

# WAAM-Knoten im Stahlhochbau

Vom  
Fachbereich 13 - Bau und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades einer  
Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)  
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

**Maren Erven, M.Sc.**  
aus Frankfurt am Main

Referent:

Korreferent:

Tag der Einreichung:

Tag der mündlichen Prüfung:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack

15. April 2024

17. Juni 2024

Darmstadt 2024

D 17

Erven, Maren: WAAM-Knoten im Stahlhochbau  
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024

Tag der Einreichung: 15.04.2024

Tag der mündlichen Prüfung: 17.06.2024

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-278997

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/27899>

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

---

## KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit untersucht, wie das Verfahren Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) zur Herstellung von individualisierten Knotenstrukturen für den Stahlhochbau genutzt und die Tragfähigkeit der gedruckten Strukturen sichergestellt werden kann. Hierzu werden einerseits etabliertes Wissen zum konventionellen Lichtbogenschweißen und andererseits aktuelle Forschungsergebnisse zum WAAM analysiert und Randbedingungen für die Herstellung festgelegt. Auf Grundlage eines festgelegten Parametersatzes wurden Probekörper hergestellt und das Materialverhalten mit Zugversuchen untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf den Auswirkungen des Slicingansatzes – Belastungsrichtung, Bahnanzahl, Auskragungen und Kreuzungsstellen. Die Ergebnisse werden in ein Materialmodell für die finite Elemente Berechnung überführt. Weiterhin finden grundlegende Untersuchungen zu Lochleibungsverhalten und T-Stummelverhalten in WAAM-Schraubenverbindungen statt, welche mit Forschungsergebnissen anderer Institute verglichen werden. Die Erkenntnisse werden in Randbedingungen zum Entwurf von WAAM-Stahlbauknoten gebündelt und verschiedene Ansätze zum Entwurf vorgestellt. Der Ansatz des parametrisierten Knotenentwurfs wird weiterhin beispielhaft durchgeführt, der Knoten wird hergestellt, in einem zerstörenden Traglastversuch getestet und mit dem erstellten Materialmodell nachmodelliert. Zum Schluss werden Möglichkeiten zum Nachweis aufgezeigt und Ergebnisse in dem Kontext der Gegenwart und Zukunft bewertet.



---

## ABSTRACT

This thesis investigates how the Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process can be used for the production of individualized node structures for steel construction and how the load-bearing capacity of the printed structures can be ensured. It involves analysing established knowledge of conventional arc welding and current research findings on WAAM. Furthermore boundary conditions for production are defined. Based on a defined parameter set, test specimens were manufactured and the material behaviour is examined through tensile tests. The focus is on the effects of the slicing approach - load direction, number of paths, overhangs and intersections. The results are incorporated into a material model for finite element analysis. Furthermore, fundamental investigations into the behaviour under double shear and the T-stub behaviour in WAAM bolted connections are conducted, which are compared with research results from other institutes. The findings are consolidated into boundary conditions for the design of WAAM steel construction nodes and various design approaches are presented. The approach of parametrized node design is further exemplified, the node is manufactured, tested in a destructive load test and modelled using the created material model. Finally, verification options are discussed, and results are assessed in the context of both the present and future.



---

# INHALTSVERZEICHNIS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Symbole und Abkürzungen</b>   | <b>xi</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivation . . . . .   | 1         |
| 1.2 Stand der Forschung . . . . .  | 2         |
| 1.2.1 WAAM im Bauwesen . . . . .   | 3         |
| 1.2.2 Additiv gefertigte Knotenstrukturen . . . . .                            | 4         |
| 1.2.3 Nachweise des Tragverhaltens von WAAM-Bauteilen . . . . .                | 5         |
| 1.3 Zielsetzung / Forschungsfrage . . . . .                                    | 6         |
| 1.4 Methodik . . . . .   | 7         |
| 1.5 Aufbau der Arbeit . . . . .  | 8         |
| <b>2 Grundlagen</b>  | <b>11</b> |
| 2.1 Additive Fertigung . . . . .   | 11        |
| 2.1.1 Verfahren . . . . .  | 11        |
| 2.1.2 Slicing . . . . .  | 12        |
| 2.1.3 Programmierung . . . . .   | 14        |
| 2.2 Optimierung . . . . .  | 15        |
| 2.2.1 Grundlagen der Optimierung . . . . .                                     | 15        |
| 2.2.2 Strukturoptimierung . . . . .  | 16        |
| 2.2.3 Topologieoptimierung . . . . .   | 16        |
| 2.3 Schweißtechnik . . . . .   | 18        |
| 2.3.1 MSG-Schweißen . . . . .  | 18        |
| 2.3.2 Lichtbogen . . . . .   | 18        |
| 2.3.3 Schutzgase . . . . .   | 21        |
| 2.3.4 Schweißlichtbogenarten . . . . .   | 21        |
| 2.3.5 CMT-Prozess . . . . .  | 23        |
| 2.3.6 Schweißprozessparameter . . . . .  | 24        |
| 2.4 Metallurgie . . . . .  | 26        |
| 2.4.1 Elementarzellen . . . . .  | 26        |
| 2.4.2 Gitterbaufehler . . . . .  | 26        |
| 2.4.3 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm . . . . .                                     | 27        |
| 2.4.4 Umwandlungsvorgänge . . . . .  | 28        |
| 2.5 Anforderungen an Stahlerzeugnisse . . . . .                                | 29        |
| 2.5.1 Zugversuch . . . . .   | 29        |
| 2.5.2 Bemessungswerte . . . . .  | 31        |
| 2.5.3 Ermittlung von Bemessungswerten nach DIN EN 1990 (2021) Anhang D . . . . | 32        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>Analyse der Randbedingungen für additiv gefertigte Strukturen</b>      | <b>33</b> |
| 3.1      | Slicing . . . . .   | 33        |
| 3.1.1    | Nahtgeometrie . . . . .   | 33        |
| 3.1.2    | Auskragendes Schweißen . . . . .  | 37        |
| 3.1.3    | Regeln für eine erfolgreiche Bahnplanung . . . . .                        | 39        |
| 3.2      | Materialeigenschaften . . . . .   | 40        |
| 3.2.1    | Mechanische Eigenschaften aus Zugversuchen . . . . .                      | 40        |
| 3.2.2    | Härte . . . . .   | 43        |
| 3.2.3    | Eigenspannungen und Verzug . . . . .                                      | 43        |
| 3.2.4    | Korrosion . . . . .   | 43        |
| 3.3      | Prozesssteuerung . . . . .  | 44        |
| 3.3.1    | Kühlung . . . . .   | 44        |
| 3.3.2    | Oberflächenwelligkeit . . . . .   | 44        |
| 3.3.3    | Echtzeitanpassungen . . . . .   | 44        |
| 3.4      | Weitere Untersuchungen . . . . .  | 44        |
| 3.4.1    | Nachhaltigkeit . . . . .  | 44        |
| 3.4.2    | Wirtschaftlichkeit . . . . .  | 45        |
| 3.5      | Bedeutung der Forschungserkenntnisse für die vorliegende Arbeit . . . . . | 45        |
| <b>4</b> | <b>Vorstellung der WAAM-Prozessparameter</b>                              | <b>47</b> |
| 4.1      | Einflussgrößen . . . . .  | 47        |
| 4.1.1    | System . . . . .  | 48        |
| 4.1.2    | Prozesssteuerung . . . . .  | 49        |
| 4.1.3    | Schweißprozesssteuerung . . . . .   | 50        |
| 4.2      | Schweißparameteruntersuchung . . . . .                                    | 50        |
| 4.2.1    | Voruntersuchung . . . . .   | 50        |
| 4.2.2    | Untersuchung der Kennlinie CMT 1840 . . . . .                             | 52        |
| 4.2.3    | Energetische Betrachtung der Kennlinienpunkte . . . . .                   | 55        |
| 4.2.4    | Berechnung der prognostizierten Energie für eine Schweißnaht . . . . .    | 57        |
| 4.2.5    | Geometrische Betrachtung der Kennlinienpunkte . . . . .                   | 59        |
| 4.3      | Gewählte Parameter . . . . .  | 61        |
| 4.3.1    | Anforderung . . . . .   | 61        |
| 4.3.2    | Wahl . . . . .  | 61        |
| 4.3.3    | Anpassung des Schweißstarts . . . . .                                     | 62        |
| 4.3.4    | Schweißergebnis . . . . .   | 62        |
| <b>5</b> | <b>Untersuchungen zum Materialverhalten</b>                               | <b>65</b> |
| 5.1      | Versuchskonzept . . . . .   | 65        |
| 5.1.1    | Prüfumfang . . . . .  | 65        |
| 5.1.2    | Probendefinition . . . . .  | 65        |
| 5.1.3    | Durchführung der Zugversuche . . . . .                                    | 67        |
| 5.2      | Untersuchungen an senkrechten Blechen . . . . .                           | 68        |
| 5.2.1    | Probenherstellung . . . . .   | 68        |
| 5.2.2    | Zugversuche . . . . .   | 69        |
| 5.2.3    | Untersuchung des Gefüges mit Schlifren und Härtmessungen . . . . .        | 72        |
| 5.2.4    | Bewertung der Ergebnisse . . . . .  | 76        |



|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.3      | Untersuchung am auskragenden Blech . . . . .   | 76         |
| 5.3.1    | Herstellung der Proben . . . . .   | 76         |
| 5.3.2    | Zugversuch . . . . .   | 77         |
| 5.3.3    | Interpretation und Bewertung . . . . .   | 78         |
| 5.4      | Untersuchungen an Kreuzungsstellen . . . . .   | 79         |
| 5.4.1    | Untersuchte Slicingstrategien . . . . .  | 79         |
| 5.4.2    | Zugversuch . . . . .   | 80         |
| 5.4.3    | Überschlägige Untersuchung des Energieeintrags . . . . .   | 83         |
| 5.4.4    | Bewertung . . . . .  | 85         |
| 5.5      | Abbildung der Materialeigenschaften in der Finiten Elemente Simulation . . . . .                             | 85         |
| 5.5.1    | Materialmodelle . . . . .  | 85         |
| 5.5.2    | Ermittlung eines genauen Materialmodells aus den Mittelwerten . . . . .                                      | 86         |
| 5.5.3    | Anpassen des Materialmodells an die verschiedenen Bahnplanungseinflüsse . . . . .                            | 87         |
| 5.5.4    | Abbildung von Kreuzungsstellen in der Simulation . . . . .   | 88         |
| 5.6      | Zusammenfassung . . . . .  | 89         |
| <b>6</b> | <b>Untersuchungen zu additiv gefertigten Schraubverbindungen</b>   | <b>91</b>  |
| 6.1      | Untersuchungskonzept . . . . .   | 91         |
| 6.2      | Lochleibungsuntersuchungen . . . . .   | 92         |
| 6.2.1    | Versuchsplanung . . . . .  | 92         |
| 6.2.2    | Experimentelle Untersuchung . . . . .  | 93         |
| 6.3      | Untersuchungen von Schraubenverbindungen unter Zug . . . . .   | 95         |
| 6.3.1    | Probengeometrie . . . . .  | 95         |
| 6.3.2    | Experimentelle Untersuchung . . . . .  | 97         |
| 6.3.3    | Abbildung mit finiten Elementen . . . . .  | 101        |
| 6.4      | Ergebnisse anderer Forschungsgruppen . . . . .   | 104        |
| 6.4.1    | Übersicht zu Untersuchungen von Schraubenverbindungen . . . . .  | 104        |
| 6.4.2    | Vorstellung und Bewertung der Ergebnisse . . . . .   | 105        |
| 6.4.3    | Einordnung der eigenen Untersuchungen . . . . .  | 110        |
| 6.5      | Zusammenfassung . . . . .  | 111        |
| <b>7</b> | <b>Entwurf von WAAM-Knotenstrukturen</b>   | <b>113</b> |
| 7.1      | Komplexität von Stahlbauknoten . . . . .   | 113        |
| 7.1.1    | Einflussgebiete der Komplexität . . . . .  | 113        |
| 7.1.2    | Beurteilung der Komplexität . . . . .  | 114        |
| 7.1.3    | Untersuchte geometrische Komplexitätsstufen . . . . .  | 114        |
| 7.2      | Formfindung durch Topologieoptimierung . . . . .   | 115        |
| 7.2.1    | Randbedingungen . . . . .  | 115        |
| 7.2.2    | Vorgehen . . . . .   | 118        |
| 7.2.3    | Knoten-Optimierung für höhere geometrische Komplexitätsstufen . . . . .                                      | 120        |
| 7.3      | Parametrisierter Knotenentwurf auf Grundlage von Optimierungsergebnissen mit Extrusionsrestriktion . . . . . | 126        |
| 7.3.1    | Ausgangssystem niedriger geometrischer Komplexität . . . . .   | 126        |
| 7.3.2    | Untersuchte Lastfälle und Optimierungsergebnisse . . . . .   | 126        |
| 7.3.3    | Erste statische Beurteilung . . . . .  | 127        |
| 7.3.4    | Parametrisierung . . . . .   | 128        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>8</b>  | <b>Untersuchungen zur Tragfähigkeit gedruckter WAAM-Knoten</b>             | <b>131</b> |
| 8.1       | Versuchsplanung . . . . .  | 131        |
| 8.1.1     | Randbedingungen . . . . .  | 131        |
| 8.1.2     | Festlegungen . . . . .   | 131        |
| 8.2       | Ermittlung und Fertigung des Prüfbauteils . . . . .                        | 132        |
| 8.2.1     | Knotenentwurf/druck . . . . .  | 132        |
| 8.2.2     | Slicingstrategie . . . . .   | 133        |
| 8.2.3     | Druck des Knotens . . . . .  | 134        |
| 8.3       | Versuchsdurchführung . . . . .   | 137        |
| 8.3.1     | Vorbereitung . . . . .   | 137        |
| 8.3.2     | Versuchsaufbau . . . . .   | 138        |
| 8.3.3     | Versuchsdurchführung . . . . .   | 139        |
| 8.3.4     | Auswertung . . . . .   | 142        |
| 8.4       | Berechnung mit Finiten Elementen . . . . .                                 | 144        |
| 8.4.1     | Modellierung . . . . .   | 144        |
| 8.4.2     | Vergleich von Versuch und Simulation . . . . .                             | 145        |
| 8.5       | Möglicher Nachweis des Knotenbauteils . . . . .                            | 146        |
| 8.5.1     | Vereinfachung des Modells . . . . .  | 146        |
| 8.5.2     | Verschiedene Ansätze zum Nachweis . . . . .                                | 146        |
| 8.5.3     | Steigerung der Tragfähigkeit . . . . .                                     | 150        |
| 8.6       | Zusammenfassung . . . . .  | 151        |
| <b>9</b>  | <b>Bedeutung, Potentiale und Vision</b>                                    | <b>153</b> |
| 9.1       | Empfehlungen für den Entwurf und den Nachweis von Stahlbauknoten . . . . . | 153        |
| 9.1.1     | Darstellung des Workflows . . . . .  | 153        |
| 9.1.2     | Ermittlung der Geometrie . . . . .   | 154        |
| 9.1.3     | Fertigungsstrategie / Slicingstrategie . . . . .                           | 154        |
| 9.1.4     | Ermittlung der Materialeigenschaften . . . . .                             | 155        |
| 9.1.5     | Fertigung des Bauteils . . . . .   | 155        |
| 9.1.6     | Simulation . . . . .   | 155        |
| 9.2       | Regelwerke, Normung, Zulassung . . . . .                                   | 156        |
| 9.2.1     | Verwendung des vorgestellten Parametersatzes . . . . .                     | 156        |
| 9.2.2     | Übertragung auf weitere Parametersätze . . . . .                           | 157        |
| 9.2.3     | Datenblatt zur Qualifizierung von Parametersätzen . . . . .                | 158        |
| 9.3       | Ressourcenschonung . . . . .   | 158        |
| 9.3.1     | Durch Wiederverwendung . . . . .   | 158        |
| 9.3.2     | Durch Bestandsertüchtigung . . . . .                                       | 159        |
| 9.3.3     | Durch Multimaterialität . . . . .  | 159        |
| 9.4       | Digitalisierung und Automatisierung . . . . .                              | 159        |
| 9.4.1     | Verringerung des Fachkräftebedarfs . . . . .                               | 159        |
| 9.4.2     | Digitaler Zwilling – Automatisierte Bauteilsimulation . . . . .            | 160        |
| 9.5       | Zusammenfassung . . . . .  | 160        |
| <b>10</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>161</b> |
| 10.1      | Zusammenfassung . . . . .  | 161        |
| 10.2      | Ausblick . . . . .   | 162        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Literatur</b>  | <b>165</b> |
| <b>A Ergebnisse zu Materialuntersuchungen anderer Forschungseinrichtungen</b> | <b>A-1</b> |
| <b>B Weitere Ausführungen, Bilder und Tabellen zu Kapitel 5</b>               | <b>B-1</b> |
| B.1 Senkrechte Bleche . . . . .   | B-1        |
| B.1.1 Proben vor dem Versuch . . . . .  | B-1        |
| B.1.2 Proben nach dem Versuch . . . . .                                       | B-2        |
| B.1.3 Kennwerte . . . . .   | B-3        |
| B.1.4 Übersicht Schliffe . . . . .  | B-4        |
| B.2 Kreuzproben . . . . .   | B-6        |
| B.2.1 Proben vor dem Versuch . . . . .  | B-6        |
| B.2.2 Proben nach dem Versuch . . . . .                                       | B-7        |
| B.2.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen . . . . .                                | B-8        |
| B.2.4 Kennwerte . . . . .   | B-9        |
| B.3 FE . . . . .  | B-10       |
| B.3.1 FE Sekantenzüge . . . . .   | B-10       |
| B.3.2 FE Anpassung an Bahnanzahl und Belastungsrichtung . . . . .             | B-11       |
| <b>C Weitere Ausführungen, Bilder und Tabellen zu Kapitel 6</b>               | <b>C-1</b> |
| C.1 Last-Verformungs-Kurven Lochleibungsuntersuchungen . . . . .              | C-1        |
| C.2 Probekörper Lochleibungsuntersuchungen . . . . .                          | C-2        |
| <b>D Weitere Ausführungen, Bilder und Tabellen zu Kapitel 8</b>               | <b>D-1</b> |
| D.1 Robotercode . . . . .   | D-1        |
| D.1.1 Programmkopf . . . . .  | D-1        |
| D.1.2 Definition der Routine <i>Punkte_initialisieren</i> . . . . .           | D-1        |
| D.1.3 Definition der Routine <i>Punkte_aktualisieren</i> . . . . .            | D-2        |
| D.1.4 Programm . . . . .  | D-3        |
| D.1.5 Case-Befehle für die 1 - 12. Lage . . . . .                             | D-4        |
| D.2 Aufnahmen der Lagen beim Druck . . . . .                                  | D-10       |



---

# SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

## Abkürzungen

|        |  |
|--------|--|
| AM     | Additive Manufacturing<br>(Deutsch: Additive Fertigung)  |
| ANN    | Künstliches Neuronales Netz<br>(Englisch: Artificial Neuronal Network)                         |
| B      | Bearing  |
| BJT    | Freistrah-Bindemittelauftrag<br>(Englisch: Binder Jetting)                                     |
| BS     | Block-Shear  |
| CAD    | Computer Aided Design  |
| CB     | Curl-Bearing   |
| CMT    | Cold Metal Transfer  |
| CNC    | Computerized Numerical Control   |
| CTWD   | Freies Drahtelektrodenende<br>(Englisch: Contact Tip to Work Distance)                         |
| DED    | Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringungen<br>(Englisch: Directed Energy Deposition) |
| DIC    | Digital Image Correlation  |
| DMS    | Dehn-Mess-Streifen   |
| E-BOM  | Enhanced Bead Overlapping Model  |
| EKS    | Eisen-Kohlenstoff-Schaubild  |
| ES     | End-Splitting  |
| FE     | Finite Elemente  |
| FOM    | Flat-top Overlapping Model   |
| G-Code | Geometric Code   |
| IB     | Incidental-Bearing   |
| LPBF   | Pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen<br>(Englisch: Laser Powder Bed Fusion)                |
| LT     | Local-Tearing  |
| MAG    | Metall-Aktiv-Gas   |
| MEX    | Material Extrusion   |

|      |  |
|------|--|
| MIG  | Metall-Inert-Gas   |
| MJT  | Freistrahlmaterialauftrag<br>(Englisch: Material Jetting)              |
| MMA  | Method of Moving Asymptotes  |
| MSG  | Metall-Schutzgas   |
| NS   | Net-Shear  |
| OC   | Optimality Criteria  |
| PBF  | Pulverbettbasiertes Schmelzen<br>(Englisch: Powder Bed Fusion)         |
| PIP  | Profilometry-based Indentation Plastometry                             |
| SCP  | Sequential Complex Programming   |
| SHL  | Schichtlaminierung<br>(Englisch: Sheet Lamination)                     |
| SIMP | Solid Isotropic Material Penalization                                  |
| SLM  | Selektives Laser Schmelzen<br>(Englisch: Selective Laser Melting)      |
| SO   | Shear-Out  |
| TB   | Tilt-Bearing   |
| TOM  | Tangent Overlapping Model  |
| TS   | Schweißgeschwindigkeit<br>(Englisch: Travel Speed)                     |
| VPP  | Badbasierte Photopolymerisation<br>(Englisch: Vat Photopolymerization) |
| WAAM | Wire Arc Additive Manufacturing  |
| WEZ  | Wärme-Einfluss-Zone  |
| WFS  | Drahtvorschubgeschwindigkeit<br>(Englisch: Wire Feed Speed)            |
| WIG  | Wolfram-Inert-Gas  |
| ZTU  | Zeit-Temperatur-Umwandlung   |

## Formelzeichen, Symbole, Buchstaben

|               |   |
|---------------|---|
| $\alpha$      | Wärmeausdehnungskoeffizient   |
| $\alpha_i$    | Parameter für die Knotenbeschreibung: Winkel des Steges[i] zur x-Achse des Koordinatensystems |
| $\bar{f}_u$   | Mittelwert der Zugfestigkeit  |
| $\bar{f}_y$   | Mittelwert der Streckgrenze   |
| $\nu$         | Poissonzahl   |
| $\sigma$      | Spannung  |
| $\varepsilon$ | Dehnung   |

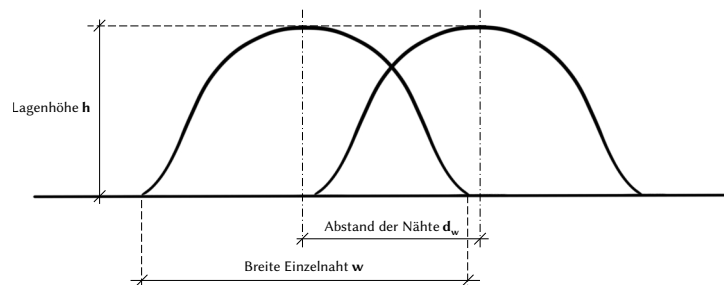
---

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\varepsilon_u$ | Bruchdehnung   |
| $\varepsilon_y$ | elastische Grenzdehnung  |
| $A$             | Bruchdehnung   |
| $A_G$           | Gleichmaßdehnung   |
| $A_t$           | totale Bruchdehnung  |
| $A_{Gt}$        | totale Gleichmaßdehnung  |
| $b$             | Breite   |
| $C$             | mittlere Nachgiebigkeit  |
| $d$             | Schraubendurchmesser   |
| $d_0$           | Durchmesser des Schraubenlochs   |
| $d_0$           | Durchmesser einer Rundprobe  |
| $d_w$           | Abstand der Schweißnähte untereinander   |
| $E$             | Elastizitätsmodul  |
| $e_1$           | Randabstand in Krafrichtung  |
| $e_2$           | Randabstand senkrecht zur Krafrichtung   |
| $E_S$           | Streckenenergie  |
| $E_{cycle}$     | Energieeintrag je Cycle  |
| $E_{naht}$      | Energie in der Schweißnaht   |
| $f(x)$          | Zielfunktion   |
| $f_u$           | Zugfestigkeit  |
| $f_y$           | Streckgrenze   |
| $f_{u,k}$       | charakteristische Zugfestigkeit  |
| $f_{y,k}$       | charakteristische Streckgrenze   |
| $g(x)$          | Ungleichheitsrestriktion   |
| $G$             | Schubmodul   |
| $h(x)$          | Gleichheitsrestriktion   |
| $k_n$           | Fraktilenfaktor  |
| $l$             | Schweißnahtlänge   |
| $L_0$           | Messlänge einer Zugprobe   |
| $L_0$           | Parallele Messlänge  |
| $l_{10}$        | Parameter für die Knotenbeschreibung: Abstand der Punkte Im zum Mittelpunkt für $z = 0$          |
| $l_{20}$        | Parameter für die Knotenbeschreibung: Abstand der Stirnseiten zum Mittelpunkt für $z = 0$        |
| $l_{grenz}$     | Parameter für die Knotenbeschreibung: kleinstmögliche Länge $l_{20}$ für einen bestimmten Winkel |
| $m_y$           | Mittelwert   |
| $m_1$           | Parameter für die Knotenbeschreibung: Steigung des inneren Rechtecks                             |
| $m_2$           | Parameter für die Knotenbeschreibung: Steigung der Stirnplatten                                  |

---

|                |   |
|----------------|---|
| $n$            | Cycleanzahl   |
| $n_{cycle}$    | Anzahl der Cycle  |
| $p$            | Penalty Factor  |
| $R_m$          | Zugfestigkeit   |
| $R_{eH}$       | Obere Streckgrenze  |
| $R_{eL}$       | Untere Streckgrenze   |
| $S_0$          | Querschnittsfläche einer Flachprobe   |
| $s_y$          | Standardabweichung  |
| $t$            | Schweißdauer  |
| $t_c$          | Zeit für einen Cycle  |
| $t_p$          | Pausenzeit  |
| $t_u$          | Spannungsvorlaufzeit  |
| $t_{8/5}$      | Abkühlzeit – Zeit, die das Schweißgut benötigt, um von 800 °C auf 500 °C abzukühlen |
| $t_{ignition}$ | zusätzliche Zeit für Zündung des Steps  |
| $t_{step}$     | Schweißdauer eines Steps  |
| $V$            | Volumen   |
| $V_0$          | Ausgangsvolumen   |
| $V_x$          | Varianz   |
| $w$            | Schweißnahtbreite   |
| $x$            | Designvariable  |
| $x_i$          | DichtevARIABLE  |
| $X_k$          | charakteristischer Wert   |
| $X_n$          | Nennwert  |
| $Z$            | Brucheinschnürung   |

## Abmessungen

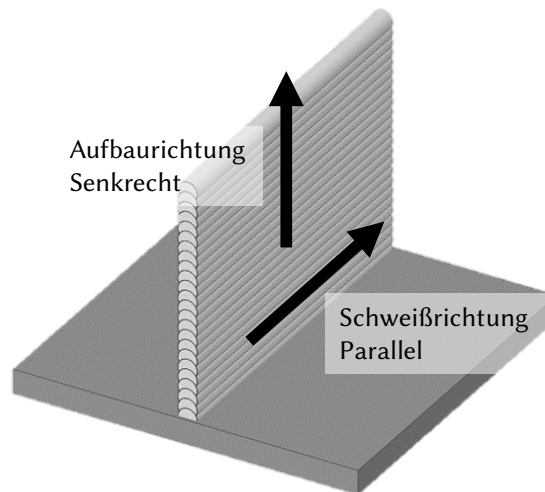


**Abbildung 1:** Bezeichnungen zur Bestimmung der Nahtgeometrie



## Definitionen

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Aufbaurichtung</b>      | Richtung in welcher die Lagen übereinander gelegt werden   |
| <b>Belastungsrichtung</b>  | Richtung in welcher eine Probe oder ein Bauteil belastet wird. Wird in Bezug zur Schweißrichtung mit parallel oder Senkrecht angegeben. Siehe Abb. 2 |
| <b>Einzelteilfertigung</b> | Wenn in jeder Lage die gleiche Trennung zwischen einzelnen Segmenten des Bauteils vorgesehen wird  |
| <b>Schweißrichtung</b>     | Längsrichtung der Naht bzw. die Richtung, in die sich der Schweißbrenner während des Schweißens bewegt.  |



**Abbildung 2:** Richtungsdefinition



---

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Motivation

In der heutigen Welt spüren wir die Auswirkungen unseres jahrhundertelangen rücksichtslosen Umgangs mit der Natur durch die sich häufenden Extremwetterereignisse immer deutlicher. Der Gebäude- und Bausektor hat an diesem Zustand keinen unerheblichen Beitrag geleistet. Er ist für mehr als ein Drittel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich (UNEP 2020; UNEP 2022; IEA 2019), verbraucht einen großen Teil der Ressourcen und verursacht selbst bei der Entstehung neuer Bauwerke große Mengen an Abfall (Umweltbundesamt 2023). Durch die weiterwachsende Bevölkerung und das allgemeine Streben nach Wohlstand wird es auch in Zukunft einen steigenden Bedarf an gebauter Umwelt geben. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, nachhaltige, alternative Gebäudekonzepte, Materialien und Formen zu untersuchen und zu entwickeln.

Die Stahlindustrie möchte ihre Produktion nun auf Wasserstoff umstellen und so einen großen Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren. Aber auch die additive Fertigung, im Volksmund unter 3-D-Druck (auch 3D-Druck) bekannt, birgt als alternative Herstellungsmethode das Potenzial, zum benötigten Wandel beizutragen. Sie ermöglicht die Herstellung neuer Strukturen, die sich dem Kraftfluss anpassen und Material einsparen, während der bei der Herstellung erzeugte Abfall auf ein Minimum reduziert wird.

Bei der additiven Herstellungsweise werden Materialien schichtweise aufgetragen, sozusagen addiert, und hierdurch die Form geschaffen, die im Idealfall nur dort Material aufweist, wo es auch wirklich benötigt wird. Die industrielle Entwicklung der Herstellweise begann in den 1970er Jahren vor allem mit Kunststoffen, mittlerweile ist es jedoch möglich, mit nahezu jedem Material additiv zu fertigen. Die Verfahren sind hierbei von Material zu Material unterschiedlich und auch ein einziges Material lässt sich auf verschiedene Weisen additiv fertigen.

Für Stahlstrukturen im Bauwesen scheint das Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) ein vielversprechendes Verfahren zu sein. Im Vergleich zu anderen 3-D-Druckverfahren für Metalle ist es kostengünstig und schnell (WAAMMAT 2019). Da es sich um ein Lichtbogenschweißverfahren handelt, hat es das Potential ohne große Umstellung im Stahlbau eingesetzt zu werden.

Neben dem ressourcenschonenden Aspekt kann das WAAM auch perspektivisch dem Fachkräftemangel entgegenwirken. Die additive Fertigung erfolgt in einem automatisierten Prozess, der durch Portalsysteme oder Roboter ausgeführt wird. Eine Fachkraft kann mehrere Maschinen gleichzeitig bedienen und somit mehrere Bauteile gleichzeitig fertigen bzw. die Fertigung dieser beaufsichtigen.

Allerdings muss der Stahl, der im WAAM in Drahtform vorliegt, zur Fertigung aufgeschmolzen werden. Einerseits ist dies nötig, um den Draht formbar zu machen, andererseits muss auch eine Vermischung mit dem Grundmaterial bzw. im additiven Fall den vorherigen Lagen erzeugt und eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt werden. Zwar sind die Schweißprozesse, die zur additiven Fertigung genutzt werden, vergleichsweise energiearm, um Abtropfen zu verhindern, aber auch um bessere Materialeigenschaften zu gewährleisten, dennoch ist der Energieverbrauch nicht von der Hand zu weisen. Vergleicht

man daher den additiven Fertigungsprozess mit dem konventionellen, ist für das gleiche Bauteil mit einem deutlich höheren Energieverbrauch zu rechnen.

Mit der additiven Fertigung ist es jedoch möglich, den Materialverbrauch deutlich zu verringern, da Material nur da angebracht wird, wo es benötigt wird. So wird neben Energie auch Verschnitt eingespart. Durch die hohe Gestaltungsfreiheit können neue Strukturen hergestellt werden, die sich dem Kraftfluss besser anpassen und somit materialeffizienter sind. Auch der zweite im Vergleich zur konventionellen Herstellung gewichtige Nachteil der niedrigen Fertigungsgeschwindigkeit wird hierdurch ausgeglichen. Materialsparende Konstruktionen sind in der konventionellen Weise häufig nur mit einem deutlich erhöhten Arbeits- und dementsprechend erhöhten Zeitaufwand herstellbar.

Hieraus ergibt sich, dass der 3-D-Druck nicht als Ersatz, sondern als Erweiterung der konventionellen Herstellweisen gesehen, große Vorteile bringen kann. Sein Potential zeigt sich nicht in der Fertigung von großvolumigen Bauteilen, die bereits jetzt mit einem hohen Automatisierungsgrad hergestellt werden – wie zum Beispiel Walzprofile –, sondern in kleineren, geometrisch komplexen und individualisierten Bauteilen.

Obwohl sie im Vergleich zum Gesamtvolumen einer Tragstruktur eher einen kleinen Anteil bilden, sind die Verbindungen zwischen den Bauteilen in Stahlkonstruktionen ein wichtiger Leistungs- und Aufwandsfaktor einer Gebäudestruktur. An diesen Stellen ist der Planungs- und Konstruktionsaufwand einerseits erhöht und andererseits sind diese Stellen entscheidend für die Aufbaugeschwindigkeit des gesamten Bauwerks. Deshalb steht für Tragwerksplaner, Bauunternehmer und Monteure die Einfachheit dieser Verbindungspunkte im Vordergrund. Dies steht jedoch oft im Konflikt mit dem Wunsch von Architekten und Bauherren nach ungewöhnlichen, außergewöhnlichen Formen der Tragstruktur einerseits und der Materialreduktion andererseits.

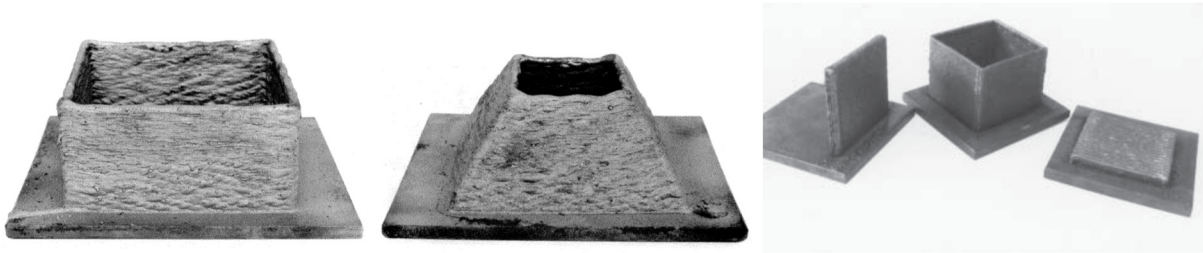
Mit der additiven Fertigung und insbesondere mit WAAM kann es gelingen, beide Wünsche zu vereinen: eine einfache Montage und Vorbereitung der übrigen Bauteile gewährleisten und gleichzeitig ungewöhnliche Tragwerke schaffen. Die Komplexität kann von der Gesamtstruktur auf die wenigen 3D-gedruckten Knotenpunkte verlagert werden. Diese Knotenstrukturen können hierbei individuell an ihre geometrische Einbausituation sowie an die an dieser Stelle wirkenden Lasten angepasst werden.

## 1.2 Stand der Forschung

Bereits in den 1920er Jahren gab es durch Baker ein Patent auf ein Verfahren, mit dem es möglich ist, durch mehrlagiges Aufeinanderschweißen dekorative Strukturen zu schaffen (Baker R. 1925). Ab den 70er Jahren lassen sich erste Ansätze zum WAAM in industrieller Anwendung finden. So werden beispielsweise bei Thyssen in dieser Zeit mit dem formgebenden Schweißen große Behälter von bis zu 80 t hergestellt (Dilthey 2006). Auch der Name Shape Welding wird genutzt. In den 90ern zeigen Dickens et al. (1992) mit ihrem „3-D Welding“ genannten Prozess bereits gute Ergebnisse bei der Fertigung von unlegiertem Stahl (siehe Abb. 1.1). In Indien wird ab Beginn der 2000er Jahre unter dem Namen „hybrid layered manufacturing (HLM)“ dazu geforscht (Karunakaran et al. 2004).

In den 2010er Jahren stieg das Forschungsinteresse rapide an. Als Vorreiter in der Erforschung des neuen Verfahrens sind hierbei vor allem die Universitäten Cranfield in Großbritannien (F. Wang et al. 2013), die Universität of Wollongong in Australien (D. Ding et al. 2014) und die Huazhong Universität Wuhan (Jin et al. 2013) sowie die Beihang Universität Peking in China (X. Li et al. 2015) zu nennen. In den nachfolgenden Jahren wurde das Forschungsinteresse auf Grund des Potentials immer größer,

sodass sich nun nahezu auf der ganzen Welt Forschungsinstitute mit dem WAAM befassen.



**Abbildung 1.1:** Ergebnisse des 3-D Welding Prozesses (links und mitte: Dickens et al. (1992); rechts: Spencer et al. (1998))

### 1.2.1 WAAM im Bauwesen

Wurden in den anfänglichen Jahren vor allem Prozessanpassungen, Druckstrategien, Materialverhalten und Anwendungen im Maschinenbau - hier vor allem in der Flugzeugtechnik - betrachtet, wird seit 2018 auch immer stärker die Anwendung im Bauwesen untersucht. Mit dem WAAM kann jedes schweißbare Material verarbeitet werden, die meisten Untersuchungen finden an den verbreitetsten Legierungen von Titan, Aluminium, Stahl und Edelstahl statt, aber auch spezielle Materialien und mehrere Materialien in einer Struktur werden verwendet, um den Prozess möglicherweise zu verbessern.

Im Folgenden werden verschiedene auf die Anwendung im Stahlbau bezogene Projekte vorgestellt. Darüber hinaus gibt es noch unzählige Untersuchungen zum WAAM-Prozess selbst, zu dessen Optimierung durch Anpassungen in vielfältiger Art oder zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge anhand von Gefügeuntersuchungen und Simulationen. Auf die für diese Arbeit wichtigsten Erkenntnisse wird in Kapitel 3 eingegangen.

Als Vorreiter für die Verwendung von WAAM im Bauwesen ist das niederländische Unternehmen MX3D zu nennen. Dieses hat eine 12 m lange Brücke mit dem WAAM hergestellt, welche 2021 ihren Platz im öffentlichen Raum als Überführung über eine Amsterdamer Gracht gefunden hat. Ende 2023 wurde sie wieder abgebaut. Auch hat das Unternehmen eine Gitterstütze und in Zusammenarbeit mit dem japanischen Bauunternehmen Takenaka Knotenstrukturen entwickelt und gedruckt. Für die ESA entwickelt es eine Dachkonstruktion (MX3D 2024c).

In Zusammenarbeit mit vielen Forschungseinrichtungen wurden die durch MX3D gedruckten Strukturen auch wissenschaftlich untersucht. So wurde die Brücke durch das London Imperial College getestet und simuliert (Gardner et al. 2020; Kyvelou et al. 2022) und während ihrer Lebenszeit durch die Zusammenarbeit mit der University of Twente sensorisch überwacht, um so das Bauteilverhalten des additiv gefertigten Stücks über die Nutzungsdauer bewerten zu können.

In Zusammenarbeit mit der Universität Bologna wurde die zuvor genannte Gitterstütze sowie das Materialverhalten dieser näher untersucht (Laghi et al. 2020a) und in diesem Zusammenhang außerdem bereits erste Empfehlungen für Teilsicherheitsbeiwerte und den Umgang mit Imperfektionen, die durch das Fertigungsverfahren entstehen, gemacht (Laghi et al. 2020b; Laghi et al. 2021). MX3D hat für die verschiedenen Strukturen vor allem Edelstahl verwendet. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf Grund des unterschiedlichen Materialverhaltens nicht direkt auf unlegierten Stahl, wie er für den Stahlbau im großen Maß eingesetzt wird, übertragen werden.

Ebenfalls in Zusammenarbeit mit MX3D sind an der TU Delft verschiedene Abschlussarbeiten entstanden, die sich mit der Anwendung von additiv gefertigten Strukturen in Stahlbau befassen (Kotteman 2020; van Bolderen 2017). Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit dem Fassadenbauer Jansen additiv gefertigte Fassadenknoten entwickelt (Jansen 2024).

Weitere Untersuchungen zum WAAM im Bauwesen werden durch den Sonderforschungsbereich SFB/TRR277 der Universitäten TU München und TU Braunschweig getätigt (Additive Manufacturing in Construction 2024b). Hierbei beschäftigt sich das Projekt A 02 mit WAAM als Bewehrung und das Projekt A 07 (Additive Manufacturing in Construction 2024a) mit dem WAAM zur Herstellung von komplexen Stahlknoten (Müller et al. 2019; Hensel et al. 2022; Müller et al. 2022). Das letztgenannte Projekt hat sich zu Beginn vor allem mit dem Finden eines Topologieoptimierungsalgorithmus beschäftigt, welcher Besonderheiten des WAAM berücksichtigen kann. Auch die Universität Bologna hat sich mit Topologieoptimierung und wie diese besser an den Prozess angepasst werden kann beschäftigt (Bruggi et al. 2021; Laghi et al. 2023).

Das Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau forscht als Maschinenbaueinrichtung vor allem am Schweißprozess und dessen Optimierung selbst. In einem Forschungsprojekt mit der Universität Weimar (Reimann et al. 2021) sowie einem weiteren Forschungsprojekt mit der TU Darmstadt (Bergmann et al. 2020) hat es jedoch auch Anwendungen im Bauwesen untersucht.

Mittlerweile hat das Imperial College die Untersuchungen auch auf unlegierten Stahl und andere Hersteller neben MX3D ausgeweitet. Hier wurden zum einen Materialuntersuchungen gemacht (Huang et al. 2022a; Kyvelou et al. 2020), zum anderen Bauteile wie additiv gefertigte Hohlstützen aus Edelstahl (Huang et al. 2022b; Huang et al. 2022c; Kyvelou et al. 2021; Zhang et al. 2021) und geschraubte Verbindungen aus Stahl (Guo et al. 2022a; Guo et al. 2023b; Guo et al. 2023a) untersucht und es gibt weitere Ansätze in Richtung optimierter Strukturen (Gardner 2023).

An der TU Darmstadt werden additiv gefertigte Trägerverstärkungen und Anschlussbauteile (Feucht 2023; Lange et al. 2020), neuartige Stützen (Waldschmitt et al. 2022) und die Verstärkung von dünnen Blechen durch das WAAM (Borg Costanzi und Knaack 2022; Borg Costanzi 2023; Grebner und Lange 2023) untersucht. Außerdem wurde hier mit Hilfe des WAAM im Jahr 2019 eine Brücke vor Ort über einen Teich gedruckt und hiermit die Vorteile des WAAM (Feucht et al. 2022) gegenüber anderen Herstellverfahren bewiesen. An der ETH Zürich werden Gitterstrukturen durch das vollautomatisierte Aneinanderschweißen von Stahlrundstäben in verschiedenen Positionen hergestellt und untersucht (Silvestru et al. 2021).

Ramonell und Chacón (2021) zeigen die Möglichkeit auf, WAAM-Stahlstrukturen zu entwerfen, die Erdbebenlasten besser aufnehmen können. Außerdem gibt es Untersuchungen dazu, die freie Formgestaltung, die das WAAM ermöglicht, zu nutzen und Stützen zu entwerfen, die durch ihre mehrfach gewellte Form deutlich stabiler sein sollen (J. Wang et al. 2021; Zhang et al. 2022). Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Abureden et al. (2021), die additiv gefertigte Wellstegträger untersuchen. Allerdings wird hier das Verfahren nicht explizit genannt. WAAM würde sich hier jedoch durch die vergleichsweise hohe Auftragsrate anbieten.

### 1.2.2 Additiv gefertigte Knotenstrukturen

Das WAAM zeigt seine Vorteile vor allem darin, dass Strukturen Formen annehmen können, die durch die konventionelle Herstellung nicht denkbar sind. Ein Nachteil ist jedoch die Fertigungszeit, die länger als für typische gewalzte Stahlelemente ist und diese als AM-Bauteil dadurch viel teurer machen würde.

Stahlbauknoten bezeichnen Stellen im Tragwerk, an denen mehrere Bauteile (häufig Walzträger) miteinander verbunden werden. Es gibt sie in unterschiedlichen Komplexitätsstufen. Vor allem, wenn viele Bauteile an einer Stelle zusammenlaufen, ergibt sich neben dem hohen Planungsaufwand ein erhöhter Aufwand in der Fertigung und Montage, bedingt durch häufig nicht standardisierte Blechgeometrien und einer Vielzahl an Schweißnähten. Zusätzlich wird an diesen Stellen häufig mehr Material verbraucht als statisch notwendig, da die Fertigung nicht anders zu realisieren wäre bzw. das eingesparte Material lediglich als Verschnitt endet. Hier kann das WAAM eine Alternative bieten. Das Potential, das die additive Fertigung an solchen Knotenstellen besitzt, wurde schon in verschiedenen Projekten untersucht und herausgearbeitet.

Galjaard et al. haben bereits 2015 einen additiv gefertigten Knoten entworfen, der das Herzstück einer Tensegrity-Struktur bildet. Dieser Edelstahlknoten wurde mit Hilfe des additiven Verfahrens Selektives-Laser-Schmelzen (SLM) gefertigt. Auf den Erkenntnissen aufbauend untersuchen Abdelwahab und Tsavdaridis (2019) die Möglichkeit, wie mit Hilfe von Topologieoptimierung und additiver Fertigung Knoten für Gitterschalen erstellt werden können. Die Knoten werden ebenfalls mit dem SLM gefertigt. Die Optimierung von Gitterschalenknoten untersuchen auch Seifi et al. (2018), hier liegt der Fokus weniger auf dem Material und der Herstellweise als auf der Entwicklung eines Algorithmus selbst.

Ein Stahlknoten wird in Chierici et al. (2021) und Kanyilmaz und Berto (2019) sowohl hinsichtlich der Materialeigenschaften von SLM-gefertigtem Stahl als auch hinsichtlich der Umweltauswirkungen des additiven Verfahrens untersucht. Den Knoten einer Baumstütze untersuchen H. Wang et al. (2021) hinsichtlich einer möglichen Formgebung und Einsparpotentialen mittels Topologieoptimierung und auch bezüglich des Tragverhaltens, allerdings wurden die Knoten aus Kunststoff und mit Hilfe des SLM gefertigt.

Die drei letztgenannten Knoten schließen direkt an die anschließenden Bauteile an und sehen keine trennbaren Montagestöße vor. Das Tragwerk müsste also entweder vor Ort geschweißt oder in sehr großen Stücken vorgefertigt werden.

### 1.2.3 Nachweise des Tragverhaltens von WAAM-Bauteilen

Bisher gibt es kein Verfahren oder Konzept, mit welchem die Tragfähigkeit eines WAAM gefertigten Bauteils nachgewiesen werden kann. Es gibt bereits verschiedene Ansätze.

Die Brücke von MX3D in Amsterdam (MX3D 2024a) wurde, ohne sie zu zerstören, zunächst bis zu einer bestimmten Last getestet, die Traglast selbst wurde nicht bestimmt. Vor dem letztendlichen Einbau wurde sie mit Sensoren ausgestattet, die das Verhalten der Brücke während ihrer gesamten Lebensdauer überwachen bzw. vor einem Versagen warnen sollen.

Die Knoten für den Einsatz bei Takenaka (MX3D 2024b) wurden mehrfach gedruckt und bis zu ihrem Versagen getestet, sodass für jeden einzelnen Knotentyp das Tragverhalten nachvollzogen werden kann. Allerdings kann damit nicht sichergestellt werden, dass während des Herstellprozess des am Ende in die Struktur eingesetzten Knotens kein gravierender Fehler passiert ist, der die Tragfähigkeit des Bauteils erheblich reduziert.

Ein weiterer Ansatz wurde im Projekt Stahlbauknoten verfolgt, hierbei sollten anhand der aufgezeichneten Prozessparameter Fehlstellen automatisch detektiert werden (Bergmann et al. 2020). Dies sollte simultan zur Fertigung geschehen, damit schon während der Fertigung eingegriffen werden kann, wenn ein gravierender Fehler geschieht. Problematisch ist hierbei allerdings die hohe Datenmenge,

die verarbeitet werden muss. Weiterhin sind zur Definition von Unregelmäßigkeiten bei einem stark schwankenden Prozess - wie dem Lichtbogenschweißen - die Auswirkungen der unterschiedlichen Unregelmäßigkeiten noch nicht umfassend erforscht, sodass bis zur Implementierung noch Zeit vergehen wird.

Sowohl eine Langzeitüberwachung als auch die Echtzeitüberwachung während des Prozesses erfordern spezielle Messtechnik und Analysesoftware. Die mehrfache Anfertigung eines individuellen Bauteils widerspricht dem Ansatz Material zu sparen.

### 1.3 Zielsetzung / Forschungsfrage

Es zeigt sich, dass es zum WAAM bereits eine Vielzahl an Forschungsergebnissen vor allem aus dem Bereich des Maschinenbaus gibt. Im Bereich des Bauwesens entwickeln sich die Forschungsinteressen gerade und der Umsetzung in die praktischen Ausführung steht die Trägheit des Marktes entgegen. Diese Trägheit rührt aus der geringen Innovationsinvestitionslust des Bauwesens. Das Bauwesen ist auf Grund der Langlebigkeit und der Größe von Bauwerken auf die Sicherheit der verwendeten Verfahren und Materialien angewiesen und daher eher innovationsscheu.

Um das WAAM zukunftsfähig zu machen, sollten diese zwei Bereiche bedient werden. Die Anlagenkosten des WAAM sind im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren zwar niedriger, allerdings stellen sie für einen Kleinunternehmer dennoch eine hohe Summe dar. Die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten sollten sich durch die gefertigten Produkte rechnen. In der additiven Fertigung und speziell im WAAM hängen die Fertigungskosten stark mit der Fertigungszeit und der herzustellenden Masse der Bauteile zusammen. Daher sollten möglichst materialsparende Bauteile gefertigt werden. Das WAAM sollte nicht als Substitution für die konventionelle Fertigung gesehen werden, sondern als chancenreiche Ergänzung betrachtet werden, mit welcher Möglichkeiten gefunden werden können, die Herstellung von Tragwerken zu verbessern und zu vereinfachen.

Diese Arbeit geht deshalb unter anderem der Frage nach, welche Art von Konstruktionen sich für die Herstellung mit dem WAAM eignen, um die Vorteile des Verfahrens effektiv nutzen zu können. Da - zumindest im derzeitigen Stadium - das Verfahrens nicht mit der konventionellen Walzherstellung mithalten kann, liegt der Fokus auf verbindenden Bauteilen, welche ausschließlich mit dem WAAM hergestellt werden. Eine Betrachtung von hybriden Bauteilen, also einer Verbindung von additiv gefertigten und Walzbauteilen, welche aus Zeit- und Kostengründen sicherlich eine interessante Verfahrensvariante darstellen, werden in der vorliegenden Arbeit explizit nicht untersucht. Die Arbeit beschäftigt sich mit Bauteilen, welche Walzbauteile verbinden und somit an den Knotenstellen dieser auftreten. Hierfür wird im Folgenden der Begriff Stahlbauknoten gewählt.

Wie zuvor angesprochen, wird die Innovationseinführung stark von dem Wunsch nach Sicherheit beschränkt. Daher muss das Tragverhalten von mit dem WAAM gefertigten Bauteilen beschreibbar und nachweisbar gemacht werden können. Es ergeben sich die Fragen: Wie verhält sich eine additiv gefertigte Stahlstruktur im Vergleich zu einer konventionellen und wie beeinflusst der Druckprozess dieses Verhalten darüber hinaus? Hieraus ergibt sich die weitere Frage: Wenn der Druckprozess das Verhalten des Materials verändert, inwiefern muss dieses Verhalten dann bereits beim Entwurf der additiv gefertigten Struktur berücksichtigt werden?



Eine weitere Frage zum Tragverhalten ergibt sich aus der Anforderung, dass es sich um ein Verbindungsbauteil handeln soll. So muss überprüft werden, ob sich Verbindungsmittel, wie Schrauben, in Verbindungen aus additiv gefertigtem Stahl genauso verhalten wie in konventionellen Verbindungen.

Wenn das Tragverhalten eines additiv gefertigten Knotens durch die Beantwortung der vorangegangenen Fragen beschreibbar gemacht wird, sollte für die baupraktische Anwendung daraufhin außerdem noch beantwortet werden, wie sich ein Nachweis der statischen Tragfähigkeit durchführen lässt.

Insgesamt lässt sich das Ziel der Arbeit in der folgenden Frage zusammenfassen: Wie muss ein Entwurfsprozess für WAAM-Stahlbauknoten aussehen, um die Vorteile dieses neuen Verfahrens zu nutzen, die notwendige statische Tragfähigkeit zu gewährleisten und diese kostengünstig nachzuweisen?

## 1.4 Methodik

Ziel ist es, einen Prozess zu finden, mit dem die Tragfähigkeit von additiv gefertigten Knoten zuverlässig beschrieben werden kann. Außerdem sollen die prozessspezifischen Charakteristika des WAAM im Entwurf der Knoten berücksichtigt werden, um einen wenig fehleranfälligen und zuverlässigen Prozess zu gewährleisten. Hierzu ist es notwendig zu wissen, welche prozessspezifischen Charakteristika die Tragfähigkeit beeinflussen und in welchem Ausmaß sie das tun. Zudem muss ermittelt werden, inwiefern dieser Einfluss in der Bewertung der Tragfähigkeit berücksichtigt werden kann und muss und inwieweit die stahlbauüblichen Nachweise verwendet werden können.

Hierzu werden zunächst vorhandene Forschungsergebnisse zum Thema WAAM gesichtet und in Bezug auf den Werkstoff unlegierten Stahl hinsichtlich Fertigungsrandbedingungen und Materialeigenschaften bewertet. Zusätzlich wird anhand von gesichertem Wissen zur Schweißtechnik der herkömmliche Lichtbogenschweißprozess analysiert. Es werden so für das WAAM wichtige Erkenntnisse ermittelt, auf welchen aufbauend das Verhalten und die Besonderheiten von gedrucktem Stahl beschrieben werden können.

Aufbauend auf ermittelten Fertigungsbedingungen wird der WAAM-Prozess praktisch untersucht. Nachdem ein geeigneter Parametersatz zur Herstellung von Strukturen gefunden ist - hierbei steht die Prozessstabilität und das Aussehen der gedruckten Struktur im Vordergrund - werden die Materialeigenschaften des gedruckten Stahls untersucht. Hierbei steht vor allem die Materialveränderung, die sich durch verschiedene Slicingeinstellungen ergibt, im Vordergrund. Die Eigenschaften werden vor allem anhand von Zugproben ermittelt. An ausgewählten Proben wird zusätzlich das Gefüge betrachtet. Die genaue Versuchsmatrix mit Begründung des Umfangs ist in Kapitel 5 zu finden. Mit Hilfe von aus der herkömmlichen Schweißtechnik bekanntem Wissen werden die verschiedenen Ergebnisse verglichen und interpretiert. Die relevanten Erkenntnisse werden in ein Finite Elemente Modell überführt.

Die in dieser Arbeit ermittelten Knotenlösungen sollen später als Anschlussbauteile und Montagestöße dienen, daher werden im Rahmen der Arbeit auch einzelne Schraubenverbindungen untersucht. Außerdem werden Erkenntnisse zu additiv gefertigten Schraubverbindungen aus der Literatur ausgewertet. Hiermit soll beurteilt werden, ob - bei bekanntem Materialverhalten des gedruckten Stahls - bekannte Nachweise verwendet werden können oder ob weitere Untersuchungen erforderlich wären. Unabhängig von der Beantwortung dieser Frage, werden keine weiteren Schraubverbindungen untersucht. Der Umfang der Schraubversuche kann Kapitel 6 entnommen werden.

Aufbauend auf den Erkenntnissen zu Materialverhalten aus Druckstrategie und dem Tragverhalten von Bauteilen mit Verbindungsmitteln kann ein Knoten entworfen werden. Hierzu werden zunächst vorhandene Stahlbauknotenausführung in der konventionellen Bauweise untersucht. Der entworfene Knoten dient als Beispielbauteil, an welchem die gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend untersucht werden können und das Verhalten simulativ vorhergesagt werden kann. Der Druckprozess wird hierzu durch eine Lagenkamera sowie durch das Aufzeichnen der Prozessvariablen überwacht. Unter Berücksichtigung möglicher Besonderheiten aus dem Druckprozess und der Erkenntnisse zu Material und Komponentenverhalten wird ein Simulationsmodell des Knotens erstellt.

Aus den Untersuchungen werden Regeln abgeleitet, wie ein additiv gefertigter Knoten entworfen und nachgewiesen werden kann.

### 1.5 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie in Abb. 1.2 zu sehen gegliedert. Zunächst werden Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit essenziell sind, aufbereitet. Hierbei wird auf Grundlegendes zu 3-D-Druck, Stahl, Schweißtechnik, Optimierung und Sicherheit im Bauwesen eingegangen.

Zum Entwurf der WAAM-Knoten ist es notwendig, Randbedingungen zu definieren. Diese kommen aus dem neuartigen Fertigungsprozess und Forschungsergebnissen hierzu. Anhand der Analyse wird definiert, was mit dem Verfahren möglich ist und was noch für die Fertigung und statische Beschreibung der Knoten untersucht werden muss.

Für die vorliegende Arbeit wurde nach vorheriger Parameteruntersuchung ein Parameterset festgelegt. Dieses und die Rahmenbedingungen, unter welchen die Fertigung der verschiedenen Probekörper erfolgt, wird im Kapitel Prozessbeschreibung dargelegt. Darauffolgend werden die Untersuchungen und Ergebnisse zu Materialverhalten und Verbindungsmitteln vorgestellt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Knotenstruktur entworfen und der Druck und die Traglastuntersuchung für einen Knoten werden beschrieben.

Hieraus werden Empfehlungen zum Vorgehen bei Entwurf und Tragfähigkeitsbestimmung von WAAM-Stahlbauknoten erarbeitet und vorgestellt. Die Arbeit schließt mit Potentialen, die die neue Herangehensweise mit sich bringt, sowie mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick für kommende Forschung.

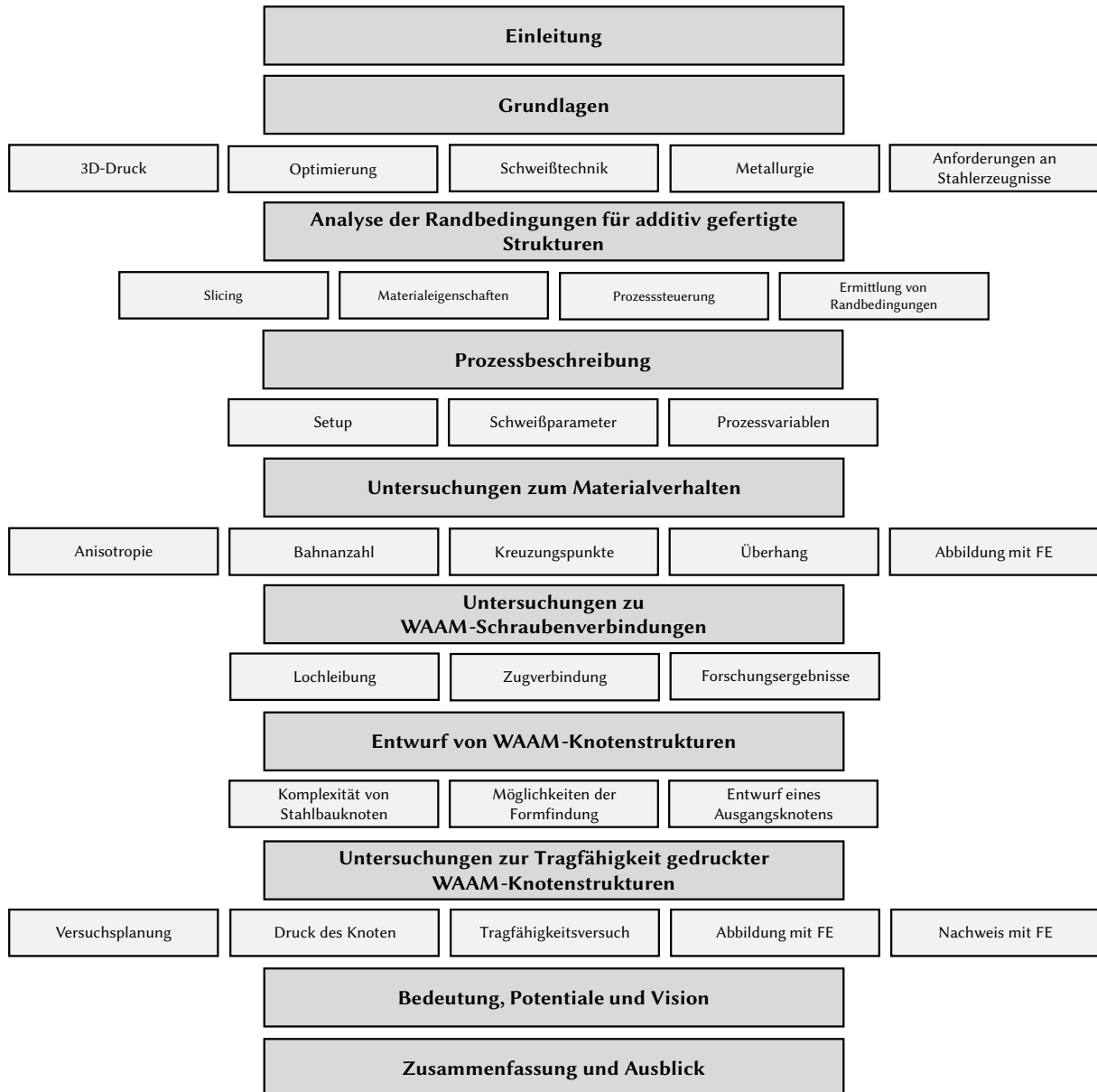


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit



---

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 Additive Fertigung

In der Umgangssprache 3-D-Druck genannt, wird mit „additiver Fertigung“ (AM, englisch: „additive manufacturing“) eine Herstellungsweise bezeichnet, die ein Bauteil durch das Zusammenfügen (Addieren) von Schichten aufbaut. Diese Bezeichnung grenzt die Art der Fertigung damit sprachlich von den traditionellen, subtraktiven Fertigungsverfahren (wie bspw. Fräsen, Drehen, Bohren...) ab. Die DIN EN ISO/ASTM 52900 (2022) enthält die folgende Definition:

„Prozess, der durch Verbinden von Material Bauteile aus 3-D-Modelldateien, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden, üblicherweise Schicht für Schicht, herstellt.“

Mit additiver Fertigung wird nicht ein spezielles Fertigungsverfahren bezeichnet, sondern eine neuartige Herstellungsweise, die in vielfältiger Art für verschiedene Materialien umgesetzt werden kann.

#### 2.1.1 Verfahren

##### Systematik

Durch die Vielzahl an Materialien und Zuständen, in welchen diese vorliegen können und die Vielzahl an Möglichkeiten, sie zu verbinden, gibt es unzählige additive Fertigungsverfahren. Teilweise beschreiben mehrere unterschiedlich benannte Verfahren ein und dasselbe. Grund hierfür kann eine andere Ausgangsaufgabenstellung der Verfahrensentwicklung oder lediglich die geografische Entfernung von unterschiedlichen Forschungs-/ Entwicklungsgruppen sein. Teilweise geben Firmen ihrer Herstellungsweise einen besonderen Namen, obwohl ein bereits bekanntes Verfahren angewendet wird.

Mittlerweile haben sich unterschiedliche Normenausschüsse gebildet, um die neuartige Herstellungsweise zu standardisieren und die verschiedenen Verfahren einzuordnen. Die wichtigsten Standards sind hierbei die DIN EN ISO/ASTM 52900 (2022), die VDI-Richtlinie VDI 3405 (2014) sowie die DIN 8580 (2022) zu Fertigungsverfahren, welche um die Fertigungsgruppe additive Fertigung ergänzt wurde. Die DIN EN ISO/ASTM 52900 (2022) unterscheidet die folgenden sieben Prozesskategorien:

- Freistrahls-Bindemittelauftrag (binder jetting, BJT),
- Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (directed energy deposition, DED),
- Materialextrusion (material extrusion, MEX),
- Freistrahls-Materialauftrag (material jetting, MJT),
- pulverbettbasiertes Schmelzen (powder bed fusion, PBF),
- Schichtlaminiert (sheet lamination, SHL) und
- badbasierte Photopolymerisation (vat photopolymerization, VPP).

### WAAM

Das Wire Arc Additive Manufacturing wird nach DIN EN ISO/ASTM 52900 (2022) klassifiziert als Materialauftrag mit gerichtetem Energieeintrag (DED-Prozess). Als DED-Prozess werden Verfahren bezeichnet, bei denen die Energie fokussiert - gerichtet - eingebracht und gleichzeitig das Material nur an dieser Stelle zugeführt wird. Beim WAAM ist der Lichtbogen die Energiequelle (DED-Arc) und der Draht das zugeführte Material. Es handelt sich um ein Verfahren, welches die bekannte Schweißtechnik verwendet, um eine Struktur durch das lagenweise Aufeinanderschweißen herzustellen. Auf die Schweißtechnik wird in Abschnitt 2.3 genauer eingegangen.

### Qualitätssicherung und Prüfung

Neben der Einordnung der Prozesse werden in der Normenfamilie DIN EN ISO/ASTM 529xx auch konkrete Anforderungen an verschiedene Prozesse oder die Ausbildung des Personals gestellt. Dies geschieht auch in den Beiblättern der VDI 3405 (2014). Weiterhin befindet sich die DIN EN ISO/ASTM 52939 (2024), welche sich mit der additiven Fertigung für das Bauwesen auseinandersetzt, derzeit im Entwurf. Eine Übersicht der verschiedenen Normen und Richtlinien zur additiven Fertigung von Metallen zeigt Tabelle 2.1. Es ist zu erkennen, dass bisher vor allem Strahlprozesse und Pulverbettverfahren geregelt sind. Im Gegensatz zu diesen vielfältigen Regelungen gibt es bisher keine Norm, die Qualitätsanforderungen an das WAAM (DED-Arc) stellt oder die Prüfung von Bauteilen regelt, die mit diesem Verfahren hergestellt wurden.

#### 2.1.2 Slicing

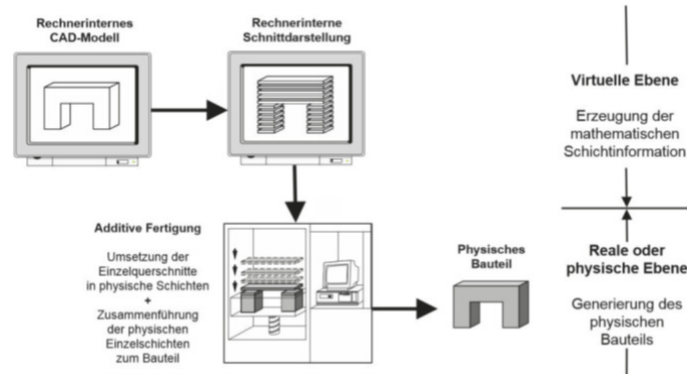
Das generelle Vorgehen in der additiven Fertigung kann in den meisten Fällen unabhängig vom Fertigungsverfahren gemäß Abb. 2.1 beschrieben werden. Bauteile werden im Schichtbauprinzip hergestellt. Ein Modell des zu fertigenden Bauteil wird in einem 3-D-CAD-Programm erstellt. Diese Geometrie wird virtuell je nach anschließendem Fertigungsverfahren in Schichten bestimmter Höhe geschnitten (gesliced). Die Informationen der einzelnen Schichten werden an die Fertigungsmaschine gesendet, welche das Bauteil entsprechend Schicht für Schicht aufbaut. Die Verbindung zwischen den Schichten weist häufig nicht die Eigenschaft auf, die innerhalb einer einzelnen Schicht vorherrscht. Weiterhin ist je nach Schichtdicke die Oberfläche des entstandenen Volumenkörpers nicht glatt, sondern stufenförmig bzw. gewellt.

Unter Slicing fällt sowohl das beschriebene Zerlegen der 3-D-Geometrie in Scheiben (englisch: Slices) als auch die genaue Planung der Pfade, auf denen die Maschine das Material innerhalb dieser Scheiben ablegt. Hierbei werden Informationen über die Reihenfolge der anzusteuernenden Koordinaten und der jeweiligen auszuführenden Aktion gegeben. Die Informationen werden in einem Programmcode an die Maschine übergeben - häufig in Form eines G-Codes. Für das erfolgreiche Slicing einer Geometrie ist die Kenntnis des Prozesses und des Prozessergebnisses (Nahtgeometrie, Materialeigenschaften, Zusammenspiel von Nähten) unerlässlich.

Für gebräuchliche 3-D-Drucker gibt es Slicingprogramme, die den Programmcode anhand der vom Benutzer gewählten Einstellungen automatisiert erstellen. Einstellungen sind neben den notwendigen Angaben zum Druckermodell und dem verwendeten Material auch die präferierte Füllstruktur (Infill). Der Benutzer kann hierbei beispielweise auswählen, ob das Innere der Struktur komplett oder nur ein bestimmter Prozentanteil ausgefüllt sein soll sowie die Anordnung dieses Anteils bestimmen.

Tabelle 2.1: Übersicht der Regelwerke zur additiven Fertigung von Metallen

| Norm                     | Datum   | Status        | Gruppe                                     | Untergruppe   | Bezeichnung  |
|--------------------------|---------|---------------|--|---|--|
| DIN EN ISO/ASTM 52904    | 2020-10 |               | Additive Fertigung                         | Prozessanforderungen und Qualifizierung                                 | Verwendung des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen bei kritischen Anwendungen                                  |
| DIN EN ISO/ASTM 52907    | 2020-05 |               | Additive Fertigung                         | Ausgangswerkstoffe  | Verfahren zur Charakterisierung von Metallpulvern  |
| DIN EN ISO/ASTM 52909    | 2023-02 |               | Additive Fertigung von Metallen            | Eigenschaften von Fertigteilen  | Orientierung und Lage in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften für pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen    |
| DIN EN ISO/ASTM 52911-1  | 2020-05 |               | Additive Fertigung                         | -   | Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen  |
| DIN EN ISO/ASTM 52911-3  | 2023-08 |               | Additive Fertigung                         | -   | Teil 3: Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Elektronenstrahl  |
| DIN EN ISO/ASTM 52926-1  | 2022-03 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Grundsätze der Qualifizierung   | Teil 1: Grundlegende Qualifizierung von Maschinenbedienern   |
| DIN EN ISO/ASTM 52926-2  | 2022-03 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Grundsätze der Qualifizierung   | Teil 2: Grundlegende Qualifizierung von Maschinenbedienern für PBF-LB  |
| DIN EN ISO/ASTM 52926-3  | 2022-03 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Grundsätze der Qualifizierung   | Teil 3: Grundlegende Qualifizierung von Maschinenbedienern für PBF-EB  |
| DIN EN ISO/ASTM 52926-4  | 2022-03 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Grundsätze der Qualifizierung   | Teil 4: Grundlegende Qualifizierung von Maschinenbedienern für DED-LB  |
| DIN EN ISO/ASTM 52926-5  | 2022-03 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Grundsätze der Qualifizierung   | Teil 5: Grundlegende Qualifizierung von Maschinenbedienern für DED-Arc   |
| DIN EN ISO/ASTM 52927    | 2022-03 | Entwurf       | Additive Fertigung                         | Grundlagen  | Hauptmerkmale und entsprechende Prüfverfahren  |
| DIN EN ISO/ASTM 52928    | 2022-12 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Ausgangsmaterialien   | Steuerung des Lebenszyklus von Pulvern   |
| DIN EN ISO/ASTM 52929    | 2023-11 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Pulverbettbasiertes Schmelzen   | Darstellung von Werkstoffkennwerten in Materialdatenblättern   |
| DIN EN ISO/ASTM/TS 52930 | 2022-04 |               | Additive Fertigung                         | Grundlagen der Qualifizierung   | Installation, Funktion und Leistung (IQ/OQ/PQ) von PBF-LB-Anlagen  |
| DIN EN ISO/ASTM 52931    | 2023-07 |               | Additive Fertigung von Metallen            | Umweltschutz, Gesundheit und Sicherheit                                 | Allgemeine Grundsätze für die Verwendung metallischer Werkstoffe   |
| DIN EN ISO/ASTM 52935    | 2022-08 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Grundsätze der Qualifizierung   | Qualifizierung des AM-Koordinationspersonals   |
| DIN EN ISO/ASTM 52938-1  | 2023-07 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Umweltschutz, Gesundheit und Sicherheit                                 | Teil 1: Sicherheitsanforderungen für PBF-LB-Maschinen  |
| DIN EN ISO/ASTM 52941    | 2022-02 |               | Additive Fertigung                         | Systemleistung und Betriebssicherheit                                   | Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlanlagen für metallische Werkstoffe in Luft- und Raumfahrtanwendungen |
| DIN EN ISO/ASTM 52943-2  | 2023-05 | Entwurf       | Additive Fertigung für Luft- und Raumfahrt | Prozessanforderungen und Qualifizierung                                 | Teil 2: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Draht und Lichtbogen                   |
| DIN EN ISO/ASTM 52948    | 2023-11 | Entwurf       | Additive Fertigung für Metalle             | Zerstörungsfreie Prüfung und Bewertung                                  | Klassifizierung von Fehlern in PBF-Teilen  |
| DIN EN ISO/ASTM 52953    | 2023-06 | Entwurf       | Additive Fertigung von Metallen            | Allgemeine Grundsätze   | Registrierung von Geometriedaten aus der Prozessüberwachung und zur Qualitätskontrolle                                 |
| VDI 3405 Blatt 2         | 2013-08 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Strahlschmelzen metallischer Bauteile                                   | Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung   |
| VDI 3405 Blatt 2.2       | 2017-07 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile                             | Materialkenndatenblatt Nickellegierungen Werkstoffnummer 2.4668  |
| VDI 3405 Blatt 2.3       | 2018-07 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Strahlschmelzen metallischer Bauteile                                   | Charakterisierung von Pulverwerkstoffen  |
| VDI 3405 Blatt 2.4       | 2019-11 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile                             | Materialkenndatenblatt Titanlegierung Ti-6Al-4V Grade 5  |
| VDI 3405 Blatt 2.6       | 2022-05 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) | Ausweis von Werkstoffkennwerten für Materialdatenblätter   |
| VDI 3405 Blatt 2.7       | 2021-07 | zurückgezogen | Additive Fertigungsverfahren               | Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) | Peripherie und Arbeitsabläufe  |
| VDI 3405 Blatt 2.8       | 2021-05 | zurückgezogen | Additive Fertigungsverfahren               | Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metall mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) | Fehlerkatalog - Fehlerbilder beim Laser-Strahlschmelzen  |
| VDI 3405 Blatt 3.5       | 2018-09 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Anwendersicherheit beim Betrieb der Fertigungsanlagen                   | Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Elektronen-Strahlschmelzen                                      |
| VDI 3405 Blatt 6.1       | 2019-11 |               | Additive Fertigungsverfahren               | Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern                                 | Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern  |



**Abbildung 2.1:** Prinzipielles Vorgehen additive Fertigung (Gebhardt et al. (2016), S. 5)

### 2.1.3 Programmierung

#### G-Code

Für den 3-D-Druck wird häufig der G-Code verwendet. Diese recht einfache Programmiersprache ist nach DIN 66025-1 (1983) und ISO 6983-1 (2009) geregelt und wurde zur Steuerung von CNC-Maschinen entwickelt (Computerized Numerical Control – rechnergestützte numerische Steuerung). Der Programmcode wird zeilenweise gelesen und ausgeführt, bis die letzte Zeile des Codes erreicht ist. Eine Zeile enthält jeweils eine Aufgabe, die die Maschine erledigen soll. Die Aufgaben werden durch G- bzw. M-Befehle definiert und durch Werteangaben oder Koordinaten spezifiziert.

Durch seine Schlichtheit kann ein solcher Code schnell generiert und die Sprache auf Maschinen schnell implementiert werden. Allerdings ist es hiermit nicht direkt möglich, Schleifen oder Verzweigungen in das Programm einzubringen und so auf das Verhalten des Werkstücks zu reagieren. Für den 3-D-Druck muss daher beispielsweise die Höhe einer Lage genau bekannt sein, sonst würde das Material entweder in der Luft abgelegt oder der Druckkopf in das gedruckte Material fahren.

#### Parametrische Roboterprogrammierung

Vor allem bei der Verwendung von Robotern bietet sich – durch ihre häufig eigene Programmiersprache – der Vorteil, unabhängig von der gängigen G-Code-Verwendung einen Programmcode nicht zeilenweise mit festen Koordinaten aufzubauen, sondern interaktiv auf den Fertigungsprozess zu reagieren. Die Vorteile und Vorgehensweisen werden in Feucht et al. (2020b) genauer beschrieben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ebenfalls mit der parametrischen Roboterprogrammierung gearbeitet.

#### Koordinatensysteme

Für die parametrische Roboterprogrammierung und die Fertigung von komplexen Strukturen ist die freie Definition von verschiedenen Koordinatensystemen von Vorteil. Prinzipiell müssen zur Robotersteuerung verschiedene Arten von Koordinatensystemen definiert werden, diese sind in Abb. 2.2 zu sehen. Die Definition des BASE-Koordinatensystems gibt die Position des Roboters im Vergleich zum Weltkoordinatensystem (Werkhalle) an. Das TOOL-Koordinatensystem gibt die Position des Werkzeugs im Vergleich zu den drei Flanschkoordinaten an. Das Benutzer-Koordinatensystem (UFRAME) gibt die Position des Arbeitsbereichs im Bezug zu den Weltkoordinaten an, in diesem Koordinatensystem wird der Arbeitspunkt angegeben.



Mit der Definition des UFRAME ist es möglich, den Arbeitsbereich auch gegenüber dem Roboter zu drehen. So kann beispielsweise eine Bewegung auf einer zur Horizontalen geneigten Ebene bei gleichbleibender Z-Koordinate erfolgen. Auch kann in einem Programm mit mehreren UFRAME gearbeitet werden und auf unterschiedliche geometrische Eigenschaften eingegangen werden, ohne den Programmcode zu beenden oder selbst aufwendige Koordinatentransformationen vorzunehmen. Für die parametrische Roboterprogrammierung können durch die geschickte Wahl des UFRAME die verwendeten Funktionen vereinfacht werden.

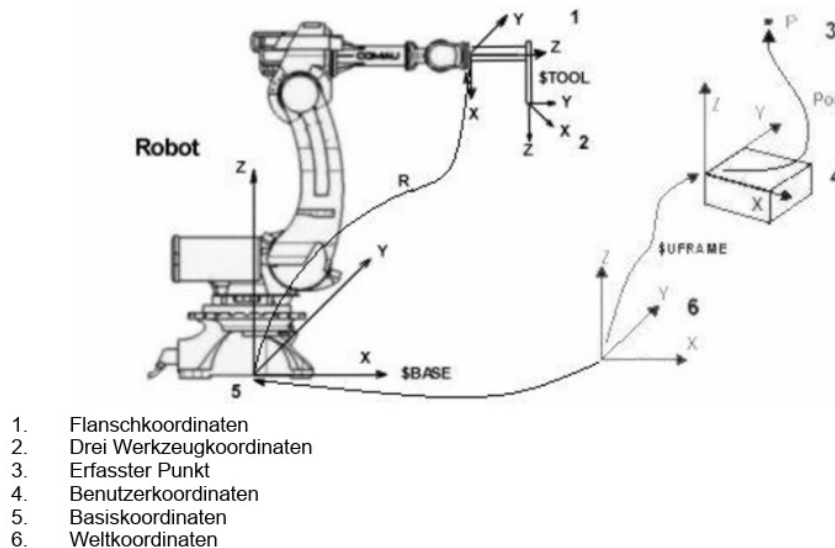


Abbildung 2.2: Bezugskoordinatensysteme (COMAU (2008))

## 2.2 Optimierung

Die Suche nach dem Optimum wird als Optimierung bezeichnet. Die Optimierung findet in vielen Bereichen Anwendung (Wirtschaft, Verkehrsplanung, ...). Zur Optimierung muss generell ein Ziel und die Veränderliche zum Erreichen dieses Ziels (Designvariable/n) bekannt sein. Weiterhin kann der Anwendungsbereich, in dem die Designvariable gewählt werden darf, beschränkt sein (Restriktionen).

### 2.2.1 Grundlagen der Optimierung

Mathematisch kann ein Optimierungsproblem nach Harzheim (2019) allgemein in der folgenden Weise beschrieben werden:

$$\min f(\vec{x})$$

sodass

$$\begin{aligned} g_j(\vec{x}) &\leq 0; & j &= 1, \dots, m \\ h_k(\vec{x}) &= 0; & k &= 1, \dots, q \\ \vec{x}^L &\leq \vec{x} \leq \vec{x}^U; \end{aligned}$$

Hierbei ist  $x$  die Designvariable,  $f$  die Zielfunktion,  $g$  sind die Ungleichheitsrestriktionen und  $h$  die Gleichheitsrestriktionen. Ist  $x$  lediglich eine Variable, handelt es sich um einen eindimensionalen Optimierungsfall. Für diesen ist bekannt, dass sich ein Minimum für jenes  $x$  finden lässt, für welches die

erste Ableitung eine Nullstelle liefert und die zweite Ableitung größer 0 ist. Zur Lösung dieses Problems gibt es einige Lösungsmethoden (Harzheim 2019).

In der Praxis hängt das Optimierungsproblem jedoch häufig nicht nur von einer, sondern von mehreren Variablen ab. Solche mehrdimensionalen Optimierungsprobleme können auf eindimensionale Probleme zurückgeführt werden, die dann mit Hilfe der eindimensionalen Lösungsansätze gelöst werden können. Für die Art der Zurückführung und somit der Lösung des Problems gibt es unterschiedliche Herangehensweisen, die für verschiedene Optimierungsprobleme unterschiedlich gut funktionieren. Diese Herangehensweisen sind die Optimierungsalgorithmen.

Neben solchen rein mathematischen Lösungsalgorithmen gibt es auch nicht mathematische Algorithmen, die auf empirischen Erkenntnissen (wie Wachstumsregeln) aufbauen. Auch gibt es Optimierungsansätze, die künstliche Intelligenz zur Lösung einsetzen.

### 2.2.2 Strukturoptimierung

Wird eine mechanische Struktur optimiert, spricht man von Strukturoptimierung. Diese kann in verschiedene Arten unterteilt werden (Harzheim 2019; Bendsøe und Sigmund 2003).

In der *Dimensionierung* (auch Sizing) werden für verschiedene Abschnitte der zu optimierenden Struktur Zahlenwerte verändert. Dies kann beispielsweise die Querschnittsfläche oder die Dicke sein. Das Prinzip der Dimensionierung ist grundlegend in jedem Tragwerksentwurf verankert. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit werden an weniger belasteten Stellen kleinere Träger verwendet und an höher belasteten Stellen demensprechend größere Träger.

Wird der Querschnitt nicht nur in einem Zahlenwert, sondern auch in der Form über die Länge der Struktur verändert, wird dies als *Formoptimierung* (auch Gestaltoptimierung) bezeichnet.

In der *Topologieoptimierung* können zusätzlich Löcher in die Struktur eingebracht werden und so ungenutzte, materialverschwendende Stellen ausgelassen werden. Mit Hilfe der Finiten Elemente (FE) Methode kann diese Art einfacher als die Formoptimierung umgesetzt werden.

### 2.2.3 Topologieoptimierung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Optimierungen wurden mit Hilfe der mathematischen Topologieoptimierung, die als Modul in Ansys Workbench verfügbar ist, geführt. Hierbei wird das Optimierungsproblem anhand der Dichteverteilung des Körpers gelöst. Diese Dichteverteilung wird über den SIMP-Ansatz vereinfacht.

#### SIMP-Ansatz

SIMP steht für „Solid Isotropic Material with Penalization“. Der SIMP-Ansatz weist jedem Element eine DichtevARIABLE  $x_i$  zu, die die aktuelle Dichte des Elementes im Verhältnis zur Ausgangssituation angibt. Zudem wird der Bezug zum E-Modul jedes Elementes über einen Potenzansatz realisiert. Die Potenz  $p$  wird auch „penalty factor“ genannt, da er vorgibt, wie stark eine kleine Dichte „bestraft“ wird (Harzheim 2019).

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho_i^0}$$
$$\frac{E_i}{E_i^0} = x_i^p$$

## Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit

Die mittlere Nachgiebigkeit  $C$  beschreibt die Summe der Arbeit  $F \cdot u$ , welche durch eine Elementverschiebung über die Gesamtheit der Elemente des Bauteils hervorgerufen wird. Da sie Rückschlüsse auf die Steifigkeit des Bauteils gibt, ist sie eine sinnvolle Zielfunktion für die statische Optimierung.

$$C = \sum_i \vec{F}_i^T \cdot u_i$$

## Restriktionen

Die maximale Steifigkeit eines Bauteils wird erreicht, wenn der gesamte Designraum die höchstmögliche Dichte aufweist. Diese Lösung hat jedoch keinen praktischen Nutzen, da sich kein materialsparendes Design ergeben würde. Daher wird eine Volumenrestriktion eingeführt. Dies bedeutet, dass für einen bestimmten Anteil  $\nu$  des Ausgangsvolumen  $V_0$  die Dichte so zu verteilen ist, dass sich die minimale Nachgiebigkeit ergibt. Die Restriktion wird nach der folgenden Ungleichung beschrieben.

$$V - \nu \cdot V_0 \leq 0$$

Zusätzlich zu dieser notwendigen Restriktion (in der vorliegenden Arbeit auch Hauptrestriktion genannt) können in Ansys Workbench weitere Restriktionen verwendet werden, diese sind an den konventionellen Fertigungsverfahren orientiert.

### Extrusion

Durch die Extrusionsrestriktion werden alle Elemente in einer vorgegebenen Achsrichtung des Bauteils gleich behandelt. Als Ergebnis bleibt der Querschnitt über die vorgegebene Achsrichtung konstant. Hierzu ist es notwendig, dass sich die Elemente in der vorgegebenen Richtung übereinander befinden, was bei der Netzgenerierung berücksichtigt werden muss. Mit dieser Vorgabe werden Überhänge vermieden.

### Symmetrie

Bei Vorgabe der Symmetrie wird eine rotationssymmetrische Anordnung der Dichte um eine vorgegebene Achse gesucht.

### Entformung

Durch die Vorgabe der Entformung werden Überhänge in eine vorgegebene Entformungsrichtung untersagt, sodass sich eine Struktur ergibt, die später in diese Richtung entformt werden kann.

### AM-Überhang

Mit der Version 19 von Ansys Workbench wurde die AM-Restriktion eingeführt. Sie berücksichtigt die zunehmende Nutzung der Optimierungsanalyse für die additive Fertigung. Hier kann ein maximaler Überhang-Winkel angegeben werden. So wird ausgehend von der in Vorgabenrichtung darunterliegenden Elementlage ermittelt, welche Elemente in der betrachteten Lage Masse vorweisen dürfen.

## Lösungsalgorithmen

Für die Anwendung in Ansys Workbench stehen zwei Optimierungsalgorithmen zur Verfügung. Das optimality criteria (OC), welches auf der Lösung der Lagrange Funktion nach Bendsøe und Sigmund (2003) basiert und der sequential complex programming (SCP), welches auf der Method of moving asymptotes (MMA) nach Svanberg (1987) beruht.

Bei Verwendung von mehreren Restriktionen, kann das OC nicht mehr verwendet werden, da die Lagrangefunktion nicht mehr aufgestellt werden kann. In solchen Fällen sollte das etwas langsamere, dafür stabile und anpassungsfähige, SCP verwendet werden.

### 2.3 Schweißtechnik

„Fügen durch Schweißen“ bildet nach DIN 8580 (2022) die Untergruppe 4.6 der Fertigungsverfahren. Beim Schweißen von Metallen ist es nötig, die Metallgitterstruktur beider Fügepartner sehr stark anzunähern, damit eine chemische Bindung der Metallionen wirksam wird. Die hierzu erforderliche Energie kann in Form von hohem Kraftaufwand (Untergruppe 4.6.1 Pressschweißen) oder durch thermische Energie (Untergruppe 4.6.2 Schmelzschweißen) zugeführt werden. Im Bauwesen sind vor allem Schmelzschweißverfahren mit elektrischer Gasentladung (Untergruppe 4.6.2.4) verbreitet. Hierunter fällt auch das Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG-Schweißen).

#### 2.3.1 MSG-Schweißen

Beim MSG-Schweißen wird die Schweißstelle durch ein kontinuierlich zugeführtes inertes Gas (Schutzgas) von der umgebenden Luft abgeschirmt und vor schädlichen Reaktionen geschützt. Die Elektrode wird kontinuierlich gefördert und im Lichtbogen aufgeschmolzen. Das Verfahrensprinzip ist in Abb. 2.3 dargestellt. Zur Erzeugung des Lichtbogens wird elektrischer Strom genutzt, dieser liegt an auf Grundwerkstoff und Schweißdraht - welcher diesen über das Kontaktrohr erhält und so zur (Draht-)Elektrode wird. Über die Schutzgasdüse strömt das Schutzgas aus und bildet eine schützende Glocke über Lichtbogen und Schmelze.

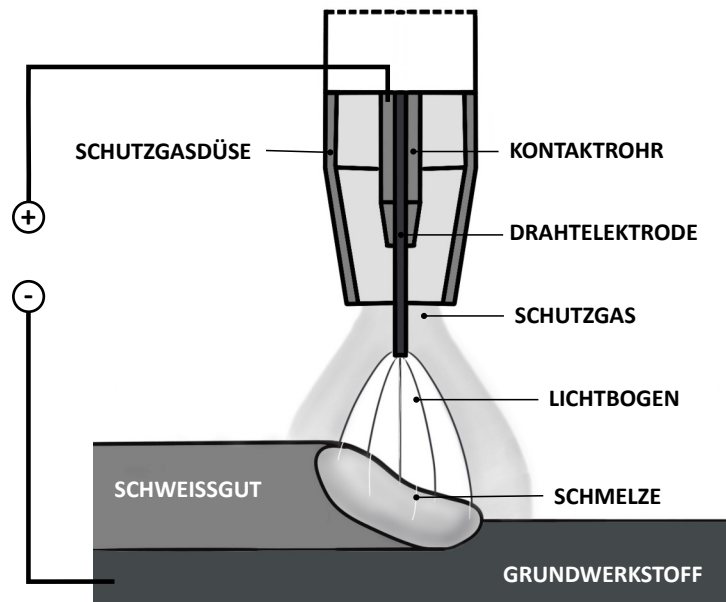


Abbildung 2.3: Verfahrensprinzip MSG-Schweißen

#### 2.3.2 Lichtbogen

Im Lichtbogen als Form der Gasentladung fließt elektrischer Strom durch ein Gas und ionisiert es. (Matthes und Schneider 2012). Die Ionisation des Gases wird durch den Lawineneffekt, welchen die

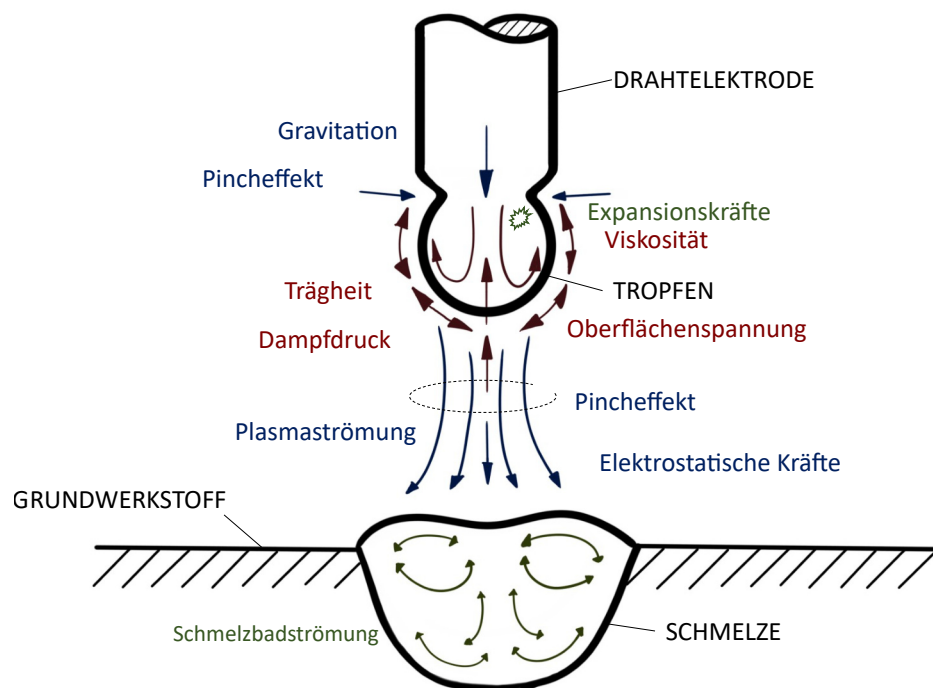
freien Elektronen durch Stoßionisation auslösen, bei anliegender Stromspannung aufrechterhalten. Die zur Dissoziation von Molekülen und zur Ionisation von Atomen erforderliche Energiemenge ist eine stoffspezifische Größe und hängt vom zu ionisierenden Gas ab. Um die notwendige Startionisierungsenergie zu erhalten, wird beim MSG-Schweißen häufig ein Kurzschluss zwischen Draht und Werkstoff genutzt, welcher durch einen kurzen hohen Strom-Impuls (Hot-Start) zusätzlich begünstigt werden kann. Durch den Kurzschluss verdampft ein kleiner Teil des Metalls und regt den Lichtbogen an.

Da im Lichtbogen freie Elektronen und Anionen vorliegen, handelt es sich physikalisch um ein Plasma. Die Anionen bewegen sich zur Kathode und die Elektroden zur Anode. Die Elektronen sind leichter und somit schneller und daher hauptverantwortlich für den Stromtransport. Dieser geschieht über mehrere parallel liegende Strompfade mit gleichsinniger Stromflussrichtung. Durch die sich überlagernden Magnetfelder und die damit einhergehende Lorentzkraft entsteht der Pinch-Effekt, der die Lichtbogensäule komprimiert und zusammenhält.

### Kräfte im Lichtbogen

Beim Lichtbogen-Schweißen wird der Lichtbogen als Werkzeug benutzt. Hauptsächlich wird hierbei die Wärmeenergie des Lichtbogens genutzt, um Schweißdraht und Grundwerkstoff zu schmelzen (Schmelz-Schweißprozess). Weiterhin wird durch den Lichtbogen, und die mit ihm einhergehenden Kräfte, die Schmelze selbst gelenkt (hilfreich z.B. beim Überkopfschweißen). Anhand der Art des Lichtbogens kann der Werkstoffübergang an sich beeinflusst und eingestellt werden.

Das Schaubild (Abb. 2.4) zeigt die verschiedenen Kräfte und Effekte, die im Schweißlichtbogen wirken. Schmelzbadströmung und die Ausbildung des Schmelzbades werden zusätzlich durch den mechanischen Aufprall der Tropfen, die thermo-kapillare Oberflächenspannung (Marangoni-Effekt), den Lichtbogen-druck, den thermischen Auftrieb und elektromagnetische Kräfte beeinflusst (Mehmert 2003).



**Abbildung 2.4:** Kräfte im Lichtbogen (nach Dilthey (2006), Matthes und Schneider (2012) und Mehmert (2003))

Die verschiedenen Effekte und Kräfte beeinflussen sich gegenseitig und sind abhängig von den verwendeten Materialien sowie den anliegenden Stromverhältnissen. Durch die große Bedeutung der Plasmaströmung wird die Ausgestaltung der Schweißnaht auch durch das verwendete Schutzgas beeinflusst.

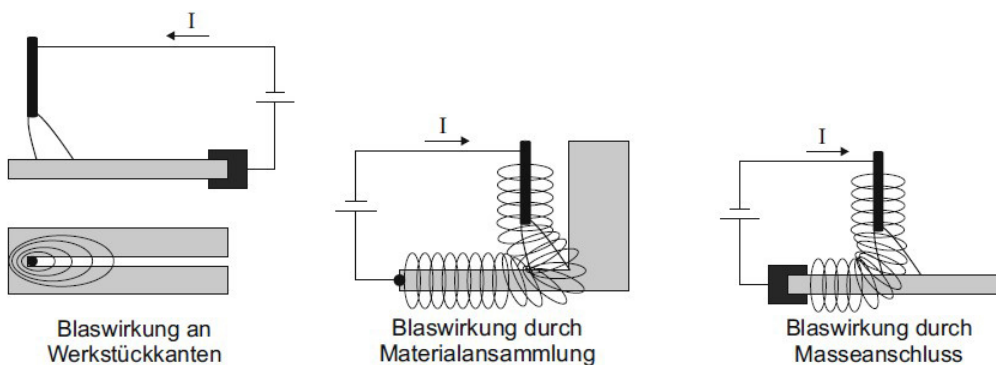
### Lichtbogenkennlinie

Um den Lichtbogen aufrecht zu erhalten, muss eine ausreichend große Potentialdifferenz vorliegen. Die hierzu notwendige Spannung ist abhängig von verschiedenen Einflüssen, wie dem schon beschriebenen Gas, dem Elektrodenmaterial, der Lichtbogenlänge und der Stromgröße (Matthes und Schneider 2012). Während es sich bei Gas, Elektrodenmaterial und Lichtbogenlänge um externe Einflüsse handelt, werden anliegende Strom- und Spannungsgrößen direkt von der Schweißstromquelle geregelt. Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung innerhalb des Lichtbogens ist daher von essentieller Bedeutung und wird mit der Lichtbogenkennlinie beschrieben.

Um das für den Lichtbogen notwendige Strom- und Spannungsverhältnis aufzubringen, besitzt die Schweißstromquelle ebenfalls eine/mehrere (Stromquellen-)Kennlinien, bei denen definiert wird, wie das Verhältnis aus Strom und Spannung innerhalb der Schweißstromquelle gewählt werden muss. Die Schnittpunkte aus Lichtbogen- und Stromquellenkennlinie bilden die Arbeitspunkte, mit denen letztendlich geschweißt wird.

### Elektromagnetischer Blaseffekt

Während der Pinch-Effekt als Resultat der elektromagnetischen Kräfte hauptsächlich eine positive Wirkung auf den Schweißvorgang hat – er führt einerseits zu einer fokussierten Energieeinbringung und andererseits zur Tropfenablöse –, bringt das elektromagnetische Feld auch einen negativen Effekt mit sich. Dieser ist die sogenannte elektromagnetische Blawirkung. Durch Störungen des Magnetfeldes wird der Lichtbogen in Bereiche geringerer magnetischer Feldliniendichte umgelenkt. Dies geschieht beispielsweise an Spalten – die durch Pendeln überbrückt werden können – und bei unterschiedlicher Masseverteilung des Werkstücks, hier wird der Lichtbogen zur größeren Masse abgelenkt (Matthes und Schneider 2012). Abb. 2.5 zeigt schematisch die Auswirkungen des magnetischen Blaseffektes.

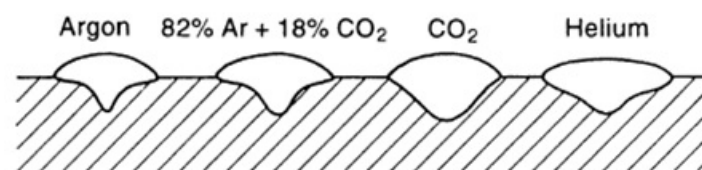


**Abbildung 2.5:** Magnetischer Blaseffekt (Matthes und Schneider (2012), S.67)

### 2.3.3 Schutzgase

Bei den Schutzgasen wird zwischen inerten Gasen (MIG-Schweißen) und Gasen mit Aktivgasanteilen (MAG-Schweißen) unterschieden. Als inerte Gase werden vor allem Argon oder Helium genutzt. Aufgrund der geringeren Ionisationsenergie lässt sich ein Argonlichtbogen bei geringeren Stromspannungen realisieren als ein Heliumlichtbogen. Infolge der geringeren Wärmeleitfähigkeit bildet sich unter Argon ein heißer Lichtbogenkern mit kälteren Randbereichen, was zu einem tiefen Einbrand in der Mitte der Schweißnaht und flacheren Seiteneinbränden führt. Demgegenüber hat der Heliumlichtbogen eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und ist durch die geringere elektrische Leitfähigkeit und die höhere notwendige Stromspannung heißer. Dies führt auch in den Seitenbereichen zu einem tieferen Einbrand. Durch die höhere Wärme ist die Schmelze des Heliumlichtbogens heißer und die Viskosität geringer, wodurch sie besser entgasen kann, hierdurch kann die Schweißgeschwindigkeit gesteigert werden. Die bessere Wärmeleitfähigkeit führt zu einer größeren Wärmeabgabe des Lichtbogens an die Umgebungsluft. Aufgrund der geringeren Dichte von Helium muss ein höherer Gasdurchfluss gewählt werden, um die gleiche Schutzwirkung vor der Umgebungsluft wie Argon zu gewährleisten (Dilthey 2006).

Die Gewinnung von Helium erfolgt vor allem als Nebenprodukt bei der Erdgasförderung, Argon wird dahingegen durch Luftzerlegung gewonnen. Da Helium in Deutschland teurer ist als Argon, wird hier vor allem Argon verwendet. Zum Heliumlichtbogen ähnliche Schmelzbadeigenschaften können durch die Zugabe von Aktivgasen erreicht werden (MAGM-Schweißen). Der Einfluss der verschiedenen Schutzgase ist in Abb. 2.6 zu sehen.



**Abbildung 2.6:** Schutzgaseinfluss auf die Nahtgeometrie (Dilthey (2006), S. 66)

Als Aktivgase werden Gase bezeichnet, die mit der Schmelze reagieren und diese auch metallurgisch beeinflussen. Hierzu werden vor allem  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  verwendet. Sie reagieren mit den Legierungselementen des Schweißzusatzes und verändern die Viskosität und die Oberflächenspannung der Schmelze. Im Lichtbogen wird das zweiatomige  $\text{O}_2$  aufgespalten und kann einerseits mit den Legierungselementen reagieren, bei Auftreffen auf der kühleren Werkstoffoberfläche rekombiniert es unter Wärmefreisetzung andererseits wieder und vergrößert den Einbrand. Bei größeren Anteilen der aktiven Komponenten kommt es zu einem deutlichen Abbrand der Legierungselemente. Aus diesem Grund und auf Grund der starken Spritzerbildung wird  $\text{CO}_2$  als reines Schutzgas fast gar nicht mehr verwendet. In Mischgasen mit Argon wird  $\text{CO}_2$  auf 20 % und  $\text{O}_2$  auf 12 % begrenzt (Dilthey 2006).

### 2.3.4 Schweißlichtbogenarten

Wie beschrieben stellen sich durch die verschiedenen Prozessparameter unterschiedliche Lichtbogenarten ein, die andere Arten der Tropfenablösung zur Folge haben. Drei verschiedene Arten sollen kurz vorgestellt werden (siehe Abb. 2.7). Durch die Möglichkeiten der Schweißprozesssteuerung gibt es mittlerweile eine Vielzahl an weiteren Prozessen.

## Kurzlichtbogen

Der Kurzlichtbogen entsteht bei geringer elektrischer Leistung. Aufgrund der geringen Lichtbogenleistung schmilzt die Elektrode zwar, jedoch löst sich der Tropfen erst durch den Kontakt mit dem Schmelzbad. Der Lichtbogen erlischt. Durch den hohen Kurzschlussstrom wird der Tropfen abgetrennt und der Lichtbogen zündet erneut. Aufgrund des explosionsartigen Werkstoffübergangs beim Kurzschluss sind Spritzer unvermeidlich. Allerdings eignet sich der Prozess durch seine geringe Wärmeeinbringung zum Schweißen von dünnen Blechen und in Zwangspositionen (Dilthey 2006).

## Sprühlichtbogen

Für stark helium- und argonhaltige Schutzgase ( $\geq 80\%$ ) steigt die Tropfenablöse ab einer bestimmten Grenzstromstärke sprunghaft an. Die Tropfen lösen sich ab diesem Punkt nicht mehr durch den Kurzschluss ab, sondern vorwiegend kurzschlussfrei durch den Pinch-Effekt an der Drahtelektrode. Stromstärke, -spannung und die Lichtbogenlänge sind im Sprühlichtbogen nahezu konstant. Der Sprühlichtbogen wird begünstigt durch eine höhere anliegende Spannung und die oberflächenspannung reduzierende Mischgasanteile ( $\leq 20\%$ ). Der gleichmäßige Werkstoffübergang führt zu hochwertigen Nahtoberflächen mit wenigen Spritzern. Der Sprühlichtbogen ist vor allem für Schweißen in Wannelage geeignet (Dilthey 2006).

## Impulslichtbogen

Der Impulslichtbogen zeichnet sich durch eine reduzierte Wärmeeinbringung, höhere Abschmelzleistung, reduzierte Spritzer und die Möglichkeit, auch dünne Bleche zu schweißen, aus. Er kombiniert die Vorteile der beiden beschriebenen Arten. Durch eine Überlagerung von Grund- und einer regelmäßig erhöhten Impulsspannung wechseln sich in vorgegebener Frequenz Grund- und Impulsstrom ab. In der Grundstromphase brennt der Lichtbogen mit geringer Leistung. Dadurch wird die Elektrode angeschmolzen und das Schweißbad flüssig gehalten. In der Impulsphase bildet sich ein großer Tropfen, welcher durch den Pinch-Effekt abgelöst wird. Der Prozess startet von vorne. Der Impulslichtbogen kann auch in Zwangspositionen verwendet werden (Dilthey 2006).

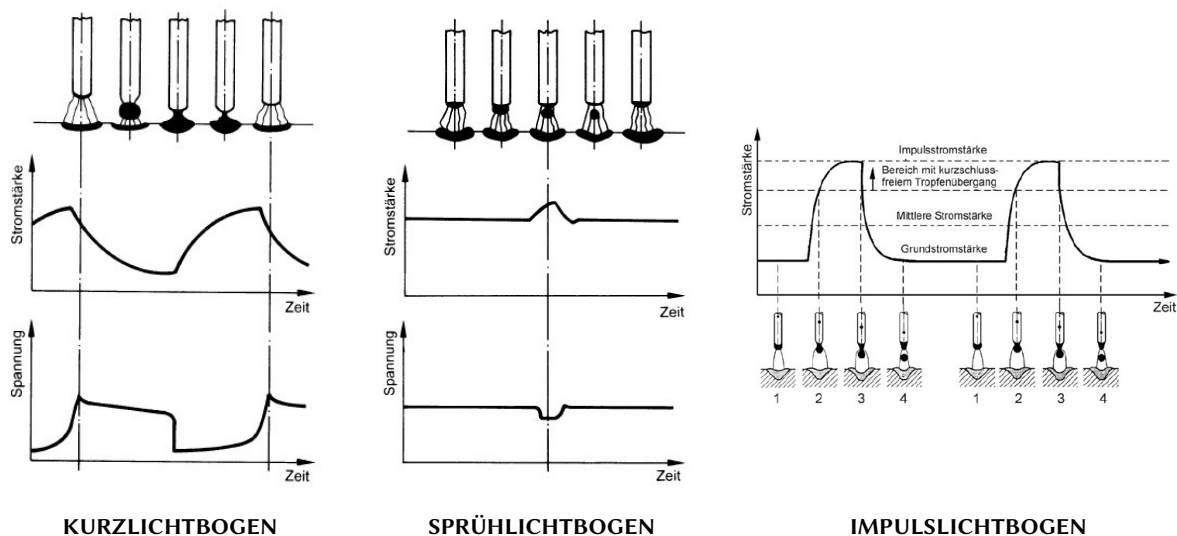


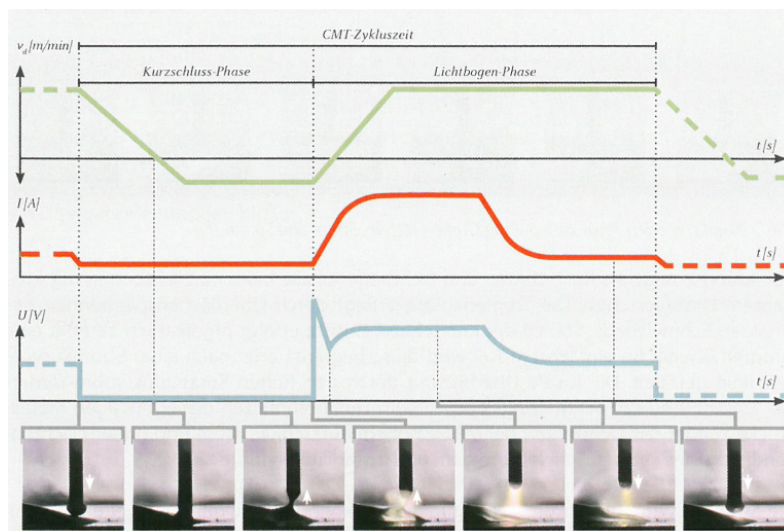
Abbildung 2.7: Verschiedene Lichtbogenarten (Dilthey (2006), S.70,71,76)



### 2.3.5 CMT-Prozess

Durch die Weiterentwicklung in der Prozessregelung haben sich viele weitere Prozesse entwickelt, die das Schweißen in bestimmten Situationen einfacher und besser machen sollten. Der Hersteller Fronius wollte mit seinem „Cold Metal Transfer“-Prozess (CMT-Prozess) einen möglichst kalten und spritzerfreien Prozess entwickeln, der vor allem für dünne Aluminiumbleche Anwendung finden sollte. Durch seinen reduzierten Energieeintrag eignet er sich auch gut für die additive Fertigung. Der CMT-Prozess wird in der folgenden Arbeit verwendet und soll daher kurz beschrieben werden.

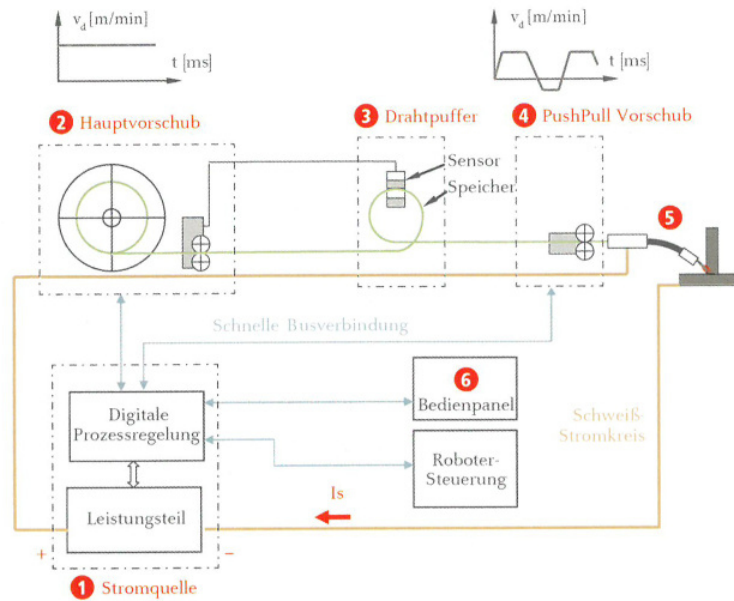
Der CMT-Prozess stellt einen erweiterten Kurzlichtbogenprozess dar. Durch die zusätzliche Regelung des Drahtvorschubs wird die Tropfenablöse allerdings kontrollierter und weniger spritzeranfällig. Den Ablauf des CMT-Prozesses zeigt Abb. 2.8. Der Prozess findet unter geringer elektrischer Leistung statt. Der Draht wird zum Werkstück geführt. Mit Eintreffen des Kurzschlusses wird der Draht zurückgezogen, wodurch sich der Tropfen ablöst und der hohe Kurzschlussstrom mit Spritzerbildung vermieden wird. Hat der Lichtbogen wieder seine eingestellte Länge, beginnt der Prozess erneut.



**Abbildung 2.8:** CMT-Prozessablauf (*Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie: Cold Metal Transfer – ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess* (2013), S.10)

Um dieses hochfrequente Umschalten in der Drahtzufuhr gewährleisten zu können, hat Fronius einen zusätzlichen Vorschubmotor am Schweißbrenner installiert (Push-Pull-Einheit). Um den hochfrequenten Prozess von der kontinuierlichen Förderung des Vorschubmotors an der Schweißstromquelle zu entkoppeln, entwarf Fronius die Drahtpuffereinheit, welche in einer kurzen Distanz zum Schweißbrenner anzubringen ist. Für das roboterbasierte Schweißen bietet sich hierzu das Gelenk des Roboterarms an. Der prinzipielle Aufbau einer CMT-Anlage ist in Abb. 2.9 zu sehen.

Neben dem CMT-Prozess an sich hat Fronius mittlerweile verschiedene Untervarianten entwickelt – CMT Synchronpulse, CMT Advanced, ... (*Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie: Cold Metal Transfer – ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess* 2013). Eine weitere Variante stellt das CMT-Cycle-Step dar, welche in dieser Arbeit verwendet wird. Hierbei wird nach einer bestimmten Anzahl an CMT-Zyklen (Bereich der durchgezogenen Kurven in Abb. 2.8) eine kurze Pause eingefügt.



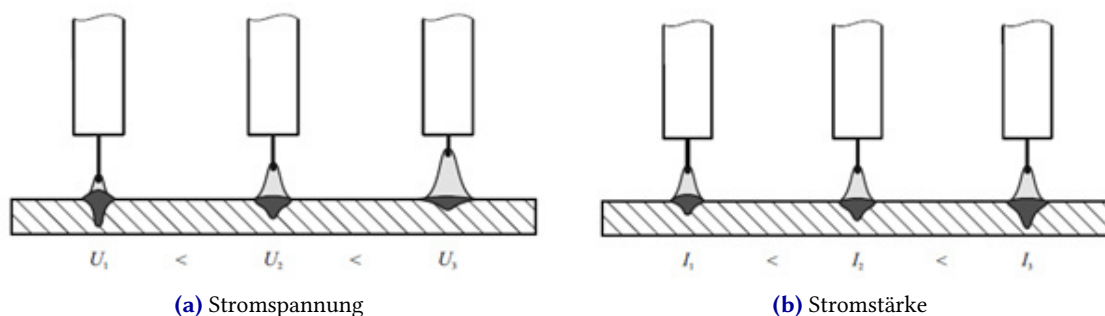
**Abbildung 2.9:** Blockschaltbild CMT-Anlagenkomponenten (*Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie: Cold Metal Transfer – ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess* (2013), S.14)

### 2.3.6 Schweißprozessparameter

Wie beschrieben, hat die elektrische Leistung erheblichen Einfluss auf die Art des Werkstoffübergangs. Sie ergibt sich aus Stromspannung und Stromstärke. Inwieweit die anliegende Leistung den Schweißprozess beeinflusst, hängt zusätzlich noch mit anderen Faktoren, wie beispielsweise dem Schutzgas zusammen, dessen Auswirkungen bereits beschrieben wurden. Es werden nun kurz einige wichtige weitere Faktoren vorgestellt.

#### Elektrische Größen

Nicht nur die Leistung an sich, sondern auch die einzelnen Parameter Stromspannung und Stromstärke haben erheblichen Einfluss auf den Schweißprozess. Die Lichtbogenlänge nimmt mit steigender Spannung zu, der Einbrand wird breiter. Dafür nehmen Nahtüberhöhung und Einbrandtiefe ab. Die Stromstärke hat deutlichen Einfluss auf die Einbrandtiefe. Bei steigender Stromstärke wird der Einbrand tiefer und die Nahtüberhöhung geringer, die Breite bleibt nahezu konstant (Matthes und Schneider 2012). Die Zusammenhänge sind in Abb. 2.10 dargestellt.



**Abbildung 2.10:** Einfluss der elektrischen Größen beim Schweißen (Matthes und Schneider (2012), S. 220)

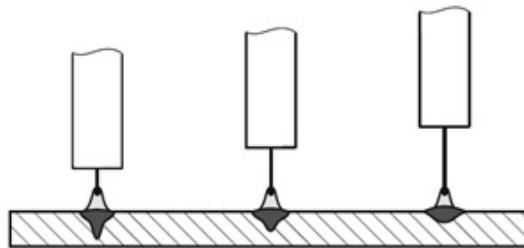
## Geschwindigkeiten

Die Stromstärke ist maßgeblich für die Höhe des Energieeintrags verantwortlich. Mit steigender Stromstärke kann mehr Material aufgeschmolzen werden. Die Drahtvorschubgeschwindigkeit (auch Drahtvorschub oder Wire Feed Speed WFS) wird daher häufig mit der Stromstärke gesteigert und bei der Prozesssteuerung an diese gekoppelt. Wie viel Energie an einem Punkt der Schweißnaht eingebracht wird, hängt zusätzlich von der Schweißgeschwindigkeit (auch Robotergeschwindigkeit oder Travelspeed TS) ab. Sie gibt an, wie schnell der Schweißbrenner über die Schweißbahn verfährt.

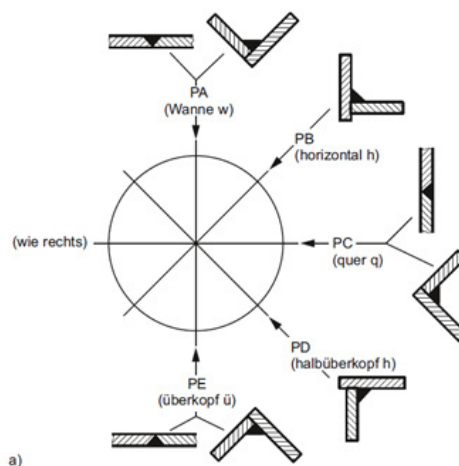
Aus dem Verhältnis von elektrischer Leistung und Schweißgeschwindigkeit lässt sich die Streckenenergie  $E_S$  ermitteln. Sie gibt an, wie viel Energie über eine Streckeneinheit aufgebracht wird. Auch sie hat erhebliche Auswirkungen auf das Temperaturfeld und die sich damit einstellende Schweißnaht.

## Geometrische Faktoren

Einerseits hat die Geometrie der Schutzgasdüse einen Einfluss darauf, wie groß die Schutzgasglocke werden kann, andererseits entscheidet sie über die Zugänglichkeit zur Schweißstelle. Sie ist daher je nach Einsatz zu wählen. Einen großen Einfluss auf die Form des Einbrandes hat der Abstand des Kontaktrohrs zum Werkstück und die damit einhergehende freie Elektrodenlänge (CTWD). Durch eine größere freie Elektrodenlänge steigt der Ohm'sche Widerstand und die Lichtbogenleistung sinkt. Somit verringert sich bei gleichem Drahtvorschub der Einbrand (siehe Abb. 2.11). Dieser Effekt kann dazu genutzt werden, den Drahtvorschub und hiermit die Abschmelzleistung zu erhöhen.



**Abbildung 2.11:** Einfluss der freien Drahtelektrodenlänge auf den Einbrand (Matthes und Schneider (2012), S. 217)



**Abbildung 2.12:** Schweißposition nach DIN EN ISO 6947 (Matthes und Schneider (2012), S. 54)

Ein weiterer geometrischer Faktor ist die Brennerstellung. Beim Schweißen wird zwischen neutraler, stehender und schleppender Brennerstellung unterschieden. Bei gleichen Schweißprozessparametern ändert sich die Einbrandtiefe in Abhängigkeit von der Brennerstellung.

Neben der Brennerstellung wird beim Schweißen auch die Position unterschieden. Die Schweißpositionen sind nach DIN EN ISO 6947 definiert und in Abb. 2.12 dargestellt. Je nach Position passen Schweißprozesseinstellungen besser oder schlechter, hierauf wurde bereits bei Vorstellung der Lichtbogenarten eingegangen. Alle Positionen mit Ausnahme der Wannenlage gelten als Zwangspositionen.

## 2.4 Metallurgie

Stahl besteht zum Hauptteil aus Eisen (Fe) und kann daher vereinfacht als metallischer Werkstoff bezeichnet werden. Metalle zeichnen sich vor allem durch ihre kristalline Struktur aus, welche durch eine geringe Anzahl von Elektronen auf der äußeren Schale der Metallatome entsteht. Um die vollständige Elektronenschalenkonfiguration zu erreichen (den Edelgaszustand), sind sie bestrebt, diese äußeren Elektronen abzugeben. Wenn mehrere Metallatome in geringer Nähe zueinander vorhanden sind, teilen sie sich ihre Elektronen, sodass jedes Atom nur einen Bruchteil erhält. Es entsteht ein "Elektronenbrei" zwischen den Atomen.

### 2.4.1 Elementarzellen

Durch die Geometrie und durch das Bestreben, nicht mehr Elektronen als nötig zu erhalten, ergibt sich eine regelmäßige Anordnung der Atome. Die kleinste Form dieser Anordnung ist die Elementarzelle. Sie kann in verschiedenen Formen vorliegen, wie Abb. 2.13 zeigt. Im Stahl sind hauptsächlich krz- und kfz-Gitter vorzufinden, auch mit  $\alpha$ -Eisen bzw.  $\gamma$ -Eisen beschrieben.

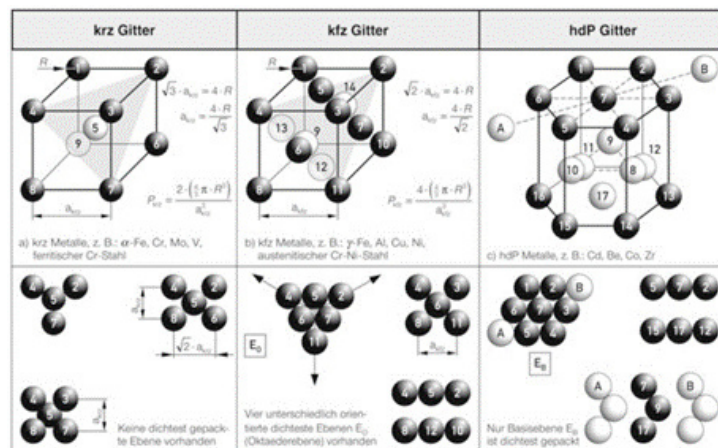
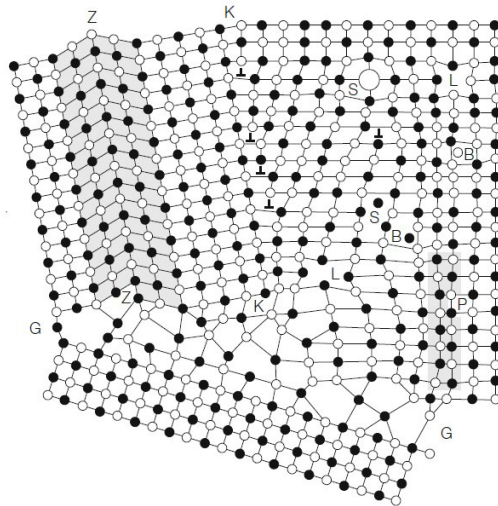


Abbildung 2.13: Kristalline Elementarzellen (Schulze (2009), S.6)

### 2.4.2 Gitterbaufehler

Im Idealkristall wäre die gesamte Kristallstruktur fehlerfrei aus diesen Elementarzellen zusammengesetzt. Eine fehlerfreie Anordnung ist jedoch in realen Werkstoffen nahezu nicht vorzufinden. Die Abweichung vom Idealkristall wird als Gitterbaufehler bezeichnet. Diese sind für Eigenschaften wie Festigkeit und Zähigkeit von Metallen verantwortlich. Weiterhin bestehen Metalle nicht aus einem einzigen

Kristall (Einkristall), sondern aus einzelnen kristallinen Bereichen, den sogenannten Kristalliten oder Körnern. Die Kornstruktur eines Werkstoffes wird als Gefüge bezeichnet. An Stellen, an welchen Körner aufeinandertreffen, bildet sich – durch die unterschiedlichen Kristallorientierungen – keine perfekte Kristallstruktur aus. Dies wird als Korngrenze bezeichnet. Die Gesamtheit aller Defekte innerhalb des Gefüges wird als Fehlordnungssystem bezeichnet. Ein Metall kann demnach den Aufbau in Abb. 2.14 haben.

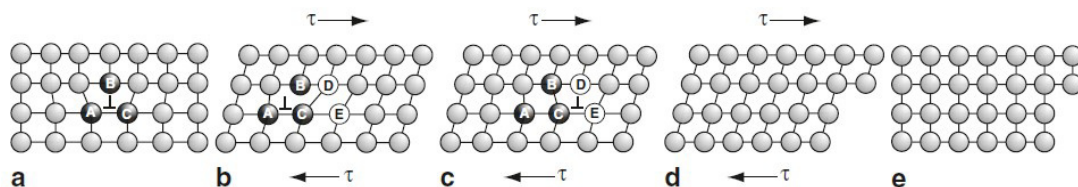


Die wichtigsten mikrostrukturellen Gitterbaufehler, dargestellt in einem Gefüge geordneter Substitutionsmischkristalle, schematisch nach Hornbogen und Petzow.

Es bedeuten: L = Leerstelle, B = Zwischengitteratom, S = Fremdatome,  $\perp$  = Versetzung, Z-Z = Zwillingsgrenze, K-K = Kleinwinkelkorngrenze, G-G = Großwinkelkorngrenze, P = kohärente Phasengrenze, entstanden durch Scherung.

**Abbildung 2.14:** Exemplarischer Aufbau zur Verdeutlichung des Fehlordnungssystems (Schulze (2009), S. 8)

Wie bereits beschrieben, lassen sich durch Gitterbaufehler unterschiedliche Materialeigenschaften herleiten. Ein Beispiel hierfür ist die plastische Verformung. Diese ergibt sich durch eine „Versetzung“ im Gefüge. Versetzungen sind Stellen, an welchen Atome nicht regelmäßig, sondern versetzt zum eigentlichen Gitter angeordnet sind. Wird eine Kraft (Scherkraft) aufgebracht, werden sich die Atome vor allem an diesen Stellen verschieben wollen, um sich in einer kompakteren Form wiederzufinden, also energetisch auf einem niedrigeren Niveau. Wird das Material entlastet, werden sich die Atome nicht wieder zurückverschieben. Die Verformung bleibt erhalten. Das folgende Schaubild (Abb. 2.15) verdeutlicht den Zusammenhang:

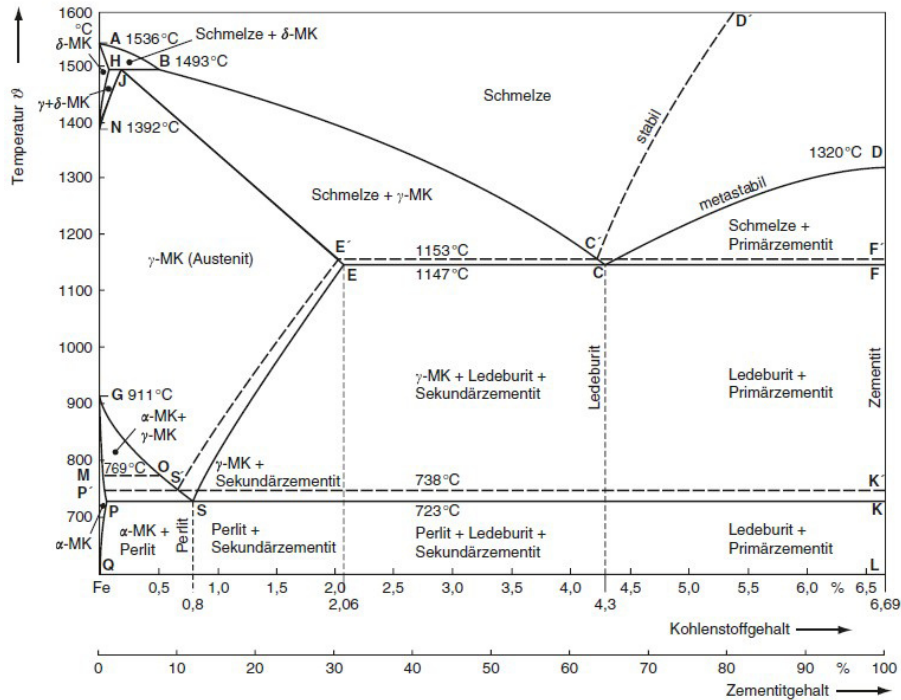


**Abbildung 2.15:** plastische Verformung durch Versetzungsverformung (Bargel und Schulze (2018), S. 18)

### 2.4.3 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Bei Stahl handelt es sich nicht um ein reines Metall, sondern um eine Legierung aus Eisen und Kohlenstoff. Dabei wird Eisen mit weniger als 2,06 M-% Kohlenstoff als Stahl, mit mehr als 2,06 M-% Kohlenstoff

als Gusseisen bezeichnet. Je nach Kohlenstoffgehalt und Temperatur liegt eine andere Gefügestruktur und somit andere Eigenschaften vor. Der Zusammenhang wird im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKS) beschrieben (vgl. Abb. 2.15).



**Abbildung 2.16:** Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS) (Bargel und Schulze (2018), S. 177)

Eisen liegt hier hauptsächlich in zwei Phasen vor – als kubisch-raumzentrierte  $\alpha$ -Phase (auch ferritische Phase) oder als kubisch flächenzentrierte  $\gamma$ -Phase (auch austenitische Phase). Austenit kann einen maximalen Kohlenstoffgehalt von 2,06 M-% aufnehmen und liegt nur oberhalb der im Diagramm eingezeichnete Zustandslinie G-S-E vor. Ferrit hat ein noch geringeres Aufnahmevermögen für Kohlenstoff. Perlit ist eine Mischform aus Ferrit und Zementit. Dieses entsteht, wenn Austenit unter eine Temperatur von 723 °C langsam abgekühlt wird.

### 2.4.4 Umwandlungsvorgänge

Das Diagramm gilt nur für sehr langsame (ideale) Temperaturänderungsvorgänge. In der Realität treten Temperaturänderungen jedoch schneller auf als im EKS angenommen. Dies ist vor allem beim Schweißen der Fall. Wird austenitischer Stahl beispielsweise schlagartig abgekühlt, kommt es zur martensitischen Umwandlung. Die Kohlenstoffatome werden minimal verschoben und führen zu einer Verzerrung der kubisch raumzentrierten Kristalle. Diese Kristallstruktur besitzt eine extreme Härte. Durch den hohen Kohlenstoffanteil ist sie jedoch auch sehr spröde. Die Martensitbildung wird bewusst zum Härten eingesetzt.

In ZTU-Schaubildern (**Z**eit **T**emperatur **U**mwandlung) wird die Umwandlung von Austenit in andere Phasen in Abhängigkeit von der Abkühlzeit dargestellt. Ein Schaubild gilt immer nur für die Austenitisierungsbedingungen, für die es aufgenommen wurde (Bargel und Schulze 2018). Für ein ZTU-Schaubild müssen daher die Austenitisierungstemperatur, die Haltezeit und die Aufheizgeschwindigkeit

angegeben werden. In ZTU-Schaubildern sind Temperaturkurven eingezeichnet, an denen das Schaubild erstellt wurde. Es darf nur an diesen Abkühlbahnen abgelesen werden (Dilthey 2006).

Im Bereich zwischen 800 °C und 500 °C finden die wichtigsten Gefügeumwandlungen statt (Schulze 2009), daher hat sich in der Schweißtechnik zur Beschreibung der Abkühlung die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  bewährt (Dilthey 2006). Sie beschreibt die Zeit, die das Material benötigt, um von 800 °C auf 500 °C abzukühlen. Nach Rykalin kann die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  rechnerisch bestimmt werden und mit ihr die Schweißbedingungen festgelegt werden.

## 2.5 Anforderungen an Stahlerzeugnisse

Für die Verwendung von Stählen in Tragwerken müssen gewisse Anforderungen erfüllt werden. Die Produktnorm DIN EN 10025-2 (2019) legt „die technischen Lieferbedingungen für Flach- und Langerzeugnisse sowie für zur Weiterverarbeitung zu Flach- und Langerzeugnissen vorgesehenes Halbzeug aus warmgewalzten unlegierten Qualitätsstählen“ fest. Hierin werden Anforderungen an die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Kerbschlagarbeit der verschiedenen Stahlsorten und Güteklassen gestellt. Anhand von in mehreren Tabellen festgelegten Werten wird ein Stahlerzeugnis klassifiziert. Diese Klassifizierung definiert den zulässigen Anwendungsbereich des Erzeugnisses. Die mechanischen Eigenschaften beziehen sich auf die in Zugversuchen ermittelten Werten für Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Als Streckgrenze wird die obere Streckgrenze genutzt.

### 2.5.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormter Werkstoffprüfversuch, aus welchem sich für das Tragverhalten wichtige Kenngrößen ableiten lassen. Für Metalle legt die Norm DIN EN ISO 6892-1 (2020) die Versuchsbedingungen und -durchführung fest. Im Zugversuch werden nach DIN 50125 (2022) genormte Prüfgeometrien uniaxial bis zum Bruch getestet. Hierbei werden die notwendige Kraft und die Längung der Probe gemessen und als technische Spannung und Dehnung gegeneinander aufgetragen. Ein Verlauf für einen Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze ist in Abb. 2.17 schematisch dargestellt. Ein solcher Verlauf ist typisch für un- und niedriglegierte Stähle. Hochfeste Stähle hingegen zeigen ein Verhalten ohne die ausgeprägte Streckgrenze.

#### Bedeutung der verschiedenen Bereiche

In Abb. 2.17 wird die Kurve in vier Bereiche eingeteilt, in denen das Material unterschiedliche Verhaltensweisen zeigt. Zunächst verhält sich der Stahl annähernd linear-elastisch, dieses Verhalten wird nach Hooke über den E-Modul als Proportionalitätsfaktor mit der folgenden Formel beschrieben.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Im elastischen (Hooke'schen) Bereich sind die aufgebrachten Verformungen reversibel. Auf atomarer Ebene werden die Atome auseinandergezogen, ohne dass sie ihren Platz verlassen. Nach Abnehmen der Kraft stellt sich die ursprüngliche Ordnung wieder ein. Die Kraft, die hierzu notwendig ist, hängt für den Idealkristall von der atomaren Bindungsenergie und somit den Atomgrößen und der Anordnung im Kristallgitter ab.

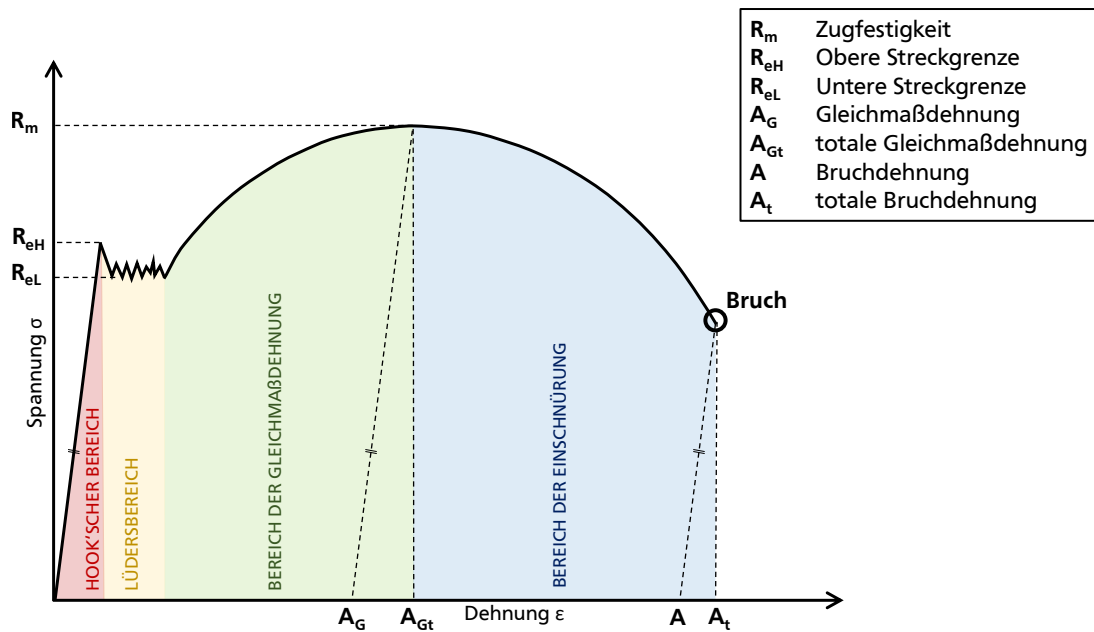


Abbildung 2.17: Schematischer Verlauf Zugversuch

Wird ein gewisser Kraft-/Spannungswert überschritten, sind die Verformungen nicht mehr reversibel, sondern bleibend. Dieser Wert wird als obere Streckgrenze  $R_{eH}$  definiert und gibt das Ende der Hooke'schen Gerade und des elastischen Verhaltens an. Auf die obere Streckgrenze folgen ein leichter Spannungsabfall und ein Bereich, in dem die Spannung relativ konstant bleibt, diese wird als untere Streckgrenze  $R_{eL}$  definiert. Das Verhalten wird als Streckgrenzeneffekt bezeichnet. Grund hierfür sind Cottrell-Wolken. An Versetzungen lagern sich aufgrund der energetisch günstigen Lage Fremdatome an. Diese Atomwolken halten die Versetzung(en) zusätzlich zur „normalen“ Bindungsenergie auf. Wird mit Erreichen der oberen Streckgrenze genug Energie aufgebracht, um die Versetzungen loszureißen, können die Versetzungen mit geringerem Kraftaufwand wandern. In diesem nahezu konstanten Bereich der Spannung sind auf der Probe Fließfiguren (auch Lüdersbänder) zu sehen. Dieser Bereich, in dem sich die verschiedenen Versetzungen von den Cottrell-Wolken losreißen, wird als Lüdersdehnung bezeichnet.

Beginnen die Versetzungen zu wandern, kommt es vor, dass sie aufeinandertreffen und sich gegenseitig im Weiterlaufen behindern. Zusätzlich entstehen durch das Wandern neue Versetzungen, die wiederum andere Versetzungen stören. Sie können erst mit erhöhtem Kraftaufwand fortgeführt werden. Die Behinderung der Versetzungsbewegung und somit der Verformung wird als Verfestigung bezeichnet. Im Zugversuch handelt es sich um eine Kaltverfestigung.

Mit Beginn der Verfestigung steigt die Kurve weiter an. Da sich die Probe nicht nur längt, sondern auch dünner wird, nimmt die Steigung der Gerade zunehmend ab, bis das Maximum erreicht ist. Dieser Punkt wird als Zugfestigkeit  $R_m$  definiert. Sie entspricht der maximalen Spannung, die bezogen auf den Ausgangsquerschnitt erreicht werden kann. Im Bereich bis zur Zugfestigkeit verformt sich der Probekörper gleichmäßig über den gesamten Querschnitt. Die zur Zugfestigkeit gehörige plastische Dehnung wird als Gleichmaßdehnung  $A_G$  bezeichnet.

Mit Überschreiten der Zugfestigkeit beginnt sich der Probekörper nur noch lokal zu verformen, es ist eine deutliche lokale Einschnürung zu sehen. Durch die starke Abnahme des Probenquerschnitts fällt die Kurve im Bereich der Einschnürung ab. Das Ende der Kurve ist schließlich der Bruch der Probe.



Die zum Bruch gehörige plastische Dehnung wird als Bruchdehnung  $A$  bezeichnet. Sie wird durch das Messen der Längenänderung nach Zusammenlegen der beiden Bruchstücke ermittelt. Weiterhin kann auch die Brucheinschnürung  $Z$  Aufschluss über das Verformungsverhalten geben. Sie ergibt sich aus der verringerten Querschnittsfläche, die nach dem Bruch gemessen werden kann.

### Auswirkungen der Prüfungsbedingungen

Die Probengeometrie beeinflusst die Spannungs-Dehnungs-Beziehung, daher sind die Probengeometrien normativ festgelegt. Der Einfluss der Probenlänge ist vor allem in der Bruchdehnung zu sehen. Die lokale Verformung hat auf einen kurzen Zugstab einen größeren Einfluss als auf einen langen. Für Erstellung von Prüfzeugnissen nach DIN EN 10025-2 (2019) ist für Materialien mit Nenndicken  $\geq 3$  mm zur Angabe der Bruchdehnung der kurze Proportionalitätsstab mit  $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$  bzw.  $5 \cdot d_0$  zu verwenden. Zusätzlich verhält sich eine Flachprobe bei Einschnürung anders als eine Rundprobe. Dieser Effekt wird als untergeordnet bewertet und daher nicht berücksichtigt.

Die Prüfgeschwindigkeit beeinflusst die gemessenen Festigkeiten, daher ist diese in DIN EN ISO 6892-1 (2020) festgelegt.

### 2.5.2 Bemessungswerte

Nach Klassifizierung und Zulassung des Stahlerzeugnisses sind Bemessungswerte festzulegen. Für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten sind die charakteristischen Werte  $X_k$  oder die Nennwerte  $X_n$  der Werkstoffeigenschaft nach Eurocode anzusetzen. Hierzu sind in DIN EN 1993-1-1 (2010) Tabelle 3.1 Nennwerte für Streckgrenze und Zugfestigkeit für die jeweilige Stahlsorte angegeben. Nach DIN EN 1993-1-1 (2010) 3.2.1 (1)a dürfen sie auch direkt aus der Produktnorm entnommen werden.

Während die Wertstoffkennwerte der Festigkeit im Versuch mit  $R$  bezeichnet werden, werden Festigkeiten als Bemessungswerte mit  $f$  gekennzeichnet ( $f_y = R_{eH}$  und  $f_u = R_m$ ). Weiterhin stellt DIN EN 1993-1-1 (2010) nach 3.2.2 generelle Anforderungen an die Duktilität eines Baustahls. Die Anforderungen sind:

$$\frac{f_u}{f_y} \geq 1,10$$

$$A \geq 15 \%$$

$$\varepsilon_u \geq 15 \varepsilon_y$$

Werden Stahlsorten nach DIN EN 1993-1-1 (2010) Tabelle 3.1 verwendet, darf nach DIN EN 1993-1-1 (2010) 3.2.2 (2) vorausgesetzt werden, dass sie die aufgeführten Anforderungen erfüllen. Unabhängig vom gewählten Stahl sind nach DIN EN 1993-1-1 (2010) 3.2.6 die folgenden Materialkonstanten anzunehmen:

|                             |          |  |
|-----------------------------|----------|--|
| Elastizitätsmodul           | E        | = 210 000 N/mm <sup>2</sup>  |
| Schubmodul                  | G        | = $\frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ $\approx$ 81 000 N/mm <sup>2</sup> |
| Poisson Zahl                | $\nu$    | = 0,3  |
| Wärmeausdehnungskoeffizient | $\alpha$ | = $12 \cdot 10^{-6}$ 1/K   |

### 2.5.3 Ermittlung von Bemessungswerten nach DIN EN 1990 (2021)

#### Anhang D

Sollen Bemessungswerte aus Versuchen ermittelt werden, wird hierzu DIN EN 1990 (2021) Anhang D genutzt. „Für die Anwendung von Festigkeitswerten aus Versuchen bedarf es in Deutschland [...] im Allgemeinen eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises (Europäische technische Zulassung, allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Zustimmung im Einzelfall oder allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis)“ (Kuhlmann 2018).

Unter Ansatz einer Normalverteilung werden zur Ermittlung der charakteristischen Werte in DIN EN 1990 (2021) Tabelle D.1 (Tabelle 2.2) Fraktilewerte  $k_n$  angegeben die zur Berechnung des 5%-Fraktilewertes genutzt werden können. Anhand von Mittelwert  $m_y$ , Standardabweichung  $s_y$  und Probenumfang kann dann der charakteristische Wert  $X_k$  nach der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$X_k = m_y - k_n \cdot s_y$$

**Tabelle 2.2:** Fraktilefaktor  $k_n$  nach DIN EN 1990 (2021) Anhang D

| n               | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 20   | 30   | $\infty$ |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| $V_x$ bekannt   | 2,31 | 2,01 | 1,89 | 1,83 | 1,80 | 1,77 | 1,74 | 1,72 | 1,68 | 1,67 | 1,64     |
| $V_x$ unbekannt |      |      | 3,37 | 2,63 | 2,33 | 2,18 | 2,00 | 1,92 | 1,76 | 1,73 | 1,64     |

---

# 3 ANALYSE DER RANDBEDINGUNGEN FÜR ADDITIV GEFERTIGTE STRUKTUREN

Um erste Randbedingungen für den Entwurf und einen geeigneten Untersuchungsrahmen festzulegen, wurden Forschungsergebnisse gesichtet und analysiert. Im Speziellen werden in diesem Kapitel die Themenfelder Slicing, Materialeigenschaften und Prozesssteuerung vorgestellt. Im Anschluss folgt eine kurze Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse.

## 3.1 Slicing

Wie in Abschnitt 2.1.2 behandelt, muss zum Druck einer Struktur, diese in einen für die druckende Maschine lesbaren Programmcode umgewandelt werden. Hierzu wird die Struktur gesliced und in Druckbahnen geteilt. Um ein gewünschtes Druckergebnis zu erhalten, ist es notwendig, zu wissen, welche Geometrie sich durch die gewählten Prozesseinstellungen ergibt.

### 3.1.1 Nahtgeometrie

Zur Abhängigkeit der Geometrie von den Schweißparametern gibt es einige Untersuchungen. Diese gehen mit verschiedenen Ansätzen und Zielen vor. Eine chronologische Übersicht über ausgewählte Untersuchungen mit unlegiertem Stahl als Zusatzwerkstoff geben die Tabellen 3.1 bis 3.3.

**Tabelle 3.1:** Übersicht zu Untersuchungen zur Geometrie von Schweißnähten

| Veröffentlichung         | Ziel   | Ansatz / Methodik   | Untersuchte Parametersätze | Ergebnis   |
|--------------------------|--|---|----------------------------|--|
| Cao et al. (2011)        | Besten Abstand für zwei Nähte finden   | 1. mathematische Einzelnahtbeschreibung mit 4 verschiedenen Funktionen (Sinus, Gauß, logistisch, Parabel) 2. mit der bestpassenden Funktion und FOM Abstand finden  | 1 Satz                     | Sinusfunktion bildet die Schweißnaht am besten ab. Es ergibt sich ein Nahtabstand von $d_w = 0,6366 w$ |
| Suryakumar et al. (2011) | Niedrigste Höhe in einer Lage aus mehreren nebeneinander geschweißten Bahnen finden, um ein endkonturnahes Fräsen zu ermöglichen | 1. Mathematische Beschreibung der Einzelnaht durch Parabel. Hierbei werden die Schweißparameter WFS und TS und die gemessene Nahthöhe verwendet. 2. Mathematische Beschreibung der Überlappung durch eingehängten Kreisbogen zwischen den Hochpunkten | 18 Sätze                   | Mathematische Beschreibung funktioniert gut für die vorgestellten Schweißnähte                         |

**Tabelle 3.2:** Übersicht zu Untersuchungen zur Geometrie von Schweißnähten (Fortsetzung)

| Veröffentlichung            | Ziel  | Ansatz / Methodik   | Untersuchte Parametersätze | Ergebnis   |
|-----------------------------|---|---|----------------------------|--|
| Almeida (2012)              | Umfassende Untersuchung der Zusammenhänge von Schweißparametern untereinander und zur Geometrie und den Materialeigenschaften | Regressionsanalyse zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften, die sich für gewählte Prozessgrößen ergeben  | 160 Sätze + 87 Sätze       | Ermittelte Regressionsformeln haben im untersuchten System gute Übereinstimmung mit den Messwerten   |
| Xiong et al. (2013)         | Besten Abstand für zwei Nähte finden  | 1. mathematische Einzelnahtbeschreibung mit 3 verschiedenen Funktionen (Sinus, Kreisbogen, Parabel) 2. mit der bestpassenden Funktion und FOM Abstand finden                                | 23 Sätze                   | Bis zu einem Verhältnis von WFS/TS = 12,5 bildet die Parabel die Schweißnaht am besten ab. Der optimale Abstand beträgt dann $d_w = w/3$ Ab einem Verhältnis von WFS/TS = 12,5 bildet der Kreisbogen die Naht am besten ab. Der optimale Abstand beträgt dann $d_w = 2w/3$ . |
| Xiong et al. (2014)         | Prädiktion der Schweißnahtgeometrie anhand von gewählten Prozessgrößen  | Vergleichende Untersuchungen von Regressionsanalyse und einem künstlichen neuronalen Netz (ANN) zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften, die sich für gewählte Prozessgrößen ergeben | 31 Sätze + 8 Sätze         | Das ANN liefert bessere Ergebnisse als die Regressionsformeln  |
| D. Ding et al. (2015)       | Besten Abstand für zwei Nähte finden  | 1. mathematische Einzelnahtbeschreibung mit 3 verschiedenen Funktionen (Sinus, Kreisbogen, Parabel) 2. mit der bestpassenden Funktion und TOM Abstand finden                                | 8 Sätze                    | Die Parabel bildet die Einzelnaht am besten ab. Es ergibt sich ein Nahtabstand von $d_w = 0,738 w$ .   |
| Y. Li et al. (2018a)        | Strategie für den endkonturnahen Druck von massiven Bauteilen finden  | Aufbauend auf D. Ding et al. (2015) und einem angepassten Model wird der Materialverlust am Ende einer Lage beschrieben   | 1 Satz                     | Die erste und die Endnaht in einer Lage flachen ab, da sie den Raum unter sich füllen müssen. Als Lösung schlagen sie eine Erhöhung des Materialauftrags in den äußeren Nähten und eine Verschiebung der Bahnposition zu den Rändern vor.                                    |
| Y. Li et al. (2018b)        | Besten Abstand für zwei und mehr Nähte finden   | Aufbauend auf D. Ding et al. (2015) und anhand von Messwerten zu Einzelnahtweiten und Verschiebung des Hochpunktes wird ein ANN trainiert   | 36 Sätze                   | Optimaler Abstand der Nähte verändert sich über die Breite. So muss der Abstand ab der 3. Naht verringert werden, damit Lücken geschlossen werden.   |
| Karmuhilan und Anoop (2018) | Parameterprädiktion für gewünschte Nahtgeometrie  | ANN   | 18 Sätze                   | Mit dem trainierten Netz werden Parameter definiert, die ähnliche Höhen und Breiten liefern sollen. Diese werden jedoch nicht überprüft.   |
| Hu et al. (2020)            | Besten Abstand für zwei Nähte finden  | Aufbauend auf vorherigen Erkenntnissen (D. Ding et al. 2015) wird die beste Form der Einzelnaht gesucht. Darauf wird mit verschiedenen Modellen mathematisch der beste Abstand gesucht.     | 4 Sätze                    | Der optimale Abstand $d_w$ liegt im Bereich von 0,6317–0,7732 $w$ .  |

**Tabelle 3.3:** Übersicht zu Untersuchungen zur Geometrie von Schweißnähten (Fortsetzung)

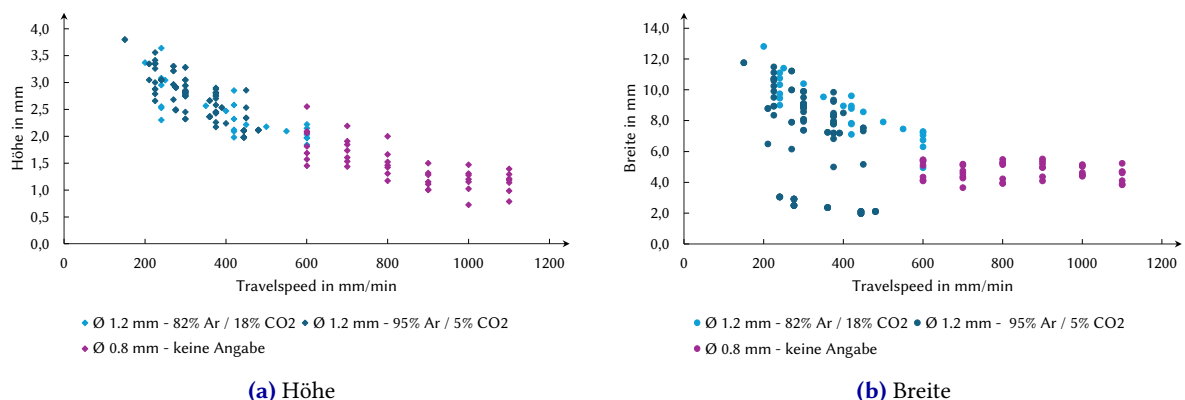
| Veröffentlichung      | Ziel   | Ansatz / Methodik   | Untersuchte Parametersätze | Ergebnis  |
|-----------------------|--|---|----------------------------|---|
| D. Ding et al. (2021) | Besten Abstand für zwei Nähte finden   | Mit dem mathematischen Zusammenhang von Einzelnaht und TOM aus D. Ding et al. (2015) wird ein Machine Learning Algorithmus trainiert und zur Prädiktion eingesetzt. | 200 Sätze                  | Machine Learning Modell liefert gute Ergebnisse zur Prädiktion  |
| Holzinger (2022)      | Untersuchung der Zusammenhänge von Schweißparametern zur Geometrie und den Materialeigenschaften | Festlegen von Parameterfenstern   | 66 Sätze                   | Es werden Parameter anhand von Heatmaps vorgestellt. Es stellt sich heraus, dass bei mehrbahnigen Schweißen ein $d_w \leq 0,66 w$ gewählt werden sollte |

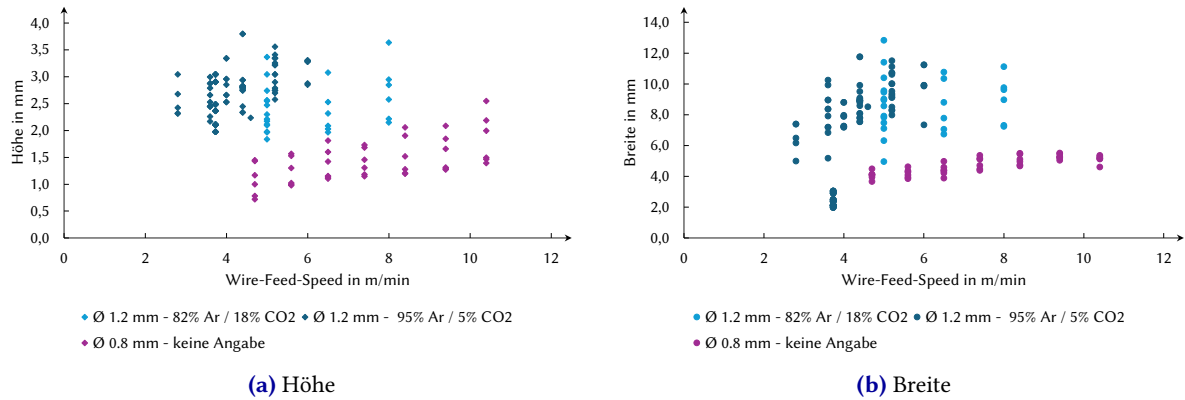
## Einzelnahtabmessungen

Einigen der aufgeführten Veröffentlichungen konnten Angaben zu den Schweißparametern und die sich daraus ergebende Schweißnahtabmessungen - Höhe und Breite - entnommen werden (D. Ding et al. 2015; Karmuhilan und Anoop 2018; Y. Li et al. 2018b; Suryakumar et al. 2011; Xiong et al. 2013; Xiong et al. 2014). In den folgenden Diagrammen (Abb. 3.1 bis 3.3) sind die entnommenen Werte für Höhe und Breite der Naht gegenüber den angegebenen Parametern für Travel-Speed (TS), Wire-Feed-Speed (WFS) und dem Verhältnis aus beiden aufgetragen.

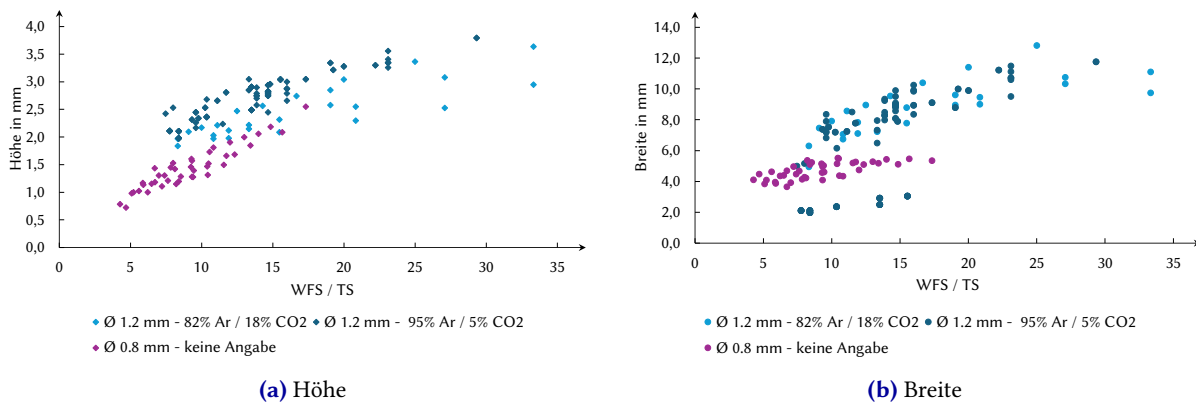
Die Diagramme vereinfachen die Zusammenhänge dabei stark, da in jedem aufgeführten Punkt noch mehr Einflüsse stecken, als in einem Diagramm unterschieden werden. Wie in Abschnitt 2.3 ausgeführt, haben beispielsweise auch die Brennerposition und das freie Drahtelektrodenende sowie der gewählte Schweißprozess einen Einfluss auf die Geometrie der Naht. Dennoch können die Ergebnisse allgemein beurteilt werden.

Es zeigt sich, was bereits Dickens et al. (1992) ermittelt haben: Höhe und Breite einer Naht verringern sich mit steigender Schweißgeschwindigkeit und erhöhen sich mit steigendem Drahtvorschub. Der Drahtvorschub hat allein keine große Aussagekraft, sondern kann nur bei gleichbleibender Schweißgeschwindigkeit verglichen werden. Beim Vergleich des Verhältnisses aus WFS/TS und den Abmessungen ist mit steigendem WFS/TS ein Anstieg in den Abmessungen zu erkennen.

**Abbildung 3.1:** Vergleich von Geometrie und Travel-Speed



**Abbildung 3.2:** Vergleich von Geometrie und Wire-Feed-Speed



**Abbildung 3.3:** Vergleich von Geometrie und dem Verhältnis aus Wire-Feed-Speed und Travel-Speed

Diese Tendenzen geben zwar einen ersten Eindruck über das Verhalten, hiermit kann jedoch keine Auswahl von Schweißparametern erfolgen. Eine Streuung von beispielsweise 2 mm bei einer vorgegebenen Schweißgeschwindigkeit ist deutlich zu hoch, um eine sichere Prognose liefern zu können. Allerdings können hieran die Randbedingungen zu den Abmessungen ermittelt werden. So liegt für einen 0,8 mm Draht die niedrigste erreichte Höhe bei 0,72 mm und die Breite bei 3,66 mm. Die maximalen Abmessungen ergaben sich für den 1,2 mm Draht zu 3,8 mm für die Höhe und 12,8 mm für die Breite. Der Großteil (über 80 %) liegt in einem Breitenbereich von 4,4 – 10 mm und in einem Höhebereich von 1,3 – 3,2 mm. Die Untersuchungen wurden lediglich mit Drahtvorschubgeschwindigkeiten über 4,7 m/min geführt.

#### Nahtform

Neben Breite und Höhe wurde in den aufgeführten Veröffentlichungen auch untersucht, welche mathematische Kurve die Form einer Einzelnaht am besten abbildet. Hier wurde immer die Annahme getroffen, dass die Schweißnaht symmetrisch ist und sich der Hochpunkt in der Mitte der Naht befindet. In den meisten Fällen stellte sich dabei die Parabel als beste Annäherung heraus.

#### Nahtabstand

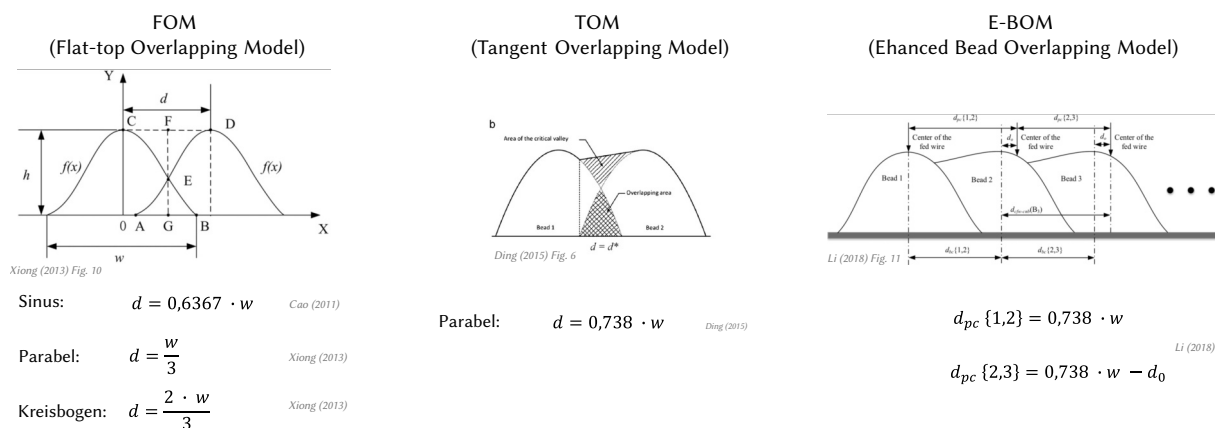
Die verschiedenen Veröffentlichungen zeigen unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung des Nahtabstandes. Aus Xiong et al. (2013) wird deutlich, dass der ideale Nahtabstand entscheidend von der vorhandenen

Nahtgeometrie abhängt, so ergibt sich für die Kreisbogenform ein anderer Abstand als für die Parabel. Auch hängt der errechnete ideale Abstand vom Überlappungsmodell ab, das gewählt wird. Drei Modelle werden nun vorgestellt. In Abb. 3.4 sind sie vergleichend dargestellt und der jeweils optimale Nahtabstand ist angegeben.

Der erste Ansatz (Cao et al. 2011; Xiong et al. 2013) geht davon aus, dass die Fläche zwischen den beiden Schweißnahthochpunkten flach ist. Hierbei wird der Abstand mit dem FOM (Flat-top Overlapping Model) berechnet.

D. Ding et al. (2015) stellen in ihren Untersuchungen fest, dass sich eine solche flache Oberfläche niemals bildet, sondern sich auf Grund von physikalischen Prozessen ein Tal ausbildet. Um dies zu berücksichtigen, entwickeln sie das TOM (Tangent Overlapping Model). Hierbei wird die Oberfläche zwischen den beiden Hochpunkten durch eine Tangente, die sich an die zweite Naht anlegt, beschrieben. Es ergibt sich ein größerer idealer Abstand als durch das FOM prognostiziert.

Eine letzte Weiterentwicklung zeigen Y. Li et al. (2018b). Sie haben festgestellt, dass sich der Hochpunkt der zweiten und aller weiteren Nähte von der geplanten Position (also dort, wo der Schweißdraht ansetzt) unterscheidet. Der Hochpunkt einer weiteren Naht wandert zur bereits geschweißten Naht (dies könnte auf den elektromagnetischen Blaseffekt zurückzuführen sein vgl. Abschnitt 2.3.2). Während das für die zweite Naht noch kein Problem darstellt, ist der Abstand zwischen dritter und zweiter Naht nun größer, was neben einer ungleichmäßigen Oberfläche auch zu Bindefehlern führen kann. Sie ermitteln mit Hilfe eines künstlichen neuronalen Netzes (ANN) den Versatz, um den sich der Hochpunkt verschiebt. Ihr Ansatz – das E-BOM (Enhanced Beads Overlapping Model) – sieht für die zweite Naht zunächst den Abstand nach D. Ding et al. (2015) und für die weiteren Nähte einen um die Prädiktion des Versatzes aus dem ANN verringerten Abstand vor. Das ANN ermittelt diesen Versatz anhand der Höhe und der Breite der Naht sowie dem geplanten Nahtabstand.



**Abbildung 3.4:** Nahtüberlappungsmodelle

### 3.1.2 Auskragendes Schweißen

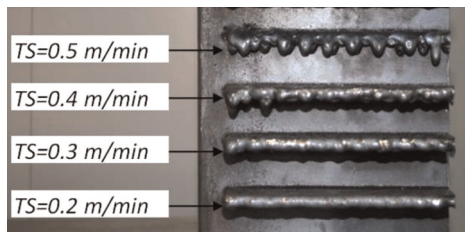
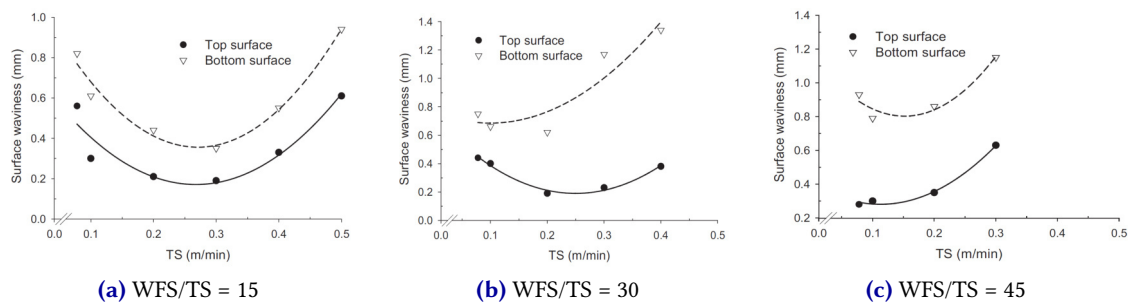
Neben der Geometrie einer in Wannelage geschweißten Naht ist es für das Slicing eines Bauteils auch wichtig zu wissen, wie sich auskragendes Schweißen auf die Naht auswirkt.

#### Horizontales Schweißen

Bereits Kazanas et al. (2012) haben gezeigt, dass es mit dem WAAM möglich ist, ohne Stützstrukturen Bauteile horizontal zu fertigen. Sie fanden heraus, dass es besser ist, wenn der Schweißbrenner nicht

horizontal steht, sondern in einem Winkel zur Horizontalen. Sie erhielten sowohl für 30° als auch für 45° gute Ergebnisse. Einen Winkel von maximal 45° zur Horizontalen schlägt auch Feucht (2023) vor.

Neben der Untersuchung, ob es möglich ist, horizontal zu fertigen, untersuchten Kazanas et al. (2012) auch, welchen Einfluss die Schweißparameter auf das Bauteil haben. Hierbei untersuchten sie bei drei Verhältnissen von WFS/TS den Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Oberflächenwelligkeit der Ober- und Unterseite eines gefertigten Blechs. Ergebnisse sind in Abb. 3.5 zu sehen. In allen Diagrammen ist zu erkennen, dass die Unterseite eine höhere Oberflächenwelligkeit aufweist als die Oberseite. Dies stellt auch Feucht (2023) fest. Zudem scheint es für jedes Verhältnis eine optimale Schweißgeschwindigkeit zu geben. Diese liegt in einem Bereich von 0,1 – 0,3 m/min.



(d) Foto der Ergebnisse bei WFS/TS = 30

**Abbildung 3.5:** Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Oberflächenwelligkeit (Kazanas et al. (2012))

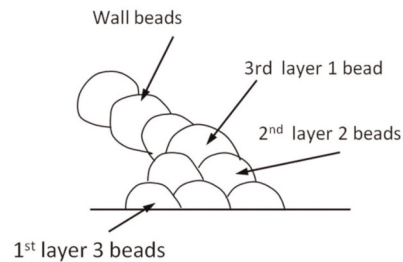
Ebenfalls mit dem horizontalen Schweißen beschäftigen sich Yuan et al. (2020), dabei verwenden sie eine horizontale Brennerposition. Sie erhalten trotz horizontaler Position verwendbare Ergebnisse. Sie untersuchen zusätzlich den Einfluss der Parameter WFS und TS auf die Schweißnaht. Auch sie stellen fest, dass niedrige Drahtvorschub- und Schweißgeschwindigkeiten zu besseren Ergebnissen führen.

### Schweißen in Überhangwinkeln

Kazanas et al. (2012) untersuchen außerdem mit einem Winkel zur Horizontalen geschweißte Bleche. Hierbei fertigen sie Bleche für Winkel zwischen 60° und 15° zur Horizontalen. Der Schweißbrenner wird dabei immer in der Fertigungsrichtung ausgerichtet. Vor allem für kleine Winkel empfehlen sie, zunächst eine kleine Pyramide aus 6 Nähten in senkrechter Brennerposition zu fertigen und dann erst mit der Auskrägung zu beginnen (siehe Abb. 3.6). Weiterhin stellen sie fest, dass sich bei gleichen Schweißparametern die effektive Dicke der Schweißnaht mit zunehmenden Fertigungswinkel verringert. Zwischen einer vertikal gefertigten Wand mit der Dicke 4 mm und einer horizontal gefertigten Wand stellen sie einen Unterschied von 1,3 mm fest.

Xiong et al. (2017) untersuchen das Fertigen von Blechen mit Überhangwinkeln bei senkrechter Brennerposition. Sie stellen fest, dass der maximal mögliche Überhangwinkel von den Schweißereinstellungen





**Abbildung 3.6:** Vorschlag von Kazanas et al. (2012) kleine Überhangwinkel zu fertigen

beeinflusst wird. So verringert sich der maximale Überhangwinkel bei gleicher Schweißgeschwindigkeit mit zunehmendem Drahtvorschub und er erhöht sich bei gleichem Drahtvorschub mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit. Sie gehen dabei nicht auf die Veränderung der Lagenhöhe ein, die in den von ihnen vorgestellten Bildern deutlich zu sehen ist.

### 3.1.3 Regeln für eine erfolgreiche Bahnplanung

Um Bauteile erfolgreich zu slicen, müssen neben dem Wissen über die erreichbaren geometrischen Abmessungen und Überhangwinkel weitere Punkte beachtet werden. Daher wurden verschiedene Strategien entwickelt.

#### Schweißnahtanfang und -ende

Die zuvor vorgestellten Untersuchungen beziehen sich immer auf die Geometrie der Schweißnaht im Regelbereich. Die Geometrie des Schweißanfangs und Schweißendes weichen von diesen ab. So ist der Schweißanfang häufig erhöht und das Schweißende fällt niedriger aus. Eine Erklärung für den erhöhten Start ist die Kommunikationszeit zwischen dem Schweißgerät und der führenden Maschine, eine Erklärung für das erniedrigte Ende ist die Möglichkeit des Schweißguts in mehrere Richtungen zu entweichen, da es nicht durch die weitere Schweißnaht behindert wird. Zusätzlich spielen auch die verschiedenen Kräfte im Schweißprozess eine Rolle für diese Erscheinung (Hu et al. 2018).

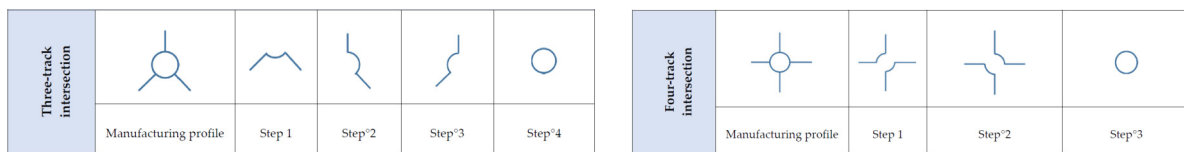
Um diesen Effekt möglichst gering zu halten und auch an Nahtanfang und -ende eine gleichmäßige Geometrie zu erhalten, wird sehr häufig eine wechselnde Schweißrichtung in den aufeinander folgenden Lagen verwendet und empfohlen (Feucht 2023; Rauch et al. 2021; Kazanas et al. 2012). Weiterhin sollten Start- und Stopppunkte innerhalb einer Lage möglichst reduziert sein, um die negativen Effekte, die damit einhergehen, zu reduzieren (D. Ding et al. 2014; Rauch et al. 2021; Feucht 2023).

#### Kreuzungspunkte

In Bauteilen kann es neben Überhang auch zu Punkten kommen, an denen sich mehrere Bahnen treffen. Solchen Kreuzungsstellen muss beim Slicing eine besondere Beachtung zukommen. Mehnen et al. (2014) haben festgestellt, dass sich bei Überlappen zweier Nähte in immer gleicher Schweißrichtung mit der im Kreuzungspunkt entstehenden Überhöhung auch ein Fehler direkt hinter dieser ergibt. Die vorgeschlagene Lösung hierzu ist der Wechsel der Schweißrichtung in jeder Lage. Hierdurch wird der Fehler zwar verhindert, allerdings ergibt sich dennoch eine Überhöhung, die mit zunehmender Bauteilhöhe höher wird und dann weitere Problematiken nach sich zieht (zum Beispiel Anstoßen der Elektrode oder des Brenners an die gedruckte Struktur).

Venturini et al. (2016) untersuchen sechs verschiedene Varianten einen T-Stoß herzustellen. Hier stellt sich je nach Variante ein Tal oder eine Überhöhung im Kreuzungspunkt ein. Die beste Variante hat eine relativ gleichmäßige Oberfläche. Diese Variante sieht alle 4 Lagen eine Auffüllung des entstehenden Lochs im Kreuzungspunkt vor.

Rauch et al. (2021) gehen auf die bei Mehnen et al. (2014) entstandene Problematik der Überhöhung ein. Ihr Vorschlag ist die Auflösung des Kreuzungspunktes in einen Kreis, an welchen die Wände dann anschließen können. Jede Wand wird mit zwei Schweißnähten, von welchen jede jeweils zwei Wände über den Kreisbogen verbindet, gefertigt. Als letztes wird der innere Kreisring gedruckt. Das Prinzip ist in Abb. 3.7 gezeigt.



**Abbildung 3.7:** Auflösung der Kreuzungsstelle in einen Kreis und Darstellung der jeweiligen Bahnplanung (Rauch et al. (2021))

### Änderungen Schweißrichtung, Ecken und Kanten

Werden nicht mehr nur gerade Linien, sondern Ecken gefertigt, kommt es an diesen Stellen zu Materialanhäufung. D. Ding et al. (2014) empfehlen daher solche Eckpunkte möglichst zu vermeiden und eher flache Winkel zu verwenden.

### Aufbaurichtung

Die vorgestellten Untersuchungen zum auskragenden Schweißen haben gezeigt, dass es möglich ist, sogar horizontal zu fertigen ohne Stützstrukturen zu benötigen. Allerdings zeigen die Untersuchungen auch, dass hierzu sehr kleine Geschwindigkeiten notwendig sind, wodurch die Aufbaurichtung des Drucks deutlich reduziert wird. Daher kann es sinnvoll sein, die Struktur in mehrere Teile zu unterteilen, in denen dann die Aufbaurichtung gewechselt wird (Rauch et al. 2021; Feucht 2023).

## 3.2 Materialeigenschaften

Neben geometrischen Größen, die für die korrekte Programmierung des Druckprozesses notwendig sind, muss zur Verwendung der gedruckten Körper als tragendes Bauteil auch ihre Tragfähigkeit sichergestellt sein. Daher werden folgend verschiedene Ergebnisse vorgestellt.

### 3.2.1 Mechanische Eigenschaften aus Zugversuchen

Vor allem in den letzten fünf Jahren hat das Interesse an niedriglegiertem Stahl als Druckwerkstoff zugenommen. Daher konnten mehrere Veröffentlichungen, die Zugversuche und ihre Ergebnisse zu den Materialien ER70S-6, G3Si1 oder G4Si1 enthielten, analysiert werden. Aus einigen der Veröffentlichungen konnten keine Ergebnisse ermittelt werden, da nur die Kurven ohne Angabe der Werte oder nur Wertebereiche angegeben waren. In Tabelle 3.4 sind die Ergebnisse aus 20 Veröffentlichungen, die in den Jahren zwischen 2017 und 2023 entstanden und genug Informationen enthielten, angegeben. Eine detaillierte Liste, welche Informationen und Ergebnisse aus welcher Veröffentlichung entnommen

wurden, ist in Anhang A zu finden. Hier ist auch zu sehen, dass teilweise nur Mittelwerte über mehrere Proben ohne Angabe der Streuung angegeben wurden.

**Tabelle 3.4:** Ergebnisse von Zugversuchen aus 20 Veröffentlichungen der Jahre 2017 - 2023

| Belastungsrichtung |                                    | E-Modul<br>in GPA | Streckgrenze<br>in MPA | Zugfestigkeit<br>in MPA | Bruchdehnung<br>in % |
|--------------------|------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Gesamt             | Minimum                            | 180,0             | 265,0                  | 405,0                   | 10,0                 |
|                    | Mittelwert ±<br>Standardabweichung | 205,5 ± 12,6      | 375,9 ± 42,4           | 498,5 ± 53,4            | 32,9 ± 7,2           |
|                    | Maximum                            | 245,7             | 519,5                  | 693,5                   | 49,7                 |
|                    | Anzahl der Proben                  | 99                | 159                    | 184                     | 168                  |
| 0°                 | Minimum                            | 194,0             | 292,0                  | 428,0                   | 26,0                 |
|                    | Mittelwert ±<br>Standardabweichung | 203,4 ± 6,2       | 377,3 ± 49,7           | 497,5 ± 60,4            | 32,4 ± 4,8           |
|                    | Maximum                            | 214,0             | 519,5                  | 693,5                   | 44,0                 |
|                    | Anzahl der Proben                  | 17                | 41                     | 49                      | 44                   |
| 45°                | Minimum                            | 182,2             | 319,0                  | 424,0                   | 29,0                 |
|                    | Mittelwert ±<br>Standardabweichung | 203,3 ± 19,0      | 369,8 ± 35,6           | 489,3 ± 54,5            | 32,7 ± 3,1           |
|                    | Maximum                            | 245,7             | 428,9                  | 576,8                   | 39,0                 |
|                    | Anzahl der Proben                  | 14                | 19                     | 21                      | 21                   |
| 90°                | Minimum                            | 180,0             | 265,0                  | 405,0                   | 10,0                 |
|                    | Mittelwert ±<br>Standardabweichung | 206,5 ± 12,6      | 372,6 ± 39,1           | 497,5 ± 48,0            | 32,9 ± 8,8           |
|                    | Maximum                            | 237,1             | 461,5                  | 618,5                   | 49,7                 |
|                    | Anzahl der Proben                  | 56                | 87                     | 102                     | 91                   |

Die Übersicht in Tabelle 3.4 zeigt die in den Veröffentlichungen enthaltenen Minimal- und Maximalwerte sowie die Mittelwerte mit Angabe der Standardabweichung, die sich aus allen angegebenen Werten ergeben. Eine leichte Ungenauigkeit ergibt sich dadurch, dass hierbei die in den Veröffentlichungen angegebene Einzel- und Mittelwerte gleich berücksichtigt wurden. Für eine erste Einschätzung wurde diese Ungenauigkeit als hinnehmbar eingestuft. Zu den Werten ist jeweils auch die Anzahl der untersuchten Proben angegeben. Hierzu wurden die jeweils angegebenen Probenanzahlen summiert. In Tabelle 3.4 sind die Werte sowohl über alle Belastungsrichtungen (gesamt) als auch nach den Richtungen 0°, 45° und 90° zur Schweißrichtung aufgeschlüsselt angegeben. Huang et al. (2022a) enthielt zusätzlich Ergebnisse für die Richtungen 30° und 60°, welche hier nicht aufgeführt sind, sodass sich die Anzahl der Proben insgesamt von der Summe der Proben aus 0°, 45° und 90° unterscheidet.

Im Mittel zeigen die Werte keine Abhängigkeit von der Belastungsrichtung. Bei den Festigkeiten wird jedoch der minimale Wert bei 90° Belastungsrichtung und der maximale Wert bei 0° Belastungsrichtung ermittelt. In 90° Belastungsrichtung kam es zudem auch zu vorzeitigem Versagen - lediglich 10 % Bruchdehnung.

### Bewertung als Baustahl

Anhand der Mittelwerte kann der gedruckte Stahl in allen Belastungsrichtungen dem S355 zugeordnet werden. Allerdings wird die Zulassung nicht nach Mittelwert, sondern nach geringstem Wert geführt

und so würde in den Richtungen 0° und 45° eine Klassierung in S235 erfolgen, in der Richtung 90° würde aufgrund der geringen Dehnung keine Zulassung erfolgen.

Bei Festigkeiten und Bruchdehnung ist allerdings die Streuung sehr hoch. Dies liegt daran, dass Ergebnisse unterschiedlicher Herstellprozesse zusammen bewertet wurden. In den untersuchten 20 Veröffentlichungen wurden 31 verschiedene Herstellprozesse der Zugproben untersucht. Von diesen wurden in 25 Fällen alle der zur Klassifizierung nach DIN EN 10025-2 (2019) notwendigen mechanischen Werte – Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung – angegeben. Von diesen 25 Fällen wurde in zwei Fällen nicht die ausreichende Bruchdehnung erreicht. Der Großteil der Ergebnisse kann dem S355 zugeordnet werden - 14 Herstellprozesse lieferten entsprechende Werte. S235 und S460 wurden jeweils einmal erzielt. Die restlichen sieben Herstellprozesse lieferten Werte für die Einordnung in S275.

#### **Prozessabhängigkeit**

Mit der detaillierten Analyse (Anhang A) unter Berücksichtigung der Prozessparameter wurde zusätzlich untersucht, ob eine Abhängigkeit der Materialeigenschaften von einem bestimmten Prozessparameter abgeleitet werden kann. Hier konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Es zeigt sich, dass die Zugfestigkeit mit der Drahtvorschubgeschwindigkeit minimal ansteigt. Allerdings streuen die Werte stark, sodass aus den Ergebnissen keine Abhängigkeit abgeleitet werden kann.

Nimmt man die Ergebnisse des 0,9 mm dicken Drahts aus der Analyse heraus – die Ergebnisse in diesen Veröffentlichungen waren generell unterdurchschnittlich – kann man mit steigendem Durchmesser eine Abnahme der Festigkeiten erkennen. Allerdings waren die Prozessparameter entsprechend der Drahtdicke andere, sodass die Ergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden können.

Explizit mit dem Vergleich von Prozessparametern beschäftigen sich Prado-Cerqueira et al. (2018). Hier wird allerdings lediglich die Härte verglichen, es zeigt sich keine Abhängigkeit zwischen thermischen Input und gemessener Härte. Auch Nguyen et al. (2023) beschäftigen sich mit den Materialeigenschaften in Abhängigkeit von den gewählten Prozessgrößen Travelspeed, Stromspannung und Stromstärke. Allerdings können ihre Erkenntnisse lediglich qualitativ beurteilt werden, da die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen eindeutig ohne Feindehnmesser aufgenommen und interpretiert wurden. Auch ist unklar, ob es sich wirklich um Spannungen handelt. Es zeigt sich prinzipiell keine Abhängigkeit der Kennwerte von den Prozessparametern. Lediglich ein Parametersatz liefert eine deutlich erhöhte Festigkeit. Unklar ist, inwiefern dies für den gesamten Parametersatz spricht oder ob es sich nur um einen einzelnen erhöhten Wert handelt.

Diese Unabhängigkeit kann auf den Ausgangswerkstoff zurückgeführt werden: Der un- und niedriglegierte Stahl ist recht unempfindlich auf Wärmebehandlung. Andere Werkstoffe reagieren deutlich empfindlicher auf die gewählten Einstellungen. Dies zeigen beispielsweise Babu et al. (2023) für hochfesten Stahl und Sood et al. (2023) für eine Nickel-Eisen-Legierung.

#### **Bahnplanungsabhängigkeit**

Huang et al. (2022a) untersuchen in ihrer Veröffentlichung auch den Einfluss der Slicingstrategie auf die Materialeigenschaften. In den untersuchten vier Fällen wird jeweils eine Bahn je Lage geschweißt, die Richtung der darauffolgenden Nähte ist unterschiedlich oder es wird in zwei Teilen mit einer langen Pause gefertigt. Die Ergebnisse der Zugversuche weisen keine Abhängigkeit von der gewählten Strategie auf.

Eine andere Untersuchung zur Bahnplanungsabhängigkeit führen Reimann et al. (2020). Hier wird untersucht, inwiefern sich die Materialeigenschaften von Bauteilen mit unterschiedlicher Bahnanzahl in einer Lage bei gleichen Schweißparametern unterscheiden. Sie stellen fest, dass die Festigkeit mit der Bahnanzahl zunimmt.

### 3.2.2 Härte

Neben Zugversuchen wird in einigen Veröffentlichungen auch die Härte untersucht. Die sich ergebenden Mittelwerte liegen zwischen 134 HV (Tripathi et al. 2022) und 240 HV (Lu et al. 2017), im Mittel wird eine Härte von 165 HV erreicht, die Streuung der Härtemesswerte innerhalb eines Bauteils liegt im Bereich von 5 bis 15 HV (Aldalur et al. 2020; Ermakova et al. 2020; Lu et al. 2017; Ma et al. 2021; Müller et al. 2019; Rafieazad et al. 2021; Tankova et al. 2022; Tripathi et al. 2022). Die mittleren Härtewerte passen zu den jeweils gemessenen Festigkeiten. Zusätzlich finden sich teilweise Zusammenhänge zwischen der Höhe der Messstelle und der gemessenen Härte, besonders die letzte Lage weist häufig eine besondere Härte auf (Müller et al. 2019; Lu et al. 2017; Tripathi et al. 2022).

Müller et al. (2019) stellen weiterhin fest, dass es vor allem beim CMT-Verfahren in der Zone zwischen zwei Lagen zu einer starken punktuellen Erhöhung der Festigkeit kommt. Dies begründen sie mit der geringen Glühzeit und -temperatur. Es ist jedoch zu beachten, dass die untersuchten Bauteile in einer „Point-by-Point“-Weise hergestellt wurden – hierbei werden einzelne Schweißpunkte aufeinander gesetzt, um einen dünnen Stab herzustellen. Ob dieser Effekt bei längeren Nähten genauso stark auftritt, kann hieraus nicht geschlossen werden.

### 3.2.3 Eigenspannungen und Verzug

Bereits Spencer et al. (1998) haben Untersuchungen zu den Eigenspannungen in additiv gefertigten Bauteilen angestellt. Sie stellten fest, dass die Eigenspannungen mit zunehmender Zwischenlagentemperatur abnahmen. Allerdings verschlechterte sich hiermit auch die Oberflächenqualität. Dass mit zunehmender Zwischenlagentemperatur die Eigenspannungen abnehmen, stellte auch J. Ding (2012) in numerischen Untersuchungen fest.

Eigenspannungen entstehen durch das Zusammenziehen der abkühlenden Schmelze, das durch den kalten Verbindungspartner unterbunden wird. Gibt das Bauteil diesem Zusammenziehen nach, kommt es zu Verzug. Verzug entsteht daher bei dünnen Bauteilen schneller. Hildebrand und Bergmann (2019) stellen einen einfachen Ansatz zur numerischen Berechnung des Verzugs bei WAAM-Bauteilen vor.

Feucht (2023) empfiehlt Fugen vorzusehen, um den Verzug durch späteres Zuschweißen zu minimieren. Generell lässt sich sagen, dass geschlossene und/oder ausgesteifte Querschnitte weniger verzugsanfällig sind.

### 3.2.4 Korrosion

Ron et al. (2019) untersuchen die Korrosionsbeständigkeit von WAAM-gefertigtem Stahl. Hierzu unterziehen sie gedruckte Proben und gewalzte Proben drei Prüfungen. Nach ihren Untersuchungen weisen die beiden Materialien ein vergleichbares Verhalten auf. Getestet wurde lediglich ein Parametersatz mit einem Argonanteil von 98 % im Schutzgas. Für eine abschließende Bewertung wären mehrere Untersuchungen dieser Art wünschenswert.

Neben der Beurteilung des Materials spielt die raue Oberfläche des WAAM eine besondere Rolle in Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit, da sich hier Schmutz und Wasser ablagern.

### 3.3 Prozesssteuerung

Neben der Bahnplanung spielen auch die Prozesseinstellungen, die den Schweißprozess nicht direkt beeinflussen, eine wichtige Rolle für eine gelungene Fertigung des Bauteils und können den Herstellprozess beschleunigen oder verlangsamen. Neben der Bahnplanung sind die geometrischen Eigenschaften – vor allem die Oberflächenwelligkeit –, die sich durch die gewählten Prozesseinstellung ergeben, wichtig für die Einschätzung der Bauteildicke und der damit einhergehenden Tragfähigkeit.

#### 3.3.1 Kühlung

Zur Steigerung der Prozessgeschwindigkeit kann eine zusätzliche Kühlung hilfreich sein. Außerdem hat die Kühlung einen positiven Einfluss auf die Regelmäßigkeit der Oberfläche (Reisgen et al. 2020; Henckell et al. 2017). Sowohl Feucht et al. (2020a) als auch Reisgen et al. (2020) zeigen, dass sich für eine effiziente Kühlung eine Kombination aus Druckluft und Aerosol eignen.

#### 3.3.2 Oberflächenwelligkeit

Die Oberflächenwelligkeit – häufig auch mit dem englischen Begriff Surface Waviness bezeichnet – ist bei WAAM-Bauteilen augenscheinlich. Diese Unregelmäßigkeit kann verschiedene negative Effekte haben. Einerseits wird die effektive Breite verringert, andererseits kann es in manchen Fällen notwendig sein, plane Oberflächen zu haben – beispielsweise, um das additive Bauteil mit anderen Bauteilen verbinden zu können. Wie stark die Oberflächenwelligkeit ausgeprägt ist, hängt von den verwendeten Schweißparametern und Prozesseinstellungen ab (vgl. auch Abschnitt 3.1.2).

#### 3.3.3 Echtzeitanpassungen

Mittlerweile gibt es einige Lösungen, die den Schweißprozess in Echtzeit überwachen und gegensteuern können, sollte der Druck nicht die gewünschte Qualität oder falsche Abmessungen liefern. Auch gibt es Ansätze, die Schweißparameter in einer Schweißnaht zu verändern, um eine möglichst gleichmäßige Oberfläche zu liefern und auf Ungenauigkeiten aus vorherigen Lagen einzugehen (S. Tang et al. 2021; Xiong et al. 2021).

## 3.4 Weitere Untersuchungen

### 3.4.1 Nachhaltigkeit

Mit der Nachhaltigkeit von WAAM-Bauteilen hat sich Muth (2021) in ihrer Bachelorthesis beschäftigt. Hierbei hat sie eine Steife in konventioneller und additiver Ausführung verglichen. Ebenso hat sie eine konventionelle Kopfplatte mit einer materialsparenden WAAM-Variante verglichen. In ihrer Analyse stellte sich der Energieverbrauch durch das WAAM als entscheidender Faktor heraus, da zunächst der Draht unter hohem Energieverbrauch hergestellt wird und dieser dann noch einmal beim WAAM

aufgeschmolzen wird. So ergab sich, dass auch eine materialsparende Variante der Kopfplatte schlechtere Auswirkungen auf die Umwelt hatte als die konventionelle Ausführung.

Allerdings wurde hier ein niedrigkomplexes konventionelles Bauteil, welches nach der Blechherstellung bis zur endlichen Platzierung nur sehr geringen Aufwands bedarf, mit einem hochkomplexen WAAM-Bauteil verglichen. Handelt es sich um ein Bauteil, das auch im konventionellen Herstellverfahren zusätzlich zur Materialherstellung einen hohen Energiebedarf aufweist, könnte die Analyse zu Gunsten des WAAM-Bauteils ausfallen. Dies zeigen Kokare et al. (2024) in ihrer Analyse. Sie vergleichen ein maschinenbautypisches Bauteil, welches entweder konventionell aus einem großen Stahlblock gefräst werden muss oder durch das WAAM hergestellt und dann auf die Endkontur gefräst wird. Die Analyse untersucht, bis zu welcher Genauigkeit das WAAM-Bauteil ein besseres Ergebnis liefert. Sie ermitteln ein maximales Übermaß von 4 mm, das von der Oberfläche herabgefräst werden darf, ehe die neben dem WAAM-Herstellprozess zusätzliche benötigte Energie für das Fräsen die Umwelt so stark belastet, dass die konventionelle Herstellmethode besser bewertet werden würde.

Eine weitere Untersuchung zur Nachhaltigkeit zeigen Bekker und Verlinden (2018). Sie untersuchen jedoch nicht unlegierten Stahl, sondern Edelstahl und identifizieren die Herstellung des Rohmaterials bei konventioneller Fertigung und beim WAAM als Hauptfaktor. Sie geben an, dass dieser Einfluss für niedriglegierten Stahl geringer ausfallen würde. Neben dem Material hat der Schweißprozess den größten Einfluss auf die Umwelteinwirkungen des WAAM. Zu 44 % ist hierfür der Energieverbrauch des Prozesses verantwortlich. 48 % der negativen Umwelteinwirkungen entstehen jedoch durch das verwendete Schutzgas. Untersucht wurde eine Zusammensetzung von 98 % Argon und 2 % CO<sub>2</sub>. Nach ihnen könnte eine Steigerung der Prozessauftragsrate die Ergebnisse verbessern. Weiterhin weisen sie auf das Potential der freien Formgebung hin und dass dadurch materialsparende Bauteile entstehen können, die entsprechend weniger schlechte Effekte haben können.

#### **3.4.2 Wirtschaftlichkeit**

Die Bauteile Steife und Kopfplatte wurden ebenfalls in der Bachelorarbeit von Katzenmayer (2021) hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht. Er stellte fest, dass die Steife, obwohl sie nicht formoptimiert war, bereits bei einer leicht gesteigerten Auftragsrate mit der konventionellen Ausführung mithalten kann. Hierzu darf der Roboter keinen Stillstand haben, sondern muss wirtschaftlich eingesetzt werden und in der Abkühlzeit eines Bauteils bereits ein anderes schweißen. Durch den sehr aufwendigen Druck der optimierten Variante der Kopfplatte, zeigte sich hier eine deutliche Unterlegenheit der additiv hergestellten Bauteile gegenüber der einfachen und kostengünstigen konventionellen Ausführung.

### **3.5 Bedeutung der Forschungserkenntnisse für die vorliegende Arbeit**

Aus der Literaturanalyse können die folgenden Schlüsse und Maßnahmen gezogen werden:

- Aufgrund der Vielseitigkeit des Prozesses und der Möglichkeiten die Prozessparameter einzustellen, kann keine Herleitung der Nahtgeometrie anhand einer mathematischen Formel erfolgen. Die Tendenzen können jedoch verwendet werden, um von einem gewählten Parameterset aus die Geometrie in einem gewissen gewünschten Maße zu verändern.

- Die Prozessvielseitigkeit führt auch dazu, dass die Materialeigenschaften streuen und die Eigenschaften daher für den verwendeten Prozess spezifisch ermittelt werden sollten.
- Teilweise zeigt sich Anisotropie, teilweise zeigt sich keine Anisotropie. Diese muss daher für den gewählten Parametersatz separat untersucht werden.
- Trotz dieser Streuung zeigt sich keine ausgeprägte Abhängigkeit von den Prozessparametern, die die Materialeigenschaften stark verändern könnten.
- Zum idealen Nahtabstand gibt es verschiedene Ansätze, die auch von der Nahtform abhängen. Je nach Modell, Prozesseinstellung und Schweißnahtform liegt er im Bereich von 0,333 bis 0,738 der Nahtbreite. Es sollte untersucht werden, welcher Abstand für den gewählten Parametersatz am besten passt.
- Eine Untersuchung zeigt die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Bahnanzahl in einer Lage. Dieser Zusammenhang wird näher betrachtet.
- Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass jeder Überhangwinkel mit dem WAAM herstellbar ist. Allerdings sind hierzu sehr kleine Schweißgeschwindigkeiten und Drahtvorschubraten zu wählen. Außerdem verändert sich die Nahtgeometrie. Dies muss im Slicing zusätzlich berücksichtigt werden.
- Schweißstart- und -endpunkte sowie scharfe Ecken und Kanten sollten reduziert werden.
- Um Eigenspannungen und Verzug zu vermeiden, sollten möglichst hohe Zwischenlagentemperaturen verwendet werden. Diese Temperatur wird jedoch durch die gewünschte Oberflächenqualität begrenzt. Auch kann der Verzug durch geschlossene Querschnitte verhindert werden.
- Um ein WAAM-Bauteil so einsetzen zu können, dass es in ökonomischer und ökologischer Hinsicht einen Vorteil schafft, sollte es möglichst materialsparend, einfach und schnell herstellbar sein und eine geringe Nachbearbeitung erfordern.



# 4 VORSTELLUNG DER WAAM-PROZESSPARAMETER

Der WAAM-Prozess wird derzeit noch erforscht. Es gibt keine Parametersätze, die einem Anwender zur Verfügung stehen, um ein gewünschtes Ergebnis (wie Nahtgeometrie oder Materialeigenschaften) zu erhalten. Dies ist auch durch die Vielzahl von WAAM-Systemen begründet, da das gewählte System bereits Auswirkungen auf das Ergebnis hat.

## 4.1 Einflussgrößen

Das folgende Schaubild (Abb. 4.1) soll die verschiedenen Einflussgrößen, die den Herstellungsprozess und das Ergebnis beeinflussen, veranschaulichen und stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das Schaubild ist in drei Bereiche unterteilt: Das System, die allgemeine Prozesssteuerung und die Schweißprozesssteuerung selbst. Eine Besonderheit bilden die geometrischen Randbedingungen, die in allen drei Bereichen zu finden sind und durch den helleren Bereich gekennzeichnet sind. Im Folgenden werden die Bereiche vorgestellt und die für diese Arbeit gewählten Einstellungen dargelegt.

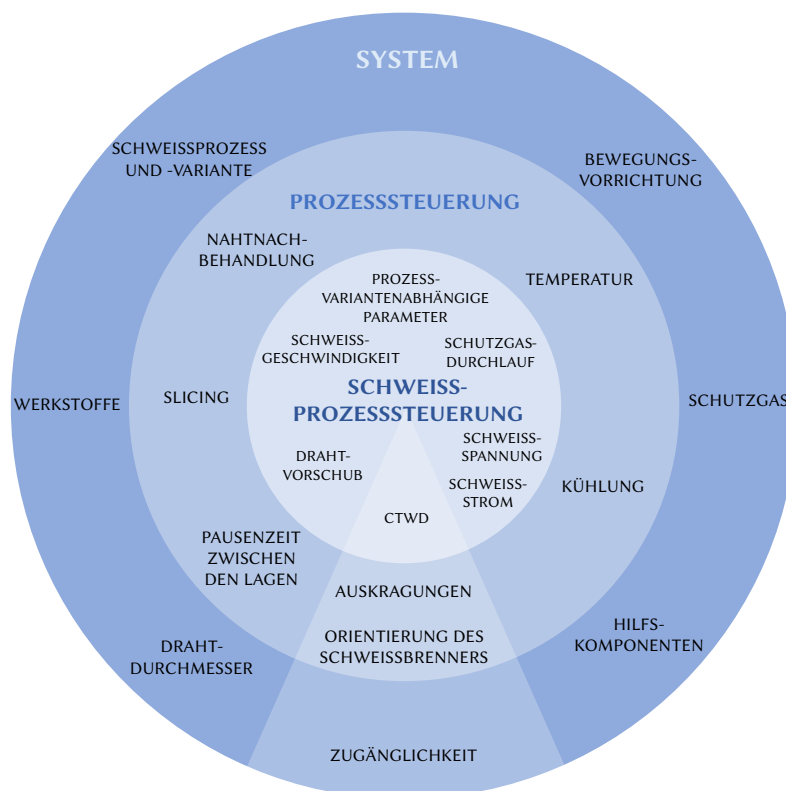


Abbildung 4.1: Einflussparameter

### 4.1.1 System

#### Grundlegende Geräte

Das System beschreibt die grundlegenden Randbedingungen in denen gefertigt wird. Ein WAAM-System besteht grundsätzlich aus einem Schweißgerät, mit den für den Schweißprozess notwendigen Komponenten, einer Vorrichtung, die den Schweißbrenner bewegen kann, sowie einer Steuerung für beide Geräte. Die Bewegung kann durch ein Portal, wie man es von den Kunststoff-3-D-Druckern für den Hausgebrauch kennt, oder durch einen Roboterarm ausgeführt werden. Wann welche Einrichtung besser geeignet ist, wird unter anderen in Bandari et al. (2015) diskutiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der 6-achsige Roboterarm Smart NM 16-3.1 der Firma Comau mit der zugehörigen Steuereinheit Comau C4G RCC1 genutzt.

#### Schweißprozess

Für das WAAM sind verschiedene Lichtbogen-Schweißprozesse (MIG-, MAG- oder WIG-Schweißen) einsetzbar. Um den mehrlagigen Aufbau der 3-D-gedruckten Struktur zu ermöglichen und Wegschmelzen der gedruckten Struktur zu vermeiden, sollte der Prozess energiereduziert sein. Als aussichtsreiche Prozessvariante hat sich hierfür das Cold-Metal-Transfer-Verfahren (CMT-Verfahren) der Firma Fronius herausgestellt. Als weitere Untervariante wird im Rahmen der Arbeit das CMT-Cycle-Step-Verfahren genutzt, welches eine sehr einfache Steuerung der Geometrieigenschaften der Schweißnaht ermöglicht. Der Schweißprozess wird durch die Schweißstromquelle CMT Advanced 4000 von Fronius gesteuert. Die erwähnte Prozessvariante CMT-Cycle-Step durch die Kennlinie CMT 1840 von Fronius geregelt.

#### Zusätzliche Komponenten

Je nach gewähltem Schweißprozess muss das System um notwendige und kann durch nützliche Komponenten erweitert werden. Eine beispielsweise für das Metall-Aktiv-Gas-Schweißen notwendige Komponente ist das Aktiv- bzw. Schutzgas. Eine nützliche Komponente kann ein Dreh-Kipp-Tisch sein, um die gute Erreichbarkeit des Werkstücks auch in schwierigen Positionen und somit einen stabileren Prozess zu gewährleisten.

Als ergänzende Komponente wurde ein Niederdrucksystem mit koaxialen Sprühdüsen verwendet, welches mit Hilfe von Druckluft destilliertes Wasser als feinen Sprühnebel versprüht und zwischen den Schweißlagen zusätzlich zur Abkühlung der Schweißnaht beiträgt. Diese Art der Kühlung hat sich als effektiv und nicht schädlich herausgestellt (vgl. Abschnitt 3.3.1). Ein Dreh-Kipp-Tisch wird nicht verwendet.

#### Materialien

Im Rahmen der Arbeit soll durch die Auswahl der Eingangsmaterialien untersucht werden, inwieweit handelsübliche und günstige Komponenten verwendet werden können, um tragfähige Bauteile erstellen zu können. Daher wird als Drahtmaterial der kostengünstige und im Bauwesen häufig verwendete Schweißzusatzwerkstoff G3Si1 verwendet (Drahtbezeichnung: Weko 2 – Hersteller: WDI – DIN EN ISO 14341-A G3Si1 – Durchmesser: 1,2 mm). Die Eigenschaften des gedruckten Materials werden unmittelbar durch den verwendeten Schweißdraht beeinflusst. Zu dem gewählten Draht wird als Schutzgas typischerweise ein Argon-Kohlenstoffdioxid-Gas verwendet. Ein häufig verwendetes Mischverhältnis ist 18 % CO<sub>2</sub> zu 82 % Ar (Gasbezeichnung: Ferroline C18 – Hersteller: Messer – ISO 14175 M21: 82 % Ar,

18 % CO<sub>2</sub>). Eine Optimierung der Eigenschaften durch die Auswahl von anderen Komponenten erfolgt nicht.

Zusätzlich hat der Drahtdurchmesser einen Einfluss auf die Auftragsrate und die notwendigen Prozessparameter. In Deutschland werden im Bauwesen typischerweise Drahtdurchmesser zwischen 0,8 mm und 1,2 mm genutzt, in Ausnahmefällen wird ein Draht der Stärke 1,6 mm genutzt. Für die Arbeit wird ein Draht von 1,2 mm gewählt, dieser erschien für eine höhere Auftragsrate sinnvoll. Vergleichende Untersuchungen zu anderen Durchmessern wurden nicht geführt. Zwar ist bekannt, dass mit einem dünneren Draht bei gleicher Stromstärke eine höhere Abschmelzleistung erreicht werden kann, jedoch ist die maximale Abschmelzleistung durch den Drahtdurchmesser limitiert, sodass für große Abschmelzleistungen ein höherer Drahtdurchmesser gewählt werden muss (Siewert 2014).

Sollen die gefertigten Bauteile als Erweiterung von Walzbauteilen dienen, spielt neben dem gewählten Drahtmaterial das Material des Anschlussbauteils eine Rolle. Im Rahmen der Arbeit werden solche Bauteile nicht explizit untersucht. Alle Probekörper wurden aufbauend auf S235 Stahlplatten der Dicke 8 oder 20 mm geschweißt. Da nicht auf andere Bauteile wie I-Träger geschweißt wurde, gab es keine besonderen Anpassungen auf Grund der Zugänglichkeit des Bauteils. In Abb. 4.2 ist der generelle Aufbau des Fertigungssystems zu sehen, die Steuerung C4G des Roboters ist außerhalb des Bereiches positioniert.



Abbildung 4.2: Aufbau des genutzten WAAM-Systems

### 4.1.2 Prozesssteuerung

Neben den Systemkomponenten hat auch die Steuerung dieser und der zeitliche Ablauf einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Aus der konventionellen Schweißtechnik ist bekannt, dass die Temperaturbedingungen entscheidende Bedeutung für die Schweißqualität haben (vgl. Abschnitt 2.4.4). Die Pausenzeit zwischen den verschiedenen Schweißungen hat einen großen Einfluss auf die Temperaturbedingungen

innerhalb des Werkstoffes. Auch wird in der Prozesssteuerung berücksichtigt, ob die Schweißungen zusätzlich gekühlt werden, wie lange das der Fall ist und durch welches Medium das geschieht. Die Pausenzeit wurde für die in der Arbeit getätigten Untersuchungen abhängig von der Zwischenlagentemperatur zwischen 30 und 90 Sekunden gewählt. In dieser Pausenzeit erfolgte eine zusätzliche Kühlung durch einen feinen Sprühnebel aus destilliertem Wasser.

Weiterhin kann eine Nahtnachbehandlung – beispielsweise durch Walzen – vorgesehen werden. Im Rahmen der Arbeit wurde keine automatisierte Nahtnachbehandlung vorgesehen. Es hat sich gezeigt, dass die Bahnplanung, das Slicing, einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des gedruckten Materials hat, hierauf wird in Kapitel 5 eingegangen.

Soll die additiv gefertigte Struktur von der Senkrechten abweichen, führt dies zu anderen geometrischen Randbedingungen und bei gleichen Parametern zu anderen Schweißergebnissen und muss daher in der Fertigungsstrategie berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2). Hier kann beispielsweise eine Änderung der Orientierung des Schweißbrenners hilfreich sein, welches gegebenenfalls mit weiteren Anpassungen des Prozesses einhergeht.

Die Position des Schweißbrenners ist trotz Auskragungen in allen Untersuchungen der Arbeit senkrecht zur Horizontalen. In Voruntersuchungen zeigte sich, dass sich bei einem maximalen Auskragungswinkel von 30° zur Senkrechten nur minimale Geometrieänderung der Naht ergaben.

### 4.1.3 Schweißprozesssteuerung

Auswirkungen auf das Schweißergebnis (Schweißnahtgeometrie und Materialeigenschaften) hat auch die Steuerung des Schweißprozesses selbst. Im Kapitel Schweißtechnik (Abschnitt 2.3) wurden bereits die Auswirkungen der Schweißprozesssteuerung auf eine konventionelle Schweißnaht beschrieben. Schweißstromstärke und Schweißspannung entscheiden während des Schweißens genauso wie Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit wesentlich über das gedruckte Ergebnis. Die Geschwindigkeit der Schutzgas-Ausströmung spielt beim Schweißen insofern eine Rolle, als dass ein bestimmter Wertebereich nicht unter- bzw. überschritten werden sollte. Das freie Drahtelektrodenende (CTWD) definiert die Lichtbogenlänge, beeinflusst den elektrischen Widerstand und somit bei gleichen Leistungsparametern den Energieeintrag in die Naht. Es wurde auf 12 mm festgelegt. Für das CMT-Cycle-Step-Verfahren ist zusätzlich festzulegen, mit wie vielen Cycles geschweißt wird, ehe eine Pause erfolgt und wie lang diese Pause dauern soll.

Zur Festlegung der Schweißprozessparameter wurde eine Parameter-Untersuchung durchgeführt, die im Folgenden vorgestellt wird. Hierbei lag das Augenmerk darauf, eine Parameterkonstellation zu finden, die einen stabilen Prozess sowie ein gleichmäßiges Nahtbild ergibt.

## 4.2 Schweißparameteruntersuchung

### 4.2.1 Voruntersuchung

Um ein Gefühl für die einstellbaren Schweißparameter zu erhalten, wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Zunächst wurden Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit sowie deren Verhältnis zueinander untersucht. Prinzipiell sollte der gewählte Drahtvorschub zur Stromstärke - und somit zur

elektrischen Leistung - proportional sein, sodass anhand von Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit die Streckenenergie proportional eingestellt werden kann. Almeida (2012) gibt zudem die Breite einer Schweißnaht im Verhältnis zur Streckenenergie bzw. dem Verhältnis aus WFS/TS an.

Eine Untersuchung soll exemplarisch vorgestellt werden: Bei einem Verhältnis von 10 des eingestellten Drahtvorschubs zur Schweißgeschwindigkeit wurden Wände der Länge 10 cm mit jeweils 20 Schweißlagen gedruckt. In jeder Lage wurde die Seite des Startpunkts gewechselt. Die Werte wurden für jede neue Wand gesteigert. In dieser Untersuchung ergab sich, dass die Schweißnähte bei steigender Schweißgeschwindigkeit und gleichem Verhältnis von WFS/TS dicker wurden. Außerdem ergab sich ab einem Drahtvorschub von 8 m/min ein sehr unruhiges Nahtbild (siehe Abb. 4.3 – letzte drei Nähte). Dieser Punkt kann als Ende des Prozessbereichs gewertet werden.



**Abbildung 4.3:** Untersuchungsergebnisse bei Vorgabe eines gleichen WFS/TS-Verhältnisses

Weiterhin ist auffällig, dass die Schweißnähte trotz Wechsel des Startpunkts an Anfang und Ende deutlich dicker als in der Mitte der Naht sind (vgl. Abschnitt 3.1.3). Für das konventionelle Schweißen wird teilweise sogar mit höherem Strom geschweißt, um ein Zünden des Lichtbogens in jedem Fall zu gewährleisten. Für die additive Fertigung ist die Ausbildung eines dicken Tropfens zu Beginn der Schweißung jedoch zu verhindern, da mit zunehmender Anzahl der aufeinander geschweißten Lagen dieser Tropfen immer größer wird und es durch die elektromagnetische Blaswirkungen des Lichtbogens (vgl. Abb. 2.5) zur Ausbildung von Lücken und zu unregelmäßigem Prozess und Nahtgeometrie kommen kann. Diese negative Auswirkung ist in Abb. 4.3 bei den ersten drei Nähten zu sehen. Der verlängerte Start – durch die Kommunikationszeit zwischen Roboter und Schweißstromquelle – hat bei den dünneren Nähten eine größere Auswirkung als für die anderen Nähte.

Dass sich bei gleichem Verhältnis von WFS/TS die Breite der Schweißnähte ändert, lässt sich auf das verwendete CMT-Cycle-Step-Verfahren zurückführen und die Steuerung dieses mit dem vorhandenen Schweißgerät. In Abschnitt 2.3.2 wurden Lichtbogenkennlinie und Stromquellenkennlinie bereits grundlegend erklärt. Die Kennlinie sorgt prinzipiell für einen stabilen Lichtbogen, indem der Zusammenhang von Strom und Spannung definiert ist. Mit den weiterentwickelten Schweißprozessen ist neben der Regelung des Zusammenhangs von Strom und Spannung aber auch der Verlauf dieser Größen und möglicherweise anderer Größen wichtig. Für das CMT-Verfahren spielt beispielsweise die Drahtvorschub- und -rückzuggeschwindigkeit eine Rolle. Daher gibt es neben der Stromspannungskennlinie weitere

definierte Abhängigkeiten. Diese werden bei der verwendeten Fronius Schweißstromquelle ebenfalls bei Angabe der Kennlinie definiert. In der Kennlinien werden einem vorgegebenen Drahtvorschub die verschiedenen Prozessparameter zugeordnet.

In der verwendeten CMT-Cycle-Step-Kennlinie CMT 1840 wird auch angegeben, wie viele CMT-Cycle ausgeführt werden sollen, bevor eine Pause ausgeführt wird – dies beschreibt einen Step –, und wie lang diese Pause dauern soll ehe der neue Step beginnt. Wenn keine Pause ausgeführt würde, würde sich anhand der Vorgabewerte ein Drahtvorschub ergeben, der dem Vorgabedrahtvorschub entspricht. Durch das Einbringen der Pausenzeit und festlegen der Cycleanzahl je Step, wird der Schweißprozess insgesamt reduziert. Der Drahtvorschub entspricht nicht mehr der Vorgabe. Die Einstellungen waren für die in Abb. 4.3 untersuchten Drahtvorschübe unterschiedlich, sodass sich auch das Verhältnis der Drahtvorschübe zueinander verändert. Im betrachteten Fall blieb das Verhältnis von WFS/TS nicht gleich, sondern wurde anscheinend größer, was zu dickeren Nähten führt (vgl. Abb. 3.3).

### 4.2.2 Untersuchung der Kennlinie CMT 1840

Da anhand der getätigten Untersuchung lediglich gesagt werden kann, welche getestete Parameterkonstellation funktioniert, nicht aber wieso, wurde die Kennlinie CMT 1840 genauer untersucht. Hierzu wurde der WeldScanner von HKS genutzt. Mit Hilfe des HKS WeldScanners werden Stromstärke, Stromspannung, Gasdurchfluss und Drahtvorschub während des Schweißprozesses gemessen. Messungen erfolgen standardmäßig mit 100 Hz. Für den hochfrequenten CMT-Prozess ist diese Abtastrate zu gering, um Stromstärke- und -spannungsverlauf zu erfassen. Es können manuell jedoch auch Aufzeichnungen mit einer Abtastrate von 3,2 kHz aufgenommen werden.

#### Messaufbau

Die Messung der Prozessvariablen erfolgt an der Schweißstromquelle, nicht direkt am Schweißbrenner, hier werden auch Draht- und Gaszufuhr gemessen. Die Drahtzufuhr für den hochfrequenten CMT-Prozess wird durch die Push-Pull-Einheit am Schweißbrenner geregelt. Diese ist durch den Drahtpuffer von der groben Drahtvorschubeinrichtung getrennt. Anhand der Messdaten kann daher nur ermittelt werden, wie viel Draht dem System in der Schweißzeit zugeführt wird, es kann keine genaue Zuordnung erfolgen, zu welchem Zeitpunkt, wie viel Draht verschweißt wird. Auch die Gaszufuhr wird am Schweißgerät gemessen, nicht an der Schweißstelle. An der Schweißstelle wird durch Undichtigkeiten im Schlauch und die Länge des Schlauchpaketes weniger Gas ankommen als gemessen.

#### Vorstellung der Kennlinie

Die durch das Schweißgerät einsehbaren Kennlinienpunkte sind in Tabelle 4.1 zu sehen. Hier wurden die gelb hervorgehobenen Werte angepasst, die anderen Werte entsprechen der Voreinstellung. Die Diagramme in Abb. 4.4 zeigen das Ergebnis der Messung einer Schweißnaht mit 3,2 kHz exemplarisch für den Kennlinienpunkt 6. Der zeitliche Verlauf von Drahtzufuhr und Gasdurchfluss ist gut verfolgbar. Durch den hochfrequenten Prozess sind die Verläufe von Stromstärke und Stromspannung nicht nachvollziehbar, sondern in gleichmäßigen Abständen lediglich Blöcke und deren Höchst- und Tiefstwerte zu erkennen. Diese Blöcke bilden jeweils einen Step der eingestellten Cycleanzahl. Die Unterbrechung zeigt die Pause zwischen den Steps.

Tabelle 4.1: CycleStep Kennlinie CMT 1840

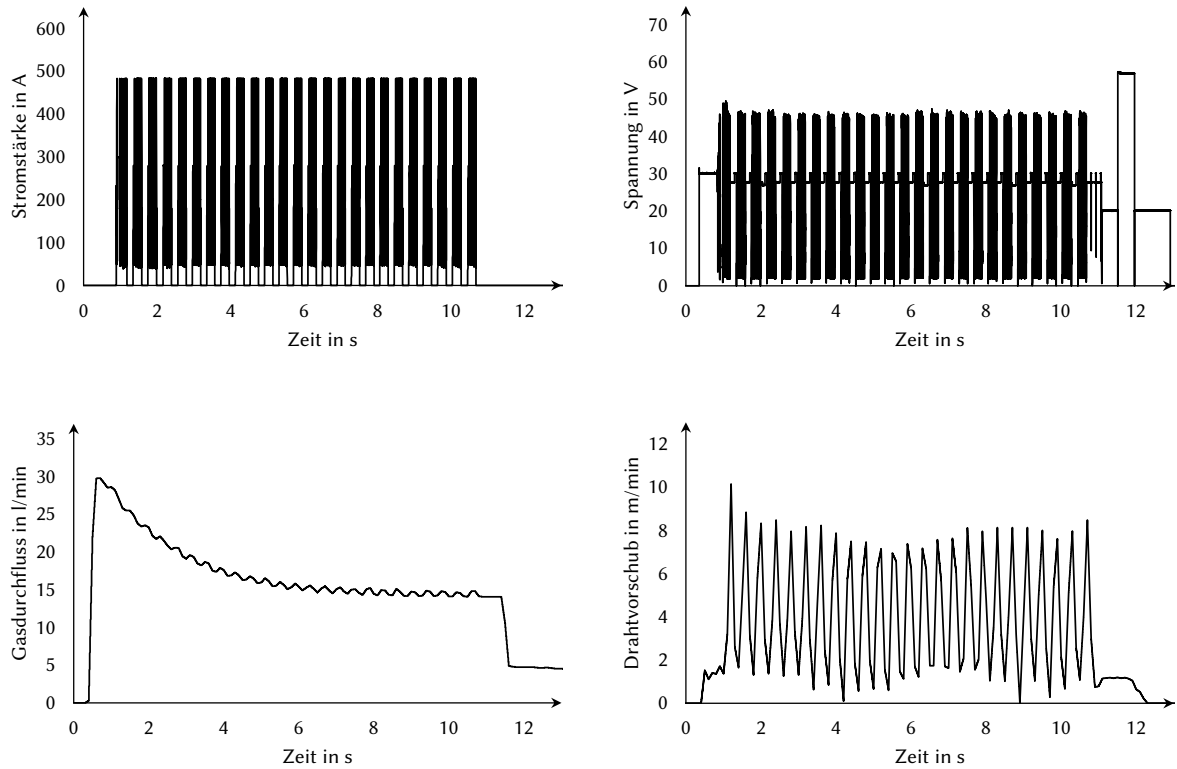
| Kennlinienpunkt       |        | Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 | Punkt 4 | Punkt 5 | Punkt 6 | Punkt 7 | Punkt 8 | Punkt 9 | Punkt 10 |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Zündung               |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
| slaghammer 0n_1/Off_0 | -      | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        |
| I_ignition            | A      | 280     | 280     | 280     | 280     | 280     | 280     | 280     | 280     | 280     | 280      |
| t_ignition            | ms     | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20       |
| I_warmup              | A      | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120      |
| t_warmup              | ms     | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       | 8       | 8        |
| Vd_warmup             | m/min  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0        |
| CMT-Param1            |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
| I_cmt_init            | A      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50       |
| Vd_cmt_init           | m/min  | 15      | 15      | 15      | 15      | 15      | 15      | 15      | 15      | 15      | 15       |
| I_sc_wait             | A      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50       |
| Vd_sc_wait            | m/min  | 25      | 25      | 25      | 25      | 26      | 27      | 29      | 29      | 29,5    | 31       |
| I_sc2                 | A      | 50      | 80      | 100     | 125     | 150     | 180     | 200     | 220     | 225     | 240      |
| Vd_back_2             | m/min  | -26     | -27     | -29     | -30     | -33     | -34     | -34     | -34     | -34     | -34      |
| CMT-Param2            |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
| d_boostup             | A/ms   | 500     | 500     | 500     | 500     | 500     | 500     | 500     | 500     | 500     | 500      |
| I_boost               | A      | 75      | 100     | 125     | 150     | 180     | 200     | 220     | 240     | 280     | 300      |
| t_I_boost_1           | ms     | 2,1     | 2,2     | 2,2     | 2,2     | 2,25    | 2,3     | 2,3     | 2,3     | 2,3     | 2,3      |
| VD_boost              | m/min  | 44      | 47      | 49      | 51      | 53      | 55      | 55      | 58      | 59      | 61       |
| t_vd_boost            | ms     | 4       | 4       | 4       | 4       | 4       | 4,1     | 4,1     | 4,1     | 4,1     | 4,1      |
| CMT_cycles            | -      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20       |
| CMT_Cycle_step        | -      | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1       | 1        |
| CMT_Cycles_min        | -      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20      | 20       |
| Interval_Cycles       | -      | 1999    | 1999    | 1999    | 1999    | 1999    | 1999    | 1999    | 1999    | 1999    | 1999     |
| t_Interval_break      | ms(ex) | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120     | 120      |
| Schweißende           |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
| t_burnback            | ms     | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15    | 0,15     |
| Richtwerte            |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |
| Strom-Richtwert       | A      | 115     | 115     | 145     | 170     | 200     | 225     | 243     | 250     | 260     | 275      |
| Material-Richtwert    | mm     | 1,5     | 1,6     | 1,7     | 1,9     | 2       | 2       | 2       | 2       | 2       | 5        |
| Spannungs-Richtwert   | V      | 9       | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 17,7    | 18      | 19      | 20       |
| Drahtvorschub         | m/min  | 1,7     | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 7,5     | 8       | 9       | 10       |

### Bedeutung der Vorgabewerte

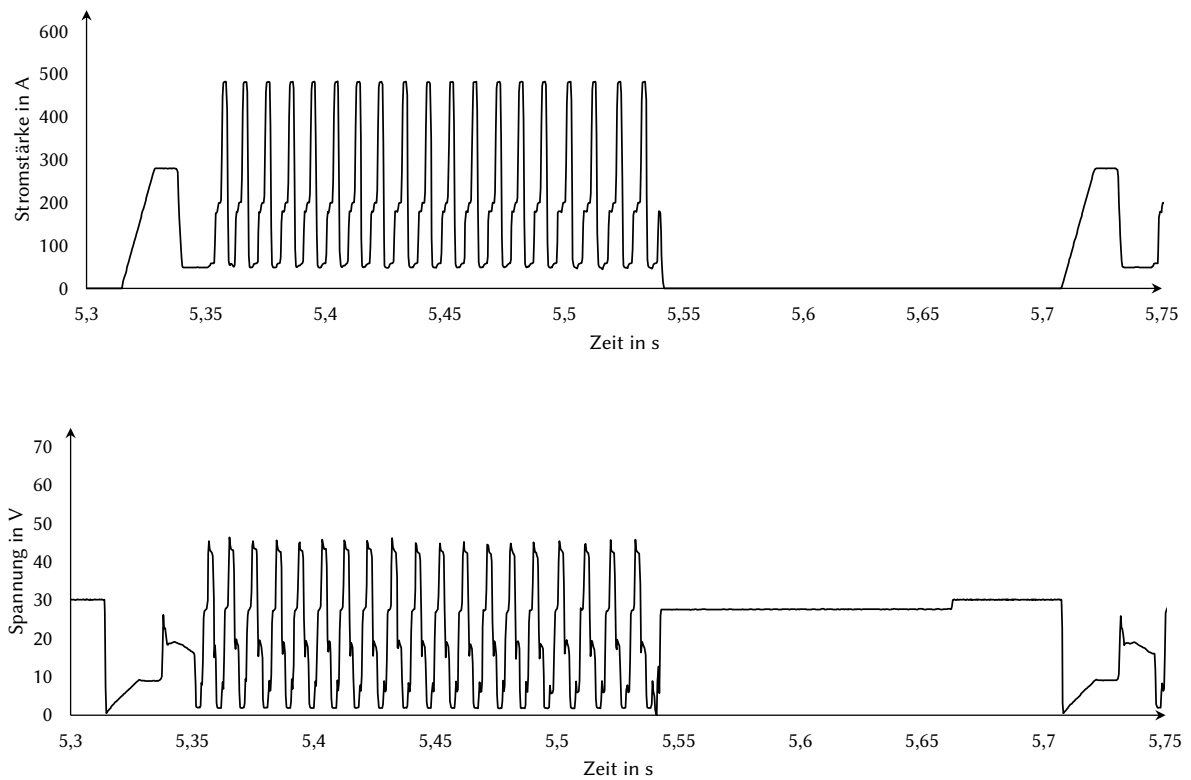
Betrachtet man nur einen Bruchteil der gesamten Schweißzeit (Abb. 4.5), kann der Verlauf von Stromstärke und Stromspannung innerhalb eines Steps verfolgt werden. Die eingestellte Pausenzeit ist im Spannungsverlauf wiederzufinden, hier liegt ein konstantes Spannungsniveau an, ehe ein Anstieg in der Spannung den Schweißbeginn des nächsten Steps einleitet. Sobald der Kurzschluss entsteht, fällt die Spannung ab und die Stromstärke steigt an. Dies ist die Zündungsphase des Steps. Nach diesem Zündungszyklus beginnt der CMT-Regel-Prozess. Innerhalb eines Regel-CMT-Cycles wird die Stromstärke in 3 Schritten erhöht, ehe sie wieder auf ein Grundniveau abfällt.

An diesen Diagrammen können einige Werte der Kennlinie zugeordnet werden: Sobald der Kurzschluss entsteht, fällt die Spannung ab und der Strom steigt auf 280 A an, dies ist der Wert I\_ignition. Die Zeit zwischen Start des Anstiegs und Abfall auf 50 A wird durch die t\_ignition vorgegeben. Diese 50 A sind durch I\_cmt\_init vorgegeben. Nun beginnt der CMT-Regel-Prozess, der Strom wird hierbei in drei Stufen gesteigert. Zunächst auf ein Niveau von 180 A, dies entspricht dem Wert I\_sc\_2 und dann auf einen Wert von 200 A, dies ist I\_boost. Die Zeit vom ersten zum zweiten Plateau wird mit t\_vd\_boost vorgegeben. Die letzte Stufe beschreibt das Maximum des Cycles von ca. 480 A. Dieser Wert kann nicht verändert werden und ist im Gerät nicht ersichtlich. Für jeden Kennlinienpunkt ist dieser Wert anders. Die Zeit, wie lange dieser hohe Wert ab Beginn der Stromänderung gehalten wird, beschreibt der Wert t\_I\_boost\_1. Nachdem die Stromstärke auf ihr Maximum gestiegen ist, fällt sie ab auf das Niveau von I\_sc\_wait.

#### 4 Vorstellung der WAAM-Prozessparameter



**Abbildung 4.4:** Schweißdaten eine exemplarische Naht

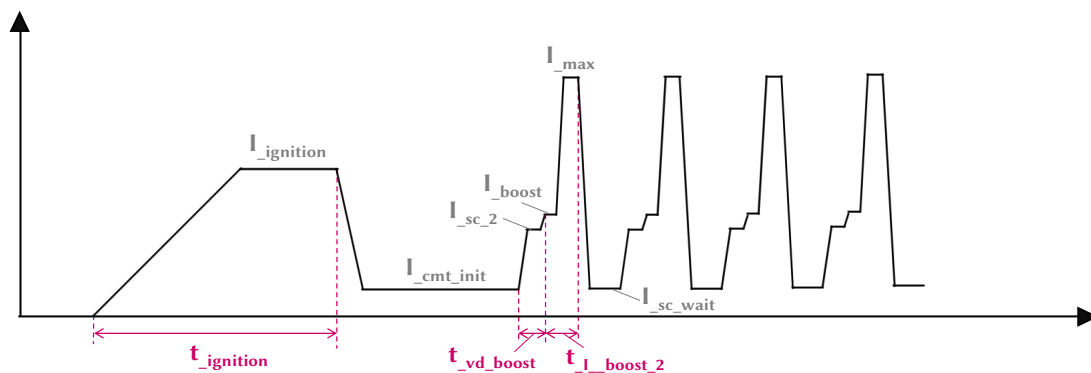


**Abbildung 4.5:** Schweißdaten für einen exemplarischen Step



Eine Besonderheit weist der erste Step auf, hier wird die Stromstärke nach Zündung in zwei Stufen reduziert, so wird nach der Zündung mit  $I_{\text{ignition}}$  zunächst auf 120 A,  $I_{\text{warmup}}$ , und dann auf  $I_{\text{cmt}}$  reduziert.

In Abb. 4.6 ist der Verlauf der Stromstärke schematisch für einen CMT-Cycle-Prozess mit Zuordnung der Werte zu sehen. Es ist zu sehen, dass anhand der in Tabelle 4.1 vorgegebenen Werte der Verlauf nicht vollständig beschrieben werden kann. Für die Energieeinbringung am wichtigsten ist sicherlich die maximale Stromstärke in jedem Step. Die Zeit bis der nächste Cycle beginnt kann ebenfalls nicht direkt gesteuert werden, sie hängt von den Umständen ab und wird zur Gewährleistung eines stabilen Prozesses von der Schweißstromquelle zur Regelung genutzt. Zur vorliegenden Spannung ist gar kein Wert bekannt. Sie wird indirekt über die Veränderung der Drahtgeschwindigkeit geregelt. So erhöht das  $V_{d\_sc\_wait}$  beispielsweise die Spannung vor jedem Cycle.



**Abbildung 4.6:** schematischer Stromstärkeverlauf eines CMT-Regelsteps

### 4.2.3 Energetische Betrachtung der Kennlinienpunkte

#### Umfang der Untersuchung

Um die Kennlinie zu analysieren, wurden für jeden Punkt der Kennlinie 10 Schweißnähte der Länge 8 cm übereinander gedruckt. Auch hier wird die Schweißrichtung in jeder Lage gewechselt. Die Schweißgeschwindigkeit wurde für alle Punkte auf konstant 0,5 m/min gestellt. Hierdurch ergibt sich die Änderung der Nahtgeometrie ausschließlich durch den gewählten Kennlinienpunkt. Für die Kennlinienpunkte 8-10 war die Schweißgeschwindigkeit von 0,5 m/min zu gering, sodass sich ein unruhiger Prozess ergab und sich keine sauberen Schweißnähte eingestellt haben. Es werden daher nur die Kennlinienpunkte 1 bis 7 analysiert. Auch der Kennlinienpunkt 1 (siehe Abb. 4.9 linke Naht) war durch den niedrigen Energieeintrag, und somit kleinen Lichtbogen, fehleranfällig – Fehler, die sich besonders durch den elektromagnetischen Blaseffekt fortpflanzen.

Es werden jeweils 2 bzw. 3 Nähte pro Kennlinienpunkt mit einer Abtastrate von 3,2 kHz aufgezeichnet. Für alle Kennlinienpunkte wurde eine Pausenzeit von 120 ms zwischen den Steps eingestellt. Alle Kennlinienpunkte wurden mit 20 Cycle je Step geschweißt, zusätzlich wurde der Kennlinienpunkt 6 mit 10 Cycle je Step und sonst unveränderten Einstellungen geschweißt.

#### Gemessene Werte

Für jede hochfrequente Aufzeichnung wurde die während des Schweißens einer Lage aufgebrachte Energie ermittelt. Hierzu wurde der zeitliche Verlauf der Leistung aus Multiplikation von Stromstärke und Stromspannung ermittelt und dieser über die Zeit integriert. Zusätzlich wurden die lokalen Maxima

## 4 Vorstellung der WAAM-Prozessparameter

und Minima in Stromstärke und -spannung sowie in der Leistung bestimmt und jeweils der Mittelwert gebildet. Neben der Betrachtung des gesamten Prozesses wurde die Energie, die jeweils in einem CMT-Regel-Cycle eingebracht wurde, ermittelt. Hierzu wurde der Energieeintrag aller Regel-Cycle (ca. 600) einer Schweißung ermittelt und der Mittelwerte gebildet. Weiterhin wurde über den Verlauf des Drahtvorschubs integriert und die dem System zugeführte Drahtmenge bestimmt. Hierdurch konnte jeweils der reale mittlere Drahtvorschub für jede Schweißnaht ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

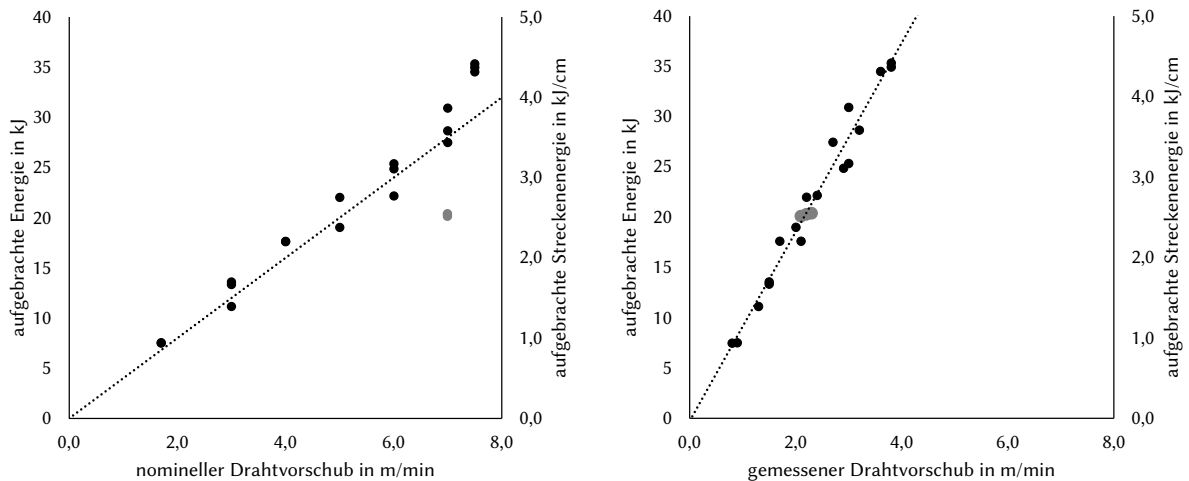
**Tabelle 4.2:** Ergebnisse der Untersuchung

| Aufgezeichnete Lage | Kennlinienpunkt | nominaler Drahtvorschub | eingestellte Cycleanzahl | Energie je Lage | Drahtverbrauch je Lage | mittlerer Drahtvorschub | Stromstärke Maximum | Stromspannung Maximum | Leistung Maximum | mittlere Schweißzeit je Step | mittlere Pausenzeit | mittlere Zeit je Step gesamt | Zeit pro Cycle | Energie pro Regel-Cycle |
|---------------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------|-------------------------|
| -                   | -               | m/min                   | -                        | kJ              | m                      | m/min                   | A                   | V                     | W                | ms                           | ms                  | ms                           | ms             | J                       |
| 2                   | 1               | 1,7                     | 20                       | 7,5             | 0,3                    | 0,8                     | 200                 | 31,0                  | 6074             | 254,4                        | 171,5               | 425,9                        | 11,2           | 17,0                    |
| 3                   | 1               | 1,7                     | 20                       | 7,5             | 0,2                    | 0,9                     | 200                 | 30,1                  | 5881             | 239,8                        | 171,6               | 411,4                        | 10,6           | 16,1                    |
| 2                   | 2               | 3                       | 20                       | 13,6            | 0,4                    | 1,5                     | 281                 | 34,5                  | 9546             | 240,4                        | 164,4               | 404,8                        | 10,6           | 26,1                    |
| 3                   | 2               | 3                       | 20                       | 11,1            | 0,4                    | 1,3                     | 280                 | 34,0                  | 9220             | 234,7                        | 168,4               | 403,2                        | 10,5           | 25,2                    |
| 9                   | 2               | 3                       | 20                       | 13,3            | 0,3                    | 1,5                     | 280                 | 33,9                  | 9298             | 234,2                        | 168,1               | 402,3                        | 10,2           | 25,3                    |
| 2                   | 3               | 4                       | 20                       | 17,6            | 0,4                    | 2,1                     | 350                 | 38,0                  | 12916            | 227,4                        | 168,6               | 396,0                        | 9,9            | 34,4                    |
| 3                   | 3               | 4                       | 20                       | 17,6            | 0,4                    | 1,7                     | 350                 | 38,1                  | 12877            | 231,2                        | 172,9               | 404,1                        | 10,2           | 34,4                    |
| 2                   | 4               | 5                       | 20                       | 22,0            | 0,5                    | 2,2                     | 402                 | 42,4                  | 15985            | 221,1                        | 172,0               | 393,1                        | 9,3            | 42,6                    |
| 3                   | 4               | 5                       | 20                       | 19,0            | 0,5                    | 2,0                     | 402                 | 41,6                  | 15895            | 226,8                        | 171,3               | 398,1                        | 9,5            | 42,6                    |
| 2                   | 5               | 6                       | 20                       | 24,9            | 0,6                    | 2,9                     | 427                 | 42,6                  | 17294            | 225,1                        | 171,3               | 396,4                        | 9,8            | 49,4                    |
| 3                   | 5               | 6                       | 20                       | 22,2            | 0,6                    | 2,4                     | 427                 | 41,9                  | 17410            | 229,3                        | 170,6               | 399,9                        | 10,0           | 49,8                    |
| 4                   | 5               | 6                       | 20                       | 25,4            | 0,6                    | 3,0                     | 427                 | 42,4                  | 17494            | 229,2                        | 170,7               | 399,9                        | 10,0           | 50,2                    |
| 2                   | 6               | 7                       | 20                       | 30,9            | 0,7                    | 2,8                     | 483                 | 46,2                  | 21233            | 224,8                        | 171,2               | 396,0                        | 9,7            | 61,9                    |
| 3                   | 6               | 7                       | 20                       | 27,5            | 0,7                    | 2,7                     | 483                 | 46,1                  | 21110            | 228,5                        | 167,4               | 395,9                        | 9,7            | 61,5                    |
| 4                   | 6               | 7                       | 20                       | 28,7            | 0,6                    | 3,2                     | 483                 | 46,0                  | 21187            | 228,1                        | 168,7               | 396,8                        | 9,7            | 61,7                    |
| 2                   | 7               | 7,5                     | 20                       | 35,0            | 0,7                    | 3,8                     | 533                 | 46,5                  | 24312            | 224,7                        | 169,4               | 394,1                        | 9,6            | 70,1                    |
| 3                   | 7               | 7,5                     | 20                       | 35,3            | 0,8                    | 3,8                     | 530                 | 46,7                  | 24224            | 226,8                        | 165,0               | 391,8                        | 9,8            | 70,2                    |
| 4                   | 7               | 7,5                     | 20                       | 34,5            | 0,8                    | 3,6                     | 535                 | 45,3                  | 24273            | 227,6                        | 167,6               | 395,2                        | 9,7            | 69,6                    |
| 2                   | 6               | 7                       | 10                       | 20,1            | 0,5                    | 2,1                     | 483                 | 37,2                  | 21160            | 127,6                        | 172,5               | 300,1                        | 9,2            | 61,5                    |
| 3                   | 6               | 7                       | 10                       | 20,3            | 0,5                    | 2,2                     | 484                 | 43,5                  | 21153            | 128,2                        | 172,2               | 300,5                        | 9,5            | 61,9                    |
| 4                   | 6               | 7                       | 10                       | 20,4            | 0,5                    | 2,3                     | 484                 | 43,8                  | 21274            | 128,9                        | 172,0               | 300,9                        | 9,4            | 62,1                    |

### Auswertung

Die ermittelten Werte je Kennlinienpunkt weisen geringe Streuung auf. Die ermittelte Cyclezeit zeigt eine leicht abfallende Tendenz, diese ist jedoch sehr gering und liegt im Bereich der Streuung. Vor allem die sehr lange Cyclezeit von Kennlinienpunkt 1 kann auch durch den unruhigen Prozess erklärt werden. Die Pausenzeit ist in allen Messungen länger als die eingestellte Pausenzeit von 120 ms, dies liegt darin begründet, dass es nach Ablauf der 120 ms nicht direkt zum Kurzschluss kommt, sondern die Spannung zunächst erhöht und der Draht vorgeschoben wird. Der Energieeintrag beginnt erst ab Zündung. Es ist zu erkennen, dass die Vorlaufzeit für die Spannung in allen untersuchten Nähten bei ca. 50 ms liegt.

An den Werten in Tabelle 4.2 ist deutlich zu sehen, dass der nominelle Drahtvorschub und der gemessene mittlere Drahtvorschub nicht übereinstimmen. In den Diagrammen in Abb. 4.7 wird die insgesamt eingebrachte Energie dem Drahtvorschub gegenübergestellt. Während die Ergebnisse der mit 10 Cyclen geschweißten Naht (graue Punkte) bei der Gegenüberstellung mit nominellen Drahtvorschub deutlich herausfallen, gliedern sie sich in der Gegenüberstellung mit dem tatsächlichen Drahtvorschub in die anderen Ergebnisse ein.



**Abbildung 4.7:** Drahtvorschub und Energie

Die aufgebrachte Energie ist ein Absolutwert, der von der Länge der Naht beeinflusst wird. Da alle verglichenen Nähte die gleiche Länge haben, fällt dies hier nicht ins Gewicht. Die Länge der Naht sollte aber prinzipiell keinen Einfluss auf die Schweißergebnisse haben. Daher wird im Folgenden die Streckenenergie genutzt.

#### 4.2.4 Berechnung der prognostizierten Energie für eine Schweißnaht

Anhand der Ergebnisse in Tabelle 4.3 kann unter der Voraussetzung, dass die Kennlinie nicht zusätzlich angepasst wird, von den eingegebenen Schweißparametern auf die eingebrachte Streckenenergie zurückgeschlossen werden. Eingabeparameter sind hierbei die Schweißgeschwindigkeit und der Drahtvorschub sowie die Anzahl der Cycle je Step und die Pausenzeit zwischen den Steps.

**Tabelle 4.3:** Werte zur Berechnung der Energie

| Drahtvorschub           | m/min | 1,7  | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 7,5  |
|-------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Energieeintrag je Cycle | J     | 16,5 | 25,5 | 34,4 | 42,6 | 49,8 | 61,8 | 70,0 |
| t <sub>ignition</sub>   | ms    |      |      |      | 20   |      |      |      |
| Spannungsvorlaufzeit    | ms    |      |      |      | 50   |      |      |      |
| Cyclezeit               | ms    |      |      |      | 10   |      |      |      |

#### Vorgehen

Über die eingestellte Robotergeschwindigkeit und eine Nahtlänge von 1 cm/cm wird die ungefähre Dauer der Schweißung je Zentimeter bestimmt. Anhand der Dauer kann die Anzahl der Steps je Zentimeter ermittelt werden und hiermit die Anzahl der Cycles. Die Streckenenergie ergibt sich aus dem Produkt der

gesamten Cycle-Anzahl und der Energie, die je Cycle für den vorgegebenen Drahtvorschub aufgebracht wird. Zusätzlich kann die absolute Energie einer Naht anhand der Nahtlänge bestimmt werden.

Zur Ermittlung der Stepanzahl muss die Dauer eines Steps bekannt sein. Hierzu werden folgende Annahmen getroffen: die Spannungsvorlaufzeit beträgt immer 50 ms, der Zündungsstep hat eine zusätzliche Dauer von  $t_{\text{ignition}}$  und bringt überschlägig die gleiche Energie ein wie ein Regelcycle. Die Zeit eines CMT-Cycles beträgt 10 ms. Zu dieser Zeit wird dann die angegebene Pausenzeit addiert. Die Berechnung ist folgend aufgeführt:

### Variable Eingangsparameter:

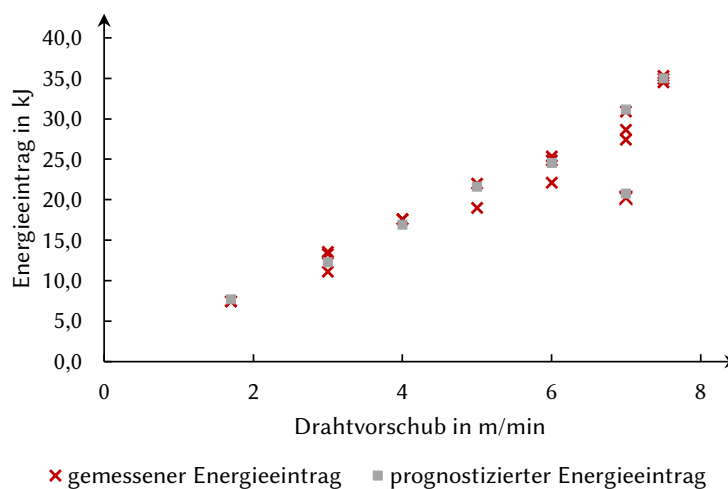
|                        |       |          |
|------------------------|-------|----------|
| Drahtvorschub          | WFS   | in m/min |
| Schweißgeschwindigkeit | TS    | in m/min |
| Pausenzeit             | $t_p$ | in ms    |
| Cycleanzahl            | $n$   |          |
| Schweißnahtlänge       | $l$   | in cm    |

### Parameter aus Tabelle 4.3:

|                          |                       |       |
|--------------------------|-----------------------|-------|
| Energieeintrag je Cycle  | $E_{\text{cycle}}$    | in J  |
| Spannungsvorlaufzeit     | $t_U$                 | in ms |
| Zusätzliche Zeit Zündung | $t_{\text{ignition}}$ | in ms |
| Cyclezeit                | $t_c$                 | in ms |

### Berechnung:

|                         |                    |  |       |
|-------------------------|--------------------|--|-------|
| Dauer eines Steps:      | $t_{\text{step}}$  | $t_U + t_{\text{ignition}} + n \cdot t_c + t_p$                      | in ms |
| Schweißdauer je cm:     | $t$                | $\frac{1\text{m}/100\text{cm}}{TS} \cdot 60.000\text{ms}/\text{min}$ | in ms |
| Anzahl der Cycle:       | $n_{\text{cycle}}$ | $\frac{t}{t_{\text{step}}} \cdot n$                                  |       |
| Streckenenergie:        | $E_S$              | $n_{\text{cycle}} \cdot E_{\text{cycle}}$                            | in J  |
| Energie in Schweißnaht: | $E_{\text{naht}}$  | $l \cdot E_S$  | in J  |



**Abbildung 4.8:** Vergleich von gemessener und prognostizierter Energie

### Vergleich der Werte

Die Gegenüberstellung in Abb. 4.8 zeigt, dass die prognostizierte Energie und die wirklich aufgewendete Energie gut zusammenpassen. Diese aufgewendete Energie entspricht auf Grund von Energieverlusten nicht der Energie, die in die Schweißnaht eingebracht wird. Zur Berechnung der eingebrachten Energie beim Schweißen wird daher standardmäßig ein Wirkungsgrad  $\eta$ , der vom Verfahren abhängig ist, berücksichtigt. Für das Metall-Aktiv-Gasschweißen liegt der Wirkungsgrad zwischen 80 und 90 %.

### 4.2.5 Geometrische Betrachtung der Kennlinienpunkte

Zusätzlich zur Aufzeichnung der Schweißdaten wurden die geschweißten Nähte mit Hilfe eines Messschiebers vermessen. Hierbei wurden Breite und Höhe jeder Naht an 5 Stellen gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 zu sehen. Die vermessenen Nähte sind in Abb. 4.9 gezeigt.

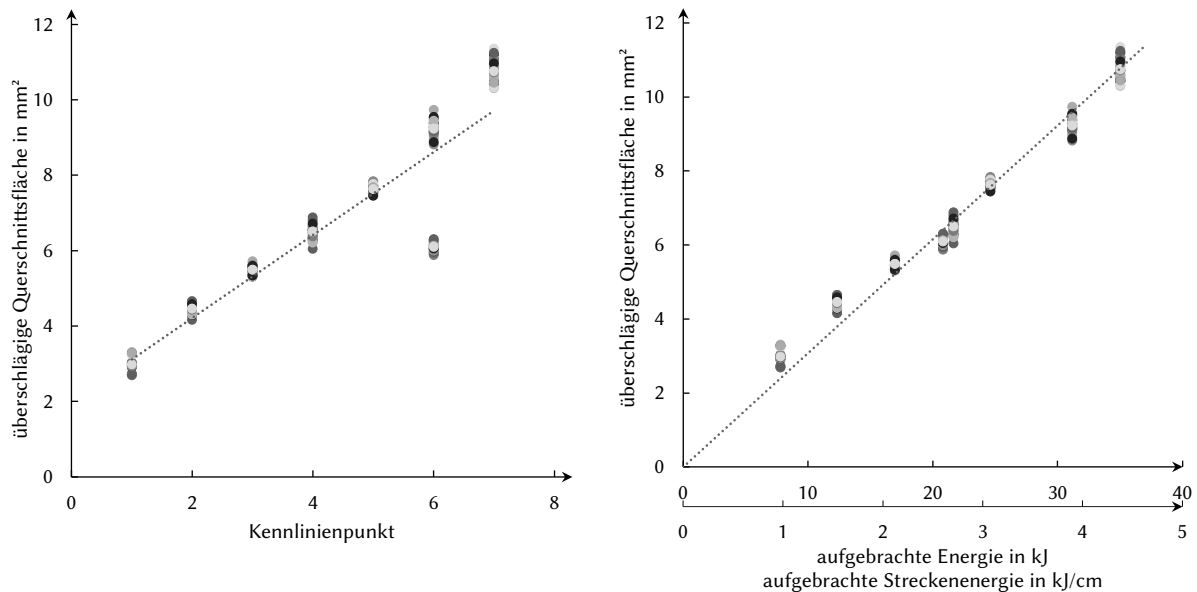
**Tabelle 4.4:** Abmessungen der geschweißten Nähte

| Messung            | KP 1 | KP 2 | KP 3 | KP 4 | KP 5 | KP 6 | KP 7 | KP 6 –<br>10 cycles |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------|
| Breite in mm       |      |      |      |      |      |      |      |                     |
| 1                  | 2,9  | 3,7  | 4,4  | 4,9  | 5,5  | 6,3  | 6,9  | 5,0                 |
| 2                  | 3,0  | 3,9  | 4,5  | 5,2  | 5,7  | 6,2  | 6,7  | 5,2                 |
| 3                  | 2,7  | 4,0  | 4,6  | 5,3  | 5,6  | 6,4  | 7,1  | 5,2                 |
| 4                  | 3,2  | 3,9  | 4,5  | 5,1  | 5,7  | 6,3  | 6,7  | 5,0                 |
| 5                  | 2,9  | 4,0  | 4,4  | 5,2  | 5,5  | 6,2  | 7,1  | 5,0                 |
| Mittelwert         | 2,9  | 3,9  | 4,4  | 5,1  | 5,6  | 6,3  | 6,9  | 5,1                 |
| Standardabweichung | 0,2  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,2  | 0,1                 |
| Höhe in mm         |      |      |      |      |      |      |      |                     |
| 1                  | 10,3 | 11,2 | 12,2 | 12,3 | 13,6 | 14,6 | 15,7 | 11,8                |
| 2                  | 10,2 | 11,6 | 12,5 | 12,6 | 13,9 | 14,7 | 15,9 | 11,9                |
| 3                  | 10,1 | 11,6 | 12,6 | 12,7 | 13,7 | 15,1 | 15,5 | 12,1                |
| 4                  | 10,1 | 11,5 | 12,3 | 12,8 | 13,8 | 14,8 | 15,3 | 12,1                |
| 5                  | 10,2 | 11,6 | 12,2 | 12,9 | 13,6 | 14,2 | 15,5 | 12,2                |
| Mittelwert         | 10,2 | 11,5 | 12,4 | 12,7 | 13,7 | 14,7 | 15,6 | 12,0                |
| Standardabweichung | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,2  | 0,1  | 0,3  | 0,2  | 0,1                 |



**Abbildung 4.9:** Schweißergebnisse der Parameterstudie

Anhand der gemessenen Werte kann überschlägig die Querschnittsfläche einer Naht ermittelt werden. Hierzu werden die gemessenen Werte miteinander multipliziert, wobei die Höhe durch die Lagenanzahl 10 geteilt wird. Es ist klar, dass es sich beim Querschnitt der Schweißraupen nicht um ein Rechteck handelt, jedoch soll zunächst nur die Tendenz abgeschätzt werden. Die so ermittelte Fläche ist im Diagramm den Kennlinienpunkten gegenüber aufgetragen (Abb. 4.10 links). Während die mit nur 10 Cycles geschweißte Naht deutlich aus der Gruppe herausfällt, ordnen sich die Messwerte im Diagramm, in welchem aufgewendete Energie auf der Ordinate zu finden ist, in die anderen Werte ein (Abb. 4.10 rechts). Es ist ein linearer Zusammenhang zu erkennen, der seinen Ursprung im Punkt (0/0) findet.



\*Anmerkung: Die verschiedenen Farben wurden gewählt, um die Messpunkte besser voneinander unterscheiden zu können und haben keine weitere Bedeutung

**Abbildung 4.10:** Abhängigkeit von Querschnittsfläche und Kennlinienpunkt bzw. Energie

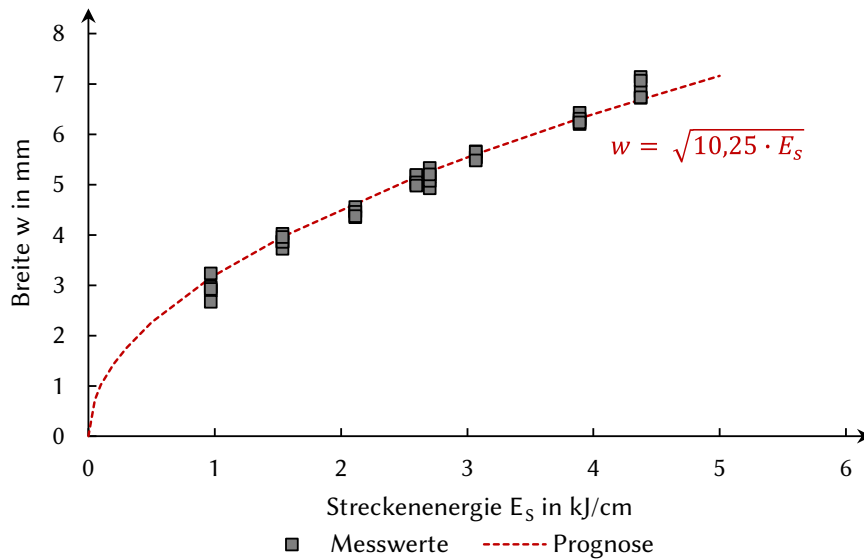
### Breitenabhängigkeit

Da die Querschnittsfläche jedoch nicht gemessen wurde, sondern nur einen ungefähren Richtwert darstellt, soll ein Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten und der aufgetragenen Energie überprüft werden. Da die Fläche linear proportional zur Energie ist und die Abmessungen Höhe und Breite veränderlich, sind diese nicht linear proportional zur Energie. Allerdings zeigt sich für die Nahtbreite eine Proportionalität zur Wurzel der aufgetragenen Energie. Ein solcher Zusammenhang wurde auch von Großmann et al. (2019) auch für das LPBF gefunden. Der Proportionalitätsfaktor ist hierbei abhängig von Material, Gas, Temperatur und der Form der Naht. Werden diese Faktoren grundlegend geändert, muss der Proportionalitätsfaktor erneut ermittelt werden.

### Bewertung

In dieser Zusammenstellung wurde für alle Kennlinienpunkte der Kennlinie CMT 1840 die gleiche Pausenzeit gewählt und auch die Schweißgeschwindigkeit nicht verändert. Für eine umfassende Betrachtung der Auswirkungen von Schweißparametern auf die Nahtgeometrie sollten zusätzlich weitere Untersuchungen dieser Art vorgenommen werden. So kann der Einfluss auf den Proportionalitätsfaktor

überprüft und möglicherweise festgelegt werden. Eine solche detaillierte Auseinandersetzung mit dem Schweißprozess und den Auswirkungen der Schweißparameter ist im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgt.



**Abbildung 4.11:** Abhängigkeit von Breite und Streckenenergie

## 4.3 Gewählte Parameter

### 4.3.1 Anforderung

Für die Arbeit wird hauptsächlich eine Parameterkonstellation gewählt, diese soll einen „stabilen Prozess“ ermöglichen und eine „mittlere Nahtbreite“ hervorbringen. „Mittlere Nahtbreite“ meint eine Einzelnaht, die bereits eine sinnvolle tragende Blechdicke hervorbringt, die weiterhin durch das Nebeneinanderschweißen von mehreren Lagen einfach auf andere Dicken erweitert werden kann. „Stabiler Prozess“ meint einen Schweißprozess, der ohne häufige Schweißstops und Aussetzer Strukturen bis 30 cm Höhe drucken kann. Dabei soll das Nahtbild gleichmäßig bleiben und eine ruhige Schuppung gewährleistet sein.

### 4.3.2 Wahl

Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse wurde für die Untersuchung die folgende Parameterkonstellation gewählt: Eine Nahtdicke von 6 mm erscheint sinnvoll, da mehrere Bahnen dieser Breite Bleche mit 10, 15 oder 20 mm hervorbringen können. Außerdem sind diese 6 mm im untersuchten Prozessbereich und gewährleisten somit einen stabilen Prozess. Mit den folgend vorgestellten Parametern erhält man eine prognostizierte aufgebrauchte Streckenenergie von 3,6 kJ/cm. Über die in Abb. 4.11 gezeigte Beziehung erhält man eine rechnerische Nahtbreite von 6,07 mm.

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| Nomineller Drahtvorschub: | 6,5 m/min |
| Schweißgeschwindigkeit:   | 0,5 m/min |
| Cycleanzahl:              | 20        |
| Pausenzeit:               | 120 ms    |

Da ein Drahtvorschub von 6,5 m/min nicht den untersuchten 10 Kennlinienpunkten entspricht, werden die Kennwerte durch das Schweißgerät zwischen den Punkten 5 und 6 interpoliert. In Tabelle 4.5 sind die interpolierten Werte der CMT-Parameter gegeben sowie die gemessenen Werte für Stromstärke und Cycle-Energie-Eintrag.

**Tabelle 4.5:** CMT-Kennwerte für einen Drahtvorschub von 6,5 m/min

| Drahtvorschub | CMT-Param1      |                  |                |                 |           |                | CMT-Param2    |             |                   |              |                 |                      | Messwerte        |      |
|---------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|-----------|----------------|---------------|-------------|-------------------|--------------|-----------------|----------------------|------------------|------|
|               | $I_{cmt\_init}$ | $Vd_{cmt\_init}$ | $I_{sc\_wait}$ | $Vd_{sc\_wait}$ | $I_{sc2}$ | $Vd_{back\_2}$ | $d_{boostup}$ | $I_{boost}$ | $t_{I\_boost\_1}$ | $VD_{boost}$ | $t_{vd\_boost}$ | Maximale Stromstärke | Energie je Cycle |      |
|               | m/min           | A                | m/min          | A               | m/min     | A              | m/min         | A           | ms                | m/min        | ms              |                      |                  | A    |
| Punkt 5       | 6               | 50               | 15             | 50              | 26        | 150            | -33           | 500         | 180               | 2,25         | 53              | 4                    | 427              | 49,8 |
| Punkt 6       | 7               | 50               | 15             | 50              | 27        | 180            | -34           | 500         | 200               | 2,3          | 55              | 4,1                  | 483              | 61,8 |
| Punkt 5,5     | 6,5             | 50               | 15             | 50              | 26,5      | 165            | -33,5         | 500         | 190               | 2,275        | 54              | 4,05                 | 450              | 55,8 |

### 4.3.3 Anpassung des Schweißstarts

Die so errechnete Nahtbreite entspricht dem Regelbereich der Schweißnaht. Wie in den Bildern zu sehen und vorher erklärt, ergibt sich durch den Prozessstart und die notwendige Kommunikationszeit von Roboter und Schweißgerät an den Startpunkten ein etwas dickerer Tropfen. Um die negativen Auswirkungen des elektromagnetischen Blaseffekts zu verhindern, sollten diese dickeren Nahtstellen vermieden werden.

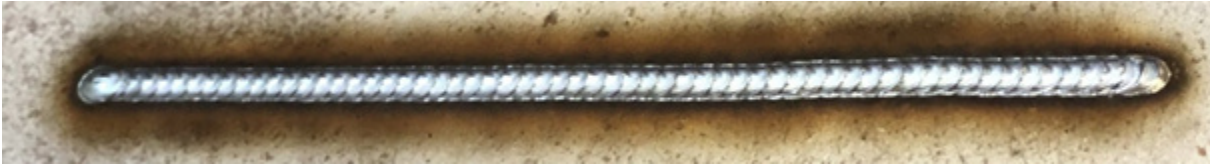
Daher werden zwei Maßnahmen getroffen. Einerseits sollte ein gleicher Startpunkt in mehreren aufeinanderfolgenden Lagen vermieden werden. Dies wurde bereits in den Parameterstudien durch den wechselnden Schweißstartpunkt berücksichtigt. Andererseits wird die Einstellung Special-Two-Step am Schweißgerät gewählt. Hierdurch ist es möglich, die vorgesehene Stromstärke über die Zeit der Naht in 3 Stufen prozentual zur Standardstromstärke des eingestellten Drahtvorschubs einzustellen. Für die vorliegende Arbeit wurde diese Prozessanpassung folgendermaßen eingestellt:

Es wurde für die ersten 0,3 s einer Schweißung 80 % der vorgesehenen Stromstärke mit einer Übergangszeit von 0,2 s eingestellt. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse entspricht eine solche Einstellung einem reduzierten ersten Step. Den Rest der Naht und das Nahtende wird mit 100 % der Stromstärke geschweißt.

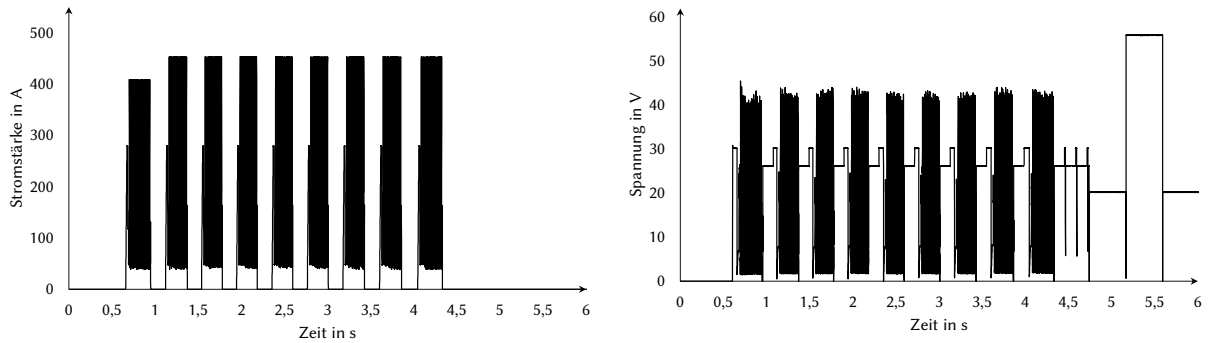
### 4.3.4 Schweißergebnis

Es ergeben sich die in Abb. 4.13 dargestellten Schweißstrom- und Schweißspannungsverläufe und eine regelmäßige Naht, wie in Abb. 4.12 zu sehen. In Tabelle 4.6 sind die endgültig gewählten Parameter zusammenfassend aufgeführt.





**Abbildung 4.12:** Schweißstrom- und Schweißspannungsverläufe für den Standardparametersatz



**Abbildung 4.13:** Schweißstrom- und Schweißspannungsverläufe für den Standardparametersatz

**Tabelle 4.6:** gewählte WAAM-Prozessparameter\*

| <b>System</b>                  |   |
|--------------------------------|---|
| Bewegungseinheit               | Roboterarm Comau Smart NM 16-3.1 und Steuereinheit Comau C4G RCC1                 |
| Schweißstromquelle             | Fronius CMT Advanced 4000   |
| Schweißprozess                 | CMT-Cycle-Step  |
| Kennlinie                      | CMT 1840  |
| Drahtelektrode                 | Weko 2 – Hersteller: WDI – DIN EN ISO 14341-A G3Si1 – Durchmesser: 1,2 mm         |
| Schutzgas                      | Ferroline C18 – Hersteller: Messer – ISO 14175 M21: 82 % Ar, 18 % CO <sub>2</sub> |
| Zusatzkomponente               | Niederdrucksystem mit koaxialen Sprühdüsen  |
| <b>Prozesssteuerung</b>        |   |
| Schweißbrennerposition         | Vertikal  |
| Kühlung                        | Druckluft und destilliertes Wasser  |
| <b>Schweißprozesssteuerung</b> |   |
| Schweißgeschwindigkeit         | 0,5 m/min   |
| Drahtvorschub                  | 6,5 m/min   |
| Schutzgasdurchfluss            | 15 l/min  |
| CTWD                           | 12 mm   |
| Cycleanzahl                    | 20  |
| Steppausenzeit                 | 120 ms  |
| Anpassung                      | Special-Two-Step - Start: 0,3 s mit 80 % I - Übergangszeit: 0,2 s                 |

\* Nicht angegebene Parameter, wie Kühlzeit, Slicingeinstellungen (wie Bahnanzahl und Abstand) werden gesondert beschrieben



---

# 5 UNTERSUCHUNGEN ZUM MATERIALVERHALTEN

Aus Kapitel 3 geht hervor, dass sich zwar keine allgemeine Beziehung zwischen den gewählten Prozessparametern und den Werkstoffkennwerten erstellen lässt, sich diese Kennwerte jedoch je nach gewählten Parametern unterscheiden. Daher wird in diesem Kapitel das – durch die zuvor vorgestellten Schweißparameter – hergestellte Material untersucht. Ein besonderer Fokus liegt darauf, ob und wie sich das Materialverhalten bei gleichen Prozessparametern durch unterschiedliche Slicingansätze verändert. Die Ergebnisse werden in ein Materialmodell für die finite Elemente (FE) Berechnung überführt.

## 5.1 Versuchskonzept

### 5.1.1 Prüfumfang

Ausgehend von dem gewählten Parametersatz wird der Einfluss der Druckstrategie auf die Materialeigenschaften untersucht. Für die Baupraxis sind hierbei vor allem E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit und die Duktilität (Bruchdehnung) des Werkstoffes relevant. Daher werden Zugversuche durchgeführt.

Zur Bestimmung, inwieweit die Schweißrichtung/ Aufbaurichtung des gedruckten Bauteiles berücksichtigt werden muss, wird das Verhalten in zwei Richtungen untersucht: in Schweißrichtung (parallel) und senkrecht zur Schweißrichtung (senkrecht). Neben der Schweißrichtung werden die Auswirkungen der Anzahl von Schweißbahnen in einer Lage, des auskragenden Aufbaus und der Ausführung von Kreuzungspunkten untersucht. Je Einfluss werden 3 Zugversuche durchgeführt.

Zusätzlich zu den Zugproben werden bei Untersuchung der Schweißbahnanzahl und der Kreuzungspunkte auch das Gefüge anhand von Schlifflinien betrachtet. Es ergibt sich der in Tabelle 5.1 gelistete Proben- und Versuchsumfang. Die untersuchten Fertigungseinflüsse sind in Abb. 5.1 visualisiert.

### 5.1.2 Probendefinition

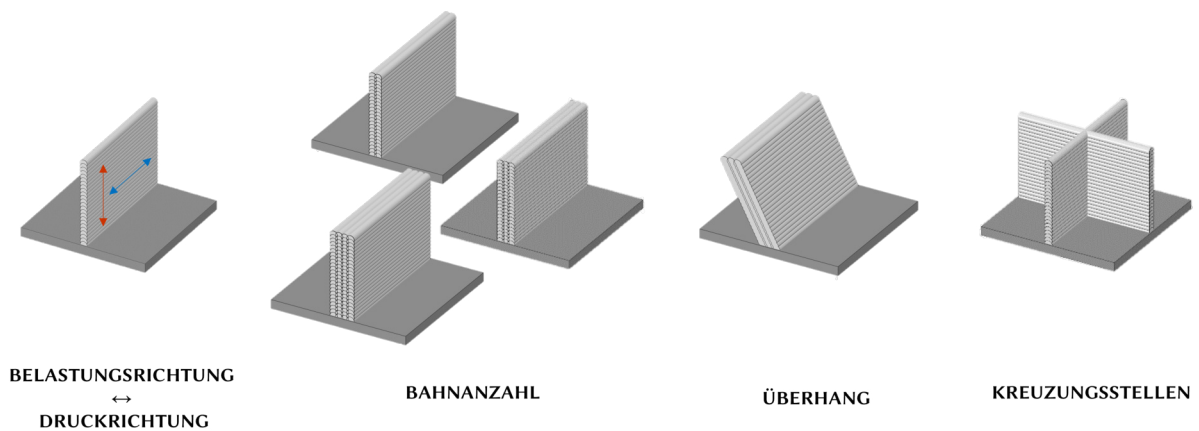
Die Zugprobengröße orientiert sich zum einen an der einfachen Fertigbarkeit und zum anderen an der Größe der Prüfmaschine sowie des verwendeten Feindehnmessers. Es wurden Rundproben der Form DIN 50125 - A 10 verwendet. Die Geometrie ist in Abb. 5.2 zu sehen.

Anhand der Rundproben soll das reine Materialverhalten ohne den Einfluss der rauhen Oberfläche geprüft werden. Daher müssen die additiv gefertigten Probekörper eine größere Dicke als den vorgesehenen Prüfdurchmesser von 10 mm aufweisen. Die Rundproben werden aus den Körpern gedreht. Die Entnahme der Zugproben erfolgt mit einem Mindestabstand von 2 cm zu allen Seiten (siehe Abb. 5.3). An den Rändern könnte sich das gedruckte Material aufgrund eines anderen Wärmeabtrags anders verhalten.

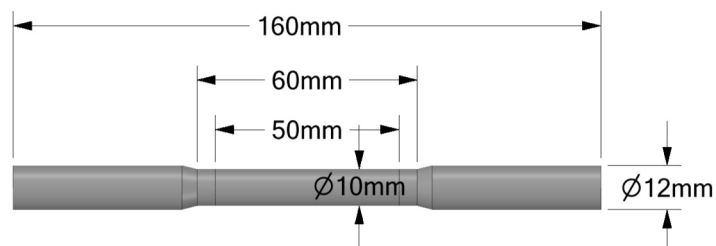
**Tabelle 5.1:** Versuchsmatrix Materialeigenschaften

|                                  | Strategie* | Bahnen je Lage | Belastungsrichtung | Entnahmerichtung* | Anzahl der Zugproben + Schliff | Bezeichnung            |
|----------------------------------|------------|----------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------|
| Einfluss der Bahnanzahl          | -          | 2              | parallel           |                   | 3                              | 2B_P                   |
|                                  | -          | 2              | senkrecht          |                   | 3 + 1                          | 2B_S                   |
|                                  | -          | 3              | parallel           |                   | 3                              | 3B_P                   |
|                                  | -          | 3              | senkrecht          |                   | 3                              | 3B_S                   |
|                                  | -          | 4              | parallel           |                   | 3                              | 4B_P                   |
|                                  | -          | 4              | senkrecht          |                   | 3 + 1                          | 4B_S                   |
| Einfluss des auskragenden Drucks | -          | 3              | parallel           |                   | 3                              | U_3B_P                 |
| Einfluss von Kreuzungspunkten    | 1          | 3              | parallel           | A<br>D            | 3<br>3                         | K1_A_3B_P<br>K1_D_3B_P |
|                                  | 2          | 3              | parallel           | G                 | 3 + 1                          | K2_G_3B_P              |
|                                  | 3          | 3              | parallel           | G                 | 3                              | K3_G_3B_P              |
|                                  | 4          | 3              | parallel           | G                 | 3                              | K4_G_3B_P              |
|                                  | 5          | 3              | parallel           | A<br>D            | 3 + 1<br>3 + 1                 | K5_A_3B_P<br>K5_D_3B_P |

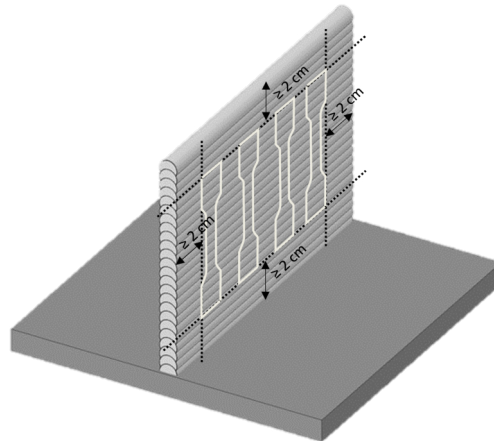
\*wird in im Abschnitt zu den Kreuzungspunkten genauer erklärt



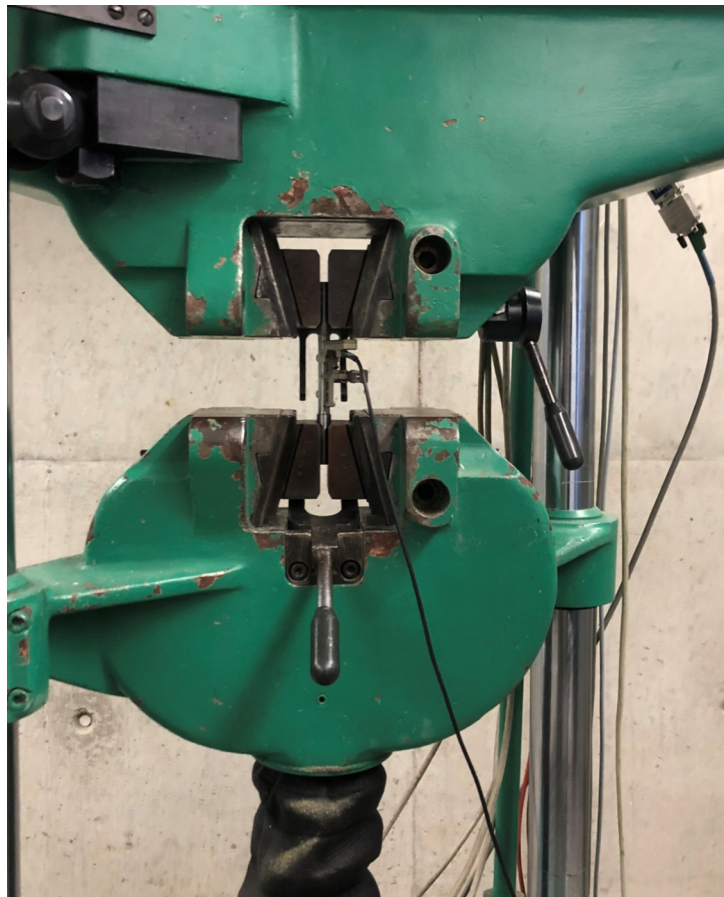
**Abbildung 5.1:** Untersuchte Fertigungseinflüsse



**Abbildung 5.2:** Maße der Zugproben



**Abbildung 5.3:** Prinzipskizze zur Probenentnahme



**Abbildung 5.4:** Versuchsaufbau Zugversuche

### 5.1.3 Durchführung der Zugversuche

Die Zugversuche wurden mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist exemplarisch in Abb. 5.4 zu sehen. Dabei wurde die Prüfgeschwindigkeit in drei Schritten eingestellt. Bis zum Erreichen der Streckgrenze wurde mit 10 mm/min gefahren, für den Bereich zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit mit 5 mm/min und danach mit 12 mm/min.

Ein Feindehnmesser nimmt die Dehnung zu Beginn des Versuches bis zu einer vorgegeben Längung - diese war standardmäßig auf 1,6 mm gesetzt - auf. Die Dehnung in den folgenden Spannungs-Dehnungs-Beziehungen wird ab dem Punkt der Abnahme des Feindehnmessers anhand der Bruchdehnung umgerechnet.

Die Ermittlung der Bruchdehnung erfolgt nach DIN EN ISO 6892-1 durch Messen der Länge des zusammengelegten Referenzbereiches nach Bruch und den Vergleich mit der Ausgangsreferenzlänge von  $L_0$ . Für die beschriebene Geometrie beträgt  $L_0$  50 mm.

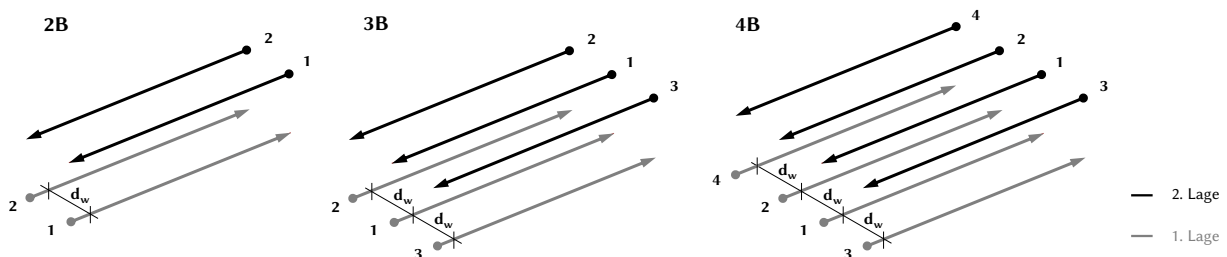
## 5.2 Untersuchungen an senkrechten Blechen

Anhand von sechs senkrecht gedruckten Blechen in drei verschiedenen Stärken wurden die zwei Einflüsse Belastungsrichtung und Bahnanzahl untersucht.

### 5.2.1 Probenherstellung

Es wurden die Einstellungen gemäß Tabelle 4.6 gewählt. Es wurden je zwei Bleche mit 2, 3 und 4 Bahnen in einer Lage gedruckt. Hierbei diente jeweils ein Blech für die Entnahme der Proben in „senkrechter“ Belastungsrichtung und ein Blech für die Entnahme in „paralleler“ Belastungsrichtung. Unter Ansatz der 2 cm für den Rand (gemäß Abb. 5.3) hatte somit ein Blech die Höhe und eines die Länge 20 cm. Die jeweils andere Dimension wurde zu 10 cm gewählt, um genug Platz für Verschnitt zu haben.

Die Slicingsstrategie wurde unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus Grebner (2022) gewählt. Ausgehend von einer Schweißnaht in der vorgesehenen Blechlänge wurden die weiteren Schweißnähte abwechselnd links und rechts neben die bereits geschweißte(n) Naht (Nähte) gesetzt. Die Bahnen hatten dabei einen Abstand von  $d_w = 0,87 * w = 5,07$  mm. Mit diesem Abstand ergab sich nach Grebner (2022) für drei Nähte eine gleichmäßige Höhe über die Probe ohne Überhöhung oder tiefe Täler. Die Start- und Stopppunkte lagen in einer Lage jeweils auf der gleichen Seite. In der nächsten Lage wurden Start- und Stopppunkte der Nähte umgekehrt, die Schweißreihenfolge blieb erhalten. In Abb. 5.5 ist die beschriebene Strategie skizziert. Die Zahlen geben Schweißreihenfolge der Nähte an. Die Lagenhöhe wurde zu 1,2 mm gewählt.



**Abbildung 5.5:** Slicingsstrategie zur Herstellung der senkrechten Bleche B2, B3 und B4

Die Pausenzeit zwischen den Lagen wurde abhängig von der Bahnanzahl gewählt. Sie betrug für die dünnen Bleche (mit 2 Bahnen in einer Lage) 45 s, für die mittleren Bleche (mit 3 Bahnen in einer Lage) 60 s und für die dicken Bleche (mit 4 Bahnen in einer Lage) 90 s. Durch diese Einstellung ergab sich für alle Bleche eine Zwischenlagentemperatur von ungefähr 150 °C. Die gefertigten Bleche zur Entnahme der Proben 2B\_S, 2B\_P, 3B\_P, 4B\_S und 4B\_P sind in Abb. 5.6 zu sehen. Die Fertigung der Wand für die Probe 3B\_S erfolgte auf einer anderen Substratplatte.



**Abbildung 5.6:** Gefertigte Bleche zur Entnahme der Zugproben

## 5.2.2 Zugversuche

### Probenherstellung

Zur Herstellung der Proben (Abb. 5.7) wurden die Bleche von der Substratplatte getrennt und der Rand von 2 cm entfernt. Aus den Blechen wurden Quader mit quadratischer Grundfläche gesägt. Diese Grundfläche orientierte sich jeweils an der Blechdicke. So konnten die Proben zentriert in die Drehbank eingespannt und auf einen Zylinder des Durchmessers 12 mm gedreht werden. Anschließend wurde der Messbereich mit einem Durchmesser von 10 mm in die Probe gedreht. Auf dem mittleren Bild in Abb. 5.7 ist bei den Proben der Bahnanzahl 2 die Oberfläche des additiv gefertigten Bleches zu erkennen, da dieses nur eine Stärke von knapp 11 mm hatte. Nach Drehen des Messbereiches auf 10 mm ist die Oberfläche im für den Zugversuch relevanten Bereich jedoch nicht mehr beeinträchtigt (Abb. 5.7 c)). Alle Proben vor dem Zugversuch sind in Anhang B.1.1 zu sehen.



(a) Sägen in Quader

(b) Drehen auf Außenmaß

(c) Drehen auf Prüfmaß

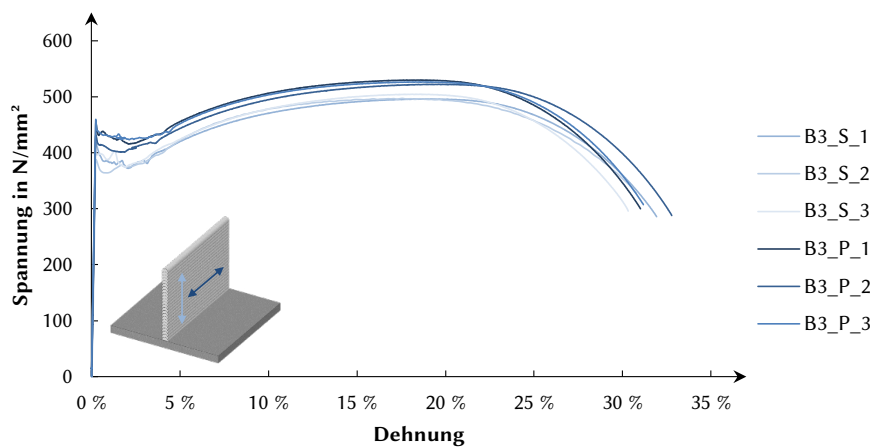
**Abbildung 5.7:** Herstellschritte der Zugproben

Die Nummerierung der Proben erfolgt anhand ihrer Lage im Blech. Für die parallelen Proben war die Probe mit Nummer 1 (xB\_P.1) am höchsten im Blech gelegen. Für die senkrechten Proben zeigt die

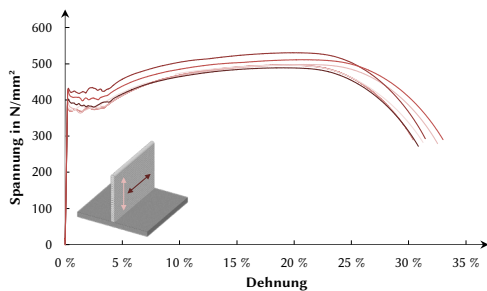
Probe mit Nummer 1 (xB\_S\_1) an, dass diese als erste nach dem vorgesehenen Abstand von 2 cm zum Rand entnommen wurde.

### Zugversuche

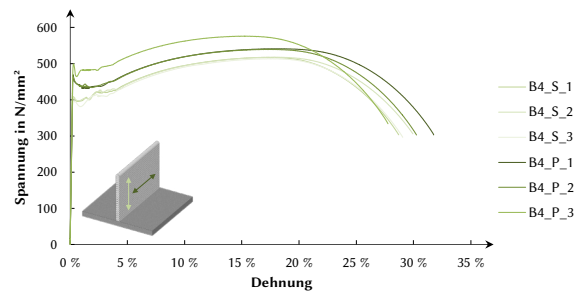
Die Zugversuche wurden wie beschrieben durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der 18 Proben sind in Abb. 5.8 zu sehen. Exemplarisch sind die Zugversuchskurven für 3 Bahnen in einer Lage groß abgebildet. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Proben aus 2 und 4 Bahnen sind zum Vergleich nebeneinander abgebildet. Generell ist das Verhalten der Proben über alle Bahnanzahlen in beiden Belastungsrichtungen jeweils mit niedrig-/ unlegiertem Walzstahl vergleichbar: Die Proben weisen eine hohe Steifigkeit im elastischen Bereich, einen ausgeprägten Streckgrenzeneffekt, eine hohe Verfestigung und eine große Duktilität mit Bruchdehnungen von über 25 % auf.



(a) 3 Bahnen je Lage



(b) 2 Bahnen je Lage



(c) 4 Bahnen je Lage

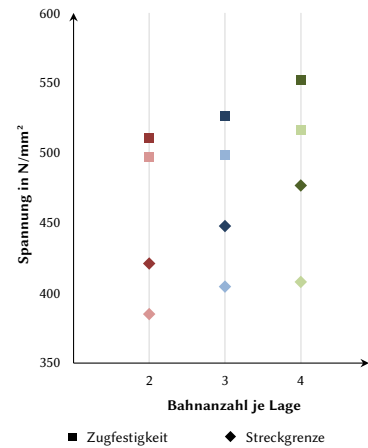
**Abbildung 5.8:** Spannungs-Dehnungs-Kurven

Im elastischen Bereich – bis zum Erreichen der oberen Streckgrenze – ist keine Abhängigkeit von der Belastungsrichtung zu erkennen. Im plastischen Bereich – ab Erreichen der Streckgrenze – zeigt sich für alle drei untersuchten Bahnanzahlen ein ähnliches anisotropes Verhalten. Es ist ein von der Belastungsrichtung abhängiges Verhalten erkennbar. Die in Schweißnahtrichtung (parallel) gezogenen Proben haben in aller Regel eine höhere Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung als die der senkrecht zur Schweißnaht gezogenen (senkrecht).

Die senkrechte Belastungskurve weist für alle untersuchten Bahnanzahlen jeweils eine geringe Streuung auf. In paralleler Belastungsrichtung ist die Streuung abhängig von der untersuchten Bahnanzahl teilweise deutlicher ausgeprägt. Während B3\_P wie B3\_S ebenfalls eine geringe Streuung vorweisen,



|                  | obere<br>Streckgrenze<br>in N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung<br>in % | E-Modul<br>in N/mm <sup>2</sup> |
|------------------|---|---------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| <b>B2_S</b>      | 385 ± 8                                       | 497 ± 1                               | 31,1 ± 0,9           | 200.285 ± 7.608                 |
| <b>B2_P</b>      | 421 ± 13                                      | 511 ± 17                              | 31,3 ± 0,7           | 198.746 ± 3.773                 |
| <b>B3_S</b>      | 404 ± 13                                      | 499 ± 4                               | 30,6 ± 0,7           | 199.075 ± 1.666                 |
| <b>B3_P</b>      | 448 ± 12                                      | 526 ± 3                               | 31,0 ± 0,7           | 194.822 ± 1.778                 |
| <b>B4_S</b>      | 408 ± 1                                       | 516 ± 2                               | 28,8 ± 0,5           | 195.566 ± 4.937                 |
| <b>B4_P</b>      | 477 ± 16                                      | 552 ± 17                              | 29,5 ± 1,7           | 202.831 ± 5.081                 |
| <b>Senkrecht</b> | 399 ± 13                                      | 504 ± 9                               | 30,2 ± 1,2           | 198.309 ± 7.624                 |
| <b>Parallel</b>  | 449 ± 27                                      | 530 ± 22                              | 30,6 ± 1,4           | 198.800 ± 5.010                 |
| <b>Gesamt</b>    | 428 ± 34                                      | 521 ± 21                              | 30,3 ± 1,4           | 198.450 ± 5.824                 |



**Abbildung 5.9:** Materialkennwerte der drei verschiedenen Bahnanzahlen im Vergleich

streuen B2\_P vergleichsweise stark. B4\_P\_3 fällt gegenüber den anderen beiden getesteten Proben B4\_P\_2 und BP\_4\_1 durch eine deutlich höhere Festigkeit und niedrige Bruchdehnung auf.

### Auswertung der Zugversuche

Die Beobachtungen bestätigen sich durch die Auswertung der Zahlenwerte. Für den E-Modul kann keine eindeutige Abhängigkeit von der Belastungsrichtung oder der Bahnanzahl gefunden werden. Im Mittel hat er sowohl für die senkrechte Belastungsrichtung als auch für die senkrechte Belastungsrichtung einen Wert von 198.000 N/mm<sup>2</sup>.

Die in den Spannungs-Dehnungs-Kurven ersichtliche Anisotropie des plastischen Verhaltens bestätigt sich bei Vergleich der Festigkeitswerte. In senkrechter Richtung sind Streckgrenze und Zugfestigkeit geringer und haben eine geringe Standardabweichung. Die Mittelwerte und mit Angabe der Standardabweichung sind in Abb. 5.9 zu sehen. Die genauen Zahlenwerte aller Proben sind in Anhang B.1.3 zu finden. Es lässt sich keine Abhängigkeit von der Höhe der Entnahmestelle erkennen.

Bei Vergleich der Probenreihen zueinander, ist eine mit der Bahnanzahl steigende Festigkeit sowie ein Abfall der Bruchdehnung zu erkennen. Die ansteigende Festigkeit ist im Diagramm in Abb. 5.9 gut zu erkennen.

### Interpretation

Die Streuung der parallelen Proben ist größer als die der senkrechten Proben. Diese Streuung könnte daran liegen, dass die Proben an unterschiedlichen Stellen aus der Probe entnommen wurden und somit unterschiedliche Temperaturhistorien besitzen. Zwar wurde auf einen gleichmäßigen Prozess geachtet, aber der derzeitige Laboraufbau kann das nicht garantieren. Da die senkrechten Proben einen Schnitt durch alle Lagen - und mögliche unterschiedliche Schichten - darstellen, könnte das die geringere Streuung begründen. Die Streuung der Proben B2\_P könnte außerdem durch die recht dünne Ausgangsgeometrie und die Unregelmäßigkeit der Oberfläche beeinflusst sein.

### 5.2.3 Untersuchung des Gefüges mit Schlifften und Härtemessungen

Da B2 und B4 signifikante Unterschiede in den Festigkeiten aufweisen (Abb. 5.9), wurden aus beiden Probekörpern senkrechte Schnitte entnommen und das Gefüge untersucht. Hierbei sollte sich einerseits zeigen, ob sich das Gefüge der beiden Probenreihen bedeutend unterscheidet und ob sich andererseits über die Probenhöhe eines Bauteils besondere Änderungen ergeben. Die Schlifffe wurden mit einer Farbätzung nach Klemm angefertigt. Zusätzlich zu den Schlifften werden über die Höhe Härtemessungen nach Vickers geführt.

#### Probenherstellung

Untersucht wurden zwei ca. 16 cm lange<sup>1</sup> und 1 cm dicke Streifen, die senkrecht zu den Schweißlagen aus Blechen 2B\_S und 4B\_S herausgenommen wurden. Nach dem Sägen der Streifen wurden die Proben plangefräst.

Nach Schleifen der Proben, Aufbringen der Ätzung und Polieren, sind die Schweißnähte mit bloßem Auge deutlich in Form eines „Fischschuppenmusters“ zu erkennen.<sup>2</sup> Durch die Größe der Probe war es schwierig, die Ätzung gleichmäßig an allen Stellen aufzubringen. Dies traf vor allem für die Probe B4\_S zu, sodass die Gefügestruktur nicht an allen Stellen betrachtet werden konnte. In Anbetracht des Forschungsziels ist die Aussagekraft der Ergebnisse dadurch jedoch nicht entscheidend beeinträchtigt.

#### Schlifffe

Für beide Proben ist über die Höhe in der Gefügestruktur anhand der Schlifffe keine Veränderung zu erkennen. In Anhang B.1.4 ist eine Übersicht der betrachteten Stellen mit einer aufgenommenen Vergrößerung von 1:2,5 zu sehen.

Bei Vergleich der Schlifffe der beiden Proben miteinander fallen zwei deutliche Unterschiede auf:

- Während in B2\_S hauptsächlich runde Körner zu sehen sind, finden sich in B4\_S in regelmäßigen Abständen über die Höhe fächerartige Gebilde. Diese säulenförmigen Dendriten sind charakteristisch für „normale“ Schweißnähte und bilden sich durch die gerichtete Erstarrung aus, wenn die Hitze der Schweißnaht schnell in das umgebende Grundmaterial abgegeben wird.
- Zusätzlich fällt auf, dass die Körner der Probe B4\_S deutlich kleiner sind als die der B2\_S (siehe Abb. 5.10). Dies passt mit der höheren Festigkeit der Zugproben zusammen.

Vor allem in der Probe B4\_S sind die angesprochenen Fächerstrukturen zu erkennen. Sie zeigen, wo der Draht beim Schweißen angesetzt hat. Dort, wo die zwei mittleren Schweißnähte gesetzt wurden, sind sie stark ausgeprägt. Zwischen den Fächern ergibt sich ein eher rundes Kornbild. So scheint es einen Unterschied zwischen dem Gefüge in der Mitte einer Naht und zwischen den Nähten zu geben. Mit dieser Erkenntnis wurden für die Härtemessung die Messstellen festgelegt.

---

<sup>1</sup>Auch hierbei wurde der Randbereich des gedruckten Bauteils von 2 cm nicht berücksichtigt.

<sup>2</sup>Dies ist allerdings durch die starke Reflexion der metallischen Proben nicht durch eine Kamera einfangbar gewesen.

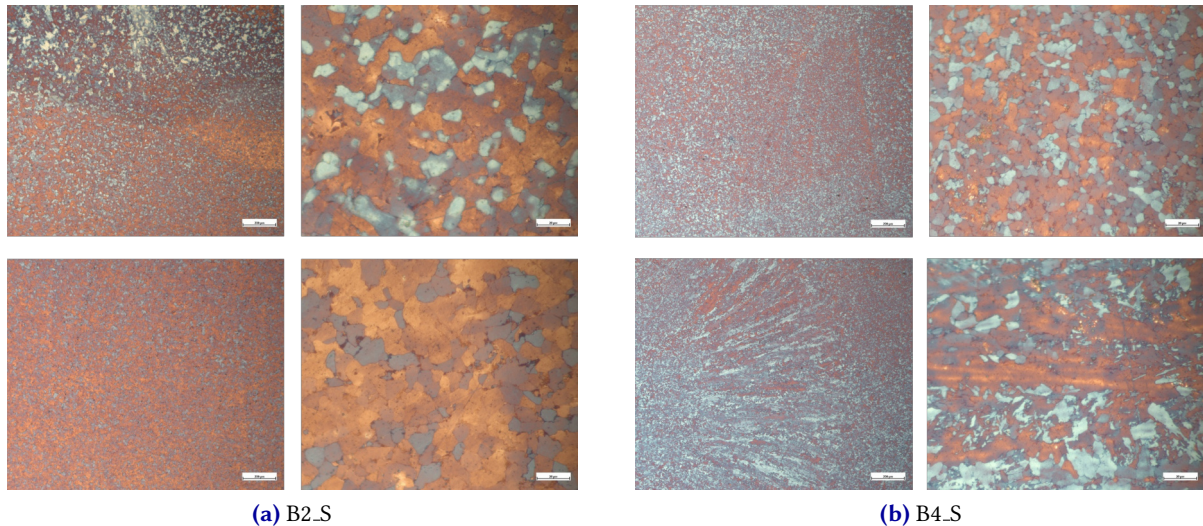


Abbildung 5.10: Korngrößen im Vergleich

### Härtemessungen

Beide Proben wurden über die Höhe in einem Abstand von 15 mm in 11 Lagen untersucht. Die Probe B2\_S wurde je Lage in der Mitte, also zwischen den zwei Schweißnähten, in Randnähe und im Viertelpunkt – ungefähr in der Mitte einer Schweißnaht – untersucht. Die Probe B4\_S wurde je Lage ebenfalls an diesen 3 Stellen untersucht. Da hier der Viertelpunkt allerdings der Stelle zwischen zwei Nähten entspricht, wurde zusätzlich noch der 3/8-Punkt untersucht, dieser entspricht ungefähr der Mitte einer mittleren Naht. Auf den Schlibfbildern wurden keine Unterschiede zwischen den beiden Seiten der Mittelachse erkannt. Es wurde daher vorausgesetzt, dass sich auf beiden Seiten der Mittelachse ähnliche Härtewerte einstellen und nur eine Seite untersucht. Die Messstellen sind in Abb. 5.11 dargestellt.

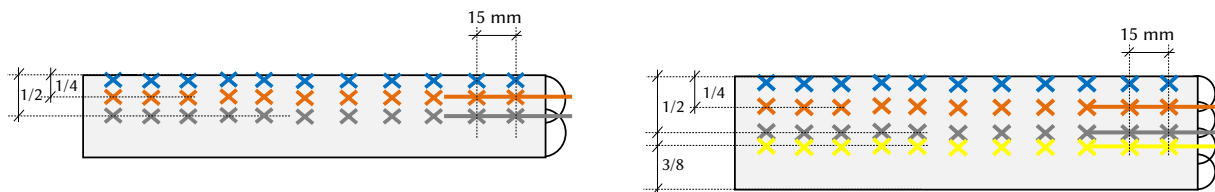


Abbildung 5.11: Messstellen der Härtemessungen

Beide Proben zeigen eine recht einheitliche Härteverteilung - sowohl über die Höhe als auch über die Breite. Die Streuung ist bei Probe B4\_S etwas höher als bei Probe B2\_S (siehe Abb. 5.12). Generell liegen die Härtewerte der Probe B4\_S deutlich über denen der B2\_S. Dies bestätigt die Ergebnisse der Zugversuche.

Zum Vergleich der Messwerte und Verdeutlichung der Streuung wird in Abb. 5.13 nicht 0, sondern eine Härte von 140 als Referenzwert festgelegt. Zusätzlich sind hier Stellen hervorgehoben, die im Nachhinein noch einmal mit dem Mikroskop betrachtet wurden. Hierbei sollte untersucht werden, ob sich die verschiedenen Härtewerte auf die Mikrostruktur zurückführen lassen.

### Vergleich von Härtemessung und Gefüge

Exemplarisch werden für die Probe B2\_S nun die Reihen 5 und 8 bei 50-facher Vergrößerung verglichen (Abb. 5.14). Während Reihe 5 gleiche Härtewerte aufweist, fällt in Reihe 8 vor allem der Viertelpunkt

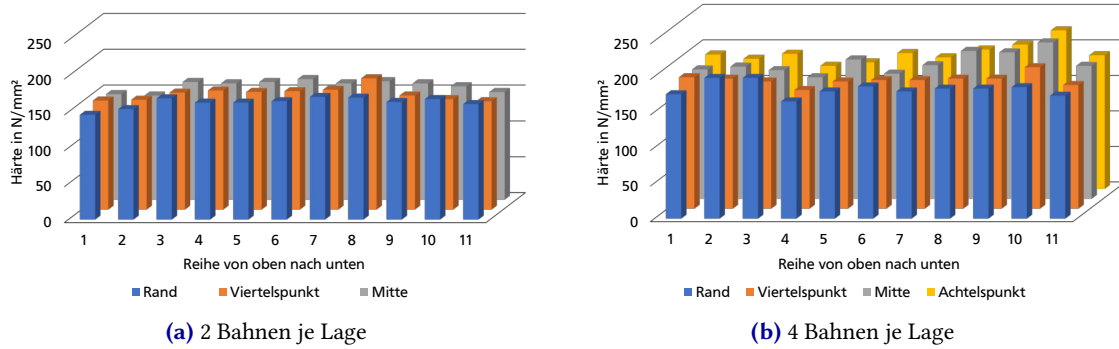


Abbildung 5.12: Ergebnisse der Härtemessung nach Vickers

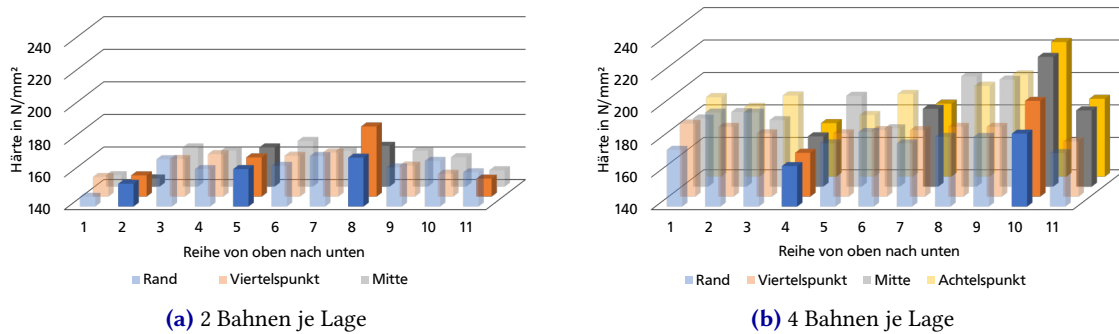


Abbildung 5.13: Härtemessung mit 140 HV als Referenz

auf, der deutlich erhöht ist. Im Gefüge lassen sich beide Stellen kaum unterscheiden. In beiden Fällen ist im Viertelpunkt (orange) eine leichte gerichtete Struktur erkennbar. Dies kann darauf hinweisen, dass hier der Draht aufgesetzt wurde. Die Körner in Reihe 8 können minimal kleiner gedeutet werden. Dennoch scheint der Unterschied zwischen dem Viertelpunkt und den beiden anderen untersuchten Stellen in Reihe 5 größer zu sein, als er es in Reihe 8 ist, sodass sich die unterschiedlichen Härtewerte nicht deutlich aus der Mikrostruktur erkennen lassen.

Der Unterschied, der sich für die Probe B2 ergibt, ist im Vergleich zu dem Unterschied in B4 von Reihe 4 zu Reihe 10 sehr gering. Reihe 4 weist vergleichsweise niedrige Härtewerte von ungefähr gleichem Niveau auf. Diese Gleichmäßigkeit geben auch die Schlitze wieder, das Gefüge stellt sich an allen 4 untersuchten Stellen sehr ähnlich durch klar erkennbare Körner dar. Reihe 10 hat generell deutlich erhöhte Härtewerte, welche sich an den vier untersuchten Stellen zusätzlich unterscheiden. Die Schlitze geben diese Unterschiede ebenfalls wieder (Abb. 5.15). Während sich im Randbereich und im Viertelpunkt runde Kornstrukturen erkennen lassen, sieht man in der Mitte deutlich die Stängelkristalle und der Achtelpunkt erscheint sehr diffus. Allerdings erscheinen die Körner im Randbereich und im Viertelpunkt, trotz erhöhter Festigkeit, in Reihe 10 größer zu sein als in Reihe 4.

Vergleicht man nun die Mitte von Reihe 4 und die Mitte von Reihe 10, könnte man annehmen, dass die erhöhte Festigkeit durch die Stängelkristalle hervorgerufen wird. Vergleicht man jedoch jeweils die Mitte von Reihe 4, 10 und 11 (siehe Abb. 5.16), fällt auf, dass in Reihe 11 die Bildung der Stängelkristalle deutlich ausgeprägter ist als in Reihe 10. Zwar ist die Härte gegenüber Reihe 4, in der man keine Stängelkristalle

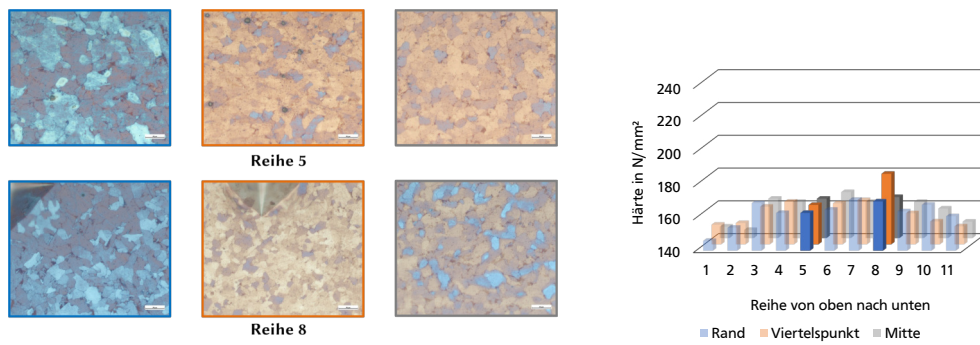


Abbildung 5.14: B2 Vergleich Reihe 5 und Reihe 8 in 50-facher Vergrößerung

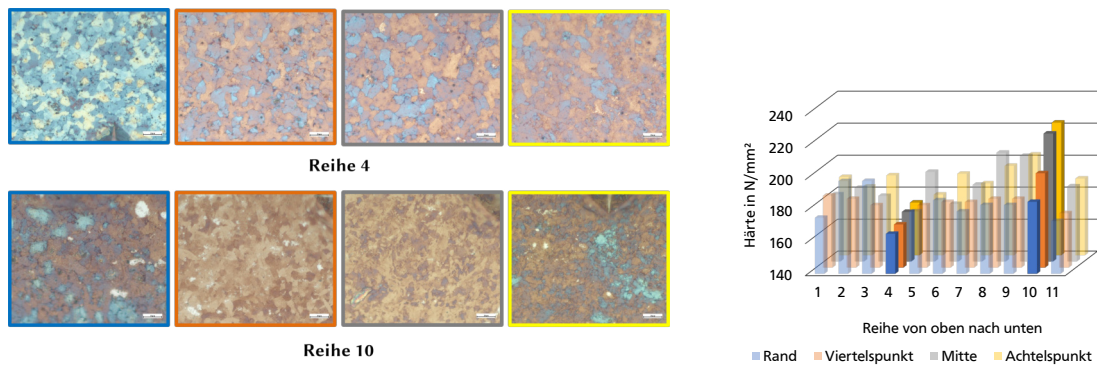


Abbildung 5.15: B4 Vergleich Reihe 4 und Reihe 10 in 50-facher Vergrößerung

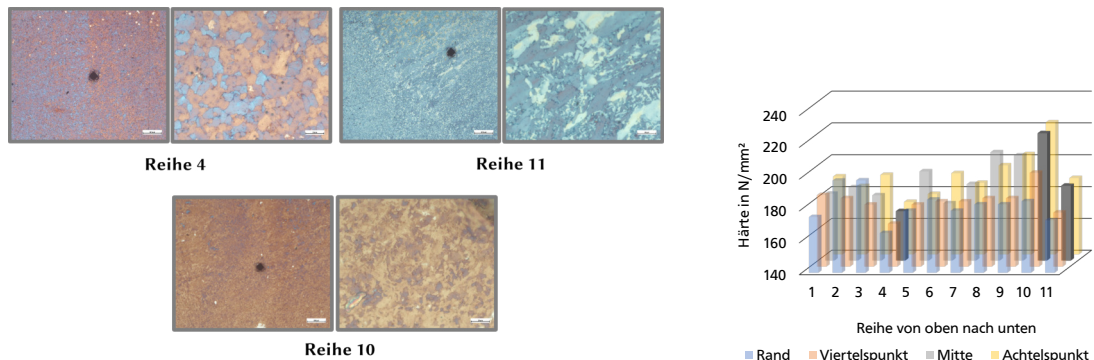


Abbildung 5.16: B4 Vergleich Reihe 4, 10 und 11 in 5-facher und 50-facher Vergrößerung

erkennt, erhöht, jedoch kann die deutlich erhöhte Härte in Reihe 10 nicht allein dadurch begründet werden.

### Interpretation

Sowohl in den Schliffen als auch in der Härtemessung ist zwischen Lagenhöhe und Gefügestruktur und somit Festigkeit und Härte kein Zusammenhang zu erkennen. In den Härtemessungen ergaben sich einige Ausreißer, allerdings lassen diese sich nicht eindeutig durch die Mikrostruktur begründen. Sie zeigen allerdings, dass eine gewisse Streuung vorherrscht, diese war auch in den Zugproben zu sehen. Sie kann aber nicht direkt auf eine Prozessspezifik zurückgeführt werden, sondern muss generell berücksichtigt werden.

Die höhere Festigkeit und Härte der Probe B4\_S gegenüber B2\_S lässt sich mit den Schlifften durch prinzipiell kleineren Korngrößen und das teilweise martensitische Gefüge begründen. Vor allem bei B4\_S ist eine regelmäßige Bildung von Stängelkristallen zu sehen. Hier könnte die größere Fläche der bereits gedruckten Struktur zu einen schnelleren Wärmeabfluss führen. Im Gegensatz zur „normalen“ Schweißnaht sind keine Grobkornzone oder sonstige Spezifika, die sich in der WEZ ergeben, zu erkennen.

### 5.2.4 Bewertung der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen zu den senkrechten Wänden lassen sich die folgenden Aussagen ziehen:

- Sowohl die Zugversuche als auch die Gefüge- und Härteuntersuchungen zeigen keine Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Lage in der Probe. Zwar sind sowohl im Gefüge als auch in den Zugproben in der parallelen Belastungsrichtung Unterschiede festzustellen, diese sind jedoch nicht abhängig von der Höhenlage, sondern wie es scheint, zufällig verteilt. Bei Ermittlung von Bemessungswerten sollte diese Streuung daher berücksichtigt werden.
- Es ist eine Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Bahnanzahl festzustellen. Mit zunehmender Bahnanzahl steigt die Festigkeit. Dies spiegelt sich auch in der Korngröße wider. Bei Ermittlung von Bemessungsgrößen sollte eine solche Abhängigkeit berücksichtigt werden. Beispielsweise sollten die Materialkennwerte nicht über Bleche von stärkerer Dicke ermittelt werden.
- Bei Auswertung der Zugproben fällt zusätzlich noch die Anisotropie auf. Das Materialverhalten ist abhängig von Fertigungs- und Belastungsrichtung eines Bauteils. Dies zeigt sich für alle drei untersuchten Blechdicken. Dieser Umstand sollte ebenfalls bei Ansatz von Bemessungswerten berücksichtigt werden.

## 5.3 Untersuchung am auskragenden Blech

Die bisher vorgestellten Untersuchungen wurden an Proben durchgeführt, die aus senkrecht gefertigten Blechen entnommen wurden. Die additive Fertigung ermöglicht jedoch die Herstellung von komplexeren Formen als nur Blechen. Hierzu ist häufig auch ein Überhang notwendig. Um den Einfluss des Überhangs zu untersuchen, wurde daher ein Blech in einem Winkel von 40° zur Vertikalen gefertigt und Zugproben in paralleler Richtung entnommen.

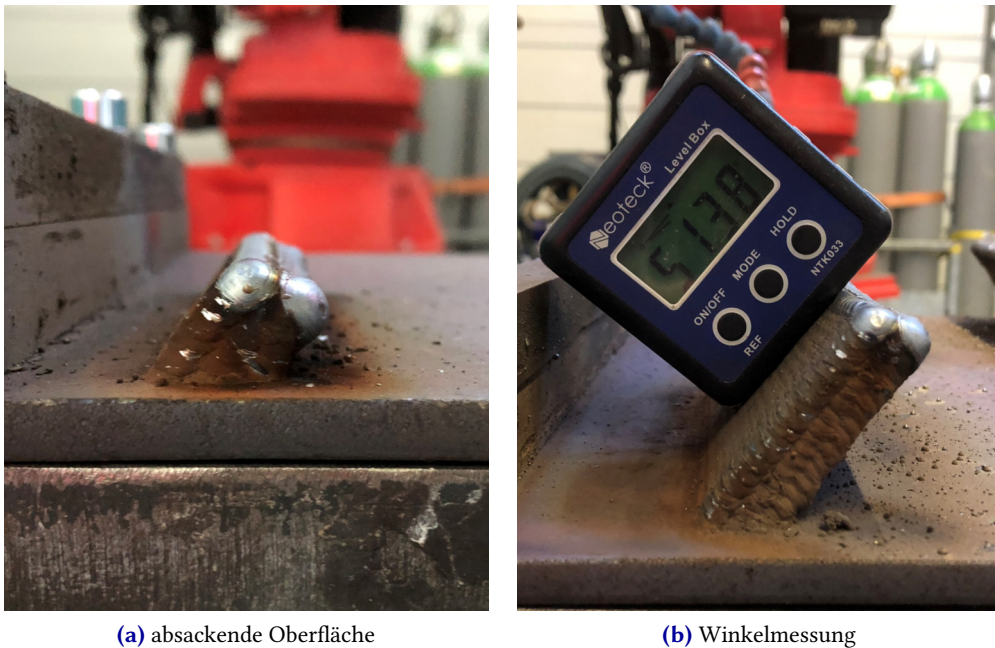
### 5.3.1 Herstellung der Proben

Der Winkel von 40° zur Senkrechten war der größte Winkel, der in der senkrechten Brennerposition noch herstellbar war und sollte daher als extreme Fertigungsbedingung hinsichtlich der Materialeigenschaften untersucht werden. Auf Abb. 5.17 b) ist die Messung des Winkels mit 51,38° zur Horizontalen, also 38,62° zu Vertikalen zu sehen. Es wurden die Einstellungen gemäß Tabelle 4.6 gewählt.

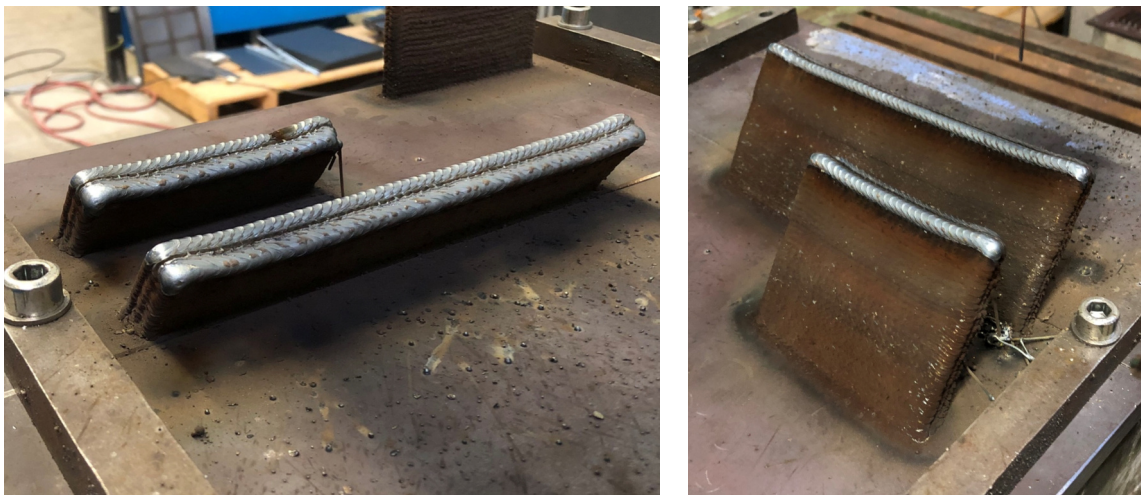
Gefertigt wurden 3 Bahnen in einer Lage. Durch den Überhang ist die Dicke des Blechs verringert. Da es bei den Proben der senkrechten Bleche mit zwei Bahnen in einer Lage bereits zu Problemen mit der Dicke kam, kann erst durch die Verwendung der 3 Bahnen eine ausreichende Dicke gewährleistet werden. Außerdem haben die 3 Bahnen in einer Lage die geringste Streuung aufgewiesen (vgl. Abb. 5.8 b)). Die Kühlzeit wurde, um Abtropfen zu verhindern, auf 90 Sekunden gesetzt.

Der Code wurde so aufgebaut, dass für jede Lage die Bahnen horizontal versetzt werden. Die Höhe wurde für alle drei Bahnen in jeder Lage gleich vorgesehen. Diese Annahme ist nicht ganz richtig, wie Abb. 5.17 a) zeigt. Durch den Versatz sackt die überhängende Bahn etwas ab. Die äußere Bahn auf der anderen Seite hingegen wird höher. Bei gleichbleibender Vorgabehöhe ergibt sich dadurch für die drei Bahnen einer Lage ein anderer CTWD.

In Abb. 5.18 ist das Blech mit einer Breite von 20 cm und einer Höhe von 10 cm zu sehen. Aus dem Blech wurden drei Zugproben in Schweißnahtichtung analog zu den senkrechten Blechen entnommen.



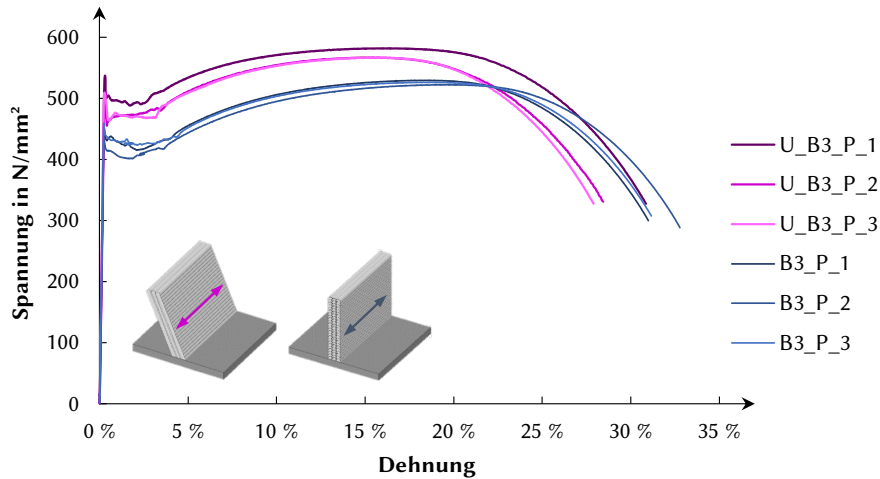
**Abbildung 5.17:** Aufnahmen von der auskragenden Fertigung



**Abbildung 5.18:** gefertigte Bleche mit Überhang

### 5.3.2 Zugversuch

Es wurden 3 Zugversuche durchgeführt (Bezeichnung der Proben: U\_3B\_P). Das Ergebnis der Zugversuche U\_3B\_P im Vergleich zu den ohne Überhang gefertigten Zugproben 3B\_P zeigt Abb. 5.19. Es ist eine



**Abbildung 5.19:** Spannungs-Dehnungs-Kurven Überhang-Proben

**Tabelle 5.2:** Materialkennwerte des Überhang im Vergleich zu B3\_P

|        | obere<br>Streckgrenze<br>in N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung<br>in % |
|--------|---|---------------------------------------|----------------------|
| U_B3.P | 519 ± 13                                      | 572 ± 7                               | 28,6 ± 1,3           |
| B3.P   | 448 ± 12                                      | 526 ± 3                               | 31,0 ± 0,7           |

deutliche Festigkeitssteigerung und eine Abnahme der Duktilität zu erkennen. Der elastische Bereich zeigt erneut keinen augenscheinlichen Unterschied.

### 5.3.3 Interpretation und Bewertung

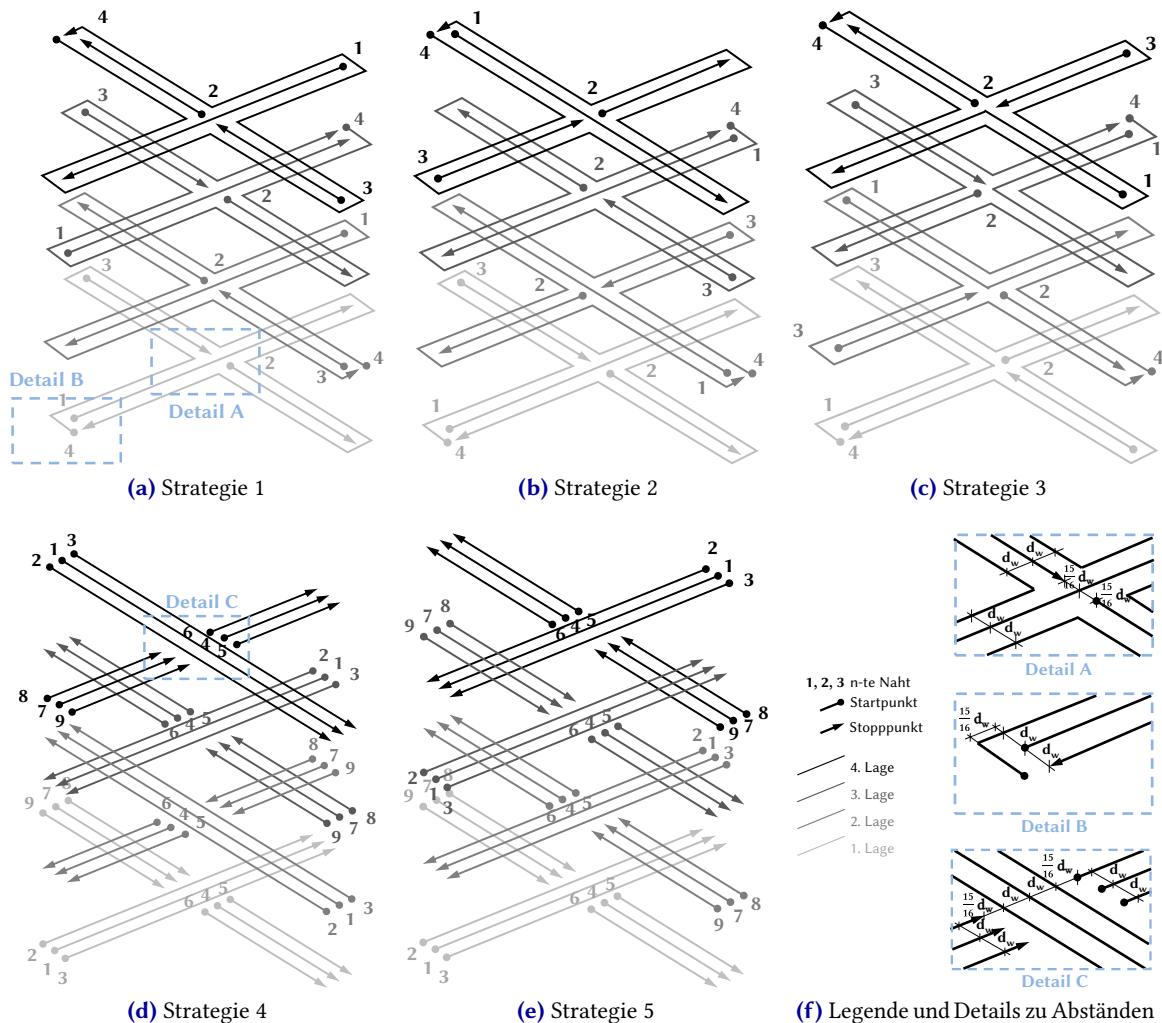
Die Festigkeitssteigerung kann verschiedene Gründe haben, zum einen war die Kühlzeit je Lage im Vergleich zur Standardprobe erhöht. Die Temperaturhistorie hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Gefüge und damit einhergehend auf die Eigenschaften von Stahl. Zum anderen ist die Lagenhöhe durch das auskragende Drucken verkleinert, da ein Teil der Schmelze herunterfließt. Dadurch wird bezogen auf die Gesamthöhe des gedruckten Blechs insgesamt mehr Energie eingebracht. Das kann ebenfalls eine festigkeitssteigernde Wirkung haben. Außerdem war der CTWD nicht an jeder Stelle der Probe gleich. Wie in Abschnitt 2.3.6 beschrieben, hat die freie Drahtelektrodenlänge einen maßgeblichen Einfluss auf die Lichtbogenlänge und die mit dem Prozess eingebrachte Energie.

Zumindest bis zu einer Dehnung von 15 % ist der Einfluss des Überhangs nicht als negativ zu bewerten.



## 5.4 Untersuchungen an Kreuzungsstellen

Neben Überhängen kann es innerhalb einer additiv gefertigten Struktur zu Kreuzungsstellen kommen. Diese Stellen können unterschiedlich ausgeführt werden. Um zu überprüfen, inwieweit unterschiedliche Bahnplanungsansätze einen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben, wurde ein Kreuzungsstoß von zwei Blechen, die sich senkrecht treffen, untersucht.

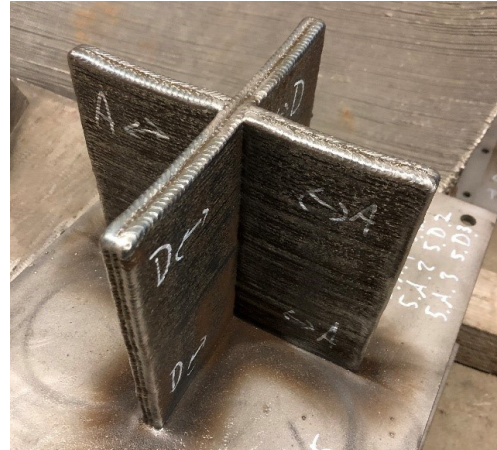
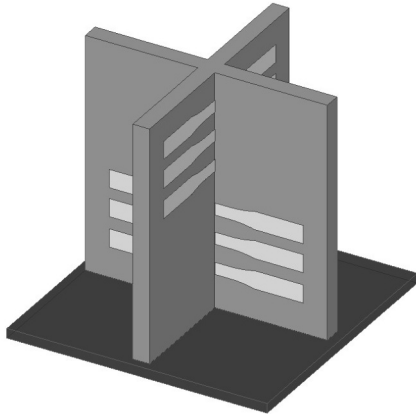


**Abbildung 5.20:** Vorstellung der fünf untersuchten Slicingstrategien für eine rechteckige Kreuzungsstelle nach Grebner (2022)

### 5.4.1 Untersuchte Slicingstrategien

Zur Untersuchung hat Grebner (2022) in seiner Masterarbeit hierfür fünf verschiedene Slicingansätze entwickelt. Diese sind in Abb. 5.20 zu sehen. Dargestellt sind jeweils vier aufeinanderfolgende Lagen, welche sich in ihrer Nahtführung unterscheiden<sup>3</sup>. Ab der fünften Lage wiederholt sich die Reihenfolge. Durch das Hochzählen der Lagen und eine Modulo-Funktion ermittelt der Roboter, ob er sich in einer ersten, zweiten, dritten oder vierten Lage befindet und führt die entsprechenden Befehle aus.

<sup>3</sup>Strategie 5 unterscheidet sich eigentlich nur in zwei Lagen, für eine einheitliche Darstellung wurden dennoch vier Lagen abgebildet.



**Abbildung 5.21:** Skizze zur Probenentnahme und mit Strategie 5 gefertigtes Bauteil

Es gibt eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten eine solche Kreuzungsstelle zu slicen. Mit den hier gefertigten Bauteilen sollten zunächst die folgenden Punkte untersucht werden:

- Additiv gefertigte Strukturen werden häufig mit einer Umrandung und einem Infill ausgeführt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Daher wurde der Einfluss einer Umrandung (Strategien 1-3) im Vergleich zu nebeneinander liegenden Schweißbahnen (Strategien 4 und 5) untersucht.
- Die Strategien 1-3 unterscheiden sich durch das gewählte Infill. In Strategie 1 und 2 geht in einer Lage jeweils die Mittelbahn durch und die andere Richtung wird in zwei Nähte aufgeteilt. In Strategie 3 ist die durchgehende Naht ein L. Sie hat einen Knick von  $90^\circ$  in der Mitte und die anderen Seiten schließen an. Dieses L rotiert mit jeder Lage.
- Ein weiterer Einfluss, der untersucht wurde, ist die wechselnde Anordnung der durchgehenden Nähte. So unterscheiden sich Strategie 1 und 2 sowie 4 und 5 dadurch, dass sich die Anordnung der durchgehenden Naht in jeder Lage ändert bzw. gleich bleibt.

Für alle Strategien wurde darauf geachtet, dass Start- und Stopppunkte in zwei aufeinanderfolgenden Lagen an unterschiedlichen Stellen positioniert sind. Die Kreuzungsstellen wurden mit 3 Bahnen in einer Lage gefertigt. Der Abstand der Bahnen untereinander wurde entsprechend den senkrechten Blechen B3 zu  $d_w = 5,07$  mm gewählt. In Voruntersuchungen von Grebner (2022) ergab sich, dass die Start- und Stopppunkte der anschließenden Nähte etwas näher als im Abstand  $d_w$  an die bereits geschweißte Naht geführt werden müssen. Hierfür ergab sich ein Abstand von  $15/16 d_w$  als am besten passend. Die Details in Abb. 5.20 zeigen, welcher Abstand wo gewählt wurde. Es wurden die Einstellungen gemäß Tabelle 4.6 gewählt. Die Kühlzeit zwischen den Lagen betrug für alle Bauteile 120 Sekunden.

### 5.4.2 Zugversuch

#### Probenherstellung

Wie in Abb. 5.21 zu sehen wurden je Schenkelrichtung drei Zugproben in Schweißnahtichtung (parallel) mittig über die Kreuzungsstelle angeordnet. Da in den Strategien 2 - 4 die durchgehende Naht in jeder Lage wechselt - und dies über die Höhe regelmäßig -, wurde davon ausgegangen, dass sich das Material in beide Schenkelrichtungen gleich verhält. Es wurden für diese Strategien daher nur Probekörper mit einer Höhe von 100 mm gefertigt und jeweils 3 Zugproben entnommen. Für die Strategien 1 und 5 wurden

Probekörper der Höhe 180 mm gefertigt und jeweils 6 Zugproben entnommen. Unter Berücksichtigung des Abstands von 2 cm zu allen Rändern und den Ergebnissen zu den senkrechten Blechen wurde davon ausgegangen, dass ein Höheneinfluss nicht berücksichtigt werden muss. Insgesamt wurden 21 Zugproben aus den Kreuzungsstellen entnommen.

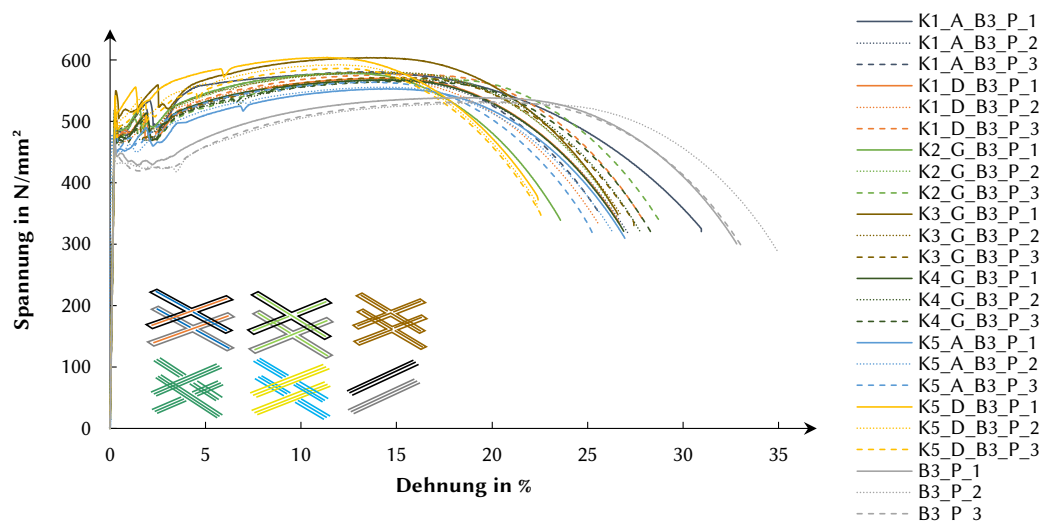
Die Zugproben wurden entsprechend ihrer Strategie und der Entnahmerichtung aus dem Stoß bezeichnet. Für die Entnahmerichtung gab es drei Bezeichnung:

- A** angeschweißt Unterscheidung für die Strategie 1 und 5, wenn die Proben in Richtung der unterbrochenen Schweißnaht entnommen wurden.
- D** durchgeschweißt Unterscheidung für die Strategie 1 und 5, wenn die Proben in Richtung der durchgehenden Schweißnaht entnommen wurden.
- G** gleichmäßig für Strategie 2 - 4.

Die Herstellung der Zugproben erfolgte äquivalent zu Abschnitt 5.2.3. Zuvor wurden die Bauteile der Strategie 1 und 5 in der Mitte geteilt. Weiterhin wurde zuerst der nicht berücksichtigte Schenkel abgesägt, ehe die Quader mit quadratischer Grundfläche gesägt werden konnten.

## Durchführung

Das Ergebnis der Zugversuche aus den Kreuzungsproben und die drei Referenzproben B3\_P sind in den Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abb. 5.22 zu sehen. In Anhang B.2.3 sind die jeweils drei zu einer Probensorte gehörenden Kurven einzeln in Diagrammen aufgeteilt. Zu Probe K1\_A\_3B\_P\_1 ist zu sagen, dass hier eine falsche (kleinere) Referenzlänge eingezeichnet wurde, sodass die Dehnungen nicht (vgl. Abschnitt 2.5.1), die Festigkeiten dennoch verwendet werden können.



**Abbildung 5.22:** Spannungs-Dehnungs-Beziehung aller Kreuzungsproben und B3\_P

Auffällig ist, dass die Kreuzungsproben deutlich höhere Festigkeiten aufweisen. Außerdem ist die Bruchdehnung stark reduziert. Allerdings sind alle Kreuzungsproben außermittig gerissen. Ein Vergleich zwischen der gerissenen Referenz und einer Kreuzungsprobe ist in Abb. 5.23 zu sehen. Bei Vergleich der Kurven fällt zudem auf, dass die Kreuzungsproben nach Erreichen der oberen Streckgrenze zwar abfallen, nach diesem Abfall aber ohne ausgeprägte Lüdersdehnung fast direkt wieder ansteigen und sich verfestigen.

Auch in diesen Zugproben zeigt sich keine Abhängigkeit von der Entnahmestelle, so hat in einer Probenreihe mal die Probe 1 (oberste Probe), mal Probe 3 (unterste Probe) und mal die Probe 2 (mittlere Probe) die höchsten Festigkeiten.

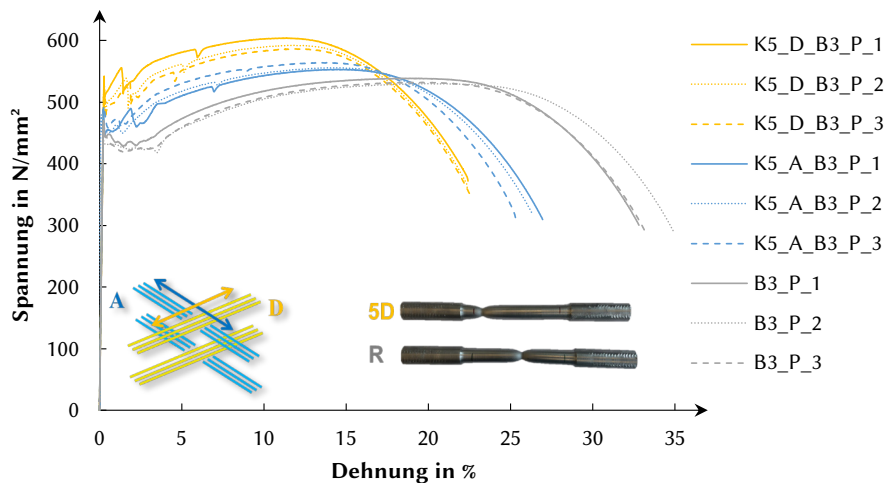
**Auswertung**

Die Mittelwerte der vier Kenngrößen und die jeweilige Standardabweichung sind in Tabelle 5.3 angegeben. Die genauen Werte jeder einzelnen Probe sind in Anhang B.2.4 zu finden.

**Tabelle 5.3:** Materialkennwerte der Kreuzungsproben

|           | obere<br>Streckgrenze<br>in N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung<br>in % |
|-----------|---|---------------------------------------|----------------------|
| K1_A_3B_P | 517,1 ± 4,7                                   | 576,0 ± 5,9                           | 25,7 ± 0,7           |
| K1_D_3B_P | 510,6 ± 4,8                                   | 571,8 ± 3,8                           | 26,6 ± 0,6           |
| K2_G_3B_P | 512,0 ± 7,3                                   | 576,2 ± 4,3                           | 25,7 ± 2,1           |
| K3_G_3B_P | 526,5 ± 17,3                                  | 585,8 ± 13,6                          | 26,3 ± 0,3           |
| K4_G_3B_P | 494,0 ± 1,4                                   | 567,0 ± 1,2                           | 27,0 ± 0,6           |
| K5_A_3B_P | 487,0 ± 5,5                                   | 558,0 ± 4,6                           | 25,7 ± 0,7           |
| K5_D_3B_P | 532,2 ± 8,1                                   | 594,6 ± 7,5                           | 21,8 ± 0,1           |
| 3B_P      | 448,0 ± 11,9                                  | 526,3 ± 3,0                           | 31,0 ± 0,7           |

Vergleicht man die Ergebnisse der verschiedenen Slicingstrategien, erkennt man den deutlichsten Unterschied in den beiden Entnahmerichtung des ohne Umrandung gedruckten Körpers. Während die Proben in Richtung der durchgehenden Schweißnaht (K5\_D\_3B\_P) vergleichsweise sehr hohe Festigkeiten und sehr geringe Bruchdehnungen zeigen, ist es für die Proben, die senkrecht hierzu entnommen wurden (K5\_A\_3B\_P), umgekehrt. Die Kennwerte der mit Umrandung gedruckten Körper liegen zwischen den beiden Extremen. Auch der abwechselnd geschweißte Körper ohne Umrandung liegt in diesem mittleren Bereich.



**Abbildung 5.23:** Vergleich Proben aus Körper 5 im Vergleich zur Referenz

Abb. 5.23 zeigt den Vergleich der Proben des Körpers 5 zur Referenzprobe. Weiterhin ist exemplarisch für das Versagen aller Proben, die Probe K5\_D\_3B\_P\_1 nach Durchführung des Versuches und die Probe R1 im Diagramm abgebildet. Wie bereits beschrieben, ist auffällig, dass die Kreuzungsproben, vor allem K5\_D\_3B\_P, nach Erreichen der Streckgrenze keinen Lüdersbereich wie die Referenzproben aufweisen,

sondern sich nahezu direkt verfestigen. Weiterhin sind deutliche Zacken zu erkennen, bei ca. 2 % und 5 % Dehnung der Proben K5\_D\_3B.P. Hier fällt die Spannung schlagartig ab, um dann wieder in eine Verfestigung überzugehen. Diese Zacken sind in allen Proben, die aus den Kreuzungskörpern entnommen wurden, mehr oder weniger stark ausgeprägt zu erkennen.

### Interpretation

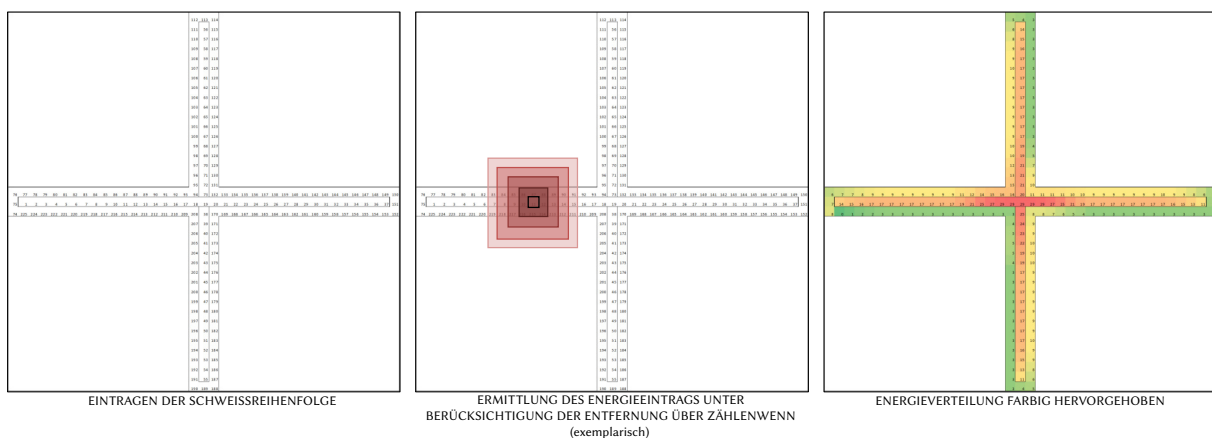
Die gesteigerte Festigkeit der Kreuzungsproben deutet auf einen Härtingsprozess hin, der während der Fertigung stattgefunden hat. Die Zacken in den Kurven und das außermittige Versagen weisen auf mehrere Materialbereiche hin, die sich in der Probe und innerhalb des Messbereichs befinden.

Ein solcher Härtingseffekt ist auch bei den Untersuchungen zu den Bahnanzahlen zu erkennen: Wurden in einer Lage mehr Bahnen gefertigt, war eine deutliche Zunahme der Festigkeit zu sehen. In den Kreuzungsproben wird vor allem die Mitte mehrfach erhitzt, hier laufen 4 x 3 Bahnen zusammen. Je weiter eine Stelle von der Mitte entfernt ist, desto weniger häufig wird sie erhitzt. Die Häufigkeit des Energieeintrags ist zusätzlich von der Slicingstrategie abhängig.

### 5.4.3 Überschlägige Untersuchung des Energieeintrags

Um den Energieeintrag vergleichen zu können, wurde versucht, diesen stark vereinfacht mit Hilfe von Excel nachzuvollziehen. Hierzu wurde eine Lage des Probekörpers in Quadrate von 5 x 5 mm eingeteilt, sodass sich in jeder Schenkelrichtung drei Reihen ergeben. Dann wurden dem Robotercode entsprechend Zahlen von 1 bis 255 in die Zellen eingetragen. Dabei stellt die 1 den Beginn des Prozesses und die 255 die letzte Schweißstelle in der Lage dar.

Nun wird angenommen, dass der Energieeintrag nur von einer großen Zahl an eine kleine Zahl erfolgen kann. Die Intensität des Eintrages wird durch die Entfernung zwischen den beiden Zellen definiert. Vereinfacht wird ein halbkugelförmiger Energieeintrag vorausgesetzt, sodass alle Stellen, egal ob sie in Schweißrichtung vor, hinter oder senkrecht zur Schweißrichtung liegen, den gleichen Eintrag abhängig von ihrer Entfernung erhalten. In Excel wird dies über mehrere gewichtete Zählenwenn-Abfragen ermittelt. Zellen, die in der direkten Umgebung liegen, werden mit 1 gewichtet, Zellen die 4 Kästchen entfernt liegen, gehen nur noch mit 1/4 in diesen Energieeintrag ein.



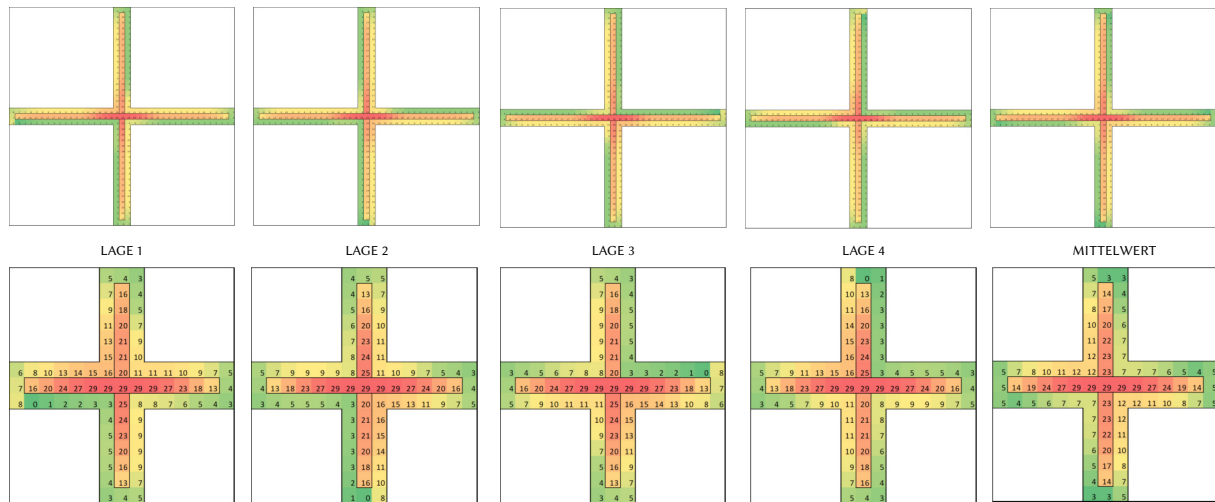
**Abbildung 5.24:** Vorgehen Ermittlung der Energieverteilung für eine Schweißlage

So erhält jede Zelle einen Zahlenwert, der angibt, wie viel Energie dort eingebracht wurde. Dieser Wert hat nur vergleichenden Charakter und hat keine physikalische Bedeutung. Durch eine farbliche

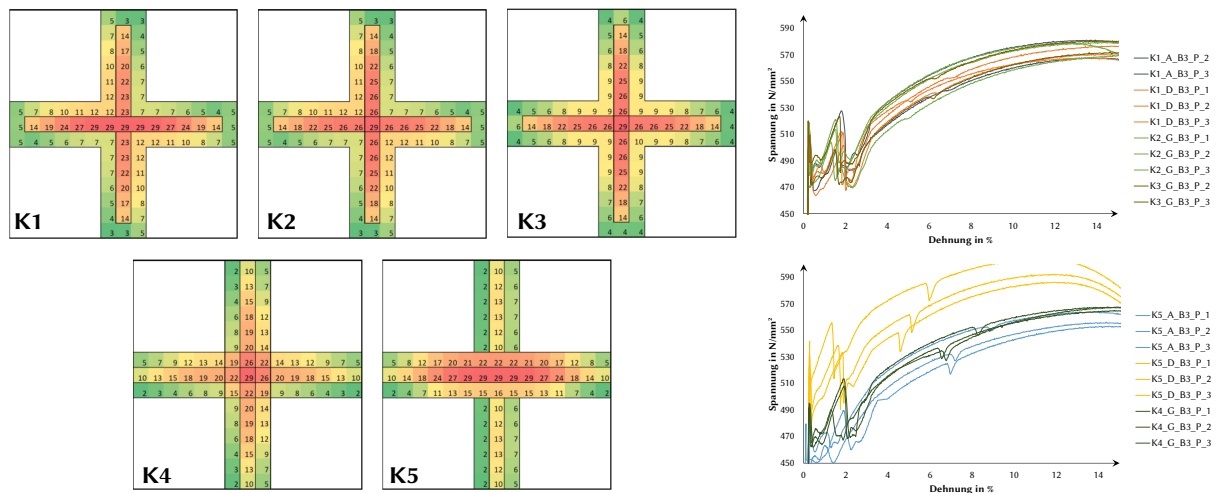
## 5 Untersuchungen zum Materialverhalten

Hervorhebung von grün (wenig Energie) bis rot (viel Energie) kann die Verteilung visuell hervorgehoben werden. Das Vorgehen ist in Abb. 5.24 aufgeführt.

Da die Fertigungsstrategie für vier aufeinander folgende Lagen unterschiedliche Schweißreihenfolgen vorsah und sich danach wiederholte, wurde das Vorgehen ebenfalls auf die drei weiteren Lagen angewendet. Der Mittelwert aus den vier Lagen beschreibt den mittleren Energieeintrag für eine Stelle. Für die Strategie 1 sind die vier Lagen und der sich daraus ergebene Mittelwert in Abb. 5.25 gezeigt. Da sich in den Schenkeln der Körper keine Änderung im Energieeintrag ergibt, wurde der Betrachtungsbereich von 39x39 auf 15x15 Zellen reduziert. Dies ist ebenfalls in Abb. 5.25 zu sehen.



**Abbildung 5.25:** Energieverteilung Strategie 1  
(oben: 39x39 Zellen = richtige Größe, unten: 15x15 Zellen = verkleinertes Kreuz)



**Abbildung 5.26:** Vergleich aller Strategien

Das beschriebene Vorgehen wurde für alle 5 Strategien wiederholt und diese verglichen (siehe Abb. 5.26). Für die Strategien 1 bis 3 ergibt eine ähnliche Verteilung der „Energie“. Dies passt zu den Zugversuchen, die sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Auch die Schweißrichtung des Infills hat nur einen sehr geringen Einfluss. Für die Strategien 4 und 5 ergibt sich eine deutlich voneinander zu unterscheidende Verteilung, innerhalb der Probe 5 ist die durchgeschweißte Richtung deutlich von der angeschweißten Richtung zu unterscheiden. Dies spiegelt sich auch in dem stark unterschiedlichen Verhalten bei den Zugversuchen wider.

#### 5.4.4 Bewertung

Anhand der Untersuchungen können die folgenden Punkte festgehalten werden:

- Durch die mehrfache Erhitzung einer Stelle – dem Kreuzungspunkt – ergibt sich eine Härtung des Materials. Dies zeigt sich durch erhöhte Festigkeit und niedrigere Duktilität. Allerdings kann die Abnahme der Duktilität nicht abschließend bewertet werden, da alle Proben außermittig gerissen sind.
- Es zeigt sich ein Verhalten, dass auf mehrere Materialbereiche innerhalb der Probe hindeutet. Dies begründet das außermittige Versagen der Proben.
- Abwechselnde Fertigung ist der Einzelteillfertigung vorzuziehen, da so in alle Richtungen einer Kreuzungsstelle von den gleichen Eigenschaften ausgegangen werden kann.
- Der Ansatz einer Umrandung wirkt homogenisierend und reduziert den Einfluss der Einzelwandfertigung im Inneren. Dieser Effekt kann allerdings nur für die hier untersuchten 3 Bahnen prognostiziert werden. Wird mit mehreren Bahnen gefertigt, könnte der Einfluss der Umrandung abnehmen.
- Mit der Slicingsstrategie sollte versucht werden, eine möglichst gleichmäßige Energieeinbringung zu gewährleisten, um ein möglichst homogenes Material zu erzeugen.

### 5.5 Abbildung der Materialeigenschaften in der Finiten Elemente Simulation

Die Untersuchungen zeigen, dass sich aus der Bahnplanung Änderungen im Material, vor allem in den Festigkeiten, ergeben. Diese sollten bei der simulativen Abbildung eines Bauteils berücksichtigt werden. Im Folgenden wird hierfür eine Möglichkeit gezeigt.

#### 5.5.1 Materialmodelle

Das Material für Stahl in Finiten Elementen kann auf verschiedene Weisen abgebildet werden. Vier verschiedene Stufen sind beispielsweise in DIN EN 1993-1-5 (2017) Anhang C zu sehen.

- Eine Möglichkeit besteht darin, das Material lediglich linear-elastisch vorzugeben. Dann wird der E-Modul des Stahls hinterlegt. Hierbei muss sichergestellt sein, dass die Streckgrenze an keiner Stelle des Modells erreicht wird, da sich das simulierte Bauteil ab diesem Punkt signifikant anders verhält als es sich in Realität verhalten würde.
- Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Material elastisch-ideal plastisch anzusetzen. Hierbei wird ab Erreichen der Streckgrenze ein Tangentenmodul von 0 angesetzt. Ein solches Verhalten wird auch in der Handrechnung angesetzt, wenn der Stahl mit einer Spannung von  $f_y$  vollplastiziert. Ein Tangentenmodul von 0 führt numerisch häufig zu Problemen. Deshalb wird häufig ein leicht erhöhter Modul von beispielsweise  $E/10.000$  angesetzt.
- Um die Verfestigung mit abzubilden, kann auch ein linear-elastischen-linear-plastisches Materialmodell verwendet werden, welches dem Tangentenmodul nach Erreichen der Streckgrenze einen Wert von  $E/100$  zuweist.

- Als genaueres Modell kann die Versuchskurve über einen Sekantenzug nachvollzogen werden. Hierbei müssen die wahren Spannungen berücksichtigt werden. Das Fließplateau wird über eine Gerade auf Höhe der Streckgrenze angenähert, bis diese den Verfestigungsast trifft. Man erhält ein linear-elastisch-multilinear-plastisches Materialverhalten.

Im letztbeschriebenen multilinear-plastischen Bereich erhöht sich die zulässige Spannungsgrenze (Fließgrenze) mit zunehmender Dehnung/Belastung. Die Verfestigung kann auf verschiedene Wege abgebildet werden. Vor allem zwei Wege sind sehr bekannt: Die kinematische und isotrope Verfestigung. Während bei der isotropen Verfestigung die Spannungsgrenzen in alle Hauptrichtungen zunehmen – mit steigender maximaler Zugspannung erhält man gleichzeitig also auch eine steigende Druck- und Schubspannung –, wird bei der kinematischen Verfestigung das Verhältnis der Spannungen untereinander beibehalten und die Grenzen verschieben sich in die gleiche Richtung. Für Stahl sollte von einer kinematischen Verfestigung ausgegangen werden, um den Bauschinger Effekt zu berücksichtigen.

### 5.5.2 Ermittlung eines genauen Materialmodells aus den Mittelwerten

Wie sich in den Untersuchungen gezeigt hat, verhält sich der gedruckte Stahl im elastischen Bereich annähernd isotrop und es ist auch keine Abhängigkeit vom Slicing und der Lagenanzahl zu erkennen. Daher wird der Mittelwert des E-Moduls über alle Proben gebildet und mit  $E = 198.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

Zur Ermittlung des Materialmodells werden die wahren plastischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der 18 Proben der senkrechten Bleche jeweils gleichartig angenähert. Da in den Zugversuchen lediglich die technischen Spannungen und Dehnungen gemessen wurden, werden sie zunächst unter Ansatz der Volumenkonstanz umgerechnet, die Formeln sind folgend aufgeführt. Der Ansatz gilt nur im Bereich der Gleichmaßdehnung. Ab Erreichen der Zugfestigkeit und mit Beginn der Einschnürung geben die Kurven keine Aussage mehr über die wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Hierzu hätten die Verformungen quer zur Lastrichtung (Einschnürung) ebenfalls gemessen werden müssen.

$$\sigma_w = \sigma \cdot (1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_w = \ln(1 + \varepsilon)$$

Die so ermittelten Kurven werden über die gleichen Dehnwerte mit Hilfe von Sekantenzügen angenähert. Alle Graphen sind in Anhang B.3.1 zu sehen. Bei dieser Annäherung wird das Ende des Fließplateaus immer bei 3 % mit einer Spannung in Höhe der unteren Streckgrenze gewählt. Aus den so ermittelten Spannungen (Eckpunkte der Sekantenzüge) wird der Mittelwert aus 17 Werten je Dehnung berechnet und für die Materialbeschreibung genutzt. B4\_P\_3 wurde auf Grund ihrer starken Abweichung zu den anderen beiden Proben B4\_P\_1 und B4\_P\_2 nicht berücksichtigt.

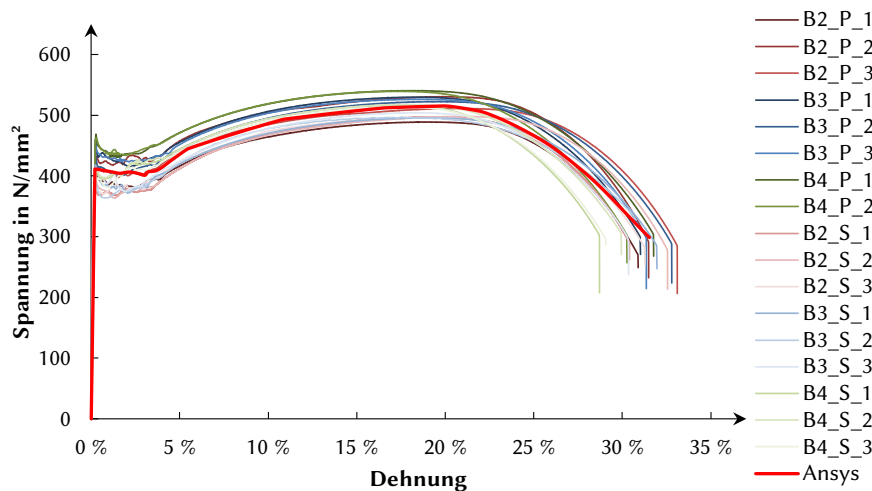
Die Beziehung zwischen wahrer plastischer Dehnung und wahrer Spannung, die dem Materialmodell zu Grunde liegt, ist in Tabelle 5.4 zu sehen. Die Werte bis zu einer Dehnung von 18 % ( $\approx$  Gleichmaßdehnung) sind Werte aus den Sekantenzügen. Die weiteren drei Werte wurden für die numerische Stabilität verwendet. Soll mit diesem bzw. einem solchen ermittelten Materialmodell ein Bauteilnachweis erfolgen, ist zu überprüfen, ob die errechnete Dehnung an jeder Stelle des Modells unter der Gleichmaßdehnung liegt.

Zur Überprüfung des Materialmodells wurde der Zugversuch in Ansys Workbench nachmodelliert. Es zeigt sich, dass das ermittelte Materialmodell zu einer Kurve führt, die bis zum Erreichen der Zugfestigkeit die Mitte aller Kurven gut abbildet (siehe Abb. 5.27).



**Tabelle 5.4:** Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den Ansatz der multilinearen kinematischen Verfestigung in Ansys Workbench

| wahre plastische Dehnung | wahre Spannung in N/mm <sup>2</sup> |
|--------------------------|-------------------------------------|
| 0                        | 412                                 |
| 0.03                     | 412                                 |
| 0.05                     | 468                                 |
| 0.1                      | 546                                 |
| 0.15                     | 596                                 |
| 0.18                     | 618                                 |
| 0.25                     | 645                                 |
| 0.5                      | 700                                 |
| 0.8                      | 742                                 |

**Abbildung 5.27:** Vergleich FE und Zugversuchskurven

### 5.5.3 Anpassen des Materialmodells an die verschiedenen Bahnplanungseinflüsse

Mit einem solchen Modell würden allerdings die unteren Kurven überschätzt und eine Traglastermittlung läge im unsicheren Bereich. Daher werden anhand der zuvor gewonnenen Erkenntnisse weitere Anpassungen getroffen.

#### Bahnanzahl

Vergleicht man die Mittelwerte der Streckgrenzen der verschiedenen Bahnanzahlen miteinander, fällt auf, dass diese sich ungefähr um den Wert von 15 N/mm<sup>2</sup> unterscheiden. Das heißt, je Bahn, die hinzukommt, wird die Streckgrenze um 15 N/mm<sup>2</sup> erhöht. Die Abbildung dieses Effekts in Ansys Workbench erfolgt über einen Versatz der zuvor aufgestellten multilinearen Verfestigungsbeziehung. Da die ermittelte Mittelwertkurve das Verhalten einer Wand darstellt, die mit drei Nähten gedrückt wurde, muss die Beziehung für zwei Nähte um 15 N/mm<sup>2</sup> verringert werden und für vier Nähte um 15 N/mm<sup>2</sup> erhöht werden.

#### Anisotropie

Weiterhin verhält sich das gedruckte Material im plastischen Bereich nicht isotrop, sondern ist abhängig von Schweiß- bzw. Belastungsrichtung. Für ein solches Verhalten reicht das Von-Mises-Fließkriterium

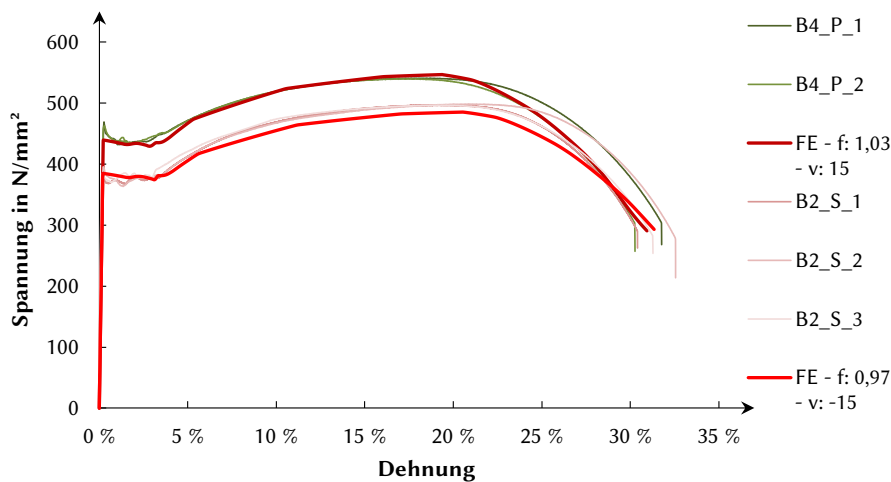
nicht mehr aus. Hill hat hier einen recht einfachen Ansatz gefunden, dieses Problem zu berücksichtigen und das Von-Mises-Kriterium zu erweitern. Der Hill-Ansatz ist in Ansys implementiert und kann verwendet werden. Hierbei müssen die verschiedenen Fließgrenzen im Verhältnis zueinander angegeben werden. Über alle Proben ergab sich ungefähr ein Verhältnis von +/- 3 % zur Mittelkurve der zur Bahnanzahl korrespondierenden Spannungs-Dehnungs-Beziehung.

### Anpassung

Die gewählte Bahnanzahl und Anisotropie des Materials können über die folgenden Anpassungen im Modell berücksichtigt werden:

|                                      |                        |                                 |      |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------|------|
| Anpassung an Bahnanzahl über Versatz |                        | Anisotropie über Hill-Kriterium |      |
| 2 Bahnen:                            | - 15 N/mm <sup>2</sup> | Parallel:                       | 1,03 |
| 4 Bahnen:                            | + 15 N/mm <sup>2</sup> | Senkrecht:                      | 0,97 |

Beispielhaft ist in Abb. 5.28 für zwei verschiedene Konstellationen gezeigt, dass diese Anpassung das Lastverhalten der Zugproben gut widerspiegelt. In Anhang B.3.2 ist das gleiche für alle Konstellationen gezeigt.



**Abbildung 5.28:** Anpassung des Materialmodells an Fertigungsstrategie

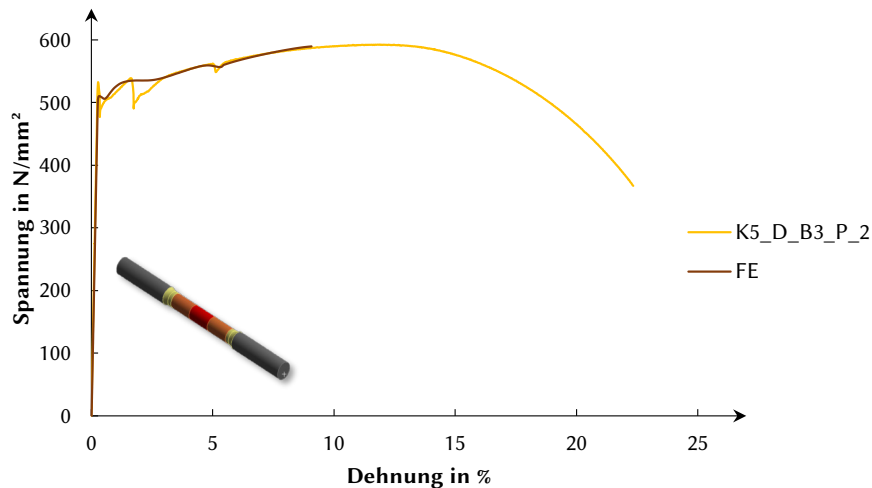
### Vereinfachung des Modells

Möchte man lediglich eine elastisch-ideal-plastische Beziehung aufstellen, können ausgehend von einer Streckgrenze von 412 N/mm<sup>2</sup> die gleichen Anpassungen hinsichtlich der Slicingstrategie verwendet werden. Alternativ kann auf der sicheren Seite die Streckgrenze der senkrecht zur Schweißnaht liegenden Belastungsrichtung gewählt werden.

### 5.5.4 Abbildung von Kreuzungsstellen in der Simulation

In Abschnitt 5.4.2 ist deutlich zu erkennen, dass es durch das mehrfache Aufschmelzen an der Kreuzungsstelle zu einer Härtung kommt. Wie stark diese Härtung ausgeprägt ist, hängt von der Slicingstrategie und der damit eingebrachten Energie ab. Zusätzlich weisen die ausgeprägten Zacken im Verfestigungsbereich auf ein Mehrkörperverhalten hin, bei welchem nacheinander die Streckgrenze überschritten wird.

Zur Simulation dieses Verhaltens wird die Zugprobe entsprechend der realen Zugprobe modelliert. Innerhalb des Messbereichs wird der Festkörper in drei Bereiche unterteilt, denen drei verschiedene Materialien zugeordnet werden (siehe Abb. 5.29 - rote, orange und gelbe Bereiche in der Probe). Das Materialverhalten ist elastisch für alle drei Werkstoffe gleich definiert, das plastische Verhalten ist durch einen Versatz der Streckgrenze entsprechend dem Wert des Spannungsabfalls definiert. Dem roten Bereich wird eine entsprechend hohe Streckgrenze ( $550 \text{ N/mm}^2$ ) zugeordnet, dem gelben Bereich eine niedrige Streckgrenze ( $505 \text{ N/mm}^2$ ) und dem orangen Bereich eine mittlere Streckgrenze ( $530 \text{ N/mm}^2$ ). Dadurch lässt sich das Verhalten der Probe annähernd abbilden (Abb. 5.29).



**Abbildung 5.29:** Vergleich Simulierte und reale Spannungs-Dehnungs-Kurve

Aufgrund der geringeren Festigkeit versagt der Simulations-Probekörper im gelben Bereich. Dieses Verhalten haben auch die realen Zugproben gezeigt. Mit dieser Simulation kann das Verhalten der Probe entsprechend abgebildet werden. Es lässt sich jedoch kein allgemeiner Ansatz finden, wie groß die verschiedenen Materialbereiche in Abhängigkeit von der Slicingstrategie sein sollten und wie hoch die jeweiligen Streckgrenzen dann sein müssen.

## 5.6 Zusammenfassung

Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass neben den Schweißparametern selbst auch die Bahnplanungen einen entscheidenden Einfluss auf das Materialverhalten von mit WAAM gefertigten Strukturen hat. Dieser Einfluss rührt sowohl von der Anzahl der Bahnen, die zum Erreichen einer bestimmten Wandstärke angesetzt werden, als auch von einem Überhang sowie maßgeblich durch die Ausführung von Kreuzungspunkten. Für den Entwurf sollte dieser Einfluss der Bahnplanung berücksichtigt werden, vor allem sollte ein der Bahnanzahl angemessenes Material angesetzt werden.

Hinsichtlich der Fertigung sollte berücksichtigt werden, Nahtanfangs- und -endpunkte in den verschiedenen Lagen an unterschiedlichen Stellen zu positionieren. Genauso sollten die Richtung und die Reihenfolge der Schweißbahnen und der Trennstellen variiert werden und eine homogene Energieverteilung gewährleistet sein, da der Einfluss der Kreuzungspunkte nicht abschließend in einem Simulationsansatz eingefangen werden konnte.



---

# 6 UNTERSUCHUNGEN ZU ADDITIV GEFERTIGTEN SCHRAUBVERBINDUNGEN

Sollen additiv gefertigte Bauteile im Stahlbau verwendet werden, kann es notwendig sein, diese auch durch die typischen Verbindungsmittel des Stahlbaus (Schrauben) zu verbinden. Daher werden im folgenden Kapitel Untersuchungen von nicht vorgespannten Schraubverbindungen und deren Ergebnisse vorgestellt. Diese Untersuchungen stellen nur einen ersten Einblick dar, für die Verwendung im Hochbau sollten sie noch durch umfassende Studien ergänzt werden.

## 6.1 Untersuchungskonzept

Im Rahmen der Arbeit wurden die folgenden eigenen Untersuchungen unternommen: Es wurden erste Lochleibungsuntersuchungen an zwei-schnittigen Verbindungen durchgeführt und Zugverbindungen anhand von zweischraubigen T-Stummeln untersucht. Hierbei wurde zusätzlich eine neue Form, die sich aus der Optimierung einer Kopfplatte ergab, untersucht. Außerdem fand eine Recherche zu Untersuchungen an Schraubenverbindungen von anderen Forschungsgruppen statt. Tabelle 6.1 zeigt den Umfang der Untersuchungen zu den Verbindungsmitteln.

**Tabelle 6.1:** Versuche zu den Verbindungsmitteln

|                                  | Schraubengröße | Belastungsrichtung | Variante | Versuchszahl | Bezeichnung |
|----------------------------------|----------------|--------------------|----------|--------------|-------------|
| Lochleibungsverhalten            | M12            | senkrecht          | 1        | 2            | V_L_M12_s   |
|                                  |                | parallel           | 1        | 2            | V_L_M12_p   |
|                                  |                | gewalzt            | 1        | 2            | V_L_M12_k   |
|                                  | M20            | senkrecht          | 1        | 3            | V_L_M20_s   |
|                                  |                | parallel           | 1        | 3            | V_L_M20_p   |
|                                  |                | gewalzt            | 1        | 3            | V_L_M20_k   |
| T-Stummeltragverhalten           | M20            | -                  | 1        | 3            | V_T_M20     |
| T-Stummeltragverhalten optimiert | M20            | -                  | 1        | 3            | V_TO_M20_S1 |
|                                  |                |                    | 2        | 3            | V_TO_M20_S2 |
|                                  |                |                    | 3        | 3            | V_TO_M20_S3 |

Die Probekörper wurden so ausgelegt, dass das additiv gefertigte Bauteil und nicht die Verbindungsmittel oder ein gewalztes Bauteil<sup>1</sup> zerstört wird. Hierzu war es teilweise erforderlich, von den zuvor festgelegten Schweißparametern abzuweichen, da diese zu unpassenden Abmessungen der Prüfbauteile führen würden.

---

<sup>1</sup>Ausnahme bilden die Versuchskörper V\_L.Mxx.k, bei denen das Lochleibungsverhalten des Walzstahls getestet wurde.

## 6.2 Lochleibungsuntersuchungen

Um einen ersten Eindruck des Lochleibungsverhaltens von additiv gefertigten Scherverbindungen zu erhalten, wurden 10 additiv gefertigte Körper untersucht. Mit diesen sollte untersucht werden, ob sich das additiv gefertigte Material äquivalent zu gewalztem Stahl verhält und die bekannten Nachweise nach DIN EN 1993-1-8 verwendet werden können.

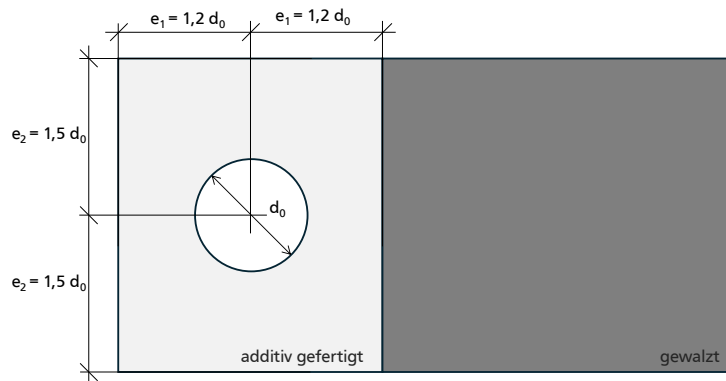
### 6.2.1 Versuchsplanung

#### Umfang

Es wurden die zwei Schraubengrößen M12 und M20 mit jeweils einer Probengeometrie getestet. Es wurden jeweils 2 (M12) bzw. 3 (M20) Probekörper in und senkrecht zur Schweißlagenrichtung belastet. Zum Vergleich wurden ebenfalls je 2 (M12) bzw. 3 (M20) gewalzte Bleche gleicher Abmessung untersucht. Die genaue Verteilung ist bereits in Tabelle 6.1 zu sehen.

#### Probengeometrie

Die Probengeometrie wurde so gewählt, dass der Randabstand in Krafrichtung  $e_1$  maßgebend für das Versagen wird. Dieser wurde zu  $1,2 d_0$  gewählt. Der Abstand senkrecht zur Krafrichtung  $e_2$  wurde zu  $1,5 d_0$  gewählt. Es wurde jeweils das normale Lochspiel von 1 mm (M12) bzw. 2 mm (M20) verwendet. Die Skizze ist in Abb. 6.1 zu sehen.



**Abbildung 6.1:** Probekörpergeometrie zur Untersuchung des Lochleibungsverhalten

#### Herstellung

Die Probekörper wurden nicht mit den in Kapitel 4 vorgestellten Parametern gefertigt, sondern mit den in Tabelle 6.2 aufgeführten. Hiermit wurden drei Bleche gedruckt. Aus diesen Blechen wurde entsprechend den vorgegebenen Maßen kleinere Bleche ausgeschnitten. In diese Bleche wurde dann mittig das Schraubenloch gebohrt. Die Bleche wurden mit einem gewalzten Blech von dickerer Stärke verlängert, um ein Einspannen in die Prüfmaschine zu ermöglichen. Durch dieses Vorgehen wurde die Druckzeit verkürzt. Die hergestellten Probekörper sind in Anhang C zu sehen.

Mit den in Tabelle 6.2 aufgeführten Parametern ergab sich eine maximale eine Nahtbreite von 5,2 mm. Die vergleichenden gewalzten Bleche hatten eine Nenndicke von 5 mm.

**Tabelle 6.2:** WAAM-Prozessparameter für die Herstellung der Lochleibungsproben

| <b>System</b>                  |   |
|--------------------------------|---|
| Bewegungseinheit               | Roboterarm Comau Smart NM 16-3.1 und Steuereinheit Comau C4G RCC1                 |
| Schweißstromquelle             | Fronius CMT Advanced 4000   |
| Schweißprozess                 | CMT-Cycle-Step  |
| Kennlinie                      | CMT 1840  |
| Drahtelektrode                 | Weko 2 – Hersteller: WDI – DIN EN ISO 14341-A G3Si1 – Durchmesser: 1,2 mm         |
| Schutzgas                      | Ferroline C18 – Hersteller: Messer – ISO 14175 M21: 82 % Ar, 18 % CO <sub>2</sub> |
| <b>Prozesssteuerung</b>        |   |
| Schweißbrennerposition         | Vertikal  |
| Kühlzeit                       | 60 s  |
| <b>Schweißprozesssteuerung</b> |   |
| Schweißgeschwindigkeit         | 0,31 m/min  |
| Drahtvorschub                  | 3,1 m/min   |
| Schutzgasdurchfluss            | 15 l/min  |
| CTWD                           | 12 mm   |
| Cycleanzahl                    | 15  |
| Steppausenzeit                 | 80 ms   |
| Anpassung                      | Special-Two-Step - Start: 0,3 s mit 80 % I - Übergangszeit: 0,2 s                 |

## 6.2.2 Experimentelle Untersuchung

### Versuchsaufbau

Für eine zentrierte Lasteinleitung wurden zweischnittige Verbindungen untersucht. Hierzu wurde der Prüfkörper durch eine Schraube mit zwei 20 mm dicken Blechen verbunden. Die Gegenstücke wurde mit einem Platzhalter in die unteren Klemmbacken einer Universalmaschine, der Prüfkörper wurde in die oberen Klemmbacken eingespannt. Der Aufbau ist in Abb. 6.2 zu sehen.

Um lediglich den Effekt des Lochausreißen zu produzieren und keine Einflüsse aus der Reibung zu erhalten, wurde zwischen den Blechen ein Spalt gelassen. Mit diesen Untersuchungen kann daher auch keine Aussage über die Wirkung der Oberflächenbeschaffenheit getroffen werden. Gemessen wurden der Maschinenweg und die Kraft.

### Durchführung

Alle Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min gefahren. Da lediglich der Maschinenweg aufgenommen wurde, haben die Kurven mit Ausnahme des Maximalwertes eine geringe Aussagekraft. Die Maximalwerte und somit Traglasten sind in Tabelle 6.3 aufgeführt. Die Traglastkurven und Fotos der getesteten Probekörper können in Anhang C eingesehen werden. In Abb. 6.3 sind vergleichend jeweils ein Probekörper je Belastungsrichtung der M20 Schraubenverbindungen vor und nach dem Versuch zu sehen.

Eine Besonderheit ergab sich für das konventionelle Blech 1 (V.L.M20.k.1): Hier trat das Versagen mit geringerer Verformung ein und das Versagensbild unterscheidet sich von den anderen Proben. Dies ist auf die Entnahmestelle der Probe zurückzuführen, welche am Rand der gelieferten Walzstange lag.



**Abbildung 6.2:** Versuchsaufbau Lochleibungsuntersuchungen

**Tabelle 6.3:** Traglasten der Lochleibungsuntersuchungen

| Probe | Traglast in kN             |                       |                        |                            |                       |                        |
|-------|----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
|       | Konventionell<br>V.L.M20.k | M20                   |                        | Konventionell<br>V.L.M12.k | M12                   |                        |
|       |                            | Parallel<br>V.L.M20.p | Senkrecht<br>V.L.M20.s |                            | Parallel<br>V.L.M12.p | Senkrecht<br>V.L.M12.s |
| 1     | 77,8                       | 65,8                  | 63,8                   | 50,2                       | 38,7                  | 34,5                   |
| 2     | 79,6                       | 64,5                  | 70,4                   | 48,6                       | 38,9                  | 36,5                   |
| 3     | 80,5                       | 61,7                  | 68,2                   |                            |                       |                        |
| ∅     | 79,3                       | 64,0                  | 67,4                   | 49,4                       | 38,8                  | 35,5                   |

## Auswertung

Auf Grund der unterschiedlichen Blechdicken von additiv gefertigten und konventionellen Proben wurden die Traglasten in Tabelle 6.4 auf die Dicke bezogen. Für die additiven Probekörper wurde die mittlere Dicke der dünnen Bereiche (zwischen den Schweißnähten) angesetzt. Hier zeigt sich, dass die Traglasten je Schraubengröße vergleichbar sind.

Unter der Annahme einer Zugfestigkeit von  $490 \text{ N/mm}^2$  kann nach DIN EN 1993-1-8 die rechnerische Tragfähigkeit für beide Geometrien ermittelt werden, diese ist auch in Tabelle 6.4 aufgeführt. Die in den Versuchen bestimmte Tragfähigkeit ist in allen Fällen ungefähr doppelt so hoch wie die nach DIN EN 1993-1-8.

## Interpretation

Zunächst lässt sich feststellen, dass die additiv gefertigten und die konventionellen Probekörper das gleiche Versagensverhalten aufweisen. Auch zeichnen sich alle Untersuchungen durch eine hohe Duktilität aus. Es zeigt sich keine Abhängigkeit von der Lastrichtung, da M20 und M12 in jeweils einer anderen Belastungsrichtung höhere Tragfähigkeiten aufweisen. Durch die Oberflächenbeschaffenheit streuen die additiv gefertigten Proben jedoch stärker als die konventionellen. Generell liegt die Abweichung





**Abbildung 6.3:** Vergleich Probekörper vor und nach dem Versuch

**Tabelle 6.4:** Angabe der minimalen Dicke und der auf die Dicke bezogenen Traglasten

| Probe                   | M20                        |                       |                        | M12                        |                       |                        |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
|                         | Konventionell<br>V.L.M20.k | Parallel<br>V.L.M20.p | senkrecht<br>V.L.M20.s | Konventionell<br>V.L.M12.k | Parallel<br>V.L.M12.p | Senkrecht<br>V.L.M12.s |
| Dicke in mm             |                            |                       |                        |                            |                       |                        |
| 1                       | 5,25                       | 4,4                   | 4,3                    | 5,4                        | 4,2                   | 4,2                    |
| 2                       | 5,44                       | 4,2                   | 4,2                    | 5,25                       | 4,3                   | 4,0                    |
| 3                       | 5,5                        | 4,2                   | 4,3                    |                            |                       |                        |
| Traglast je mm in kN/mm |                            |                       |                        |                            |                       |                        |
| 1                       | 14,8                       | 14,9                  | 14,8                   | 9,3                        | 9,2                   | 8,2                    |
| 2                       | 14,6                       | 15,4                  | 16,8                   | 9,3                        | 9,0                   | 9,1                    |
| 3                       | 14,6                       | 14,7                  | 15,9                   |                            |                       |                        |
| ∅                       | 14,7                       | 15,0                  | 15,8                   | 9,3                        | 9,1                   | 8,7                    |
| DIN EN 1993-1-8         |                            | 7,5                   |                        |                            | 4,5                   |                        |

je Schraubendurchmesser unter 10 %. Alle getesteten Tragfähigkeiten liegen über der Bemessungstragfähigkeit und können bei Ansatz der gemessenen Dicke entsprechend DIN EN 1993-1-8 nachgewiesen werden.

## 6.3 Untersuchungen von Schraubenverbindungen unter Zug

Schrauben unter Zugbeanspruchungen kommen im Stahlbau häufig in Kopfplattenanschlüssen vor. Hierbei wird die Schraube auf Zug, der Stahl jedoch auf Biegung beansprucht. Zum Nachweis einer solchen Verbindung wird der T-Stummel-Nachweis nach DIN EN 1993-1-8 genutzt. Für eine erste Einschätzung zum Tragverhalten wurden verschiedene additiv gefertigte T-Stummel getestet.

### 6.3.1 Probengeometrie

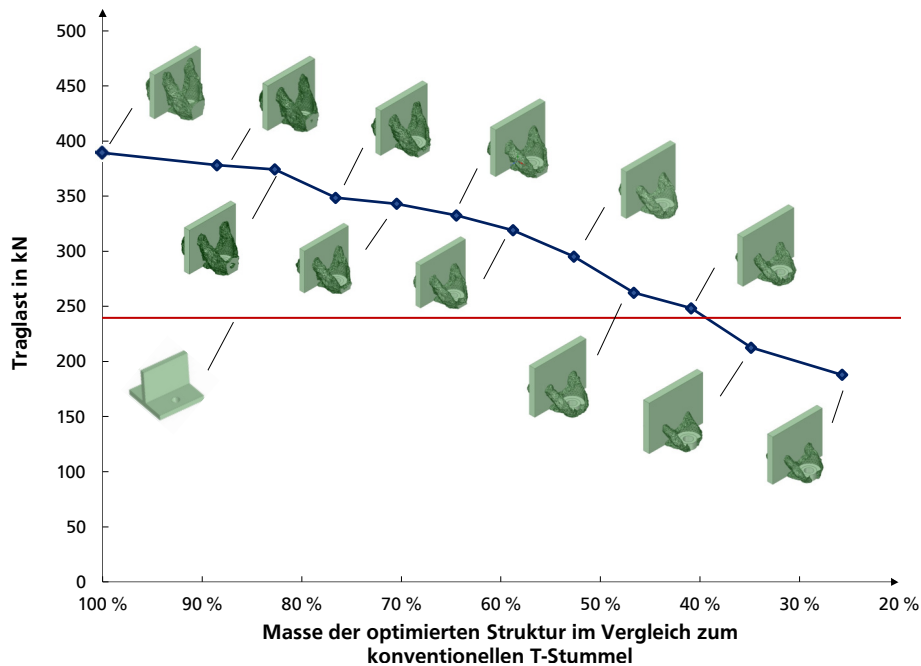
Es wurden eine „normale“ (V.T.M20) und drei optimierte T-Stummelvarianten (V.TO.M20.S1 bis V.TO.M20.S3) mit je drei Versuchen untersucht. Alle Varianten waren für die Schraubengröße M20 ausgelegt.

Die Probengeometrie der optimierten Variante leitete sich aus einer vorhergehenden Arbeit ab (Erven 2018). In dieser wurde ein T-Stummelanschluss mit Hilfe der Topologieoptimierung optimiert. In dieser

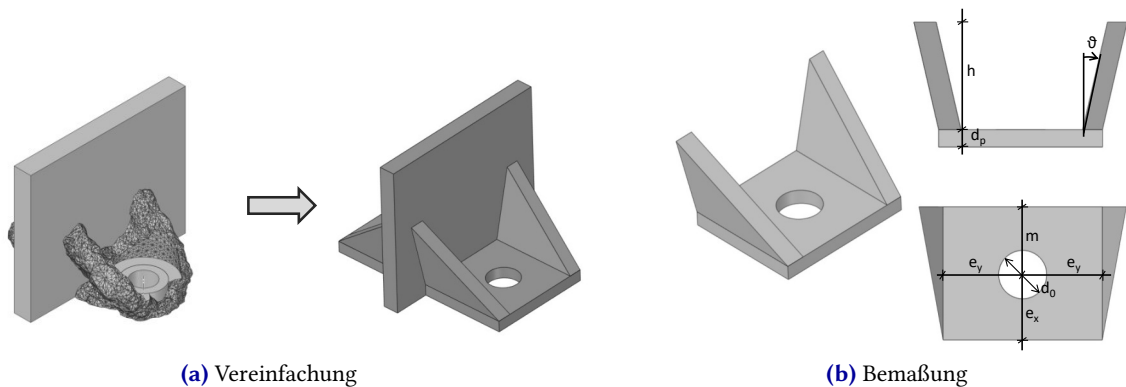
simulativen Untersuchung stellte sich eine Form heraus, die bei gleicher Masse eine fast doppelt so große und bei nur 40 % der Ausgangsmasse die gleiche Tragfähigkeit aufwies wie die vergleichbare konventionelle T-Stummel-Geometrie. Der Vergleich der Tragfähigkeiten ist in Abb. 6.4 zu sehen.

Die optimierte Geometrie zeichnet sich durch zwei vom Flansch ausgehende Flügel aus, die als Zugbänder die Last zentrierter als die normale Plattengeometrie in die Schrauben einleiten und die auf Biegung belastete Platte zusätzlich aussteifen. Die Optimierungsergebnisse weisen allerdings eine sehr unebene Oberfläche und variierende Dicken an jeder Stelle des Bauteils auf. Dies ist vor allem auf die Art der Optimierung zurückzuführen. Daher wurde das Wirkprinzip der optimierten Strukturen analysiert. Die erhöhte Tragfähigkeit ist vor allem auf die angesprochenen Flügel zurückzuführen. Die vereinfachte Struktur ist in Abb. 6.5 zu sehen.

Ausgehend von diesen Überlegungen hat Hansen (2022) in seiner Masterthesis drei Geometrien entwickelt, die sich durch die Gestaltung der angesprochenen Flügel unterscheiden. Die Maße sind in Tabelle 6.5 angeben und werden in Abb. 6.5 der Geometrie zugeordnet.



**Abbildung 6.4:** Darstellung der Optimierungsergebnisse nach Erven (2018)



**Abbildung 6.5:** Allgemeine Vereinfachung des Optimierungsergebnis mit Bemaßung

**Tabelle 6.5:** Maße der verschiedenen Varianten

|                 |             | V_TO_M20_S1 | V_TO_M20_S2 | V_TO_M20_S3 | V_T_M20 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| Flügelhöhe      | h in mm     | 30,0        | 30,0        | 60,0        | -       |
| Winkel          | $\theta$    | 0°          | 20°         | 20°         | -       |
| Lochabstand     | m in mm     |             | 41,5        |             |         |
| Lochdurchmesser | $d_0$ in mm |             | 22,0        |             |         |
| Randabstand     | $e_y$ in mm |             | 40,0        |             |         |
| Randabstand     | $e_x$ in mm |             | 18,5        |             |         |
| Dicke           | $d_p$ in mm |             | 8,0–8,5     |             |         |

## 6.3.2 Experimentelle Untersuchung

### Herstellung

Für die Herstellung der angestrebten Dicke von 8 mm waren andere Schweißparameter als in Kapitel 4 vorgestellt notwendig. Es wurde die in Tabelle 6.6 aufgeführten Prozessparameter verwendet. Hiermit ergab sich eine mittlere Dicke von 8,1 mm.

**Tabelle 6.6:** WAAM-Prozessparameter für die Herstellung der T-Stummelproben

| <b>System</b>                  |   |
|--------------------------------|---|
| Bewegungseinheit               | Roboterarm Comau Smart NM 16-3.1 und Steuereinheit Comau C4G RCC1                 |
| Schweißstromquelle             | Fronius CMT Advanced 4000   |
| Schweißprozess                 | CMT-Cycle-Step  |
| Kennlinie                      | CMT 1840  |
| Drahtelektrode                 | Weko 2 – Hersteller: WDI – DIN EN ISO 14341-A G3Si1 – Durchmesser: 1,2 mm         |
| Schutzgas                      | Ferroline C18 – Hersteller: Messer – ISO 14175 M21: 82 % Ar, 18 % CO <sub>2</sub> |
| Zusatzkomponente               | Niederdrucksystem mit koaxialen Sprühdüsen  |
| <b>Prozesssteuerung</b>        |   |
| Schweißbrennerposition         | Vertikal  |
| Kühlung                        | Druckluft und destilliertes Wasser  |
| Kühlzeit                       | 60 s  |
| Bahnen je Lage                 | 2   |
| Abstand zwischen den Bahnen    | 3,44 mm   |
| <b>Schweißprozesssteuerung</b> |   |
| Schweißgeschwindigkeit         | 0,4 m/min   |
| Drahtvorschub                  | 4,8 m/min   |
| Schutzgasdurchfluss            | 15 l/min  |
| CTWD                           | 12 mm   |
| Cycleanzahl                    | 20  |
| Steppausenzeit                 | 120 ms  |
| Anpassung                      | Special-Two-Step - Start: 0,3 s mit 80 % I - Übergangszeit: 0,2 s                 |

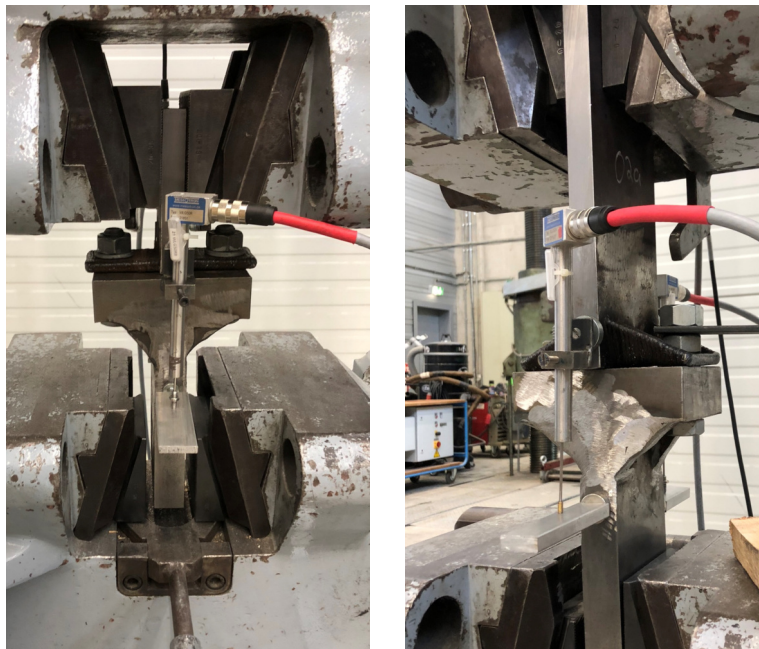
Zwei bzw. drei Probekörper – je nach Breite der Proben – wurden zunächst einseitig am Rand eines 20 mm dicken gewalzten Blechs aufbauend gedruckt. Anschließend wurde das Blech gedreht und die andere Seite bedruckt (Abb. 6.6). Vor dem Druck wurde zunächst die obere Schicht – die Walzhaut – des Blechs mit einem Winkelschleifer entfernt, um eine gute Anbindung des additiv gefertigten Bauteils an das gewalzte Blech zu erhalten. Nach dem Druck der Probekörper wurde das Blech in die einzelnen Probekörper geschnitten. Die Schnitte wurden in einem Abstand von 5 mm zu den additiv gefertigten Bauteilen gesetzt.



**Abbildung 6.6:** Druck an den Rand des Blechs

### Versuchsaufbau

Die Versuchskörper wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min in einer Universalprüfmaschine unter Zugbelastung getestet. Hierzu wurden sie mit einem sehr steifen Gegenstück verschraubt und dann in die Maschine eingespannt. Zusätzlich zu Kraft und Maschinenweg wurde die Verformung am unteren Ende des Blechs im Vergleich zum Gegenstück auf beiden Seiten des Blechs gemessen. Der Aufbau für die flügellose Variante und eine optimierte Variante ist in Abb. 6.7 zu sehen.



**(a)** Flügellose Geometrie

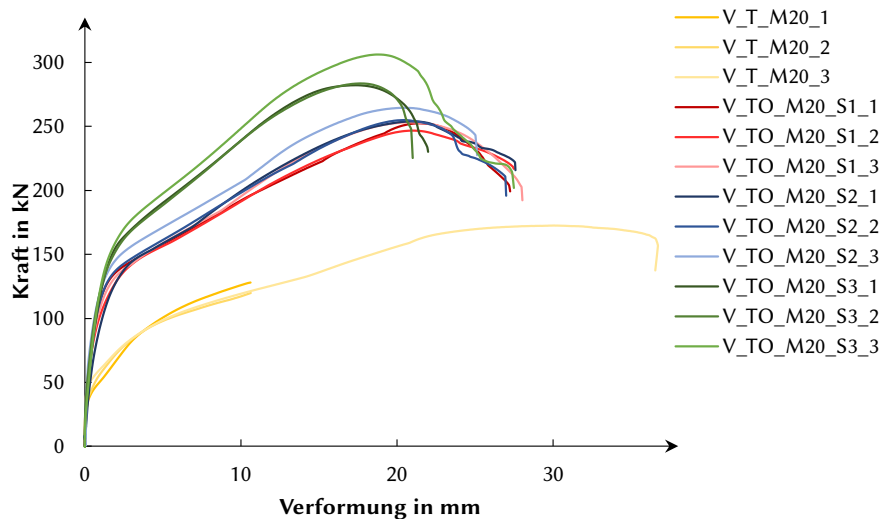
**(b)** Optimierte Geometrie

**Abbildung 6.7:** Versuchsaufbau T-Stummelversuche

### Durchführung

Die Probekörper mit Flügeln wurden bis zu ihrem Versagen getestet. Die Probekörper ohne Flügel versagten erst bei einer sehr großen Verformung, die mit starker Biegung der Schraube einherging. Es

trat ein kombiniertes Versagen aus Schraube und Blech ein. Da bei Zug bis 10 mm bereits ein starker Abfall in der Steifigkeit der Verbindung zu sehen war, wurden die flügellosen Probekörper mit einer Ausnahme nur bis 10 mm Verformung getestet. Die Kraft-Verformungs-Kurven der Versuche sind in Abb. 6.8 zu sehen. Alle Probekörper der optimierten Variante sowie V\_T\_M20\_3 versagten durch Ausreißen des Lochs. Abb. 6.9 zeigt Probekörper V\_TO\_M20\_S2\_2 vor und nach dem Versuch.



**Abbildung 6.8:** Kraft-Verformungs-Diagramm der T-Stummelversuche



**Abbildung 6.9:** Probekörper V\_TO\_M20\_S2\_2 vor und nach dem Versuch

### Auswertung

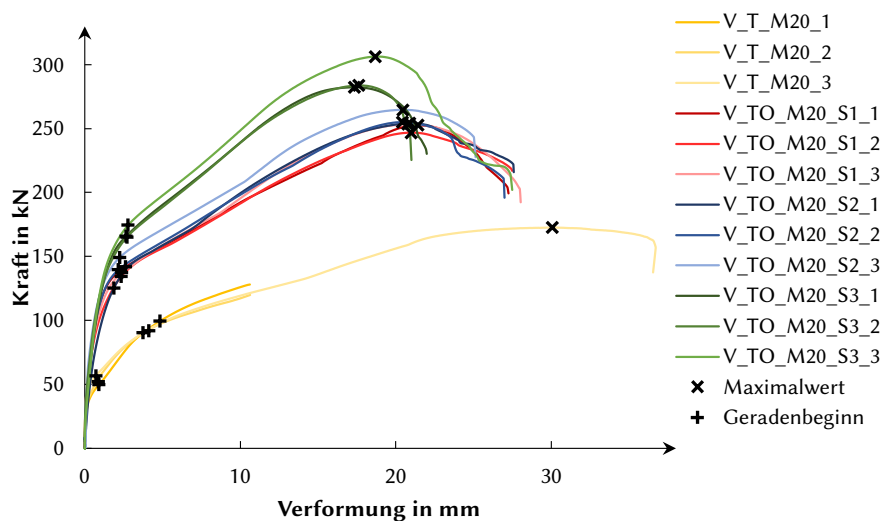
Bei Betrachten der Kurven fällt besonders für die flügellosen Körper ein starker Abfall in der Steifigkeit bei ca. 40 kN auf. Vor Erreichen der Traglast, welche im Maximalwert der Kurven zu finden ist, findet sich in allen Kurven ein weiterer Knick. Für die optimierten Varianten liegt dieser um 150 kN, bei der flügellosen Variante bei 100 kN.

**Tabelle 6.7:** Auswertung der Lasten für die optimierten Varianten

|               | Last nach Knick in kN | Traglast in kN |
|---------------|-----------------------|----------------|
| V_TO_M20_S1_1 | 141,9                 | 252,0          |
| V_TO_M20_S1_2 | 134,4                 | 246,7          |
| V_TO_M20_S1_3 | 137,2                 | 253,4          |
|               | 137,8 ± 3,1           | 250,7 ± 2,9    |
| V_TO_M20_S2_1 | 125,3                 | 253,0          |
| V_TO_M20_S2_2 | 139,6                 | 254,9          |
| V_TO_M20_S2_3 | 149,3                 | 264,6          |
|               | 138,1 ± 9,9           | 257,5 ± 5,1    |
| V_TO_M20_S3_1 | 165,8                 | 282,3          |
| V_TO_M20_S3_2 | 165,3                 | 283,4          |
| V_TO_M20_S3_3 | 174,5                 | 306,0          |
|               | 168,5 ± 4,2           | 290,6 ± 10,9   |

**Tabelle 6.8:** Auswertung der Lasten für die flügellose Variante

|               | Last nach 1. Knick in kN | Last nach 2. Knick in kN | Traglast in kN |
|---------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| V_TO_M20_S1_1 | 50,0                     | 99,4                     | -              |
| V_TO_M20_S1_2 | 52,2                     | 91,9                     | -              |
| V_TO_M20_S1_3 | 56,8                     | 90,4                     | 173,3          |
|               | 53,0 ± 2,8               | 93,9 ± 4,0               | -              |



**Abbildung 6.10:** Kraft-Verformungs-Kurven mit Angabe der ausgewerteten Punkte

In den Tabellen 6.7 und 6.8 sind die beschriebenen Punkte ausgewertet. Hierbei wurde jeweils der erste Wert ermittelt, ab dem die Steigung über die nächsten 5 Werte kaum Änderung aufweist. Für die flügellosen wurden beide beschriebenen Knickpunkte ausgewertet. In Abb. 6.10 sind die ausgewerteten Punkte graphisch aufbereitet.

Bei der optimierten Variante 2 und 3 fällt auf, dass die Kurven des jeweils dritten Probekörpers (V\_TO\_M20\_S2\_3 und V\_TO\_M20\_S3\_3) im Vergleich zu den anderen beiden Probekörpern erhöht sind. Abgesehen von diesen beiden Körpern liegen die Kurven je untersuchter Variante nah beieinander und

weisen eine geringe Streuung und ähnliches Verhalten auf.

### **Interpretation**

Bei genauerem Betrachten der optimierten Varianten ist im Anfangsbereich ebenfalls ein Abfall der Steifigkeit zu sehen. Eine Erklärung hierzu kann die Herstellung der Körper sein. Zwar wurden die Körper direkt an die Kante der Platte gedruckt, jedoch weist die Platte durch das Walzen eine geringe, nach außen gerichtete, Rundung auf. Vor dem Verschrauben der Körper mit dem Gegenstück ergab sich dadurch ein kleiner Abstand, der kaum zu sehen war. Beim Verschrauben mit dem Gegenstück wurde diese Lücke geschlossen und die Probekörper leicht vorgespannt. Dies führte zunächst zu einer erhöhten Steifigkeit. Nachdem die Vorspannung überwunden war, fiel die Steifigkeit ab.

Der ausgeprägte Knick der flügellosen Variante kann zusätzlich durch das kombinierte Versagen von Schraube und Probekörper begründet werden. Die zunehmende Biegung der Schraube macht die Verbindung zunehmend weicher.

Die beiden Körper V\_TO\_M20\_S2\_3 und V\_TO\_M20\_S3\_3 wurden am gleichen Tag gefertigt. Obwohl die gleichen Schweißparameter gewählt wurden, sind beide Körper im Vergleich zu den jeweils anderen beiden dicker geworden. Dies kann die erhöhten Last-Verformungs-Kurven begründen.

Generell ist zu sehen, dass die optimierten Varianten deutlich steifer sind und die Last zentrierter in die Schraube einleiten können. Das Ausreißen des Lochs kann durch den geringen Randabstand erklärt werden.

### **6.3.3 Abbildung mit finiten Elementen**

#### **Ermittlung der Materialparameter**

Da mit abweichenden Schweißparametern gedruckt wurde, wurde für die richtige Abbildung des Bauteilverhaltens zunächst mit Zugversuchen das Materialverhalten ermittelt. Hierzu wurden Bleche mit den gleichen Schweißparametern und ebenfalls mit zwei Schweißnähten je Lage gefertigt. Aus diesen Blechen wurden jeweils 3 Proben (DIN 50125 (2022) - A 6 x 30) parallel (P1 – P3) und senkrecht (S1 – S3) zur Schweißrichtung entnommen. Auch hierbei wurde Abstände zu den Rändern der Bleche von mindestens 2 cm eingehalten.

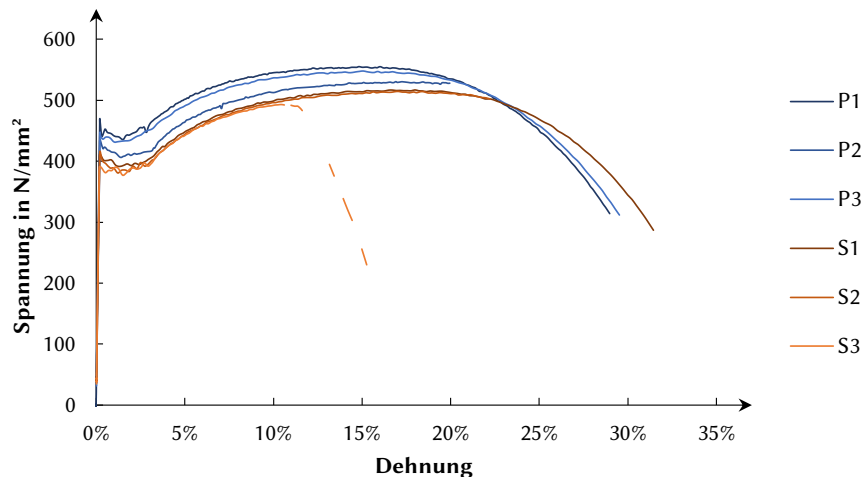
Aufgrund der kleineren Probengröße war es nicht möglich, den Feindehnmesser zu nutzen. Daher wurde die DIC (Digital Image Correlation) genutzt. Die Versuchsgeschwindigkeit wurde zu konstant 2 mm/min gewählt. Die Aufnahmefrequenz lag bei 0,5 Hz.

Um für die DIC ein gut erkennbares Muster vorzuhalten, wurden die Proben zunächst mit weißer Farbe grundiert. Daraufhin wurde ein schwarzes Speckmuster aufgebracht. Da eine Probe im Zugversuch vor allem bei Einschnürung lokal große Dehnungen aufweist, reißt an dieser Stelle die weiße Farbe. Die lokalen Dehnungen sind in diesem Bereich nicht mehr auszuwerten.

Für die Auswertung der Zugproben wurde daher analog zum Vorgehen mit Feindehnmesser jeweils ein virtueller Extensometer mit der nach Norm vorgegeben Ausgangslänge von 30 mm angesetzt. Da diese Bereiche auch nach Riss der Probe noch intakt waren, kann diese Gesamt-Verformung bis zum Bruch nachvollzogen werden. Eine Ausnahme bildet hierbei Probe P2. Hier war der gerissene Bereich der weißen Farbe so groß, dass auf den letzten Bildern auch der intakte Rest der Probe nicht mehr zugeordnet werden konnte.

Bei Probe S3 kam es im Vergleich zu den anderen Proben nicht zur Einschnürung, sondern einem schlagartigen Versagen im Bereich der Verfestigung. Der Bruch der Probe lag nicht mittig, sondern in Randnähe. Grund hierfür war eine Pore.

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sind in Abb. 6.11 zu sehen. Anhand dieser Zugversuche wurden die Materialparameter für die FE-Simulation äquivalent zu Abschnitt 5.5 ermittelt (Tabellen 6.9 und 6.10). Hierbei wurden die Versuche P2 und S3 nicht verwendet.



**Abbildung 6.11:** Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

**Tabelle 6.9:** Auswertung der Zugversuche

|            | Streckgrenze<br>in N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung<br>in % |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| V_T.B2.P_1 | 473,8                                | 549,6                                 | 28,9                 |
| V_T.B2.P_2 | 441,3                                | 531,5                                 | 31,6                 |
| V_T.B2.P_3 | 459,5                                | 548,6                                 | 29,7                 |
| V_T.B2.S_1 | 415,9                                | 517,0                                 | 32,1                 |
| V_T.B2.S_2 | 419,6                                | 515,8                                 | 31,5                 |
| V_T.B2.S_3 | 401,1                                | 495,4                                 | 16,4                 |

### Modellierung des Versuchs

Zur Simulation des Versuchs wurden neben den Probekörpern auch die Schrauben und das Gegenstück modelliert. In Abb. 6.12 sind die Randbedingungen zu sehen. Die Lagerung befand sich in der Mitte der Unterseite des Gegenstücks (Abb. 6.12 D). In Realität hat hier das Blech angeschlossen, welches in die Prüfmaschine eingespannt war. Da die Verformung des Probekörpers im Vergleich zur Verformung der Mitte der Außenseite des Gegenstücks gemessen wurde, ist eine etwaige Längung des unteren Blechs irrelevant und wird daher nicht modelliert. Die Last wurde, wie auch im Versuch, als Verschiebung am Blech des Probekörpers angebracht (Abb. 6.12 gelbe Fläche).

Der Probekörper bestand aus den beiden additiv gefertigten Bereichen und dem Stahlblech, die Verbindung erfolgt über den Kontakt „Verbund“: die Körper werden hierdurch, wie in Realität, quasi miteinander verschweißt. Um den zuvor beschriebenen Vorspannungseinfluss abzubilden, wurden die additiven Körper um 0,2 mm versetzt zum Blechrand modelliert.



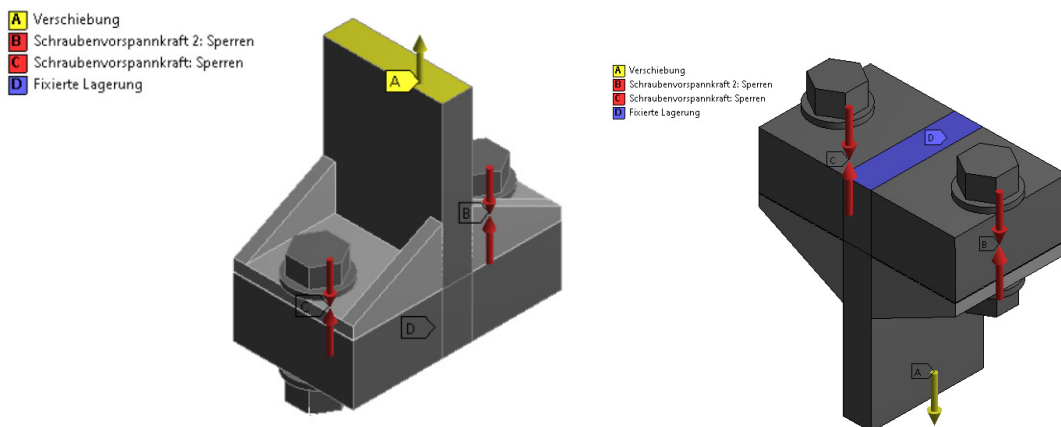
**Tabelle 6.10:** gewählte Materialparameter

| Plastische Dehnung | Spannung<br>in N/mm <sup>2</sup> |
|--------------------|----------------------------------|
| 0                  | 438                              |
| 0,03               | 452                              |
| 0,05               | 499                              |
| 0,1                | 564                              |
| 0,15               | 601                              |
| 0,165              | 606                              |
| Hillfaktor         |                                  |
| Parallel           | 1,03                             |
| Senkrecht          | 0,97                             |

Die Schrauben wurden jeweils als ein Bauteil bestehend aus Schraubenkopf, Schraubenschaft mit Spannungsquerschnitt, Scheibe und Mutter modelliert. Das Gewinde und die verschiedenen Kontakte zwischen den Bestandteilen der Schraube wurden nicht modelliert. In einem ersten Lastschritt wurde eine Vorspannung auf beide Schrauben aufgebracht (Abb. 6.12 rote Pfeile). Diese wurde im zweiten Lastschritt gehalten, während an der Oberseite die Verschiebung aufbracht wurde.

Zwischen Probekörper und Gegenstück wurde der Kontakt „reibungsbehaftet“ mit einem Reibbeiwert von 0,2 verwendet. Zwischen den Unterseiten der Schraubenscheiben und der Oberfläche des Probekörpers bzw. des Gegenstücks wurde dieser Kontakt ebenfalls verwendet. Weiterhin wurde der Kontakt „reibfrei“ zwischen Schraubenloch und Schraubenschaft gewählt.

Für die additiven Körper wurde das beschriebene multi-lineare Materialmodell (Tabelle 6.10) verwendet. Für die gewalzten Bleche in Probekörper und Gegenstück wurden jeweils ein linear-elastisches Materialmodell mit einem E-Modul von 210.000 N/mm<sup>2</sup> vorgesehen. Die Schrauben erhielten ein bilineares Materialmodell mit einem E-Modul von 210.000 N/mm<sup>2</sup> und einer Streckgrenze von 900 N/mm<sup>2</sup>.



**Abbildung 6.12:** Modellierung der Versuche

### Vergleich von Versuch und FE-Simulation

In Abb. 6.13 sind die Last-Verformungs-Kurven um die Ansys Simulationen ergänzt. Mit der beschriebenen Modellierung kann das Tragverhalten annähernd beschrieben werden.

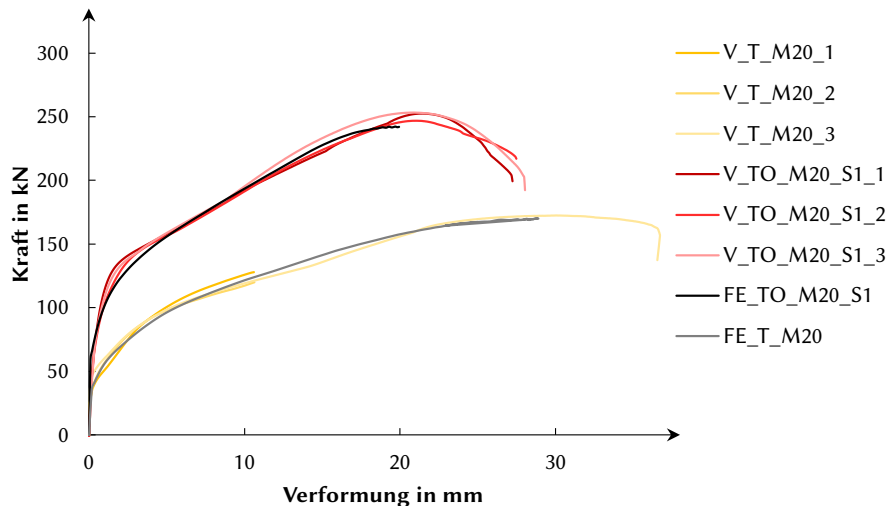


Abbildung 6.13: Vergleich von T-Stummel-Versuch und FE-Simulation

## 6.4 Ergebnisse anderer Forschungsgruppen

Zum Tragverhalten von Schrauben in WAAM gefertigten Bauteilen gibt es mittlerweile einige Untersuchungen. Einen Überblick über Untersuchungen mit unlegiertem Stahl (E70S-6) gibt Tabelle 6.11. Für eine Einordnung der eigenen Untersuchungen und eine prinzipielle Beurteilung der Eignung von Schrauben bzw. der konventionellen Formeln, um diese nachzuweisen, wurden die Ergebnisse analysiert, aufbereitet und mit den eigenen Ergebnissen verglichen.

### 6.4.1 Übersicht zu Untersuchungen von Schraubverbindungen

Der Großteil der aufgeführten Veröffentlichungen beschäftigt sich mit dem Lochleibungsverhalten. Es werden sowohl einschnittige als auch zweisechnittige Verbindungen untersucht. Allen Untersuchungen ist gemein, dass die Probekörper nicht durch die Untersuchenden selbst hergestellt, sondern Bauteile geliefert wurden, aus denen die Probekörper entnommen wurden. Zusätzlich zu den Probekörpern für die Verbindungsversuche wurden jeweils auch Zugproben entnommen und Zugversuche durchgeführt.

In der Masterthesis von Kotteman (2020) werden die Lochleibungsuntersuchungen in drei Belastungsrichtungen (parallel, senkrecht und  $45^\circ$  zur Schweißrichtung) durchgeführt. Die weiteren Untersuchungen beschränken sich auf die beiden „Hauptrichtungen“ (parallel und senkrecht). Kotteman (2020) untersucht in 45 Versuchen die gleiche Geometrieconfiguration mit einem Randabstand  $e_1$  von  $1,2 d_0$ . Je Belastungsrichtung und Dicke werden 5 bis 7 Versuche durchgeführt. Zusätzlich werden in Einzelversuchen die Randabstände  $e_1$  von  $2 d_0$  und  $2,2 d_0$  untersucht.

Ausführlich mit dem Tragverhalten von mit WAAM gefertigten Schraubverbindungen hat sich Guo in mehreren Veröffentlichungen befasst. Er hat das Lochleibungsverhalten von einschnittigen (Guo et al. 2022a; Guo et al. 2022b) und zweisechnittigen (Guo et al. 2023b) Verbindungen sowie als einzige Quelle das T-Stummeltragverhalten (Guo et al. 2023a; Guo et al. 2023c) untersucht. Beide Lochleibungsuntersuchungen wurden an Proben des gleichen Herstellers und mit den gleichen Schweißparametern geführt. Die jeweils 30 Probengeometrien wurden einmal in und senkrecht zur Schweißrichtung belastet. So wird eine große Bandbreite untersucht, inwiefern diese Einzelergebnisse der Streuung unterliegen, kann nicht eingeschätzt werden. Einige der untersuchten Probengeometrien der ein- und zweisechnittigen Verbindungen stimmen überein und das Tragverhalten kann miteinander verglichen werden.

**Tabelle 6.11:** Übersicht zu Untersuchung von WAAM-Stahl-Schraubverbindungen

| Veröffentlichung   | Untersuchungsgegenstand*                                | Untersuchte Bauteildicke* | Untersuchte Schraubengröße*                 | Untersuchte Belastungsrichtung* |
|--------------------|---|---------------------------|---|---------------------------------|
| Kotteman (2020)    | Lochleibungsverhalten zweischnittiger Verbindungen (50) | 3 mm (22)<br>6 mm (28)    | M16 (50)<br>Parallel (18)                   | Senkrecht (17)<br>45° (15)      |
| Guo et al. (2022a) | Lochleibungsverhalten einschnittiger Verbindungen (60)  | 3 mm (34)<br>8 mm (26)    | M16 (18)<br>M20 (10)<br>M24 (24)<br>M30 (8) | Parallel (30)<br>Senkrecht (30) |
| Guo et al. (2023b) | Lochleibungsverhalten zweischnittiger Verbindungen (60) | 3 mm (34)<br>8 mm (26)    | M16 (18)<br>M20 (10)<br>M24 (24)<br>M30 (8) | Parallel (30)<br>Senkrecht (30) |
| Ye et al. (2023)   | Lochleibungsverhalten einschnittiger Verbindungen (36)  | 3 mm (36)                 | M16 (18)<br>M20 (10)<br>M24 (8)             | Parallel (18)<br>Senkrecht (18) |
| Liu et al. (2023)  | Lochleibungsverhalten zweischnittiger Verbindungen (36) | 3 mm (36)                 | M16 (18)<br>M20 (10)<br>M24 (8)             | Parallel (18)<br>Senkrecht (18) |
| Guo et al. (2023c) | T-Stummelverhalten mit 2 Schrauben (52)                 | 8,5 mm (52)               | M12 (52)                                    |                                 |
|                    | T-Stummelverhalten mit 4 Schrauben (28)                 | 8,5 mm (28)               | M12 (28)                                    |                                 |

\* (mit Angabe der jeweiligen Anzahl an Untersuchungen)

Auch (Ye et al. 2023) und (Liu et al. 2023) führen ihre Untersuchungen an Proben des gleichen Herstellers mit den gleichen Schweißparametern und Materialeigenschaften durch. Ebenfalls werden hier je Probengeometrie nur ein Versuch in und senkrecht zur Schweißrichtung geführt. Auch in diesen Untersuchungen gleichen sich einige der Abmessungen der ein- und zweischnittigen Probekörper.

## 6.4.2 Vorstellung und Bewertung der Ergebnisse

### Lochleibung

In den Arbeiten von Guo et al. (2022a), Guo et al. (2023a), Liu et al. (2023) und Ye et al. (2023) wird zur Traglast jeweils der Versagensmodus mit angegeben. Es wird in die Versagensarten shear-out (SO), net section (NS), bearing (B), end-splitting (ES), localised tearing (LT), block-shear (BS), incidental bearing (IB), curl bearing (CB) und tilt-bearing (TB) unterschieden. Die Arten BS (Liu et al. 2023) und IB (Guo et al. 2023b) beschreiben das gleiche Phänomen, hier kommt es zu einer Kombination aus SO und NS. CB (Guo et al. 2022a) und TB (Ye et al. 2023) können in einschnittigen Verbindung auf Grund der Exzentrizität und Biegung der Platte bzw. Schraube auftreten. LT ist eine Art, die Guo für WAAM gefertigte Bauteile eingeführt hat. Er begründet das Versagen mit einer lokalen Schwächung des Bauteils durch den Druckprozess bzw. durch die Anisotropie des Materials.

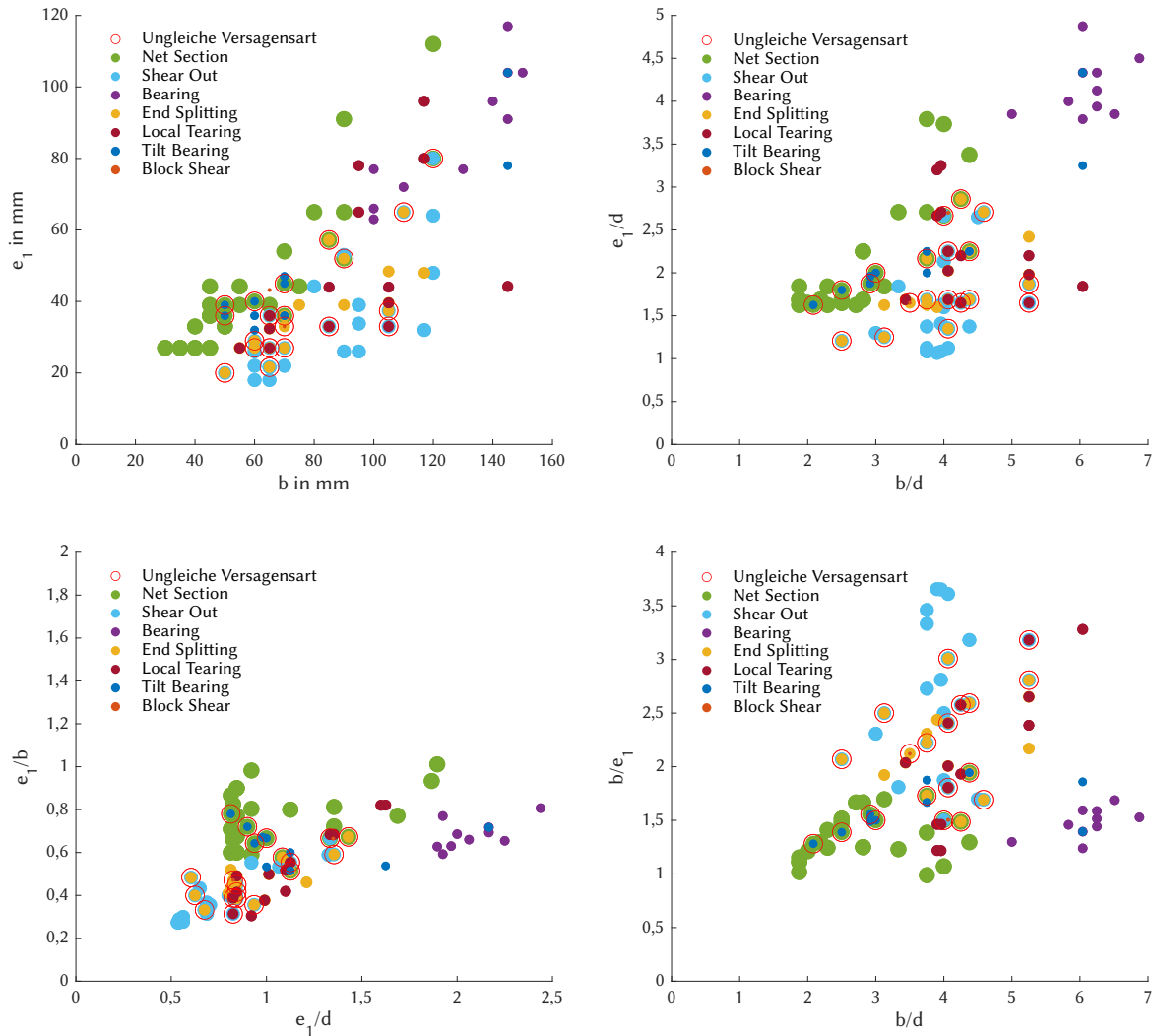


Abbildung 6.14: Übersicht über Versagensarten nach nomineller Geometrieabmessung

### Versagensart

In der Übersicht sind die Versagensart den Abmessungen  $b$ ,  $d$  und  $e_1$  gegenübergestellt (Abb. 6.14). Auf Grund der genannten Zusammenhänge werden die Arten BS und IB zu BS und die Arten CB und TB zu TB zusammengefasst. In der Gegenüberstellung sind zusätzlich die Geometrien gekennzeichnet, bei denen sich in paralleler und senkrechter Richtung verschiedene Versagensarten ergeben haben.

Es fällt auf, dass sich bei kleinem  $b/e_1$ -Verhältnis eher SO ergibt, bei großen  $b/e_1$  vor allem NS und bei großem  $b/d$  und  $e_1/d$  Verhältnis ergibt sich B. Dieses Verhalten ist typisch und tritt auch bei gewalztem Stahl auf. Die anderen Versagensarten zeigen keine ausgeprägte Zone, in welcher sie vermehrt auftreten, generell sind sie aber eher mittig angeordnet. Für das Auftreten von TB könnte ein Verhältnis um 1,5  $b/e_1$  als ausschlaggebend interpretiert werden.

### Belastungsrichtung

Bei Gegenüberstellung der Versagensarten von senkrechter und paralleler Belastung ist generell eine gute Übereinstimmung zu erkennen (vgl. Abb. 6.15). So zeigen 70 % der Versuche in beide Richtungen das gleiche Versagen. Die Unstimmigkeit fällt vor allem bei ES auf. Dieses tritt in paralleler deutlich häufiger als in senkrechter Belastungsrichtung auf. In senkrechter Richtung kommt es für diese Geometrien

|   |    |  |    |    |    |    |    |   |
|---|----|--|----|----|----|----|----|---|
| Anzahl der Proben je Versagensmodus<br>bei senkrechter Belastungsrichtung | B  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 10 |   |
|   | BS | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |   |
|   | ES | 0  | 1  | 0  | 0  | 8  | 0  |   |
|   | LT | 0  | 2  | 0  | 12 | 0  | 0  |   |
|   | NS | 3  | 1  | 24 | 0  | 3  | 0  |   |
|   | SO | 0  | 15 | 0  | 0  | 8  | 0  |   |
|   | TB | 6  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  |   |
|   |    | TB   | SO | NS | LT | ES | BS | B |
|   |    | Anzahl der Proben je Versagensmodus<br>bei paralleler Belastungsrichtung |    |    |    |    |    |   |

Abbildung 6.15: Gegenüberstellung der Versagensarten je Belastungsrichtung

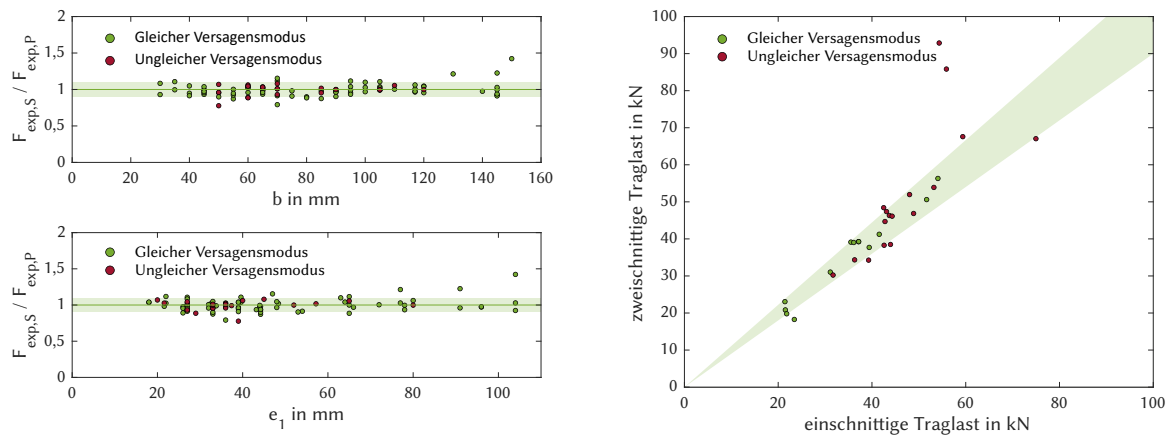


Abbildung 6.16: Einfluss der Belastungsrichtung

vermehrt zu SO. Dies führen die Autoren der Untersuchungen vor allem auf das Herstellungsverfahren und auf dadurch hervorgerufene Schwächungen der Probekörper zurück.

In Abb. 6.16 sind die experimentellen Traglasten der beiden Belastungsrichtung gegeneinander und als Verhältnis dieser Traglasten gegenüber  $e_1$  bzw.  $b$  aufgetragen. In grün ist der Bereich bis 10 % Abweichung hervorgehoben. Außerdem zeigt die Farbe der Punkte, ob eine gleiche oder ungleiche Versagensart aufgetreten ist.

Es lässt sich über alle Versuche hinweg keine ausgeprägte Abhängigkeit der Belastungsrichtung auf die Traglast erkennen. In einigen Fällen ist die Traglast in paralleler Richtung etwas höher, in anderen Fällen ist es umgekehrt. Zusätzlich ist zu erkennen, dass eine in den beiden Belastungsrichtung unterschiedliche Versagensart nicht unbedingt zu einer unterschiedlichen Traglast führt. Auch die hier nicht aufgeführte diagonale Belastungsrichtung zeigt keine Besonderheit in der Traglast.

### Rechnerische Traglast

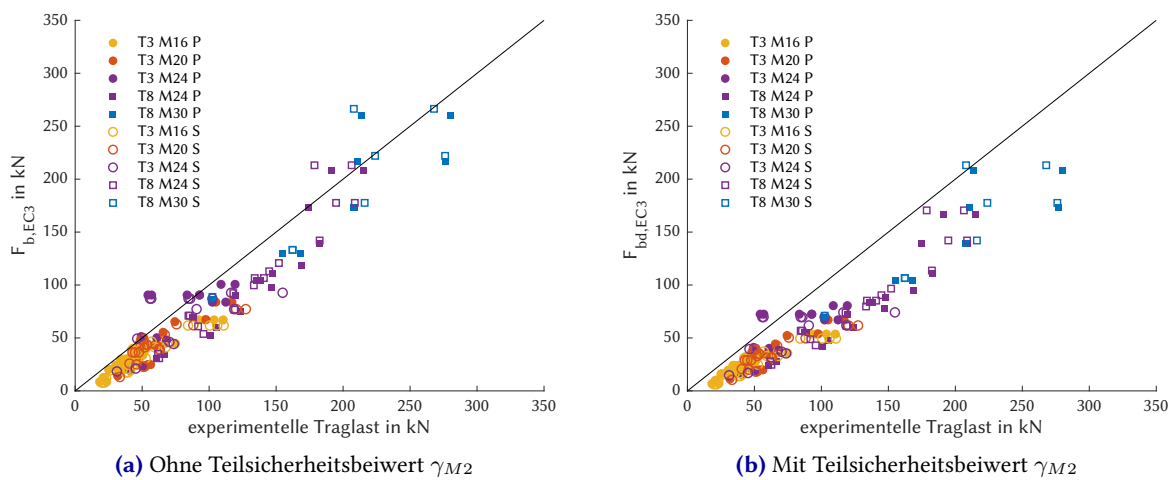
In den untersuchten Veröffentlichungen werden die Traglasten auch mit den rechnerischen Traglasten, die sich aus den verschiedenen Normen ergeben, verglichen. Zwar wird hierzu auch der Eurocode 3 verwendet, allerdings unterscheidet sich die Berechnung im britischen Raum von der deutschen

Berechnung. Daher wurden mit den in den Veröffentlichungen angegebenen Zugfestigkeiten und nominellen Abmessungen anhand der folgenden Formeln die rechnerischen Traglasten ermittelt.

$$F_{b,EC3} = \alpha_b \cdot k_m \cdot f_u \cdot d_t$$

$$F_{bd,EC3} = \frac{\alpha_b \cdot k_m \cdot f_u \cdot d_t}{\gamma_{M2}}$$

Den Vergleich der rechnerischen Traglast mit der experimentell ermittelten Traglast zeigt Abb. 6.17. Hier wurden die Traglasten sowohl ohne als auch mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_2$  von 1,25 aufgetragen. Befindet sich ein Punkt über der diagonalen Geraden, hat die experimentelle Traglast nicht die ermittelte rechnerische Traglast erreicht. Dies ist beim Vergleich ohne Teilsicherheitsbeiwert für 22 Versuche der Fall.



**Abbildung 6.17:** Vergleich der experimentellen mit den rechnerischen Traglasten

Der Mittelwert über alle Versuche liegt bei einem um 40 % erhöhten experimentellen Traglastwert ohne Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwert. Bei Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes liegt die Traglast sogar 70 % höher. Bei Vergleich mit dem Versagensmodus (Tabelle 6.12) tritt eine niedrigere experimentelle Traglast vor allem für die Versagensarten B und LT auf.

**Tabelle 6.12:** Versagensmodus, wenn experimentelle Traglast geringer als rechnerische Traglast

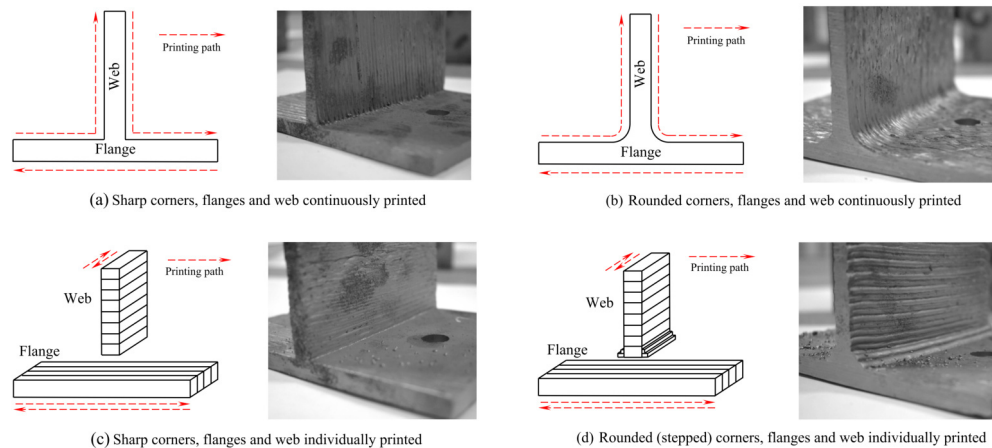
|            | Gesamt | B    | LT   | NS  | TB   |
|------------|--------|------|------|-----|------|
| Anzahl     | 22     | 7    | 7    | 4   | 4    |
| Prozentual | 11,2 % | 35 % | 27 % | 7 % | 25 % |

**Bewertung**

Generell zeigt sich ein recht vorhersagbares Verhalten, das mit dem Nachweis zur Lochleibung nach DIN EN 1993-1-8 in den meisten Fällen auf der sicheren Seite abgeschätzt werden kann. Es zeigt sich auch keine Abhängigkeit von der Lastrichtung. Allerdings wurde für jede Geometrie nur ein Versuch geführt. Für eine umfassende Bewertung des Verhaltens, sollten zusätzliche Versuche durchgeführt werden. Sinnvoll könnte auch nochmal der direkte Vergleich mit gewalzten Blechen der gleichen Geometrie sein, um besondere Versagensarten, die sich durch die additive Herstellweise ergeben, ermitteln zu können.

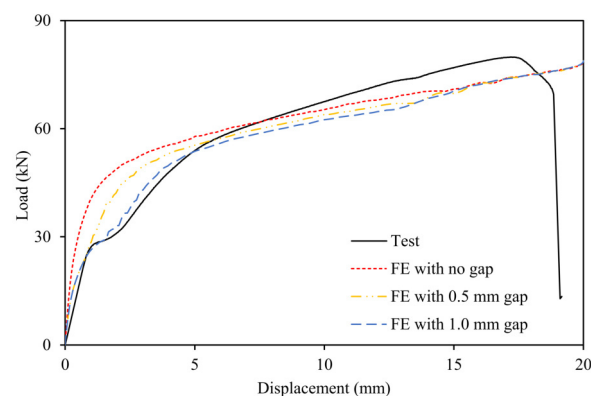
## T-Stummel

Auch die T-Stummeluntersuchungen (Guo et al. 2023a) wurden lediglich an einem Versuch je Geometrievariante durchgeführt. Jedoch wird jeweils eine Geometrie mit vier verschiedenen Fertigungsstrategien (Abb. 6.18) hergestellt. Die Probekörper sind alle vollständig mit dem WAAM hergestellt. Es werden DIC und DMS genutzt, um die Entstehung der Fließgelenke genau zu analysieren.



**Abbildung 6.18:** Untersuchte T-Stummel-Herstellvarianten (Guo et al. 2023a)

In den untersuchten Fällen, tritt das erste Fließgelenk immer am Anschnitt des Stegs auf. Dieses Versagen bestimmt nach Guo et al. (2023a) die Höhe der Traglast und die Art des Versagens. In einigen Versuchen ist ein vorzeitiges Fließen mit einem darauffolgenden deutlichen Steifigkeitsanstieg zu sehen. Dies führen Guo et al. (2023a) auf die Geometrieungenauigkeiten durch Oberflächenwelligkeit und Verzug zurück. Diese führen zu einem Abstand zwischen den verbundenen Flächen und somit zum Wegfall der Abstützkräfte und einem vorzeitigen Fließen. Nach Fließbeginn kann sich das Blech auf dem Gegenstück abstützen und es kommt zu einem Steifigkeitsanstieg. Dies haben Guo et al. (2023a) auch in Finiten Elementen (Abb. 6.19) gezeigt.



**Abbildung 6.19:** FE-Nachmodellierung des Abstands (Guo et al. 2023a)

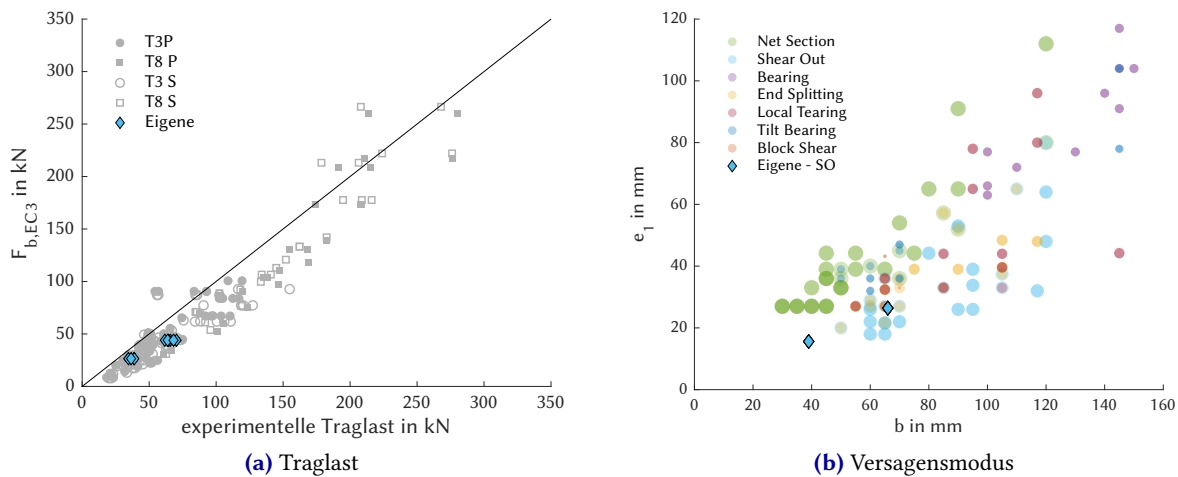
Guo et al. vergleichen weiterhin den Einfluss der Druckstrategie. Hier stellen sie fest, dass die mit Rundungen gedruckten Probekörper (Abb. 6.18 b) und d)) deutlich höhere Fließgrenzen haben und höhere Traglasten aufweisen als die mit scharfen Kanten gedruckten Probekörper (Abb. 6.18 a) und c)). Außerdem stellen sie fest, dass die in zwei Teilen gedruckten Probekörper (Abb. 6.18 c) und d)) jeweils etwas höhere Traglasten aufweisen als die kontinuierlich gedruckten Körper.

Guo et al. (2023a) vergleichen die experimentell ermittelten Fließkräfte mit den rechnerischen Kräften nach DIN EN 1993-1-8. Hierbei stellen sie fest, dass die Berechnung ohne Abstützkräfte generell kleinere Kräfte ermittelt als im Versuch erreicht wurden. Die Berechnung nach Modus 2 – kombiniertes Versagen aus Schraube und Blech – liegt im Durchschnitt auf der unsicheren Seite. Die Berechnung nach Modus 1 – Versagen des Blechs – liegt im Durchschnitt auf der sicheren Seite.

### 6.4.3 Einordnung der eigenen Untersuchungen

#### Lochleibung

Auch die eigenen Untersuchungen zeigen keine Abhängigkeit der Traglast von der Belastungsrichtung. Aufgrund des geringen Randabstand  $e_1$  kommt es bei den eigenen additiv gefertigten Probekörpern durchweg zu einem SO Versagen. In Abb. 6.20 sind die eigenen Versuche zusätzlich zu den Versuchen aus der Literatur dargestellt. Sie ordnen sich sehr gut in die vorhandenen Ergebnisse ein.



**Abbildung 6.20:** Vergleich der eigenen Untersuchungen mit der Literatur

Die eigenen Versuche zeigen zusätzlich zu den Versuchen von Kotteman, dass die Streuung der additiv gefertigten Probekörper sehr gering ist. Sie zeigen, dass die Traglast anhand der vorhandenen Norm auf der sicheren Seite berechnet werden kann. Sie zeigen auch, dass es bei einem überwachten Herstellprozess nicht zu unerwarteten Versagensmodi kommt. Die Probekörper verfügen über eine ausreichende Duktilität, um ein Versagen ankündigen zu können.

#### T-Stummel

Die in der Literatur zu findenden T-Stummeluntersuchungen unterscheiden sich von den eigenen. Einerseits durch die gewählten Abmessungen und die Geometrie und andererseits durch die Herstellweise. Sie zeigen allerdings ebenfalls eine starke Abhängigkeit des Tragverhaltens von der Genauigkeit des Drucks. Es zeigt sich, dass das nicht Schließen der Lücke zwischen den verbundenen Blechen zu einem vorzeitigen Fließen im Blech führt. Dies konnte in den eigenen Versuchen durch ein leichtes Vorspannen verhindert werden.



## 6.5 Zusammenfassung

Es wurden 240 Lochleibungsversuche aus der Literatur miteinander und mit den eigenen Untersuchungen (10 Versuche) verglichen. Prinzipiell zeigt sich ein zum konventionellen Stahl vergleichbares Verhalten. In den untersuchten Veröffentlichungen finden sich allerdings auch immer wieder Ausreißer, welche die rechnerischen Traglasten unsicher werden lassen. Hier sollten noch weitere umfassendere Untersuchungen unternommen werden, in denen vor allem auch der Herstellungsprozess beobachtet werden sollte, um Schwachstellen von vornherein zu identifizieren.

Vor allem beim T-Stummeltragverhalten spielt die Oberflächenwelligkeit und der Verzug eine übergeordnete Rolle. Generell kann das Verhalten gut vorhergesagt werden, wenn diese Unregelmäßigkeiten berücksichtigt werden. Wünschenswert ist jedoch sicherlich, einen direkten Vergleich mit nachbearbeiteten Probekörpern zu führen, um die Auswirkungen umfassend beurteilen zu können und möglicherweise Vorschriften für die Herstellweise von auf Zug belasteten Schraubenverbindungen zu geben. Weiterhin sollten die Untersuchungen der getrennt hergestellten Probekörper nach Guo et al. (2023a) durch in anderer Richtung gedruckte Bleche ergänzt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte kann prinzipiell gesagt werden, dass Schrauben in additiv gefertigten Bauteilen verwendet werden können. So kann das Potential von WAAM-Bauteilen als komplexe, verbindende und lösbare Bauteile genutzt werden.



---

# 7 ENTWURF VON WAAM-KNOTENSTRUKTUREN

## 7.1 Komplexität von Stahlbauknoten

Verbindungsstellen im Stahlbau treten in unterschiedlichen Formen auf. Aus bisherigen Untersuchungen wird ersichtlich, dass die additive Fertigung vor allem für Bauteile, die in der konventionellen Fertigung aufwendig sind, vorteilhaft ist. Es wurden daher verschiedene Faktoren ermittelt, die die Komplexität beeinflussen.

### 7.1.1 Einflussgebiete der Komplexität

#### Geometrische Komplexität

Einen großen Einfluss auf die Komplexität einer Knotenstruktur hat die geometrische Situation. Dies beginnt mit der Anzahl der zu verbindenden Stäbe. Während es beispielsweise für drei Stäbe noch einfach ist, eine praktikable Lösung zu finden, können fünf Stäbe bereits zu einem Platzproblem führen und es ist zu überlegen, ob ein Träger außerhalb des Knotenpunktes angeschlossen werden kann bzw. muss.

Weiterhin spielt die Ausrichtung der Träger zueinander eine Rolle. Wird eine Stabachse weitergeführt, kann ein Träger durchlaufend ausgeführt und die anderen Träger an diesen angeschlossen werden. Zusätzlich erhöhen zueinander um die Stabachse verdrehte Träger die Komplexität.

Ebenfalls hat die Größe der Träger einen Einfluss. Wenn die Träger verschieden hoch sind, beeinflusst das auch die Anschlussstelle. Hierzu muss zusätzlich unterschieden werden, ob die Träger sich im Schwerpunkt treffen oder ob sie einseitig bündig abschließen sollen. Häufig erfolgt die Auswahl von Profilen – vor allem bei kleineren Spannweiten und Lasten – nicht nach den erforderlichen Widerständen, sondern nach der Montierbarkeit im Anschlussbereich.

#### Lastkomplexität

Neben der geometrischen Situation spielen auch die zu übertragenden Lasten eine entscheidende Rolle. Sind alle Träger biegesteif anzuschließen, ist anderer Aufwand erforderlich, als wenn einige Träger nur gelenkig anzuschließen sind.

#### Ausführungskomplexität

Weiterhin spielt die Ausführung eine Rolle für die Einschätzung der Komplexität. Hierbei ist zum einen die Zugänglichkeit zu beachten. Diese definiert das Maximalgewicht und die Maximallänge des Bauteils bzw. der Einbau wird bei Überschreiten dieser komplizierter. Auch welche Verbindungsmöglichkeit besteht, beeinflusst den Entwurf des Bauteils. Ist es nicht möglich zu schweißen, muss für die Schrauben ausreichend Platz vorgesehen werden. Des Weiteren wird der Anspruch an die Ausführung auch durch die spätere Exposition des Bauteils festgelegt.

### Ästhetische Komplexität

Ein weiterer die Komplexität beeinflussender Aspekt ist die Ästhetik. Soll ein Knoten sichtbar sein, werden an ihn häufig andere – höhere – Anforderungen gestellt, als bei nachheriger Verdeckung durch den Ausbau. Solche Anforderungen können gerade in Bauwerken von großem Prestige die Planung und Ausführung von (sonst) sehr niederkomplexen Bauteilen zusätzlich beeinflussen und erschweren. Wenn beispielsweise Schweißnähte nicht sichtbar sein sollen, müssen sie für ein späteres Schleifen auch zugänglich sein.

#### 7.1.2 Beurteilung der Komplexität

Die hier getrennt betrachteten Einflussgebiete beeinflussen sich zusätzlich gegenseitig. So ist eine getrennte Bewertung nicht möglich, sondern muss immer im Gesamtzusammenhang gesehen werden.

Zusätzlich stellt sich die Frage, ob alle Faktoren gleich bewertet werden können. Ist beispielweise ein geometrisch hochkomplexer Knoten komplexer oder weniger komplex als ein Knoten mit hoher Ausführungskomplexität? Dies erschwert die Vergleichbarkeit verschiedener Knotensituationen.

Im Folgenden werden Untersuchungen vorgestellt, die sich auf vier gleiche Träger beziehen, die in einem Knotenpunkt aufeinandertreffen. Der Knoten soll als Einzelbauteil ausgeführt werden und die Träger jeweils separat an ihn angeschlossen werden.

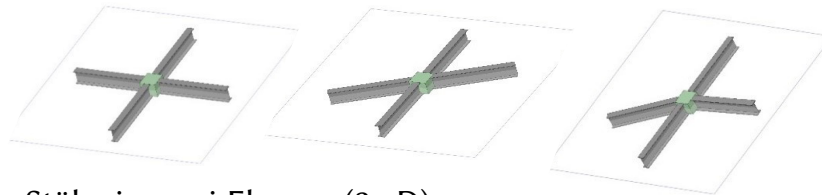
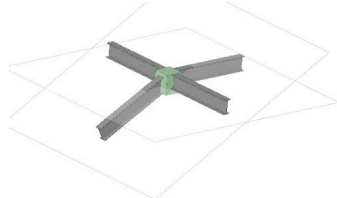
#### 7.1.3 Untersuchte geometrische Komplexitätsstufen

Geometrisch wird die Unterteilung in drei Grade vorgenommen. Hierzu werden die Stabebenen der im Knoten anzuschließenden Stäbe betrachtet. Stabebenen bezeichnen die Ebenen, die sich aus den lokalen Stabkoordinatensystemen ergeben. Zur Definition der geometrischen Komplexität werden für alle Stäbe sowohl das Zusammenspiel der x-y-Ebenen untersucht als auch das der x-z-Ebenen. Dies ermöglicht es, eine Rotation des Trägers mitzuberechnen.

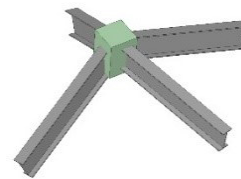
Es ergeben sich die in Abb. 7.1 dargestellten Komplexitätsgrade. Im einfachsten Fall haben alle Stäbe eine gleiche Ebene, dies bildet der Komplexitätsgrad 1 ab. Die Komplexität nimmt zu, wenn ein Stab nicht in der gleichen Ebene verläuft wie die anderen Stäbe; dies wird durch Komplexitätsgrad 2 abgebildet. Verlaufen die Stäbe in mehr als 2 Ebenen wird der Knoten dem Komplexitätsgrad 3 zugeordnet.

Innerhalb dieser Grade gibt es noch Unterstufen, verlaufen die Stäbe durchgehend und in einem Winkel größer  $60^\circ$  zueinander, ist die Ausführung einfacher, als wenn die Stäbe durchlaufend sind, sich aber in einem Winkel kleiner  $60^\circ$  treffen. Treffen sich alle Stäbe aus unterschiedlichen Richtungen kommend, ist dies der komplexeste Fall eines Grades.

Prämisse sollte für die Knoten sein, dass sich alle Stab-X-Achsen in einem Punkt treffen, da hierdurch keine zusätzlichen Exzentrizitäten entstehen. Diese Exzentrizitäten müssten im Entwurf berücksichtigt werden und erhöhen die Komplexität des Knotens. Sie lassen sich jedoch teilweise nicht vermeiden, vor allem bei konventioneller Ausführung. Mit der freieren Formgebung durch das WAAM kann hier zusätzlich der Vorteil genutzt werden, Exzentrizitäten abzubauen. Solche Knoten werden dem Komplexitätsgrad 4 zugeordnet.

**GRAD 1: Stäben in einer Ebene (2 -D)****GRAD 2: Stäbe in zwei Ebenen (3 -D)****GRAD 3: Stäbe beliebig im Raum (3 -D)****UNTERSTUFEN**

- rechtwinklig zueinander
- nicht rechtwinklig zueinander
- nicht durchgehend

**Abbildung 7.1:** Untersuchte geometrische Komplexitätsgrade

## 7.2 Formfindung durch Topologieoptimierung

Im Gegensatz zur konventionellen Fertigung entspricht die Einsparung von Material bei additiv gefertigten Strukturen direkt auch einer Einsparung der Fertigungszeit, da weniger Material aufgebracht werden muss. Allerdings muss diese pauschale Aussage begrenzt werden, da nicht jede Struktur mit der gleichen Aufbaurate gefertigt werden kann (vgl. Kapitel 3). Trotzdem ist es sinnvoll, die Knotenstrukturen an die zu übertragenden Lasten anzupassen und hinsichtlich des Materials zu optimieren. Um sinnvolle Lösungen zu erhalten, sollten Einschränkungen aus dem Fertigungsprozess, dem Tragverhalten sowie aus der späteren Montage in die Formfindung einbezogen werden.

### 7.2.1 Randbedingungen

#### Fertigung

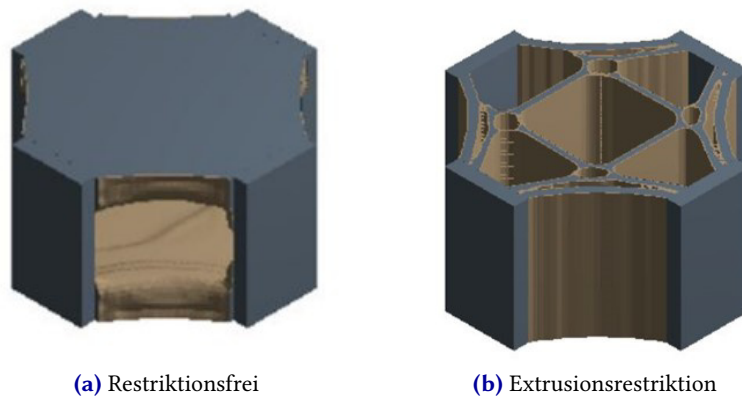
Obwohl das WAAM fast alle Geometrien realisieren kann, sogar Brücken über Wasser (Feucht et al. 2022), sind einige Strukturen einfacher und damit schneller herzustellen als andere - und ihre Produktion ist zuverlässiger.

Zum Beispiel sollte der vertikale Winkel einer Struktur einen bestimmten Wert nicht überschreiten (vgl. Kapitel 4). Beim Schweißen mit den vorgestellten Parametern liegt dieser Wert bei 30° zur Vertikalen. Bei einem größeren Wert wird die Schweißnaht deutlich niedriger und kann nicht mehr mit der gleichen Lagenhöhe gedruckt werden. Wenn ein größerer Winkel erforderlich ist, muss der Schweißbrenner oder der Tisch gedreht werden. Ein größerer Winkel geht jedoch immer mit einer geringeren Geschwindigkeit des Druckvorgangs einher (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Das punktuelle Aufeinanderschweißen, um dünne Stäbe zu fertigen, kombiniert den unregelmäßigen und fehleranfälligen Prozess am Anfang und am Ende einer Schweißnaht. Es erfordert daher mehr

Aufmerksamkeit als ein wandartiges Bauteil. Filigrane, schlanke Strukturen neigen zu starkem Verzug. Daher sind geschlossene Querschnitte (z. B. Rohre) oder anderweitig ausgesteifte Bauteile besser geeignet.

Um den Fertigungsprozess einfach und schnell zu gestalten, sind wandförmige Strukturen ohne Überhang am besten geeignet. Solche Strukturen können durch die Vorgabe einer Extrusionsrichtung als Fertigungsbeschränkung im Optimierungsalgorithmus erzeugt werden. Den Vergleich zwischen einem restriktionsfreien Optimierungslauf und einer vorgegebenen Extrusionsrestriktion zeigt Abb. 7.2.

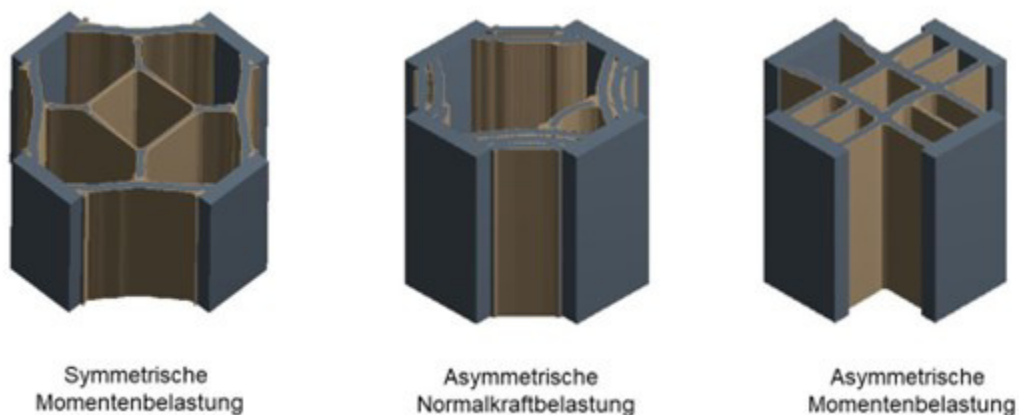


**Abbildung 7.2:** Einfluss der Restriktion

Zwar wird der Fertigungsprozess hierdurch erleichtert, allerdings nimmt man mit dieser Vorgabe eine weniger materialsparende Variante in Kauf. Außerdem erzeugt diese Art der Optimierung keinerlei Überhang und nutzt das Potential nicht vollständig aus.

### Statisches Verhalten

Da die Optimierung eine für den Lastfall angepasste Form ermittelt, erhält man je nach Belastung auch unterschiedliche Optimierungsergebnisse. Dies ist in Abb. 7.3 zu sehen. In den drei dargestellten Fällen wurden auf die gleiche Ausgangsgeometrie eines Quaders, bei dem vier Seiten miteinander verbunden werden sollten, lediglich unterschiedliche Lasten aufgebracht und diese für die gleiche Massenrestriktion optimiert.



**Abbildung 7.3:** Unterschiedliche Optimierungsergebnisse für unterschiedliche Lastfälle

Ist ein Bauteil mehreren Lastfällen ausgesetzt, sollte die optimierte Struktur auch für alle Lastfälle ausgelegt sein. Hierbei kann getestet werden, ob das Optimierungsergebnis für einen Lastfall auch die

nötige Tragfähigkeit für den anderen Lastfall aufweist. Weiterhin kann eine Überlagerung von zwei sehr verschiedenen Ergebnissen stattfinden. In einigen Optimierungsalgorithmen ist es auch möglich mehrere Lastfälle gleichzeitig zu berücksichtigen. Im Nachhinein sollten dennoch alle Lastfälle überprüft werden.

Die lineare Optimierung berücksichtigt die Tragfähigkeit des Knotens nicht, da die Streckgrenze nicht berücksichtigt wird. Dies führt teilweise zu unangemessen kleinen lokalen Querschnitten. Hier kann die Tragfähigkeit durch Anpassung dieser kritischen Stellen sehr leicht erhöht werden. Um solche Stellen zu ermitteln und auch um zu überprüfen, ob die notwendige Tragfähigkeit durch das Optimierungsergebnis gewährleistet wird, ist immer eine Traglastanalyse an die Optimierung anzuschließen.

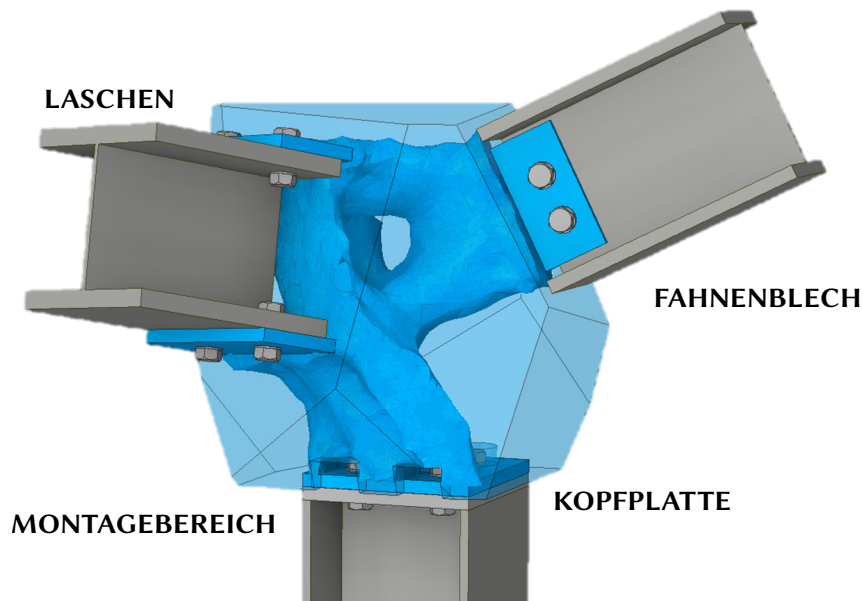
Allerdings erschwert die sehr unregelmäßige Oberfläche häufig eine nachträgliche Berechnung, da die Struktur nur noch schwer vernetzt werden kann. Daher kann es sinnvoll sein, die Ergebnisse für verschiedene Massenreduktionsquoten zu vergleichen und Regelmäßigkeiten abzuleiten. Aus diesen Regelmäßigkeiten kann dann eine optimierte Struktur gebildet werden und die Tragfähigkeit bestimmt werden. Dieses Vorgehen erfolgte beispielsweise bei den im Kapitel 6 vorgestellten T-Stummelvarianten.

Abb. 7.3 zeigt eine weitere Besonderheit, auf die bei der Modellierung des Optimierungsproblems geachtet werden muss: die Lagerung. Es ist vor allem in den Fällen 2 und 3 zu sehen, dass die linke hintere Platte nicht auf die gleiche Weise in den Knoten eingebunden ist wie die anderen Seiten. Hier wurde ein Lager platziert, während die anderen Platten die Last erhielten. Bezogen auf die Schnittgrößen ist das ein plausibles Vorgehen: drei Seiten werden freigeschnitten und die vorherrschenden Schnittgrößen aufgebracht, an der vierten Seite wird nun die Reaktion gemessen. Allerdings bringt das Lager eine Steifigkeit in die zu optimierende Struktur, welche eigentlich nicht vorhanden ist. Der Algorithmus muss beispielsweise im Fall 3 an dieser Stelle der Struktur keinen zusätzlichen Steg einbringen, da das Lager bereits eine Steifigkeit einbringt. Der Versuch dieses Problem über das Einfügen eines Lagers an jeder Platte, damit jede Platte „gleichberechtigt“ ist, zu lösen, würde dazu führen, dass die Platten im Optimierungsergebnis nicht miteinander verbunden werden, da die Last ja direkt ins Lager gehen kann. Diese Problematik ist vor allem für die hier untersuchten Knoten von Bedeutung.

Auch für Bauteile mit einem definierten Lastpfad hat die Lagerung eine Bedeutung. Eine direkte Lagerung (in Ansys Workbench eine fixierte oder eine verschiebliche Lagerung) bringt immer eine Steifigkeit in das Ergebnis, die eigentlich nicht vorhanden ist und kann damit zu problematischen Ergebnissen führen. Daher sollte die Lagerung entweder durch ein weiteres Bauteil oder durch eine externe Lagerung stattfinden. Gleiches gilt für das Aufbringen der Last. Eine Last, die als direkte Verschiebung aufgebracht wird, steift das Bauteil für den Algorithmus aus. Es sollte daher entweder eine Last oder eine externe Verschiebung genutzt werden.

### **Montage**

Die Bauteile sollten so entworfen werden, dass der spätere Montageprozess so weit wie möglich, vereinfacht wird (Kapitel 3). Eine Möglichkeit ist, typische Verbindungen des Stahlbaus - wie z.B. Stirnplatten oder Fahnenbleche - für den Anschluss an den Knoten vorzusehen (siehe Abb. 7.4). Dies hat den Vorteil, dass die an den Knoten angrenzenden Bauteile schnell vorbereitet werden können. Der Konstruktionsraum muss dann auch auf ausreichend Platz geprüft werden, um Werkzeuge für die Montage ansetzen zu können. Weiterhin kann die Struktur so konzipiert werden, dass keine Gehrungsschnitte notwendig sind.



**Abbildung 7.4:** Unterschiedliche typische Stahlbauanschlüsse an einem Designraum

### 7.2.2 Vorgehen

Die Topologieoptimierung ist ein mächtiges Tool. Sie kann jedoch nur im vorgegebenen Rahmen nach dem optimalen Ergebnis suchen. Daher wird das folgende Vorgehen vorgeschlagen:

#### Definition des Problems

Zunächst sollte das Bauteil in einem adäquaten Modell abgebildet sein. In diesem Modell sollte sich das Bauteil so verhalten, wie es sich in Realität verhält. Beispielsweise kann eine bekannte Traglast verglichen werden und das Verformungsverhalten im Modell kritisch auf Plausibilität beurteilt werden. Für die realistische Abbildung können neben einem nichtlinearen Materialgesetz, je nach Problem, auch nicht-lineare Lagerungen notwendig sein.

Diese Nicht-Linearitäten können von den meisten Optimierungsalgorithmen nicht berücksichtigt werden. Daher kann dieses Modell nicht direkt zur Optimierung genutzt werden. Allerdings kann später das optimierte Bauteil in dieses Modell eingesetzt und das Tragverhalten überprüft werden.

#### Erstellen des statischen Systems zur Topologieoptimierung

Wie zuvor erklärt, kann das nicht-lineare System in den meisten Fällen nicht zur Optimierung genutzt werden und muss daher in ein lineares überführt werden. Hierbei sollte das Verhalten durch die gewählten linearen Randbedingungen möglichst realitätsnah abgebildet werden. Wenn das nicht möglich ist, muss dies bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden und diese gegebenenfalls angepasst werden. Zusätzlich muss bei Wahl der Lagerungsbedingungen die zuvor erläuterte Steifigkeitsproblematik beachtet werden.

#### Definition der Topologieoptimierung

Bei Definition des Optimierungsproblems wird nach Wahl der Zielfunktion – wie im Kapitel 2 erklärt eignet sich hierfür die mittlere Nachgiebigkeit - ein Designraum festgelegt, also jener oder jene Körper, der oder die optimiert werden sollen. Die Hauptrestriktion (vgl. Kapitel 2) kann dann die Masse oder



das Volumen sein. Wird lediglich ein Körper oder mehrere Körper des gleichen Materials optimiert, sind die beiden Einstellung gleichbedeutend. Ein Unterschied ergibt sich, wenn zwei Materialien unterschiedlicher Rohdichte optimiert werden. Dann können sich bei gleichem Prozentsatz für die beiden Restriktionen unterschiedliche Ergebnisse einstellen. Für die im Rahmen der Arbeit untersuchten Fälle sind beide Restriktionen gleichbedeutend.

Es können zusätzliche Restriktionen hinzugefügt werden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Hierbei sollte beachtet werden, dass jede Restriktion die Suche erschwert und somit die Rechenzeit verlängert.

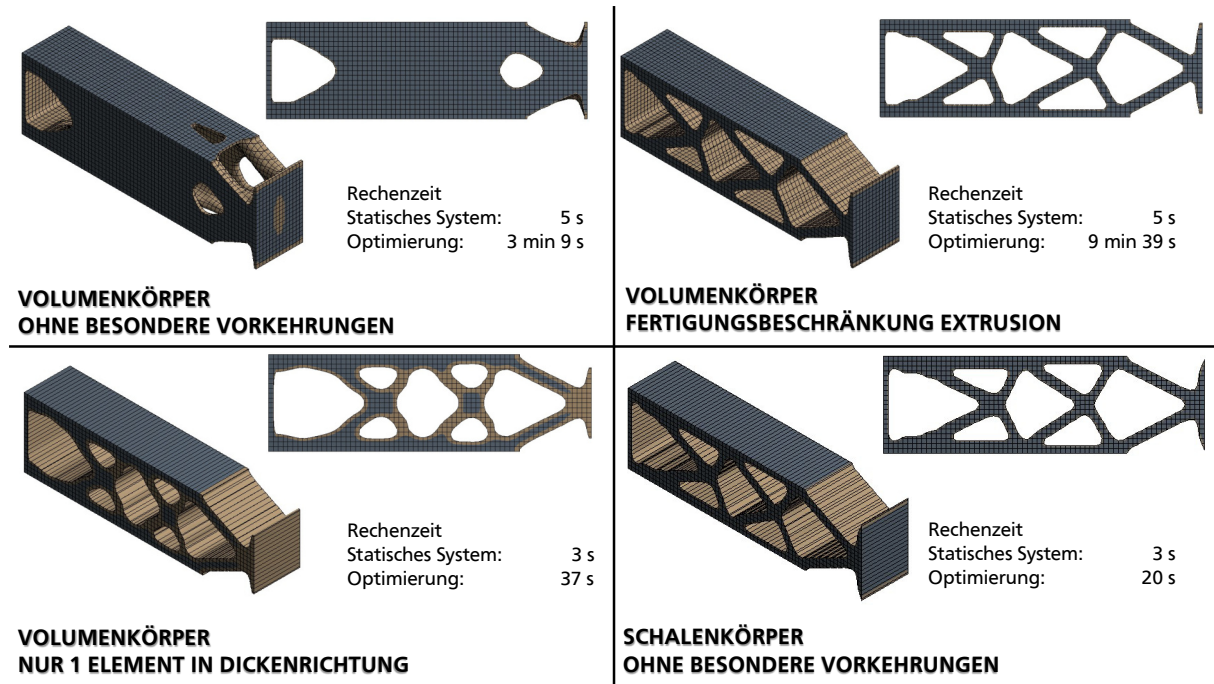
Neben den zusätzlichen Restriktionen kann das Ergebnis stark durch den gewählten Designraum beeinflusst werden. Hierbei sollte man sich der Möglichkeiten der additiven Fertigung bewusst sein. Nimmt man lediglich das Ausgangsbauteil und optimiert es, so erfährt man zwar, wo Masse nicht benötigt wird, jedoch berücksichtigt man nicht, dass man nicht mehr konventionell – „in Platten“ – denken muss. Den Vorteil, den es bringt, den Designraum über die Größe des konventionellen Bauteils zu vergrößern, wurde bereits am Beispiel einer Kopfplatte gezeigt (Erven 2018; Erven und Lange 2023). Bei Erweiterung des Designraums muss immer berücksichtigt werden, ob die Montierbarkeit des Bauteils noch gegeben ist.

Der Designraum und dessen Modellierung spielt auch in umgekehrter Richtung eine Rolle: Will man eine Struktur nicht in ihrer Dicke variieren, sondern nur eine bessere Kontur finden, dann ist es unpraktisch, einen Volumenkörper – mit mehreren Elementen über die Dicke – zu modellieren. Die Optimierung wird ein in seiner Dicke sehr ungleichmäßiges Bauteil ergeben und kann auch dazu führen, dass sich keine Änderung des Umrisses ergibt. Dieses Problem könnte man einerseits ebenfalls mit der Restriktion Extrusion umgehen – nun jedoch in Dickenrichtung – oder man modelliert den Designraum von vornherein zur Fragestellung passend. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten: Das Bauteil kann entweder als Schalenkörper modelliert werden, was zusätzlich die Berechnungszeit allgemein deutlich verkürzt. Eine andere Möglichkeit ist es, in Dickenrichtung nur ein Element vorzusehen. In Abb. 7.5 sind die vier Ansätze am Beispiel eines Kragarms vergleichend dargestellt.

Die Anzahl der Elemente ist ein weiterer wichtiger Faktor für das Ergebnis. Da die Dichte innerhalb eines Elements variiert wird, entscheidet die Elementanzahl über die Möglichkeit, mehrere Lastpfade auszubilden. Dies führt jedoch besonders bei einem vergrößerten Bauraum zu höheren Rechenzeiten. Eine Möglichkeit kann sein, bereits eine Optimierung durchzuführen und den Bauraum entsprechend des Ergebnisses zu verkleinern. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass Lösungsmöglichkeiten durch den zugeschnittenen Bauraum wegfallen.

### **Durchführung der Topologieoptimierung**

Wie zuvor erklärt, berücksichtigt die Topologieoptimierung nicht die Tragfähigkeit des zu optimierenden Bauteils, sondern gibt die Elementverteilung an, die dem Bauteil unter den gegebenen Randbedingungen die höchste Steifigkeit bringt. Daher hat es sich als sinnvoll erwiesen, Optimierungen mit verschiedenen Massenrestriktionen durchzuführen. Zusätzlich können unterschiedliche Ansätze untersucht werden. Beispielsweise können verschiedene Lagerungen, zusätzliche Restriktionen oder unterschiedliche Bauräume angesetzt werden.



**Abbildung 7.5:** Definitionen des Designraums und ihre Auswirkung am Beispiel eines Kragarms  
 (Alle Optimierung unter folgenden Randbedingungen:  
 Elementgröße: 1,5 mm - Algorithmus: OC - Massenrestriktion: 40 % - Penaltyfactor: 5 -  
 Beibehaltungswert: 0,5)

### Analyse und Bewertung der Optimierungsergebnisse

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Optimierungsläufe gilt es dann zu untersuchen. Hierzu kann die Traglast für die verschiedenen Optimierungsergebnisse ermittelt werden und diese mit der Masse verglichen werden. Ein gutes Design kann sich dann durch ein hohes Traglast-Masse-Verhältnis auszeichnen. Dies ist besonders sinnvoll, wenn in den verschiedenen Durchgängen voneinander verschiedene Strukturen entstehen. Dann kann bewertet werden, welche Geometrie am sinnvollsten ist. Häufig ergeben sich für verschiedene Massenquoten jedoch ähnliche Strukturen, dann kann das Prinzip der Lastführung nachvollzogen werden und eine Geometrie daraus abgeleitet werden. Diese Geometrie kann in ihren Abmessungen dann an die Situation angepasst werden. Die Ergebnisse sollten auch auf ihre Praktikabilität hin geprüft werden: sind alle Randbedingungen beachtet? Muss eine Anpassung vorgenommen werden, auf Grund des Prozesses oder der Montage oder wurden alle Lastfälle beachtet?

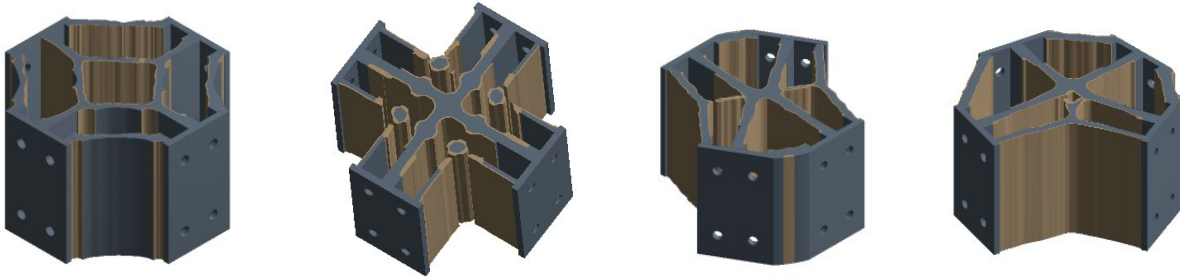
### Traglastanalyse des optimierten Bauteils

Ist ein Bauteil gefunden, das das Problem am besten löst, ist dieses in jedem Fall einer Traglastanalyse zu unterziehen - sollte dies zuvor nicht geschehen sein. Für diese Analyse sollte das im ersten Schritt erstellte nicht-lineare System genutzt werden. Möglicherweise ergibt sich hierbei noch eine Änderung der Abmessungen. Auch können nun andere Lastfälle geprüft werden, die möglicherweise in der Optimierung nicht berücksichtigt werden konnten. Sind alle Bedingungen erfüllt, ist das Bauteil gefunden.

### 7.2.3 Knoten-Optimierung für höhere geometrische Komplexitätsstufen

Die verschiedenen geometrischen Stufen erfordern unterschiedlichen Aufwand in der Optimierung, wenn der additive Fertigungsprozess möglichst einfach gehalten werden soll. Ist es im beschriebenen

Grad 1 noch sehr einfach durch Vorgabe der Extrusion schnell fertigbare Lösungen zu finden (Abb. 7.6), wird es bereits in Grad 2 nicht mehr möglich die Extrusion ohne spätere Anpassung des Modells zu verwenden. Daher werden nun verschiedene Vorgehensvarianten vorgestellt.

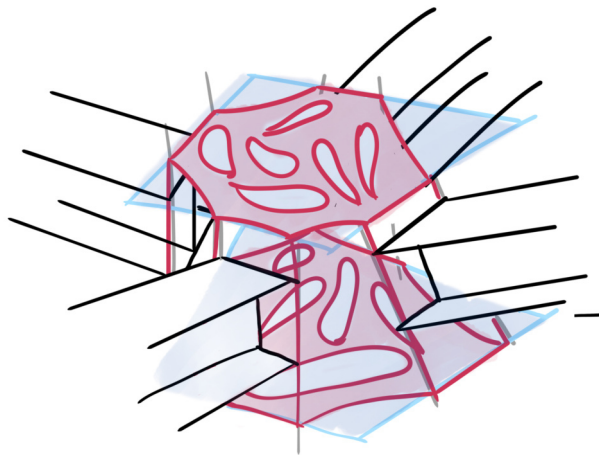


**Abbildung 7.6:** Unterschiedliche Optimierungsergebnisse für den geometrischen Komplexitätsgrad 1

### Verbinden der optimierten projizierten Flanschebenen

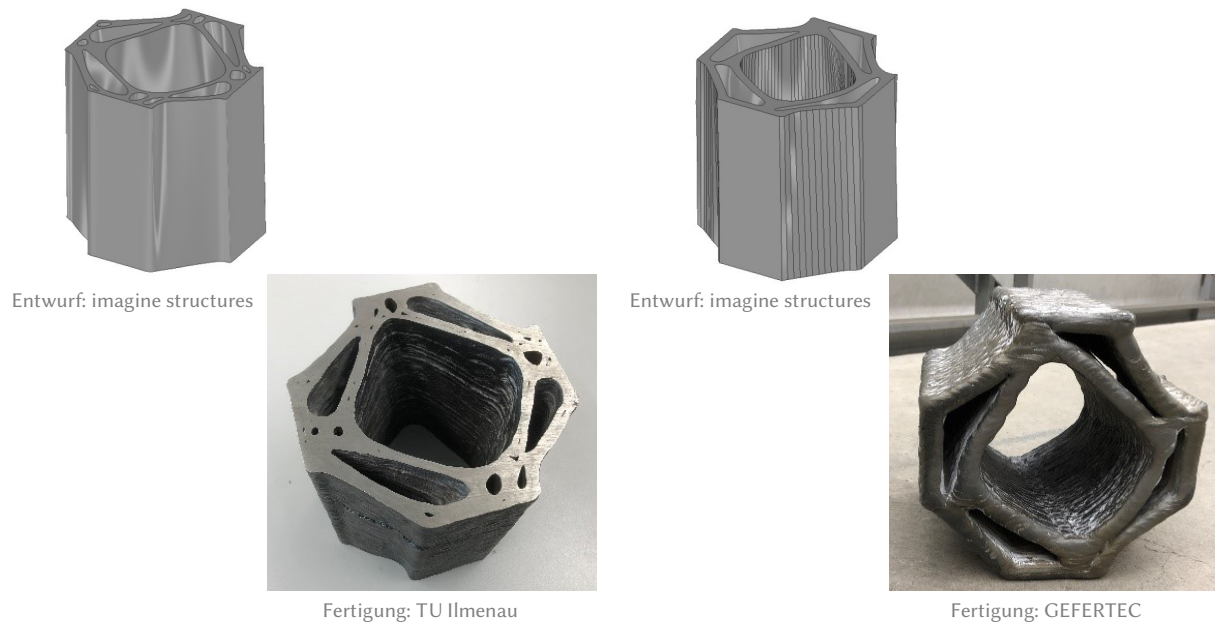
Diese Vorgehensweise wurde innerhalb des Projektes Stahlbauknoten entwickelt (Bergmann et al. 2020). Wie in Abb. 7.2 zu sehen, wird sich bei Optimierung unter vorwiegender Momentenbelastung auf einen Knoten die Masse vor allem auf der Ebene der Flansche sammeln. Hier liegt auch die größte Belastung in Form von Zug- und Druckkräften vor.

Bei leicht zueinander gedrehten und versetzten Profilen werden Ober- und Unterflansche jeweils auf eine Ebene projiziert. Die Projektionsebenen sind zueinander parallel. Die am Knoten wirkenden Schnittkräfte werden dann als Einzelkräfte auf beide Ebenen verteilt und die Ebenen werden optimiert. Der Knoten entsteht dann aus der Verbindung der beiden Ebenen. Das Vorgehen ist in Abb. 7.7 visualisiert.



**Abbildung 7.7:** Ansatz der projizierten Flanschflächen

Im Rahmen des Projektes Stahlbauknoten sind auf diese Weise zwei Knotenstrukturen entstanden. Die zweite Knotenstruktur war eine Weiterentwicklung des Vorgehens. Hier wurde bei Verbindung der beiden Oberflächen zur Vereinfachung des Fertigungsprozesses kleine Löcher geschlossen. Die beiden Knotenstrukturen sind in Abb. 7.8 zu sehen.



**Abbildung 7.8:** Entwickelte Knoten im Rahmen des Projektes Stahlbauknoten

### Nachbilden des Knotens anhand der Optimierungsergebnisse

Mit der zuvor vorgestellten Vorgehensweise entstehen eher extrudierte Körper. Diese nutzen die verwendete Masse aber nicht optimal, vor allem im Stegbereich wird viel Masse angeordnet, die nicht notwendig wäre. Daher wurde eine weitere Vorgehensweise untersucht.

Hierbei werden auch ausgehend von der unrestriktierten Optimierung die maßgebenden Bereiche, die für die Tragfähigkeit notwendig sind, ermittelt. Anhand der ermittelten Bereiche und den Randbedingungen aus der Fertigungsstrategie wird dann eine Struktur ermittelt.

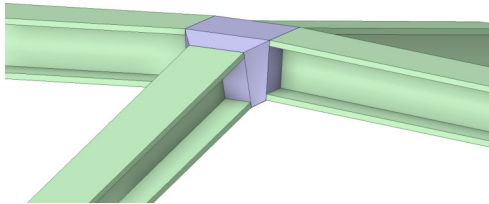
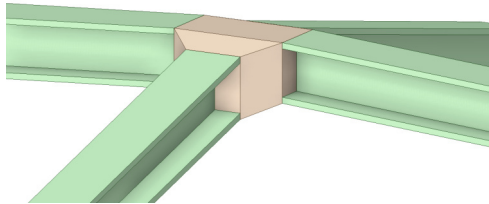
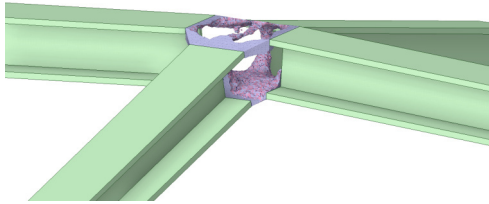
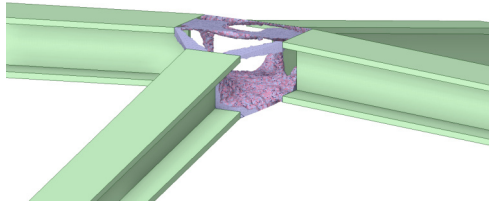
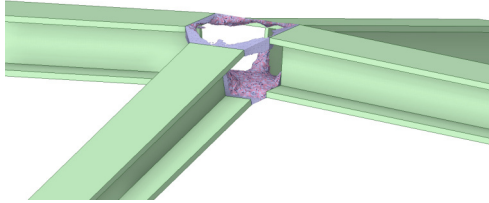
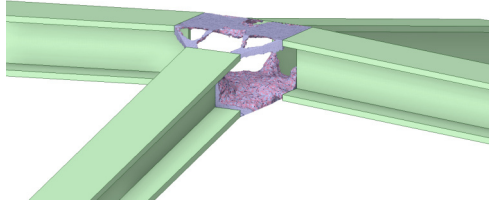
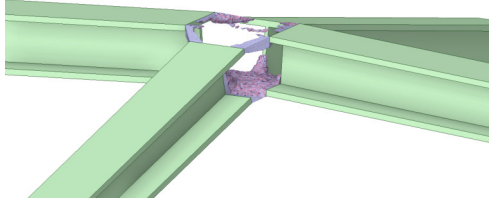
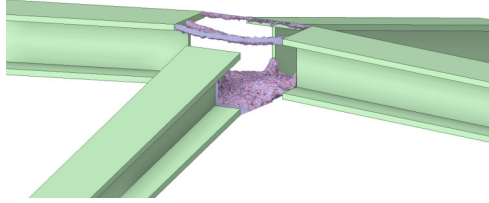
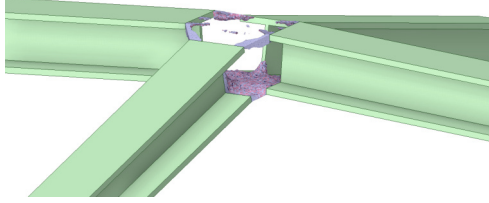
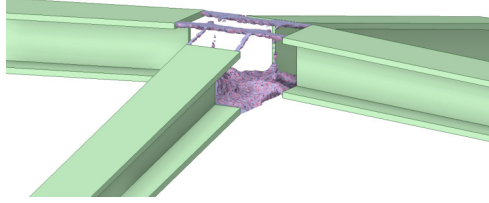
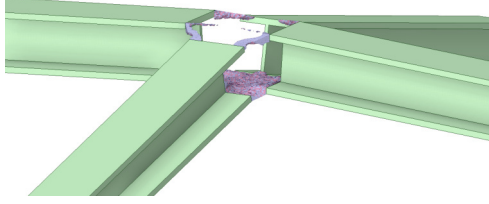
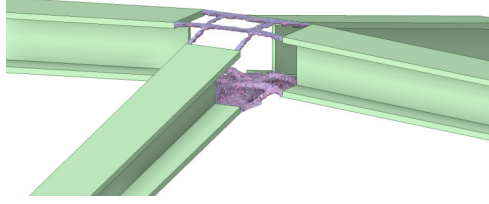
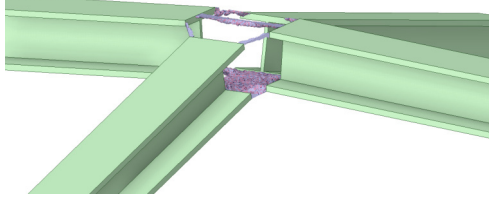
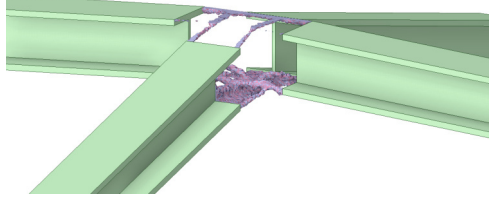
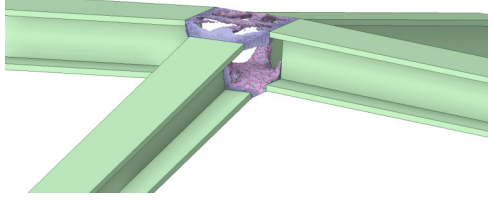
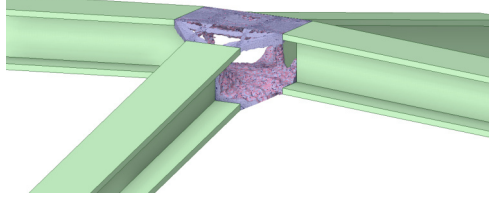
#### „Händische“ Nachbildung

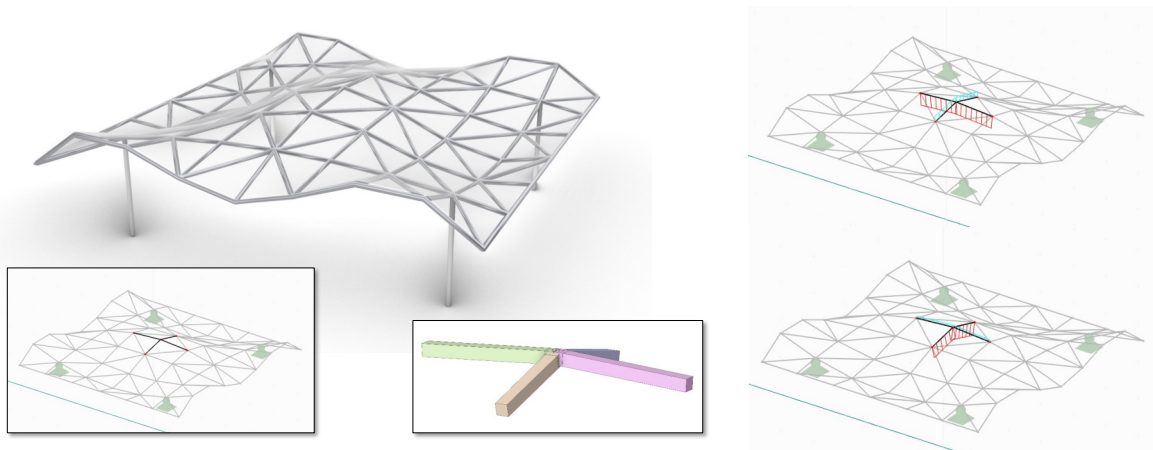
Das Vorgehen soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Um einen Ausgangspunkt zu ermitteln, also Lasten und die geometrische Situation, wurde ein frei geformtes Tragwerk entworfen. Dies kann als Unterkonstruktion dienen und soll nicht direkt als Dachtragwerk verwendet werden. Es ist in Abb. 7.9 zu sehen. Auf dieses Tragwerk wurden verschiedene mögliche Lastfälle angesetzt.

Für den mittleren Knoten sollte nun eine Geometrie gefunden werden. Hierzu wurde das Stabwerk zunächst dimensioniert. Anhand der Dimensionierung konnten die notwendigen Abmessungen des Knotens ermittelt werden. Für den gewählten Knoten wurden zwei stark unterschiedliche Lastfälle ausgewählt, die anschließend zur Optimierung angesetzt wurden.

Es wurden Optimierungen für die Fälle, dass alle Träger senkrecht zu ihrer Achse an den Knoten angeschlossen werden und dass Knoten und Träger in der globalen Vertikalen angeschlossen werden, untersucht. Die Optimierungen wurden für Massenquoten zwischen 30 % und 7 % geführt. Für beide Fälle wurden die Optimierungsergebnisse dann übereinandergelegt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 7.1.

**Tabelle 7.1:** Optimierung für verschiedenen Massenquoten

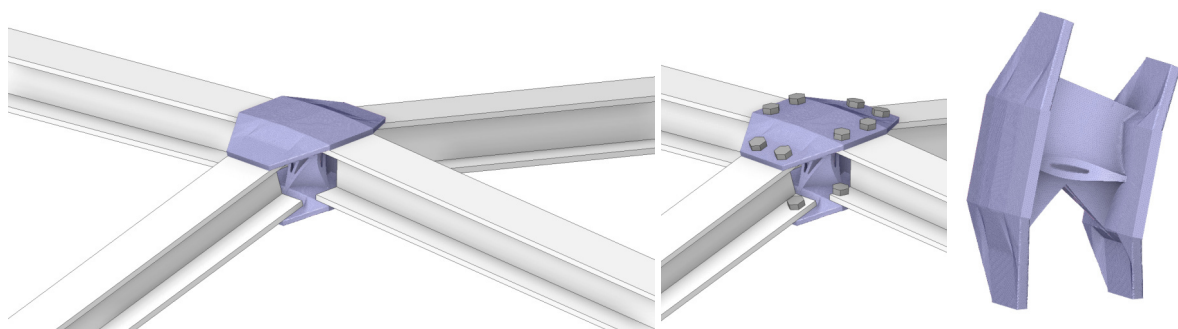
| Massenquote                            | Anschluss senkrecht zu Trägern  | Anschluss vertikal   |
|--|---|--|
| Ausgangs-<br>geometrie                 |    |    |
| 30 %                                   |    |    |
| 25 %                                   |    |    |
| 20 %                                   |   |   |
| 15 %                                   |  |  |
| 10 %                                   |  |  |
| 7 %                                    |  |  |
| Überlagerung<br>aller<br>Optimierungen |  |  |



**Abbildung 7.9:** Visualisierung des Beispieltragwerks und Auswahl des untersuchten Knotens mit den Lastfällen

In den Ergebnissen ist zu erkennen, dass besonders in Höhe der Trägerflansche Masse angeordnet wird - vor allem in Bereich des Unterflansches. Weiterhin werden im Bereich des Oberflansches gegenüberliegende Trägerflansche jeweils weitergeführt. Je nach Designraum ist jedoch eine Trägerrichtung bevorzugt. Dies fällt besonders bei Vergleich der Ergebnisse für 7 % auf. Bei senkrechtem Trägeranschluss (links in Tabelle 7.1) wird besonders die Verbindung zum nächsten Träger gesucht, während beim vertikalen Schnitt (rechts in Tabelle 7.1) eher die gegenüberliegenden Träger verbunden werden.

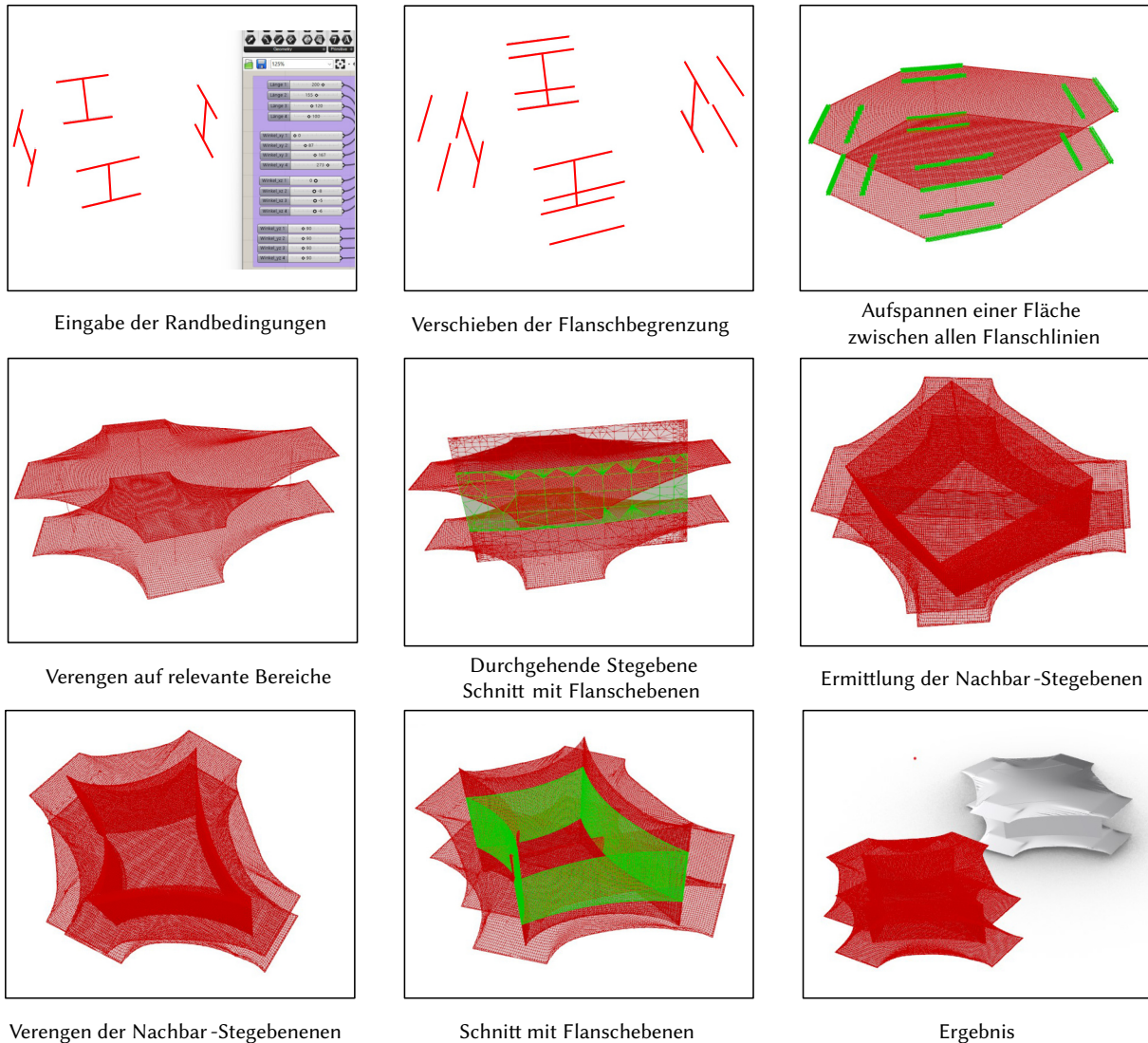
Aus diesen Ergebnissen wurde die folgende Geometrie entwickelt. Vor allem sollen die Flansche miteinander verbunden werden, zusätzlich sollte der Steg beide Bereiche miteinander verbinden. Neben der direkten Verbindung der gegenüberliegenden Flansche werden auch die „Nachbar-Träger“ verbunden. Dies ist einerseits eine Konsequenz aus den Optimierungsergebnissen, andererseits kann hierdurch der Überhang während der Fertigung minimiert werden. Die Stege werden mit Berücksichtigung des maximalen Überhangwinkels auskragend gefertigt, dies definiert unter anderem auch die Größe des Knotens. Zusätzlich sollen die Flansche in einer Art Laschenverbindung über Schrauben mit dem Knoten verbunden werden, sodass die Flanschebene des Knotens in Länge der Träger erweitert wird. Außerdem liegt die „Knotenebene“ über bzw. unter den Flanschen. Den beschriebenen Entwurf zeigt Abb. 7.10.



**Abbildung 7.10:** Entwurf in Anlehnung an das Optimierungsergebnis mit Darstellung der Schrauben und Ausrichtung zur Fertigung

### Überführung in die automatisierte Geometrieerstellung

Dieser Ansatz wurde dann so weiterentwickelt, dass für eine überwiegende Momentenbelastung keine vorherige Optimierung mehr stattfinden muss, sondern anhand der geometrischen Angaben die Geometrie parametrisiert erschaffen werden kann. Die einzelnen Bestandteile können dann noch einer Optimierung unterzogen werden, um Material zu sparen. Der Ablauf ist in der folgenden Abb. 7.11 zu sehen.



**Abbildung 7.11:** Ablauf automatisierte Geometrieerstellung

### Parametrisierung der Extrusionsergebnisse aus geometrischem Komplexitätsgrad 1

Ein letzter Ansatz, der in der vorliegenden Arbeit weiterverfolgt wurde, war es, das Ergebnis der Extrusion zu analysieren und hieraus ein parametrisiertes Modell zu erstellen, das leicht auf verschiedene Randbedingungen angepasst werden kann. Hierbei wird eine Regelmäßigkeit in der Struktur gesucht und diese in das Design übertragen. Das genaue Vorgehen am Beispiel des in der Arbeit experimentell untersuchten Knotens folgt im nächsten Abschnitt.

## 7.3 Parametrisierter Knotenentwurf auf Grundlage von Optimierungsergebnissen mit Extrusionsrestriktion

### 7.3.1 Ausgangssystem niedriger geometrischer Komplexität

In der untersuchten Situation treffen sich vier Träger in einer Ebene und in einem Winkel von je 90° in einem Knotenpunkt. Bei den Trägern handelt es sich um vier IPE 200. Der Knotenpunkt hat die Designraumgröße 320 x 320 x 200 mm<sup>3</sup>.

Die Träger werden über stahlbautypische Kopfplatten und je 4 Schrauben M16 10.9 an den Knoten angeschlossen. Innerhalb des Knotendesigns wird hierfür je Träger ein Bereich der Dicke 10 mm und der Breite 120 mm vorgesehen (Abb. 7.12 lilafarbene Bereiche). Die Schraubenlöcher werden ausgespart. Der Bereich, an denen die Scheiben der Schrauben aufliegen würden, bzw. in denen sich der Druckzylinder ausbreitet, wird im Designbereich als eigener Körper vorgesehen. Hier kann die Kraft aufgebracht werden.

Da die Schrauben später auch eingesetzt und angezogen werden müssen, wird im Designraum Platz ausgespart, in welchem später kein Material angeordnet werden darf (Abb. 7.12 blaue Bereiche). Zusätzlich werden die Eckbereiche des Designraums entfernt, da eine Anordnung von Material in diesen Bereichen nicht zu einer optimalen Lösung führen würde. Hierdurch wird einerseits Rechenzeit gespart, andererseits wird die Ausgangsmasse reduziert, sodass bei gleicher Anzahl von Elementen ein feineres Netz und somit ein schärferes Design entsteht. Die Schritte zum Erstellen des Designraums zeigt Abb. 7.12.

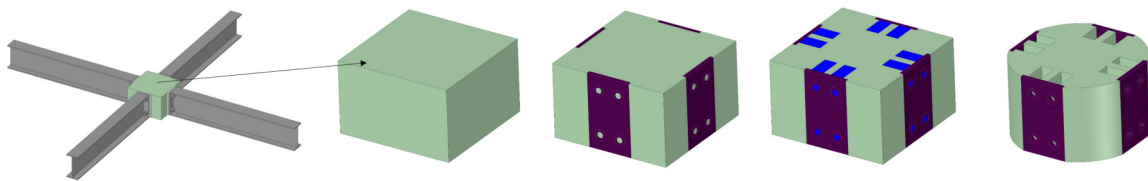


Abbildung 7.12: Erstellen des Designraums

### 7.3.2 Untersuchte Lastfälle und Optimierungsergebnisse

Es werden zwei Lastfälle untersucht:

- An allen vier Enden des Knotens greifen gleich gerichtete Momente an (symmetrischer Lastfall).
- In einer Richtung greifen positive Momente an, in der anderen Richtung negative (antimetrischer Lastfall).

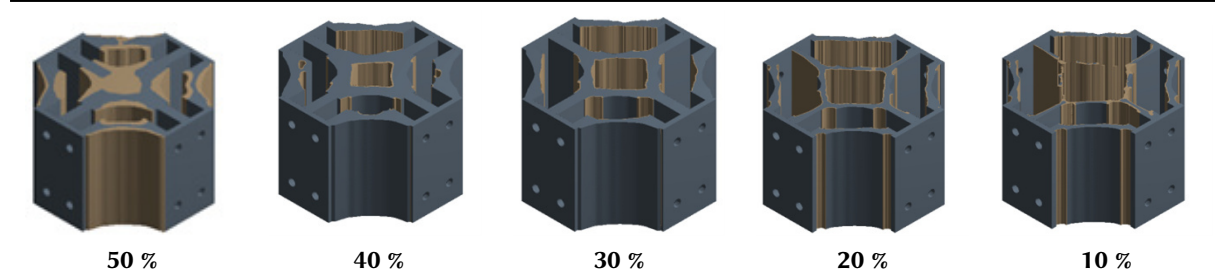
Die Lasten werden als Kräftepaare auf den Bereich der Schrauben angesetzt. Die vertikale Lagerung erfolgt als verformbare externe Verschiebung der Größe 0 mm in den Schraubenlöchern aller Stirnseiten. Zusätzlich wird in den Schraubenlöchern horizontal jeweils die zur Stabachse senkrechte Richtung mit einer verformbaren externen Verschiebung der Größe 0 mm gehalten.

Die Optimierungen werden mit einem Penalty-Faktor von 3 und Wahl des SCP-Algorithmus geführt. Die Ergebnisse der Optimierungen unter Ansatz der Restriktion Extrusion sind für die Massenquoten 50 – 10 % in Tabellen 7.2 und 7.3 zu sehen. Im Bereich 100 – 50 % war keine bedeutende Änderung der Geometrie festzustellen und ist daher nicht dargestellt – hier wird zunächst lediglich der äußere Bereich des Knotens reduziert.

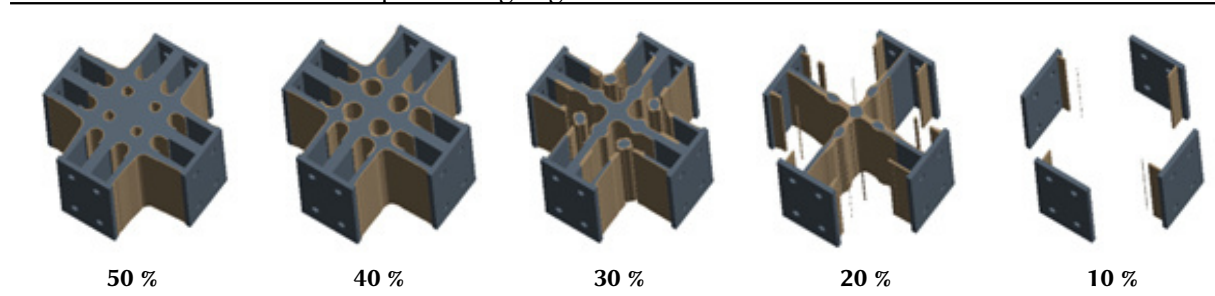


In beiden Lastfällen ist besonders der Mittelsteg, der von jeder Platte ausgeht, als elementares Bauteil zu erkennen. Dieser wird in beiden Fällen erst bei einer Massenquote von 20 % in seiner Dicke reduziert. Dahingegen unterscheidet sich die Gestaltung des Mittelpunktes, welcher im symmetrischen Fall aufgelöst ist und im antimetrischen Fall ein Punkt ist, in dem sich die Mittelstege kreuzen. Auch die äußere Verbindung der Stirnplatten zeigt einen Unterschied, hier wird entweder die Last zum Nachbar geführt oder über den ganzen Knoten hinweg zum gegenüberliegenden Träger.

**Tabelle 7.2:** Optimierungsergebnisse für den symmetrischen Lastfall

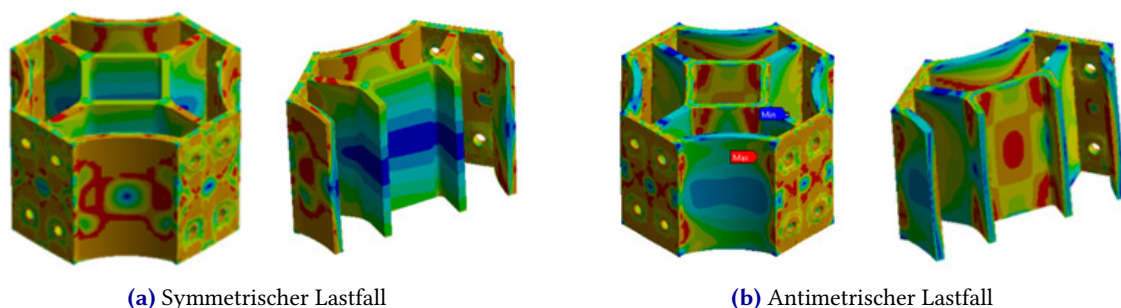


**Tabelle 7.3:** Optimierungsergebnisse für den antimetrischen Lastfall



### 7.3.3 Erste statische Beurteilung

Anhand des symmetrischen Ergebnisses für 20 % der Masse wurde ein Knotenmodell erstellt und dieses unter der Optimierungslast bewertet. Es wurden auch hier die Lasten, nun als Verschiebungen, direkt auf den Knoten gesetzt. Es wurden beide Lastfälle angesetzt. Erstaunlicherweise ergab sich für beide Lastfälle – trotz der nicht optimalen Geometrie für den antimetrischen Lastfall – die gleiche Traglast von 220 kN je Schraubenpaar.



**Abbildung 7.13:** Vergleichsspannung bei Erreichen der Traglast  
(Blau: unbelastet – Rot: Überschreitung einer Spannung von 355 N/mm<sup>2</sup>)

Die Erklärung hierfür liegt in der Extrusion und dem zusätzlichen Material, welches nun den nicht vorhergesehenen Lastfall tragen kann. Die Spannungsverteilungen bei Erreichen der Traglast sind

in Abb. 7.13 zu sehen. Während bei symmetrischer Belastung vor allem die Wände im „Außenring“ plastizieren, ist es im antimetrischen Fall andersherum und der „Innenring“ plastiziert. In beiden Fällen ist die Kopfplatte hochbelastet.

### 7.3.4 Parametrisierung

Das symmetrische Ergebnis wird nun parametrisiert, um es auch für andere geometrische Situationen verwenden zu können. Aus der Geometrieanalyse, die nach den Optimierungen stattfand, gehen von den Stirnseiten mittig Stege aus, die sich in einem zu einem Rechteck aufgelösten Punkt treffen. Die beiden Enden der Stirnseiten sind jeweils über einen leichten Bogen mit den benachbarten Strinseiten verbunden. Die parametrische Beschreibung ist in Abb. 7.14 zu sehen. Zum Vergleich ist der gedruckte Knoten des Ursprungsmodell zu sehen. Die mathematische Beschreibung ist folgend dargestellt. Hierbei wurde die Syntax des verwendeten Roboters genutzt.

#### Definition der Vorgabeparameter:

- b:** Breite der Stirnseiten  
**l10:** Abstand der Punkte  $I_m$  zum Mittelpunkt für  $z = 0$  (meistens erste Lage)  
**l20:** Abstand der Stirnseiten zum Mittelpunkt für  $z = 0$  (meistens erste Lage)  
**m1:** Steigung des inneren Rechtecks  
**m2:** Steigung der Stirnplatte  
**Winkel[i]:** Winkel des Steges[i] zur x-Achse des Koordinatensystems  
(in Abb. 7.14 und im folgenden Text mit  $\alpha$  beschrieben)

```

l1 := l10 + m1 * z
l2 := l20 + m2 * z

Im[i].X := l1 * COS(Winkel[i])
Im[i].Y := l1 * SIN(Winkel[i])
Im[i].Z := z

Am[i].X := l2 * COS(Winkel[i])
Am[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i])
Am[i].Z := z

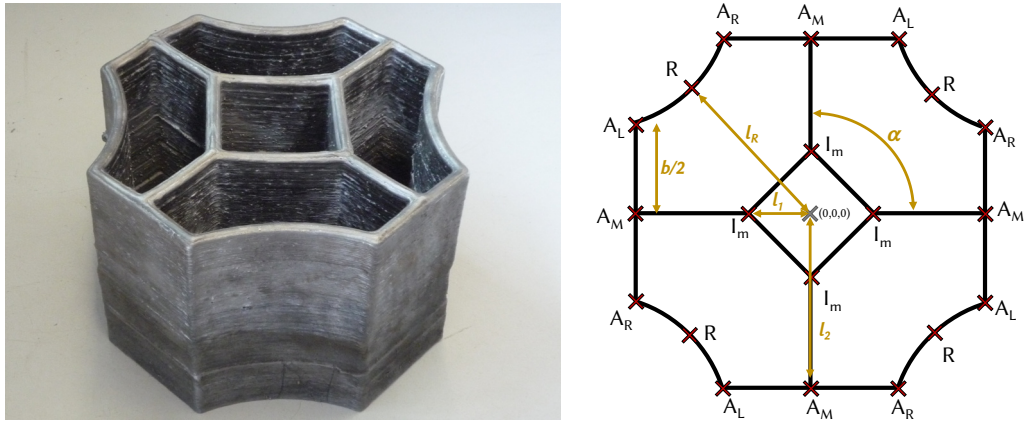
Ar[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) - b / 2 * SIN(Winkel[i])
Ar[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) + b / 2 * COS(Winkel[i])
Ar[i].Z := z

Al[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) + b / 2 * SIN(Winkel[i])
Al[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) - b / 2 * COS(Winkel[i])
Al[i].Z := z

R[i].X := 1.28 * l2 * COS((Winkel[i + 1] - Winkel[i]) / 2)
           * COS((Winkel[i] + Winkel[i + 1]) / 2)
R[i].Y := 1.28 * l2 * COS((Winkel[i + 1] - Winkel[i]) / 2)
           * SIN((Winkel[i] + Winkel[i + 1]) / 2)
R[i].Z := z

```

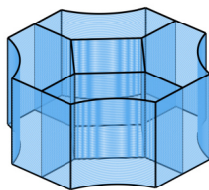
Das Ursprungsmodell ist für vier Träger, die sich in einer Ebene rechtwinklig zueinander treffen, optimiert. Das parametrisierte Modell wird durch Einführen der Winkel  $\alpha_i$ , die den Winkel der Träger zur x-Achse definieren, erweitert – wird  $\alpha_1 = 0^\circ$  gesetzt, geben die Winkel direkt den Schnittwinkel der anderen Träger zum Träger 1 an. Durch die Abhängigkeit der Stirnseiteneckpunkte  $A_R$  und  $A_L$  vom Winkel  $\alpha_i$  stehen die Stirnseite immer senkrecht auf den Stegen. Weiterhin wird es durch Einbringen der Parameter  $m_1$  und  $m_2$  bei Berechnung der Längen  $l_1$  und  $l_2$  ermöglicht, dass die Stirnseiten mit



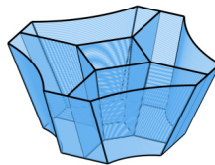
**Abbildung 7.14:** Parametrisierung des Knotens

Überhang ausgeführt werden. Die Träger treffen dann nicht mehr in einer Ebene, sondern in vier Ebenen aufeinander.

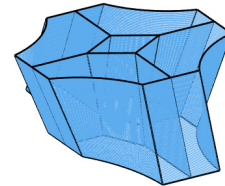
In Abb. 7.14 und in der vorgestellten mathematischen Beschreibung sind alle Seiten gleich breit und besitzen den gleichen Abstand zum Mittelpunkt. Das Modell kann jedoch sehr leicht verallgemeinert und jeder Stirnseite eine andere Breite  $b_i$  sowie ein eigener Abstand  $l_{20,i}$  gegeben werden. Dies zeigt Abb. 7.15, in der verschiedene durch die Parametrisierung mögliche Geometrien gezeigt werden.



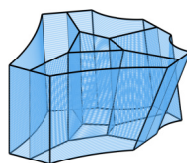
**(a)** Ursprungsmodell



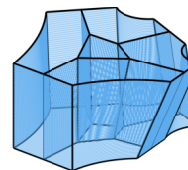
**(b)** Einbringen der gleichen Steigung  $m$  für alle Stirnseiten



**(c)** Gegensätzlich Steigung für die kreuzenden Trägerachsen



**(d)** Andere Steigung  $m$  und Winkel  $\alpha$  für alle Träger



**(e)** Zusätzlich unterschiedliche Stirnseitenbreiten  $b$  für alle Träger

**Abbildung 7.15:** Weitere parametrisierte Knotenstrukturen

Das parametrisierte Modell kann einfach in ein FE-Modell überführt werden. Zur schnelleren Berechnung wird hierzu ein Schalenmodell empfohlen. Modelliert werden sollten hierbei neben dem Knoten selbst auch die vier anschließenden Träger. Mit Hilfe dieses FE-Modells kann dann die Tragfähigkeit für eine bestimmte Situation ermittelt werden bzw. der Knoten entsprechend den Anforderungen dimensioniert werden.



---

# 8 UNTERSUCHUNGEN ZUR TRAGFÄHIGKEIT GEDRUCKTER WAAM-KNOTEN

Um zu zeigen, dass durch die bestimmten Materialeigenschaften, das Tragverhalten eines additiv gefertigten Knotens vorhergesagt werden kann, wurde ein Knoten gedruckt. Dieser wurde dann auf seine Traglast getestet und diese mit Ergebnissen der FE-Berechnung verglichen. Das folgende Kapitel stellt die Untersuchung vor.

## 8.1 Versuchsplanung

### 8.1.1 Randbedingungen

Um einen Knoten sinnvoll testen zu können, sollten einige Aspekte im Vorhinein berücksichtigt werden. Da die Tragfähigkeit des Knotens getestet werden soll, sollten die anschließenden Bauteile die Traglast des Knotens ohne Schädigung übertragen können. Sonst wäre die Traglast des getesteten Objekts beeinflusst durch einen Körper, der nicht getestet werden sollte. Um zusätzlich die Tragfähigkeit nicht zu beeinflussen, wurden die Träger entgegen der vorgesehenen Anwendung nicht angeschraubt, sondern direkt an den Knoten geschweißt. Schrauben würden durch Lochspiel und Streuung in ihren Materialeigenschaften zusätzliche Ungenauigkeiten in die Traglastermittlung einbringen. Außerdem zeigte sich in den Untersuchungen zu den Schrauben vor allem für die Zugverbindungen die Oberflächenwelligkeit als problematisch. Durch die Schweißung können zwar zusätzliche Eigenspannungen und Verzug eingebracht werden, die negativen Effekte wurden allerdings durch die Verwendung eines energiearmen Prozesses sowie die Schweißreihenfolge möglichst gering gehalten.

Auf Grund der Platzverhältnisse in der Versuchshalle und damit kein Umbau notwendig ist, sollte das Gesamtkonstrukt aus Träger und Knoten nicht viel Platz einnehmen. Vor allem sollte es nicht zu breit sein. Hiermit einhergehend sollte der Knoten selbst nicht zu viel Platz benötigen. Ein platzsparender Knoten hat zusätzlich den Vorteil, dass die Schweißzeit kürzer ist.

Da der Knoten auf seine Momententragfähigkeit getestet werden soll, für die die Optimierung ursprünglich ausgelegt war, sollten die Träger verschieblich gelagert sein. Wenn alle Träger verschieblich sind, wird ein anderer Festpunkt benötigt, der eine mögliche horizontale Verschiebung behindert. Hierzu wird in der Mitte des Aufbaus ein Stahlprofil mit Rechteck-Querschnitt vorgesehen, das im Boden verankert ist.

### 8.1.2 Festlegungen

Unter den getroffenen Randbedingungen ergeben sich die folgenden geometrischen Gegebenheiten: Als Träger werden HEA 140 gewählt. Die vier Träger werden jeweils mit einer Länge von 2 m ausgeführt. Sie treffen sich im Knoten in der Draufsicht in zwei Achsen, sodass jeweils zwei Träger einander direkt

gegenüber liegen. Für den platzsparenden Versuchsaufbau schneiden sich die Achsen nicht in einem Winkel von 90°, sondern in einem Winkel von 65°. Dies stellt einen Kompromiss aus kleiner Größe des Knotens für eine schnelle Druckzeit und geringer Breite des Gesamtaufbaus.

Um die freie Formgestaltung durch das WAAM zu zeigen und wie geometrisch komplexe Situationen damit leicht umgesetzt werden können, werden die Träger mit einer Steigung von 30 %, also einem Winkel von 17° zur Horizontalen angeschlossen. Der Knoten muss an den Stirnseiten einen Überhang von 17° zur Vertikalen vorweisen.

Mit dem WAAM wäre es auch einfach, für jede Stirnseite einen anderen Winkel vorzusehen (vgl. Abb. 7.15), allerdings würde das im Versuch zu unterschiedlichen Auflagerhöhen, unterschiedlichen Lasteinleitungshöhen, unterschiedlichen Trägerlängen und zu einem nicht eindeutigen Lastzustand im Knoten führen. Hier ergäben sich durch den Versuchsaufbau viele Unsicherheiten, unabhängig vom untersuchten Tragverhalten des Knotens. Durch einen doppelsymmetrischen Aufbau und einen dementsprechenden doppelsymmetrischen Knoten ist es möglich, bereits durch ein unsymmetrisches Versagensbild des Knotens problematische Stellen zu identifizieren. Weiterhin ist die Umsetzung des Versuchs, hinsichtlich Lasteinleitung und Lagerung, einfacher.

## 8.2 Ermittlung und Fertigung des Prüfbauteils

### 8.2.1 Knotenentwurf/druck

Unter dem vorgegeben Winkel von 65° und der durch die Träger vorgegebenen Stirnseitenbreite von 140 mm lässt sich der kleinstmögliche Querschnitt des Knotens ermitteln. Dies ist genau die Länge für  $l_2$  nach Abb. 7.14, die notwendig ist, dass sich zwei Stirnseiten in ihrem Eckpunkt treffen. Für gleiche Stirnseitenbreiten  $b$ , ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$l_{\text{grenz}} = \frac{b}{2} \cdot \sqrt{\frac{1 + \cos(\alpha)}{1 - \cos(\alpha)}}$$

Für die vorgegebenen geometrischen Verhältnisse beträgt  $l_{\text{grenz}}$  109,87 mm. Dieser Wert ergibt sich für eine Linie, die Naht hat allerdings eine Breite. Der Knoten wurde daher mit einem  $l_2$  von 115 mm in seiner Anfangslage gedruckt.  $l_1$  wurde zu 37,5 mm gewählt, ungefähr 1/3 von  $l_2$ . Der Winkel der Stirnseiten zur Vertikalen wird durch ein  $m$  von 0,3 realisiert. Es ergibt sich die in Abb. 8.1 dargestellte Knotengeometrie. Um eine im Vergleich zu den angeschlossenen Trägern geringere Tragfähigkeit zu gewährleisten, wird der Knoten mit einer Bahn je Schweißlage und somit mit einer Dicke von ca. 5,5 mm ausgeführt.

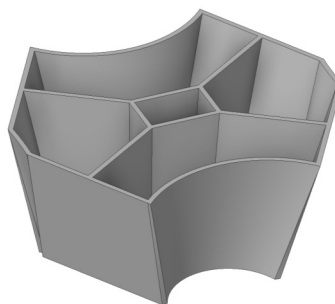


Abbildung 8.1: Knotengeometrie

### 8.2.2 Slicingstrategie

Unter Einbezug der Erkenntnisse aus Materialuntersuchung und bestehender Forschung wurde für den Knoten die folgende Slicingstrategie entwickelt. Wichtige Aspekte hierbei waren das „abwechselnde“ Aufbauen – möglichst kein Streckenabschnitt sollte in der darauffolgenden Lage in der gleichen Richtung überschweißt werden. Weiterhin wurden die Start- und Stopppunkte reduziert, indem möglichst viele durchgängige Nähte vorgesehen wurden. Die Start- und Stopppunkte wurden in den aufeinanderfolgenden Lagen an unterschiedlichen Stellen positioniert. Die Energieeinbringung war hierdurch gleichmäßig verteilt. Es wurde keine Einzelbauteilfertigung vorgesehen, sondern die zusammenhängenden Abschnitte lagenweise unterschieden. Unter diesen Voraussetzungen wurden 12 verschiedene Bahnführungen entwickelt, die aufeinander folgen. Die Reihenfolge ist in Abb. 8.2 zu sehen.

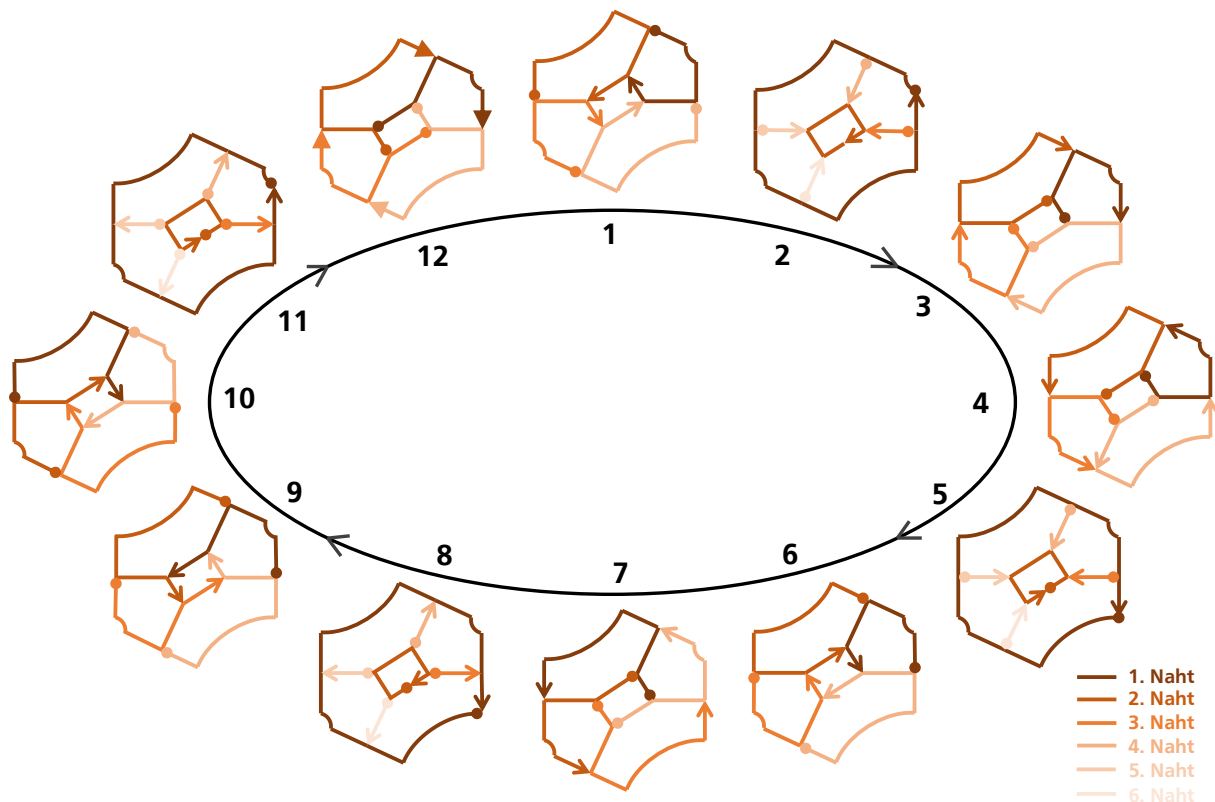


Abbildung 8.2: Slicingsstrategie

Bei der realen Ausführung ist den Kreuzungspunkten besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Wenn sich zwei Bahnen im gleichen Punkt treffen, dann ergibt sich schnell eine Überhöhung (vgl. Abschnitt 3.1.3). Außerdem wird dadurch in eine Stelle zusätzliche Energie eingebracht (vgl. Abschnitt 5.4.2). Sowohl die Überhöhung als auch eine punktuelle Energieerhöhung sollten vermieden werden, um einen sicheren Druckprozess und damit einhergehend ein sicheres Tragverhalten zu gewährleisten. Zusätzlich sollten nicht alle zusammenlaufenden Bahnen in dem Punkt enden, da dies den negativen Einfluss der Nahtendstelle potenzieren würde.

Da sich im untersuchten Knoten immer maximal drei Nähte in einer Kreuzungsstelle treffen, wurde in der Slicingsstrategie vorgesehen, dass immer zwei Abschnitte eine durchgehende Naht bilden und die dritte Naht dort anschließt. Jede Bahnführung wurde außerdem einmal in umgekehrter Richtung geschweißt, sodass die dritte Naht im Kreuzungspunkt sowohl einmal ihren Startpunkt als auch einmal ihren Endpunkt hat. Um, wie beschrieben, keine Einzelbauteilfertigung zu provozieren, wurden über die Lagen die Abschnitte, die die durchgehende Naht bilden, variiert.

In Abb. 8.2 ist zu sehen, dass in 8 Fällen 4 Nähte in einer Lage vorgesehen sind. Dies ist – bei Ausführung von lediglich einer Naht in einer Bahn – die minimal mögliche Anzahl an Schweißnähten für eine solche Geometrie. Zusätzlich sind in 4 Lagen je 6 Nähte vorgesehen. Dies war notwendig, damit im mittleren Kreuzungspunkt der Stirnseite auch die Stirnseite selbst durchgehend ist. In diesen Lagen werden das innere Rechteck und die Umrandung jeweils als eine Naht ausgeführt. Die Stege werden als vier Einzelnähte ausgeführt.

Trotz der bereits aufgeführten Berücksichtigung der Kreuzungsstellen in der Slicingstrategie, würde sich weiterhin eine Überhöhung ergeben, da alle Bahnen denselben Punkt ansteuern. Daher wurden für jede Kreuzungsstelle und jeden Abschnitt weitere Punkte in einem Abstand  $d$  zum Mittelpunkt der Kreuzungsstelle eingeführt. Dieser Abstand ergab sich in einer Voruntersuchung von Grebner (2022) als der Abstand, der für einen  $90^\circ$  Stoß genau so viel Material einbringt, dass die Nähte vollständig miteinander verbunden sind, jedoch nicht zu einer Überhöhung führt. Der Abstand wurde in Anlehnung an den Abstand  $d$  gewählt, der benötigt wird, damit parallele zwei Bahnen eine homogene nicht überhöhte Wand ergeben. Da das Material an einer Kreuzungsstelle jedoch nicht nur in eine, sondern in zwei Richtungen ausweichen kann, werden hier nur  $15/16$  des Abstands  $d$  benötigt.

Für die Erstellung des RoboterCodes werden demnach zusätzlich zu den in Kapitel 7 gezeigten Punkten noch weitere Punkte benötigt, sodass sich die in Abb. 8.3 gegebenen Punkte und Pfade ergeben. Die Abstände der gelben Punkte um die Kreuzungsstellen (rot) sind unmaßstäblich, da sich sonst beide Kreuze nahezu in einem Punkt treffen würden. Die Indizes stehen für Vorne, Hinten, Mitte, Rechts und Links von einem Punkt, wenn die Blickrichtung von der jeweiligen Stirnseite aus in die Mitte des Knotens gerichtet ist.

Beispielhaft sieht man die Führung der Schweißbahnen für jede 1. Lage eines Turnus rechts in Abb. 8.4: Die Schweißnaht beginnt jeweils neben dem Mittelpunkt der Stirnplatte am Punkt  $A_{ML}[i]$  (Außen - Mitte - Links), führt dann über die Eckpunkte  $A_R[i]$  (Außen - Rechts) und den Punkt  $R$  (Rundung) der Außenrundung, um in den Punkten  $A_M$  (Außen - Mitte) und  $I_M$  (Innen - Mitte) jeweils abzuknicken und dann im Punkt  $I_L$  (Innen - Links) zu enden.

Der Code für den gesamten Knoten und die einzelnen Lagen im Detail können Anhang D.1 entnommen werden. Der Code ist parametrisiert und kann so jede mögliche doppelsymmetrische Knotenstruktur dieser Art herstellen. Der Code wurde zunächst durch die Herstellung von kleineren Knotenstrukturen getestet. Diese sind in Abb. 8.5 zu sehen.

Verwendet man die Herangehensweise zur Energiebetrachtung, die für die Kreuzungsstellen in Kapitel 5 vorgestellt wurde, so erkennt man eine recht gleichmäßige Verteilung mit sehr niedrigen Werten. Daher kann angenommen werden, dass sich das Material des Knoten an allen Stellen homogen verhält.

### 8.2.3 Druck des Knotens

Der Knoten wurde mit der vorgestellten Slicingsstrategie gefertigt, zwischen jeder Lage wurde eine Kühlung von 1 Minute mit Druckluft und einem Sprühnebel aus destilliertem Wasser vorgesehen. Gewählt wurden die bereits vorgestellten und untersuchten Schweißparameter aus Tabelle 4.6. Während der Fertigung sind keine Besonderheiten aufgetreten.



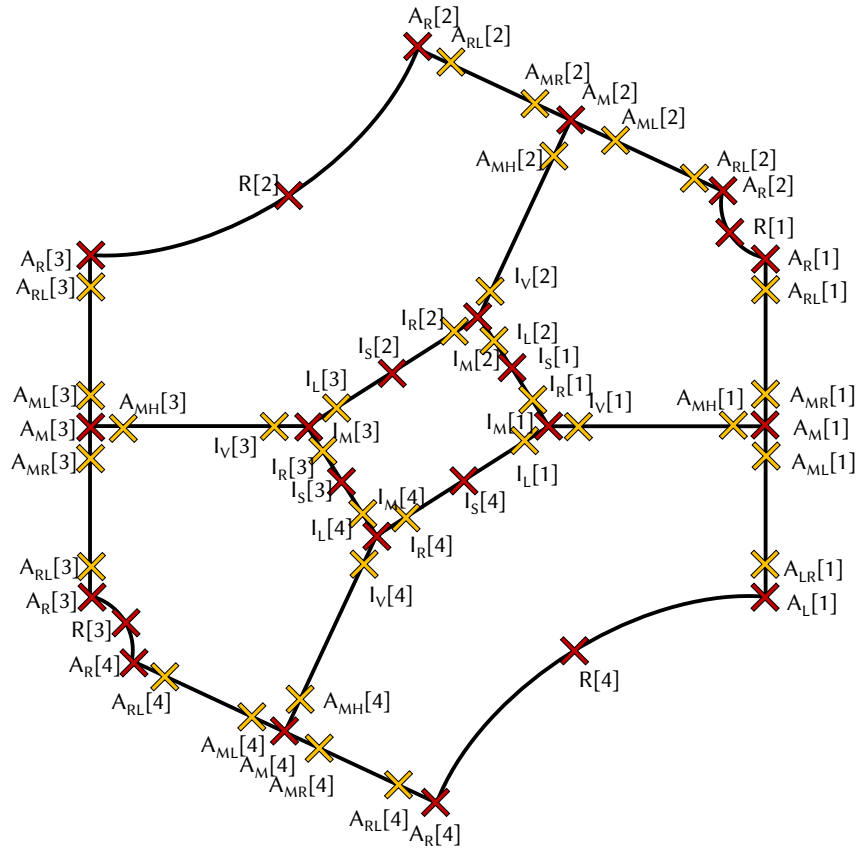


Abbildung 8.3: Punkte für die Roboterprogrammierung

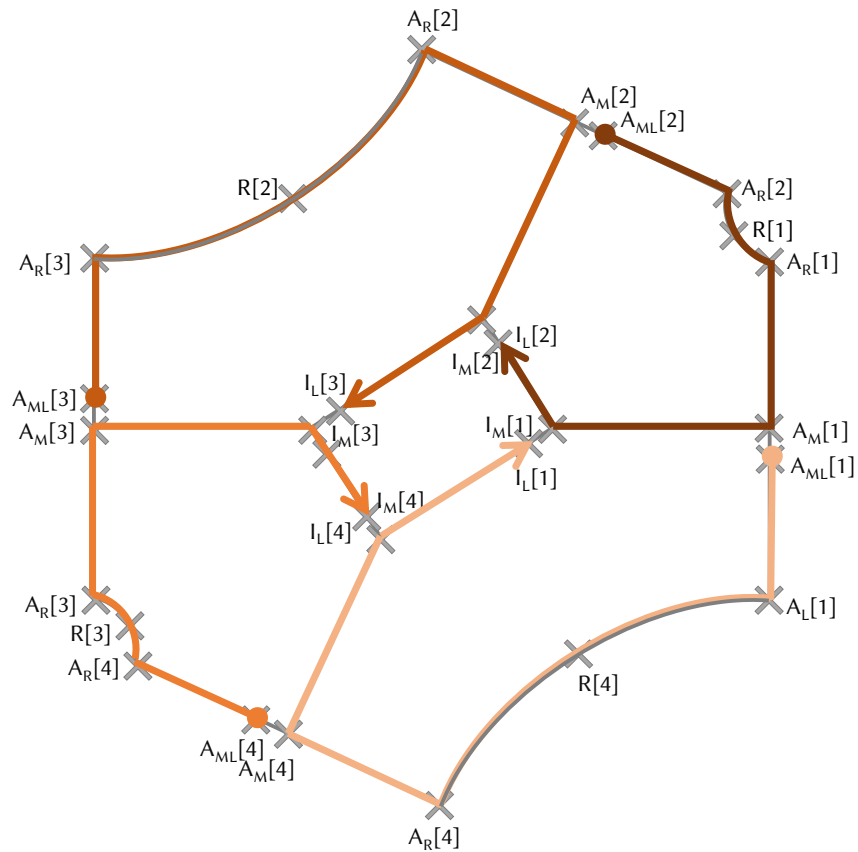
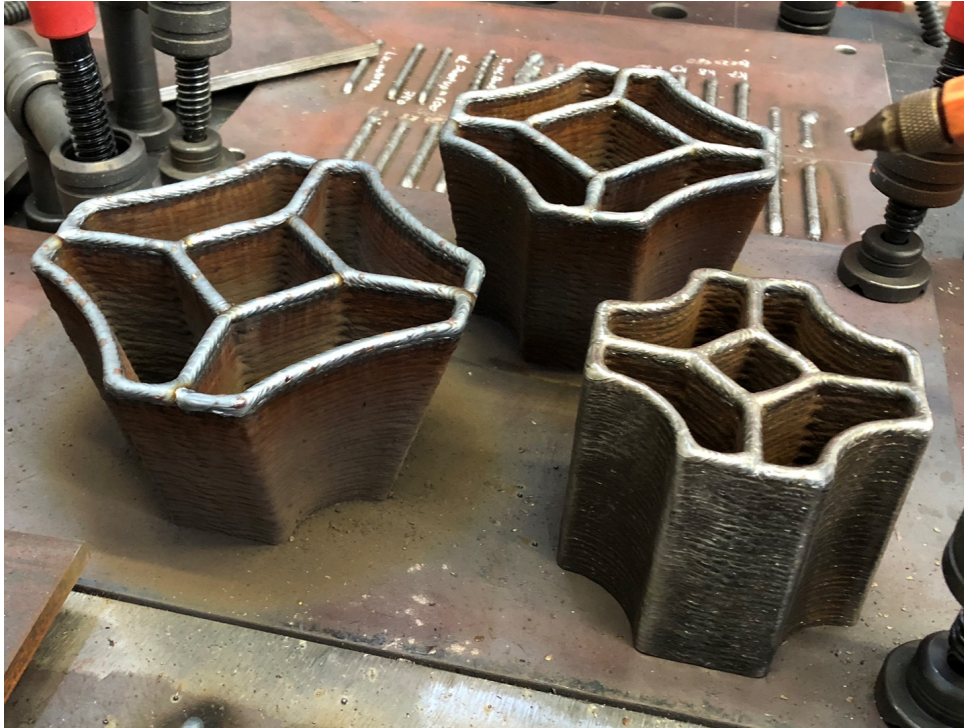
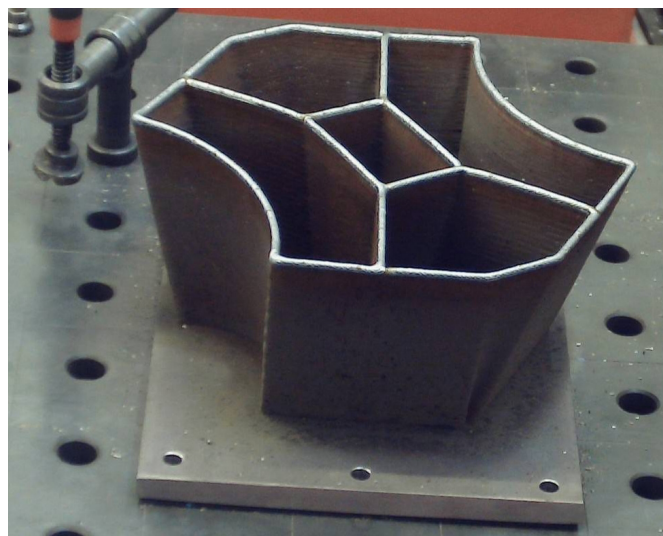


Abbildung 8.4: beispielhafte Bahnplanung Lage 1



**Abbildung 8.5:** Testknoten

Die Fertigungszeit betrug insgesamt 11 Stunden, die reine Druckzeit 6,8 Stunden. Gefertigt wurden 126 Lagen. Der Knoten hatte am Ende eine Höhe von 150 mm. Da der Knoten nach der Fertigung noch von der Substratplatte gelöst werden musste, wurde er etwas höher gefertigt als für den Anschluss an die Träger eigentlich notwendig gewesen wäre - um den Anschluss auch bei großzügigem Verschnitt gewährleisten zu können.



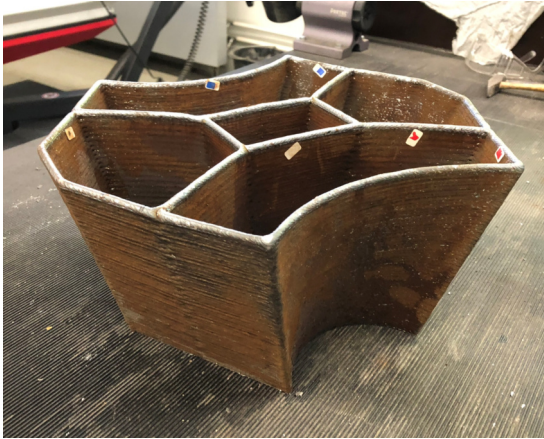
**Abbildung 8.6:** Knoten nach Druck

Während der Fertigung wurde von jeder Lage ein Foto aufgenommen, um mögliche Fehlstellen direkt detektieren zu können bzw. ein besonderes Verhalten im Nachhinein zuordnen zu können. Die Aufnahmen sind in Anhang D.2 zu sehen. Außerdem wurde jede Schweißung mithilfe des HKS Weldscanners aufgezeichnet.

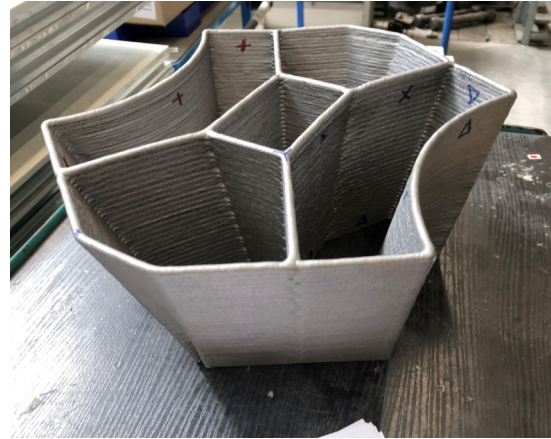
## 8.3 Versuchsdurchführung

### 8.3.1 Vorbereitung

Nach dem Druck des Knotens wurde dieser durch Sägen von der Substratplatte getrennt und anschließend sandgestrahlt. Die Träger wurden für die Schweißung angefast, um eine vollständige Verbindung durch die Schweißnaht sicherzustellen. Nach Positionierung und Heftung der Träger, wurden die Schweißnähte abschnittsweise mit möglichst großem Abstand und langen Pausen zueinander geschweißt. Für den Versuch wurden gewinkelte Stahlplatten an die Enden der Träger geschweißt, sodass die Träger eine horizontale Auflagerfläche hatten. Für die Lasteinleitung wurden Profile der Größe U60 im Abstand von 20 cm zum Knoten an die Oberflansche der Träger geschweißt. Die verschiedenen Arbeitsschritte sind in Abb. 8.7 zu sehen.



(a) Knoten nach Sägen



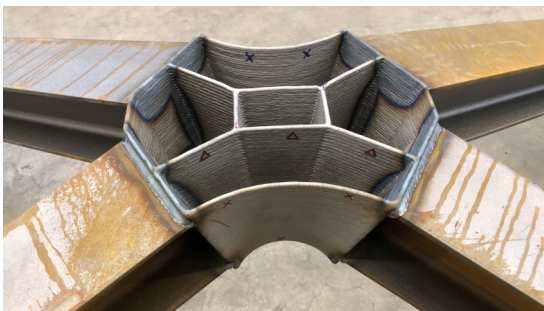
(b) Knoten nach Strahlen



(c) Ausrichten der Träger



(d) Ausgerichtete und geheftete Träger



(e) Angeschweißte Träger

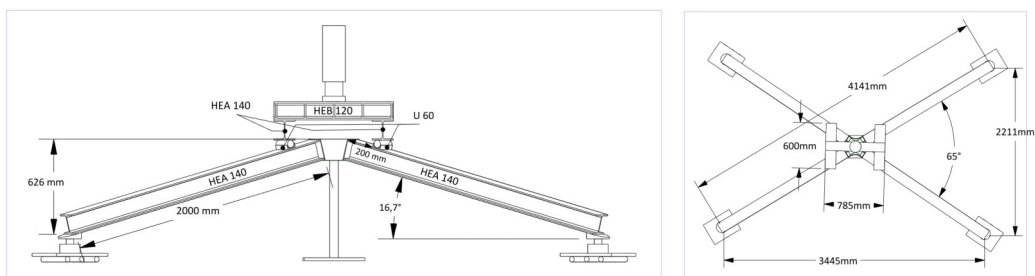


(f) Angebrachte U-Profile und Auflagerflächen

**Abbildung 8.7:** Arbeitsschritte Versuchsvorbereitung

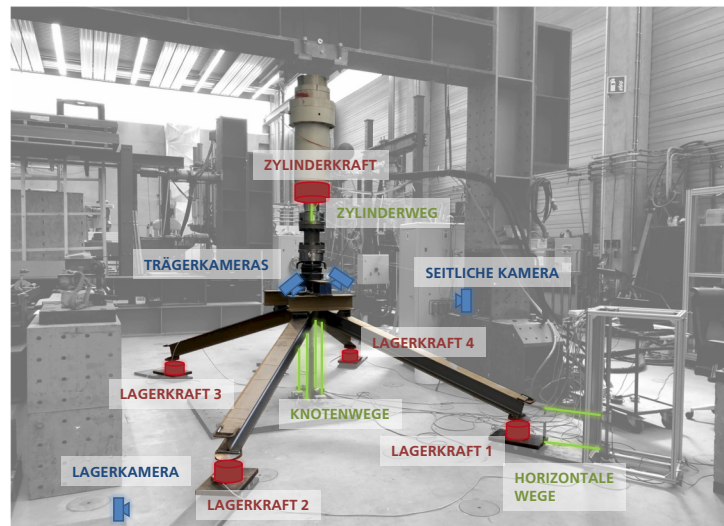
### 8.3.2 Versuchsaufbau

Der endgültige Versuchsstand und seine Maße sind in Abb. 8.8 zu sehen. Die Lasteinleitung auf alle vier Träger erfolgte durch einen Hydraulikzylinder, welcher auf einen Träger drückte, der wiederum auf zwei Trägern auflag, die über in den U-Profilen gelagerten Rundstahl die vier Träger belasteten. Um die gleichmäßige Lasteinleitung zu überprüfen, wurde die Auflagerlast an allen vier Trägerenden jeweils mit einer Kraftmessdose gemessen. Diese Kraftmessdosen befanden sich auf Stahlplatten, die durch das Auflagern auf Rundstahl in horizontaler Richtung verschieblich waren.



**Abbildung 8.8:** Versuchsstand

Gemessen wurden die Zylinderkraft und die vier Auflagerkräfte. Außerdem wurde über vier Seilzugwegaufnehmer die vertikale Verschiebung der Träger am Knoten ermittelt. Mit Hilfe von zwei Laserwegaufnehmern wurde die horizontale Verschiebung von Oberflansch des Trägers und der Stahlplatte unter der Kraftmessdose am Lager 1 gemessen. Weiterhin wurden der Knoten von oben, ein Lager und der gesamte Versuchsstand von der Längsseite aus während des Versuchs gefilmt. Die Anordnung des Messsystems ist in Abb. 8.9 markiert.

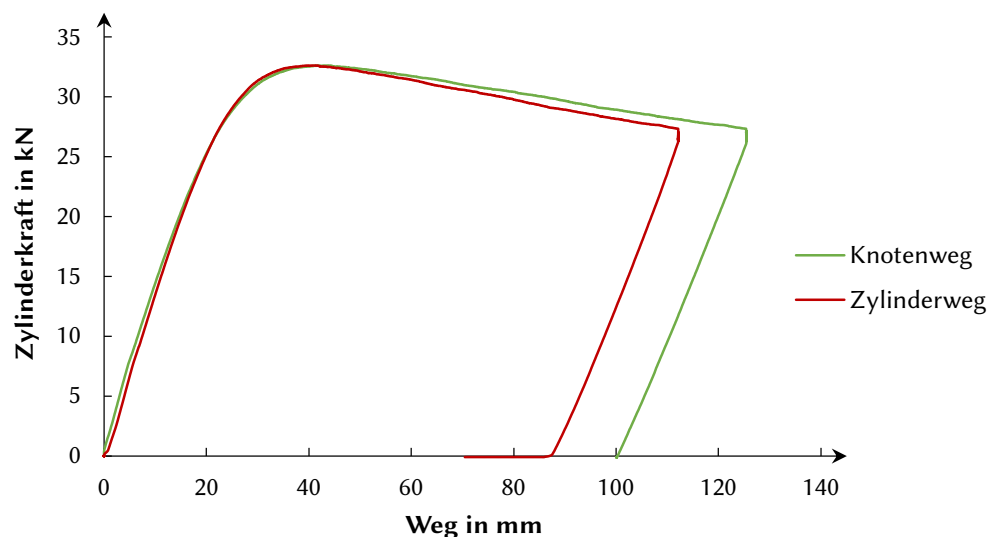


**Abbildung 8.9:** Anordnung des Messsystems im Versuchsstand

### 8.3.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min weggesteuert gefahren. Nach ca. 100 mm Zylinderweg wurde der Versuch gestoppt und der Knoten mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/min entlastet. Der Versuch lief ohne Auffälligkeiten ab. Der Lastabfall fiel mit einer großen Verformung des Knotens zusammen. Es kam an keiner Stelle zu einem plötzlichen lokalen Versagen. In Tabellen 8.1 und 8.2 sind die Kameraaufnahmen der Last-Verformungs-Kurve Abständen von 2 Minuten gegenübergestellt.

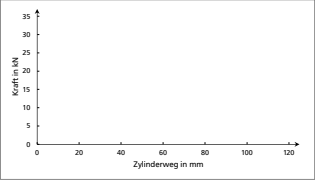
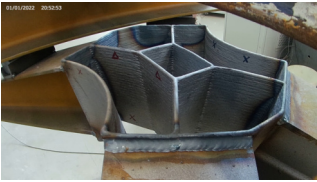
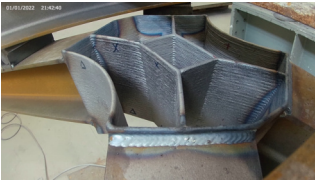
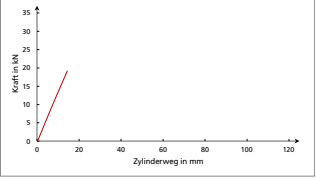
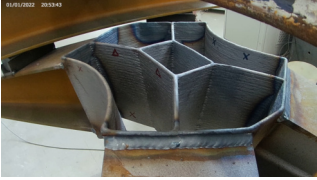
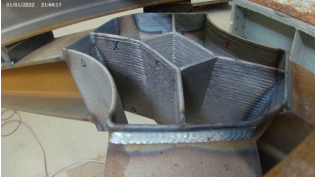
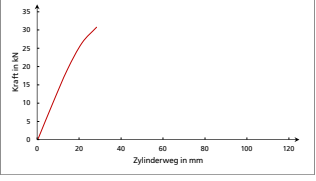
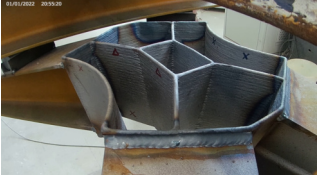
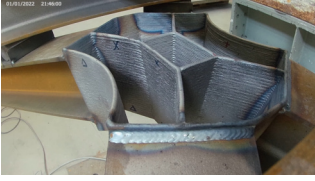
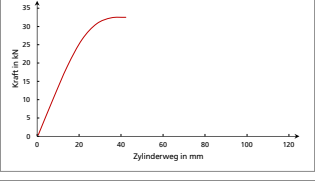

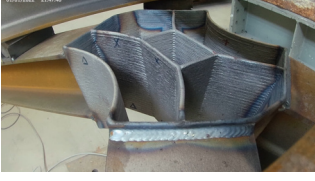
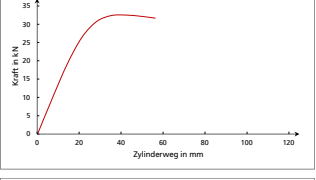

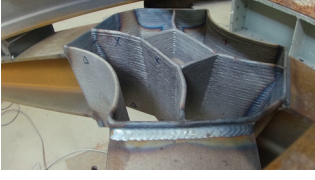
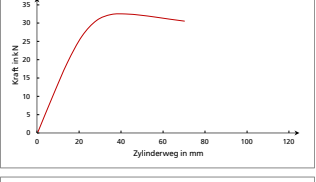


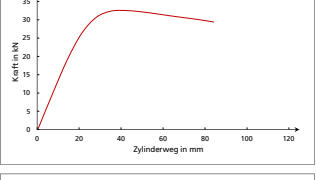


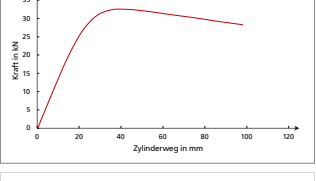
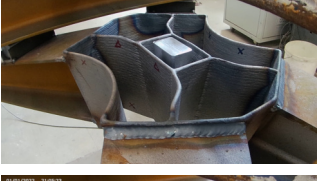

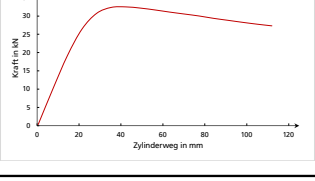
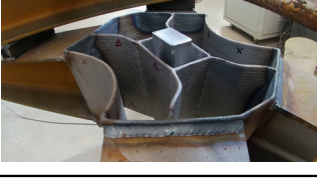
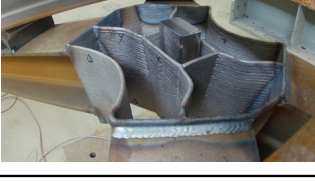
Lasten und Wege wurden bis nach Entlastung aufgenommen. In den Diagrammen in Abb. 8.10 und 8.11 sind Kraft und Weg gegeneinander aufgetragen. Der Knotenweg ist der aus den vier am Knoten befindlichen Wegaufnehmern gemittelte Weg. Die horizontalen Wege an Lager 1 sind der Lagerkraft am Lager 1 gegenübergestellt.



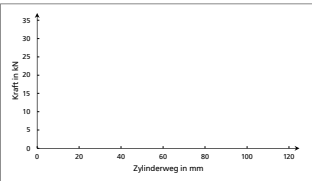

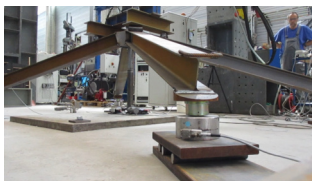
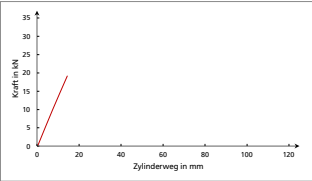

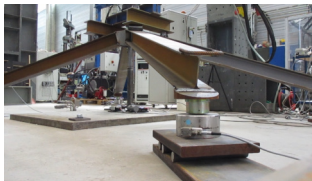
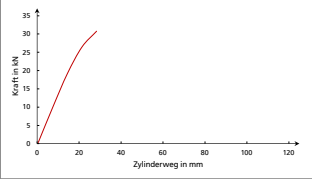

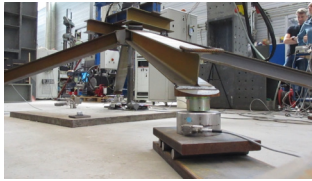
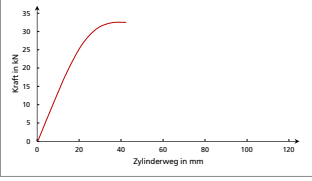

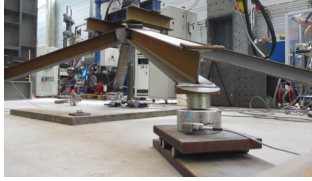
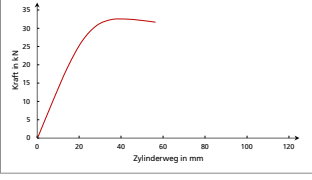

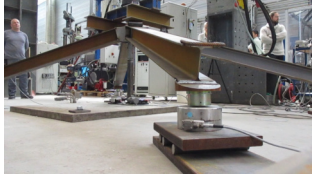
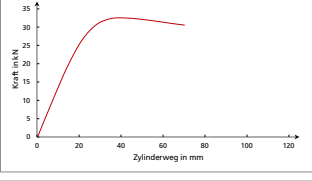

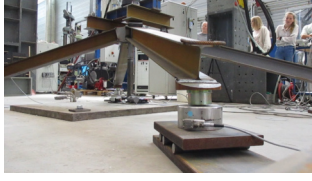
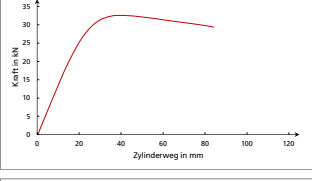

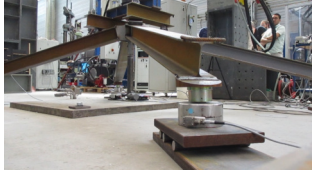
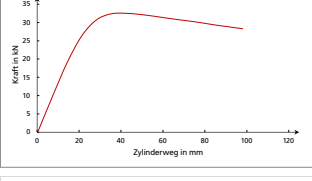


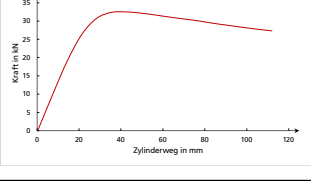


**Abbildung 8.10:** Last-Verformungs-Kurven Gesamtlast

# 8 Untersuchungen zur Tragfähigkeit gedruckter WAAM-Knoten

**Tabelle 8.1:** Zur Last-Verformungs-Kurve zugeordnete Kameraaufnahmen

| Kraft-Weg-Kurve   | Trägerkamera 2  | Trägerkamera 4   |
|---|---|--|
|    |    |    |
|    |    |    |
|    |    |    |
|   |   |   |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

**Tabelle 8.2:** Zur Last-Verformungs-Kurve zugeordnete Kameraaufnahmen

| Kraft-Weg-Kurve   | Seitlich  | Lager  |
|---|---|--|
|    |    |    |
|    |    |    |
|    |    |    |
|   |   |   |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

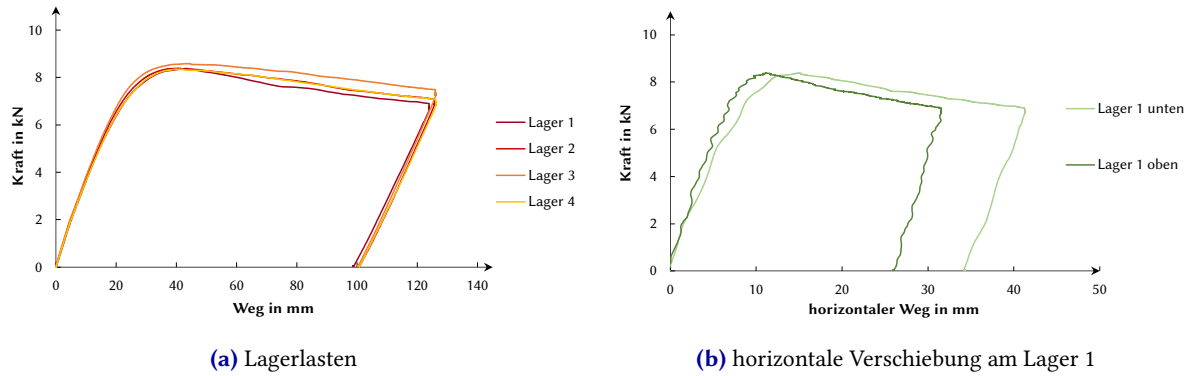


Abbildung 8.11: Last-Verformungs-Diagramme

### 8.3.4 Auswertung

Das Verformungsbild des Knotens ist symmetrisch. Anhand der Videos kann das Abweichen von der elastischen Geraden dem beginnenden Ausknicken der Stege zugordnet werden (vgl. Tabelle 8.1 Zeile 2 und 3). Das Versagen – der Traglastabfall – tritt durch Ausbeulen der Stege ein. Nach Erreichen der Traglast fällt die Last langsam ab und es kann noch eine sehr hohe Verformung erreicht werden. Auch nach Erreichen der Traglast und Steigerung der Verformung um das 5-fache trat kein plötzliches Versagen ein. Abgesehen von der Verformung, waren keine Anzeichen von lokalem Versagen – Bruch – zu erkennen.

Tabelle 8.3: Lagerlasten

|         | Lagerkraft<br>in kN | Jeweiliger<br>Knotenweg<br>in mm | Zylinderweg<br>in mm | Mittlerer<br>Knotenweg<br>in mm | Zylinderkraft<br>in kN |
|---------|---------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------|
| Lager 1 | 8,4                 | 42,9                             | 40,9                 | 43,4                            | 32,6                   |
| Lager 2 | 8,4                 | 40,6                             | 38,7                 | 40,9                            | 32,6                   |
| Lager 3 | 8,6                 | 43,5                             | 40,9                 | 43,4                            | 32,6                   |
| Lager 4 | 8,4                 | 39,8                             | 37,4                 | 39,4                            | 32,5                   |

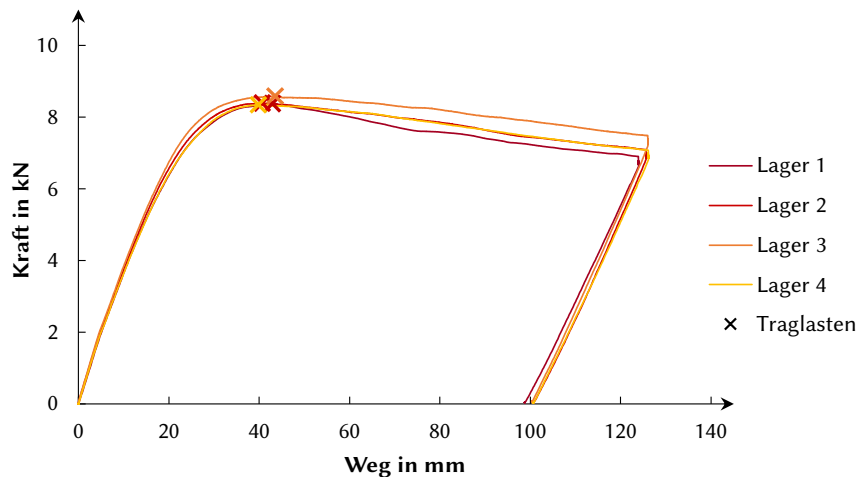
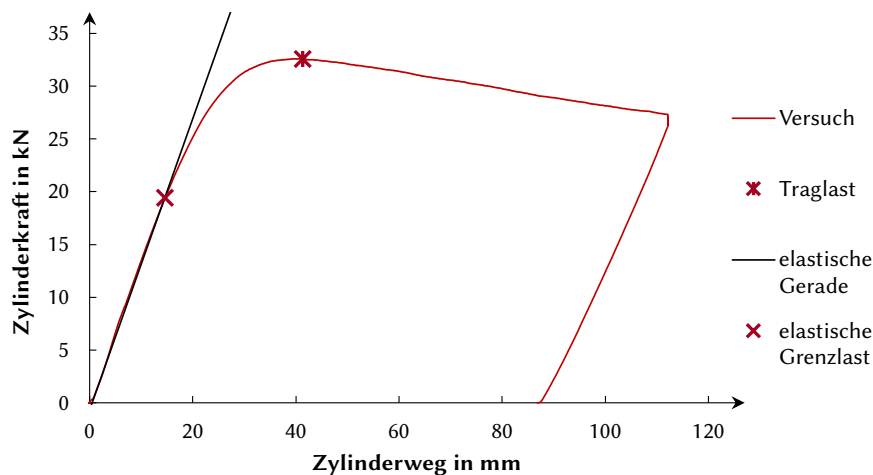


Abbildung 8.12: Lagerlasten mit Angabe des jeweiligen Maximums



Bei Vergleich der Lagerreaktion fällt auf, dass die Last über alle vier Lager gleichmäßig verteilt ist. Lager 2 und 4 weisen nahezu identische Kurven auf. Die Kraft in Lager 3 fällt über den gesamten Versuch etwas höher aus. Die Lagerreaktion in Lager 1 fällt im plastischen Bereich etwas geringer aus. Die Abweichungen sind jedoch sehr gering, sodass gesagt werden kann, dass sich die Last über alle Lager und somit auch innerhalb des Knotens gleichmäßig verteilt hat. Die maximalen Lagerlasten und der jeweilige Knoten- und Zylinderweg sind in Tabelle 8.3 angegeben.

Anhand der Zylinderkraft-Zylinderweg-Kurve wurde die Traglast bestimmt. Zusätzlich wurde eine elastische Grenzlast bestimmt. Die ausgewerteten Punkte sind in Abb. 8.13 markiert. Die Traglast kann anhand des Maximums der Kurve ermittelt werden. Die elastische Traglast bezeichnet den Punkt, an welchem die Kurve beginnt von der elastischen Geraden abzuweichen.



**Abbildung 8.13:** Bestimmung der Traglast

In einem realen Versuch gibt es jedoch keine ideale elastische Gerade. Daher wurde folgendermaßen vorgegangen. Im Bereich von 5 mm bis 10 mm Weg wurde die mittlere Steigung der Versuchsgeraden ermittelt. Mit dieser Steigung wurde eine Gerade ermittelt, die im Bereich von 0 mm bis 20 mm Weg die geringste Abweichung zur Versuchskurve darstellt. Der Punkt, an dem die Versuchskurve die so ermittelte elastische Gerade verlässt, wird als elastische Traglast gekennzeichnet. Zusätzlich zu den beiden Traglasten ist im Diagramm auch die elastische Gerade eingezeichnet.

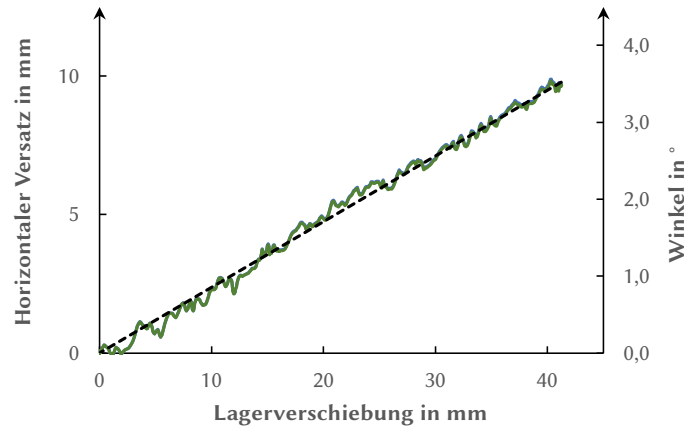
Die ermittelten Werte sind in Tabelle 8.4 zu sehen. Hieraus ist ersichtlich, dass nach Verlassen der elastischen Geraden noch eine Steigerung von über 50 % der Last möglich ist. Auch die Verformung weist einen fast 3-mal so großen Wert auf. Die Maximallast selbst wird erst nach einem längeren Verweilen auf hohem Niveau erreicht. So wird bereits nach 37,4 mm eine Last von 32,5 kN erreicht. Bis zum Erreichen der Traglast von 32,6 kN verformt sich der Knoten um weitere 4 mm.

**Tabelle 8.4:** ermittelte Traglastwerte

|                     | Zylinderweg in mm<br>in mm | Kraft in kN<br>in kN |
|---------------------|----------------------------|----------------------|
| elastische Traglast | 14,6                       | 19,4                 |
| Traglast            | 41,3                       | 32,6                 |

Zuletzt wird die horizontale Lagerverschiebung ausgewertet. Hierzu wird die Differenz zwischen dem horizontalen Weg am Oberflansch des Trägers und dem horizontalen Weg am Lager gebildet. In Abb. 8.14

ist der Versatz gegenüber der Lagerverschiebung und einem hieraus errechneten Winkel aufgetragen. Versatz und Winkel nehmen quasi linear zu. Dies war so zu erwarten und lässt darauf schließen, dass es zu keinem unvorhergesehenen Verhalten kam. In Tabelle 8.5 sind zusätzlich noch maximale und bleibende Lagerverschiebung bzw. horizontaler Versatz und Winkel angegeben.



**Abbildung 8.14:** Horizontaler Versatz am Lager 1

**Tabelle 8.5:** Auswertung Lagerverschiebung an Lager 1

|          | Horizontaler Versatz<br>in mm | Ungefäher Winkel<br>in ° | Lagerverschiebung<br>in mm |
|----------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Maximal  | 10,0                          | 3,6                      | 40,3                       |
| Bleibend | 8,3                           | 3,0                      | 34,3                       |

## 8.4 Berechnung mit Finiten Elementen

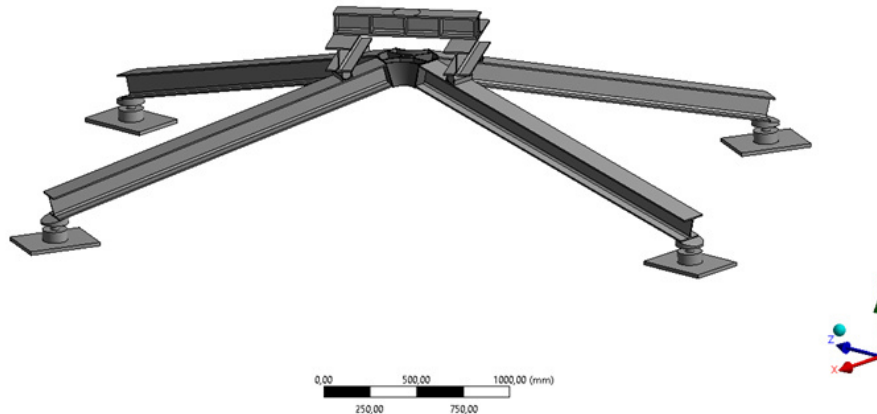
### 8.4.1 Modellierung

#### Geometrie

Um nachvollziehen zu können, ob die Simulation mit finiten Elementen das Tragverhalten richtig abbildet, werden alle an der Verformung beteiligten Komponenten des Versuchs mit abgebildet. Dies schließt die Lasteinleitung vom Querträger HEB 120 bis zu den aufgeschweißten U-Profilen und die Auflager mit den Kraftmessdosen mit ein. Ebenfalls werden die Träger und die an diese geschweißten Auflagerflächen mitmodelliert. Die Geometrie ist in Abb. 8.15 zu sehen.

#### Material

Für den Knoten wird das in Kapitel 5 ermittelte Materialmodell angesetzt. Die schwache Achse des Hill-Kriteriums wird entsprechend der Aufbaurichtung in Richtung der globalen y-Achse angesetzt. Den an den Knoten angeschlossenen Trägern wurde ein bilineares Materialmodell mit einem E-Modul von 210.000 N/mm<sup>2</sup> und einer Streckgrenze von 355 N/mm<sup>2</sup> zugewiesen. Den abgebildeten Kraftmessdosen und Platten, auf denen sie lagerten, wurde ein linear elastisches Materialmodell mit einem E-Modul von 210.000 N/mm<sup>2</sup> zugewiesen. Allen weiteren Bauteilen wurde bilineares Materialmodell mit einem E-Modul von 210.000 N/mm<sup>2</sup> und einer Streckgrenze von 235 N/mm<sup>2</sup> zugewiesen.



**Abbildung 8.15:** Geometrie des FE-Modells

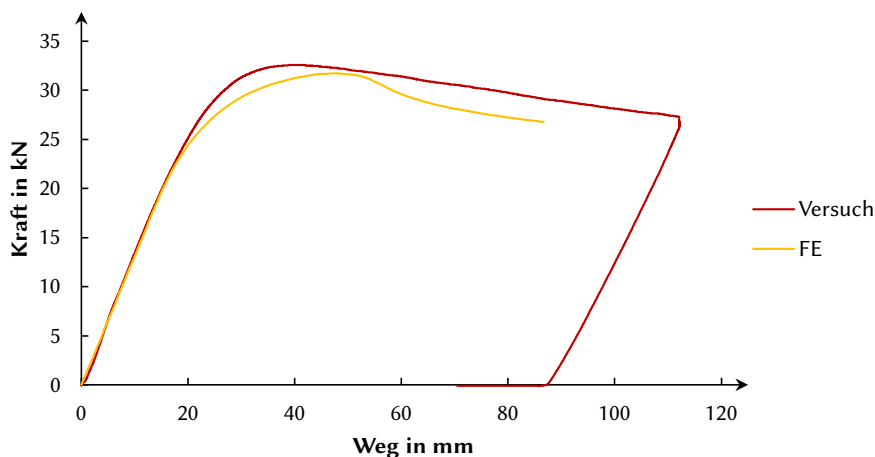
### Randbedingungen

Die Last wurde als Verschiebung entgegen der  $y$ -Achse aufgebracht. Die Platten unter den Auflagern wurden als Verschiebungen von 0 mm in vertikaler Richtung gehalten. Der Knoten wurde in den mittleren unteren Kanten horizontal über eine verformbare externe Verschiebung gehalten. Dies entspricht dem Stab, der im Versuch den Knoten in Position gehalten hat.

Zwischen Rundstahl und Lasteinleitungsträger wurde ein reibungsbehafteter Kontakt mit einem Reibbeiwert von 0,2 angesetzt. Zwischen dem Auflagerbereich der Träger und den Körpern, welche die Kraftmessdosen simulieren, wurde ein rauher Kontakt angesetzt. So konnte sich die im Versuch aufgetretene Drehung (vgl. Abb. 8.14) des Trägers auch im FE-Modell einstellen. Alle weiteren Kontakte wurden als Verbund gewählt.

### 8.4.2 Vergleich von Versuch und Simulation

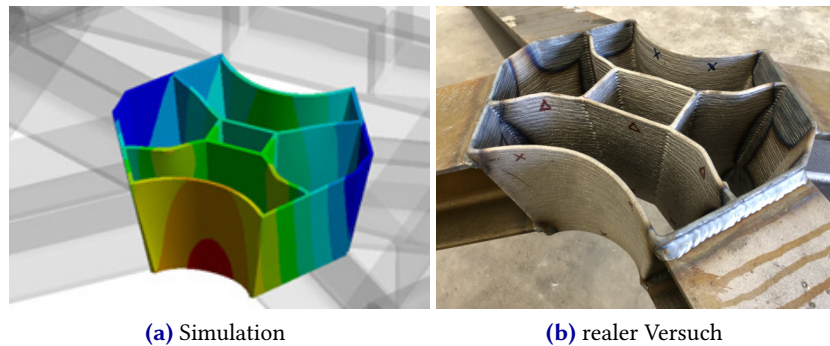
Abb. 8.16 zeigt das Ergebnis der numerischen Berechnung (gelb) im Vergleich zum realen Versuchsergebnis. Vor allem der Beginn, der elastische Bereich wird realitätsnah abgebildet. Die im Simulationsmodell erreichte elastische Grenzlast liegt bei 19,7 kN und einer Verformung von 15 mm. Hier beginnt die Steigung abzunehmen. Dies wurde auch aus dem Versuch ähnlich bestimmt.



**Abbildung 8.16:** Vergleich Traglastkurven aus Versuch und Simulation

Die Traglast liegt in der Simulation bei 31,75 kN, allerdings wird sie bei einer etwas größeren Verformung erreicht. Der starke Knick nach Erreichen der Traglast ist auf das Materialmodell zurückzuführen, dass die Verfestigung ab Erreichen der Zugfestigkeit nicht abbildet.

Wie im realen Versuch auch, beulen die Stege in der Simulation im Inneren des Knotens stark aus. In der Simulation geschieht dies in die andere Richtung als im realen Versuch. Generell wird das Verhalten des Knotens im Versuch und in der Simulation als gleich bewertet (Abb. 8.17).



**Abbildung 8.17:** Vergleich der Verformung nach dem Versuch

## 8.5 Möglicher Nachweis des Knotenbauteils

### 8.5.1 Vereinfachung des Modells

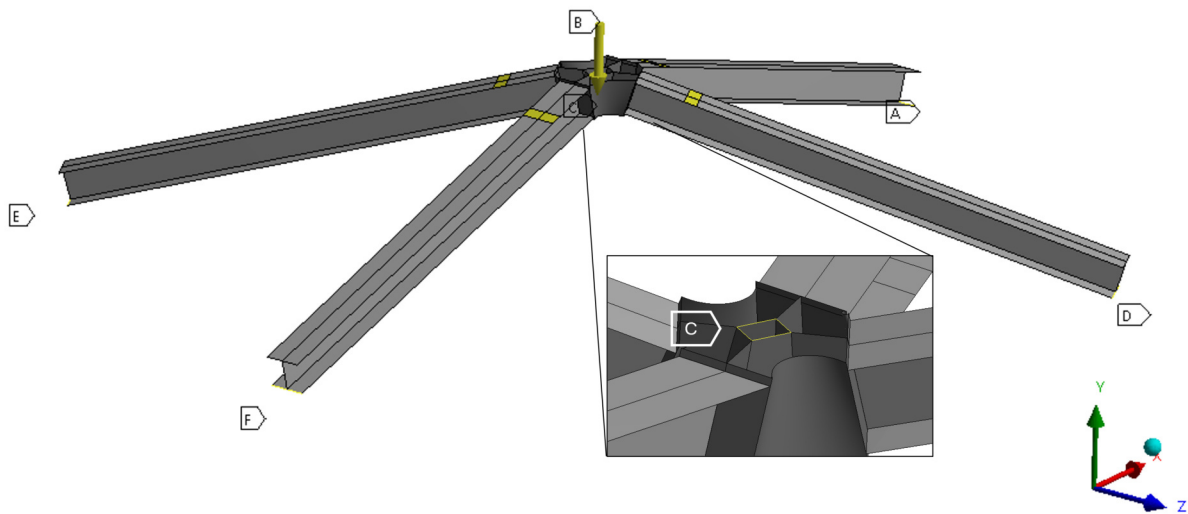
Durch die Modellierung nahezu aller beteiligter Komponenten - lediglich der Zylinder und der Rundstahl unter den Auflagern sind nicht modelliert - und der damit einhergehenden Notwendigkeit von nichtlinearen Kontakten wird das Modell in der Berechnung sehr aufwendig. Die Rechenzeit betrug über 24 Stunden. Um mögliche Nachweismethoden zu zeigen, wird das Modell daher vereinfacht.

Hierbei werden Träger und Knoten als Schalenkörper modelliert, denen dann jeweils eine Dicke zugewiesen werden kann. Traverse und Auflager werden als Randbedingungen - externe Verschiebungen - modelliert. Das Modell ist in Abb. 8.18 zu sehen. So kann die Rechenzeit auf 5 Minuten reduziert werden.

Bei Definition der Randbedingungen ist darauf zu achten, dass diese die realen Verhältnisse genau abbilden. Wie in Abb. 8.11 zu sehen, haben Zylinderweg und Knotenweg die gleiche Steifigkeit, da die Lasteinleitung selbst sehr starr war und quasi nicht zur Verformung beigetragen hat. Die Last kann direkt auf die Träger aufgebracht werden. Anders verhält es sich bei den Lagern. Wie auf den Bildern der seitlichen Lagerkamera in Tabelle 8.2 zu sehen, hat sich der Stempel auf der Kraftmessdose mit dem Träger verdreht. Der Drehpunkt liegt etwas tiefer und weiter außerhalb des Trägers. Die Materialeigenschaften sind entsprechend dem Volumenmodell gewählt. Mit diesem Schalenmodell wird das Tragverhalten ähnlich gut wie durch das Volumenmodell abgebildet (Abb. 8.19).

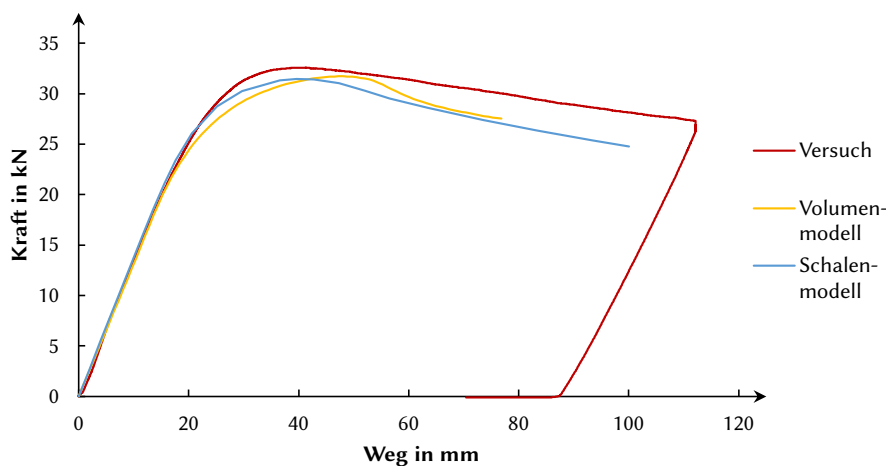
### 8.5.2 Verschiedene Ansätze zum Nachweis

Anhand des vereinfachten Modells können verschiedene Möglichkeiten gezeigt werden, den Knoten nachzuweisen. Um den Versuch nachzubilden, wurde das genaue Materialmodell nach Kapitel 5 genutzt. Dies setzt sich aus den Mittelwerten der Versuche zusammen. Die Zugversuche werden zwar wie



**Abbildung 8.18:** Vereinfachtes Schalenmodell

(C: Festhaltung des Knotens in x,y / A,B,D, F: externe Verschiebung an den Trägerrenden / E: externe Verschiebung auf die vier Lasteinleitungsflächen)



**Abbildung 8.19:** Last-Verformungs-Diagramm zum Vergleich von Versuch, Volumen- und Schalenmodell

in Kapitel 5 zu sehen gut getroffen, allerdings liegen einige der Versuchskurven auch unterhalb der Simulationskurve. Für den Nachweis eines Knoten ohne einen zuvor gemachten Versuch sollte auf der sicheren Seite auch ein möglich schlechteres Material berücksichtigt werden.

Hierzu können verschiedene Ansätze verfolgt werden. Für das Modell wurde das Fließkriterium nach Hill verwendet, welches in die verschiedenen Achsrichtung unterschiedliche Fließgrenzen berücksichtigt. Zwar ist sichtbar, dass der Knoten die Last vor allem in zur Schweißnaht paralleler Richtung abträgt, auf der sicheren Seite könnte jedoch auf den Ansatz der Anisotropie verzichtet werden und lediglich die niedrigere Festigkeit angesetzt werden. Weiterhin können aus den Zugversuchen nach DIN EN 1990 die charakteristischen Festigkeitswerte ermittelt werden. Hierbei kann bilineares oder multilineares Verhalten angesetzt werden. Das Material kann auch nach DIN EN 10025-2 klassifiziert werden und entsprechend der klassifizierten Festigkeit berücksichtigt werden. Als weitere Möglichkeit oder auch zusätzlich zum gewählten Ansatz kann die Dicke des Bauteils kleiner angesetzt werden.

## Ermittlung der charakteristischen Festigkeit

Die charakteristische Festigkeit kann über das in Kapitel 2 beschriebene Vorgehen nach Anhang D der Norm ermittelt werden. Da es sich in dieser Arbeit lediglich um 3 Versuche handelt wird ein  $k_n$ -Wert von 3,37 angesetzt. Tabelle 8.6 zeigt die Mittelwerte für Streckgrenze und Zugfestigkeit und die daraus ermittelten charakteristischen Werte, zusätzlich wird jeweils das Verhältnis der beiden Werte angegeben.

**Tabelle 8.6:** Mittelwerte und charakteristische Werte für die verschiedenen Bahnanzahlen

|     | $\bar{f}_y$<br>in N/mm <sup>2</sup> | $f_{y,k}$<br>in N/mm <sup>2</sup> | $f_{y,k}/\bar{f}_y$<br>- | $\bar{f}_u$<br>in N/mm <sup>2</sup> | $f_{u,k}$<br>in N/mm <sup>2</sup> | $f_{u,k}/\bar{f}_u$<br>- |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| B2S | 385                                 | 358                               | 0,93                     | 497                                 | 494                               | 0,99                     |
| B2P | 421                                 | 377                               | 0,90                     | 511                                 | 453                               | 0,89                     |
| B3S | 405                                 | 363                               | 0,90                     | 499                                 | 486                               | 0,97                     |
| B3P | 448                                 | 408                               | 0,91                     | 526                                 | 516                               | 0,98                     |
| B4S | 408                                 | 406                               | 1,00                     | 516                                 | 511                               | 0,99                     |
| B4P | 477                                 | 423                               | 0,89                     | 552                                 | 495                               | 0,90                     |

Durch die geringe Streuung der senkrechten Proben im Bereich der Verfestigung, wird die Zugfestigkeit in dieser Richtung nahezu nicht abgemindert. Die anderen charakteristischen Werte liegen bei ca. 90 % des Mittelwertes. Auch wenn die Abminderung in den zwei Belastungsrichtungen unterschiedlich ausfällt, kann auf der sicheren Seite eine Abminderung auf 90 % der aus den Versuchen ermittelten Festigkeiten angesetzt werden. Das in Kapitel 5 ermittelte Materialmodell wird daher auf 90 % abgemindert.

Hierzu ist zu sagen, dass die Abminderung um 10 % auch auf den Versuchsumfang zurückzuführen ist. Würde sich bei jeweils 10 Versuchen eine ähnliche Streuung ergeben, läge die Abminderung nur noch bei 5 %.

## Anwendung der verschiedenen Ansätze

Es werden die folgenden Ansätze untersucht:

- Isotropes Material aus **schwacher** Belastungsrichtung, multilinear:  
Streckgrenze = 370,5 N/mm<sup>2</sup>
- **Charakteristisches** Materialmodell mit **Hill**, multilinear:  
mittlere Streckgrenze = 343,8 N/mm<sup>2</sup>
- Isotropes Material aus **schwacher** Belastungsrichtung **charakteristisch**, multilinear:  
Streckgrenze = 333,5 N/mm<sup>2</sup>
- Isotropes Material entsprechend Klassifizierung, bilinear:  
Streckgrenze = 355 N/mm<sup>2</sup>
- Materialmodell mit **Hill**, multilinear, **5 mm** Dicke des Bauteils:  
mittlere Streckgrenze = 382 N/mm<sup>2</sup>
- Isotropes Material entsprechend Klassifizierung, bilinear, **5 mm** Dicke des Bauteils:  
Streckgrenze = 355 N/mm<sup>2</sup>

Verglichen werden die Ansätze mit dem Ergebnis des Versuchs und dem zuvor vorgestellten Modell (Hill). In Abb. 8.20 sind die Last-Verformungskurven zu sehen, in Tabelle 8.7 sind die Traglasten angegeben. Es ergeben sich Abminderungen der Traglast zwischen 5 % und 30 %. Die zu den ermittelten Traglasten gehörenden Verformungen sind alle in einem ähnlichen Bereich.

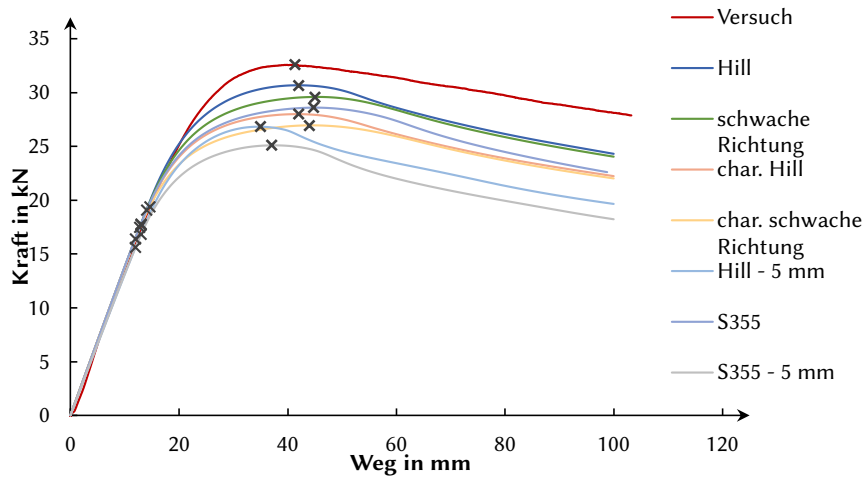


Abbildung 8.20: Last-Verformungs-Diagramme bei unterschiedlichen Ansätzen

Tabelle 8.7: Traglasten der verschiedenen Ansätze

|                         | Traglast           |                    | Versuch/Modell |           |
|-------------------------|--------------------|--------------------|----------------|-----------|
|                         | elastisch<br>in kN | plastisch<br>in kN | elastisch      | plastisch |
| Versuch                 | 19,4               | 32,6               |                |           |
| Hill                    | 19,1               | 30,7               | 1,02           | 1,06      |
| schwache Richtung       | 17,8               | 29,6               | 1,09           | 1,10      |
| char. Hill              | 17,7               | 28,0               | 1,10           | 1,16      |
| char. schwache Richtung | 16,4               | 27,0               | 1,18           | 1,21      |
| S355                    | 17,5               | 28,6               | 1,11           | 1,14      |
| S355 - 5 mm             | 15,6               | 25,1               | 1,24           | 1,30      |
| Hill - 5 mm             | 16,8               | 26,8               | 1,15           | 1,21      |

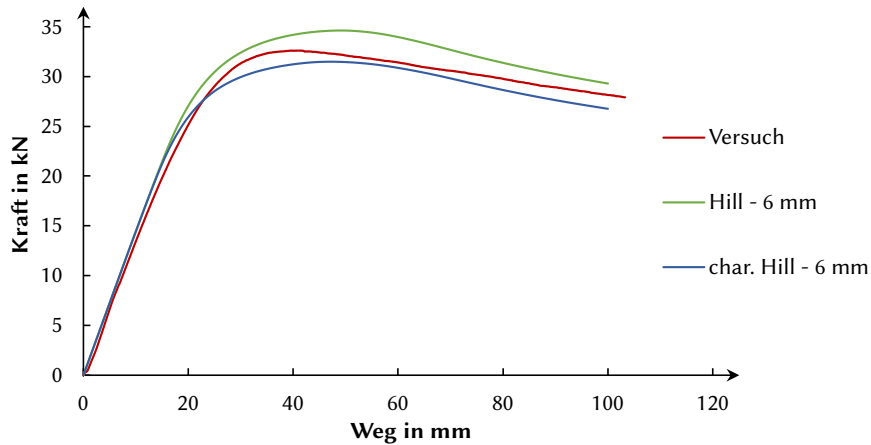
### Dickeneinfluss

Eine gezielte Verringerung der Dicke zusammen mit einer niedrig gewählten Festigkeit ist sicherlich keine wirtschaftliche Nachweisvariante. Es zeigt aber, dass der Einfluss der Bauteildicke sehr groß ist. Es ist daher essenziell, diese möglichst genau zu wählen.

Eine Abminderung der Traglast kann sinnvoll sein, um mögliche Geometrieüberschätzungen zu berücksichtigen. Dies wird an einem Beispiel gezeigt. Anstelle der sich für den Knoten als passend herausgestellten Dicke von 5,5 mm wird eine Dicke von 6 mm gewählt. Für diesen Knoten wird einerseits das charakteristische und andererseits das unveränderte Materialmodell angesetzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.21 und Tabelle 8.8 zu sehen. Das unveränderte Material überschätzt das Tragverhalten. Diese Überschätzung wird durch das charakteristische Material abgefangen.

Tabelle 8.8: Traglasten bei 6 mm Bauteilstärke

|                   | Traglast           |                    | Versuch/Modell |           |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|-----------|
|                   | elastisch<br>in kN | plastisch<br>in kN | elastisch      | plastisch |
| Versuch           | 19,4               | 32,6               |                |           |
| Hill - 6 mm       | 21,4               | 34,6               | 0,91           | 0,94      |
| char. Hill - 6 mm | 18,6               | 31,5               | 1,04           | 1,04      |



**Abbildung 8.21:** Last-Verformungs-Kurven bei 6 mm Bauteildicke

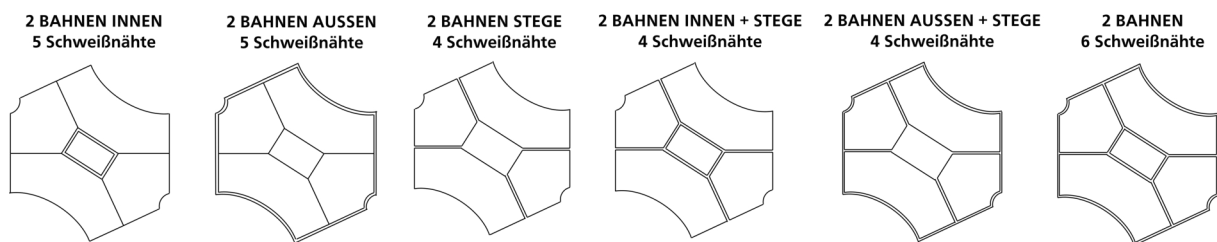
### Nachweis des Knotens

Es wurden verschiedene Ansätze gezeigt, die zu unterschiedlich hohen Traglasten führen. Der unveränderte Ansatz eines ermittelten Materialmodells ist kritisch zu sehen, da er bei einer Überschätzung der Bauteildicke zu höheren Traglasten führt. Hier könnte eine Abminderung sinnvoll sein. Auch könnte die Dicke von vorneherein etwas dünner angesetzt werden. Hierbei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass sich die Steifigkeit des Bauteils ändert und bei Verwendung in einem größeren Kontext zu Lastverlagerungen führen könnte.

Um Unsicherheiten abzufangen, scheint es daher sinnvoll, entweder eine Klassifizierung nach DIN EN 10025-2 durchzuführen oder anhand der Zugversuchsdaten charakteristische Festigkeiten zu ermitteln. Auch könnte ein Teilsicherheitsbeiwert ermittelt, mit dem eine an einem ungeminderten Materialmodell ermittelte Traglast abgemindert wird. Orientierend an der Abminderung der Festigkeiten könnte dieser bei 1,11 liegen. Für die Einführung eines allgemeinen Teilsicherheitsbeiwert bedarf es jedoch weiterer, umfassender Untersuchungen mit entsprechend großem Probenumfang.

### 8.5.3 Steigerung der Tragfähigkeit

Anhand des Modells kann auch abgeschätzt werden, was unterschiedliche Wandstärken für einen Einfluss auf die Traglast hätten. In ca. 5 mm Schritten kann mit dem vorgestellten Parametersatz durch die Verwendung von mehreren Bahnen in einer Lage die Wandstärke variiert werden. Hierbei kann der ganze Knoten dicker ausgeführt werden oder nur einzelne Bereiche. Mögliche Slicingansätze zeigt Abb. 8.22.



**Abbildung 8.22:** Mögliche Slicingansätze zur Verstärkung des Knotens

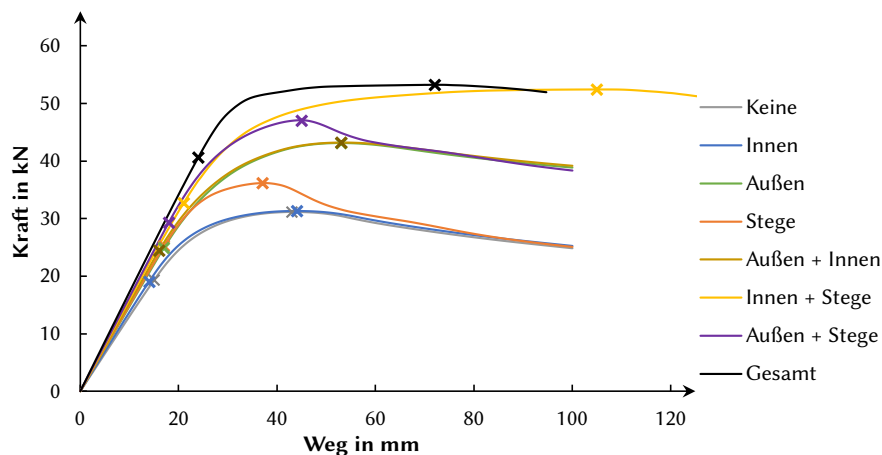


Mit den vorgeschlagenen Aufteilungen werden die verschiedenen Anforderungen an das Slicing (nach Kapitel 3 und Abschnitt 8.2.2) berücksichtigt. Die Anzahl der Start- und Stopppunkte erhöht sich teilweise nicht oder maximal um zwei Punkte.

Die Auswirkungen, die diese Verstärkungen hätten, sind in Abb. 8.23 und Tabelle 8.9 zu sehen. Eine Verstärkung des inneren Rechtecks hat nahezu keine Auswirkung. Allerdings zeigt sich, dass bei Verstärkung der Stege eine zusätzliche Verstärkung des inneren Rechtecks einen deutlichen Traglastanstieg mit sich bringt. Die plastische Traglast wird erst mit einer sehr großen Verformung erreicht. Es bildet sich jedoch ein Plateau, das über eine große Verformungsspanne eine hohe Last halten kann.

**Tabelle 8.9:** Traglasten bei verschiedenen Verstärkungen

| Verstärkung   | Traglast           |                    | Verhältnis zur<br>Traglast ohne Verstärkung |           |
|---------------|--------------------|--------------------|---|-----------|
|               | elastisch<br>in kN | plastisch<br>in kN | elastisch                                   | plastisch |
| Keine         | 19,3               | 31,2               | 1   | 1         |
| Innen         | 19,1               | 31,3               | 0,99  | 1,00      |
| Stege         | 25,2               | 36,2               | 1,30  | 1,16      |
| Innen + Stege | 32,7               | 52,4               | 1,69  | 1,68      |
| Außen         | 24,9               | 43,2               | 1,29  | 1,38      |
| Außen + Stege | 29,3               | 47,1               | 1,52  | 1,51      |
| Außen + Innen | 24,4               | 43,2               | 1,26  | 1,38      |
| Gesamt        | 40,7               | 53,3               | 2,10  | 1,71      |



**Abbildung 8.23:** Last-Verformungs-Kurven für verschiedene Verstärkungen (Dicke der verstärkten Bereiche: 10 mm)

## 8.6 Zusammenfassung

Das Kapitel zeigt die Fertigung des parametrisierten Entwurfs. Hierbei wird auf die Besonderheiten des Slicings eingegangen und die Slicingstrategie vorgestellt. Der Knoten wurde so konzipiert, dass die Tragfähigkeit in einem Bauteilversuch bestimmt werden kann. Zusätzlich wird durch die gewählte Geometrie gezeigt, wie anpassungsfähig das WAAM und der parametrisierte Entwurf sind.

Der Knoten zeigte das erwartete symmetrische Versagen und wies auch nach Erreichen der Tragfähigkeit eine hohe Duktilität auf. Es kam zu keinem punktuellen Versagen, wie Aufreißen der Naht auf Grund

von Poren oder ähnlichen Unregelmäßigkeiten. Dies wurde auch durch die genaue Überwachung des Herstellprozesses gewährleistet.

Mit dem in Kapitel 5 erstellten Materialmodell, das die Anzahl der Bahnen berücksichtigt, kann ein Simulationsmodell erstellt werden, das das Bauteilverhalten gut wiedergibt, ohne es zu überschätzen. Zusätzlich hierzu wurden unterschiedliche Ansätze gezeigt, wie ein Bauteil sicher und wirtschaftlich nachgewiesen werden könnte.

Mit dem ermittelten Simulationsmodell kann abgeschätzt werden, wie eine Bauteilverstärkung das Tragverhalten verbessern könnte.

---

## 9 BEDEUTUNG, POTENTIALE UND VISION

Das folgende Kapitel fasst die erlangten Erkenntnisse zusammen und stellt sie in den Kontext der Gegenwart und Zukunft. So wird aus den Untersuchungen eine Systematik erarbeitet, mit der Stahlbauknoten und andere Bauteile mit dem WAAM bereits jetzt hergestellt und nachgewiesen werden könnten. Es wird aber auch gezeigt, wie die Erkenntnisse in Zukunft weiterentwickelt und verwendet werden können.

### 9.1 Empfehlungen für den Entwurf und den Nachweis von Stahlbauknoten

In der Arbeit hat sich gezeigt, dass Entwurf, Fertigungsstrategie und die Tragfähigkeit von Bauteilen zusammenhängen. Sie zeigt auch, dass die Berücksichtigung der unterschiedlichen Faktoren zu einem nachweisbaren Ergebnis führt. Um die Erkenntnisse nicht nur für den hier dargestellten Einzelfall zu verwenden, wird nun ein Workflow / eine Systematik vorgestellt, die eine beliebige Struktur nachweisbar machen kann. Auch muss nicht der in dieser Arbeit verwendete Parametersatz genutzt werden. Dieser Parametersatz wurde auf Grund seiner Stabilität gewählt. Allerdings handelt es sich um einen eher langsamen Prozess, der zur wirtschaftlichen Verwendung von WAAM-Bauteilen gesteigert werden sollte.

#### 9.1.1 Darstellung des Workflows

Unabhängig von den hier vorgestellten Parametern kann der folgende Ablauf (Abb. 9.1) verwendet werden. Der oder die verwendeten Parametersätze müssen entsprechend umfassend untersucht werden. Ausgangspunkt bilden die Anforderungen für das Bauteil. Diese bestehen aus der geometrischen Situation und den Lasten, die das Bauteil tragen muss. Zusätzlich könnten auch Anforderungen an die Herstellzeit, die Kosten oder das Gewicht des Bauteils gestellt werden. Dies könnte zum Beispiel sinnvoll sein, um abzuschätzen, ob eine Fertigung mit dem WAAM wirtschaftlich ist.

Passend zu diesen Anforderungen wird eine Geometrie ermittelt, welche sicher herstellbar sein muss. Die Geometrie wird in Wechselwirkung mit der Fertigungsstrategie entwickelt. Steht die Geometrie, wird die Fertigungsstrategie verfeinert. Hierbei wird festgelegt, wie die Struktur genau gefertigt wird und welche Prozessparameter verwendet werden. Ist der Prozessparametersatz unbekannt, werden anhand der Fertigungsstrategie notwendige Materialuntersuchungen definiert. Durch die Aufzeichnung des Prozesses und die Kenntnis wie dieser das Material beeinflusst, kann ein Simulationsmodell erstellt werden, welches das Tragverhalten vorhersagt. Die einzelnen Schritte werden nun genauer beschrieben.

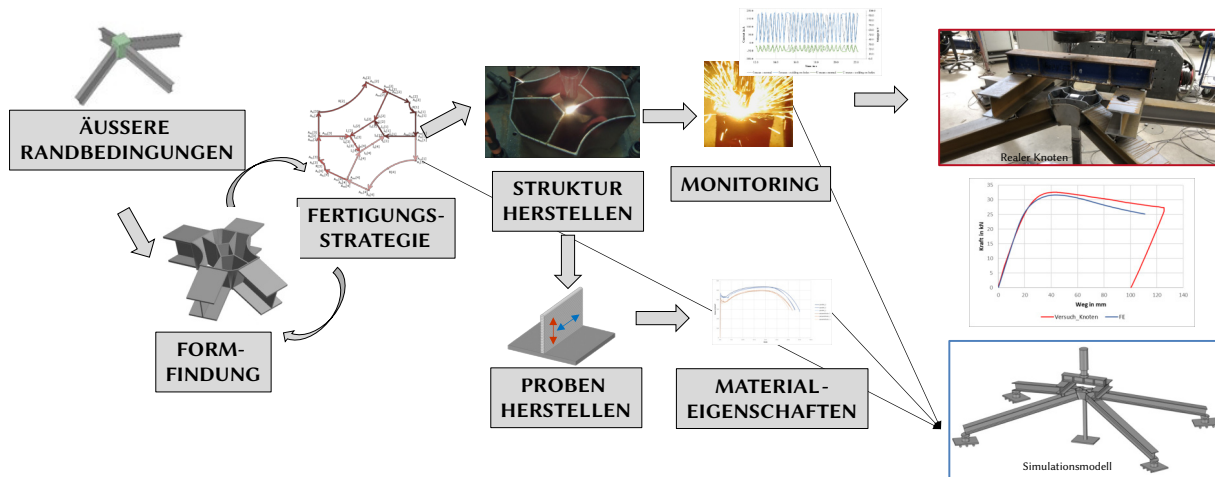


Abbildung 9.1: Workflow zur Tragfähigkeitsbestimmung

### 9.1.2 Ermittlung der Geometrie

Die additive Fertigung hat die Möglichkeit, neue Formen und Geometrien zu fertigen. Dieses Potential sollte ausgenutzt werden, um materialeffiziente Bauteile zu entwerfen. Mögliche Ansätze eine Knotengeometrie zu finden, sind in Kapitel 7 beschrieben. So kann beispielsweise mit Hilfe der Topologieoptimierung ein effizientes Design gefunden werden. Andererseits können auch bekannte Konstruktionsansätze hinterfragt und auf Grund des ingenieurtechnischen Verständnisses neue Lösungen gefunden werden. Auch neue Ansätze aus der Forschung können genutzt und parametrische Lösungen, wie in dieser Arbeit vorgestellt, verwendet werden.

Das Design sollte immer im Hinblick auf die Möglichkeiten der Fertigung bewertet und, sofern notwendig, angepasst werden. Die Fertigungsstrategie sollte jedoch auch hinsichtlich der bestmöglichen Geometrie hinterfragt und angepasst werden. Voruntersuchungen zur Fertigungsstrategie können helfen, die Randbedingungen zu definieren. Aus dieser Schleife ergibt sich das endgültige Design und ein Grundkonzept der Fertigungsstrategie.

### 9.1.3 Fertigungsstrategie / Slicingstrategie

Dieser Ansatz der Fertigungsstrategie wird dann in seinen Feinheiten – Start- und Stopppunkte, Bahnanzahl und -abstände – definiert. Hierzu können weitere Untersuchungen gemacht werden. Ist zum Beispiel eine möglichst kurze Fertigungszeit als Anforderung gegeben, sollte der Parametersatz für die gewünschte Nahtbreite hinsichtlich der Auftragsrate gewählt werden. Hierbei sollte jedoch immer die Prozessstabilität und die Gleichmäßigkeit der Naht berücksichtigt werden. Ein schneller, aber fehleranfälliger Prozess ist schlechter zu bewerten, als ein langsamerer, jedoch stabilerer Prozess, da er während der Fertigung weniger zusätzliche Pausenzeiten erzeugt.

Hinsichtlich des Slicings sind die in Kapitel 3 und in Kapitel 8 angesprochenen Grundsätze zu berücksichtigen. So sollten möglichst wenige Start- und Stopppunkte verwendet und diese über die verschiedenen Schweißlagen in ihrer Position verändert werden. Es sollte Einzelteilerfertigung vermieden und für ein möglichst homogenes Material die Energie gleichmäßig eingebracht werden.

### 9.1.4 Ermittlung der Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften können aus dafür vorgesehenen Probekörpern ermittelt werden. Hierbei sollten Proben mindestens in Schweißrichtung und senkrecht dazu entnommen werden. Zusätzlich können Proben in einem weiteren Winkel zur Schweißnahtichtung – beispielsweise  $45^\circ$  – entnommen werden, um die Anisotropie weiter zu klassifizieren.

Aufbauend auf der Fertigungsstrategie sollten dann bestimmte geometrisch „schwierige“ Stellen (Kreuzungen, starke Überhänge) weiter untersucht werden. Auch kann hierbei untersucht werden, ob eine alternative Slicingmethode – beispielsweise in Kreuzungsstellen – bessere Ergebnisse liefern würde. Neben dem gleichen Parametersatz sollte auch die zum Erreichen der Dicke verwendete Bahnanzahl gleichgehalten werden. Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Bahnanzahl einen deutlichen Einfluss auf die Eigenschaften hat.

Die Probekörper sind so zu definieren, dass die Proben auch die Eigenschaften der untersuchten Besonderheit wiedergeben. Weiterhin ist eine geeignete Anzahl an Proben zu untersuchen. Hierdurch können die anzusetzenden Materialparameter wirtschaftlicher definiert werden. Bei Zugproben kann die notwendige Größe ein Problem darstellen. Mittlerweile kann mithilfe des Profilometry-based Indentation Plastometry (PIP) eine Spannungs-Dehnungs-Linie ermittelt werden, die einen deutlich kleineren Bereich von wenigen Millimetern berücksichtigen kann (Plastometrex 2024). Gerade für die additive Fertigung kann dies genutzt werden, um die verschiedenen Bereiche einer Struktur zu untersuchen. Babu et al. (2023) und Y. T. Tang et al. (2021) zeigen bereits Anwendungen dieses neuen Messsystems zum Bestimmen der Materialeigenschaften in einem sehr lokalen Bereich.

Bei Kenntnis der Materialeigenschaften an den verschiedenen Stellen können ein oder mehrere Materialmodelle definiert werden, die dann in der Simulation angewendet werden.

### 9.1.5 Fertigung des Bauteils

Mit dem erstellten Programmcode wird die Struktur gedruckt. Während des Drucks sollte der Prozess überwacht und aufgezeichnet werden, hierdurch lassen sich Unregelmäßigkeiten erkennen. In Zukunft sollte es vertieft Untersuchungen zu Prozessunregelmäßigkeiten und deren Auswirkungen auf das Materialverhalten einer Struktur geben. Erste Ansätze wurden jedoch bereits in Erven und Lange (2022) und Bergmann et al. (2020) gezeigt. Hieraus lässt sich ableiten, dass grobe Unregelmäßigkeiten – wie fehlendes Schutzgas – direkt auszubessern sind. Alle Unregelmäßigkeiten sollten protokolliert werden. Bei einem häufig auftretenden Fehler könnte eine Überprüfung der Auswirkungen sinnvoll sein. Zusätzlich sollte der Energieeintrag mit dem Standardprozess bzw. mit dem für die Untersuchung der Materialeigenschaften eingebrachten verglichen werden. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass die gewollten Geometrie- und Materialeigenschaften entstehen.

### 9.1.6 Simulation

Mit den Materialeigenschaften und den Kenntnissen zum Prozess sowie den Einflüssen des Slicings kann ein Simulationsmodell erstellt werden und das Tragverhalten des gedruckten Bauteils prognostiziert werden.

Zunächst ist festzuhalten, dass die Lagerungsbedingungen eines Systems sehr großen Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnung haben. So ist bei Verwendung sicherzustellen, dass das zu untersuchende

Problem auch richtig abgebildet ist. Weiterhin ist für das WAAM eine richtig gewählte Bauteildicke von entscheidender Bedeutung. Problematisch ist hierbei jedoch die Oberflächenwelligkeit. Ansätze für eine Geometrieanalyse sind beispielsweise bei Huang et al. (2022a) zu finden. Anhand der Analyse kann dann eine effektive Dicke abgeschätzt werden, welche konservativ angesetzt werden sollte.

Das Material kann entsprechend Kapitel 5 in unterschiedlichen Feinheiten abgebildet werden. Hierzu sollten entweder die charakteristischen Festigkeiten oder eine Klassifizierung nach DIN EN 10025-2 (2019) genutzt werden. Werden die Materialkennwerte direkt aus dem Versuch entnommen, sollte das Ergebnis durch einen Teilsicherheitsbeiwert abgemindert werden.

Je nach Fragestellung können verschiedene Ergebnisse als Versagenskriterium angesehen werden. Einerseits kann die elastische Grenzlast bestimmt werden, andererseits könnte auch die plastische Tragfähigkeit genutzt werden. Es sollte zusätzlich überprüft werden, dass das Material eine Grenzdehnung nicht überschreitet. Diese Grenzdehnung sollte so definiert sein, dass alle getesteten Proben diese erreicht haben – beispielsweise die kleinste Gleichmaßdehnung, die in den Zugversuchen ermittelt wurde.

Wird die elastische Grenzlast betrachtet, können Anisotropie und Festigkeitssteigerung durch das Slicing durch Ansatz der kleinsten getesteten Festigkeit - für die vorliegende Arbeit die Belastungsrichtung senkrecht zur Schweißnaht - auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden. Hierbei wird jedoch eine weniger wirtschaftliche Ausnutzung in Kauf genommen. Bei vollplastischer Betrachtung sollte auf Grund von möglichen Steifigkeitsverlagerungen - zumindest bei Bereichen mit stark erhöhter Festigkeit – die Festigkeitserhöhung berücksichtigt werden. Werden dennoch alle Bereiche mit der kleineren Festigkeit berechnet, sollte der Punkt des ersten Plastizierens als plastische Traglast angesetzt werden. Der Ansatz einer vorhandenen Anisotropie führt zusätzlich zu einer wirtschaftlicheren Ausnutzung.

## 9.2 Regelwerke, Normung, Zulassung

Um eine neue Technologie im Bauwesen zu etablieren, braucht es gesicherte Prozesse und Kennwerte. Derzeit fehlen zum WAAM noch Normen und Richtlinien. Die in der Arbeit gemachten Erkenntnisse können jedoch als Grundlage dienen.

### 9.2.1 Verwendung des vorgestellten Parametersatzes

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Parametersatz umfassend untersucht. Der untersuchte Parametersatz eignet sich natürlich nicht nur für die Herstellung von Knotenstrukturen im Stahlbau, sondern kann für viele andere Strukturen verwendet werden. Bei Verwendung des Parametersatzes sollte auf die gleichen Herstellungsrandbedingungen geachtet werden. Die Strom-/Spannungskurven und der durch sie erzeugte Energieeintrag haben erheblichen Einfluss auf die – vor allem geometrischen – Eigenschaften. Daher muss darauf geachtet werden, dass sich bei Verwendung des Parametersatzes auch die hier vorgestellten Kurven ergeben.

Der Parametersatz ist für die Fertigung in senkrechter Brennerstellung ausgelegt. Bis zu einem Winkel von 30° kann er so verwendet werden, ohne dass sich größere Unterschiede ergeben. Bei deutlicher Verringerung der Lagenhöhe ist von anderem Energieeintrag und somit veränderten Eigenschaften auszugehen. Ebenfalls sollten die vorgestellte Lagenhöhe und bei Fertigung von mehreren Bahnen in einer Lage der vorgestellte Nahtabstand gewählt werden.

| VORGABEPARAMETER                    |  | SYSTEM |  |
|-------------------------------------|--|--------|--|
| SCHWEISSDRAHT                       | G3Si1 ER70S-6 DICHTE 1,2 mm  |        |  |
| SCHUTZGAS                           | 82 % ARBON 18 % CO <sub>2</sub>  |        |  |
| SCHWEISSSTROMQUELLE                 | Fronius CMT Advanced 4000  |        |  |
| BEWEGUNGSEINHEIT                    | Roboter Comau Smart NM 16-3.1  |        |  |
| SCHWEISSPROZESS                     | CMT Cycle Step CMT 1840  |        |  |
| KÜHLUNG                             | Niederdrucksystem mit Sprühnebel aus destilliertem Wasser  |        |  |
| ZUSÄTZLICHE KOMponente              | -  |        |  |
| TEMPERATURSTEUERUNG                 | - °C 30 - 120° s   |        |  |
| NAHTNACHBEHANDLUNG                  | -  |        |  |
| BRENNERSTELLUNG                     | 0°   |        |  |
| MAXIMALER ÜBERHANGWINKEL            | 30°  |        |  |
| DRAHTVORSCHUB                       | 6,5 m/min CTWD 12 mm   |        |  |
| SCHWEISSGESCHWINDIGKEIT             | 0,5 m/min SCHUTZGASDURCHFLUSS 15 l/min   |        |  |
| PROZESSANPASSUNG                    | Special Two Step Startstrom = 80 %, Startzeit = 0,3 s, Slope = 0,1 s   |        |  |
| PROZESSVARIANTENABHÄNGIGE PARAMETER | Staghämmer On d_boostup 500 -<br>t_ignition 280 A t_boost 190 A/ms<br>t_ignition 20 ms t_l_boost_1 2,275 A<br>t_warmup 120 A VD_boost 54 ms<br>t_warmup 8 ms t_vd_boost 4,05 m/min<br>Vd_warmup 0 m/min CMT_cycles 20 ms<br>t_cmt_init 50 A CMT_cycle_step 1 -<br>Vd_cmt_init 15 m/min CMT_cycles_min 20 -<br>t_sc_wait 50 A Interval_Cycles 1999 -<br>Vd_sc_wait 26,5 m/min t_interval_break 120 -<br>t_sc2 165 A t_burnback 0,15 ms(ex)<br>Vd_back_2 -33,5 m/min |        |  |
| BERMerkungen                        | * Abhängig von Bahnanzahl je Lage (1 Naht: 30 s, 4 Nähte: 90 s, >4 Nähte: 120s)  |        |  |

| ERGEBNIS  |           | PROZESSINGROSSEN                |        |
|---|-----------|---------------------------------|--------|
| TYPISCHE SCHWEISSSTROM- UND SCHWEISSPANNUNGSVERLÄUFE                            |           |                                 |        |
|   |           |                                 |        |
| STRECKENENERGIE 3,6 kJ/cm   |           |                                 |        |
| DICK E INZELNAHT 6,02 mm (MAXIMAL) 5,2 mm (MINIMAL) 5,5 mm (EFFEKTIV ANSETZBAR) |           |                                 |        |
| HÖHE INZELNAHT 1,2 mm   |           |                                 |        |
| NAHTABSTAND BEI MEHREREN NÄHTEN 4,46 mm   |           |                                 |        |
| E-MODUL 198.000 N/mm <sup>2</sup> (MITTELWERT)                                  |           | BRUCHDEHNUNG 28 % (MINDESTWERT) |        |
| CHAR. STRECKGRENZE f <sub>yk</sub>  |           |                                 |        |
|   | PARALLEL  | 1 NAHT                          | 2 NAHT |
|   |           | 3 NAHT                          | 4 NAHT |
|   | SENKRECHT | 1 NAHT                          | 2 NAHT |
|   |           | 3 NAHT                          | 4 NAHT |
| CHAR. ZUGFESTIGKEIT f <sub>yk</sub>   |           |                                 |        |
|   | PARALLEL  | 1 NAHT                          | 2 NAHT |
|   |           | 3 NAHT                          | 4 NAHT |
|   | SENKRECHT | 1 NAHT                          | 2 NAHT |
|   |           | 3 NAHT                          | 4 NAHT |

| GEOMETRIE   |  | MATERIALEIGENSCHAFTEN                          |  |
|---|--|--|--|
| DICK E INZELNAHT 6,02 mm (MAXIMAL) 5,2 mm (MINIMAL) 5,5 mm (EFFEKTIV ANSETZBAR) |  | E-MODUL 198.000 N/mm <sup>2</sup> (MITTELWERT) |  |
| HÖHE INZELNAHT 1,2 mm   |  | BRUCHDEHNUNG 28 % (MINDESTWERT)                |  |
| NAHTABSTAND BEI MEHREREN NÄHTEN 4,46 mm   |  | CHAR. STRECKGRENZE f <sub>yk</sub>             |  |
|   |  | PARALLEL 1 NAHT 2 NAHT 3 NAHT 4 NAHT           |  |
|   |  | SENKRECHT 1 NAHT 2 NAHT 3 NAHT 4 NAHT          |  |
|   |  | CHAR. ZUGFESTIGKEIT f <sub>yk</sub>            |  |
|   |  | PARALLEL 1 NAHT 2 NAHT 3 NAHT 4 NAHT           |  |
|   |  | SENKRECHT 1 NAHT 2 NAHT 3 NAHT 4 NAHT          |  |

Abbildung 9.2: Beispielhaftes Datenblatt für die Zulassung des Prozesses

### 9.2.2 Übertragung auf weitere Parametersätze

Das Vorgehen kann auch auf andere Parametersätze ausgeweitet werden. So könnte ein Portfolio von gesicherten Parametersätzen entstehen, aus denen für eine vorliegende Aufgabe ein geeigneter Satz ausgewählt werden kann. Anhand von Kriterien kann dann überprüft werden, ob die gleichen Ergebnisse erwartet werden können.

Ein Regelwerk könnte die Zulassung und Verwendung dieser Parametersätze regeln. Hierfür können orientierend an dieser und anderen Arbeiten (bspw. Holzinger (2022)) die notwendigen Schritte zur Definition eines Parametersatzes, die notwendigen Angaben und Randbedingungen für die Verwendung der Sätze und die notwendigen Prüfkriterien zur sicheren Verwendung festgelegt werden.

Bei Definition des Parametersatzes sollten verschiedene Eigenschaften erreicht werden: Der Parametersatz sollte wenige Fehler hervorbringen – Drahtfestbrand, Startprobleme und Aussetzer. Außerdem sollte er Nähte mit gleichbleibender Güte erstellen – eine gleichmäßige Schweißnahtgeometrie, die auch nach mehreren Lagen unverändert bleibt und reproduzierbar ist. Nachdem auf diese Weise ein geeignet erscheinender Satz gefunden ist, sind die Materialeigenschaften zu prüfen. Hierbei ist auf geringe Streuung bei gleichen Randbedingungen und ausreichende Kennwerte – mindestens: E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung – zu achten. Weiterhin sollte auch die Abhängigkeit vom Slicing in Anlehnung an die Ergebnisse dieser Arbeit untersucht werden bzw. entsprechend dem vorgestellten Workflow diese bei der Modellierung individuell berücksichtigt werden.

Ergeben sich durch den gewählten Parametersatz die gewünschten Eigenschaften, sind die Randbedingungen anzugeben, unter denen die Ergebnisse erzielt wurden. Hierbei muss eine genaue Angabe der

Prozessparameter erfolgen. Weiterhin sind die materiellen Auswirkungen unterschiedlicher Einstellungen anzugeben. Außerdem ist der Rahmen festzulegen, in welchem der Parametersatz verwendet werden kann, beispielsweise durch die Beschränkung mit einem maximalen Überhangwinkel.

### 9.2.3 Datenblatt zur Qualifizierung von Parametersätzen

Im Rahmen der Normung muss festgelegt werden, welche Randbedingungen notwendig sind und welche Randbedingungen als Kriterien zur Überprüfung dienen sollen. So könnte ein Datenblatt erstellt werden, anhand welchem ein Prozessparametersatz zugelassen wird. Ein Beispiel für ein solches Datenblatt für den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Parametersatz ist in Abb. 9.2 dargestellt. Durch eine derartige einheitliche Regelung für die Festlegung und Verwendung von Prozessparametern lässt sich das Herstellverfahren WAAM in Zukunft qualifizierbar und quantifizierbar machen und besser in die Praxis integrieren.

## 9.3 Ressourcenschonung

### 9.3.1 Durch Wiederverwendung

Die Etablierung des Prozesses sollte nicht dazu führen, dass Bauteile einfach ersetzt werden. Es sollte sich, wie in der Arbeit vorgestellt, durch die Verwendung des Prozesses ein Vorteil gegenüber der konventionellen Fertigung ergeben. Unsere Welt ist endlich, auch wenn wir in Zukunft die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren und unseren Strom grün herstellen, können wir Ressourcen wie Eisenerz nicht unendlich fördern, da ihr Vorkommen begrenzt ist. Daher sollte die Möglichkeit des WAAM genutzt werden, materialsparende Bauteile herzustellen.

Das große Potential von Stahl hinsichtlich der Nachhaltigkeit ist bereits jetzt seine Recyclingfähigkeit ohne den Verlust der Tragfähigkeit. Bereits jetzt werden 99 % des Stahlschrotts aus dem Stahlbau gesammelt und dem Baustoffkreislauf zugeführt. Allerdings werden hiervon 88 % recycelt, also in der Elektrohochofen zu neuem Stahl eingeschmolzen. Lediglich 11 % werden direkt wiederverwendet (Helmus und Randel 2015). Um Energie einzusparen, sollte dieser Anteil vergrößert werden.

Hierzu kann bereits im Entwurf an das Lebensende des Bauwerks gedacht werden und eine schnelle Rückbaubarkeit Berücksichtigung finden. Durch den in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz, die Komplexität des Anschlusses in das 3-D-gedruckte Bauteil zu verlegen, können lineare, hoch standardisierte Bauteile – wie Walzprofile – einfacher ohne (großen) Längenverlust direkt wiederverwendet werden. Durch diese direkte Wiederverwendung kann die graue Energie für Neubauten reduziert werden. Durch die Verwendung von materialsparenden additiv gefertigten Bauteilen und den geringen Verschnitt wird der Materialverbrauch generell gesenkt.

Zusätzlich kann das WAAM durch die Individualisierbarkeit der Bauteile auch genutzt werden, um bereits verbaute Bauteile, bei denen nicht an eine Wiederverwendbarkeit gedacht wurden, wiederzuverwenden, indem es auf die vorhandene Besonderheit des Anschlusses eingeht.



### 9.3.2 Durch Bestandertüchtigung

Hieran schließt sich ein weiterer Gedanke an: Der Abbruch eines Bauwerks ist teilweise notwendig, da einzelne Bauteile ihre Lebensdauer überschritten haben. Derzeit werden viele Gebäude auch zurückgebaut, weil sie nicht mehr genutzt werden. Ein weiteres Problem ist der Leerstand. In Frankfurt liegt der Leerstand von Bürogebäuden bei knapp 10 %, deutschlandweit liegt er bei 5 %. In beiden Fällen ist die Tendenz steigend (Statista 2024b; Statista 2024a), da sich seit der Coronapandemie das Arbeitsleben verändert hat. Hier handelt es sich um Raum, der vor allem in den betroffenen Großstädten eigentlich für Wohnungen, Kultur oder soziale Einrichtungen genutzt werden könnte.

Solche ungenutzten Gebäude können durch individuell angepasste, additiv hergestellte Bauteile – auch durch das WAAM – ertüchtigt und an neue Anforderungen angepasst werden. So können einerseits einzelne Bauteile direkt oder Tragwerksabschnitte durch den Einsatz von weiteren Bauteilen verstärkt werden. Andererseits können Grundrissanpassungen noch individueller gestaltet werden, indem die Anpassbarkeit neuer Bauteile erhöht wird.

### 9.3.3 Durch Multimaterialität

Die in der Arbeit untersuchten Knoten beschränkten sich auf die Verbindung von Stahlbauteilen. Durch die Individualisierbarkeit können hiermit jedoch auch andere Baustoffe verbunden werden. Für Holzbauwerke gibt es bereits konventionelle Stahlknotenlösungen, diese könnten ebenfalls additiv gefertigt werden. Neben Holzbauteilen könnte das WAAM auch die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen mit Stahlbauteilen mühelos verbinden. Dies schließt somit an den zuvor aufgeführten Aspekt der Bestandsverwertung an.

Verschiedene Materialien haben verschiedene Vorteile. Diese je nach Aufgabe zu benutzen und miteinander zu verbinden ist durch das WAAM und den 3-D-Druck noch einfacher möglich und kann zu Materialersparnis und -effizienz führen. Wird hierbei zusätzlich an das Lebensende des Bauwerks und den Materialkreislauf gedacht, birgt es das große Potential, die Nachhaltigkeit von Bauteilen und Bauwerken in Zukunft deutlich zu steigern.

## 9.4 Digitalisierung und Automatisierung

### 9.4.1 Verringerung des Fachkräftebedarfs

Durch die Verlagerung der Komplexität in die additiv gefertigten Bauteile, können die linearen Bauteile einfacher und schneller vorbereitet werden. Dadurch kann auch bei weiterhin „händischer“ Verarbeitung dieser Bauteile die Produktivität einer Arbeitskraft gesteigert werden. Zwar werden für die industrielle Implementierung des WAAMs weitere Fachkräfte mit anderer Ausbildung oder Weiterbildungen für vorhandenes Personal benötigt, diese Fachkräfte können jedoch auch mehrere Roboter gleichzeitig bedienen und überwachen. Dies steigert die Produktivität je Arbeitskraft ebenfalls. Werden zusätzlich noch vollautomatisierte Fertigungslinien verwendet, die auch die einfache Vorbereitung der Halbzeuge übernehmen, reduziert sich die Fachkräfteanzahl zusätzlich.

Auch in der Montage können die hochkomplexen individuellen additiv gefertigten Stahlbauknoten dem Fachkräftemangel entgegenwirken. Durch die Vereinfachung von Anschlüssen kann es zur Erleichterung der Montage kommen. Dies beginnt schon bei dem Gewicht der einzelnen Bauteile. Durch

die materialsparende Konstruktion könnte es dazu kommen, dass ein Bauteil für welches zuvor zwei Arbeitskräfte notwendig waren, nun von einer einzelnen Arbeitskraft getragen werden kann. Zusätzlich können auch vor Ort Schweißungen reduziert werden, für die besondere Fachkräfte benötigt werden würden.

### **9.4.2 Digitaler Zwilling – Automatisierte Bauteilsimulation**

Der erarbeitete Workflow bietet schon jetzt eine Möglichkeit, individuell hergestellte Bauteile nachzuweisen. Durch sich immer weiterentwickelnde Systeme, die mehr Daten speichern und verarbeiten können, kann er automatisiert werden. Bei Kenntnis, wie sich verschiedene Ausgestaltungen der Schweißprozessparameterverläufe auf die Bauteileigenschaften auswirken, kann anhand des Herstellungs-codes und Rückmeldungen des Fertigungssystems ein Bauteilmodell simultan zur Fertigung erstellt werden.

## **9.5 Zusammenfassung**

Bereits jetzt kann durch den vorgestellten Workflow ein mit dem WAAM gefertigtes Bauteil nachgewiesen werden. In Zukunft kann dieser durch die detaillierte Untersuchung von Prozessirregularitäten zusätzlich verwendet werden, um nicht nur fehlerfreie Bauteile berechenbar zu machen, sondern auch die Auswirkungen von den Irregularitäten zu berücksichtigen und nicht fehlerfreie Bauteile je nach Anforderung verwendbar zu machen.

Aufbauend auf den in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen zu einem Parametersatz sollten weitere Parametersätze umfassend untersucht werden und diese in einem einheitlichen System WAAM-Anwendern verfügbar gemacht werden. Dies hilft bei Standardisierung und Qualifizierung des WAAM.

Durch den in dieser Arbeit gezeigten Ansatz des Umdenkens hinsichtlich der Konstruktion von Bauteilen, der Wiederverwendung von genutzten, aber noch tragfähigen Bauteilen und dem Einbezug der Stärken verschiedener Baumaterialien können in Zukunft Ressourcen effektiv und nachhaltig eingesetzt werden.

Die Automatisierung bietet in Kombination mit dem WAAM und der Vereinfachung von Bauteilen sowie der Verlagerung von Komplexität die Möglichkeit, dem Fachkräftemangel in Zukunft entgegenzuwirken. Durch die voranschreitende Forschung können in Zukunft Auswirkungen des WAAMs noch besser abgeschätzt und Bauteilsimulationen automatisiert werden.

---

# 10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

## 10.1 Zusammenfassung

Die Arbeit befasst sich mit der Möglichkeit das WAAM im Stahlbau zu nutzen, um durch individualisierte Knotenstrukturen die Herstellung von komplexen Tragwerken zu vereinfachen. Aufgrund der Neuheit des Verfahrens befasst sich die Arbeit außerdem mit der Nachweisbarkeit von solchen additiv gefertigten Strukturen.

Das WAAM ist zwar ein neues Verfahren, um ganze Bauteile herzustellen, allerdings ist das Lichtbogenschweißen bereits ein seit langem etablierter Prozess. Daher werden im Rahmen der Arbeit zunächst auf Grundlage des Stands der Technik Einflussparameter für den Herstellprozess und deren „Ausprägungen“ ermittelt. Mit Erkenntnissen der neueren Forschung werden dann spezielle Randbedingungen für die Herstellung aufgestellt und notwendige eigene Untersuchungen identifiziert.

Auf Grund der Vielzahl an möglichen Prozesseinstellungen und den nicht eindeutigen Ergebnissen, die diese liefern, wird für diese Arbeit ein eigener Parametersatz ermittelt. Hierbei steht ein sicherer Prozess ohne häufige Aussetzer und mit einer möglichst gleichmäßigen Nahtgeometrie im Vordergrund. Der Parametersatz wird hinsichtlich seiner Materialeigenschaften untersucht. Hierbei stehen die aus Zugversuchen ermittelbaren Kennwerte im Fokus.

In den Untersuchungen zum Material zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Fertigungsstrategie. Dies wird einerseits durch eine leichte Anisotropie der Festigkeiten ersichtlich, andererseits und viel stärker ausgeprägt ist die Abhängigkeit durch den vermehrten Energieeintrag, der sich durch mehrere Bahnen in einer Lage und Kreuzungsstellen ergibt. Auch durch Auskragungen kann sich das Materialverhalten ändern. Diese Ergebnisse stellen sich bei Voraussetzung eines fehlerfreien Prozesses ein; Irregularitäten werden im Rahmen der Arbeit nicht untersucht.

Es werden erste Untersuchungen zu Schraubenverbindungen vorgestellt. Prinzipiell kann ein WAAM-Bauteil wie Walzstahl verwendet werden. Problematisch stellt sich jedoch vor allem für Zugverbindungen die wellige Oberfläche der Bauteile heraus. Sofern Scherverbindungen nicht vorgespannt sind, ist die Anfälligkeit von der Oberflächenbeschaffenheit geringer einzustufen.

Aus Untersuchungen für Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit ergibt sich, dass vor allem Bauteile additiv gefertigt werden sollten, die in der konventionellen Fertigung aufwendig herzustellen sind. Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind daher Knoten von hoher geometrischer Komplexität. Dennoch sollte im Entwurf der additiven Struktur die Herstellung möglichst einfach gehalten werden. Im Rahmen der Arbeit werden verschiedene Ansätze zum Entwurf von Knotenstrukturen gezeigt.

Die Ableitung von Optimierungsergebnissen in eine parametrisierte Knotenform, die den geometrischen Randbedingungen im gewissen Rahmen angepasst werden kann, wird vorgestellt. Sie zeigt gute Anpassbarkeit an örtliche Gegebenheiten und kann durch die zuvor ermittelten Materialparameter in ihrem Tragverhalten vorhergesagt werden.

Zuletzt wird gezeigt, wie ein Nachweis für eine solche Knotenform aussehen kann und wie die Arbeit darüber hinaus verwendet werden kann.

### 10.2 Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurden Wege vorgestellt, wie Knotenstrukturen entworfen werden können. Vor allem eine Ableitung der Optimierungsergebnisse und die Überführung in einen parametrischen Ansatz hat sich als brauchbar herausgestellt. Dieser Ansatz sollte auch für andere Schnittgrößensituationen verfolgt werden, sodass eine Art Bauteilkatalog erstellt werden kann. Aus diesem Bauteilkatalog kann dann für eine vorliegende Situation die am besten passende Knotengeometrie gewählt werden.

Eine weitere Möglichkeit, den Herstellprozess zu beschleunigen, wäre es, Halbzeuge in die additiv gefertigte Struktur zu integrieren. Hierzu müssen Entwürfe auf Integrationsmöglichkeiten überprüft und möglicherweise dahingehend angepasst werden. Für den sicheren Einsatz muss dann jedoch auch eine umfassende Untersuchung der Übergangszone zwischen gewalztem Stahl und additiv gefertigter Struktur erfolgen. Hieraus sollten Regeln für den Prozess und Ansätze für einen erfolgreichen Entwurf der Hybridbauteile abgeleitet werden.

Es wurde ein Parametersatz umfassend untersucht und für die Fertigung von Bauteilen verwendet. Hierbei zeigte sich eine starke Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Bahnplanung. Inwiefern dieses Phänomen für das WAAM generell gilt oder nur für den untersuchten Parametersatz, sollte durch gleichartige Untersuchungen ermittelt werden.

Der Einfluss von Irregularitäten, wie diese detektiert werden können und wie sie im Nachweis berücksichtigt werden können, wurde nicht untersucht. Für die sichere Nutzung von Bauteilen wurde im Rahmen der Arbeit darauf verwiesen, dass der Prozess keine besonderen Auffälligkeiten vorweisen darf. In welchem Umfang welche Irregularitäten auftreten dürfen oder gar nicht vorkommen sollten, um ein Bauteil noch verwenden zu können, sollte in Zukunft umfassend untersucht werden, um die Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit des Verfahrens zu steigern.

Die Temperatur wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit lediglich in der Pausenzeit zur Ermittlung der Zwischenlagentemperatur ermittelt. Der genaue Temperaturverlauf während und direkt im Anschluss an den Schweißprozess kann zu einem umfassenden Verständnis von Schweißparametern und Ergebnissen der Materialuntersuchungen beitragen.

Für den Einsatz von Schrauben in WAAM-Bauteilen fehlen noch umfassende Untersuchungen. Hierbei ist vor allem der Effekt der Oberflächenwelligkeit von großem Interesse. Inwieweit die ungleiche Oberfläche genutzt werden oder nachbearbeitet werden muss, sollte daher umfassend betrachtet werden.

Für den Einsatz von WAAM-Bauteilen in Tragwerken mit stark wechselnden Belastungen – wie Brücken – ist eine umfassende Kenntnis der Betriebsfestigkeit notwendig. Da die Arbeit sich auf die Anwendung bei statischen Belastungen ohne große Schwingbreiten beschränkt, wurde dies nicht behandelt. Für ein umfassendes Verständnis und die breite Anwendung des WAAMs ist es jedoch unumgänglich dieses Verhalten zu untersuchen.

Diese Arbeit hat gezeigt, wie die Anwendung des WAAMs im Stahlbau erfolgen kann und eine Grundlage geschaffen, auf der die weiteren Forschungsfelder ergründet werden können.





---

## LITERATUR

- Abdelwahab, M. und Tsavdaridis, K. D. (2019). *Optimised 3D-Printed Metallic Node-Connections for Reticulated Structures*. DOI: 10.31224/osf.io/jkexd.
- Abureden, G. A., Hasan, W. M. und Ababneh, A. N. (2021). "Exploring potential benefits of additive manufacturing in creating corrugated web steel beams". In: *Journal of Constructional Steel Research* 187, S. 106975. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106975.
- Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J. und Lamikiz, A. (2020). "Analysis of the Wall Geometry with Different Strategies for High Deposition Wire Arc Additive Manufacturing of Mild Steel". In: *Metals* 10.7, S. 892. DOI: 10.3390/met10070892.
- Almeida, P. M. S. (2012). "Process Control and Development in Wire and Arc Additive Manufacturing". Dissertation. Cranfield: Cranfield University.
- Astarita, A., Campatelli, G., Corigliano, P., Epasto, G., Montevecchi, F., Scherillo, F. und Venturini, G. (2021). "Microstructure and mechanical properties of specimens produced using the wire-arc additive manufacturing process". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 235.10, S. 1788–1798. ISSN: 0954-4062. DOI: 10.1177/0954406219883324.
- Babu, A., Ebrahimi, A., Wu, K.-H., Richardson, I. M. und Hermans, M. J. (2023). "Local control of microstructure and mechanical properties of high-strength steel in electric arc-based additive manufacturing". In: *Journal of Materials Research and Technology* 26, S. 1508–1526. ISSN: 22387854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.262.
- Baker R. (1925). "Method of making decorative articles: United". US15333300. URL: <https://drive.google.com/viewerng/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US15333300.pdf>.
- Bandari, Y. K., Williams, S. W., Ding, J. und Martina, F. (2015). "Additive Manufacture of Large Structures: Robotic or CNC Systems?" In: *2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Hrsg. von University of Texas at Austin.
- Bargel, H.-J. und Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-48628-3. DOI: 10.1007/978-3-662-48629-0.
- Bekker, A. C. und Verlinden, J. C. (2018). "Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel". In: *Journal of Cleaner Production* 177, S. 438–447. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.148.
- Bendsøe, M. P. und Sigmund, O. (2003). *Topology optimization: Theory, methods and applications*. Engineering online library. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 3-540-42992-1. DOI: 30512. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0815/2002030512-d.html>.

- Bergmann, J. P., Lange, J., Hildebrand, J., Eiber, M., Erven, M., Gaßmann, C., Chiang, C.-H., Lenz, C., Röder, T. und Bashariar, W. (2020). "Herstellung von 3D-gedruckten Stahlknoten". In: *Stahlbau* 89.12, S. 956–969. ISSN: 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.202000080.
- Borg Costanzi, C. und Knaack, U. (2022). "Function integration and reinforcement of free-form thin sheet metal using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)". In: *Structures and Architecture A Viable Urban Perspective?* Hrsg. von P. J. Cruz und M. F. Hvejsel. London: CRC Press, S. 221–228. ISBN: 9781003023555. DOI: 10.1201/9781003023555-27.
- Borg Costanzi, C. (2023). *Reinforcing and Detailing of Thin Sheet Metal Using Wire Arc Additive Manufacturing as an Application in Facades*. Bd. 68. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-41539-6. DOI: 10.1007/978-3-658-41540-2.
- Bruggi, M., Laghi, V. und Trombetti, T. (2021). "Simultaneous design of the topology and the build orientation of Wire-and-Arc Additively Manufactured structural elements". In: *Computers & Structures* 242, S. 106370. ISSN: 00457949. DOI: 10.1016/j.compstruc.2020.106370.
- Cao, Y., Zhu, S., Liang, X. und Wang, W. (2011). "Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process". In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27.3, S. 641–645. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.11.002.
- Chierici, M., Berto, F. und Kanyilmaz, A. (2021). "Resource-efficient joint fabrication by welding metal 3D-printed parts to conventional steel: A structural integrity study". In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 44.5, S. 1271–1291. ISSN: 8756-758X. DOI: 10.1111/ffe.13428.
- COMAU (2008). *BEWEGUNGSPROGRAMMIERUNG Systemsoftware Rel. 3.2x*. Italien.
- Dickens, P. M., Pridham, M. S., Cobb, R. C., Gibson, I. und Dixon, G. (1992). "Rapid Prototyping Using 3-D Welding". In: *1992 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. The University of Texas at Austin, S. 280–290. DOI: 10.15781/T2ZW1990V.
- Dilthey, U. (2006). *Schweiß- und Schneidtechnologien*. 3., bearb. Aufl. Bd. Bd. 1. VDI. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-21673-1.
- Ding, D., He, F., Yuan, L., Pan, Z., Wang, L. und Ros, M. (2021). "The first step towards intelligent wire arc additive manufacturing: An automatic bead modelling system using machine learning through industrial information integration". In: *Journal of Industrial Information Integration* 23, S. 100218. ISSN: 2452414X. DOI: 10.1016/j.jii.2021.100218.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. und Li, H. (2014). "A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73.1-4, S. 173–183. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-014-5808-5. URL: <https://ro.uow.edu.au/eispapers/2729>.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. und Li, H. (2015). "A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)". In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 31, S. 101–110. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- Ding, J. (2012). "Thermo-mechanical Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing Process". Dissertation. Cranfield: Cranfield University.
- Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, N. und Berto, F. (2020). "Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components". In:



- 
- Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 109, S. 102685. ISSN: 01678442. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102685.
- Erven, M. und Lange, J. (2022). "Influence of process irregularities in additively manufactured structures". In: *Current Perspectives and New Directions in Mechanics, Modelling and Design of Structural Systems*. Hrsg. von A. Zingoni. London: CRC Press, S. 374–379. ISBN: 9781003348443. DOI: 10.1201/9781003348443-61.
- Erven, M. (2018). "Untersuchung von 3-D-gedruckten, geschraubten Kopfplatten". Masterthesis. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Erven, M. und Lange, J. (2023). "Material efficient WAAM Steel Construction Details". In: *IABSE Congress, New Delhi 2023: Engineering for Sustainable Development*. IABSE Congress Reports. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Zurich, Switzerland, S. 543–551. DOI: 10.2749/newdelhi.2023.0543.
- Feucht, T. (2023). "Additive Fertigung von Anschlusselementen im Stahlbau mit dem Wire Arc Additive Manufacturing". Diss. Darmstadt: TU Darmstadt - FB 13. DOI: 10.26083/tuprints-00024363.
- Feucht, T., Lange, J., Waldschmitt, B., Schudlich, A.-K., Klein, M. und Oechsner, M. (2020a). "Welding Process for the Additive Manufacturing of Cantilevered Components with the WAAM". In: *Advanced Joining Processes*. Hrsg. von L. F. M. Da Silva, P. A. F. Martins und M. S. El-Zein. Bd. 125. Advanced Structured Materials. Singapore: Springer Singapore, S. 67–78. ISBN: 978-981-15-2956-6. DOI: 10.1007/978-981-15-2957-3\_5.
- Feucht, T., Lange, J., Erven, M., Costanzi, C. B., Knaack, U. und Waldschmitt, B. (2020b). "Additive manufacturing by means of parametric robot programming". In: *Construction Robotics* 4.1-2, S. 31–48. ISSN: 2509-811X. DOI: 10.1007/s41693-020-00033-w.
- Feucht, T., Waldschmitt, B., Lange, J. und Erven, M. (2022). "Additive manufacturing of a bridge in situ". In: *Steel Construction* 15.2, S. 100–110. ISSN: 1867-0520. DOI: 10.1002/stco.202100045.
- Gardner, L. (2023). "Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook". In: *Structures* 47, S. 2178–2193. ISSN: 23520124. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.039.
- Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G. und Buchanan, C. (2020). "Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge". In: *Journal of Constructional Steel Research* 172, S. 106233. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106233.
- Gebhardt, A., Kessler, J. und Thurn, L., Hrsg. (2016). *3D-Drucken*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-446-44672-4. DOI: 10.3139/9783446448452.
- Grebner, P. (2022). "Auswirkungen von Slicingstrategien auf die Materialeigenschaften von additiv gefertigten Strukturen". Masterthesis. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Grebner, P. und Lange, J. (2023). "3D-printing with steel on thin sheets for application in free form façade construction: welding process development and material properties". In: *ce/papers* 6.3-4, S. 666–671. ISSN: 2509-7075. DOI: 10.1002/cepa.2299.
- Großmann, A., Felger, J., Frölich, T., Gosmann, J. und Mittelstedt, C. (2019). "Melt pool controlled laser powder bed fusion for customised low-density lattice structures". In: *Materials & Design* 181, S. 108054. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108054.
-

- Guo, X., Kyvelou, P., Ye, J., Teh, L. H. und Gardner, L. (2022a). "Experimental investigation of wire arc additively manufactured steel single-lap shear bolted connections". In: *Thin-Walled Structures* 181, S. 110029. ISSN: 02638231. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110029.
- Guo, X., Kyvelou, P., Ye, J., Teh, L. H. und Gardner, L. (2022b). "Structural Response of Wire Arc Additively Manufactured Steel Bolted Connections under Single Shear". In: *ce/papers* 5.4, S. 251–257. ISSN: 2509-7075. DOI: 10.1002/cepa.1753.
- Guo, X., Kyvelou, P., Ye, J. und Gardner, L. (2023a). "Experimental investigation of wire arc additively manufactured steel T-stub connections". In: *Journal of Constructional Steel Research* 211, S. 108106. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108106.
- Guo, X., Kyvelou, P., Ye, J., Teh, L. H. und Gardner, L. (2023b). "Experimental study of DED-arc additively manufactured steel double-lap shear bolted connections". In: *Engineering Structures* 281, S. 115736. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115736.
- Guo, X., Kyvelou, P., Ye, J. und Gardner, L. (2023c). "Structural Response of Wire Arc Additively Manufactured Steel T-stub Connections". In: *ce/papers* 6.3-4, S. 1312–1318. ISSN: 2509-7075. DOI: 10.1002/cepa.2436.
- Hansen, M. (2022). "Additive Fertigung von optimierten Zugverbindungen". Masterthesis. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Harzheim, L. (2019). *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Europa Lehrmittel. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG. ISBN: 9783808558836.
- Helmus, M. und Randel, A. (2015). *Sachstandsbericht zum STAHLRECYCLING IM BAUWESEN*. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft. URL: <https://bauforumstahl.de/wp-content/uploads/2023/12/bfs-sachstandsbericht-recycling-im-bauwesen.pdf> (besucht am 20.03.2024).
- Henckell, P., Günther, K., Ali, Y., Bergmann, J. P., Scholz, J. und Forêt, P. (2017). "The Influence of Gas Cooling in Context of Wire Arc Additive Manufacturing—A Novel Strategy of Affecting Grain Structure and Size". In: *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. Hrsg. von T. M. M. bibinitperiod M. S. TMS. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing, S. 147–156. ISBN: 978-3-319-51492-5. DOI: 10.1007/978-3-319-51493-2\_15.
- Hensel, J., Przyklenk, A., Müller, J., Köhler, M. und Dilger, K. (2022). "Surface quality parameters for structural components manufactured by DED-arc processes". In: *Materials & Design* 215, S. 110438. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110438.
- Hildebrand, J. und Bergmann, J. P. (2019). "Dehnungsbasierter Ansatz für die schnelle Verzugsermittlung generativ hergestellter Strukturen". In: *Stahlbau* 88.4, S. 370–377. ISSN: 0038-9145. DOI: 10.1002/stab.201900022.
- Holzinger, C. (2022). "3DWelding. Additive Fabrication of Structural Steel Elements". Dissertation. Graz: TU Graz.
- Hu, Z., Qin, X., Li, Y., Yuan, J. und Wu, Q. (2020). "Multi-bead overlapping model with varying cross-section profile for robotic GMAW-based additive manufacturing". In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 31.5, S. 1133–1147. ISSN: 0956-5515. DOI: 10.1007/s10845-019-01501-z.

- 
- Hu, Z., Qin, X., Shao, T. und Liu, H. (2018). "Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95.5-8, S. 2357–2368. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-017-1392-9.
- Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Ben Britton, T. und Gardner, L. (2022a). "Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels". In: *Materials & Design* 216, S. 110544. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110544.
- Huang, C., Meng, X., Buchanan, C. und Gardner, L. (2022b). "Flexural Buckling of Wire Arc Additively Manufactured Tubular Columns". In: *Journal of Structural Engineering* 148.9. ISSN: 0733-9445. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003427.
- Huang, C., Meng, X. und Gardner, L. (2022c). "Cross-sectional behaviour of wire arc additively manufactured tubular beams". In: *Engineering Structures* 272, S. 114922. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114922.
- IEA (2019). *2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. Paris: Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency and the United Nations. URL: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019> (besucht am 27.03.2024).
- Jin, G. Q., Li, W. D. und Gao, L. (2013). "An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing". In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29.1, S. 23–38. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.07.001.
- Kanyilmaz, A. und Berto, F. (2019). "Robustness-oriented topology optimization for steel tubular joints mimicking bamboo structures". In: *Material Design & Processing Communications* 1.1, e43. ISSN: 2577-6576. DOI: 10.1002/mdp2.43.
- Karmuhilan, M. und Anoop, K. S. (2018). "Intelligent process model for bead geometry prediction in WAAM". In: *Materials Today: Proceedings* 5.11, S. 24005–24013. ISSN: 2214-7853. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.193. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478531832488X>.
- Karunakaran, K. P., Sreenathbabu, A. und Pushpa, V. (2004). "Hybrid layered manufacturing: Direct rapid metal tool-making process". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 218.12, S. 1657–1665. ISSN: 0954-4054. DOI: 10.1177/095440540421801202.
- Katzenmayer, V. (2021). "Wirtschaftlichkeitsanalyse von additiv gefertigten Bauteilen aus Stahl". Bachelorarbeit. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Kazanas, P., Deherkar, P., Almeida, P., Lockett, H. und Williams, S. (2012). "Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226.6, S. 1042–1051. ISSN: 0954-4054. DOI: 10.1177/0954405412437126.
- Kokare, S., Oliveira, J. P. und Godina, R. (2024). "Comparison of Wire Arc Additive Manufacturing and Subtractive Manufacturing Approaches from an Environmental and Economic Perspective". In: *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems*. Hrsg. von F. J. G. Silva, L. P. Ferreira, J. C. Sá, M. T. Pereira und C. M. A. Pinto. Lecture Notes
-

- in Mechanical Engineering. Cham: Springer Nature Switzerland, S. 868–878. ISBN: 978-3-031-38164-5. DOI: 10.1007/978-3-031-38165-2\_100.
- Kotteman, G. M. (2020). “Steel 3D printing for structures: An explorative study on the tear-out strength of a pin or bolt in a Wire and Arc Additively Manufactured carbon steel plate”. Masterthesis. Delft: TU Delft.
- Kuhlmann, U. (2018). *Stahlbau-Kalender 2018: Schwerpunkte - Verbundbau; Fertigung*. Stahlbau-Kalender Ser. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische. ISBN: 9783433607718. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6735485>.
- Kyvelou, P., Buchanan, C. und Gardner, L. (2022). “Numerical simulation and evaluation of the world’s first metal additively manufactured bridge”. In: *Structures* 42, S. 405–416. ISSN: 23520124. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.06.012.
- Kyvelou, P., Huang, C., Gardner, L. und Buchanan, C. (2021). “Structural Testing and Design of Wire Arc Additively Manufactured Square Hollow Sections”. In: *Journal of Structural Engineering* 147.12. ISSN: 0733-9445. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003188.
- Kyvelou, P., Slack, H., Daskalaki Mountanou, D., Wade, M. A., Britton, T. B., Buchanan, C. und Gardner, L. (2020). “Mechanical and microstructural testing of wire and arc additively manufactured sheet material”. In: *Materials & Design* 192, S. 108675. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108675.
- Laghi, V., Palermo, M., Bruggi, M., Gasparini, G. und Trombetti, T. (2023). “Blended structural optimization for wire-and-arc additively manufactured beams”. In: *Progress in Additive Manufacturing* 8.3, S. 381–392. ISSN: 2363-9512. DOI: 10.1007/s40964-022-00335-1.
- Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., Girelli, V. A. und Trombetti, T. (2021). “On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of Wire-and-Arc Additively Manufactured planar elements”. In: *Journal of Constructional Steel Research* 178, S. 106490. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106490.
- Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G. und Trombetti, T. (2020a). “Computational design and manufacturing of a half-scaled 3D-printed stainless steel diagrid column”. In: *Additive Manufacturing* 36, S. 101505. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101505.
- Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., Veljkovic, M. und Trombetti, T. (2020b). “Assessment of design mechanical parameters and partial safety factors for Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel”. In: *Engineering Structures* 225, S. 111314. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111314.
- Lange, J., Feucht, T. und Erven, M. (2020). “3D printing with steel”. In: *Steel Construction* 13.3, S. 144–153. ISSN: 1867-0520. DOI: 10.1002/stco.202000031.
- Li, X., Reynolds, A. P., Baoqiang, C., Jialuo, D. und Williams, S. (2015). “Production and Properties of a Wire-Arc Additive Manufacturing Part Made with Friction Extruded Wire”. In: *TMS2015 Supplemental Proceedings*. Wiley, S. 445–452. ISBN: 9781119082415. DOI: 10.1002/9781119093466.ch56.
- Li, Y., Han, Q., Zhang, G. und Horváth, I. (2018a). “A layers-overlapping strategy for robotic wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead components with homogeneous layers”. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96.9-12, S. 3331–3344. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-018-1786-3.

- 
- Li, Y., Sun, Y., Han, Q., Zhang, G. und Horváth, I. (2018b). "Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts". In: *Journal of Materials Processing Technology* 252, S. 838–848. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.017.
- Liu, Y., Ye, J., Yang, Y., Quan, G., Wang, Z., Zhao, W. und Zhao, Y. (2023). "Experimental study on wire and arc additively manufactured steel double-shear bolted connections". In: *Journal of Building Engineering* 76, S. 107330. ISSN: 23527102. DOI: 10.1016/j.jobeb.2023.107330.
- Lu, X., Zhou, Y. F., Xing, X. L., Shao, L. Y., Yang, Q. X. und Gao, S. Y. (2017). "Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93.5-8, S. 2145–2154. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-017-0636-z.
- Ma, C., Li, C., Yan, Y., Liu, Y., Wu, X., Li, D., Han, Y., Jin, H. und Zhang, F. (2021). "Investigation of the in-situ gas cooling of carbon steel during wire and arc additive manufacturing". In: *Journal of Manufacturing Processes* 67, S. 461–477. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.05.022.
- Matthes, K.-J. und Schneider, W., Hrsg. (2012). *Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen ; mit 497 Bildern, 95 Tabellen und 21 Tafeln*. 5., neu bearbeitete Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag. ISBN: 978-3-446-42073-1. DOI: 42073.
- Mehmert, P. (2003). *Numerische Simulation des Metallschutzgasschweißens von Grobblechen aus un- und niedriglegiertem Feinkornbaustahl*. URL: [https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/import\\_mods\\_00000776](https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/import_mods_00000776).
- Mehnen, J., Ding, J., Lockett, H. und Kazanas, P. (2014). "Design study for wire and arc additive manufacture". In: *International Journal of Product Development* 19.1/2/3, S. 2. ISSN: 1477-9056. DOI: 10.1504/IJPD.2014.060028.
- Müller, J., Grabowski, M., Müller, C., Hensel, J., Unglaub, J., Thiele, K., Kloft, H. und Dilger, K. (2019). "Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction". In: *Metals* 9.7, S. 725. DOI: 10.3390/met9070725.
- Müller, J., Hensel, J. und Dilger, K. (2022). "Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures". In: *Welding in the World* 66.3, S. 395–407. ISSN: 0043-2288. DOI: 10.1007/s40194-021-01204-1.
- Muth, J. (2021). "Analyse der ökologischen Auswirkungen von additiv gefertigten Bauteilen aus Stahl". Bachelorarbeit. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Nguyen, V.-T., Minh, P. S., Uyen, T. M. T., Do, T. T., Ngoc, H. V. T., Le, M.-T. und van Tien Nguyen, T. (2023). "WAAM Technique: Process Parameters Affecting the Mechanical Properties and Microstructures of Low-Carbon Steel". In: *Metals* 13.5, S. 873. DOI: 10.3390/met13050873.
- Prado-Cerqueira, J. L., Camacho, A. M., Diéguez, J. L., Rodríguez-Prieto, Á., Aragón, A. M., Lorenzo-Martín, C. und Yanguas-Gil, Á. (2018). "Analysis of Favorable Process Conditions for the Manufacturing of Thin-Wall Pieces of Mild Steel Obtained by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)". In: *Materials (Basel, Switzerland)* 11.8. ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma11081449.
- Rafieezad, M., Nemani, A. V., Ghaffari, M. und Nasiri, A. (2021). "On Microstructure and Mechanical Properties of a Low-Carbon Low-Alloy Steel Block Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing". In: *Journal of Materials Engineering and Performance* 30.7, S. 4937–4945. ISSN: 1059-9495. DOI: 10.1007/s11665-021-05568-9.
-

- Ramonell, C. und Chacón, R. (2021). "On the topological optimization of horizontal links in eccentrically braced frames". In: *Journal of Constructional Steel Research* 185, S. 106887. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106887.
- Rauch, M., Hascoet, J.-Y. und Querard, V. (2021). "A Multiaxis Tool Path Generation Approach for Thin Wall Structures Made with WAAM". In: *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5.4, S. 128. DOI: 10.3390/jmmp5040128.
- Reimann, J., Henckell, P., Ali, Y., Hammer, S., Rauch, A., Hildebrand, J. und Bergmann, J. P. (2021). "Production of Topology-optimised Structural Nodes Using Arc-based, Additive Manufacturing with GMAW Welding Process". In: *Journal of Civil Engineering and Construction* 10.2, S. 101–107. DOI: 10.32732/jceec.2021.10.2.101.
- Reimann, J., Hildebrand, J. und Bergmann, J. P. (2020). *3D-Weld - 3D gedruckte Knotenpunkte aus Stahllegierungen für bionische Tragstrukturen*. Bd. F 3208. Forschungsinitiative Zukunft Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. ISBN: 978-3-7388-0472-0.
- Reisgen, U., Sharma, R., Mann, S. und Oster, L. (2020). "Increasing the manufacturing efficiency of WAAM by advanced cooling strategies". In: *Welding in the World* 64.8, S. 1409–1416. ISSN: 0043-2288. DOI: 10.1007/s40194-020-00930-2.
- Ron, Levy, Dolev, Leon, Shirizly und Aghion (2019). "Environmental Behavior of Low Carbon Steel Produced by a Wire Arc Additive Manufacturing Process". In: *Metals* 9.8, S. 888. DOI: 10.3390/met9080888.
- Schulze, G. (2009). *Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe*. 4. Aufl. 2010. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-03182-3. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1494267>.
- Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie: Cold Metal Transfer – ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess* (2013). Stand: März 2013. WEKA-Praxislösungen. Kissing: WEKA-Media. ISBN: 978-3-8111-6879-4.
- Seifi, H., Rezaee Javan, A., Xu, S., Zhao, Y. und Xie, Y. M. (2018). "Design optimization and additive manufacturing of nodes in gridshell structures". In: *Engineering Structures* 160, S. 161–170. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.01.036.
- Siewert, E. (2014). "Experimentelle Analyse des Elektrodenwerkstoffübergangs beim Metallschutzgasschweißen mit gepulstem Schweißstrom". München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2014. Neubiberg: Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München. DOI: 4183.
- Silvestru, V.-A., Ariza, I., Vienne, J., Michel, L., Aguilar Sanchez, A. M., Angst, U., Rust, R., Gramazio, F., Kohler, M. und Taras, A. (2021). "Performance under tensile loading of point-by-point wire and arc additively manufactured steel bars for structural components". In: *Materials & Design* 205, S. 109740. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109740.
- Sood, A., Schimmel, J., Ferreira, V. M., Bosman, M., Goulas, C., Popovich, V. und Hermans, M. J. (2023). "Directed energy deposition of Invar 36 alloy using cold wire pulsed gas tungsten arc welding: Effect of heat input on the microstructure and functional behaviour". In: *Journal of Materials Research and Technology* 25, S. 6183–6197. ISSN: 22387854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.06.280.
- Spencer, J. D., Dickens, P. M. und Wykes, C. M. (1998). "Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding". In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 212.3, S. 175–182. ISSN: 0954-4054. DOI: 10.1243/0954405981515590.

- 
- Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N. und Sharma, D. (2011). "Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing". In: *Computer-Aided Design* 43.4, S. 331–344. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2011.01.006.
- Svanberg, K. (1987). "The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization". In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 24.2, S. 359–373. ISSN: 0029-5981. DOI: 10.1002/nme.1620240207.
- Tang, S., Wang, G., Song, H., Li, R. und Zhang, H. (2021). "A novel method of bead modeling and control for wire and arc additive manufacturing". In: *Rapid Prototyping Journal* 27.2, S. 311–320. ISSN: 1355-2546. DOI: 10.1108/RPJ-05-2020-0097.
- Tang, Y. T., Campbell, J. E., Burley, M., Dean, J., Reed, R. C. und Clyne, T. W. (2021). "Profilometry-based indentation plastometry to obtain stress-strain curves from anisotropic superalloy components made by additive manufacturing". In: *Materialia* 15, S. 101017. ISSN: 25891529. DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101017.
- Tankova, T., Andrade, D., Branco, R., Zhu, C., Rodrigues, D. und Da Simões Silva, L. (2022). "Characterization of robotized CMT-WAAM carbon steel". In: *Journal of Constructional Steel Research* 199, S. 107624. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107624.
- Tripathi, U., Saini, N., Mulik, R. S. und Mahapatra, M. M. (2022). "Effect of build direction on the microstructure evolution and their mechanical properties using GTAW based wire arc additive manufacturing". In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 37, S. 103–109. ISSN: 17555817. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.01.010.
- UNEP (2020). *2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector: Executive Summary*. Nairobi: United Nations Environment Programme. URL: <https://drive.google.com/file/d/1k2X0oASP1-RUSi90RdKLMkrBfa1v29yW/view> (besucht am 27.03.2024).
- UNEP (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Nairobi: United Nations Environment Programme. URL: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction> (besucht am 27.03.2024).
- van Bolderen, G. (2017). "Exploration of Stability of 3D-Printed Steel Members: A study to buckling behaviour of wire and arc additively manufactured stainless steel tubular columns". Masterthesis. Delft: TU Delft. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:cf099386-6a89-44f6-849c-0738177e7ea1>.
- Venturini, G., Montecvecchi, F., Scippa, A. und Campatelli, G. (2016). "Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features". In: *Procedia CIRP* 55, S. 95–100. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.043.
- Waldschmitt, B., Costanzi, C. B., Knaack, U. und Lange, J. (2022). "3d printing of column structures for architectural applications". In: *Architecture, Structures and Construction* 2.4, S. 565–574. ISSN: 2730-9886. DOI: 10.1007/s44150-022-00050-z.
- Wang, F., Williams, S., Colegrove, P. und Antonysamy, A. A. (2013). "Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V". In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 44.2, S. 968–977. ISSN: 1073-5623. DOI: 10.1007/s11661-012-1444-6.
-

- 
- Wang, H., Du, W., Zhao, Y., Wang, Y., Hao, R. und Yang, M. (2021). "Joints for treelike column structures based on generative design and additive manufacturing". In: *Journal of Constructional Steel Research* 184, S. 106794. ISSN: 0143974X. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106794.
- Wang, J., Evernden, M., Chater, B. und Pan, J. (2021). "Printing imperfections – geometric patterns to improve resistances of 3D printed steel plates". In: *ce/papers* 4.2-4, S. 1822–1828. ISSN: 2509-7075. DOI: 10.1002/cepa.1491.
- Xiong, J., Lei, Y., Chen, H. und Zhang, G. (2017). "Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition". In: *Journal of Materials Processing Technology* 240, S. 397–403. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013616303685>.
- Xiong, J., Zhang, G., Gao, H. und Wu, L. (2013). "Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing". In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29.2, S. 417–423. ISSN: 07365845. DOI: 10.1016/j.rcim.2012.09.011.
- Xiong, J., Zhang, G., Hu, J. und Wu, L. (2014). "Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis". In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 25.1, S. 157–163. ISSN: 0956-5515. DOI: 10.1007/s10845-012-0682-1.
- Xiong, J., Zhang, Y. und Pi, Y. (2021). "Control of deposition height in WAAM using visual inspection of previous and current layers". In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 32.8, S. 2209–2217. ISSN: 0956-5515. DOI: 10.1007/s10845-020-01634-6.
- Ye, J., Liu, Y., Yang, Y., Wang, Z., Zhao, O. und Zhao, Y. (2023). "Testing, analysis and design of wire and arc additively manufactured steel bolted connections". In: *Engineering Structures* 296, S. 116939. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116939.
- Yuan, L., Ding, D., Pan, Z., Yu, Z., Wu, B., van Duin, S., Li, H. und Li, W. (2020). "Application of Multidirectional Robotic Wire Arc Additive Manufacturing Process for the Fabrication of Complex Metallic Parts". In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16.1, S. 454–464. ISSN: 1551-3203. DOI: 10.1109/TII.2019.2935233.
- Zhang, R., Gardner, L., Buchanan, C., Matilainen, V.-P., Piili, H. und Salminen, A. (2021). "Testing and analysis of additively manufactured stainless steel CHS in compression". In: *Thin-Walled Structures* 159, S. 107270. ISSN: 02638231. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107270.
- Zhang, R., Meng, X. und Gardner, L. (2022). "Shape optimisation of stainless steel corrugated cylindrical shells for additive manufacturing". In: *Engineering Structures* 270, S. 114857. ISSN: 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114857.

## Normen

- DIN 50125 (2022). *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 66025-1 (1983). *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen: Allgemeines*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.



- DIN 8580 (2022). *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 10025-2 (2019). *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen: Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; Deutsche Fassung EN 10025-2:2019*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1990 (2021). *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung: Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1993-1-1 (2010). *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*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1993-1-5 (2017). *Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009 + A1:2017*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 1993-1-8 (2010). *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 6892-1 (2020). *Metallische Werkstoffe - Zugversuch: Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2019*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO/ASTM 52900 (2022). *Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021): Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO/ASTM 52939 (2024). *Additive Fertigung für das Bauwesen: Grundsätze der Qualifizierung - Struktur- und Infrastrukturelemente (ISO/ASTM 52939:2023); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52939:2023*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 6983-1 (2009). *Automationssysteme und Integration: Steuerung von Maschinen - Programmformat und Definition von Adresswörtern - Teil 1: Datenformat für Positionierung, Linearbewegungen und Bahnsteuerungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI 3405 (2014). *Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

## Internetquellen

- Additive Manufacturing in Construction (2024a). *Project A 07: Networking with other projects Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Complex Individualized Steel Components*. URL: <https://amc-trr277.de/projects/project-area-a/focus-area-project-a07/> (besucht am 27.03.2024).
- Additive Manufacturing in Construction (2024b). *Sonderforschungsbereich Transregio 277*. URL: <https://amc-trr277.de/> (besucht am 27.03.2024).

- 
- Jansen (2024). *Study VISS<sup>3</sup> free-form facade with 3D printed steel nodes*. URL: <https://www.jansen.com/en/building-systems-profile-systems-steel/topics/jansen-viss3.html> (besucht am 27.03.2024).
- MX3D (2024a). *a Smarter Bridge*. URL: <https://mx3d.com/industries/design/smart-bridge/> (besucht am 27.03.2024).
- MX3D (2024b). *Connector for Takenaka*. URL: <https://mx3d.com/industries/construction/connector-for-takenaka/> (besucht am 27.03.2024).
- MX3D (2024c). *WAAM for Architecture and Construction*. URL: <https://mx3d.com/industries/architecture-construction/> (besucht am 27.03.2024).
- Plastometrex (2024). *Vorstellung*. URL: <https://plastometrex.com/> (besucht am 27.03.2024).
- Statista (2024a). *Büroflächenleerstandsquote in den Top 7-Bürostandorten in Deutschland in den Jahren von 1995 bis 2023*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173738/umfrage/leerstand-der-buerogebaeude-der-top-buerostandorte-in-deutschland-seit-2009/> (besucht am 27.03.2024).
- Statista (2024b). *Leerstandsquote von Büroflächen in Frankfurt am Main in den Jahren von 2010 bis 2023*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/261008/umfrage/leerstandsquote-von-bueroflaechen-in-frankfurt-am-main/> (besucht am 27.03.2024).
- Umweltbundesamt (2023). *Abfallaufkommen in Deutschland*. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> (besucht am 27.03.2024).
- WAAMMAT (2019). *Documents*. URL: <https://waammat.com/documents> (besucht am 27.03.2024).

---

# A ERGEBNISSE ZU MATERIALUNTERSUCHUNGEN ANDERER FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

# A Ergebnisse zu Materialuntersuchungen anderer Forschungseinrichtungen

| Veröffentlichung        | Draht    |             | Gas               |                              |                             | angegebener Schweißprozess | Prozessgrößen |                  |                |              |                 |   |                    | Ergebnisse Zugversuch |                     |                      |                   |              |
|-------------------------|----------|-------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------|----------------|--------------|-----------------|---|--------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|
|                         | Material | Durchmesser | Argon-Anteil in % | CO <sub>2</sub> -Anteil in % | O <sub>2</sub> -Anteil in % |                            | I in A        | U in V           | Slicing Ansatz | WFS in m/min | TS in m/min     | Wartezeit zwischen den Lagen und/oder Zwischenlagentemperatur | Belastungsrichtung | E-Modul GPa           | Streckgrenze in MPa | Zugfestigkeit in MPa | Bruchdehnung in % | Versuchszahl |
| Lu et al. (2017)        | ER70S-6  | 0,8 mm      | 95                | 5                            |                             | 132                        | 20            | 1 Bahn je Lage   | 7,3            | 0,6          |                 | 0   | 519,5 ± 8,3        | 693,5 ± 8,5           | 36,8 ± 0,2          | 3                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 0,8 mm      | 95                | 5                            |                             | 132                        | 20            | 1 Bahn je Lage   | 7,3            | 0,6          |                 | 90  | 461,5 ± 6,3        | 618,5 ± 10,8          | 28,2 ± 0,5          | 3                    |                   |              |
| Astarita et al. (2021)  | ER70S-6  | 0,8 mm      |                   |                              |                             | 80                         | 20            | 1 Bahn je Lage   | 4,6            | 0,2          |                 | 0   | 214                | 373                   | 498                 | 29,5                 | 1                 |              |
|                         | ER70S-6  | 0,8 mm      |                   |                              |                             | 80                         | 20            | 1 Bahn je Lage   | 4,6            | 0,2          |                 | 0   | 194                | 411                   | 536                 |                      | 1                 |              |
|                         | ER70S-6  | 0,8 mm      |                   |                              |                             | 80                         | 20            | 1 Bahn je Lage   | 4,6            | 0,2          |                 | 90  | 208                | 415                   | 561                 | 29                   | 1                 |              |
| Müller et al. (2019)    | ER70S-6  | 0,8 mm      |                   |                              |                             | 80                         | 20            | 1 Bahn je Lage   | 4,6            | 0,2          |                 | 90  | 213                | 385                   | 520                 | 30                   | 1                 |              |
|                         | G4Si1    | 1,0 mm      | 82                | 18                           |                             | 218                        | 27,6          | point by point   | 10,6           |              | 200 °C          | 90  | 180                | 265                   | 445                 | 49,7                 | 1                 |              |
|                         | G4Si1    | 1,0 mm      | 82                | 18                           |                             | 158                        | 11,1          | point by point   | 5              |              | 200 °C          | 90  | 198                | 410                   | 554                 | 46,3                 | 1                 |              |
| Rafieezad et al. (2019) | G4Si1    | 1,0 mm      | 82                | 18                           |                             | 204                        | 16,4          | point by point   | 9,4            |              | 200 °C          | 90  | 191                | 390                   | 565                 | 47                   | 1                 |              |
|                         | ER70S-6  | 0,9 mm      | 100               |                              |                             | 320                        | 28            | 6 Bahnen je Lage | 6,24           | 0,3          | 10 min / 165 °C | 0   | 396 ± 26,0         | 503 ± 21,0            | 35 ± 2,0            | 6                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 0,9 mm      | 100               |                              |                             | 320                        | 28            | 6 Bahnen je Lage | 6,24           | 0,3          | 10 min / 165 °C | 90  | 396 ± 26,0         | 503 ± 21,0            | 12 ± 3,0            | 6                    |                   |              |
| Ron et al. (2019)       | ER70S-6  | 1,2 mm      | 98                | 2                            |                             | 210                        | 23,9          | 1 Bahn je Lage   | 6,1            | 0,14         | 66,5 s          | 90  | 365,9 ± 46,0       | 475,7 ± 2,3           | 34,6 ± 3,6          | 6                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | Oszillierend     | 8              | 0,2          | 400 °C          | 90  | 338 ± 4,0          | 474 ± 1,0             | 36 ± 2,0            | 6                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | Oszillierend     | 8              | 0,2          | 400 °C          | 0   | 354 ± 13,0         | 478 ± 6,0             | 38 ± 3,0            | 6                    |                   |              |
| Aldalur et al. (2020)   | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | 3 Bahnen je Lage | 8              | 0,65         | 400 °C          | 90  | 368 ± 4,0          | 501 ± 3,0             | 32 ± 1,0            | 6                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | 3 Bahnen je Lage | 8              | 0,65         | 400 °C          | 0   | 368 ± 12,0         | 498 ± 9,0             | 36 ± 4,0            | 6                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | 3 Bahnen je Lage | 8              | 0,65         | 400 °C          | 0   | 368 ± 12,0         | 498 ± 9,0             | 36 ± 4,0            | 6                    |                   |              |
| Ermakova et al. (2020)  | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | Oszillierend     | 7,5            | 0,44         | 120 s           | 0   | 209                | 390                   | 522                 | 44                   | 2                 |              |
|                         | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | 300                        | 26,8          | Oszillierend     | 7,5            | 0,44         | 120 s           | 90  | 221                | 365                   | 518                 | 43                   | 2                 |              |
| Lange et al. (2020)     | G3Si1    | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | 210                        | 23,9          | 1 Bahn je Lage   | 6,1            | 0,14         | 66,5 s          | 90  | 365,9 ± 46,0       | 475,7 ± 2,3           | 34,6 ± 3,6          | 6                    |                   |              |
|                         | G3Si1    | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | 210                        | 23,9          | 1 Bahn je Lage   | 6,1            | 0,14         | 66,5 s          | 90  | 365,9 ± 46,0       | 475,7 ± 2,3           | 34,6 ± 3,6          | 6                    |                   |              |
| Le et al. (2020)        | ER70S-6  | 1,2 mm      | 100               |                              |                             | 70                         | 80            |                  |                |              | 60 s            | 0   | 3206               | 4298                  |                     | 3                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 1,2 mm      | 100               |                              |                             | 70                         | 80            |                  |                |              | 60 s            | 90  | 3628               | 4797                  |                     | 3                    |                   |              |
| Nemani et al. (2020)    | ER70S-6  | 0,9 mm      |                   |                              |                             |                            |               |                  |                |              | 165 °C / 10 min | 0   | 497,21             | 352                   |                     | 5                    |                   |              |
|                         | ER70S-6  | 0,9 mm      |                   |                              |                             |                            |               |                  |                |              | 165 °C / 10 min | 90  | 504,21             | 123                   |                     | 5                    |                   |              |

| Veröffentlichung         | Draht    |             | Gas               |                              |                             | Prozessgrößen              |        |        |                   | Ergebnisse Zugversuch |             |   |                    |             |                     |                      |                   |              |
|--------------------------|----------|-------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------|--------|-------------------|-----------------------|-------------|---|--------------------|-------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------|
|                          | Material | Durchmesser | Argon-Anteil in % | CO <sub>2</sub> -Anteil in % | O <sub>2</sub> -Anteil in % | angegebener Schweißprozess | I in A | U in V | Slicing Ansatz    | WFS in m/min          | TS in m/min | Wartezeit zwischen den Lagen und/oder Zwischenlagentemperatur | Belastungsrichtung | E-Modul GPa | Streckgrenze in MPa | Zugfestigkeit in MPa | Bruchdehnung in % | Versuchszahl |
| Ayan und Kahraman (2021) | ER70S-6  | 1,2 mm      | 86                | 12                           | 2                           |                            | 95     | 23     | 1 Bahn je Lage    | 2                     | 0,1         |   | 0                  |             |                     | 451                  | 30                | 2            |
|                          | ER70S-6  | 1,2 mm      | 86                | 12                           | 2                           |                            | 95     | 23     | 1 Bahn je Lage    | 2                     | 0,1         |   | 45                 |             |                     | 451                  | 29                | 2            |
|                          | ER70S-6  | 1,2 mm      | 86                | 12                           | 2                           |                            | 95     | 23     | 1 Bahn je Lage    | 2                     | 0,1         |   | 90                 |             |                     | 444                  | 28                | 2            |
| Ma et al. (2021)         | ER70S-6  | 1,0 mm      | 95                | 5                            |                             |                            | 180    | 24,2   | 1 Bahn je Lage    |                       | 0,6         | 60 s  | 90                 |             | 342                 | 464                  | 38,7              | 6            |
| Rafieazad et al. (2021)  | ER70S-6  | 0,9 mm      | 100               |                              |                             |                            | 320    | 28     | 40 Bahnen je Lage | 6,24                  | 0,3         | 10 min  | 0                  |             | 406± 23,0           | 524± 13,0            | 37± 3,0           | 5            |
|                          | ER70S-6  | 0,9 mm      | 100               |                              |                             |                            | 320    | 28     | 40 Bahnen je Lage | 6,24                  | 0,3         | 10 min  | 45                 |             | 406± 23,0           | 524± 13,0            | 37± 2,0           | 5            |
|                          | ER70S-6  | 0,9 mm      | 100               |                              |                             |                            | 320    | 28     | 40 Bahnen je Lage | 6,24                  | 0,3         | 10 min  | 90                 |             | 386± 26,0           | 405± 22,0            | 10± 2,0           | 5            |
| Silvestru et al. (2021)  | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 116    | 12,7   | point by point    | 2,4                   | 0,06        | 74,5 s  | 90                 | 192,9       | 361,3               | 485,3                | 32,4              | 5            |
|                          | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 112    | 12,5   | point by point    | 1,8                   | 0,06        | 58,5 s  | 90                 | 193,4       | 369,1               | 487,9                | 30,5              | 6            |
|                          | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 127    | 13,1   | point by point    | 2,4                   | 0,06        | 58,5 s  | 90                 | 194,1       | 363,4               | 496                  | 33,7              | 4            |
|                          | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 106    | 12,5   | point by point    | 2                     | 0,06        | 58,5 s  | 90                 | 196,2       | 366,5               | 496,1                | 31,5              | 4            |
|                          | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 104    | 12,5   | point by point    | 1,8                   | 0,06        | 58,5 s  | 90                 | 194,7       | 351,5               | 484,4                | 32,8              | 4            |
|                          | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 115    | 12,7   | point by point    | 2,4                   | 0,06        | 58,5 s  | 90                 | 208,1       | 344,2               | 481,9                | 33,7              | 4            |
| Xin et al. (2021)        | G3Si1    | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | CMT                        | 108    | 12,4   | point by point    | 1,8                   | 0,06        | 58,5 s  | 90                 | 203,3       | 360,9               | 493,9                | 33,6              | 4            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 0                  | 210,8       | 401,6               | 575,6                | 27,4              | 1            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 0                  | 204,2       | 382,8               | 564                  | 30                | 1            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 45                 | 182,2       | 428,9               | 570,2                | 32                | 1            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 45                 | 206,9       | 418,4               | 576,8                | 32,5              | 1            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 45                 | 185,4       | 393,8               | 575,4                | 31,2              | 1            |
| ER70S-6                  | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 90                 | 216,7       | 455,7               | 598,2                | 31                | 1            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 90                 | 199,4       | 408,7               | 577,3                | 32,1              | 1            |
|                          | ER70S-6  | 1 mm        |                   |                              |                             |                            |        |        |                   |                       |             |   | 90                 | 182,8       | 394                 | 573,6                | 34,5              | 1            |

# A Ergebnisse zu Materialuntersuchungen anderer Forschungseinrichtungen

| Veröffentlichung    | Draht    |             | Gas               |                              |                             | Prozessgrößen              |        |        |                  |              |             |   | Ergebnisse Zugversuch |             |                     |                      |                   |                |
|---------------------|----------|-------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------|--------|------------------|--------------|-------------|---|-----------------------|-------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------|
|                     | Material | Durchmesser | Argon-Anteil in % | CO <sub>2</sub> -Anteil in % | O <sub>2</sub> -Anteil in % | angegebener Schweißprozess | I in A | U in V | Slicing Ansatz   | WFS in m/min | TS in m/min | Wartezeit zwischen den Lagen und/oder Zwischenlagentemperatur | Belastungsrichtung    | E-Modul GPa | Streckgrenze in MPa | Zugfestigkeit in MPa | Bruchdehnung in % | Versuchsanzahl |
| Guo et al. (2022)   | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 0                     | 214         | 292                 | 434                  | 40                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 80                | 20                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 0                     | 211         | 405                 | 503                  | 26                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 45                    | 212         | 329                 | 440                  | 34                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 80                | 20                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 45                    | 210         | 366                 | 482                  | 39                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 1,2 mm      | 80                | 20                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 90                    | 212         | 319                 | 444                  | 30                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 80                | 20                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 90                    | 209         | 372                 | 484                  | 35                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 0                     | 201,2       | 312                 | 428                  | 38                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 30                    | 200,5       | 310                 | 424                  | 38                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 45                    | 199,7       | 319                 | 424                  | 37                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 60                    | 204,5       | 311                 | 420                  | 35                | 3              |
| Huang et al. (2022) | ER70S-6  | 1,2 mm      | 82                | 18                           |                             | pulsed                     | 130    | 24,8   | 1 Bahn je Lage   | 4            | 0,48        | 30 s  | 90                    | 204,5       | 307                 | 418                  | 31                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 82                | 18                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 0                     | 211,5       | 390                 | 490                  | 38                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 82                | 18                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 30                    | 212,4       | 387                 | 483                  | 35                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 82                | 18                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 45                    | 222,2       | 392                 | 479                  | 32                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 82                | 18                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 60                    | 212,5       | 397                 | 459                  | 21                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 82                | 18                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 90                    | 215,7       | 392                 | 486                  | 33                | 3              |
|                     | ER70S-6  | 1 mm        | 98                | 2                            |                             | CMT                        | 155    | 15,7   | 3 Bahnen je Lage | 6            | 0,6         |   | 0                     | 202,1       | 373,2               | 499,3                | 37,8              | 3              |
|                     | ER70S-6  | 1 mm        | 98                | 2                            |                             | CMT                        | 155    | 15,7   | 3 Bahnen je Lage | 6            | 0,6         |   | 45                    | 245,7       | 383,7               | 511,8                | 36,9              | 3              |
|                     | ER70S-6  | 1 mm        | 98                | 2                            |                             | CMT                        | 155    | 15,7   | 3 Bahnen je Lage | 6            | 0,6         |   | 90                    | 237,1       | 375,7               | 501,5                | 36,2              | 3              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 99                |                              |                             |                            | 95     |        |                  | 0,8          | 0,08        |   | 0                     |             |                     | 450± 10,0            |                   |                |
| ER70S-6             | 0,8 mm   | 99          |                   |                              |                             | 95                         |        |        | 0,8              | 0,08         |             | 90  |                       |             | 437± 18,0           |                      |                   |                |
| Huang et al. (2023) | ER70S-6  | 0,8 mm      | 80                | 20                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 90                    | 205,7       | 412                 | 504                  | 24                | 1              |
|                     | ER70S-6  | 0,8 mm      | 80                | 20                           |                             | Short-arc                  | 54     | 14,8   | 1 Bahn je Lage   | 3            | 0,48        | 30 s  | 90                    | 207,1       | 415                 | 503                  | 21                | 1              |

---

# B WEITERE AUSFÜHRUNGEN, BILDER UND TABELLEN ZU KAPITEL 5

## B.1 Senkrechte Bleche

### B.1.1 Proben vor dem Versuch



(a) B2\_P



(b) B3\_P



(c) B4\_P



(d) B2\_S



(e) B3\_S



(f) B4\_S

**Abbildung B.1:** Zugproben der senkrechten Bleche vor dem Versuch  
Numerierung anhand der im Bild angegebenen letzten Zahl

### B.1.2 Proben nach dem Versuch



(a) B2\_P



(b) B3\_P



(c) B4\_P



(d) B2\_S



(e) B3\_S



(f) B4\_S

**Abbildung B.2:** Zugproben der senkrechten Bleche nach dem Versuch  
Nummerierung anhand von links nach rechts 1, 2, 3

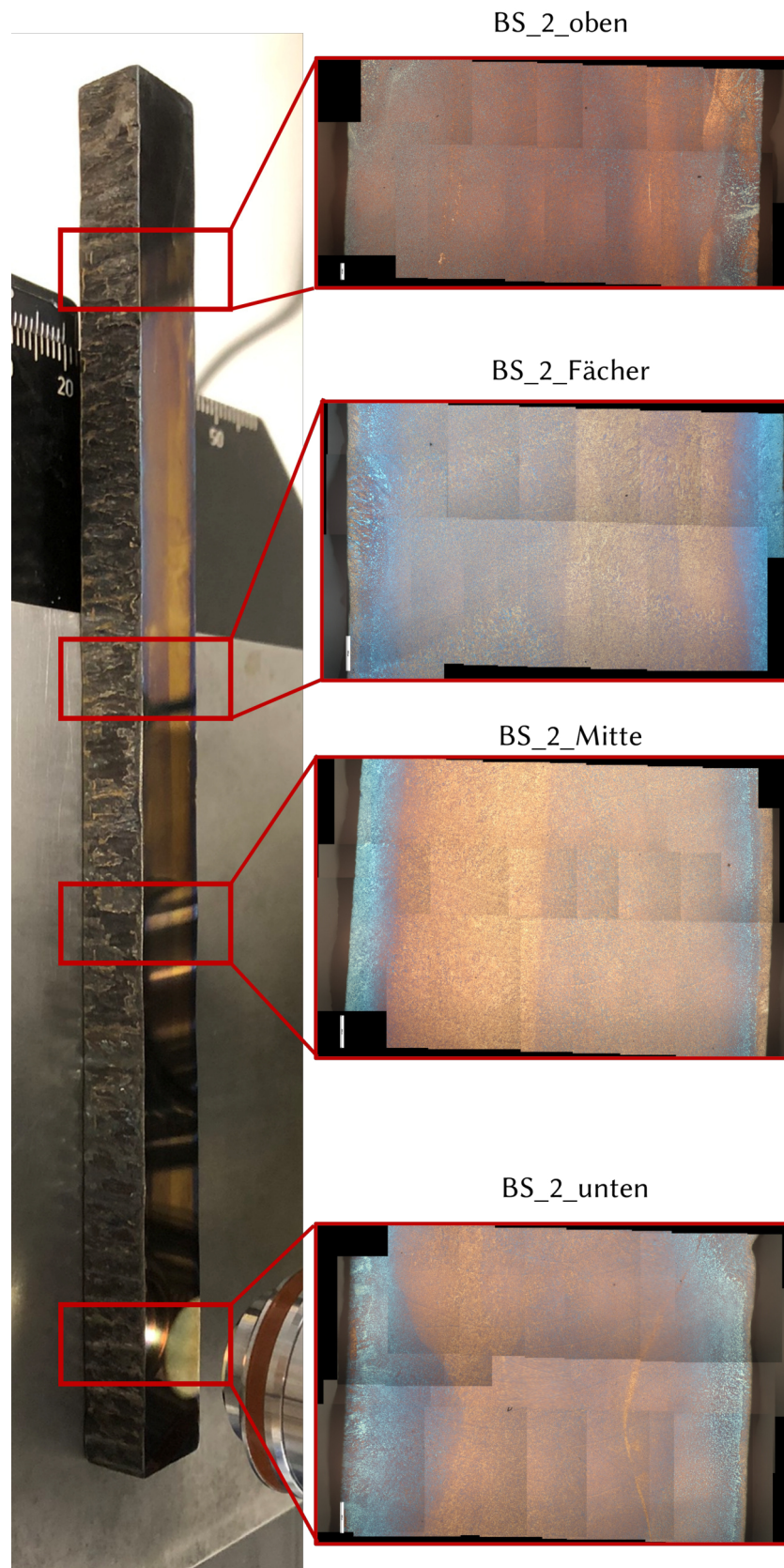


### B.1.3 Kennwerte

**Tabelle B.1:** Kennwerte aus den Zugversuchen der senkrechten Bleche

|        | Streckgrenze<br>in N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>in N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung | E-Modul<br>in N/mm <sup>2</sup> |
|--------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| B2.P_1 | 402,9                                | 489,2                                 | 0,31         | 196.078                         |
| B2.P_2 | 432,2                                | 530,9                                 | 0,31         | 204.081                         |
| B2.P_3 | 428,6                                | 511,6                                 | 0,32         | 196.078                         |
| B2.S_1 | 375,9                                | 497,1                                 | 0,30         | 1923.07                         |
| B2.S_2 | 395,2                                | 498,4                                 | 0,32         | 198.019                         |
| B2.S_3 | 383,8                                | 496,4                                 | 0,31         | 210.526                         |
| B3.P_1 | 452,8                                | 529,9                                 | 0,30         | 192.307                         |
| B3.P_2 | 431,6                                | 522,6                                 | 0,32         | 196.078                         |
| B3.P_3 | 459,5                                | 526,4                                 | 0,31         | 196.078                         |
| B3.S_1 | 418,0                                | 495,9                                 | 0,31         | 198.019                         |
| B3.S_2 | 388,4                                | 496,8                                 | 0,30         | 188.679                         |
| B3.S_3 | 407,5                                | 504,3                                 | 0,30         | 204.105                         |
| B4.P_1 | 468,8                                | 540,6                                 | 0,31         | 196.078                         |
| B4.P_2 | 462,6                                | 539,6                                 | 0,30         | 204.081                         |
| B4.P_3 | 499,1                                | 576,3                                 | 0,27         | 208.333                         |
| B4.S_1 | 408,0                                | 516,8                                 | 0,28         | 200.000                         |
| B4.S_2 | 407,2                                | 518,1                                 | 0,29         | 188.679                         |
| B4.S_3 | 408,6                                | 514,0                                 | 0,29         | 198.019                         |

### B.1.4 Übersicht Schliffe



**Abbildung B.3:** Übersicht erste betrachtete Stellen B2.S



**Abbildung B.4:** Übersicht erste betrachtete Stellen B4.S

## B.2 Kreuzproben

### B.2.1 Proben vor dem Versuch



(a) K1.A.3B.P



(b) K1.D.3B.P



(c) K2.G.3B.P



(d) K3.G.3B.P



(e) K4.G.3B.P



(f) K5.A.3B.P



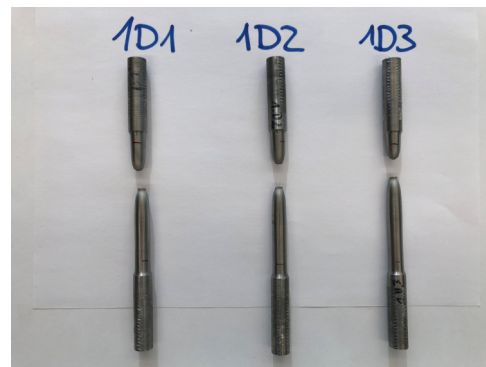
(g) K5.D.3B.P

**Abbildung B.5:** Zugproben der Kreuzungen vor dem Versuch  
Numerierung anhand der im Bild angegebenen letzten Zahl

## B.2.2 Proben nach dem Versuch



(a) K1.A.3B.P



(b) K1.D.3B.P



(c) K2.G.3B.P



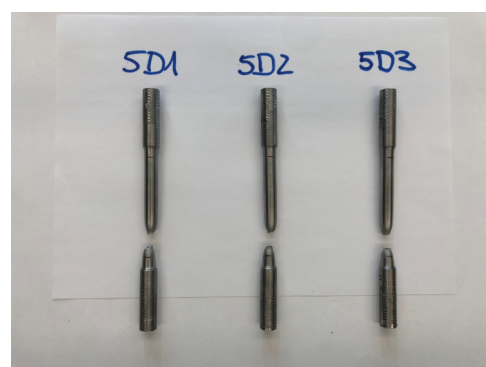
(d) K3.G.3B.P



(e) K4.G.3B.P



(f) K5.A.3B.P



(g) K5.D.3B.P

**Abbildung B.6:** Zugproben der Kreuzungen nach dem Versuch  
Numerierung anhand der im Bild angegebenen letzten Zahl

### B.2.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

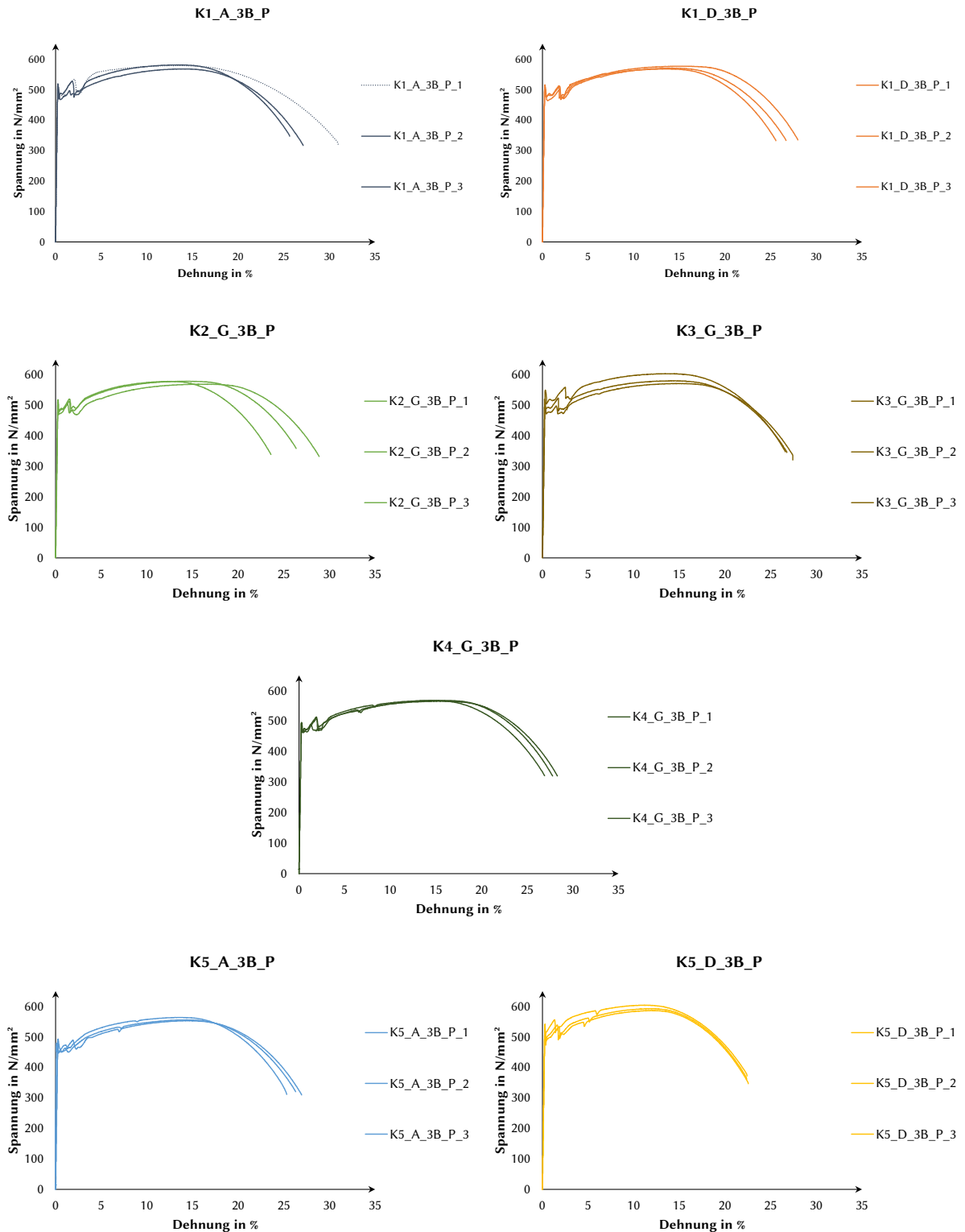


Abbildung B.7: Spannungs-Dehnungs-Kurven der Kreuzungsproben

## B.2.4 Kennwerte

**Tabelle B.2:** Kennwerte aus den Zugversuchen der Kreuzungsproben

|             | Entnahmestelle | Streckgrenze<br>in N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung |
|-------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| K1_A_3B_P_1 | Unten – Oben   | 521,9                                | 579,1                              | 0,301*       |
| K1_A_3B_P_2 | Unten – Mitte  | 510,6                                | 567,7                              | 0,265        |
| K1_A_3B_P_3 | Unten – Unten  | 518,7                                | 581,2                              | 0,250        |
| K1_D_3B_P_1 | Oben – Oben    | 512,1                                | 570,8                              | 0,259        |
| K1_D_3B_P_2 | Oben – Mitte   | 504,2                                | 567,7                              | 0,265        |
| K1_D_3B_P_3 | Oben – Unten   | 515,6                                | 576,9                              | 0,273        |
| K2_G_3B_P_1 | Oben           | 515,7                                | 578,9                              | 0,230        |
| K2_G_3B_P_2 | Mitten         | 518,5                                | 579,6                              | 0,259        |
| K2_G_3B_P_3 | Unten          | 501,7                                | 570,1                              | 0,283        |
| K3_G_3B_P_1 | Oben           | 550,2                                | 604,3                              | 0,259        |
| K3_G_3B_P_2 | Mitten         | 520,1                                | 580,7                              | 0,262        |
| K3_G_3B_P_3 | Unten          | 509,2                                | 572,3                              | 0,267        |
| K4_G_3B_P_1 | Oben           | 495,2                                | 567,8                              | 0,262        |
| K4_G_3B_P_2 | Mitten         | 494,7                                | 568,0                              | 0,271        |
| K4_G_3B_P_3 | Unten          | 492,0                                | 565,3                              | 0,277        |
| K5_A_3B_P_1 | Oben – Oben    | 488,2                                | 553,3                              | 0,264        |
| K5_A_3B_P_2 | Oben – Mitte   | 479,6                                | 556,4                              | 0,261        |
| K5_A_3B_P_3 | Oben – Unten   | 493,0                                | 564,2                              | 0,247        |
| K5_D_3B_P_1 | Unten – Oben   | 541,9                                | 604,5                              | 0,217        |
| K5_D_3B_P_2 | Unten – Mitte  | 532,6                                | 592,6                              | 0,217        |
| K5_D_3B_P_3 | Unten – Unten  | 522,0                                | 586,5                              | 0,220        |

\*falsche Messlänge eingestellt

## B.3 FE

### B.3.1 FE Sekantenzüge

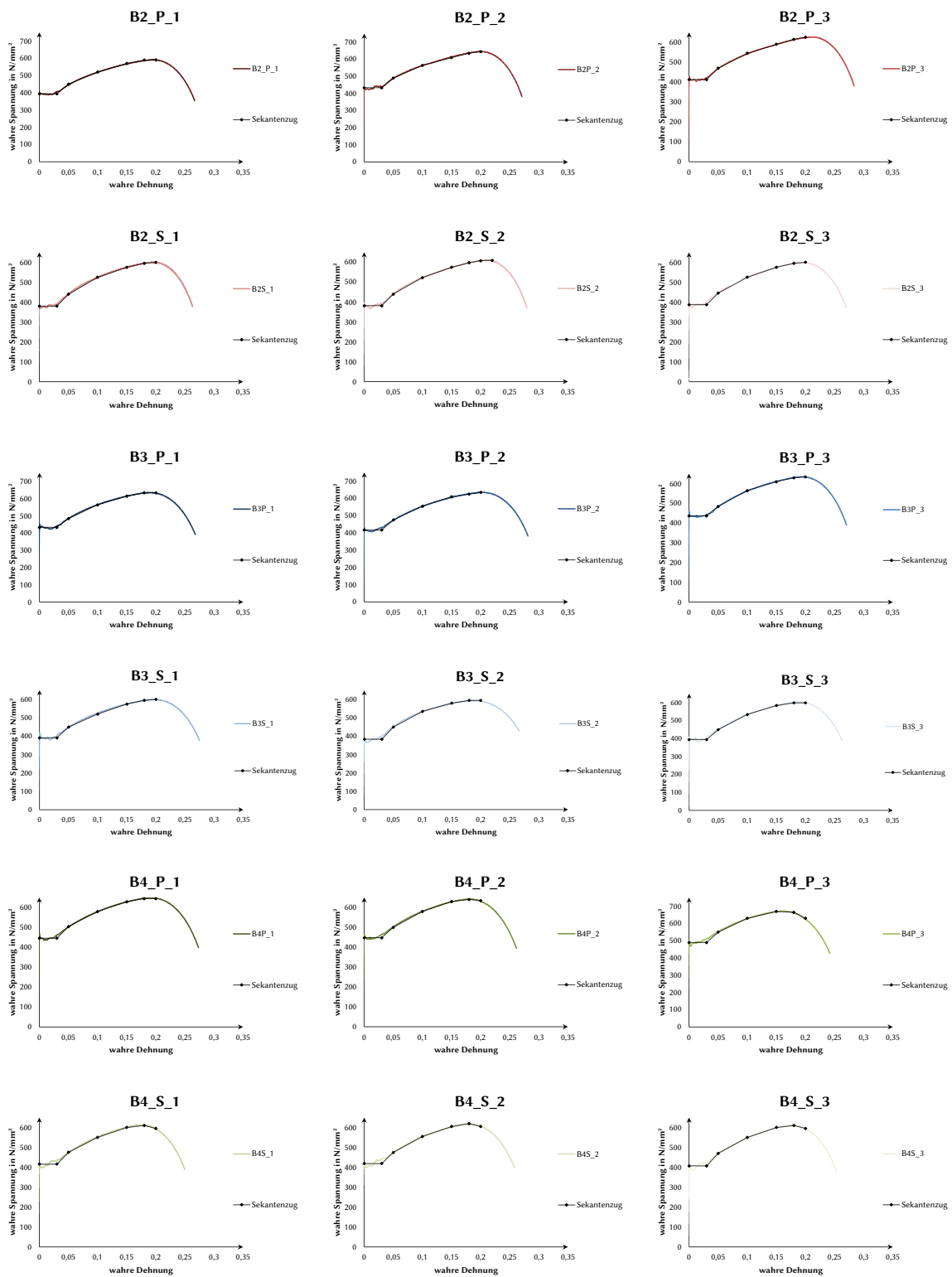


Abbildung B.8: Sekantenzüge



## B.3.2 FE Anpassung an Bahnanzahl und Belastungsrichtung

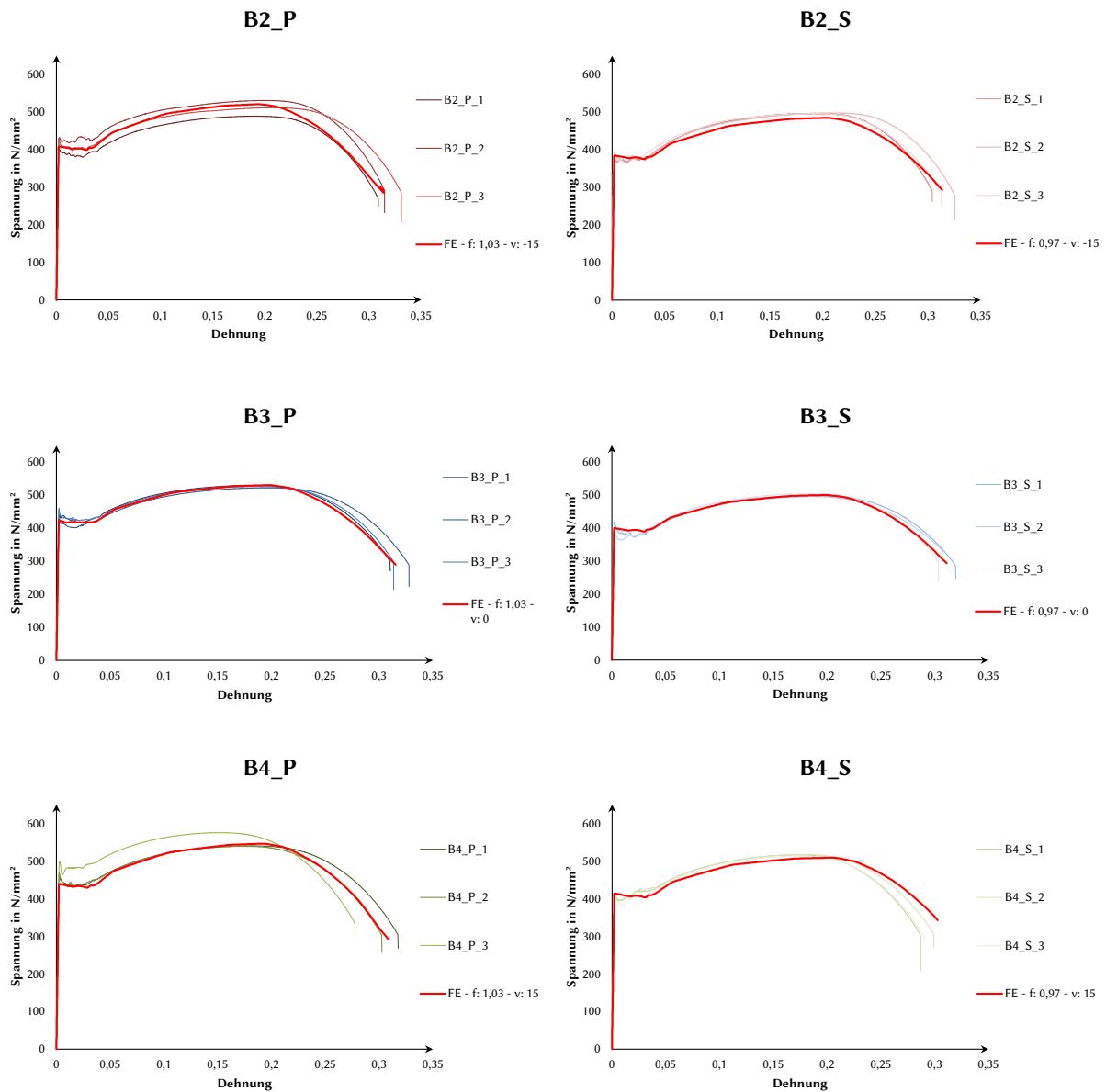


Abbildung B.9: Anpassung des Materials



# C WEITERE AUSFÜHRUNGEN, BILDER UND TABELLEN ZU KAPITEL 6

## C.1 Last-Verformungs-Kurven Lochleibungsuntersuchungen

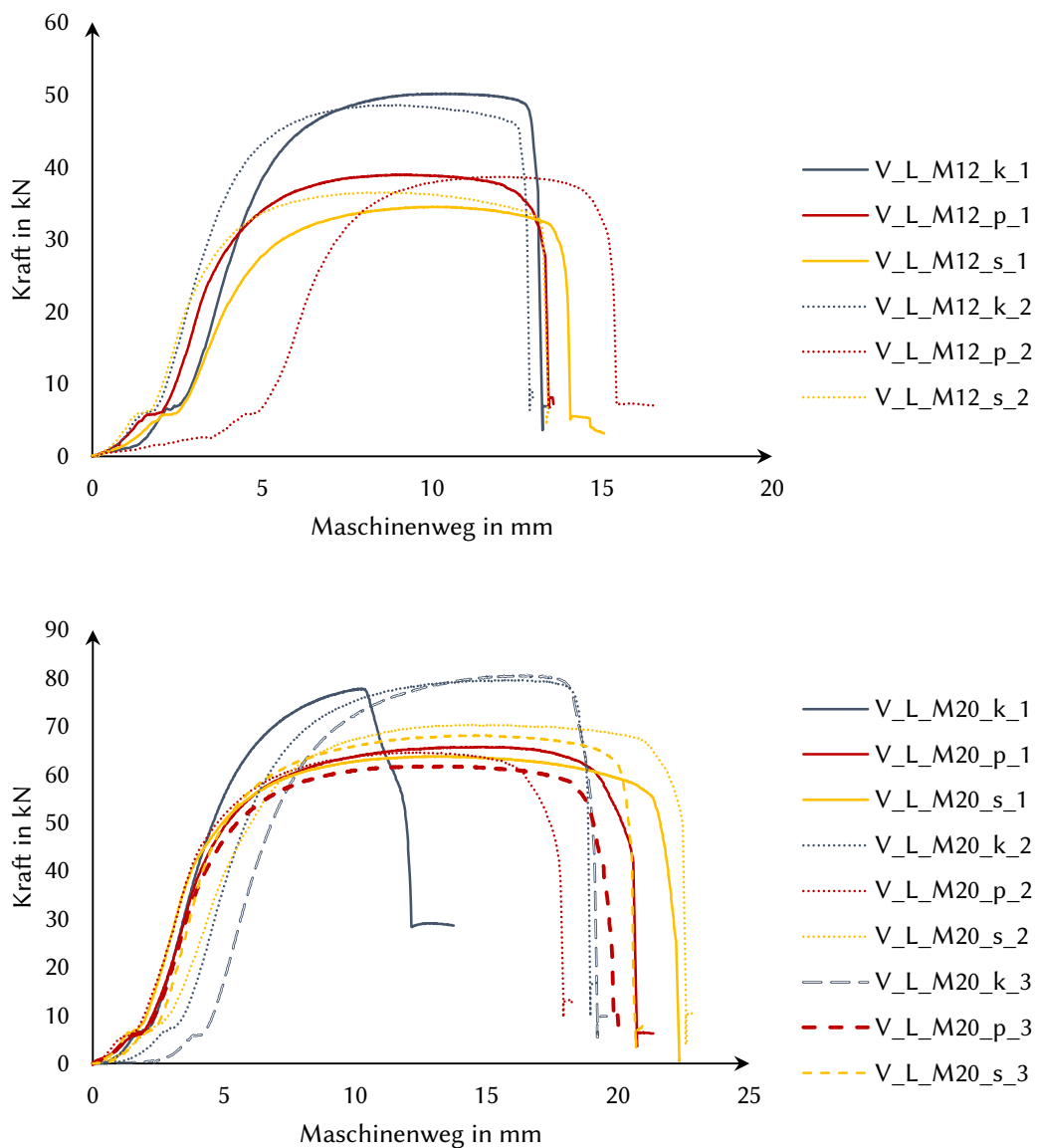


Abbildung C.1: Kraft-Verformungs-Kurven Lochleibungsuntersuchungen

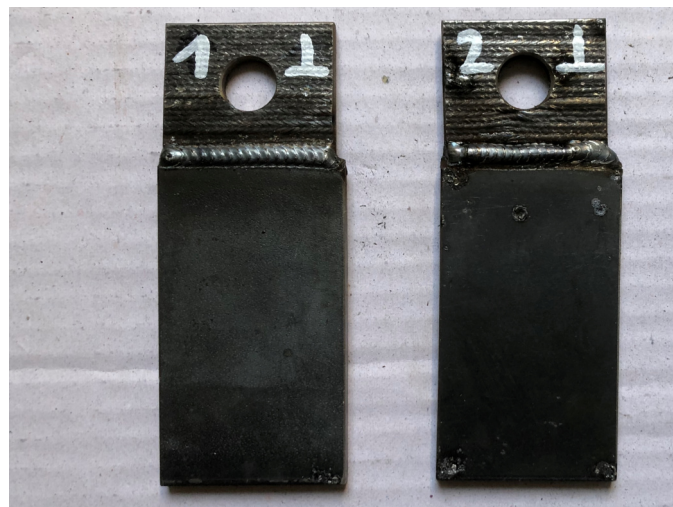
## C.2 Probekörper Lochleibungsuntersuchungen



(a) V.L.M12.k



(b) V.L.M12.p

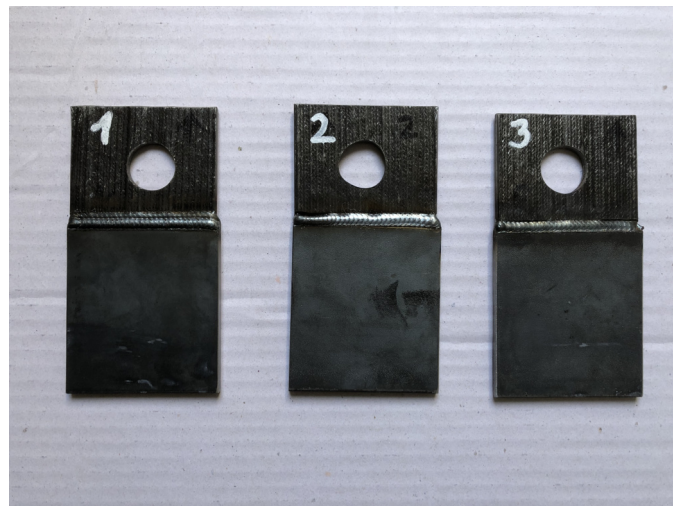


(c) V.L.M12.s

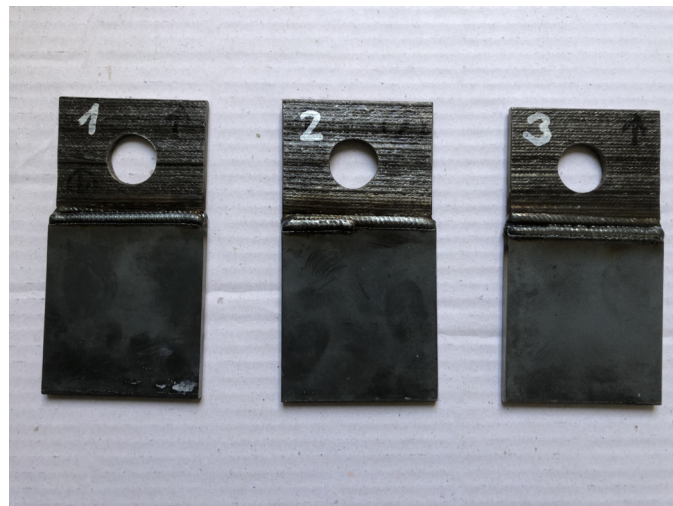
**Abbildung C.2:** Probekörper zur Untersuchung des Lochleibungstragverhaltens vor dem Versuch – Schraubengröße M12



(a) V.L.M20.k



(b) V.L.M20.p



(c) V.L.M20.s

**Abbildung C.3:** Probekörper zur Untersuchung des Lochleibungstragverhaltens vor dem Versuch – Schraubengröße M20



(a) V.L.M12.k

(b) V.L.M12.k



(c) V.L.M12.p



(d) V.L.M12.s

**Abbildung C.4:** Probekörper zur Untersuchung des Lochleibungstragverhaltens nach dem Versuch – Schraubengröße M12



(a) V.L.M20.k



(b) V.L.M20.p



(c) V.L.M20.s

**Abbildung C.5:** Probekörper zur Untersuchung des Lochleibungstragverhaltens nach dem Versuch – Schraubengröße M20





---

# D WEITERE AUSFÜHRUNGEN, BILDER UND TABELLEN ZU KAPITEL 8

## D.1 Robotercode

### D.1.1 Programmkopf

Beginn des Programms, die Variablen werden deklariert und die verwendeten Routinen aufgerufen.

```
PROGRAM ME_230404_Knoten_Uber EZ, PROG_ARM = 1, STACK = 2048

VAR
  i, l : INTEGER
  Im, Iv, Ir, Il, Is, Am, Amh, Aml, Amr, Ar, Arl, Al, Alr, R : ARRAY[6] OF POSITION
  Winkel : ARRAY[8] OF REAL
  Startpunkt : POSITION
  l1, l2, b, d, l10, l20 : REAL
  e0, a0, r0 : REAL
  z : REAL
  VAR m : REAL

ROUTINE arc_job(ai_njob : INTEGER) EXPORTED FROM wa_appl
ROUTINE arc_init EXPORTED FROM wa_appl
ROUTINE arc_start(ai_ntbl : INTEGER) EXPORTED FROM wa_appl
ROUTINE arc_end(ai_ntbl : INTEGER) EXPORTED FROM wa_appl
ROUTINE a_tool(ai_t_idx : INTEGER) EXPORTED FROM TT_TOOL
ROUTINE a_frame(ai_f_num : INTEGER) EXPORTED FROM tu_frame

ROUTINE Punkte_initialisieren EXPORTED FROM ME_230404_Knoten_Uber
ROUTINE Punkte_aktualisieren EXPORTED FROM ME_230404_Knoten_Uber
```

### D.1.2 Definition der Routine *Punkte\_initialisieren*

In der Routine *Punkte\_initialisieren* werden alle Koordinaten auf 0, 0, 0, 0, 0, 0 gesetzt.

```
ROUTINE Punkte_initialisieren
BEGIN
  FOR i := 1 TO 6 DO

    Im[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Iv[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Ir[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Il[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Is[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Am[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Amh[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Amr[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Aml[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Ar[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Arl[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Al[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    Alr[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)
    R[i] := POS(0, 0, 0, e0, a0, r0)

  ENDFOR
END Punkte_initialisieren
```

### D.1.3 Definition der Routine *Punkte\_aktualisieren*

In der Routine Punkte\_aktualisieren werden die Koordinaten der derzeitigen Lage anhand der Lagenhöhe  $z$  berechnet.

```

ROUTINE Punkte_aktualisieren
BEGIN
  l1 := 110 + m * 0.5 * z
  l2 := 120 + m * z
  FOR i := 1 TO 6 DO

    Im[i].X := l1 * COS(Winkel[i])
    Im[i].Y := l1 * SIN(Winkel[i])
    Im[i].Z := z

    Iv[i].X := (l1 + d * 7 / 8) * COS(Winkel[i])
    Iv[i].Y := (l1 + d * 7 / 8) * SIN(Winkel[i])
    Iv[i].Z := z

    Ir[i].X := (l1 - d * 15 / 16 * COS((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2)) * COS(Winkel[i]) -
    d * 15 / 16 * SIN((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2) * SIN(Winkel[i])
    Ir[i].Y := (l1 - d * 15 / 16 * COS((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2)) * SIN(Winkel[i]) +
    d * 15 / 16 * SIN((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2) * COS(Winkel[i])
    Ir[i].Z := z

    Il[i].X := (l1 - d * 15/16 * SIN((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2)) * COS(Winkel[i]) +
    d * 15 / 16 * COS((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2) * SIN(Winkel[i])
    Il[i].Y := (l1 - d * 15/16 * SIN((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2)) * SIN(Winkel[i]) -
    d * 15 / 16 * COS((180 - (Winkel[i + 1] - Winkel[i])) / 2) * COS(Winkel[i])
    Il[i].Z := z

    Is[i].X := l1 * COS((Winkel[i + 1] - Winkel[i]) / 2) * COS((Winkel[i] + Winkel[i + 1]) / 2)
    Is[i].Y := l1 * COS((Winkel[i + 1] - Winkel[i]) / 2) * SIN((Winkel[i] + Winkel[i + 1]) / 2)
    Is[i].Z := z

    Am[i].X := l2 * COS(Winkel[i])
    Am[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i])
    Am[i].Z := z

    Amh[i].X := (l2 - d * 15 / 16) * COS(Winkel[i])
    Amh[i].Y := (l2 - d * 15 / 16) * SIN(Winkel[i])
    Amh[i].Z := z

    Amr[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) - d * 15 / 16 * SIN(Winkel[i])
    Amr[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) + d * 15 / 16 * COS(Winkel[i])
    Amr[i].Z := z

    Aml[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) + d * 15 / 16 * SIN(Winkel[i])
    Aml[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) - d * 15 / 16 * COS(Winkel[i])
    Aml[i].Z := z

    Ar[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) - b / 2 * SIN(Winkel[i])
    Ar[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) + b / 2 * COS(Winkel[i])
    Ar[i].Z := z

    Arl[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) - (b / 2 - d * 15 / 16) * SIN(Winkel[i])
    Arl[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) + (b / 2 - d * 15 / 16) * COS(Winkel[i])
    Arl[i].Z := z

    Al[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) + b / 2 * SIN(Winkel[i])
    Al[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) - b / 2 * COS(Winkel[i])
    Al[i].Z := z

    Alr[i].X := l2 * COS(Winkel[i]) + (b / 2 - d * 15 / 16) * SIN(Winkel[i])
    Alr[i].Y := l2 * SIN(Winkel[i]) - (b / 2 - d * 15 / 16) * COS(Winkel[i])
    Alr[i].Z := z

    R[i].X := 1.28 * l2 * COS((Winkel[i + 1] - Winkel[i]) / 2) * COS((Winkel[i] + Winkel[i + 1]) / 2)
    R[i].Y := 1.28 * l2 * COS((Winkel[i + 1] - Winkel[i]) / 2) * SIN((Winkel[i] + Winkel[i + 1]) / 2)
    R[i].Z := z

  ENDFOR
END Punkte_aktualisieren

```

## D.1.4 Programm

Nachdem die Routinen definiert sind, beginnt das eigentliche Programm. Hierbei werden die verwendeten Koordinatensysteme aufgerufen. Und der Befehl gegeben, dass im Programm geschweißt wird. Dann werden die verwendeten Parameter gesetzt und die Punkte initialisiert.

Das Programm beginnt mit dem Hochzählen der For-Schleife für die Lagen. Anhand das z-Wertes werden die Koordinaten aktualisiert. Der Roboter fährt den Mittelpunkt der derzeitigen Lage mit einem vertikalen Abstand von 5 cm an. Mit der Select-Case Abfrage wird ermittelt in welcher der 12 definierten Lage das Programm sich befindet – die verschiedenen Cases werden im nächsten Abschnitt getrennt betrachtet.

Nachdem die entsprechende Lage ausgeführt wurde, fährt der Roboter 20 cm nach oben. Die Kühlung wird 90 Sekunden lang angeschaltet. Der Roboter wartet auf den Befehl zum Weitermachen – alle 10 Lagen wurde die Temperatur überwacht. Sobald der Befehl zum Weitermachen erfolgt, wird die Variable z um die Lagenhöhe von 1,25 mm erhöht, die For-Schleife erhöht die Variable der Lage l. Die For-Schleife wird von vorne ausgeführt. Nachdem die gewünschte Lagenanzahl erreicht ist, endet das Programm.

```

BEGIN
a_tool(4)
a_frame(6)
arc_init

e0 := 0
a0 := 180
r0 := 0

Punkte_initialisieren

l10 := 37.5
l20 := 115
b := 140
d := 4.46

m := 0.30000001
z := 0

Winkel[1] := 0
Winkel[2] := 65
Winkel[3] := 180 + Winkel[1]
Winkel[4] := 180 + Winkel[2]
Winkel[5] := Winkel[1] + 360
Winkel[6] := Winkel[2] + 360
Winkel[7] := Winkel[3] + 360
Winkel[8] := Winkel[4] + 360

FOR l := 1 TO 126 DO

    Punkte_aktualisieren
    MOVE LINEAR TO POS(0, 0, z + 50, e0, a0, r0)

        SELECT l MOD 12 OF
        - werden später erklärt
        ENDSELECT

    MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -200) IN TOOL

    $DOUT[101] := ON
    $DOUT[102] := ON
    DELAY 90000
    $DOUT[101] := OFF
    $DOUT[102] := OFF

    WAIT FOR $FDIN[21]
    z := z + 1.25

ENDFOR

END ME.230404.Knoten.Uber

```

## D.1.5 Case-Befehle für die 1 - 12. Lage

### Lage 1

```

CASE (1):
FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Aml[i + 1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20

MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Aml[i + 1])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Al[i + 1])
MOVE CIRCULAR TO (Ar[i]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i])
MOVE LINEAR TO (Im[i])
MOVE LINEAR TO (Il[i + 1])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR
    
```

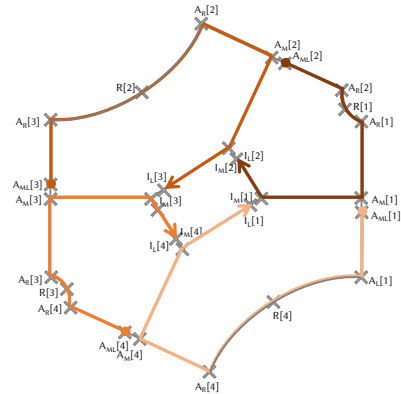


Abbildung D.1: Lage 1

### Lage 2

```

CASE (2):
Startpunkt := Ar[1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Ar[1])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Ar[i])
MOVE CIRCULAR TO (Al[i + 1]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Ar1[i + 1])
ENDFOR
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

Startpunkt := Is[4]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Im[5 - i])
ENDFOR
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Amh[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Amh[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Iv[i])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR
    
```

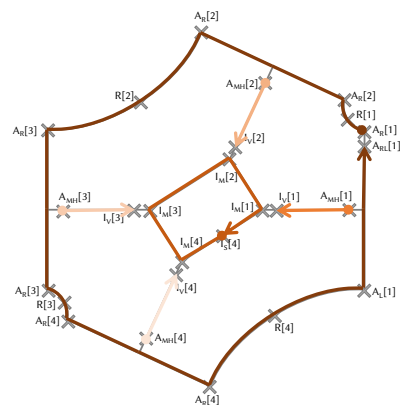


Abbildung D.2: Lage 2

### Lage 3

```

CASE (3):
FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Ir[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20

MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Ir[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Im[i + 1])
MOVE LINEAR TO (Am[i + 1])
MOVE LINEAR TO (Al[i + 1])
MOVE CIRCULAR TO (Ar[i]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Amr[i])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

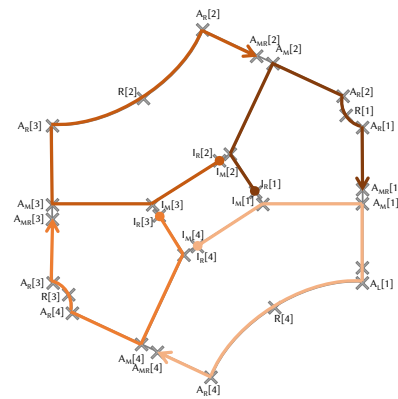


Abbildung D.3: Lage 3

### Lage 4

```

CASE (4):
FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Il[i + 1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20

MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Il[i + 1])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Im[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i])
MOVE LINEAR TO (Ar[i])
MOVE CIRCULAR TO (Al[i + 1]) VIA (R[i])

MOVE LINEAR TO (Am1[i + 1])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

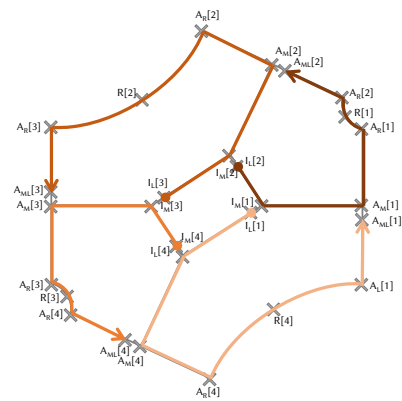


Abbildung D.4: Lage 4

### Lage 5

```

CASE (5):
Startpunkt := Al[5]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Al[5])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Al[6 - i])
MOVE CIRCULAR TO (Ar[5 - i]) VIA (R[5 - i])
MOVE LINEAR TO (Alr[5 - i])
ENDFOR
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

```

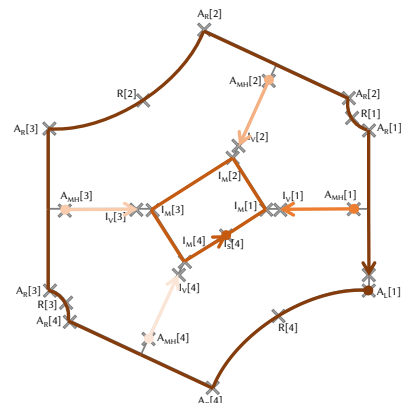


Abbildung D.5: Lage 5

```

Startpunkt := Is[4]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Im[i])
ENDFOR
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Amh[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Amh[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Iv[i])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

### Lage 6

```

CASE (6):
FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Amr[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20

MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Amr[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Ar[i])
MOVE CIRCULAR TO (Al[i + 1]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i + 1])
MOVE LINEAR TO (Im[i + 1])
MOVE LINEAR TO (Ir[i])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

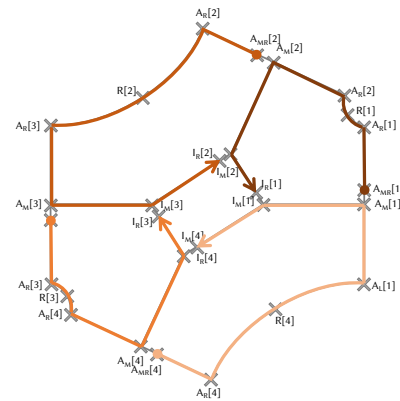


Abbildung D.6: Lage 6

### Lage 7

```

CASE (7):
FOR i := 2 TO 5 DO
Startpunkt := Ir[i - 1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20

MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Ir[i - 1])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Im[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i])
MOVE LINEAR TO (Ar[i])
MOVE CIRCULAR TO (Al[i + 1]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Am1[i + 1])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

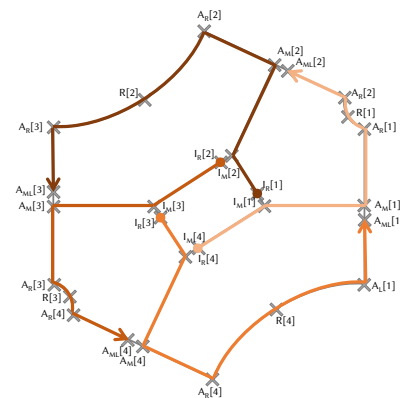


Abbildung D.7: Lage 7

## Lage 8

```

CASE (8):
Startpunkt := A1[5]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (A1[5])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (A1[6 - i])
MOVE CIRCULAR TO (Ar[5 - i]) VIA (R[5 - i])
MOVE LINEAR TO (Alr[5 - i])
ENDFOR
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

Startpunkt := Is[4]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Im[5 - i])
ENDFOR
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Iv[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Iv[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Amh[i])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

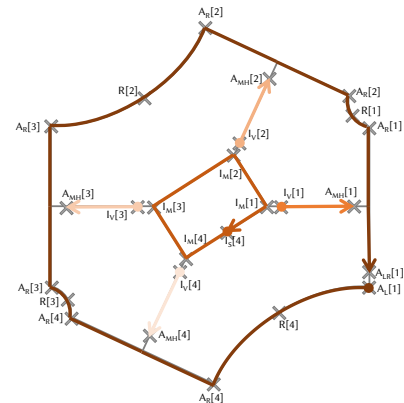


Abbildung D.8: Lage 8

## Lage 9

```

CASE (9):
FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Amr[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Amr[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Ar[i])
MOVE CIRCULAR TO (A1[i + 1]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i + 1])
MOVE LINEAR TO (Im[i + 1])
MOVE LINEAR TO (Il[i + 2])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

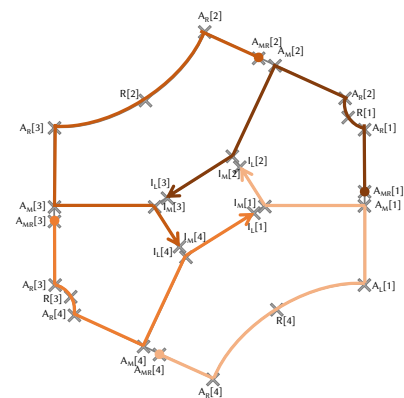


Abbildung D.9: Lage 9

## Lage 10

```

CASE (10):
FOR i := 2 TO 5 DO
Startpunkt := Aml[i + 1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20

MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Aml[i + 1])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Al[i + 1])
MOVE CIRCULAR TO (Ar[i]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i])
MOVE LINEAR TO (Im[i])
MOVE LINEAR TO (Ir[i - 1])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR
    
```

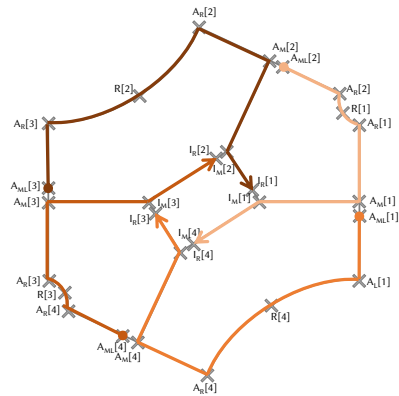


Abbildung D.10: Lage 10

## Lage 11

```

CASE (11):
Startpunkt := Ar[1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Ar[1])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Ar[i])
MOVE CIRCULAR TO (Al[i + 1]) VIA (R[i])
MOVE LINEAR TO (Arl[i + 1])
ENDFOR
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

Startpunkt := Is[4]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_job(65)
arc_start(65)
FOR i := 1 TO 4 DO
MOVE LINEAR TO (Im[i])
ENDFOR
MOVE LINEAR TO (Is[4])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL

FOR i := 1 TO 4 DO
Startpunkt := Iv[i]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (Iv[i])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Amh[i])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR
    
```

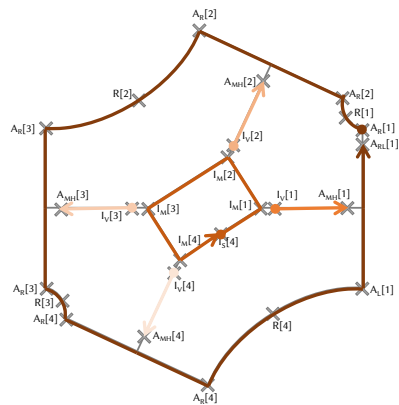


Abbildung D.11: Lage 11



## Lage 12

```

CASE (0):
FOR i := 2 TO 5 DO
Startpunkt := I1[i + 1]
Startpunkt.Z := Startpunkt.Z + 20
MOVE LINEAR TO Startpunkt
MOVE LINEAR TO (I1[i + 1])
arc_job(65)
arc_start(65)
MOVE LINEAR TO (Im[i])
MOVE LINEAR TO (Am[i])
MOVE LINEAR TO (A1[i])
MOVE CIRCULAR TO (Ar[i - 1]) VIA (R[i - 1])
MOVE LINEAR TO (Amr[i - 1])
arc_end(1)
MOVE LINEAR RELATIVE VEC(0, 0, -100) IN TOOL
ENDFOR

```

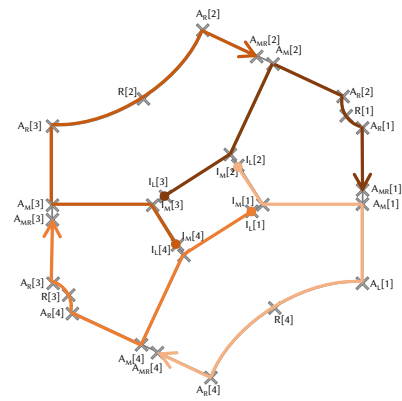


























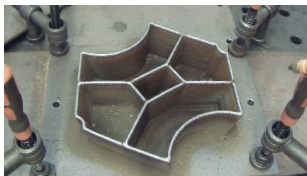

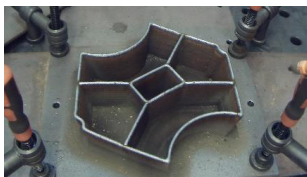

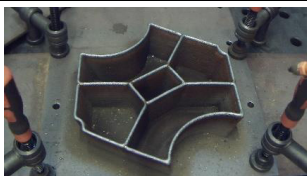



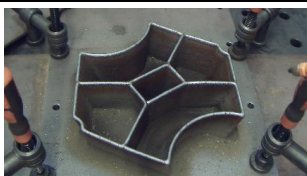




Abbildung D.12: Lage 12

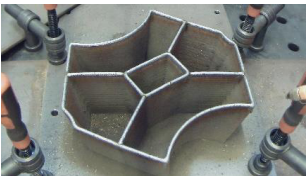
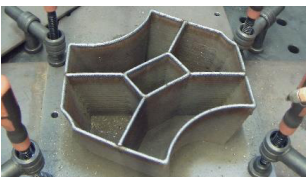
## D.2 Aufnahmen der Lagen beim Druck

| Aufnahme  | Besonderheit                    | Aufnahme   | Besonderheit                       |
|---|---------------------------------|--|------------------------------------|
|    | Lage 1                          |    | Lage 10<br>Rückbrand Naht 4 L1     |
|    | Lage 2                          |    | Lage 11                            |
|    | Lage 3<br>Arc Start Naht 1      |    | Lage 12                            |
|   | Lage 4                          |   | Lage 13<br>Drahtfestbrand Naht 4   |
|  | Lage 5                          |  | Lage 14<br>Aussetzer Naht 2        |
|  | Lage 6                          |  | Lage 15<br>Aussetzer Naht 1        |
|  | Lage 7                          |  | Lage 16<br>Viel Wasser Radius 2    |
|  | Lage 8<br>Drahtfestbrand Naht 3 |  | Lage 17                            |
|  | Lage 9                          |  | Lage 18<br>Längere aktive Kühlzeit |

| Aufnahme  | Besonderheit  | Aufnahme   | Besonderheit  |
|---|---|--|---|
|    | Lage 19   |    | Lage 28<br>Arc Start Naht 3,<br>Aussetzer Naht 3                |
|    | Lage 20<br>Fehler Power Contractors<br>Naht 1 erster großer<br>Radius |    | Lage 29   |
|    | Lage 21<br>Aussetzer Naht 3,<br>Aussetzer Naht 4                      |    | Lage 30<br>Arc Start Naht 1                                     |
|   | Lage 22   |   | Lage 31   |
|  | Lage 23   |  | Lage 32<br>Aussetzer Naht 1:<br>Stirnplatte 3,<br>Stirnplatte 2 |
|  | Lage 24<br>Aussetzer Naht 4   |  | Lage 33<br>Aussetzer Naht 1: Lv1                                |
|  | Lage 25   |  | Lage 34   |
|  | Lage 26   |  | Lage 35   |
|  | Lage 27<br>Aussetzer Naht 2:<br>großer Radius                         |  | Lage 36<br>Aussetzer Naht 4: innen                              |

| Aufnahme  | Besonderheit  | Aufnahme   | Besonderheit  |
|---|---|--|---|
|    | Lage 37   |    | Lage 46   |
|    | Lage 38<br>Aussetzer Lage 1:<br>Stirnplatte 1             |    | Lage 47<br>Aussetzer Naht 1:<br>Radius 4                                  |
|    | Lage 39<br>Aussetzer Lage 1:<br>Stirnplatte 2             |    | Lage 48   |
|   | Lage 40   |   | Lage 49   |
|  | Lage 41   |  | Lage 50<br>Fehler power contractors,<br>Ecke Radius 4 zu<br>Stirnplatte 1 |
|  | Lage 42<br>Aussetzer Naht 2: innen                        |  | Lage 51   |
|  | Lage 43<br>Aussetzer Naht 3: Knick,<br>Stirnplatte Anfang |  | Lage 52<br>Aussetzer Naht 2: lv2  |
|  | Lage 44<br>Rückbrand Naht 1:<br>Stirnplatte 4             |  | Lage 53   |
|  | Lage 45   |  | Lage 54   |

| Aufnahme  | Besonderheit                | Aufnahme   | Besonderheit  |
|---|-----------------------------|--|---|
|    | Lage 55                     |    | Lage 64   |
|    | Lage 56<br>Rückbrand Naht 5 |    | Lage 65   |
|    | Lage 57                     |    | Lage 66<br>Aussetzer Naht 1:<br>Stirnplatte 2, Innen,<br>Arc Start Naht 3 |
|   | Lage 58                     |   | Lage 67   |
|  | Lage 59                     |  | Lage 68   |
|  | Lage 60                     |  | Lage 69   |
|  | Lage 61                     |  | Lage 70<br>Naht 1: Arc Start<br>Probleme (Stirnplatte 3)                  |
|  | Lage 62                     |  | Lage 71   |
|  | Lage 63                     |  | Lage 72<br>Naht 1: Arc Start<br>Probleme (II3)                            |

| Aufnahme  | Besonderheit                                  | Aufnahme   | Besonderheit  |
|---|---|--|---|
|    | Lage 73                                       |    | Lage 82<br>Arc Start Naht 3                                   |
|    | Lage 74<br>Naht 3: Arc Start Problem, (Amh1)  |    | Lage 83<br>Arc Start Naht 3                                   |
|    | Lage 75                                       |    | Lage 84   |
|   | Lage 76<br>Naht 2: Arc Start II3              |   | Lage 85<br>Aussetzer/Rückbrand<br>Naht 4: Radius              |
|  | Lage 77<br>Naht 4: Aussetzer                  |  | Lage 86   |
|  | Lage 78<br>Naht 2: Aussetzer<br>Radius 2      |  | Lage 87   |
|  | Lage 79                                       |  | Lage 88<br>Arc Start Probleme<br>→ ohne Schweißen<br>begonnen |
|  | Lage 80<br>Aussetzer Naht 1:<br>Stirnplatte 4 |  | Lage 89<br>Aussetzer Naht 2:<br>Innen 4, Arc Start Naht 3     |
|  | Lage 81                                       |  | Lage 90   |

| Aufnahme  | Besonderheit                                  | Aufnahme   | Besonderheit  |
|---|---|--|---|
|    | Lage 91                                       |    | Lage 100  |
|    | Lage 92                                       |    | Lage 101<br>Aussetzer Naht 1: Ecke<br>Stirnplatte 3 zu Radius 2,<br>Naht 2: Nicht getroffen |
|    | Lage 93                                       |    | Lage 102  |
|   | Lage 94                                       |   | Lage 103  |
|  | Lage 95                                       |  | Lage 104  |
|  | Lage 96                                       |  | Lage 105  |
|  | Lage 97<br>Aussetzer Naht 2:<br>Stirnplatte 2 |  | Lage 106  |
|  | Lage 98<br>Arc Start Naht 2: Innen            |  | Lage 107  |
|  | Lage 99                                       |  | Lage 108  |

| Aufnahme  | Besonderheit   | Aufnahme   | Besonderheit  |
|---|--|--|---|
|    | Lage 109   |    | Lage 118  |
|    | Lage 110   |    | Lage 119<br>Rückbrand Naht 1,<br>Stirnplatte 4<br>Ecke Radius 4,<br>Arc Start Naht 5, lv3 |
|    | Lage 111   |    | Lage 120  |
|   | Lage 112   |   | Lage 121<br>Aussetzer Naht 1,<br>Stirnplatte 2  |
|  | Lage 113<br>Naht 1: Fehler power<br>contactors,<br>Naht 6: Arc Start |  | Lage 122<br>Rückbrand Naht 1:<br>Radius 3, Arc Start Naht<br>2: Innen                     |
|  | Lage 114<br>Aussetzer Naht 4   |  | Lage 123  |
|  | Lage 115   |  | Lage 124  |
|  | Lage 116   |  | Lage 125  |
|  | Lage 117<br>Aussetzer Naht 4: Amr 1                                  |  | Lage 126  |



