



Christoph Handl, BSc

Additive Fertigung im Stahlbau

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters

Institut für Tragwerksentwurf

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Kettler

Institut für Stahlbau

Graz, September 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

VORWORT

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines Studiums begleitet haben und diesen Lebensabschnitt zu einer wunderbaren Erinnerung machten.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters für seine tolle Unterstützung, die motivierenden Gespräche und das entgegengebrachte Vertrauen. Auch bei Herrn Dipl.-Ing. Christoph Holzinger möchte ich mich für die guten Ratschläge und die guten Gespräche bedanken.

Von Herzen möchte ich mich auch bei meiner Familie bedanken, die in guten sowie in schlechten Zeiten stets für mich da ist. Ein besonderer Dank gilt dabei meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und mich in jeder Situation unterstützt haben.

Ein herzlicher Dank gebührt auch meiner Freundin Marie-Therese für die wunderbare Zeit, die wir bisher miteinander verbracht haben. Danke für die schönen Gespräche, die zahlreichen motivierenden Worte und die Unterstützung in all meinen Vorhaben.

ZUSAMMENFASSUNG

Die additive Fertigung ist bereits in zahlreichen Branchen der Industrie vertreten und in einigen Fällen auch nicht mehr wegzudenken. In der Baubranche wurde der Fokus der Forschung innerhalb der letzten Jahre überwiegend auf die additive Verarbeitung von Beton gelegt. Auch der Stahlbau könnte durch die Anwendung der additiven Fertigung profitieren und revolutioniert werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurden die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren metallischer Werkstoffe analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung für den Stahlbau bewertet. Das größte Potential wurde dabei der Verfahrensgruppe „Wire and Arc Additive Manufacturing“ zugeschrieben. Der aktuelle Stand der Wissenschaft zu dieser Technologie wurde erhoben und gemeinsam mit den relevantesten Herausforderungen festgehalten. Mit der Durchführung von Zugversuchen konnten Rückschlüsse auf das Materialverhalten eines derartig, additiv hergestellten Werkstoffs gezogen werden. Die Herstellung des untersuchten Werkstoffs erfolgte dabei unter Anwendung der „Cold Metal Transfer“ Technologie. Weiters wurden im Zuge dieser Arbeit potentielle Anwendungsmöglichkeiten für die additive Fertigung im Stahlbau aufgelistet und beschrieben. Eine dieser Anwendungen diente dabei als Vorlage für einen abschließenden Schweißversuch.

ABSTRACT

Additive manufacturing is well known in many sectors of the industry and in some cases it has become indispensable. Recently, in the construction industry, the focus of research has been predominantly on the additive manufacturing of concrete. The steel construction sector could also benefit and be revolutionized by the application of additive manufacturing.

In the course of this work, the various metallic additive manufacturing processes were analyzed and evaluated concerning their suitability for steel construction. The greatest potential was attributed to the process group "Wire and Arc Additive Manufacturing". The current state of science on this technology has been surveyed and recorded along with the most relevant challenges. By carrying out tensile strength tests, conclusions could be drawn about the material behavior of such an additive-produced material. The investigated material was manufactured by using the "Cold Metal Transfer" process. Furthermore, potential applications for additive manufacturing in steel construction were listed and described in the course of this work. One of these applications served as a model for a final welding test.

INHALTSVERZEICHNIS

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG	1
VORWORT	2
ZUSAMMENFASSUNG.....	3
ABSTRACT	4
INHALTSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG.....	8
1.1 Historisches.....	8
1.2 Herstellungsprinzip.....	9
1.3 Einflussgrößen und Zielgrößen.....	10
1.4 Anwendungen in der Industrie.....	10
1.4.1 Anwendungen in der Bautechnik.....	11
2 METALLISCHE ADDITIVE FERTIGUNG	14
2.1 Hauptgruppen	14
2.1.1 Directed Energy Deposition (DED)	14
2.1.2 Powder Bed Fusion (PBF).....	14
2.1.3 Binder Jetting (BJ).....	15
2.1.4 Sheet Lamination (SL).....	15
2.2 Verfahrensfindung	15
2.3 Cold Metal Transfer.....	19
2.3.1 Prozessbeschreibung.....	19
2.3.2 Komponenten.....	19
2.3.3 Vorteile des Verfahrens.....	20
2.3.4 Prozesskombinationen und Verfahrensvarianten	23
3 STAND DER WISSENSCHAFT	25
3.1 Eigenspannungen und Verzug	25
3.2 Unbearbeitete Oberflächen	25
3.3 Schweißpfadführung	26
3.4 Forschungsarbeiten.....	27
3.4.1 Bautechnik	27
3.4.2 Allgemeines	28
3.4.3 Materialeigenschaften	28
3.4.4 Eigenspannungen	29
3.4.5 Design.....	29

3.4.6	Optimierungen.....	29
3.4.7	Prozessüberwachung.....	30
3.4.8	Cold Metal Transfer.....	30
4	NORMENWERK.....	35
4.1	Härte.....	38
4.1.1	Proben.....	38
4.1.2	Durchführung.....	38
4.2	Zugfestigkeit.....	39
4.2.1	Proben.....	39
4.2.2	Auswertung.....	40
4.3	Schlagfestigkeit.....	40
4.3.1	Proben.....	40
4.3.2	Durchführung.....	41
4.4	Scherfestigkeit.....	42
5	ZUGVERSUCHE.....	43
5.1	Ausgangsmaterial.....	43
5.1.1	Schweißparameter.....	45
5.2	Probenabmessungen.....	45
5.3	Probenanordnung.....	47
5.4	Probenausarbeitung.....	49
5.5	Prüfmaschine.....	50
5.5.1	Prüfungskonfiguration.....	50
5.6	Prüfungsablauf.....	51
5.7	Ergebnisse.....	52
5.7.1	Ohne Pendeln – längs zur Schweißnaht.....	55
5.7.2	Ohne Pendeln – quer zur Schweißnaht.....	57
5.7.3	Mit Pendeln – längs zur Schweißnaht.....	59
5.7.4	Mit Pendeln – quer zur Schweißnaht.....	61
5.8	Diskussion der Ergebnisse.....	63
6	ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN.....	64
6.1	Aussteifungen.....	64
6.1.1	Lasteinleitungssteifen.....	64
6.1.2	Beulsteifen.....	65
6.2	Querschnittsänderungen.....	65
6.3	Knotenelemente.....	66

6.3.1	Knotenpunkt Gitterschale	68
6.4	Linienelemente	69
7	SCHWEISSVERSUCH	73
7.1	Y-Steifen	74
7.1.1	Zusammenfassung	76
7.2	Anschlusselemente	77
7.2.1	Versuch 1	77
7.2.2	Versuch 2	79
7.3	Erkenntnisse Schweißversuch	82
	AUSBLICK	83
	LITERATURVERZEICHNIS	84
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	91
	TABELLENVERZEICHNIS	94
	ANHANG	95

1 EINLEITUNG

Bei der additiven Fertigungstechnik handelt es sich um eine Gruppe von Herstellungsverfahren, welche dem Urformen, einer Hauptgruppe der Fertigungstechnik, untergeordnet ist. Durch das schichtweise Auftragen von Werkstoffen lassen sich hierbei dreidimensionale Objekte zufolge eines digitalen Modelldatensatzes erstellen (Fritz 2018).

Im Gegensatz zu den konventionellen Fertigungsverfahren wie dem Fräsen oder Bohren, herrschen bei den additiven Fertigungsverfahren deutlich umfangreichere geometrische Möglichkeiten für das zu erstellende Objekt. Ausschlaggebend hierfür ist der Herstellungsprozess, in welchem die Konstruktion über die Fertigung bestimmt und nicht die Fertigung über die Möglichkeiten der Konstruktion.

1.1 Historisches

Die Geschichte der Additiven Fertigung fand ihren Ursprung im Jahr 1983. Der amerikanische Ingenieur Charles „Chuck“ Hull nutzte ultraviolettes Licht zum Aushärten von dünnen Photopolymerschichten und entwickelte so das erste Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Objekten. Er patentierte die verwendete Technologie als „Stereolithographie“ und gründete im Jahr 1986 sein eigenes Unternehmen, die Firma 3D-Systems. Innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte traten mehrere Unternehmen in die Fußstapfen von 3D-Systems und entwickelten eine Vielzahl an additiven Fertigungsverfahren und Maschinen. Durch die verschiedenen Verfahren war es bald möglich dreidimensionale Objekte aus den verschiedensten Materialien zu fertigen (Krujatz et al. 2017).

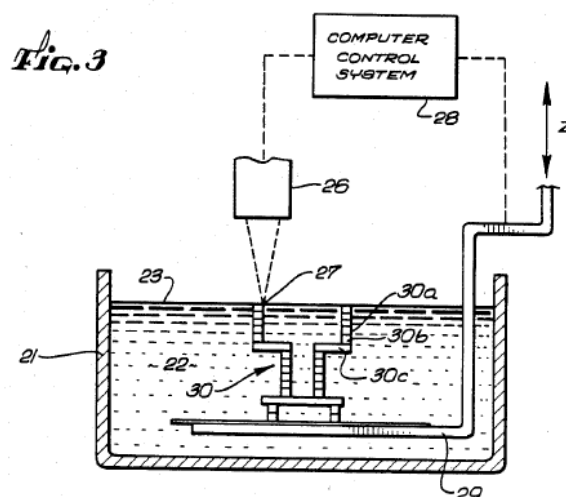


Abbildung 1: Funktionsprinzip der Stereolithographie - US-Patent Charles Hull (1986) (Fritz 2018)

1.2 Herstellungsprinzip

Die Basis für ein additiv gefertigtes Bauteil bildet immer ein recheninternes CAD-Modell. Erstellt wird dieser Datensatz entweder selbstständig innerhalb eines Entwurfsprozesses oder durch das Laserscannen eines realen Bauteils. Nach der Aufarbeitung der Daten werden diese über eine Schnittstelle an den Prozess übergeben. Abhängig vom gewählten Fertigungsverfahren und der Fertigungsmaschine wird dieses CAD-Modell nun mittels herstellerspezifischer Software, sogenannter Slice-Programme, in einzelne Schichten zerlegt. Hierfür sind Informationen über die Aufbaurichtung sowie die Schichtdicke, welche wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit sowie die Herstellungsdauer des Bauteils haben notwendig. Nach Einstellung der maschinenspezifischen Parameter kann mit der schichtweisen Fertigung des Bauteils begonnen werden (Fritz 2018).

Innerhalb der folgenden Darstellung wird das Prinzip der Bauteilerzeugung durch ein additives Fertigungsverfahren symbolisch beschrieben.

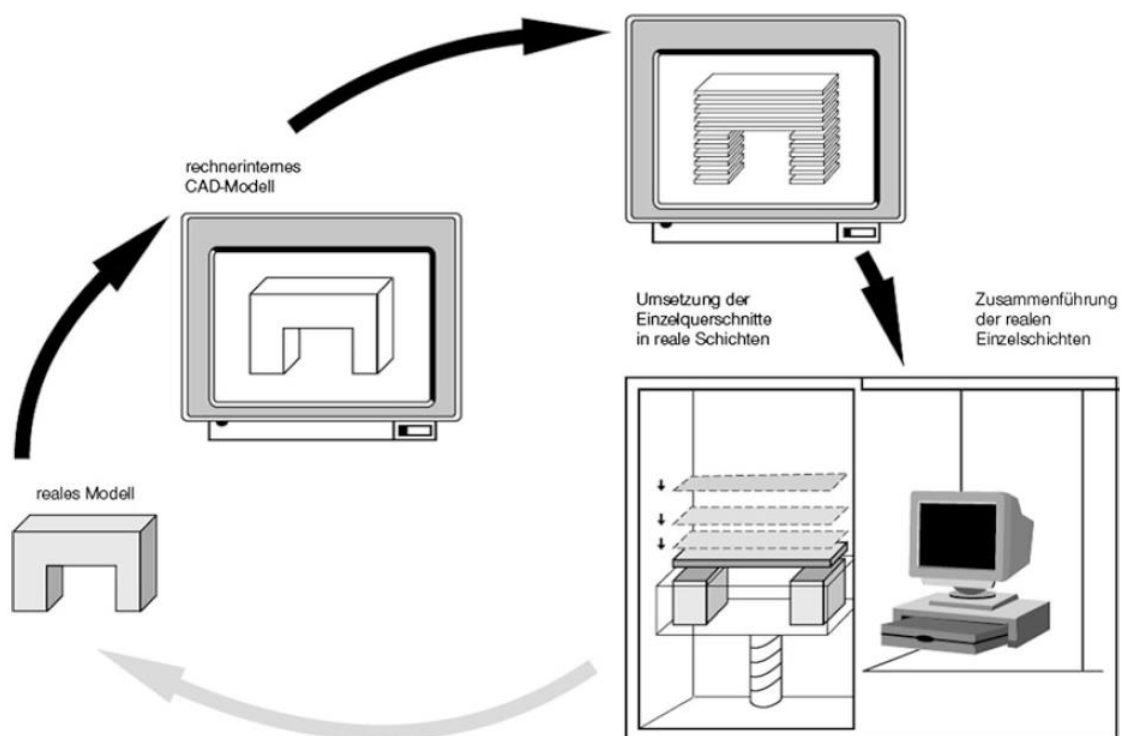


Abbildung 2: Prozesskette - Additive Herstellungsverfahren (Fritz 2018)

1.3 Einflussgrößen und Zielgrößen

Zum Erhalt eines optimalen Prozessergebnisses müssen zahlreiche Parameter beachtet werden und wichtige Entscheidungen betreffend Qualität und Produktionsdauer getroffen werden. Abbildung 3 bildet hierfür einen Überblick über die Prozessbestimmenden Einfluss- und Zielgrößen.

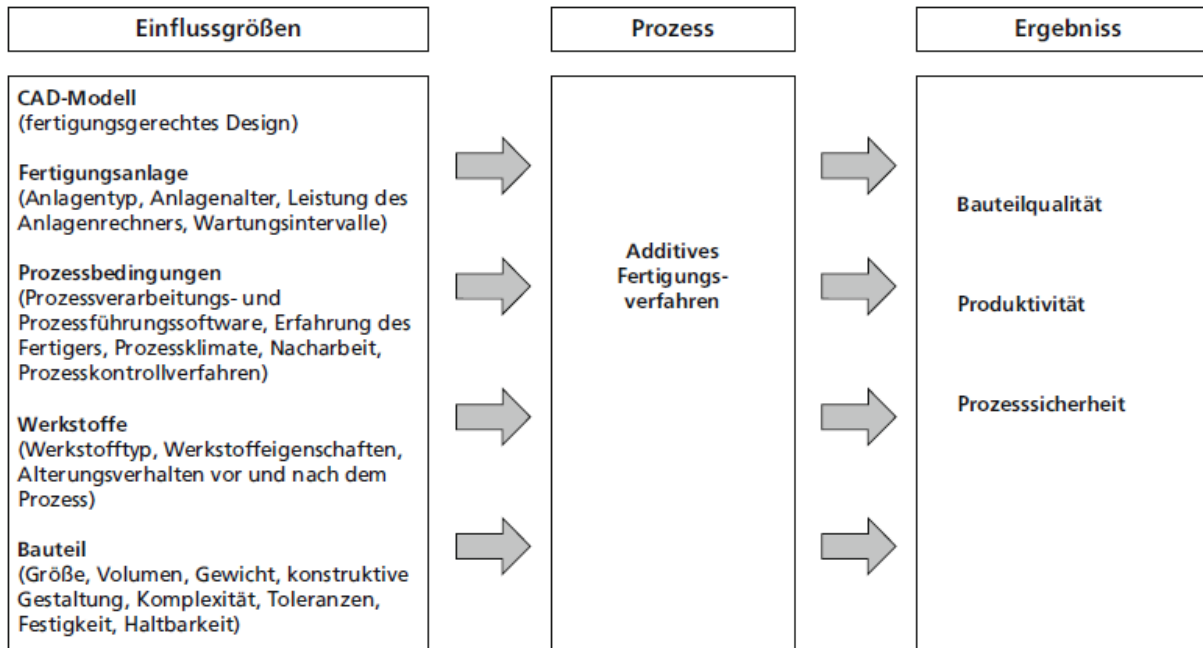


Abbildung 3: Einfluss- und Zielgrößendarstellung (Fritz 2018)

1.4 Anwendungen in der Industrie

Den ersten großen Nutzen von additiven Fertigungsverfahren fand die Industrie in der Herstellung von Prototypen. Entscheidend hierfür ist zum einen die weitreichende Konstruktionsfreiheit und zum anderen die kurze Fertigungszeit, welche besonders bei komplexen Geometrien überzeugt. Additive Verfahren sind aus der Produktion von Gebrauchsmustern nicht mehr wegzudenken und heutzutage unter dem Begriff Rapid Prototyping bekannt. Auch in die Fertigungslinien von Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt, Fahrzeugbau und Werkzeugbau wurden additive Fertigungsverfahren mittlerweile integriert, welche aufgrund der zuvor genannten Vorteile, Kosten- und Zeitersparnisse in der Entwicklung und Herstellung ermöglichen. Je nach Branche kommen dabei verschiedene Materialien zum Einsatz, wobei Kunststoffe, Kunstharze, Metalle und Keramiken derzeit als typische Werkstoffe gelten.

1.4.1 Anwendungen in der Bautechnik

Durch die ständige Weiterentwicklung der additiven Fertigungsverfahren und der damit verbundenen Möglichkeit des Verarbeitens verschiedenster Materialien, entwickelt sich auch innerhalb der Bautechnik ein großes Potential für die additive Fertigung. Zum Überblick werden im Folgendem einige derzeitige Beispielprojekte, gegliedert entsprechend dem dabei verwendeten Material, aufgelistet und kurz beschrieben.

Betonbau

Das Drucken von Beton ist in der Bautechnik mittlerweile weit verbreitet und beschäftigt einige Universitäten sowie Unternehmen. Die Produktpalette reicht derzeit von gedruckten Architekturobjekten, Bushaltestellen und Brücken bis hin zu gesamten Wohnkomplexen.

Einen Meilenstein im Drucken von Beton setzt das chinesischen Unternehmen WinSun im Jahr 2014. Innerhalb von nur 24 Stunden konnte eine Wohnsiedlung mit zehn einstöckigen Häusern zu je 200 Quadratmetern hergestellt werden. Dafür wurde ein 3D-Drucker mit den Abmessungen von 150x10x6,6m (LxBxH), welcher ein Gemisch aus recyceltem Bauschutt, Zement und Fiberglas verarbeitete. Die verwendeten Herstellungskosten für eines dieser Häuser umfasste weniger als 4000 Euro (Ahrens 2014).

Einen weiteren Meilenstein stellt die gedruckte Fußgängerbrücke im Castilla La Mancha Park, nahe Madrid, dar. Die Brücke wurde nach einer parametrischen Design-Methode entwickelt und mit faserverstärktem Beton gedruckt. Sie verfügt über eine Länge von 12m und eine Breite von 1,75m, besteht aus acht Teilen und wurde mittels Contour Crafting hergestellt (Berger 2017; Pluta 2017).

Concrete Elements by Robots (COEBRO) nennt sich ein Forschungsprojekt, das im Jahr 2015 an der Technischen Universität Graz entstand. Spezialisiert auf die Produktion von Betonfertigteilen, liegt das Projektziel in der Entwicklung einer ressourcenschonenden Produktionskette für derartige Bauteile. Ein Deckenelement mit speziell angeordneten Aussparungen ist ein Bauteil, welches im Rahmen des Projektes realisiert wurde. Durch die Anordnung der Aussparungen an Stellen mit geringen statischen Erfordernissen, konnte Material eingespart werden ohne die Performance des Bauteils zu reduzieren. Weiters erfolgte die Fertigung eines geometrisch komplexen Fassadenteils, welches mit konventionellen Schalungssystemen nicht herstellbar wäre (TU Graz 2019).

Neue Möglichkeiten ergeben sich auch durch die kombinierte Anwendung von 3D-Scannern und 3D-Druckern. Ein Forschungsprojekt an der Huazhong University of Science and Technology in China beschäftigte sich mit der digitalen Reproduktion von Ornamenten historischer Gebäude. Bestehende Strukturen wurden gescannt und zu digitalen Modellen

verarbeitet. Mittels 3D-Druck und einem Gemisch aus Wasser, Zement, Sand und Kunststofffasern wurden diese neu erstellt und in die Fassade integriert. Durch die Möglichkeit der digitalen Geometrieangepassung kann beschädigten Strukturen wieder ihre ursprüngliche Form verliehen werden. (Xu et al. 2017).

Schalungstechnik

In der Schalungstechnik, welche den Betonbau häufig hinsichtlich Gestaltungsfreiheit einschränkt, öffnen sich durch den 3D-Druck neue Türen. Durch ein additives Fertigungsverfahren, welches sich am Ausgangsmaterial Sand bedient, können nun kostengünstig und unter geringem Zeitaufwand, geometrisch anspruchsvolle Schalungsformen hergestellt werden (Voxeljet 2019). Weiters eignet sich der 3D-Druck auch zur Herstellung von Schalungen für Wände und Fassaden mit integrierten Mustern. Bereits bestehende Muster können gescannt und nachfolgend, mittels 3D-Druck, in die Schalung integriert werden (Hofmeister et al. 2018).

Mauerwerksbau

Die additive Verarbeitung von Tonkeramik befindet sich derzeit noch in der Anfangsphase. Laufende Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Findung eines stabilen Druckprozesses, dem Material an sich, sowie den dazugehörigen Materialeigenschaften. Bei den ersten Produktideen handelt es sich um die Herstellung von Sonderbauteilen. Bauteile mit komplexen Geometrien und optimierten Hohlräumen sowie Mauerziegel mit eingebetteten technischen Lösungen würden neue Möglichkeiten schaffen, welche mit den bisherigen Herstellungsverfahren nicht kosteneffizient umsetzbar sind (Unipor 2018).

Fassadentechnik

Das skandinavische Unternehmen NorDan nutzt einen 3D-Drucker von BLB Industries zur Herstellung von Fenster- und Türrahmen. Verarbeitet werden hierfür Kunststoffpellets sowie landwirtschaftliche Nebenprodukte wie Holz, Kork, Stroh und Hanf. Mit dem Drucker ist es möglich Türen und Fenstern bis zu einer Abmessung von 1,5x2,5m (BxH) herzustellen. Die Ablagerungsrate erreicht hierbei einen Wert von bis zu 14kg/h (Thum 2018).

Stahlbau

Zusammen mit einigen Partnern entwarf, modellierte, baute und testet das Unternehmen MX3D die erste additiv gefertigte Brücke aus Stahl. Die Brücke besitzt eine Spannweite von 12,5m und wurden mittels Wire And Arc Additive Manufacturing innerhalb 12 Monaten hergestellt. Da es sich bei diesem Projekt bislang um ein Einzelstück handelt, wurde die Brücke erstweilen mit einem aufwendigen Sensorsystem ausgestattet. Genauere Aussagen über das Verhalten unter dynamischer sowie statischer Last können somit erst in Zukunft getroffen werden. Das Projekt gilt als Wegweiser für die Zukunft und erhielt einige Auszeichnungen (MX3D 2019).



Abbildung 4: Additiv gefertigte Fußgängerbrücke der Firma MX3D (MX3D 2019)

Auch das Unternehmen Arup forscht derzeit an den Möglichkeiten der metallischen additiven Fertigung und deren Einsatz in der Bautechnik. Die Forschung konzentriert sich bislang auf den direkten Vergleich zwischen traditionell gefertigten Elementen und optimierten, additiv gefertigten Elementen. Anhand der Neuentwicklung eines Knotenpunktes einer Tensegrity-Struktur wurden neue Erkenntnisse über den Optimierungsprozess, das verwendete Fertigungsverfahren Powder Bed Fusion sowie die erzielten Materialeigenschaften gewonnen (Galjaard et al. 2015).



Abbildung 5: Additiv gefertigter Leichtbauknoten der Firma Arup (Galjaard et al. 2015)

2 METALLISCHE ADDITIVE FERTIGUNG

Im Jahre 1986 wurde die erste Technologie patentiert, mit welcher es möglich war, kleine Metallpartikel zu einer dreidimensionalen Form zusammenzufügen. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher additiver Verfahren zur Herstellung metallischer Bauteile welche grundsätzlich in vier Hauptgruppen unterteilt werden können (Sames et al. 2016; Derekar 2018).

2.1 Hauptgruppen

2.1.1 Directed Energy Deposition (DED)

Ein DED-Verfahren gilt als ein additives Herstellungsverfahren, welches mittels gebündelter thermischer Energie Materialien zum Schmelzen bringt und im gleichen Zuge ablagert. Mit dieser Technologie ist es möglich innerhalb eines Arbeitsschrittes Bauteile zu erzeugen, zu reparieren, zu verstärken, zu modifizieren oder andere Materialien zu bestehenden Strukturen hinzuzufügen. Eine Einteilung der DED-Verfahren erfolgt über die Form des Ausgangswerkstoffs, wobei es zu einer Unterscheidung zwischen pulverbasierten und drahtbasierten Fertigungsprozessen kommt. Zusätzlich unterscheidet sich auch die Art der verwendeten Wärmequelle. Die Aufschmelzung des Ausgangswerkstoffs kann mittels Laser, Elektronenstrahl oder Lichtbogen durchgeführt werden (Stockinger et al. 2016; Duda und Raghavan 2018)

2.1.2 Powder Bed Fusion (PBF)

PBF-Verfahren basieren auf der Ablagerung von Pulverschichten, welche durch eine Energiequelle sequentiell miteinander verschmolzen werden. Dieser Zyklus wird Schicht für Schicht wiederholt bis das gesamte Bauteil fertig ist. Verglichen mit den DED-Verfahren wird eine bessere Oberflächenqualität erreicht und eine höhere Komplexität des Bauteils ermöglicht. Nachteile findet man in der verhältnismäßig langen Herstellungszeit sowie in den begrenzt herstellbaren Bauteilgrößen. Die zwei bekanntesten PBF-Verfahren sind Selective Laser Sintering (SLS) und Electron Beam Melting (EBM) (Duda und Raghavan 2018).

2.1.3 Binder Jetting (BJ)

Gleich wie beim PBF-Verfahren ist das Ausgangsmaterial auch beim BJ-Verfahren in Pulverform vorhanden. Im Zuge des Verfahrens wird ein geschmolzenes Material, üblicherweise ein flüssiges Bindemittel, Schicht für Schicht und entsprechend dem 3D-CAD-Modells auf das Pulver aufgetragen. Zwischen den einzelnen Schichten wird das Pulver zur Verfestigung thermisch gehärtet. Dadurch entsteht ein sogenannter Grünkörper, welcher bereits die gewünschte Form des Werkstücks besitzt, jedoch nur aus verklebtem Pulver besteht. Zum Abschluss kommt der Grünkörper in einen Ofen, in dem das Werkstück einen Sinterprozess durchläuft und so seine endgültigen mechanischen Eigenschaften erhält (Bai und Williams 2018; Bikas et al. 2016).

2.1.4 Sheet Lamination (SL)

Die Schichtlaminierung ist ein additiver Fertigungsprozess, bei welchem ein Bauteil durch das Verbinden einzelner Werkstoffschichten geformt wird. Der Ausgangswerkstoff liegt in der Form einer Folie vor, wobei eine Schicht der Folie in weiterer Folge eine Schicht des Werkstückes darstellt. Jede Schicht erhält eine Kontur (beispielsweise mittels Laser) und wird daraufhin mit den bereits bestehenden Schichten verbunden. Die Verbindung erfolgt durch thermische oder chemische Reaktionen oder auch mittels Ultraschall. Dieser Zyklus, bestehend aus Formgebung der Schicht und anschließendem Verbinden, wird nun bis zur Fertigstellung des Bauteils wiederholt und kann prozessabhängig, auch in umgekehrter Reihenfolge ausgeführt werden (Gao et al. 2015).

2.2 Verfahrensfindung

Die Verfahrensgruppen Binder Jetting und Sheet Lamination erhalten in der Literatur nur wenig Aufmerksamkeit. Ihnen wird geringe Relevanz für die metallische, additive Fertigung zugeschrieben weswegen sie nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Die Mehrheit der metallischen, additiven Herstellungsverfahren werden hingegen den beiden Hauptgruppen Directed Energy Deposition und Powder Bed Fusion untergliedert (Duda und Raghavan 2018; Raghavan et al. 2016).

Ein Vergleich dieser beiden Verfahrensgruppen wurde bereits in der Arbeit von Duda sowie Grunwald durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt und tragen einen wesentlichen Teil zur Findung eines geeigneten additiven Fertigungsverfahrens für bautechnische Anwendungen bei.

	Directed Energy Deposition	Powder Bed Fusion
Ablagerungsrate	bis 4kg/h	0,05 bis 0,3 kg/h
Genauigkeit	±0.125-0.25mm / 25mm 0.5-1.0mm	±0.02-0.05mm / 25mm 0.04-0.2mm
Oberflächenqualität	Ra 7-20µm	Ra 4-10µm
Bauteilgrößen	2000x1500x750mm	500x280x325mm
Fertigungsfokus	Auftragsschweißen Bauteilmodifizierung	Prototypen Komplexe Geometrien

Tabelle 1: Vergleich von DED und PBF (Grunwald et al. 2018; Duda und Raghavan 2018)

Die wesentlich höhere Ablagerungsrate der DED-Verfahren, sowie die Option auf bereits bestehende Bauteile aufzubauen, gelten als ausschlaggebende Vorteile hinsichtlich der in Kapitel 6 aufgezeigten Anwendungsmöglichkeiten von additiver Fertigung in der Bautechnik. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Möglichkeit der Verarbeitung und Erstellung wesentlich größerer Bauteile. Wiederum auf die Anwendungen in der Bautechnik bezogen, erhält die Tatsache, dass DED gefertigte Bauteile über eine geringere Genauigkeit gegenüber PBF gefertigten Bauteilen verfügen, eine nachrangige Bedeutung. Angesichts der vorhandenen Toleranzen im Stahlbau, ist die durch den DED Prozess erreichte Genauigkeit einerseits meist ausreichend und könnte andererseits durch eine Nachbehandlung verbessert werden. Den DED-Verfahren wird insgesamt also ein größeres Potential zugeschrieben, weswegen dieser Verfahrensgruppe im Folgenden besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden soll.

Wie schon in Kapitel 2.1.1 beschrieben können DED-Verfahren über die Form des Ausgangswerkstoffes unterschieden werden. In der Arbeit von DebRoy werden die Vorteile von drahtförmigen DED-Prozessen aufgezeigt. Abgesehen von den geringeren Anschaffungskosten des Ausgangswerkstoffes in Drahtform, profitiert man bei drahtförmigen Verfahren auch durch wesentlich höhere Ablagerungsraten. Durch die geringere Oberfläche des Drahtes verglichen mit dem Pulver, fallen die Reaktionen mit der Atmosphäre geringer aus, was zu einem stabileren Prozessablauf führt. Auch Stockinger betont in seiner Arbeit den Vorteil des Umgangs mit einem drahtförmigen Ausgangsmaterial. Hohe Aufwandmengen machen die Drahtmethoden umwelt- und benutzerfreundlich (DebRoy et al. 2018; Stockinger et al. 2016).

Abhängig von den zuvor genannten Energiequellen (Laser, Elektronenstrahl, Lichtbogen), welche zur Abschmelzung des Ausgangswerkstoffes verwendet werden, können die drahtförmigen DED-Verfahren in drei Gruppen untergliedert werden. Laser-basierende Verfahren gelten als sehr präzise, sind aufgrund ihrer äußerst schlechten Energieeffizienz allerdings als sehr kostenintensiv einzustufen. Sie wurden bei Ding hinsichtlich ihrer Energieeffizienz lediglich mit 2-5% eingestuft. Mit einem Prozentsatz von 15-20% gelten Elektronenstrahl-Verfahren als energieeffizienter, verglichen mit Lichtbogen-Verfahren, welche teilweise eine Energieeffizienz von bis zu 90% erreichen, können sie allerdings immer noch als ineffizient gesehen werden. Ein zusätzlicher Vorteil der Lichtbogen-Verfahren ergibt sich durch die verhältnismäßig günstigen Anlagenkosten (Ding et al. 2015b; Geng et al. 2017).

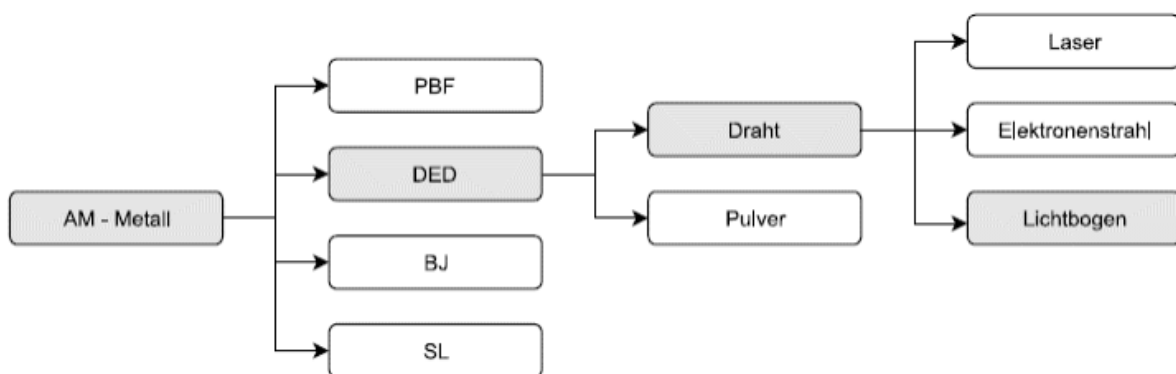


Abbildung 6: Darstellung Verfahrensauswahl

Ein Lichtbogenverfahren kombiniert mit einem drahtförmigen Ausgangsmaterial, ist ein DED-Verfahren, welches aktuell ein sehr großes industrielles Interesse erweckt. In der Fachsprache erhielt diese Technologie den Namen Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM).

Durch einen Kostenvergleich zwischen konventionell gefertigten Bauteilen und Bauteilen, hergestellt mittels WAAM, konnte Williams das große Potential dieser Technologie aufzeigen. Alle analysierten Bauteile wurden durch WAAM günstiger hergestellt, wobei die Einsparungen von 7% bis hin zu 69% reichten. Innerhalb seiner Arbeit formulierte er auch die Vorteile gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren und bestätigte damit die in Kapitel 3.3 durchgeführte Verfahrensfindung (Williams et al. 2016).

Vorteile von WAAM	
+	Reduzierung des Materialabfalls
+	Geringe Herstellungskosten
+	Geringe Anlagenkosten
+	Hohe Abscheidungsraten
+	Hohe Energieeffizienz
+	Nahezu unbegrenzt herstellbare Bauteilgrößen

Tabelle 2: Vorteile WAAM

In Kapitel 3 (Stand der Wissenschaft) wird ersichtlich, dass der Schweißprozess Cold Metal Transfer eine führende Rolle bei den WAAM Herstellungsverfahren eingenommen hat. Auch Derekar beschreibt den CMT-Prozess als ein WAAM-Verfahren, welches sich von anderen Verfahren durch eine qualitativ hochwertige, spritzerfreie Schweißnaht mit deutlich geringerem Wärmeeintrag abhebt. Außerdem ist der CMT-Prozess in der Industrie bereits weitgehend bekannt und wurde weltweit gut angenommen (Derekar 2018).

2.3 Cold Metal Transfer

Beim Cold Metal Transfer (CMT) handelt es sich um einen Metall-Schutzgas-Schweißprozess, welcher eine Erweiterung der Kurzlichtbogen-Schweißtechnik darstellt. Das CMT-Verfahren wurde vom österreichischen Unternehmen Fronius entwickelt und eröffnete neue Anwendungsgebiete, welche innerhalb der Schweißtechnik als unmöglich galten. Ein wesentliches Merkmal des CMT-Prozesses ist die reversierende Drahtelektrodenbewegung. Durch die gezielte Rückwärtsbewegung der Drahtelektrode ist es möglich die Tropfenablöse und Wiederzündung des Lichtbogens kontrolliert herbeizuführen. Im Vergleich zu kommerziellen Schweißprozessen wird dadurch eine reduzierte Spritzerbildung, ein stabilerer Schweißprozess und ein wesentlich geringerer Wärmeeintrag erreicht (Bruckner et al. 2013).

2.3.1 Prozessbeschreibung

Der CMT-Schweißprozess startet mit der Kurzschlussphase und dem Drahtvorschub in Richtung Werkstück. Bei Einsetzen des Kurzschlusses erlischt der Lichtbogen und die Richtung der Drahtbewegung wird umgekehrt. Durch das Zurückziehen des Drahtes wird die Lichtbogenphase eingeleitet. Der Kurzschluss bricht auf und die Wiederzündung des Lichtbogens folgt. Um den Zyklus von Kurzschlussphase und Lichtbogenphase zu schließen wird die Richtung der Drahtbewegung erneut umgekehrt und der Prozess nimmt seinen Lauf (Bruckner et al. 2013).

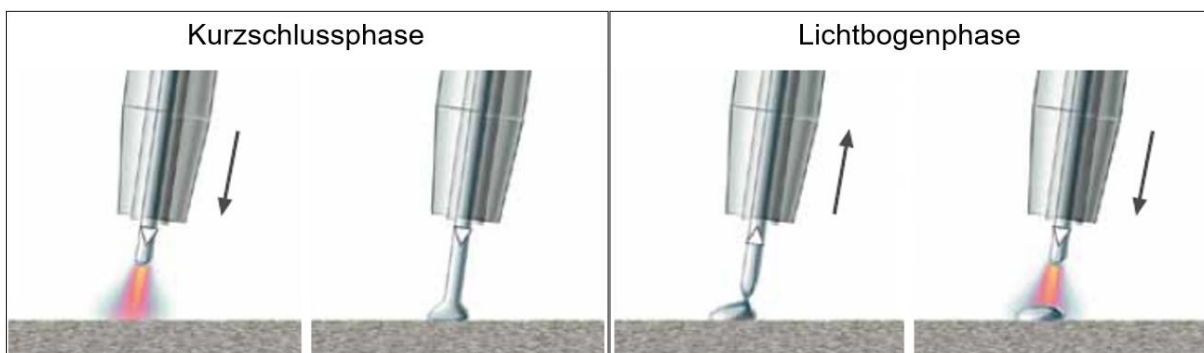


Abbildung 7: Prozessablauf CMT (Fronius 2019)

2.3.2 Komponenten

Ein CMT-System setzt sich, wie in Abbildung 8 ersichtlich, aus sechs Komponenten zusammen. Das Herzstück des digital geregelten Schweißsystems bildet die Stromquelle (1), welche es ermöglicht die dynamische Drahtbewegung in die Schweißprozessregelung zu integrieren. Verantwortlich für die hochfrequente, dynamische Drahtbewegung ist ein spezieller Schweißbrenner. Der sogenannte Push-Pull-Vorschub (4) befindet sich unmittelbar

vor dem Rohrbogen (5) und hat einen getriebelosen und verschleißfreien AC-Servomotor integriert. Dieser Motor ist je nach Prozessphase für die Richtung der Drahtbewegung verantwortlich. Damit der Push-Pull-Schweißbrenner, unabhängig vom Hauptvorschub (2), für eine störungsfreie Drahtförderung garantieren kann, werden die beide Drahtförderkomponenten durch einen sogenannten Drahtpuffer (3) entkoppelt. Durch ein Bedienpanel (6) hat der Benutzer des Schweißsystems die Möglichkeit diverse Einstellungen durchzuführen (Bruckner et al. 2013).

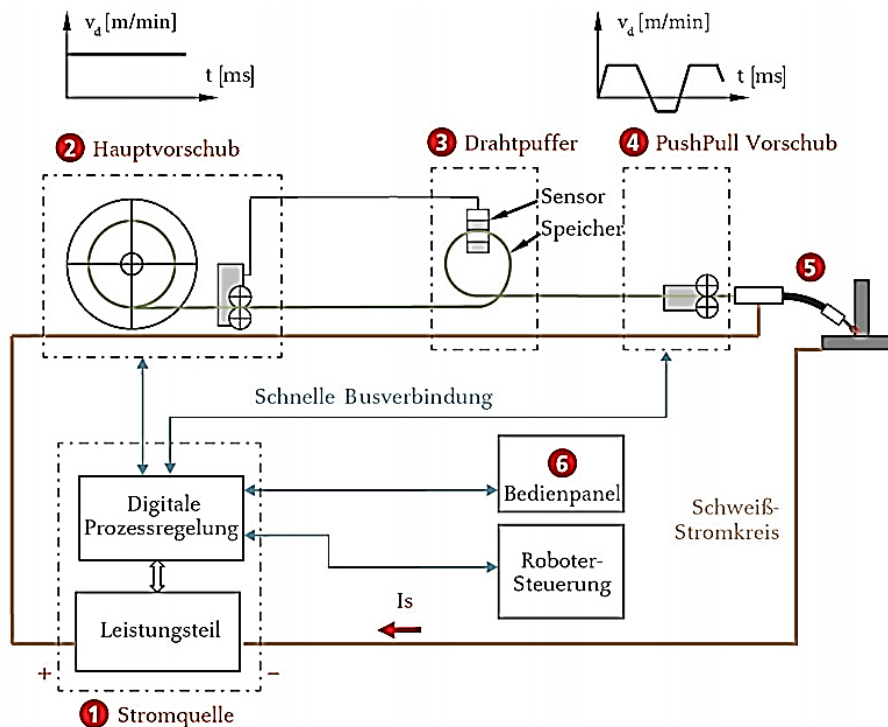


Abbildung 8: Blockschaltbild eines CMT-Systems (Bruckner et al. 2013)

2.3.3 Vorteile des Verfahrens

Schweißstart:

Eine konventionelle Zündung erfolgt durch das Abschmelzen des unteren Drahtendes unmittelbar nach Kontakt mit dem Werkstück und der damit verbundenen Zündung eines Lichtbogens. Auch bei einer idealen Zündung kommt es durch die hohen Stromanstiegsgeschwindigkeiten und Schweißströmen zu einem großen Lichtbogendruck, welcher in weiterer Folge für Schweißspritzer verantwortlich ist. Beim CMT-Verfahren hingegen, ist der Drahtvorschub mit der Lichtbogenzündung gekoppelt. Sobald das untere Drahtende auf das Werkstück trifft, erfolgt der Kurzschluss und der Drahtvorschub wird umgekehrt. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt somit bei geringerer Stromstärke in der Rückwärtsbewegung des Drahtes, wodurch der Schweißstart nahezu spritzfrei erfolgt (Bruckner et al. 2013).

Schweißende:

Für einen möglichst reibungslosen Schweißstart spielt auch das Ende des Schweißprozesses eine entscheidende Rolle. Konventionelle Schweißverfahren enden durch das Abschmelzen eines letzten Tropfens am unteren Drahtende. Mit dem angeschmolzenen Tropfen kann sich auch Schlacke an der Drahtspitze sammeln, welche bei erneutem Schweißstart zu Problemen führen kann. Beim CMT-Verfahren bleibt die Drahtspitze hingegen frei von Verunreinigungen. Der Schweißdraht wird hierbei stromlos aus dem Schmelzbad gezogen, wodurch der letzte Tropfen nicht am Draht haften bleibt (Bruckner et al. 2013).

Prozessstabilität:

Bei konventionellen Metall-Schutzgas-Prozessen erfolgt die Regelung der Lichtbogenlänge ausschließlich über die Lichtbogenspannung. Durch Verunreinigungen und Oxidschichten der Fügeteile kann es bei dieser Art der Regelung zu Problemen kommen. Der CMT-Prozess regelt die Lichtbogenlänge nicht über die Lichtbogenspannung, sondern über die definierte Rückwärtsbewegung des Drahtes. Verunreinigungen und Oxidschichten haben somit keinen Einfluss auf die Lichtbogenlänge. Um eine möglichst konstante Lichtbogenlänge garantieren zu können, wird ein gleichbleibender Gesamtwiderstand des Schweißkreises benötigt, welcher jedoch bereits bei kaum verhinderbaren Abstandsänderungen zwischen Werkstück und Kontaktröhre variiert. Um dem entgegenzuwirken bietet sich die Möglichkeit den Strommittelwert, die Drahtvorschubgeschwindigkeit oder beide zu verändern. Moderne Impulsschweißprozesse regeln den Lichtbogenabstand durch das stetige annähern des Strommittelwertes bis zum Erreichen des idealen Wertes. Diese Art der Regelung funktioniert nur mit geringen Stellgrößen von Zyklus zu Zyklus und ist langsamer als der CMT-Prozess, bei welchem die Lichtbogenlänge nach jedem Kurzschluss und somit nach jedem CMT-Zyklus neu und exakt eingestellt wird (Bruckner et al. 2013).

Positionsschweißen:

Da es bei der additiven Fertigung aus geometrischen Gründen vermehrt zu Zwangslagen kommen kann, bekommt die Prozessstabilität beim Positionsschweißen eine wichtige Rolle zugeschrieben. Ein Vorteil des CMT-Prozesses ergibt sich hierbei durch die mechanische Tropfenübergabe. Aufgrund der reversierenden Drahtbewegung wird der Schweißtropfen direkt im Schmelzbad abgelegt, wodurch verglichen mit konventionellen Kurzlichtbogen, ein weitaus störungsempfindlicher Schweißprozess ermöglicht wird (Bruckner et al. 2013).

Spritzerbildung:

Unter Verwendung eines M21 Schutzgases, welches sein Einsatzgebiet bei Baustählen findet, können durch das CMT-Verfahren bis zu 99% der Schweißspritzer, welche bei kommerzieller Impuls- und Kurzlichtbogenprozessen auftreten, vermieden werden. Bei der Verwendung von 100% CO₂ als Schutzgas, gibt es erstmals nahezu keine Schweißspritzer. Die Studie bezieht sich auf einen Meter Schweißnaht, welcher mit einer Drahtfördergeschwindigkeit von 7,5 m/min, einer Scheißgeschwindigkeit von 90 cm/min und unter konstanten Verhältnissen hergestellt wurde (Bruckner et al. 2013).

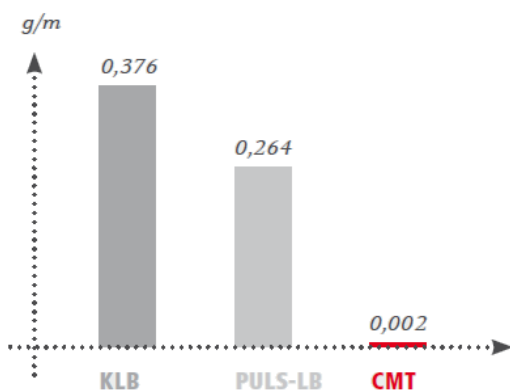


Abbildung 9: Vergleich Spritzerbildung M21 (Bruckner et al. 2013)

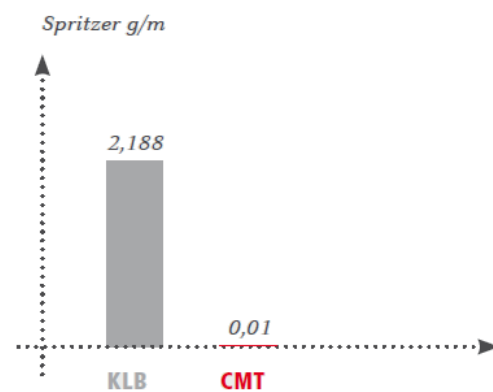


Abbildung 10: Vergleich Spritzerbildung 100% CO₂ (Bruckner et al. 2013)

100% CO₂ als Schutzgas:

Die Aufgabe des Schutzgases ist es, während dem Schweißprozess den Lichtbogen sowie das Schmelzbad vor dem Zutritt von Atmosphärgasen zu schützen. Beim Schweißen von Stahl wird als Schutzgas oft CO₂ oder ein Gemisch aus CO₂ und Argon verwendet. Die Vor- und Nachteile, welche sich durch die Verwendung von 100% CO₂ oder Mischgas bei konventionellen Schweißverfahren ergeben, sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Gegenüber den konventionellen Schweißverfahren ist das CMT-Verfahren in der Lage, die Eigenschaften der Schweißnaht, unter der Verwendung von 100% CO₂, deutlich zu verbessern. Wie in Abbildung 10 ersichtlich, sind Schweißspritzer nahezu nichtmehr vorhanden, die Nahtoptik verbessert sich wesentlich und durch den fehlenden Pincheffekt kann mit dem CMT-Prozess eine Leistungssteigerung in Form einer höheren Schweißgeschwindigkeit erzielt werden (Bruckner et al. 2013).

Mischgas		100% CO2	
-	schmäler Einbrand	+	breiter, sicherer Einbrand
-	teurer als 100% CO2	+	günstiges Schutzgas
+	geringe Schlackebildung	-	mehr Schlacke
+	gute Nahtoptik	-	schlechte Nahtoptik
+	geringe Spritzerbildung	-	hohe Spritzerbildung

Tabelle 3: Vor- und Nachteile von Mischgas oder 100% CO2 als Schutzgas (Bruckner et al. 2013)

2.3.4 Prozesskombinationen und Verfahrensvarianten

Die CMT-Technologie bringt eine Vielzahl an möglichen Prozesskombinationen und Verfahrensvarianten mit sich, wodurch die wesentlichen Eigenschaften der Schweißergebnisse beeinflusst werden können.

Die Prozessvariante **CMT Synchronpuls** gilt als die Einfachste und bietet den zyklischen Ablauf einer geringen Leistungsphase und einer nachfolgenden größeren Leistungsphase. Durch diese phasenweisen Änderungen des Schweißprozesses wird das Schmelzbad in Schwingung versetzt, wodurch Vorteile bei der Durchschweißung und der Flankenerfassung erzielt werden. Ersichtlich wird diese Phasenänderung durch die Schuppung der Nahtoberfläche (Bruckner et al. 2013).

Durch den Einbau von Pulszyklen in den CMT-Prozess ergibt sich eine Kombination aus CMT- und Impulsschweißprozess. Diese Prozesskombination erhielt den Namen **CMT Pulse** und vereint die Vorteile beider Schweißprozesse. Durch den Einbau von Pulszyklen wird eine Verbesserung der Schweißleistung ermöglicht, wobei mit der CMT-Prozessphase im gleichen Zuge die Stabilität des gesamten Schweißprozesses erhöht wird (Bruckner et al. 2013).

Mit der **CMT Advanced** Technologie, welche zusätzlich zur reversierenden Drahtbewegung auch einen Polaritätswechsel des Schweißstroms in die Prozessregelung einbindet, gelingt es, den bereits niedrigen Wärmeeintrag des CMT-Verfahrens weiter zu verringern. Außerdem wird in der negativ geladenen Prozessphase ein größerer Schmelztropfen gebildet, was bei gleichbleibendem Schweißstrom zu einer höheren Abschmelzleistung führt (Bruckner et al. 2013).

Eine weitere Prozessvariante ergibt sich durch die Kombination von CMT Pulse mit CMT Advanced. **CMT Pulse Advanced** besteht aus einer negativen CMT-Phase und einer positiven Impulslichtbogenphase, wobei die Drahtförderung während der Impulsphase kontinuierlich erfolgt. Erreicht wird dabei eine höhere Abschmelzleistung als bei CMT Pulse (Bruckner et al. 2013).

Mit **CMT Twin** wurde ein MSG-Tandemschweißverfahren geschaffen womit eine erhöhte Wirtschaftlichkeit erreicht wird. Das Schweißen mit zwei Drahtelektroden ermöglicht eine Steigerung der Abschmelzleistung durch die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit oder die Vergrößerung des Nahtquerschnitts. Die führende Drahtelektrode startet den CMT-Prozess direkt am Grundwerkstoff und bildet ein Schmelzbad, worauf die folgende Drahtelektrode brennt und die Ablagerungsrate erhöht wird. Alle zuvor genannten Prozessvarianten können als Twin-System ausgeführt werden, wobei sich die Kombinationen CMT-CMT und CMT Pulse-CMT als besonders vorteilhaft erwiesen haben (Bruckner et al. 2013).

Eine neue Anwendung bietet **CMT Pin**, welche mittels Widerstandserwärmung kleine Drahtstifte auf eine metallische Oberfläche schweißt. Der Prozess startet mit dem Anschmelzen des Drahtes auf dem metallischem Grundmaterial. Es bildet sich ein Schmelzbad, in welchem der Draht bis zum Erstarren verbleibt. Die Abkühlzeit ist nun entscheidend für die Länge des Pins, welcher durch eine erneute Stromerhöhung abschmilzt. Ausschlaggebend für die endgültige Form des Pins (zylindrisch, spitz oder ballförmig) ist das Zusammenspiel aus Stromstärke und Kraft der Drahtförderung (Bruckner et al. 2013).

Mit **CMT Print** können einzelne Punkte auf einem metallischem Grundmaterial abgelegt werden. Dieser Prozess des Aufschweißens einzelner Tropfen kann nebeneinander sowie aufeinander durchgeführt werden (Bruckner et al. 2013).

3 STAND DER WISSENSCHAFT

Publikationen zum Thema „Additive Fertigung von metallischen Werkstoffen“ sind bereits in umfassender Anzahl verfügbar. Die Themengebiete der Arbeiten reichen von der Auflistung und Kategorisierung der einzelnen Fertigungsprozesse, weiter zu direkten Vergleichen unterschiedlicher Prozesskategorien, Eignungsprüfungen bezüglich des vorgesehenen Einsatzgebietes, Prozessoptimierungen und Prozessüberwachungen, bis hin zu mikrostrukturellen Untersuchungen der Erzeugnisse. Die Forschungsarbeiten beschäftigen sich hauptsächlich mit den Werkstoffen Titanium, Aluminium und Stahl, wobei Titanium und Aluminium vermehrt Beachtung geschenkt wird. Ausschlaggebend dafür könnte der Einfluss der Branchen sein, denen im Bereich der metallischen additiven Fertigung das größte Potential zugeschrieben wird. Hierzu zählen die Luft- und Raumfahrt, die Fahrzeugtechnik, der Werkzeugbau und die Medizintechnik.

Die Anzahl der Publikationen speziell zum Thema „Additive Fertigung im Stahlbau“ ist derzeit überschaubar. Die Forschungsfragen decken sich dabei weitgehend mit den allgemeinen Forschungsthemen der additiven Fertigung von metallischen Werkstoffen.

3.1 Eigenspannungen und Verzug

Wesentlichen Einfluss auf eine wirtschaftliche und einfache Integration von additiven Fertigungsprozessen in den bestehenden Stahlbau hat die benötigte Fertigungszeit, welche wesentlich mit der möglichen Abschmelzleistung zusammenhängt. Den bislang limitierenden Faktor hierbei bildet die Zwischenlagentemperatur, welche bei Vernachlässigung zu Verzug und Eigenspannungen im Erzeugnis führt und so die Bauteiltragfähigkeit negativ beeinflusst. Die derzeitige Herausforderung liegt somit in der Erhöhung der Abschmelzung und der gleichzeitigen Kontrolle von Verzug und Eigenspannungen. Einen Lösungsansatz für die Problemvermeidung bilden hierfür thermomechanische Simulationen, wodurch diesbezüglich Vorhersagen getroffen werden können, welche wiederum eine vorzeitige Anpassung der Prozessparameter ermöglicht. Eine nachträgliche Problembehandlung kann mittels Spannungsarmglühen vollzogen werden (Feldmann et al. 2019).

3.2 Unbearbeitete Oberflächen

Eine weitere Forschungsfrage umfasst die Auswirkungen und die Handhabung des Geometrieeffekts von unbearbeiteten Oberflächen hinsichtlich der Festigkeitsbestimmung sowie der Bauteilbemessung. Abhängig vom eingesetzten Schweißprozess, den verwendeten Schweißparametern und der damit zusammenhängenden Abschmelzleistung, ergeben sich,

über das gesamte Bauteil, wiederkehrende, in Schweißrichtung verlaufende Kerben. Erfolgt nun, aus Kostengründen oder auch aus Gründen der Zugänglichkeit keine Nachbehandlung der Oberfläche, ist eine negative Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten nicht ausgeschlossen. Notwendig für die Bemessung solcher Bauteile wird nun die Definition der effektiven Wandstärke sowie der Einfluss der Kerben auf die Materialfestigkeiten. Die erste Werte zur Ermüdungsfestigkeit eines WAAM-gefertigten Bauteils mit unbehandelter Oberfläche fallen mit 112 N/mm^2 geringer aus als die 160 N/mm^2 eines gewalzten Bleches (Feldmann et al. 2019).

3.3 Schweißpfadführung

Geometrische Fragestellungen ergeben sich an Kreuzungspunkten des Schweißpfades, Anfangs- und Endpunkten des Schweißpfades, sowie parallel verlaufenden Schweißpfaden zur Herstellung von massiven Bauteilen. Die Problematik von Kreuzungs-, Anfangs- und Endpunkten lässt sich am besten mit Hilfe einer Abbildung beschreiben. Aus Abbildung 11 wird ersichtlich, dass sich beim Schweißstart sowie bei Kreuzungspunkten leichte Überhöhungen des Schweißgutes ergeben. Das Schweißende bringt hingegen immer ein abflachen der Schweißnaht mit sich. Besonders kritisch sind solche geometrischen Abweichungen infolge der Tatsache, dass sie sich mit zunehmender Bauteilhöhe kontinuierlich verstärken. Die Unregelmäßigkeiten zufolge Schweißstart und Schweißende können durch die Änderung der Schweißrichtung nach Abschluss der jeweiligen Schweißlage relativ einfach korrigiert werden. Schweißstart und Schweißende gleichen sich somit gegenseitig aus. Für die Überhöhungen sowie Unterwölbungen ab den Kreuzungspunkten besteht die Möglichkeit zur Korrektur durch die Anpassung von Schweißparametern (Drahtfördergeschwindigkeit und Schweißgeschwindigkeit). Weiters können kritische Kreuzungspunkte oder Verzweigungen auch durch oszillierende Schweißpfadplanungen vermieden werden (Feldmann et al. 2019).

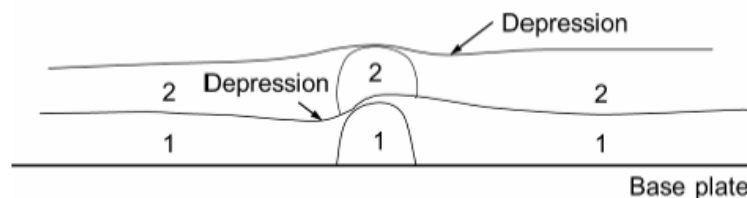


Abbildung 11: Geometrische Abweichungen (Feldmann et al. 2019)

Derartige Probleme können durch eine spezielle Schweißpfadplanung vermieden werden. Wie in Abbildung 12 schematisch dargestellt, können kreuzförmige Geometrien auch ohne eine Kreuzung der Schweißnähte hergestellt werden.

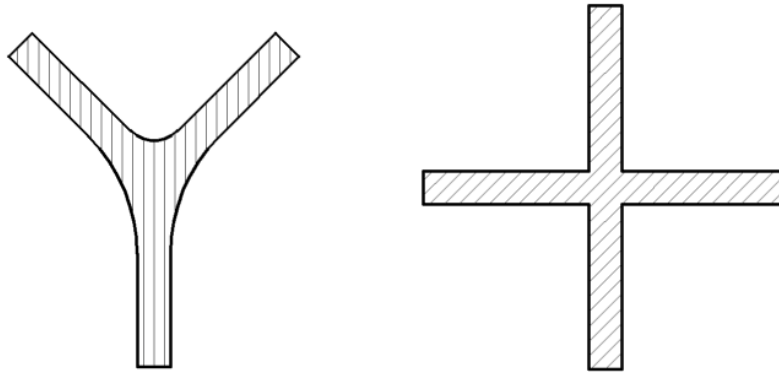


Abbildung 12: Alternative Schweißpfadführung (Feldmann et al. 2019)

3.4 Forschungsarbeiten

Die folgende Auflistung beinhaltet die derzeit relevantesten Forschungsarbeiten zum Thema *metallische additive Fertigung in der Bautechnik*. Im Zuge der Verfahrensfindung (siehe Kapitel 2.2) wurde der Technologie Wire and Arc Additive Manufacturing das größte Potential zugeschrieben, wodurch sich auch die Auflistung der Forschungsarbeiten auf diese Technologie konzentriert. Die Arbeiten sind hinsichtlich ihres Schwerpunktes kategorisiert und schaffen einen Überblick zum aktuellen Stand der Wissenschaft.

3.4.1 Bautechnik

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Feldmann et al. 2019	3D-Drucken im Stahlbau mit dem automatisierten Wire Arc Additive Manufacturing	- Überblick - Forschungsfelder
Lange und Feucht 2019	3-D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of Connection Elements and Beam Reinforcements	- Anwendungsmöglichkeiten - Schweißparameter
Mechtcherine et al. 2018	3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour	- GMAW - Gedruckter Bewehrungsstahl
Buchanan und Gardner 2019	Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges	- Prozessvarianten - Anwendungsmöglichkeiten - Herausforderungen
Galjaard et al. 2015	Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing	- Topologieoptimierung - Knotenpunkt
Delgado Camacho et al. 2018	Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review	- Prozessvarianten - Beispielprojekte - Anwendungsmöglichkeiten

Tabelle 4: Forschungsarbeiten WAAM- Bautechnik

3.4.2 Allgemeines

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Derekar 2018	A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium	- Überblick - Forschungsthemen - Aluminium
Grunwald et al. 2018	WAAM – Technologie und aktuelle Anwendung	- Prozessvergleich - Materialeigenschaften
Williams et al. 2016	Wire + Arc Additive Manufacturing	- Vorteile - Herausforderungen
Kah et al. 2013	Advanced gas metal arc welding processes	- Überblick - Prozessvarianten

Tabelle 5: Forschungsarbeiten WAAM- Allgemeines

3.4.3 Materialeigenschaften

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Lu et al. 2017	Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties	- Prozessparameter - Mikrostruktur - Open Source System
Donoghue et al. 2016	The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V	- Interlayer Rolling - Korngefüge - Titanium
Shen et al. 2016	In-depth study of the mechanical properties for Fe ₃ Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing	- Mikrostruktur - Mechanische Eigenschaften - Fe ₃ Al
Wang et al. 2013	Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V	- Mikrostruktur - Mechanische Eigenschaften - Titanium

Tabelle 6: Forschungsarbeiten WAAM- Materialeigenschaften

3.4.4 Eigenspannungen

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Somashekara et al. 2017	Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing	- Mehrdrahtschweißen - Schweißpfadführung - FE-Modellierung
Martina et al. 2016	Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components	- Interlayer Rolling - Titanium
Zhang et al. 2016	Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additivemanufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress	- Rissausbreitung - Ermüdung - Titanium
Ding et al. 2011	Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts	- Thermische Analyse - Modellierung

Tabelle 7: Forschungsarbeiten WAAM- Eigenspannungen

3.4.5 Design

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Xiong et al. 2017	Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition	- Geometrische Versuche - Einfluss einzelner Parameter - Stahl
Ding et al. 2015a	A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)	- Nahtüberlappungen - Stahl
Mehnen et al. 2014	Design study for wire and arc additive manufacture	- Pfadkreuzungen - FE-Modellierung

Tabelle 8: Forschungsarbeiten WAAM- Design

3.4.6 Optimierungen

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Youheng et al. 2017	Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel	- Oberflächenoptimierung - Varianzanalyse - Bainit Stahl
Geng et al. 2017	Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing	- Spaltbereiche - GTAW - Aluminium

Tabelle 9: Forschungsarbeiten WAAM- Optimierungen

3.4.7 Prozessüberwachung

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Zhan et al. 2017	A wire deflection detection method based on image processing in wire+arc additive manufacturing	- Schweißdrahtverformung - Überwachung per Kamera - Berechnung Schiefstellung
Yang et al. 2017	Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography	- Thermische Analyse - Infrarotkamera - Oberflächentemperatur - Interlayer Cooling
Xiong und Zhang 2013	Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision	- Regulierung der Schmelzbadgeometrie - Überwachung Breite & Höhe

Tabelle 10: Forschungsarbeiten WAAM- Prozessüberwachung

3.4.8 Cold Metal Transfer

Autor Erscheinungsjahr	Titel	Schlagwörter
Queguineur et al. 2018	Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications	- Große Bauteile - Schweißparameter - Materialeigenschaften
González et al. 2017	Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology	- Grundeinstellungen - Genauigkeit
Stockinger et al. 2016	Additive Manufacturing Via Cold Metal Transfer	- Schweißparameter - Materialeigenschaften
Posch et al. 2014	Manufacturing of Turbine Blades by shape giving CMT-Welding	- Materialeigenschaften - Mikrostruktur
Kazanas et al. 2012	Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture	- Geometrische Möglichkeiten - Schweißparameter

Tabelle 11: Forschungsarbeiten WAAM- Cold Metal Transfer

Aufgrund der positiven Eigenschaften von Cold Metal Transfer wurde das Verfahren auch für die Schweißversuche im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. Aus diesem Grund sollen die bisherigen Forschungsarbeiten im Folgenden näher betrachtet werden. Den Beschreibungen können in weiterer Folge Parametereinstellungen, Erfahrungen zu unterschiedlichen Versuchsaufbauten und die gewonnen Erkenntnisse entnommen werden.

Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications (Queguineur et al. 2018)

Das International Institute of Welding beschäftigte sich im Jahre 2017 mit der Forschung an einer alternativen Fertigungsmethode für marine Bauteile, welche bisher zumeist durch Gussverfahren hergestellt wurden. Mit der Möglichkeit große Bauteile mit komplexer Geometrie herzustellen, könnte Wire and Arc Additive Manufacturing dafür ein innovativer Lösungsansatz sein. Die experimentelle Studie beschäftigt sich mit den Materialien Aluminium und Edelstahl, sowie dem WAAM-Verfahren Cold Metal Transfer. Innerhalb dieser Arbeit wurde nachgewiesen, dass mittels WAAM große und somit auch mehrzeilige Bauteile ohne signifikante Fehler hergestellt werden können. Unter Verwendung des Schweißzusatzes aus Edelstahl wurden typische mechanischen Eigenschaften einer Schweißverbindung laut Welding Procedure Qualification Record (WPQR) erreicht. Die Zugfestigkeiten in Nahtlängsrichtung fallen höher aus als in Nahtquerrichtung, welche jedoch jenen der Mindestanforderungen für geschmiedeten, gewalzten sowie gegossenem Edelstahl entsprechen. Die Ergebnisse des Härtetests entsprechen den typischen Kennwerten eines konventionell hergestellten Edelstahls und auch die Untersuchungen hinsichtlich der Korrosion sind zufriedenstellend. Die genaue Bezeichnung des verarbeiteten Edelstahls lautet AISI 316L und die dazu verwendeten Schweißparameter können Tabelle 12 entnommen werden (Queguineur et al. 2018).

Verfahren	WFS [m/min]	TS [cm/min]	Stromstärke [A]	Spannung [V]
CMT	5,0	60	144	19,0

Tabelle 12: Verwendete Schweißparameter (Queguineur et al. 2018)

Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology (González et al. 2017)

Hauptziel dieser Forschungsarbeit war es die Grundeinstellungen für eine additive Fertigung mittels GMAW zu optimieren. Die erstellten Werkstücke wurden anhand der beiden Gesichtspunkte Geometrie und Topographie beurteilt und diskutiert. Zu den geometrischen Aspekten zählten die Werkstückhöhe, Werkstückbreite, Schichthöhe, Winkel zwischen Werkstück und Grundplatte sowie die Abweichung der Werkstückhöhe pro Werkstück. Die topographischen Aspekte setzten sich aus dem arithmetischen Mittel der Höhen über die Oberfläche, der Oberflächensymmetrie beziehungsweise der Gleichmäßigkeit der Oberfläche, der Einsenkungen sowie der Erhebungen der Oberfläche und dem vorhandenen Porenvolumen zusammen. Verwendet wurde ein Schweißgerät der Firma Fronius mit der

Typenbezeichnung TPS 4000 CMT R, ein Schutzgasgemisch bestehend aus 15% CO₂ und 85% Argon, eine Massivdrahtelektrode mit der Bezeichnung AWS ER70S-6 und eine Grundplatte der Stahlgüte S235JR (González et al. 2017).

Additive Manufacturing via Cold Metal Transfer (Stockinger et al. 2016)

Innerhalb dieser Arbeit wurden geeignete Schweißparameter für eine schnelle, effiziente und wirtschaftliche Reparatur von Schmiedewerkzeugen ermittelt. Die Werkstücke wurden mittels CMT-Verfahren hergestellt und anschließend verschiedenen Versuchen unterzogen. Zur genaueren Betrachtung der Mikrostruktur wurden lichtoptische Untersuchungen durchgeführt und zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurden die Werkstücke einem Zugversuch und einer Härteprüfung unterzogen. Als Grundwerkstoff wurde ein Böhler W302 Warmarbeitsstahl 1.2344 verwendet, als Schweißdraht ein Massivdraht mit der Bezeichnung UTP A 73 G 3 und als Schutzgas die Gasmischung CORGON 12s2. Die Schweißarbeiten erfolgten mit dem Schweißgerät Fronius TPS4000-CMT und den in folgender Tabelle dargestellten, Schweißparametern.

Variante	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißdraht-förderung [m/min]	Hitzeeintrag [kJ/cm]	Ablagerung [kg/h]
a	100	11,2	2,2	1,1	1,16
b	160	13,6	4,8	2,1	2,53
c	223	14,7	7,2	3,2	3,75
d	250	20	8,3	5	4,38

Tabelle 13: Schweißparameter (Stockinger et al. 2016)

Um die Anzahl der Einflussparameter zu reduzieren und einen Vergleich herzustellen, wurde der Grundwerkstoff bei allen Prüfungen auf mindestens 400°C erwärmt und eine konstante Schweißgeschwindigkeit von 10mm/s gewählt. Hergestellt wurden einzeilige sowie mehrzeilige Werkstücke, mit einer jeweiligen Höhe von zehn übereinanderliegenden Schweißnähten. Bezüglich der einzeiligen Werkstücke wurde ein Diagramm erstellt, welches die erzielten Querschnittsabmessung, bezogen auf die verwendete Stromstärke, darstellt. Betreffend die mehrzeiligen Werkstücke wurde ersichtlich, dass es mit Parametereinstellung a, der geringsten Stromstufe, nicht möglich war die einzelnen Zeilen miteinander zu verbinden. Die Anzahl und Größe der Poren innerhalb der Schweißnähte ist in den übrigen Werkstücken mit jenem im Basismaterial vergleichbar.

Die Härte sowie die Zugfestigkeit des Schweißgutes stellten sich unabhängig von den Parametereinstellungen als höher als spezifiziert heraus und erfüllten somit die Erwartungen (Stockinger et al. 2016)

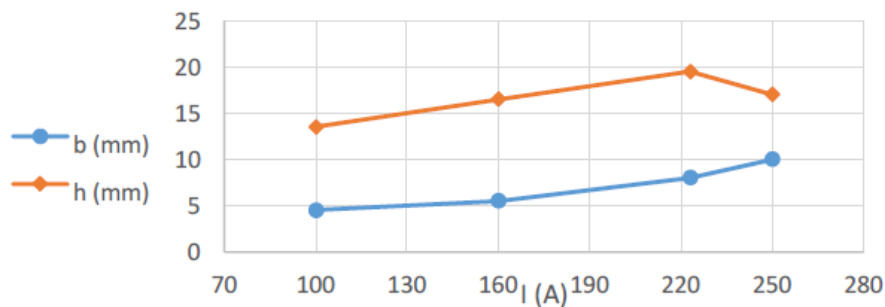


Abbildung 13: Höhe und Breite in Abhängigkeit zur Stromstärke (Stockinger et al. 2016)

Manufacturing of Turbine Blades by shape giving CMT-Welding (Posch et al. 2014)

Bereits in den frühen 90er Jahren nutzte die Firma Andritz Hydro den Gas Metal Arc Wire (GMAW) Prozess zur Fertigung der Turbinenblätter von Pelton-turbinen. Eine große Härte, eine hohe Zugfestigkeit sowie eine porenfreie Struktur zählen bei diesen zu den wichtigsten Materialeigenschaften und konnten mit dem formgebenden Schweißverfahren sichergestellt werden. CMT zählt als eine Erweiterung dieser Technologie und könnte auch in der Herstellung von Turbinenblättern zur Anwendung kommen. Für erste Untersuchungen wurde hierfür eine einfache Schaufelgeometrie mit den Abmessungen 200 x 200 x 10mm mittels CMT hergestellt. Die Herstellungszeit für die 136 Schichten betrug 87 Minuten, was zu einer Abscheidungsrate von 1,7kg/h führt. Die Mikrostruktur sowie die mechanischen Materialeigenschaften des erstellten Werkstückes sind mit den Angaben des Schweißdrahtherstellers vergleichbar und erfüllen somit die Erwartungen. Als Schweißzusatz wurde der Duplexstahl mit der Bezeichnung CN 22/9N-IG der Firma Böhler verwendet (Posch et al. 2014).

Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture
(Kazanas et al. 2012)

Üblicherweise wird beim WAAM der Schweißbrenner vertikal ausgerichtet und das Werkstück in die benötigte Position gedreht. Die Institution Of Mechanical Engineers forschte im Jahr 2011 an den Möglichkeiten Schweißbrenner schräg und horizontal auszurichten, da mit zunehmender Komplexität und Größe der Bauteile eine solche Ausrichtung des Brenners nahezu unumgänglich ist. Die technische Ausrüstung bildete hierfür das Schweißgerät Fronius CMT - Transpulse Synergic 500 und der Roboter ABB type MTB 250 6 Axen. Beim verwendeten Grundwerkstoff handelte es sich um einen Stahl vom Typ S355 und das Schutzgas setzte sich aus 80% Argon und 20% Kohlendioxid zusammen. Innerhalb der Untersuchung wurden Wände mit unterschiedlichen Neigungen (60°, 45°, 30°, 15°), einer Länge von 200mm, einer Höhe von 60mm und einer Stärke von 4-5mm hergestellt. Die Ausrichtung des Schweißbrenners erfolgte hierbei senkrecht auf die geschweißte Wand. Aufgrund der erfolgreichen Herstellung leicht geneigter Wände, wurden in weiterer Folge auch die Möglichkeiten zur Herstellung horizontaler Wände genauer betrachtet. Der größte Einfluss auf die Qualität des Schweißguts konnte, aufgrund der durchgeführten Untersuchungen, dem Schweißparameter Travel Speed (TS) zugeschrieben werden. Weitere Versuche dieser Arbeit beschäftigen sich mit der Herstellung von geschlossenen Strukturen, welche auch mit gekrümmten Flächen umgesetzt wurden. Ein erhöhter Wärmeeintrag bei der Verbindung zweier, additiv hergestellte Wände wird hierbei empfohlen (Kazanas et al. 2012).

4 NORMENWERK

Innerhalb der ISO 17296 „Additive Fertigung – Grundlagen“ werden seit dem Jahr 2011 internationale Standards im Bereich der additiven Fertigung festgelegt. Die Norm setzt sich aus vier Teilen zusammen:

- EN ISO 17296-1 Terminologie
- EN ISO 17296-2 Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe
- EN ISO 17296-3 Haupteigenschaften und entsprechenden Prüfverfahren
- EN ISO 17296-4 Überblick über die Datenverarbeitung

Aus Teil 1 und Teil 2 der ISO 17296 wird ersichtlich, dass WAAM der Prozesskategorie „Gerichtete Energieeinbringung“ zugeordnet wird. Beschrieben wird diese Kategorie als ein additiver Fertigungsprozess, welcher durch konzentrierte Wärmeenergie, Werkstoffe beim Zusammenführen miteinander verschmilzt und so vereinigt. Die folgende Abbildung zeigt die schematische Darstellung der gerichteten Energieeinbringung laut EN ISO 17296-2 (ÖNORM EN ISO 17296-2).

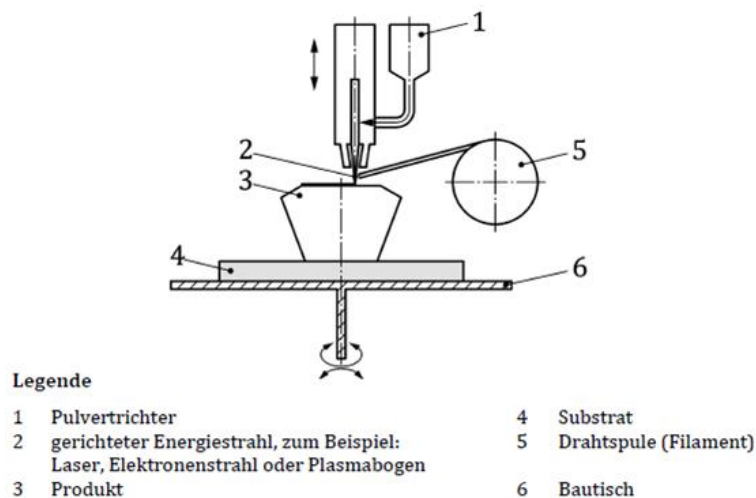


Abbildung 14: Schematische Darstellung der gerichteten Energieeinbringung (ÖNORM EN ISO 17296-2)

Da sich spezifische Prüfverfahren für additiv gefertigte Bauteile noch in Arbeit befinden, wird innerhalb Teil 3 der ISO 17296 auf die derzeit geltenden Prüfnormen verwiesen. In der folgenden Abbildung ist ein Ausschnitt der ISO 17296-3 zu sehen. Die dargestellte Tabelle zeigt die anzuwendenden Prüfnormen, nach Material und der zu untersuchenden Qualitätsmerkmale geordnet. Zusätzlich der Prüfung des Werkstoffes werden innerhalb der ISO 17296-3 auch Richtlinien zur Prüfung der erstellten Bauteile sowie zur Überwachung des Prozesses formuliert.

Qualitätsmerkmale		Metall	Kunststoff	Keramik
Ausgangswerkstoff				
Anforderungen an die Massenrohwerkstoffe	Partikelgröße und Verteilung des Pulvers	ISO 4497 ISO 8130-1 ISO 13319 ISO 13320	ISO 4610 ISO 13319 ISO 13320	ISO 13319 ISO 13320 ISO 24235 ISO 14703
	Morphologie	ISO 9276-6	ISO 9276-6	ISO 9276-6
	Oberfläche	ISO 9277	ISO 9277	ISO 18757 ISO 9277
	Dichte (Klopfdichte und Rohdichte)	ISO 3923-2	ISO 1068	ISO 18753 ISO 23145-1 ISO 23145-2
	Fließverhalten/ Rieselfähigkeit	ISO 4490	ISO 6186 ISO 4324	ISO 14629
	Aschegehalt	nicht relevant	ISO 3451-1	nicht relevant
	Kohlenstoffgehalt	ISO 7625	keine Norm identifiziert	nicht relevant
Bauteile				
Oberflächenanforderungen	Aussehen	ISO 16348	ISO 16348	ISO 16348
	Oberflächengüte	ISO 1302 (Spezifikation) ISO 4288 (Messung)	ISO 1302 (Spezifikation) ISO 4288 (Messung)	ISO 1302 (Spezifikation) ISO 4288 (Messung)
	Farbe	ISO 11664-1 ISO 11664-2 ISO 11664-4 ISO 11664-5	ISO 11664-1 ISO 11664-2 ISO 11664-4 ISO 11664-5	ISO 11664-1 ISO 11664-2 ISO 11664-4 ISO 11664-5
Geometrische Anforderungen	Größe, Länge und Winkelmaße, sowie Maßtoleranzen	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 (Spezifikation) ISO 1938-1 ^c (Messung) ISO 2768-1	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 (Spezifikation) ISO 1938-1 ^c (Messung) ISO 2768-1	ISO 129-1 ISO 286-1 ISO 14405-1 (Spezifikation) ISO 1938-1 ^c (Messung) ISO 2768-1
	Form- und Lagetolerierung (Abweichungen in Form und Position)	ISO 1101 (Spezifikation) + Isostatik ISO 2768-2	ISO 1101 (Spezifikation) + Isostatik ISO 2768-2	ISO 1101 (Spezifikation) + Isostatik ISO 2768-2

Abbildung 15: Teil1 - Haupteigenschaften und entsprechende Prüfnormen (ÖNORM EN ISO 17296-3)

Qualitätsmerkmale			Metall	Kunststoff	Keramik
Mechanische Anforderungen	Härte		ISO 6507	ISO 2039 ISO 868	ISO 14705
	Zugfestigkeit		ISO 6892-1 ^a	ISO 527-1 ISO 527-2 ISO 527-3 ISO 527-4 ISO 527-5 ^a	ISO 15490
	Schlagfestigkeit		ISO 148-1 ISO 148-2 (Charpy) ^a	ISO 179-1 ISO 179-2 (Charpy) ^a ISO 180 (Izod)	ISO 11491 ^{b, c}
	Druckfestigkeit		ISO 4506	ISO 604	ISO 17162
	Biegefestigkeit		ISO 3327	ISO 178	ISO 14704 ISO 14610
	Schwingfestigkeit		ISO 1099 ISO 1143	ISO 13003 ISO 15850	ISO 22214 ISO 28704
	Kriechverhalten		ISO 204	ISO 899-1 ISO 899-2	ISO 22215
	Alterung		nicht relevant	ISO 4892-1 ISO 4892-2 ISO 4892-3 ISO 4892-4	nicht relevant
	Reibungsbeiwert		keine Internationale Norm identifiziert	ISO 6601	ISO 20808
	Scherfestigkeit		ISO 148-1	ISO 14129	ISO 14129
Risswachstum		ISO 22889	ISO 15850	ISO 15732 ISO 18756 ISO 24370 ISO 23146	
Anforderungen an Aufbauwerkstoffe		Dichte	ISO 3369	ISO 1068	ISO 18754
	Physische, sowie physikalisch-chemische Eigenschaften: Analyse der Mikrostruktur (zerstörungsfreie Prüfung)	Durchstrahlungsprüfung	ISO 5579	nicht relevant	nicht relevant
		Eindringprüfung	ISO 3452-1 ISO 3452-2	ISO 3452-1 ISO 3452-2	ISO 3452-1 ISO 3452-2
		Tomografie	IEC 61675-1 IEC 61675-2	IEC 61675-1 IEC 61675-2	IEC 61675-1 IEC 61675-2
		Magnetpulverprüfung	ISO 9934-1	ISO 9934-1	ISO 9934-1
^a ISO/TC 261 wird spezielle Normen für die Probengeometrie und Probenrichtung festlegen. ^b Spezifisch für chirurgische Implantate. ^c Veröffentlichung in Vorbereitung.					

Abbildung 16: Teil2 - Haupteigenschaften und entsprechende Prüfnormen (ÖNORM EN ISO 17296-3)

4.1 Härte

Die Härte, welche den Widerstand eines Werkstoffes gegen das Eindringen eines Prüfkörpers beschreibt, kann grundsätzlich durch unterschiedliche Methoden festgestellt werden. Man unterscheidet dabei zwischen Ritzverfahren, Schleifverfahren, Eindringverfahren, Prüfungen durch dynamische Verfahren und indirekten Methoden. Der ÖNORM EN ISO 17296-3 kann entnommen werden, dass für additiv Hergestellte, metallische Erzeugnisse nach ÖNORM EN ISO 6507 vorzugehen ist und somit die Härteprüfung nach Vickers (Eindringverfahren) angewendet wird.

Bei dieser Art der Härteprüfung wird eine pyramidenförmige Diamantspitze mit einer festgelegten Prüfkraft in die Probe eingedrückt. Durch die Vermessung des Eindrucks wird die Härte des Werkstoffes bestimmt. Die Vickers-Härte wird anhand folgender Formel berechnet:

$$HV = \frac{\text{Prüfkraft [kg]}}{\text{Oberfläche des Eindrucks [mm}^2\text{]}}$$

4.1.1 Proben

Die Probendicke ist so zu wählen, dass nach der Prüfung keine Verformungen auf der Rückseite der Probe vorhanden sind. Laut Norm wird dieses Kriterium ab einer Dicke der mindestens 1,5-fachen Eindruckdiagonallänge erfüllt. Mindestdicken der Proben in Abhängigkeit der Prüfkraft und Härte befinden sich im Anhang A der ÖNORM EN ISO 6507. Für eine exakte Messung des Eindrucks muss die Oberfläche der Probe eine Bearbeitung sowie einen glatten Zustand aufweisen. Die Durchführung der Prüfung auf einer gekrümmten Oberfläche ist möglich, jedoch müssen die Anhang B angegebenen Korrekturwerte in der Ergebnisauswertung berücksichtigt werden (ÖNORM EN ISO 6507-1).

4.1.2 Durchführung

Die üblichen Prüfkraften sind in laut Norm definiert und befinden sich im Bereich von 0,009807N bis 980,7N. Liegt die gewählte Prüfkraft außerhalb dieses Bereiches, ist die Prüfung nur gültig, wenn sich ein Diagonaleindruck von mindestens 0,020mm ergibt. Eine weitere Vorgabe bezüglich der Versuchsdurchführung betrifft den Mindestabstand von nebeneinanderliegenden Prüfeindrücken. Für den Werkstoff Stahl beträgt dieser Mindestabstand für nebeneinanderliegende Abdrücke die 3-fache Eindruckdiagonallänge und die 2,5-fachen Eindruckdiagonallänge zum Rand der Probe (ÖNORM EN ISO 6507-1).

4.2 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit eines Werkstoffes kann mit der Durchführung eines Zugversuches bestimmt werden. Der Zugversuch laut ÖNORM EN ISO 6892-1 dient zur Ermittlung mechanischer Kennwerte bei Raumtemperatur. Bei einem derartigen Versuch wird die Probe durch das Aufbringen einer Zugbeanspruchung bis zum Bruch gedehnt. Die Belastung der Probe wird während des Versuchs langsam erhöht und gemeinsam mit der zugehörigen Verformung kontinuierlich aufgezeichnet (ÖNORM EN ISO 6892-1)

4.2.1 Proben

Gemäß ÖNORM EN ISO 6892-1 können Proben mit unterschiedlichen Querschnitten zur Durchführung des Zugversuches verwendet werden. Grundsätzlich werden die Proben entsprechend ihrer Abmessungen in proportionale und nicht proportionale Proben unterschieden. Proportionale Proben werden durch ein bestimmtes Verhältnis von Anfangsmesslänge L_0 zu Anfangsquerschnitt S_0 beschrieben und sind für den Zugversuch zu bevorzugen. Das vorgegebene Verhältnis wird durch die Gleichung

$$L_0 = k * \sqrt{S_0}$$

ausgedrückt, wobei für Proben mit einer Anfangsmesslänge von mindestens 15mm, der international festgelegten Proportionalitätsfaktor $k = 5,65$ zu verwenden ist (ÖNORM EN ISO 6892-1).

Auf die gebräuchlichsten Probenarten wird im entsprechenden Anhang der Norm genauer eingegangen. Anhang A beinhaltet Empfehlungen für die Anwendung Rechnergestützte Zugprüfmaschinen und Anhang B - D beinhalten, unter Abhängigkeit der Probenform, Informationen zu den Probenabmessungen sowie zur Probenherstellung.



Erzeugnisformen		Maße in Millimeter
Feinblech — Grobblech — Flachstäbe	Draht — Stäbe — Profile	Entsprechender Anhang
		
Dicke a	Durchmesser oder Seitenlänge	
$0,1 \leq a < 3$	—	B
—	< 4	C
$a \geq 3$	≥ 4	D
Rohre		E

Abbildung 17: Gebräuchliche Probenarten und Erzeugnisformen (ÖNORM EN ISO 6892-1)

4.2.2 Auswertung

Die Auswertung erfolgt anhand des Spannungs-Dehnungs-Diagramms, welches während dem Zugversuch, durch das Zusammenspiel von Messeinrichtung und Prüfungssoftware und der kontinuierlichen Aufzeichnung von Spannung und Dehnung, erstellt wird. Die mit dem Zugversuch festzustellenden Kennwerte und deren Definitionen sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Heine 2015).

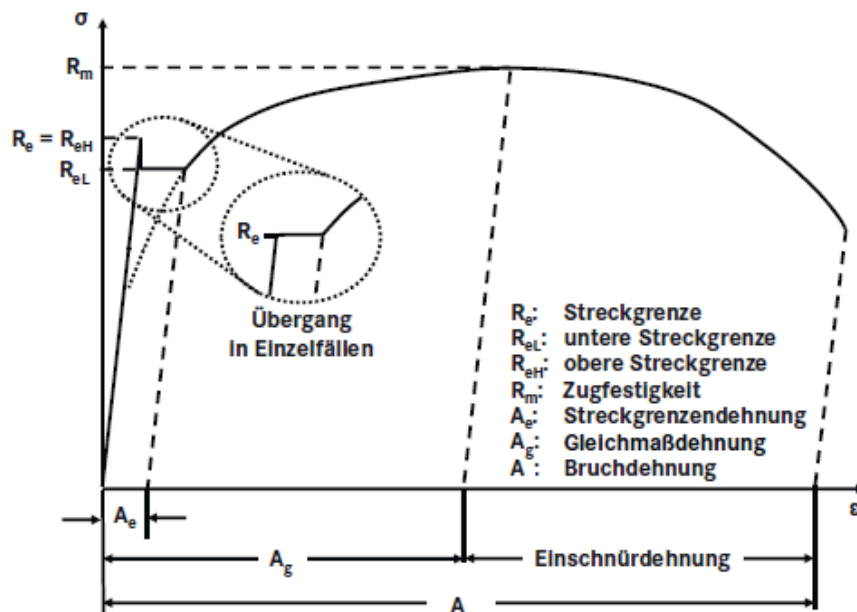


Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Heine 2015)

4.3 Schlagfestigkeit

Der Ablauf des Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy ist in Teil 1 der ÖNORM EN ISO 148 festgelegt. Teil 2 dieser Norm beinhaltet die Vorgehensweise zur Überprüfung der Prüfmaschine, dem sogenannten Pendelschlagwerk. Der Ablauf der Prüfung sieht vor, dass eine genormte Probe von einem herunterfallenden Pendelhammer getroffen wird und die Probe mit einem einzigen Schlag durchschlägt. Die beim Durchschlag der Probe verbrauchte Schlagarbeit wird während der Prüfung erfasst und stellt das Prüfergebnis in der Einheit Joule [J] dar (ÖNORM EN ISO 148-1).

4.3.1 Proben

Hinsichtlich der möglichen Probenabmessungen werden die Proben in Normal-Proben und Untermaß-Proben unterschieden. Der Kerb der Probe befindet sich bei beiden Probenarten in der Mitte der Probenlänge und kann als U-Kerb oder auch als V-Kerb ausgebildet sein. Die

laut ÖNORM EN ISO 148-1 festgelegten Probenmaße sowie die einzuhaltenden Toleranzen sind in der folgenden Abbildung ersichtlich (ÖNORM EN ISO 148-1).

Bezeichnung	Symbol und Nr.	V-Kerb-Probe			U-Kerb-Probe		
		Nennmaß	Toleranzen für die Bearbeitung		Nennmaß	Toleranzen für die Bearbeitung	
				Toleranz-klasse ^a			Toleranz-klasse ^a
Länge	<i>L</i>	55 mm	±0,60 mm	js15	55 mm	±0,60 mm	js15
Breite	<i>W</i>	10 mm	±0,075 mm	js12	10 mm	±0,11 mm	js13
Dicke ^c	<i>B</i>	10 mm	±0,11 mm	js13	10 mm	±0,11 mm	js13
— Normal-Probe		10 mm	±0,11 mm	js13	10 mm	±0,11 mm	js13
— Untermaß-Probe		7,5 mm	±0,11 mm	js13	7,5 mm	±0,11 mm	—
— Untermaß-Probe		5 mm	±0,06 mm	js12	5 mm	±0,06 mm	—
— Untermaß-Probe		2,5 mm	±0,05 mm	js12	—	—	—
Kerbwinkel	1	45°	±2°	—	—	—	—
Steg	2	8 mm	±0,075 mm	js12	5 mm	±0,09 mm	js13
Kerbradius	3	0,25 mm	±0,025 mm	—	1 mm	±0,07 mm	js12
Kerb-Position (zentriert)	4	27,5 mm	±0,42 mm ^d	js15	27,5 mm	±0,42 mm ^d	js15
Winkel zwischen der Symmetrieebene des Kerbs und der Längsachse der Probe		90°	±2°	—	90°	±2°	—
Winkel zwischen benachbarten Längsflächen der Probe	5	90°	±2°	—	90°	±2°	—
Oberflächenrauheit ^b	N.V.	< 5 µm			< 5 µm		

^a In Übereinstimmung mit ISO 286-1.
^b Außer an den Enden müssen die Proben eine Oberflächenrauheit besser als *Ra* 5 µm haben.
^c Falls eine andere Dicke (2 mm oder 3 mm) festgelegt ist, müssen auch die entsprechenden Toleranzen festgelegt sein.
^d Für Pendelschlagwerke mit automatischer Positionierung der Proben wird eine Toleranz von ±0,165 mm statt ±0,42 mm empfohlen.

Abbildung 19: Probenmaße Kerbschlagbiegeversuch (ÖNORM EN ISO 148-1)

4.3.2 Durchführung

Für die Durchführung des Kerbschlagbiegeversuchs wird die Probe so auf die beiden Widerlager gelegt, dass die Kerbe der Wiederlagerseite zugewendet ist und symmetrisch zwischen den beiden Widerlagerblöcken ausgerichtet ist. Der Pendelhammer wird gelöst und fällt, eine Kreisbahn beschreibend, mit der Finne voraus auf die Probe. Die Probe zerbricht bzw. verformt sich und der Pendelhammer schwingt bis zum Umkehrpunkt weiter, welcher mittels Schleppzeiger markiert wird. Je zäher die Probe, desto stärker wird die Bewegung des

Pendelhammers gebremst. Anhand der Differenz zwischen Ausgangshöhe des Pendelhammers und Umkehrpunkt kann die Schlagfestigkeit des Werkstoffes bestimmt werden (Heine 2015).

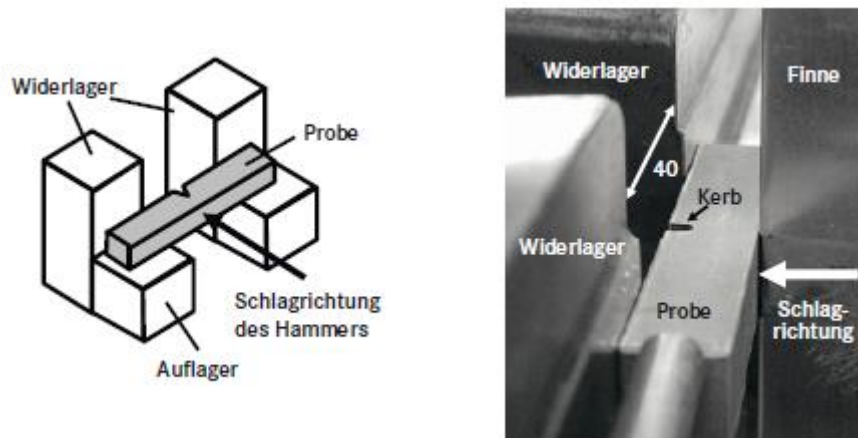


Abbildung 20: Durchführung Kerbschlagbiegeversuch (Heine 2015)

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Schlagenergiewerte vieler metallischer Werkstoffe ist für die Versuchsdurchführung eine festgelegte Prüftemperatur notwendig. Grundsätzlich sollten die Kerbschlagbiegeversuche bei $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durchgeführt werden. Liegt die verbrauchte Schlagenergie über 80 Prozent der potentiell vorhandenen Startenergie, so müssen die Ergebniswerte als ungenaue Werte angesehen werden (ÖNORM EN ISO 148-1).

4.4 Scherfestigkeit

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit wird in der ÖNORM EN ISO 17296-3 auf die bereits beschriebene ÖNORM EN ISO 148-1 (siehe Kapitel 5.3) und den darin beschriebenen Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy verwiesen.

5 ZUGVERSUCHE

Werkstoffe werden durch eine Vielzahl von Eigenschaften beschrieben. Handelt es sich um einen Werkstoff welcher zur Erstellung sogenannter „tragender Strukturen“ verarbeitet wird, so sind vor allem die mechanischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Um die grundlegenden, mechanischen Eigenschaften eines metallischen Werkstoffes aufzuzeigen empfiehlt sich die Durchführung eines einachsigen Zugversuchs. Im Zuge dieser Arbeit erfolgte die Durchführung von 36 einachsigen Zugversuchen, wodurch Kenntnisse zu den mechanischen Materialeigenschaften gewonnen wurden. Durch den schichtweisen Materialaufbau, welcher sich aus der additiven Fertigung ergibt, wird von einer Anisotropie des Ausgangswerkstücker ausgegangen. Zur Beurteilung dieses anisotropen Aufbaus erfolgte die Ausrichtung der Zugproben in zwei unterschiedliche Richtungen. Die mechanischen Materialeigenschaften wurden somit in Längsrichtung der Schweißnähte sowie in Querrichtung der Schweißnähte bestimmt.

5.1 Ausgangsmaterial

Die Herstellung des Ausgangsmaterials, aus welchem die einzelnen Zugproben ausgearbeitet wurden, erfolgte bei der Firma Fronius in Wels. Das Herzstück der dort verwendeten Schweißanlage bildete die MIG/MAG Stromquelle mit der Bezeichnung Fronius TPS 600i. In Kombination mit dem CMT Schweißprozess, dem Fronius MTB 700i Schweißbrenner, sowie dem Roboterarm IRB 2600 der Firma ABB erfolgte die Herstellung dreier Werkstücke mit den Hauptabmessungen von 240x125mm. Zwei davon mit einer Blechstärke von 5,3mm und eines mit der Blechstärke von 12mm. Die Realisierung der verschiedenen Blechstärken erfolgte durch die Anwendung unterschiedlicher Schweißpfade. Die Blechstärke von 5,3mm wurde mit einem geradlinigen Schweißpfad erzielt. Die Blechstärke von 12mm infolge einer Pendelbewegung des Schweißbrenners. Als Werkstoff diente die Massivdrahtelektrode G3Si1 mit einem Durchmesser von 1,2mm und der Firmenbezeichnung Böhler EMK 6 (Datenblatt wurde im Anhang D angefügt), welche unter dem Schutzgas Ar+5%CO₂ verarbeitet wurde. Der Schweiß Tisch wurde mit einer Wasserkühlung versehen, worauf die Grundplatte aus dem Werkstoff Stahl eingespannt wurde. Die Fertigung der Werkstücke erfolgte ohne einem zugrundeliegenden 3D-Datensatz. Die Anfangs- und Endkoordinaten der Schweißnaht wurden manuell festgelegt und dem Schweißroboter übergeben.

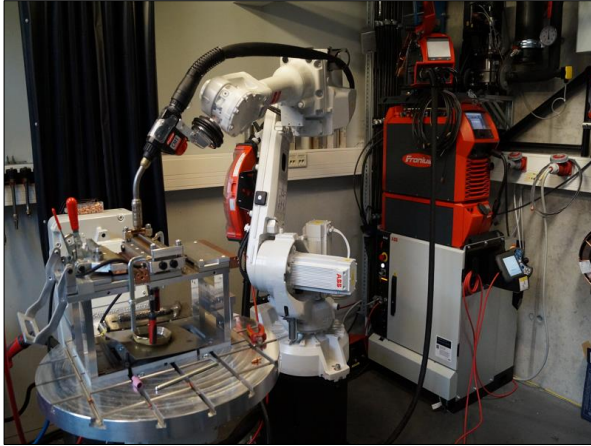


Abbildung 21: Schweißanlage

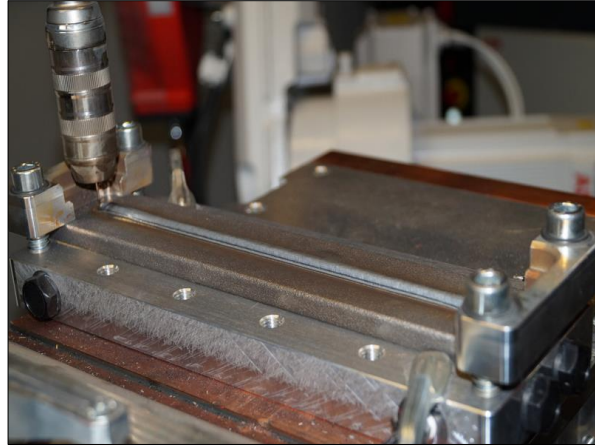


Abbildung 22: Wassergekühlter Schweißbisch



Abbildung 23 – Ausgangsmaterial 5,3mm (ohne Pendeln)



Abbildung 24: Ausgangsmaterial 12mm (mit Pendeln)

5.1.1 Schweißparameter

Die folgende Tabelle beinhaltet die Schweißparameter zu den additiv hergestellten Werkstücken. Insgesamt bestehen die geschweißten Wände aus jeweils 70 Schweißlagen. Zwischen den einzelnen Schweißlagen wurde eine Wartezeit eingehalten bis die Temperatur des zuvor hergestellten Schweißgutes maximal 200°C betrug. Bei den Werkstücken mit der Blechstärke von 5,3mm betrug diese Wartezeit ca. 2,5 Minuten, bei dem Werkstück mit der Blechstärke von 12mm ca. 3,5 Minuten. Der Abstand zwischen Schweißbrenner und Werkstück wurde einheitlich mit 14mm gewählt. Die dargestellten Werte sind als Mittelwerte pro Werkstück zu verstehen.

		Ohne Pendeln	Mit Pendeln
Abschmelzleistung	[kg/h]	2,1	2,7
Schweißgeschwindigkeit	[cm/min]	50	25
Drahtvorschub	[m/min]	4	5,1
Spannung	[V]	12,6	12,8
Strom	[A]	144	152

Tabelle 14: Schweißparameter

Durch die verwendeten Schweißparameter wurde ein Werkstück mit der Blechstärke 5,3mm in der reinen Schweißzeit von 33,6 Minuten hergestellt. Der Prozess erzielte somit eine Flächenrate von 8,85cm²/min. Inklusive Abkühlzeiten bedeutet dies eine Flächenrate von 1,5cm²/min und eine gesamte Herstellungszeit von 195 Minuten.

Die Herstellung des Werkstückes mit der Blechstärke 12mm erfolgte in 67,2 Minuten reiner Schweißzeit, was eine Flächenrate von 4,46cm²/min ergibt. Inklusive Abkühlzeiten ergibt sich eine Flächenrate von 0,98cm²/min und eine gesamte Herstellungszeit von 307 Minuten

5.2 Probenabmessungen

Die Festlegung der Probenabmessungen erfolgte laut ÖNORM EN ISO 6892-1 „Metallische Werkstoffe – Zugversuche“. Durch die Tabelle 2 „Gebräuchliche Probenarten und Erzeugnisformen“ der ÖNORM EN ISO 6892-1 sowie der Form des Ausgangsmaterials, erfolgt die Verweisung auf den entsprechenden Anhang, welcher die Vorgangsweise zur Findung der korrekten Probenabmessungen vorgibt. Durch die blechartige Form des Ausgangsmaterials und den vorhandenen Blechstärken von 5,3mm und 12mm, ergibt sich Anhang D als entsprechender Anhang.



Erzeugnisformen		Maße in Millimeter
Feinblech — Grobblech — Flachstäbe	Draht — Stäbe — Profile	Entsprechender Anhang
		
Dicke a	Durchmesser oder Seitenlänge	
$0,1 \leq a < 3$	—	B
—	< 4	C
$a \geq 3$	≥ 4	D
Rohre		E

Abbildung 25: Tabelle 2 - Gebräuchliche Probenarten und Erzeugnisformen (ÖNORM EN ISO 6892-1)

Die Festlegung der Probenabmessungen richtet sich nach dem vorgegebenen Verhältnis zwischen Anfangsmesslänge L_0 und Anfangsquerschnitt S_0 , welches durch die Gleichung

$$L_0 = k * \sqrt{S_0}$$

beschrieben wird. Der Proportionalitätsfaktor k ist ein international festgelegter Wert und ist der ÖNORM EN ISO 6892-1 zu entnehmen. Unter Einhaltung des zuvor beschriebenen Verhältnisses für proportionale Proben und einer vorgegebenen Mindestlänge der parallelen Länge L_c werden die Abmessungen der Zugproben folglich dargestellt und berechnet.

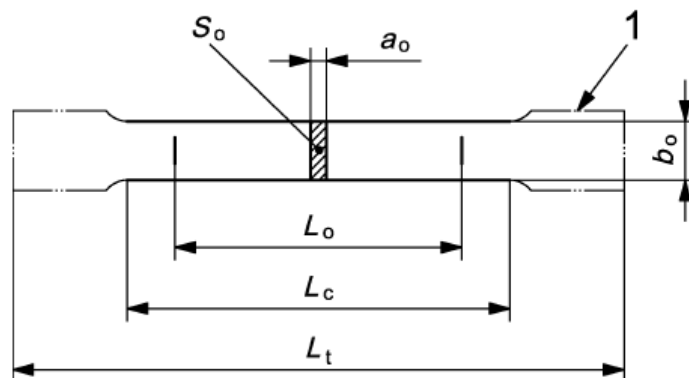


Abbildung 26: Definition Abmessungen (ÖNORM EN ISO 6892-1)

Den Ausgangspunkt der Berechnung bildet die Annahme von Probendicke a_0 und Probenbreite b_0 .

$$a_0 = 5 \text{ mm}$$

$$b_0 = 8 \text{ mm}$$

Mit diesen beiden Abmessungen wird in weiterer Folge der Anfangsquerschnitt S_0 berechnet.

$$S_0 = a_0 * b_0 = 5\text{mm} * 8\text{mm} = 40\text{mm}^2$$

Da zwischen Anfangsquerschnitt S_0 und Anfangsmesslänge L_0 eine bestimmte Beziehung eingehalten werden muss, kann mit folgender Gleichung die Anfangsmesslänge L_0 bestimmt. Der Proportionalitätsfaktor k ist laut Norm mit 5,65 anzunehmen.

$$L_0 = k * \sqrt{S_0} = 5,65 * \sqrt{40\text{mm}} = 35,73\text{mm}$$

Der Mindestwert der parallelen Länge L_C , für proportionale Proben mit anderen Querschnitten als zylinderförmig, wird wie folgt berechnet:

$$L_C \geq L_0 + 1,5 * \sqrt{S_0} = 35,73\text{mm} + 1,5 * \sqrt{40\text{mm}} = 45,22\text{mm}$$

Unter Einhaltung der Vorgaben laut ÖNORM EN ISO 6892-1 ergibt sich die in Abbildung 27 dargestellte Probengeometrie. Für den Übergangsbereich zwischen Probenkopf und den parallelen Längen wird ein Ausrundungsradius von mindestens 12mm vorgeschrieben. Die Abmessungen der Probenköpfe richten sich nach der Spannvorrichtung der Zugprüfmaschine und sind somit nicht an die Norm gebunden.

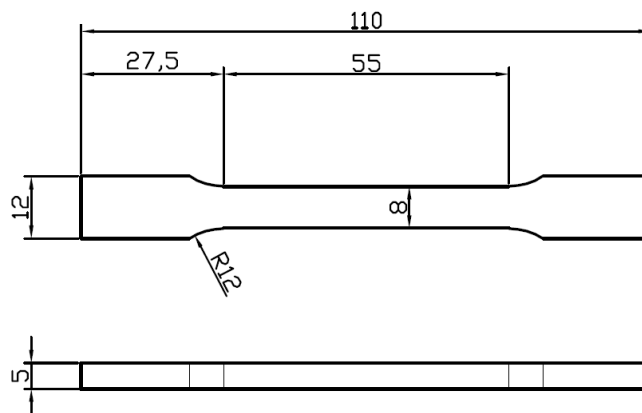


Abbildung 27: Probenabmessungen

5.3 Probenanordnung

Wie bereits erwähnt wird durch den schichtweisen Materialaufbau von einer Anisotropie des Ausgangswerkstücks ausgegangen. Um das Ausmaß dieser Anisotropie beurteilen zu können, erfolgt die Ausrichtung der Zugproben in zwei Richtungen. Eine Hälfte der Proben in Längsrichtung der Schweißnähte und eine Hälfte in Querrichtung der Schweißnähte. Die unterschiedliche Anordnung der Zugproben erfolgt für das gependelt hergestellte Werkstück sowie für die geradlinig hergestellten Werkstücke.

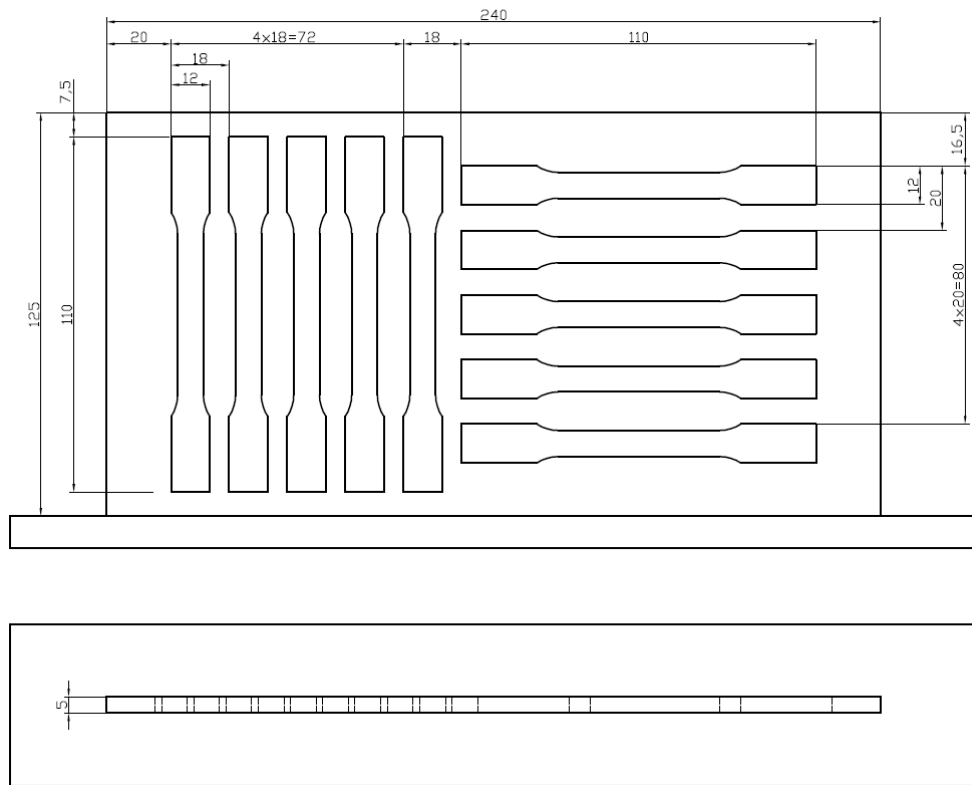


Abbildung 28: Probenanordnung - ohne Pendeln

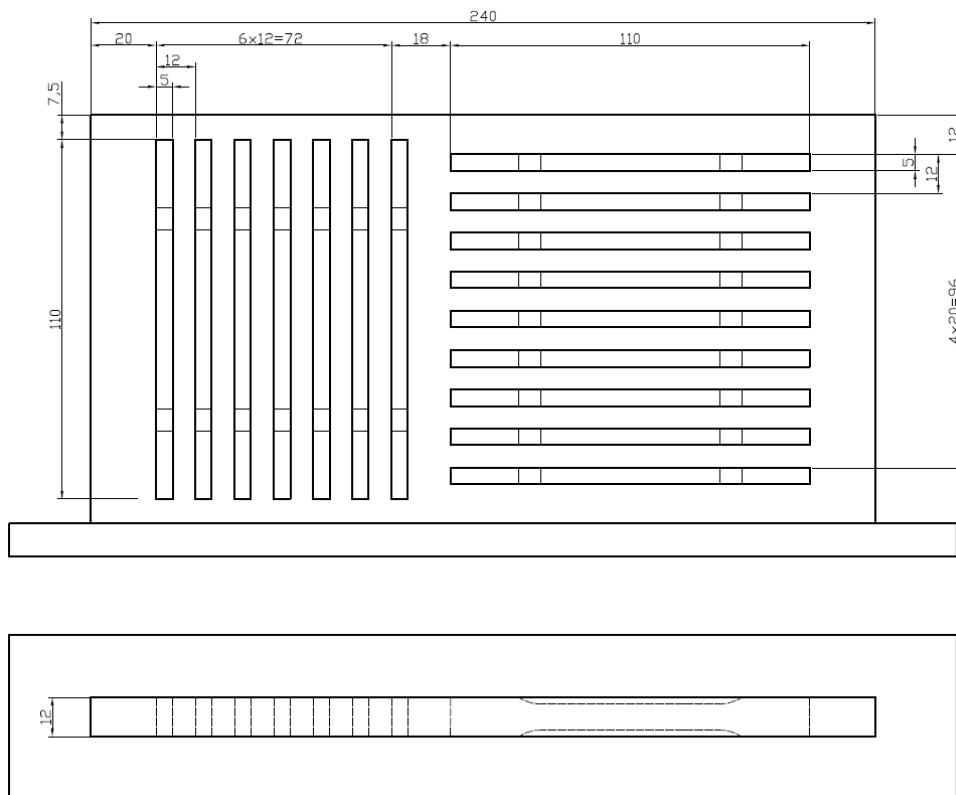


Abbildung 29: Probenanordnung - mit Pendeln

5.4 Probenausarbeitung

Die Ausarbeitung der Proben erfolgte am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung der Technischen Universität Graz. Der grobe Zuschnitt der Proben wurde mit einer Metall-Bandsäge durchgeführt. Die weiteren Bearbeitungsschritte zum Erhalt der einzelnen Zugproben erfolgten durch eine Metallschleifmaschine.

Da es mit den zur Verfügung stehenden Geräten teilweise nicht möglich war die Geometrie exakt laut Plan umzusetzen, kam es im Zuge der Probenausarbeitung zur Anpassung einzelner Probenabmessungen. Aufgrund dieser geometrischen Änderungen ist zu betonen, dass die folgenden Zugversuche nur in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 6892-1 durchgeführt werden konnten.



Abbildung 30: Ausgearbeitete Zugproben 5,3mm



Abbildung 31: Ausgearbeitete Zugproben 12mm

5.5 Prüfmaschine

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte am Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik der Technischen Universität Graz. Zum Einsatz kam hierbei eine von ZwickRoell modernisierte elektromechanisch-statische Prüfmaschine mit der genauen Bezeichnung RetroLine testControl II AllroundLine und einer Nennlast von 100kN. Die Einstellung der prüfungsrelevanten Parameter sowie die Durchführung und Aufzeichnung der Prüfungen erfolgte mit der Prüfsoftware ZwickRoll testXpert III.

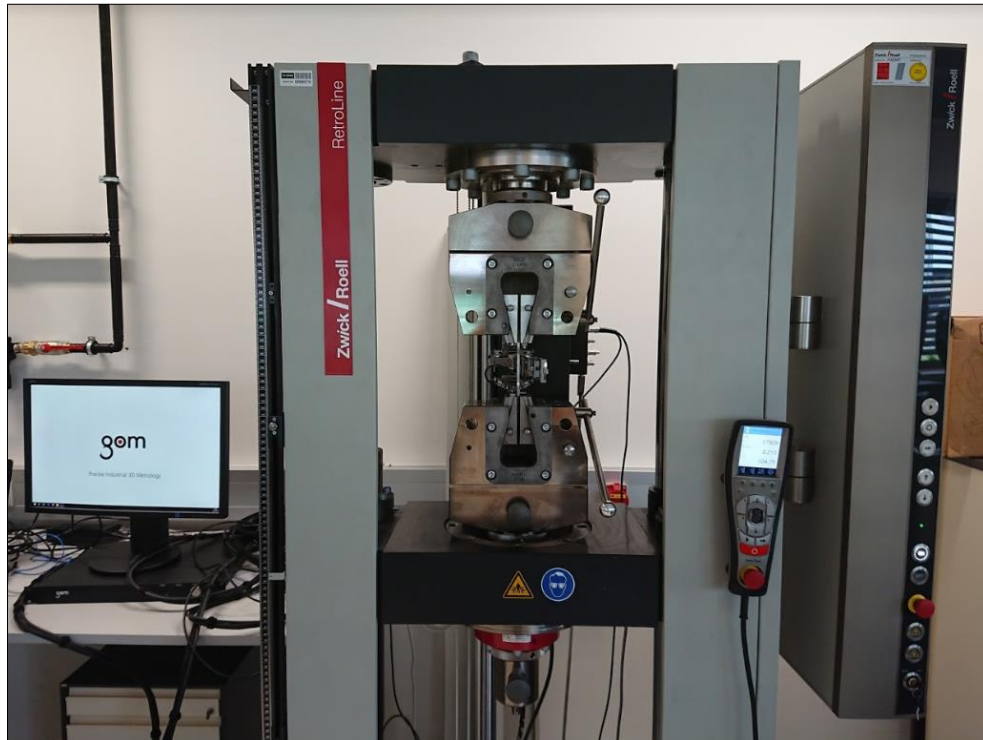


Abbildung 32: RetroLine testControl II AllroundLine

5.5.1 Prüfungskonfiguration

Zur Konfiguration der Zugprüfungen wurden folgende Parameter der Prüfungssoftware testXpert III übergeben.

Prüfgeschwindigkeit	[mm/min]	5
Messlänge Dehnungsaufnehmer	[mm]	50
Erwartete Steifigkeit der Probe	[GPa]	210
Vorkraft	[N]	100
Empfindlichkeit obere Streckgrenze in % Kraftabfall	[%]	0,5

Tabelle 15: Prüfungsparameter

5.6 Prüfungsablauf

Der Versuchsumfang umfasste insgesamt 36 Zugprüfungen. Zur Zuordenbarkeit der einzelnen Proben wurde jede einzelne Probe mit einer Nummer versehen. Die Nummerierungen von 1 bis 36 erfolgten mit Hilfe eines Stanzwerkzeuges und dem zugrundeliegenden Plan, welcher die Zusammengehörigkeit von Probe und Nummer beinhaltet. Die Plandarstellung inklusive Probennummerierung ist im Anhang A beigefügt.

	Ausrichtung zur Schweißnaht	Nummerierung
Ausgangsmaterial ohne Pendeln	quer	1 - 5, 11 - 15
	längs	6 - 10, 16 - 20
Ausgangsmaterial mit Pendeln	quer	21 - 27
	längs	28 - 36

Tabelle 16: Übersicht Probennummerierung

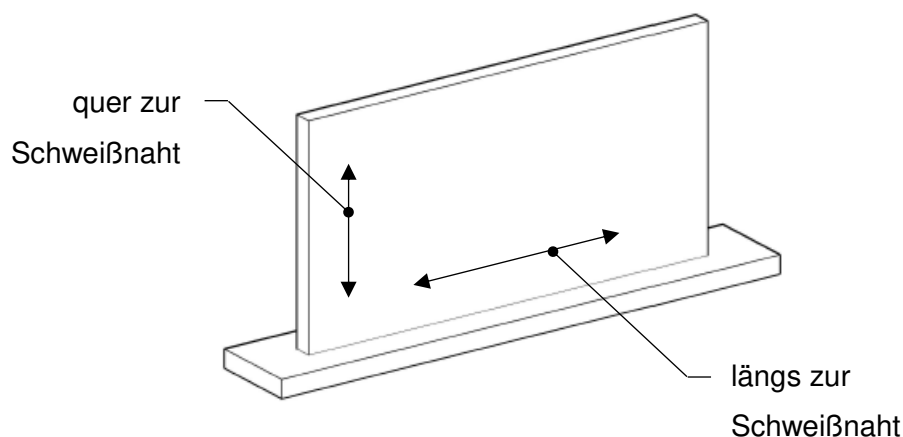


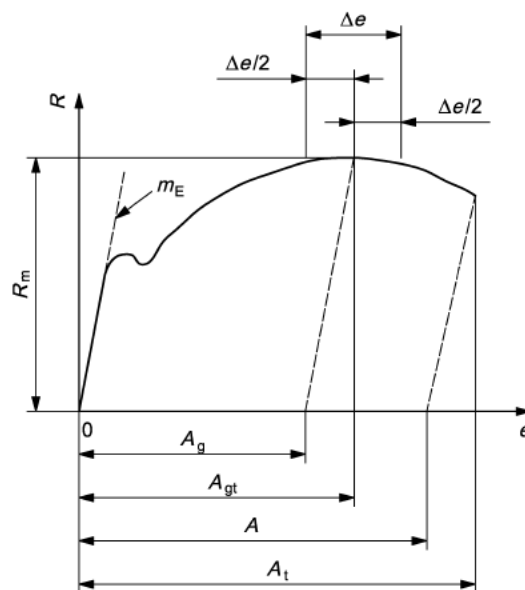
Abbildung 33: Definition Probenausrichtung

Aufgrund von Unregelmäßigkeiten, welche sich während des Ausarbeitungsprozesses der Proben ergeben haben, wurde der Anfangsquerschnitt je Probe mit Hilfe eines Messschiebers kontrolliert und gegebenen Falls korrigiert. Für die Querschnittsabmessungen von unbearbeiteten Proben wurden der Mittelwert aus Minimum und Maximum je Probe und Querschnittsabmessung gebildet. Pro Zugversuch wurde der Prüfsoftware testXpert III somit die Probennummerierung und die zugehörigen Querschnittsabmessungen übermittelt. Die Einspannung der Zugproben erfolgte durch ein Keilspannzeug, wobei besonders darauf geachtet wurde die Kraft so axial wie möglich einzuleiten. Zur Überprüfung der Korrektheit des Einspannvorganges erfolgte eine Testbelastung mit einer Vorkraft von 100N. Eine fehlerhafte Positionierung der Probe zwischen dem Spannzeug kann so frühzeitig erkannt und korrigiert

werden. Nach erfolgreicher Aufbringung der Vorkraft erfolgt die Durchführung des Zugversuches. Die Probe wird bis zum Bruch belastet, wobei zeitgleich, mit Hilfe der Prüfsoftware testXpert III, ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt wird.

5.7 Ergebnisse

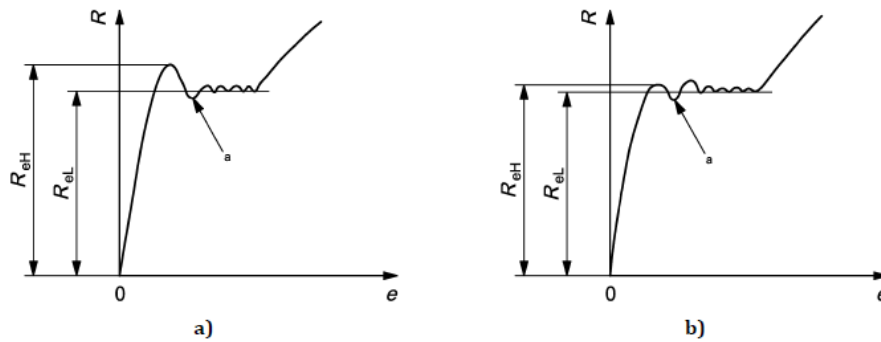
Die Auswertung der Zugversuche erfolgte automatisch durch die Prüfsoftware testXpert III. Es konnten Erkenntnisse zur Zugfestigkeit R_m , zur Streckgrenze R_e sowie zum Dehnungsverhalten des additiv hergestellten Materials gewonnen werden. Die folgenden Darstellungen von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen beinhalten die Definitionen der darin enthaltenen Kennwerte und wurden der ÖNORM EN ISO 6892-1 entnommen.



Legende

- A Bruchdehnung [mit einem Dehnungsaufnehmer oder direkt an der Probe bestimmt (siehe 20.1)]
- A_g plastische Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft
- A_{gt} gesamte Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft
- A_t gesamte Extensometer-Dehnung beim Bruch
- e Extensometer-Dehnung
- m_E Steigung des elastischen Teils der Spannung/Extensometer-Dehnung-Kurve
- R Spannung
- R_m Zugfestigkeit
- Δe Plateaubereich (für die Bestimmung von A_g siehe Abschnitt 17, für die Bestimmung von A_{gt} siehe Abschnitt 18)

Abbildung 34: Definition Zugfestigkeit und Dehnungen (ÖNORM EN ISO 6892-1)



Legende

- e Extensometer-Dehnung
- R Spannung
- R_{eH} obere Streckgrenze
- R_{eL} untere Streckgrenze
- a Einschwingerscheinung

Abbildung 35: Definition obere und untere Streckgrenze (ÖNORM EN ISO 6892-1)

Die Analyse der Bruchformen erfolgt durch den bildlichen Vergleich mit den in Abbildung 36 festgelegten Versagensformen. Durch diese Betrachtung können wertvolle Hinweise zur Verformungsfähigkeit des Werkstoffes gewonnen werden. Eine senkrecht und eben zur Belastungsrichtung verlaufende Bruchfläche zeugt von einem spröden Materialverhalten. Schräg zur Belastungsrichtung verlaufende Bruchflächen ergeben sich durch das Abgleiten unter Schubspannung und beschreiben ein duktileres Materialverhalten (Ruge und Wohlfahrt 2013).

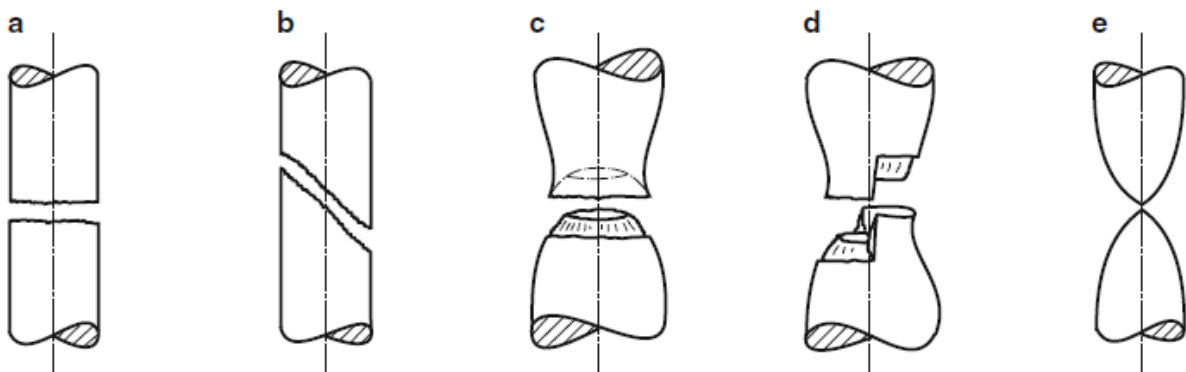


Abbildung 36: Bruchformen: a Normalspannungsbruch, b Scherbruch, c Kegel-Tasse-Bruch (Mischbruch), d Mischbruch, e Duktiler Bruch (Ruge und Wohlfahrt 2013)

Aufgrund der einheitlichen Bruchformen innerhalb einer Probenkategorie werden exemplarisch nur zwei Bruchbilder pro Probengeometrie abgebildet.

Die Einteilung der Ergebnisse erfolgt, wie bereits aus der Probennummerierung ersichtlich, aufgeteilt in zwei Hauptgruppen. Unterscheidungskriterium hierfür ist die Art des Schweißpfades, wobei sich die Probenkategorien „ohne Pendeln“ und „mit Pendeln“ ergeben. Die weitere Unterteilung der beiden Hauptgruppen berücksichtigt die Probenanordnung über das Ausgangswerkstück. Es wird dabei in die beiden Richtungen „längs zur Schweißrichtung“ und „quer zur Schweißrichtung“ unterschieden. Die Definition dieser beiden Richtungen ist in Abbildung 33 dargestellt.

Die Ergebniswerte der Materialeigenschaften werden in Form von Mittelwerten dargestellt. Ungültige Proben, bei denen der Bruch nicht im Bereich der parallelen Längen erfolgte, werden bei der Bildung des Mittelwertes nicht berücksichtigt.

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aller Zugversuche sowie die zugehörigen Querschnittsabmessungen sind im Anhang A angefügt.

5.7.1 Ohne Pendeln – längs zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Alle Ergebniswerte

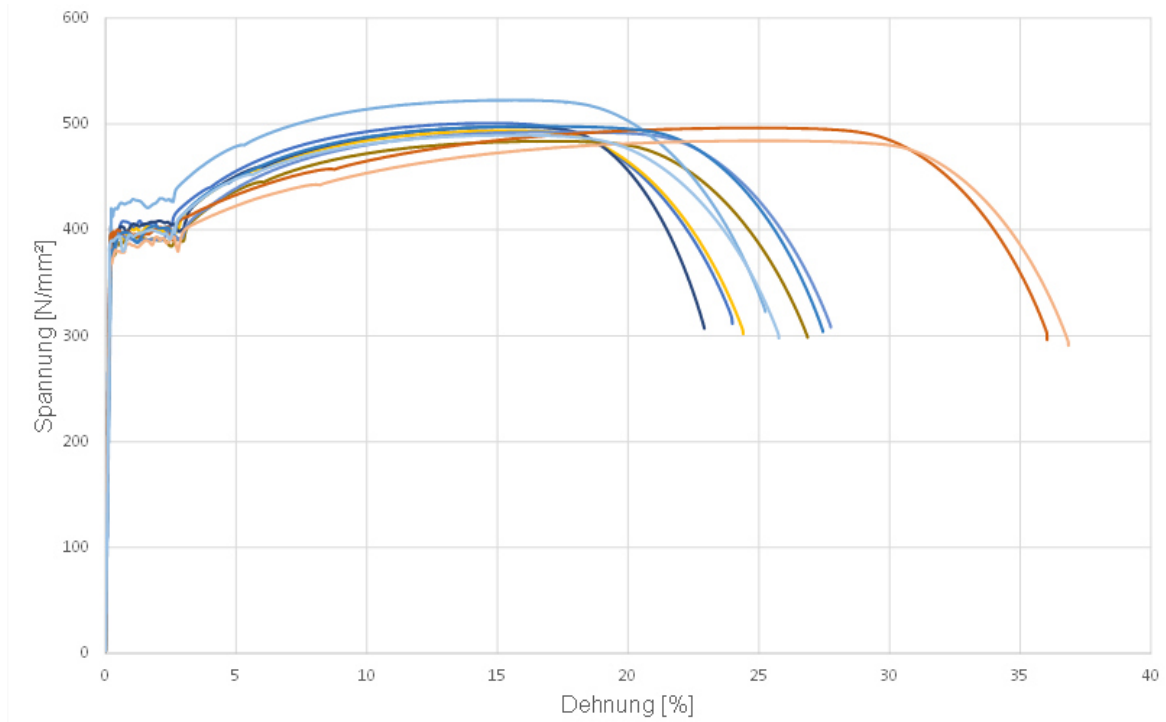


Abbildung 37: Alle Ergebniswerte - ohne Pendeln, längs zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Gültige Ergebniswerte

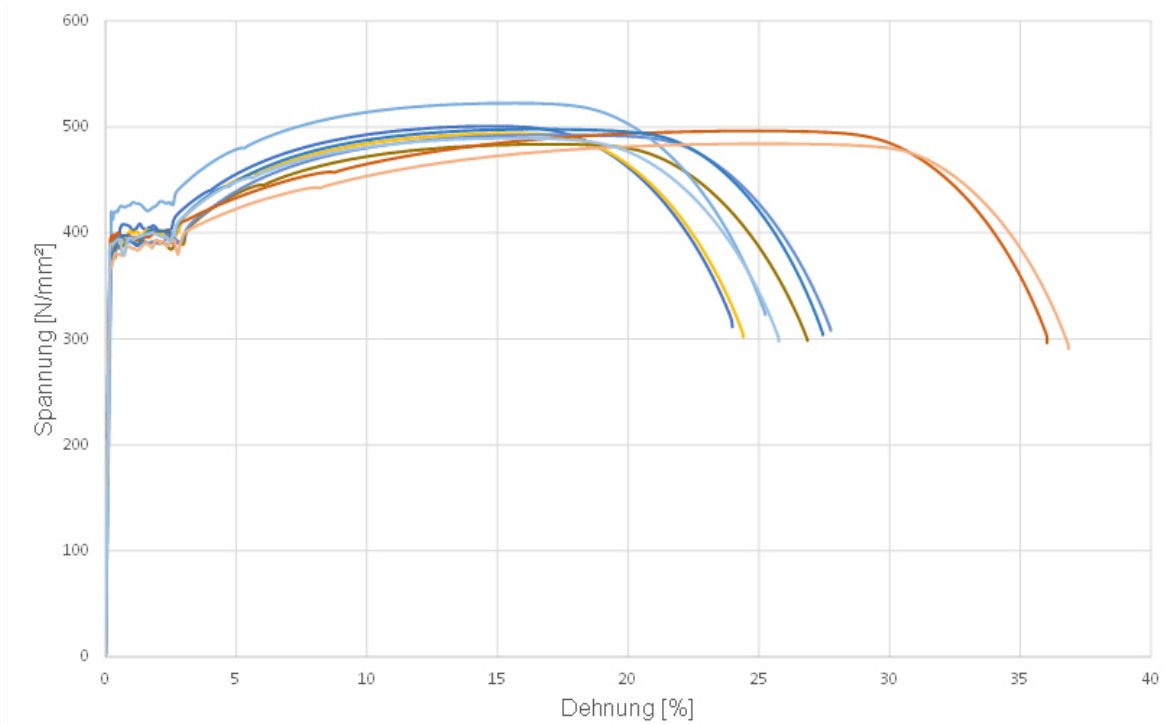


Abbildung 38: Gültige Ergebniswerte - ohne Pendeln, längs zur Schweißnaht

Zugprobe Nummer 8 wird aufgrund der Brucheinschnürung außerhalb der parallelen Längen nicht in der Ergebnisbildung berücksichtigt. Zur Bildung der Mittelwerte können somit die Ergebniswerte von neun Zugversuchen herangezogen werden.

Proben Nr. [-]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Streckgrenze R_e [MPa]	Dehnung A_t [%]
6	500,76	395,57	23,98
7	493,78	394,14	24,40
(8)	(497,32)	(403,83)	(22,91)
9	483,63	393,49	26,86
10	492,51	386,24	27,75
16	522,46	420,25	25,25
17	496,21	395,49	36,03
18	497,83	380,83	27,45
19	484,09	380,99	36,85
20	489,38	394,31	25,77
Mittelwerte:	495,63	393,48	28,26

Tabelle 17: Ergebnisse - ohne Pendeln, längs zur Schweißnaht

Bruchform

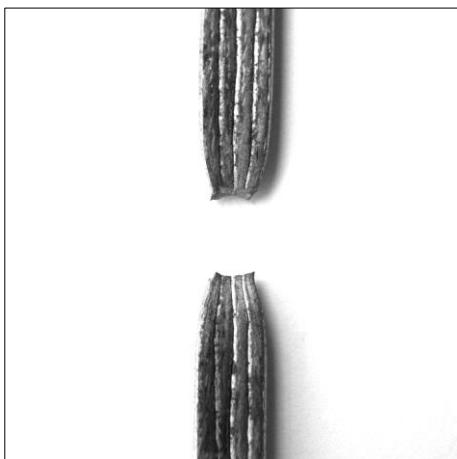


Abbildung 39: Bruchform Probe 10

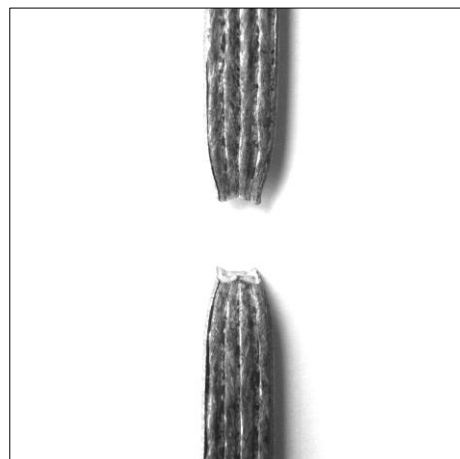


Abbildung 40: Bruchform Probe 17

Die ausgeprägte Einschnürung im Bereich der Bruchzone verweist auf ein duktileres Materialverhalten. Beide Bruchformen werden als eine Art Mischbruch kategorisiert.

5.7.2 Ohne Pendeln – quer zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Alle Ergebniswerte

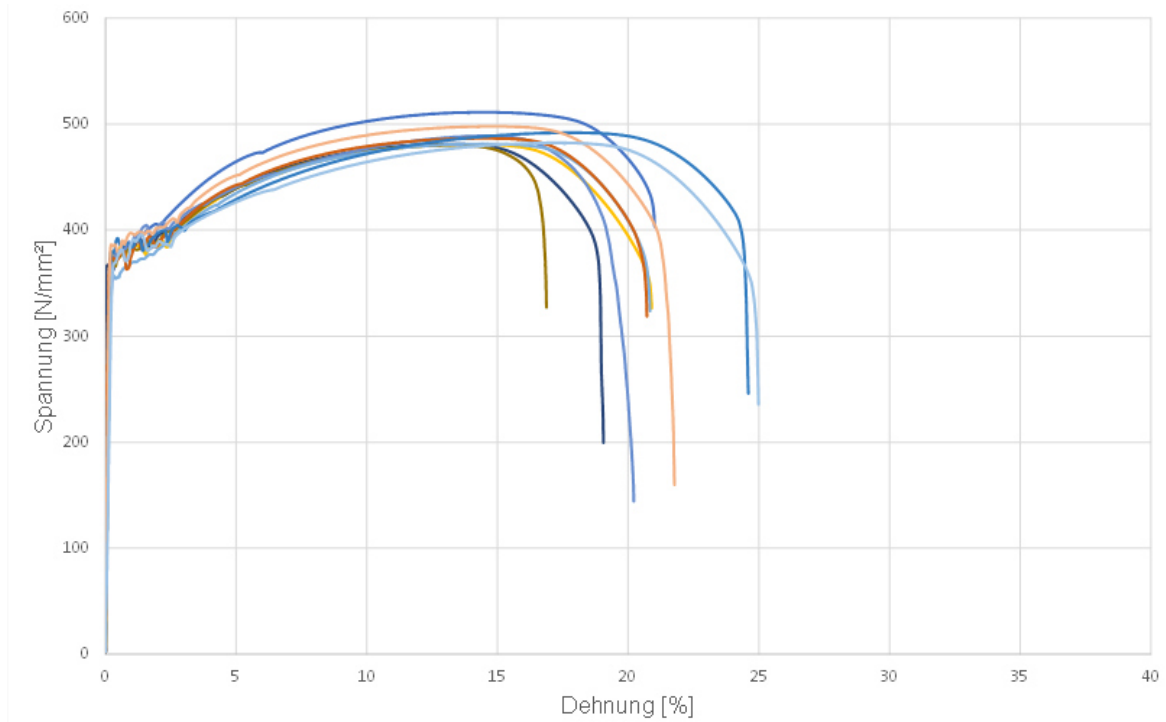


Abbildung 41: Alle Ergebniswerte - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Gültige Ergebniswerte

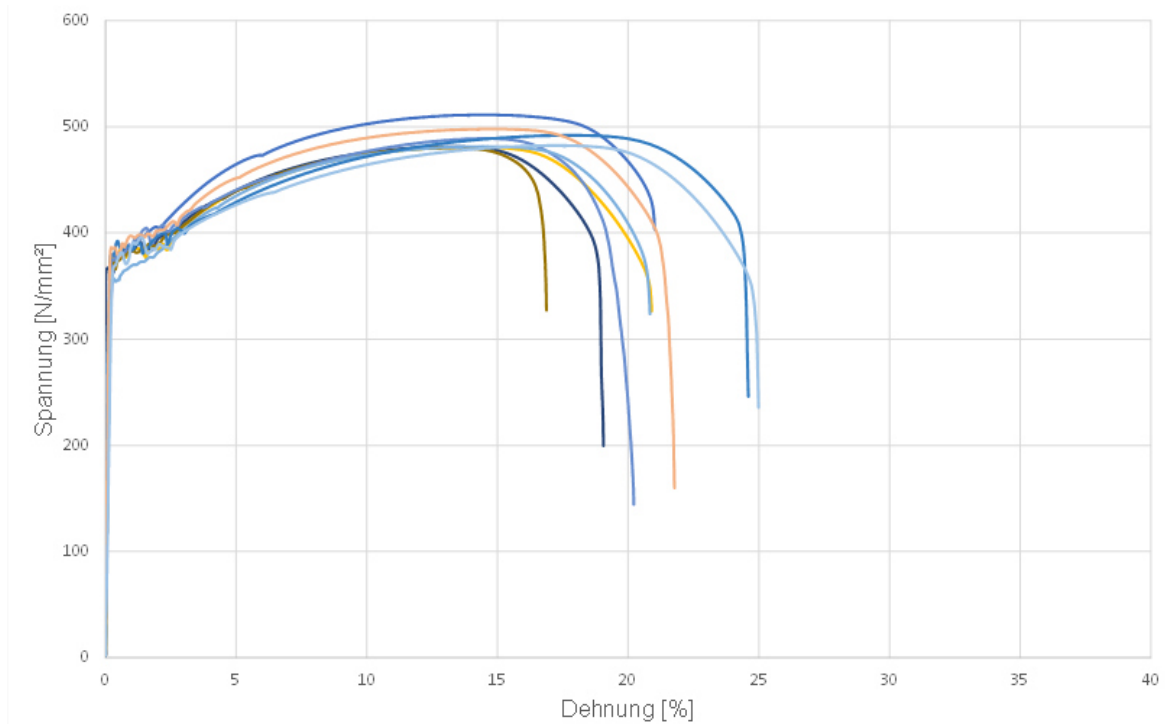


Abbildung 42: Gültige Ergebniswerte - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht

Zugprobe Nummer 12 wurde aufgrund der Brucheinschnürung außerhalb der parallelen Längen nicht in der Ergebnisbildung berücksichtigt. Zur Bildung der Mittelwerte können somit die Ergebniswerte von neun Zugversuchen herangezogen werden.

Proben Nr. [-]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Streckgrenze R_e [MPa]	Dehnung A_t [%]
1	511,23	380,49	21,01
2	480,91	376,52	20,90
3	481,13	367,34	19,06
4	480,15	374,46	16,87
5	488,89	375,28	20,22
11	481,35	357,63	20,83
(12)	(486,69)	(373,70)	(20,72)
13	491,94	380,07	24,59
14	497,88	386,37	21,77
15	482,33	381,81	24,98
Mittelwerte:	488,42	375,55	21,14

Tabelle 18: Ergebnisse - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht

Bruchform

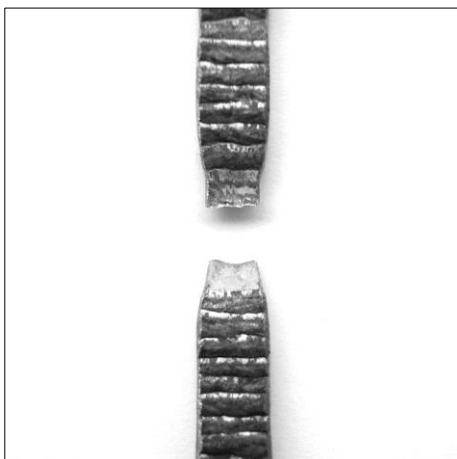


Abbildung 43: Bruchform Probe 2

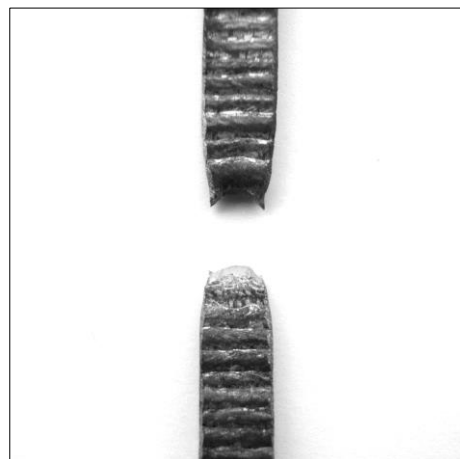


Abbildung 44: Bruchform Probe 5

Die Bruchform von Probe 2 fällt in die Kategorie der Scherbrüche. Probe 5 ergibt eine Kombination aus Scherbruch und Mischbruch. In beiden Fällen wird somit auf ein duktilen Materialverhalten rückgeschlossen.

5.7.3 Mit Pendeln – längs zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Alle Ergebniswerte

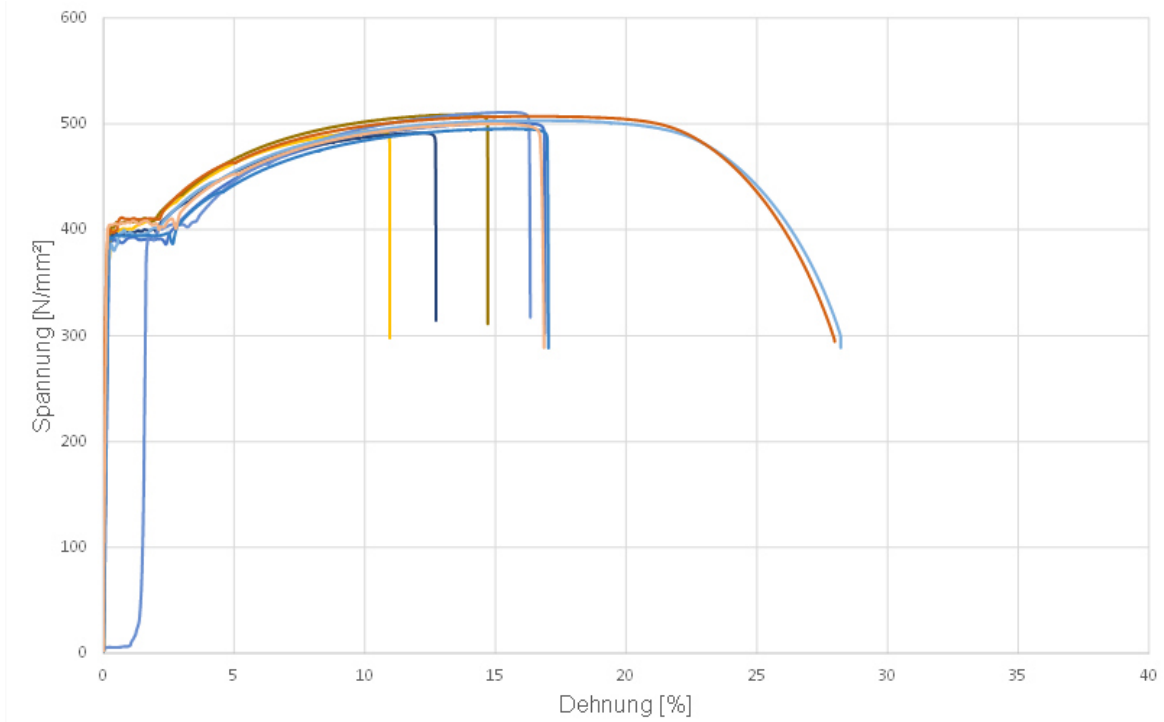


Abbildung 45: Alle Ergebniswerte - mit Pendeln, längs zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Gültige Ergebniswerte

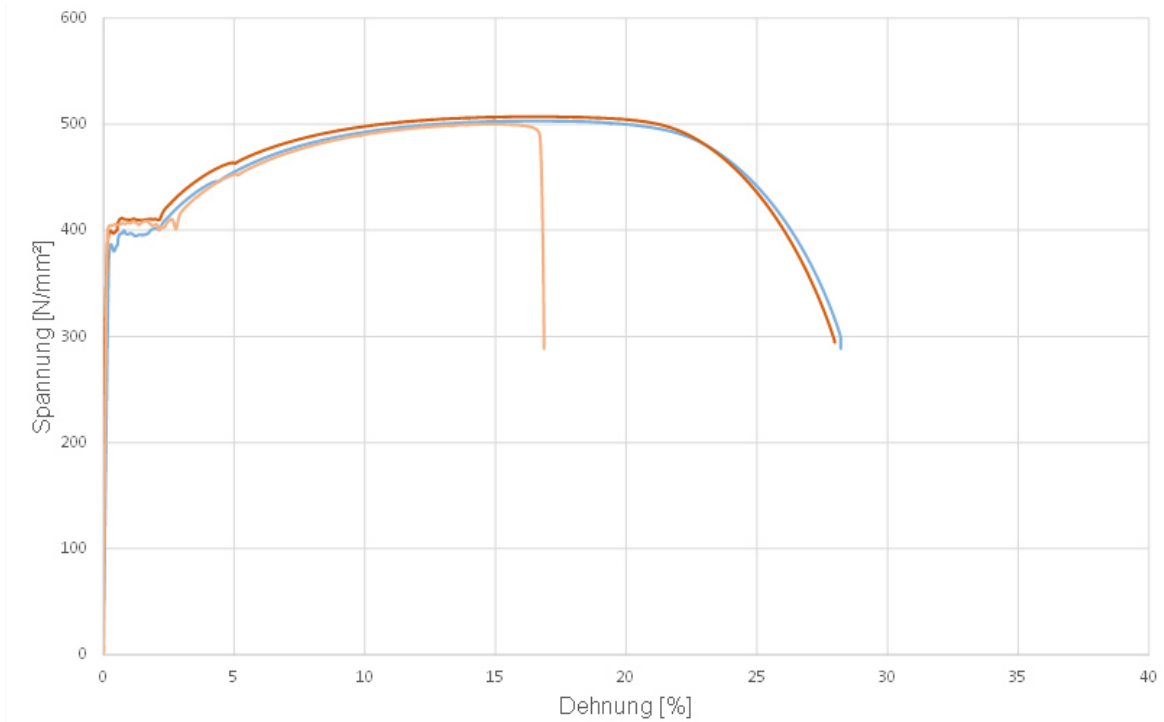


Abbildung 46: Gültige Ergebniswerte - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht

Zugprobe Nummer 28, 29, 30, 31, 32 und 35 wurde aufgrund der Brucheinschnürung außerhalb der parallelen Längen nicht in der Ergebnisbildung berücksichtigt. Ebenso wird auch der Dehnungswert von Probe 36, aufgrund des untypischen Bruches, nicht in der Ergebnisbildung berücksichtigt. Der Mittelwert von Zugfestigkeit und Streckgrenze ergibt sich somit aus drei Ergebniswerten und der Mittelwert der Dehnung aus zwei Ergebniswerten.

Proben Nr. [-]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Streckgrenze R_e [MPa]	Dehnung A_t [%]
(28)	(500,77)	(374,45)	(16,90)
(29)	(492,88)	(374,92)	(10,95)
(30)	(491,35)	(375,72)	(12,73)
(31)	(508,70)	(386,76)	(14,71)
(32)	(510,87)	(394,08)	(16,33)
33	503,10	386,75	28,21
34	507,09	399,65	27,98
(35)	(495,38)	(382,82)	(17,03)
36	499,85	398,48	(16,86)
Mittelwerte:	503,35	394,96	(28,10)

Tabelle 19: Ergebnisse – mit Pendeln, längs zur Schweißnaht

Bruchform

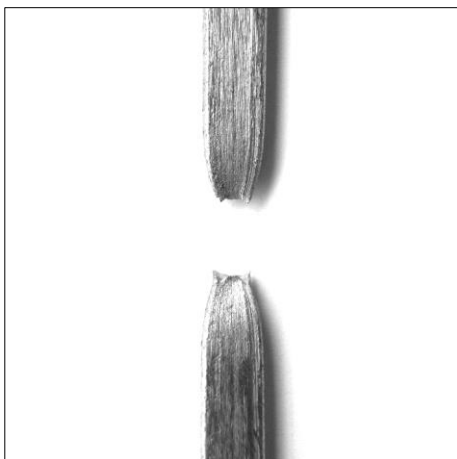


Abbildung 47: Bruchform Probe 32

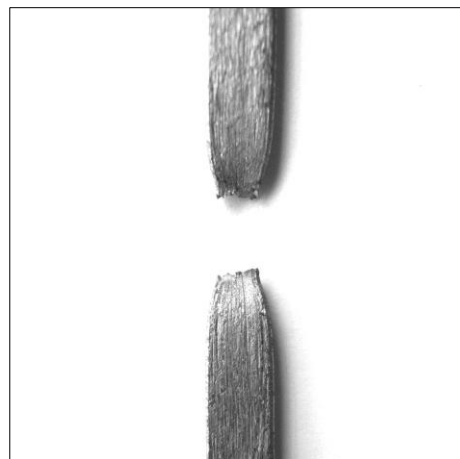


Abbildung 48: Bruchform Probe 33

Die ausgeprägte Einschnürung im Bereich der Bruchzone verweist auf ein duktileres Materialverhalten. Beide Bruchformen werden als eine Art Mischbruch kategorisiert.

5.7.4 Mit Pendeln – quer zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Alle Ergebniswerte

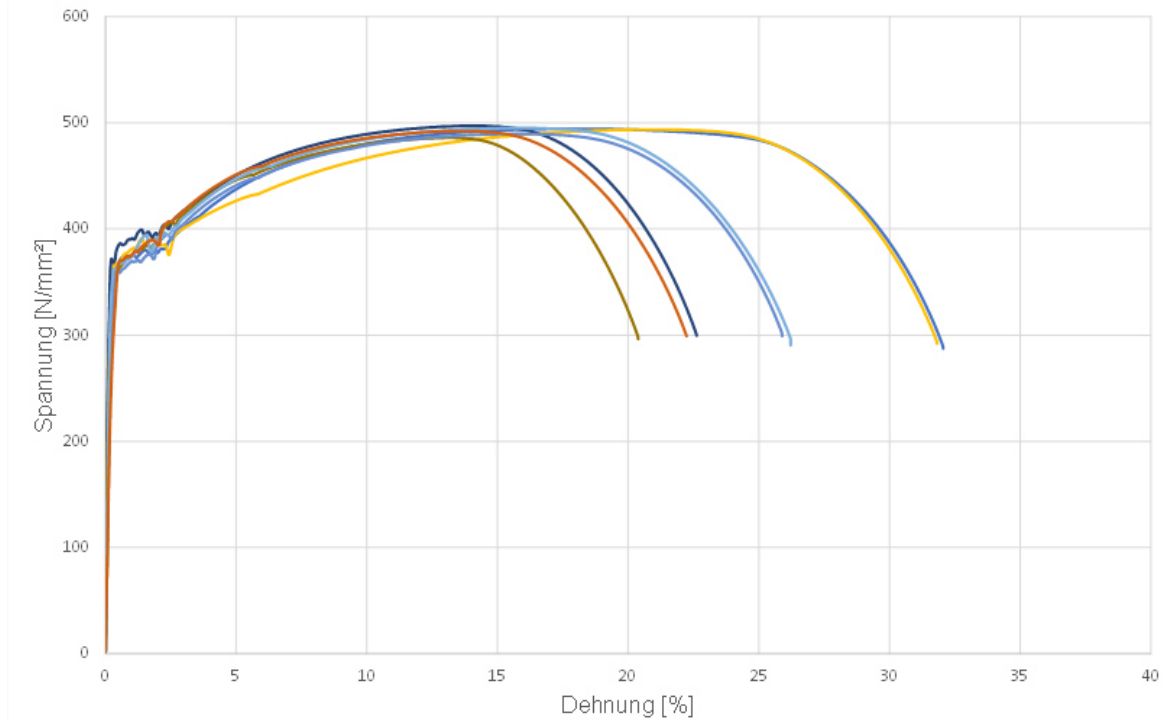


Abbildung 49: Alle Ergebniswerte - mit Pendeln, quer zur Schweißnaht

Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Gültige Ergebniswerte

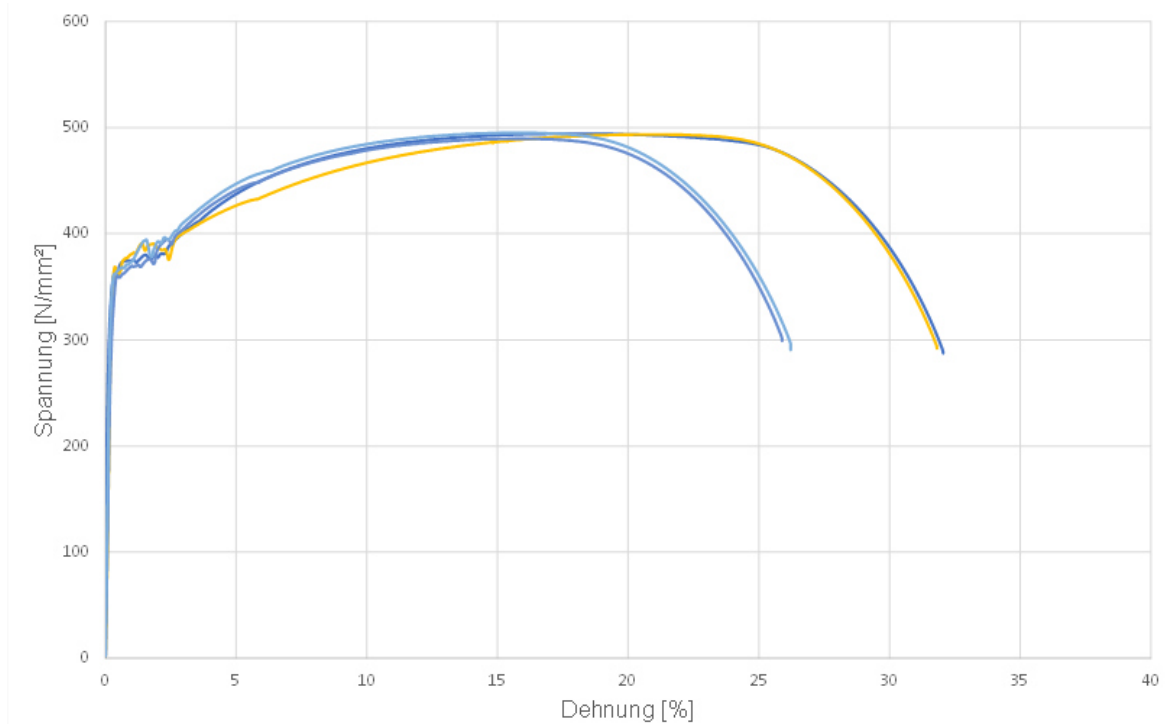


Abbildung 50: Gültige Ergebniswerte - mit Pendeln, quer zur Schweißnaht

Zugprobe Nummer 23, 24 und 27 wurde aufgrund der Brucheinschnürung außerhalb der parallelen Längen nicht in der Ergebnisbildung berücksichtigt. Zur Bildung der Mittelwerte können somit die Ergebniswerte von vier Zugversuchen herangezogen werden.

Proben Nr. [-]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Streckgrenze R_e [MPa]	Dehnung A_t [%]
21	494,21	360,44	32,05
22	493,52	368,83	31,81
(23)	(485,81)	(353,37)	(20,38)
(24)	(497,04)	(371,79)	(22,62)
25	489,51	360,47	25,90
26	495,07	362,66	26,22
(27)	(492,17)	(364,75)	(22,23)
Mittelwerte:	493,08	363,10	29,00

Tabelle 20: Ergebnisse - mit Pendeln, quer zur Schweißnaht

Bruchform

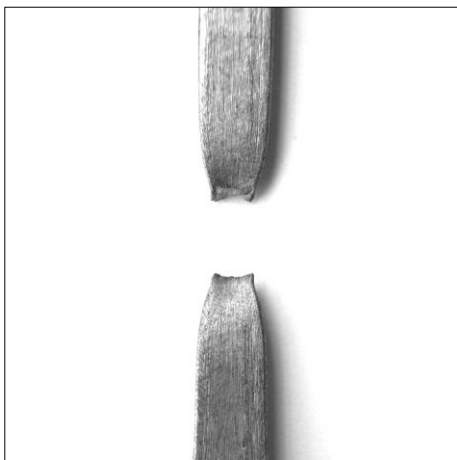


Abbildung 51: Bruchform Probe 21

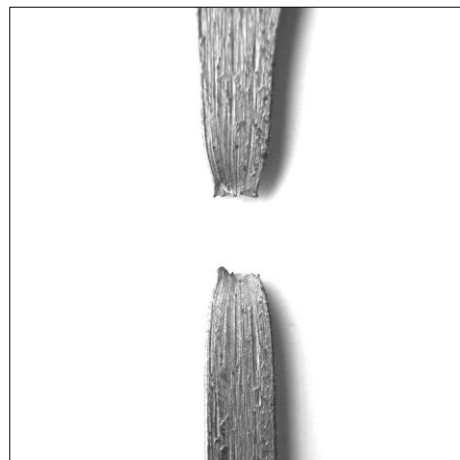


Abbildung 52: Bruchform Probe 26

Die ausgeprägte Einschnürung im Bereich der Bruchzone verweist auf ein duktileres Materialverhalten. Beide Bruchformen werden als eine Art Mischbruch kategorisiert.

5.8 Diskussion der Ergebnisse

	Ausrichtung zur Schweißnaht	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Streckgrenze R_e [MPa]	Dehnung A_t [%]
Ohne Pendeln	längs	495,63	393,48	28,26
	quer	488,42	375,55	21,14
Mit Pendeln	längs	503,35	394,96	(28,10)
	quer	493,08	363,10	29,00

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse

Tabelle 21 beinhaltet die Gegenüberstellung der Ergebnisse. Die Zugfestigkeiten unterscheiden sich trotz der unterschiedlichen Probenausrichtung und Schweißpfadführung nur gering. Bei der Betrachtung der Streckgrenze ergibt sich, abhängig von der Ausrichtung der Probe, ein Unterschied von ca. 30MPa. Die höhere Streckgrenze wird in Längsrichtung zur Schweißnaht erreicht. Die erreichten Festigkeitswerte können in etwa mit denen eines S355JR Baustahls verglichen werden. Die Zugfestigkeit eines derartigen Baustahls liegt bei 490-630MPa und die Streckgrenze bei 355MPa.

Aus den Ergebnissen der Dehnung wird ersichtlich, dass der additiv hergestellte Werkstoff in Querrichtung etwas an Duktilität verliert. Die Bruchdehnung des Baustahls vom Typ S355JR liegt bei 22%. Die erreichten Dehnungswerte können somit als sehr zufriedenstellend angesehen werden.

Der eingeklammerte Dehnungswert basiert nur auf zwei gültigen Zugversuchen, weswegen dieses Ergebnis nur wenig Aussagekraft besitzt. Die Anzahl an gültigen und ungültigen Versuchsergebnissen ist in Tabelle 22 dargestellt. Die Ursache für die ungültigen Brüche wird auf eine ungenaue Probenausarbeitung zurückgeführt. Bei einigen Zugproben konnten ungeplante Querschnittsverminderungen im Übergangsbereich von Probenkopf und parallelen Längen festgestellt werden, wodurch die Brüche außerhalb der parallelen Längen erfolgten.

	Ausrichtung zur Schweißrichtung	Gültig [Anzahl]	Ungültig [Anzahl]
Ausgangsmaterial ohne Pendeln	längs	9	1
	quer	9	1
Ausgangsmaterial mit Pendeln	längs	3	6
	quer	4	3

Tabelle 22: Gültigkeit der Versuchsergebnisse

6 ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Mit der Erweiterung der derzeit angewendeten konventionellen Fertigungsverfahren um das additive Fertigungsverfahren, ergeben sich im Stahlbau zahlreiche neue Möglichkeiten. Die Neuerungen reichen von nahezu uneingeschränkten Gestaltungsmöglichkeiten, über die Herstellung belastungsoptimierter Bauteile und der damit verbundenen Materialreduzierung, bis weiter zu neuen Möglichkeiten innerhalb der Digitalisierung und Automatisierung. Innerhalb dieses Kapitels werden potentielle Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt und deren Vorteile beschrieben.

6.1 Aussteifungen

6.1.1 Lasteinleitungssteifen

Kommt es bei einer konzentrierten Lasteinleitung zur Überschreitung der Grenzkraft des Stahlquerschnittes, so ist eine zusätzliche Aussteifung in Form von Steifen erforderlich. Durch eine solche Anordnung wird die Lasteinleitung in den Steg des Profils verbessert und die Biegung des Flansches behindert. Für den konventionellen Einbau einer Steife sind mehrere unterschiedliche Arbeitsschritte erforderlich was zu einem hohen Zeitaufwand führt. *Wire Arc Additive Manufacturing* bietet hingegen die Möglichkeit, Material direkt auf eine bestehende Struktur aufzutragen. Die Steife kann somit ohne anfallenden Verschnitt, innerhalb eines Arbeitsschrittes und mit optimierter Geometrie hergestellt werden.

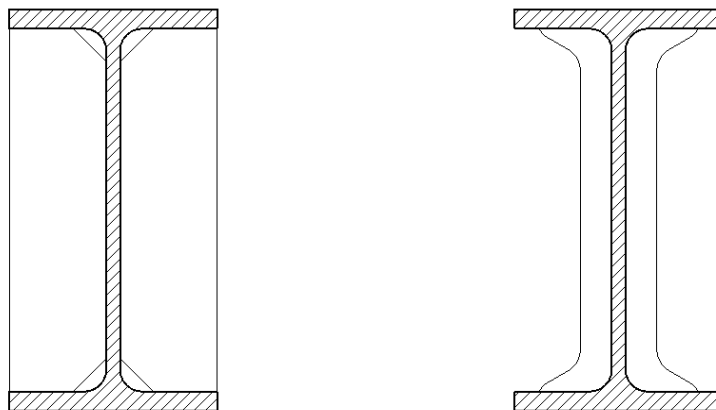


Abbildung 53: konventionelle Steifen (links) und optimierte, additiv hergestellte Steifen (rechts)

6.1.2 Beulsteifen

Eine weitere Einsatzmöglichkeit von Steifen gibt es hinsichtlich dem Stabilitätsversagen *Beulen*. Wird die erforderliche Beulsicherheit eines Beulfeldes nicht erreicht, müssen spezielle Maßnahmen zur Aussteifung getroffen werden. Die Anordnung von Beulsteifen bietet hierfür die wirtschaftlichste Lösung. Der größte Effekt gegen das Stabilitätsversagen wird erreicht, wenn die Lage der Beulsteifen so gewählt wird, dass sie mit der Lage der größten Beulverformung übereinstimmt. Betrachtet man einen hierfür beispielhaft einen Einfeldträger, so ergibt sich die optimale Anordnung der Steifen wie in folgender Darstellung gezeigt.

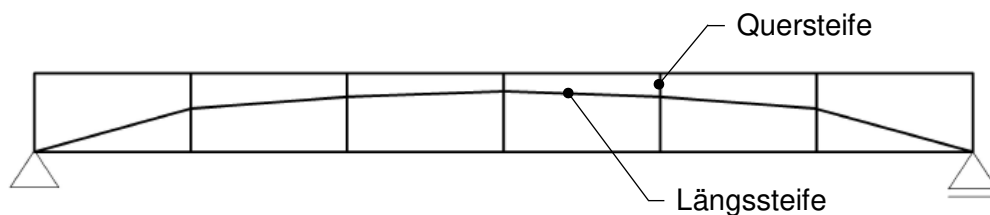


Abbildung 54: Optimale Steifenanordnung hinsichtlich Beulen eines Trägers (Unterweger, 2014)

Eine derartige Steifenanordnung ist aufgrund der unterschiedlichen Längenabmessungen und den unterschiedlichen Steifenausrichtungen nur in Verbindung mit einem hohen Arbeitsaufwand realisierbar. Durch die Anwendung von Wire and Arc Additive Manufacturing ergibt sich nun die Möglichkeit die Beulsteifen materialeffizient, voll automatisiert und innerhalb eines Arbeitsschrittes, entlang dem ermittelten, optimalen Verlauf der größten Beulverformung herzustellen.

6.2 Querschnittsänderungen

Ein neues Potential im Stahlbau ergibt sich durch die, gegenüber der konventionellen Fertigungsmethoden, großen Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigung. Krümmungen sowie variierende Materialdicken sind durch den schichtweisen Herstellungsprozess ohne großen Arbeitsaufwand und innerhalb eines Arbeitsschrittes realisierbar. Neue ingenieurtechnische Möglichkeiten ergeben sich zum Beispiel durch die Herstellung von verlaufende Querschnittsänderungen. Profile mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen könnten verlaufen miteinander verbunden werden, was eine gleichmäßige Lastverteilung ermöglicht. Des Weiteren könnten Profile mit offenem Querschnitt, verlaufend und ohne zwischenliegender Kopfplatte, in ein Hohlprofile übergehen.

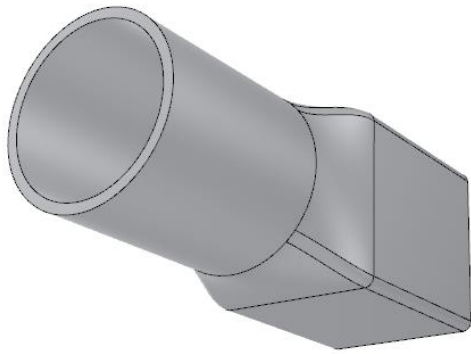


Abbildung 55: Querschnittsänderung 1

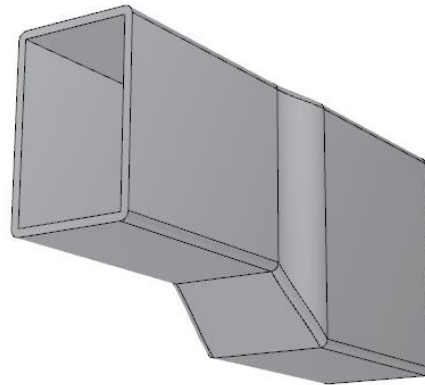


Abbildung 56: Querschnittsänderung 2

Einsetzen könnte man derartige Querschnittsänderungen zum Beispiel bei der Realisierung von Tragwerksoptimierungen. Holzinger zeigte in seiner Arbeit „Tragwerksoptimierung durch Materialverteilung und Materialreduktion“ anhand 5 verschiedenen Fallbeispiele, dass durch eine Materialumverteilung eine gleichmäßigere Auslastung des Tragwerks sowie eine Verformungsminimierung erreicht werden kann (Holzinger 2011). Diese Art der Optimierung basiert auf bereichsweisen Querschnittsanpassungen. Aufgrund des großen Arbeitsaufwands in der Herstellung von Querschnittsänderungen durch konventionelle Fertigungsmethoden, bleibt dieses Optimierungspotential weitgehend unausgeschöpft. Die geometrische Flexibilität des WAAM-Prozesses sowie die Möglichkeit benötigte Verbindungselemente direkt auf eine bestehende Struktur aufzubauen, würden den Arbeitsaufwand reduzieren und die Herstellung von derartig optimierten Tragstrukturen vereinfachen.

6.3 Knotenelemente

Ein großer Vorteil, welcher sich durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile ergibt, betrifft die geometrische Gestaltungsfreiheit. Architektonische Aspekte führen oft zu geometrisch komplexen Tragstrukturen welche wiederum zu geometrisch komplexen Bauteilen und Bauteilverbindungen führen. Die Gestaltung einer Tragstruktur ist allerdings nicht der einzige Aspekt der zu geometrischen Herausforderungen führt. Die Topologie, welche die Materialverteilung in einem gegebenen Bereich definiert, kann die Trageffizienz einer Struktur wesentlich beeinflussen. Bekommt die Effizienz der Tragstruktur im Rahmen der Strukturfindung eine besondere Rolle zugeschrieben, so können sich auch durch Tragwerksoptimierungen geometrisch komplexe Tragwerksentwürfe entstehen. Die erzielten Verbesserungen wie zum Beispiel die Erhöhung der Steifigkeit oder die Reduzierung von Eigengewicht basieren zumeist auf geometrischen Unregelmäßigkeiten des Tragwerks und

sind eng mit einem erhöhten Arbeitsaufwand innerhalb der konventionellen Fertigung verknüpft. Ein Beispiel zur Veranschaulichung ergibt sich mit der Optimierung eines Fachwerkträgers.

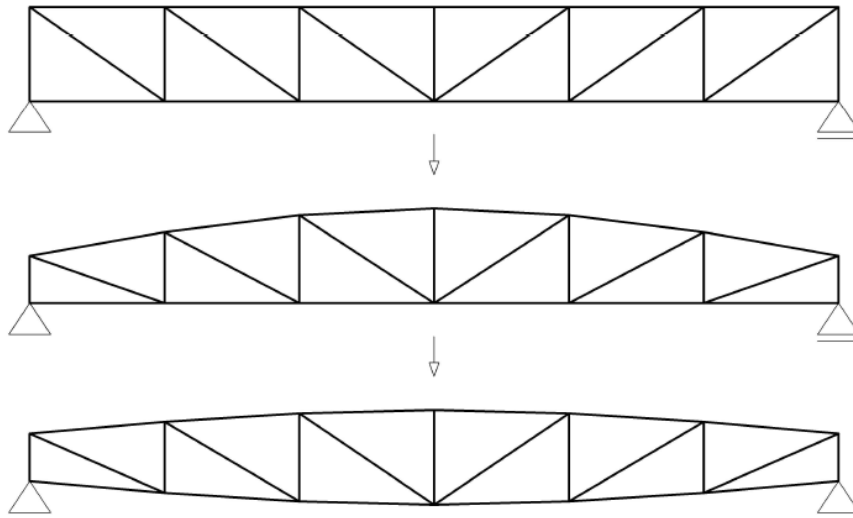


Abbildung 57: Optimierung Fachwerkträger

Wie aus Abbildung 57 ersichtlich ergeben sich mit der Optimierung der Tragstruktur unterschiedlich geneigten Fachwerkstreben, welche in weiterer Folge jedem Knotenpunkt des Fachwerkträgers eine individuelle Geometrie verleihen. Die konventionelle Herstellung dieser zahlreichen, unterschiedlichen Bauteilverbindungen ist mit einem großen Arbeitsaufwand und mehreren Arbeitsschritten verbunden. Für einen additiven Herstellungsprozess führen geometrische Unterschiede hingegen zu keinem Mehraufwand. Die optimierte Geometrie wird digital erstellt, für die unterschiedlich geneigten Fachwerkstreben werden individuelle Anchlusselemente entwickelt, parametrisiert und in Form eines Datensatzes an den Schweißroboter übermittelt. Mittels Wire Arc Additive Manufacturing wäre es möglich, die Anchlusselemente voll automatisiert und innerhalb eines Arbeitsschrittes, direkt auf der Struktur des Obergurts und Untergurts herzustellen.

Auch unter Betrachtung eines räumlichen Fachwerks, bei welchem sich aufgrund der zusätzlichen, seitlich einfallenden, Streben die Komplexität des Fachwerkknotens wesentlich erhöht, ergibt sich durch die Anwendung von Wire and Arc Additive Manufacturing, kein zusätzlicher Arbeitsaufwand in der Fertigung der Knotenpunkte

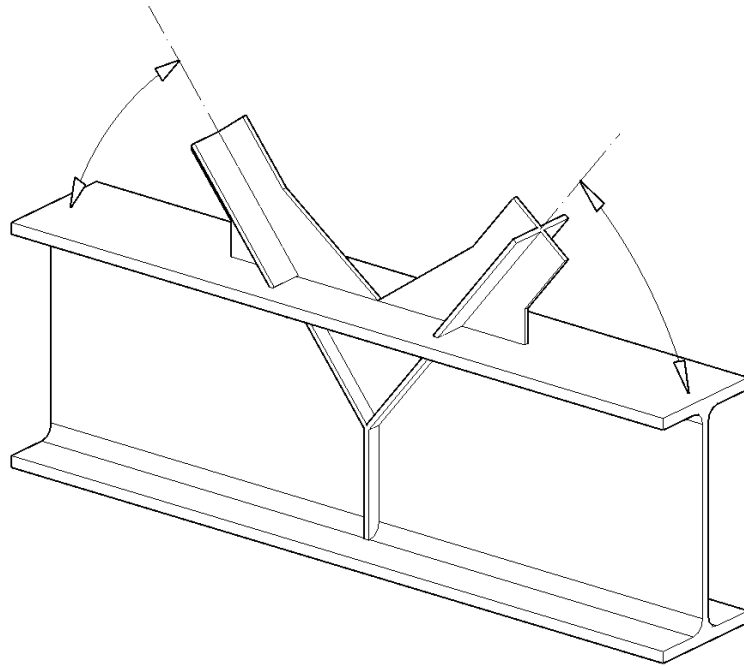


Abbildung 58: Beispiel additiv hergestellter Fachwerkknoten

6.3.1 Knotenpunkt Gitterschale

Eine Gitterschale besteht aus sich in unterschiedliche Richtungen kreuzende, biegesteif und torsionssteif miteinander verbundene Balken. Eine Möglichkeit zur Realisierung einer derartigen Verbindung erfolgt durch die Verschweißung der Balkenenden mit Knotenpunkten. Die konventionelle Herstellung eines Knotenpunktes dieser Art erfolgt in mehreren Arbeitsschritten. Die grundlegende Form des Knotenpunktes wird mittels Trennverfahren wie dem thermischen Schneiden oder auch dem Wasserstrahlschneiden aus einem Stahlblech ausgearbeitet. Wie in Abbildung 59 ersichtlich ergeben sich dadurch große Mengen an Verschnitt. Für den Erhalt der finalen Geometrie werden die ausgeschnittenen Rohlinge nun, unter der Anwendung spanender Fertigungsverfahren, weiterverarbeitet wobei wiederum Material entfernt wird und ein Abfallprodukt entsteht.

Alternativ können Knotenpunkte für Gitterschalen additiv gefertigt werden. Die finale Geometrie des Knotenpunktes wird bereits während dem schichtweisen Materialautrag erzeugt. Eine Nachbehandlung ist nur noch aufgrund der unregelmäßigen Oberfläche erforderlich, was zu einer enormen Materialersparnis gegenüber der konventionellen Knotenherstellung führt.



Abbildung 59: Knotenausarbeitung (Nier und Schlaich 2016)



Abbildung 60: Massiver Stahlknoten (Nier und Schlaich 2016)

Weiters ist durch Wire And Arc Additive Manufacturing die Herstellung von topologieoptimierten Knotenpunkten möglich. Durch diese Art der Optimierung werden die Knotenpunkte entsprechend ihrer Belastung und ihren Anforderungen aufgebaut. Material ist somit nur an jenen Stellen vorhanden, an denen es eine Beanspruchung erfährt. Im Gegensatz zu konventionell gefertigten, massiven Knotenpunkten kann durch die additive Herstellung topologieoptimierter Knotenpunkte somit Material eingespart werden. Außer dem ressourcenschonenden Aspekt bringt ein topologieoptimiertes Bauteil auch die Reduzierung von Eigengewicht mit sich. Besteht ein Tragwerk aus einer Reihe von topologieoptimierten Tragelementen, so kann das Eigengewicht der gesamten Tragstruktur wesentlich verringert werden, wodurch in weiterer Folge schlankere Bauweisen ermöglicht werden.

6.4 Linienelemente

Ein neuer Ansatz wäre nun die Optimierung von linienförmigen Tragwerkselementen. Zur besseren Veranschaulichung dieses Gedankens wird in weiterer Folge eine alternative, optimierte Geometrie für den Steg eines I-Profils entwickelt. Die Strukturfindung des Profilstegs erfolgt anhand eines Verfahrens der Topologieoptimierung. Grundsätzlich hilft die Topologieoptimierung bei der Bauteilgestaltung zur optimalen Erfüllung der gestellten Anforderungen. Mögliche Anforderungen wären zum Beispiel das Ziel der maximalen Steifigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung des Bauteilvolumens. Die Topologieoptimierung des Profilstegs erfolgt unter Anwendung des *Topology Optimization for Stiffness and Stress* (TOSS) Verfahrens. Ziel dieses Verfahrens ist eine Kombination aus maximaler Steifigkeit und maximaler Festigkeit bei einem geringem Materialeinsatz zu ermöglichen (Z88 2019).

Exemplarisch wird für die Optimierung ein Profilquerschnitt vom Typ IPE160 und einer Profillänge von einem Meter als Ausgangsbau teil herangezogen. Die äußeren Randbedingungen für das Optimierungsverfahren bilden ein einwertiges und ein zweiwertiges Auflager sowie die Belastung in Form einer Einzellast in Trägermitte.

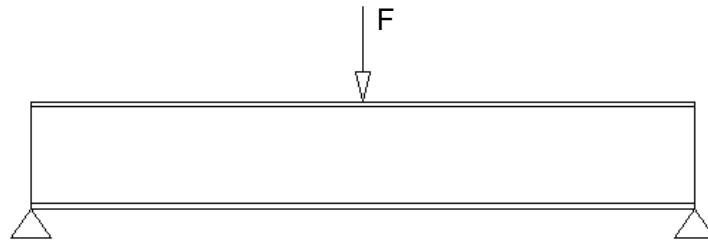


Abbildung 61: Randbedingungen Topologieoptimierung

Ausgeführt wird die Optimierung mit der Strukturoptimierungssoftware Z88Arion V2 welche auf der Finite-Elemente-Analyse Software Z88 basiert. Es handelt sich dabei um ein Freeware-Softwarepaket, welches an der Universität Bayreuth entwickelt wurde (Z88 2019).

Die folgenden Darstellungen zeigen einzelne Entwicklungsschritte der Strukturfindung unter Anwendung des beschriebenen Verfahrens. Die Optimierung der Geometrie erfolgt in einzelnen Iterationsschritten.

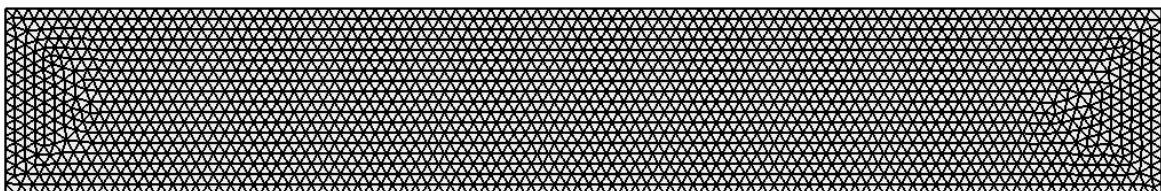


Abbildung 62: Ausgangsgeometrie inklusive FE-Netz

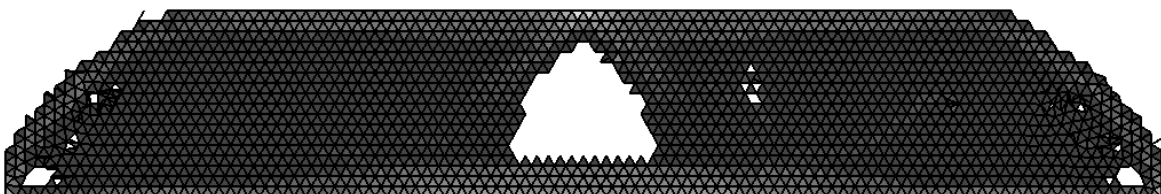


Abbildung 63: Iterationsschritt 10

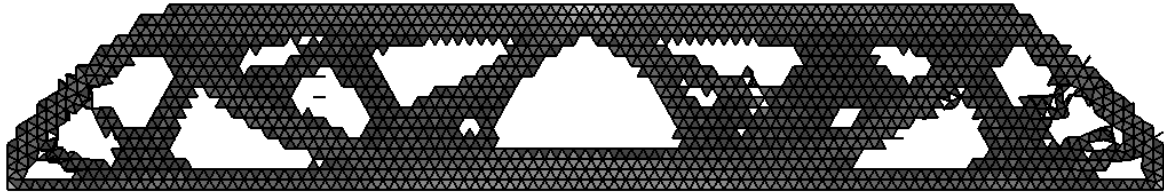


Abbildung 64: Iterationsschritt 20

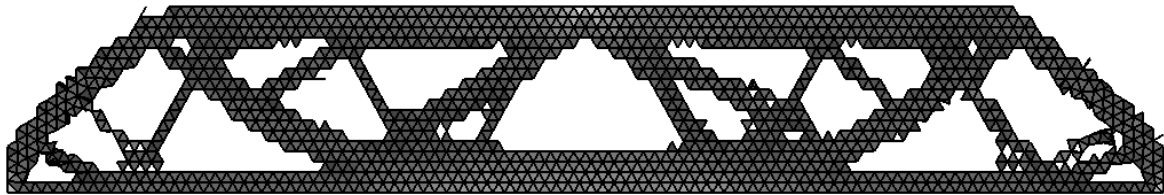


Abbildung 65: Iterationsschritt 40

Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist in Abbildung 65 ersichtlich und zeigt eine mögliche Steggeometrie, welche die drei vorgegebenen Kriterien „maximalen Steifigkeit“, „maximalen Festigkeit“ und „Reduzierung des Bauteilvolumens“, unter Einhaltung der gegebenen Lagerbedingungen und Belastung, miteinander vereint. Gegenüber konventionellen Herstellungsverfahren ergibt sich durch Wire And Arc Additive Manufacturing die Möglichkeit, eine solche Geometrie ohne Verschnitt beziehungsweise ohne anfallendem Materialabfall herzustellen. Das Ergebnis der Topologieoptimierung dient als Grundlage für die Strukturfindung des Bauteils. Eine mögliche finale Trägergeometrie ist in Abbildung 66 dargestellt.

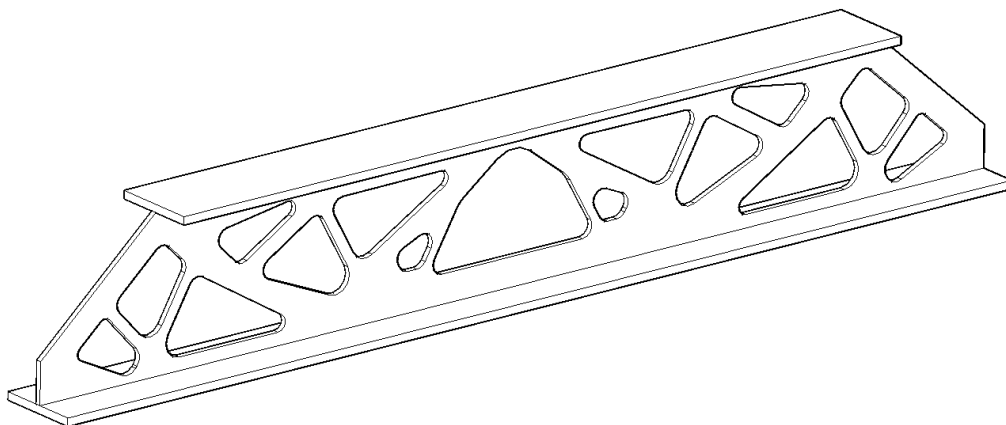


Abbildung 66: Topologieoptimiertes linienförmiges Bauteil

Abhängig von den Zielfunktionen und den gegebenen Randbedingungen könnten jegliche Bauteile eines Tragwerks auf diese Art und Weise optimiert und mittels Wire And Arc Additive Manufacturing hergestellt werden. Eine gleichmäßige Auslastung der Tragstruktur und ein geringerer Materialeinsatz, welcher zur Reduzierung des Eigengewichts und in weiterer Folge zur Realisierung schlanker Strukturen führt, zählen zu den Verbesserungen, welche ohne größeren Arbeitsaufwand möglich sind.

7 SCHWEISSVERSUCH

Die Durchführung des Schweißversuches erfolgte bei der Firma ABB AG in Wiener Neudorf. Der ABB Roboter vom Typ IRB1600 in Kombination mit der MIG/MAG Stromquelle Fronius TPS 500i und dem CMT Schweißprozess bildeten die Grundelemente der technischen Ausrüstung. Beim verwendeten Schweißdraht handelt es sich um einen Stahl-Massivdraht der Firma Würth mit einem Durchmesser von 1,2mm (Datenblatt im Anhang D angefügt). Als Schutzgas wurde eine Gasmischung der Klassifikation M21 verwendet, welche sich aus 82% Argon und 18% CO₂ zusammensetzt. Die Robotersteuerung bietet ein Bediengerät mit Touchscreen und Joystick und basiert auf der Software RobotWare. Bewegungsabläufe können direkt am Bediengerät erstellt werden, oder über die Kommunikationsschnittstellen, nach der Erstellung am Computer, an die Steuereinheit des Schweißroboters übertragen werden. Die Programmierung der Bewegungsaufgaben erfolgt dabei mit der Programmiersprache RAPID.

Als geometrische Vorlage diente die in Abbildung 67 dargestellte und entsprechend den Anwendungsmöglichkeiten der additiven Fertigung im Stahlbau entwickelte Geometrie eines Fachwerkknotens. Den Schweißgrund, auf welchen die Anchlusselemente sowie die Y-förmigen Aussteifungen erstellt werden, bildet ein 300mm langes Trägerstück der Profilreihe IPE 160 und der Stahlgüte S235JR.

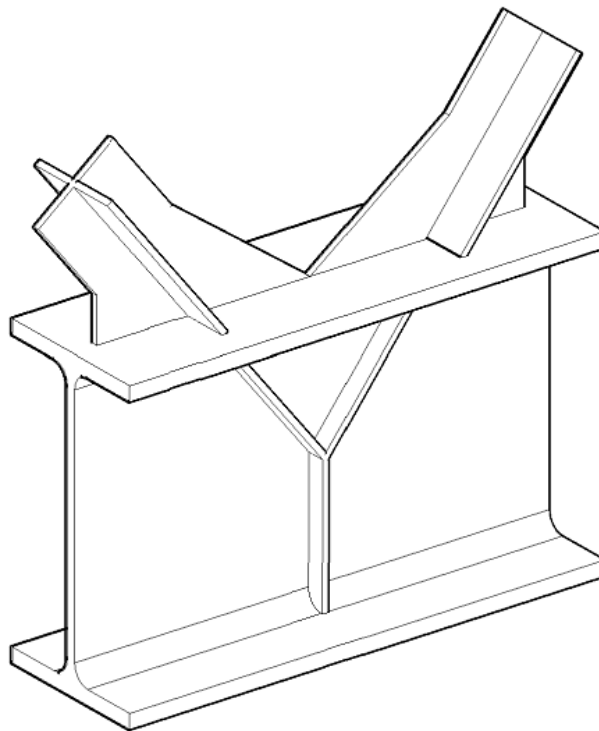


Abbildung 67: Geometrische Vorlage – Schweißversuch

Der Versuchsablauf gliederte sich in zwei Teile. Der erste Teil beinhaltete die Herstellung der Y-Steifen und der zweite Teil die Herstellung der kreuzförmigen Anschlusselemente.

7.1 Y-Steifen

Die additive Fertigung der Y-förmigen Aussteifungen bringt zwei besondere Herausforderungen mit sich. Zum einen die Herstellung des Kreuzungspunktes aufgrund der Y-förmigen Geometrie und zum anderen die Anbindung der Steife an den Flansch des I-Profiles.

Probleme, wie die bereichsweisen Unterwölbungen und Überhöhungen, an den Kreuzungspunkten der Schweißnähte können durch alternative Schweißpfadführungen dezimiert werden. Eine derartige Schweißpfadführung, welche die gewünschte Steifengeometrie ermöglicht und gleichzeitig die bekannte Problematik an Kreuzungspunkten umgeht ist in den folgenden Abbildungen dargestellt und wurde im Zuge des Schweißversuchs angewendet.

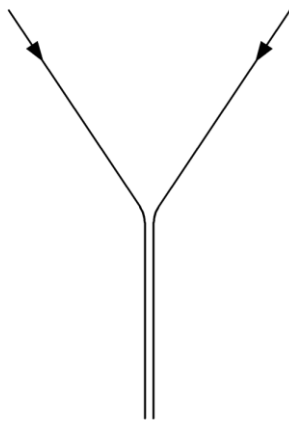


Abbildung 68: Schweißpfadführung - Lage 1

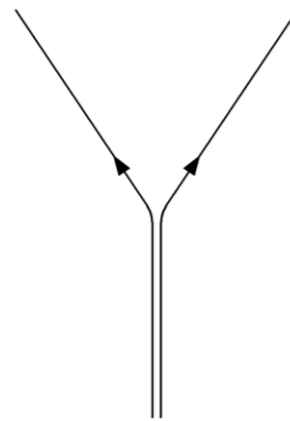


Abbildung 69: Schweißpfadführung - Lage 2

Die Herstellung der Y-förmigen Aussteifung erfolgte an beiden Seiten des Profilsteigs und wurde somit zweimal ausgeführt. Jeweils die erste Lage der beiden Y-Steifen wurde mit einem erhöhten Drahtvorschub von 4,5m/min durchgeführt. Diese Erhöhung des Drahtvorschubs führt zu einer Erhöhung des Schweißstroms wodurch ein sicherer Einbrand in den Grundwerkstoff erzeugt wird. Die Herstellung der restlichen Lagen erfolgte mit einem Drahtvorschub von 3,0m/min. Durch die ständige Umkehr der Schweißrichtung je Schweißlage wurde die unterschiedliche Schweißnahtausbildung infolge Schweißstart und Schweißende bestmöglich ausgeglichen.

Der Höhenversatz zwischen den Schweißlagen betrug für beide Y-Steifen 1mm. Die Abkühlzeit wurde mit 6 Sekunden gewählt. Insgesamt wurden pro Y-Steife 10 Schweißlagen aufgebracht wodurch eine Steifenhöhe von ca. 10mm erreicht wurde. Die Herstellung einer Schweißlage erfolgte in 36 Sekunden was zu einer reinen Schweißzeit von 6 Minuten führt. Unter Berücksichtigung der Abkühlzeiten zwischen den Schweißlagen beträgt die gesamte Herstellungszeit einer Y-Steife 7min.

Das Ergebnis der ersten Y-förmigen Aussteifung ist in den folgenden Abbildungen ersichtlich und zeigt, dass die gewünschte Anbindung der Steife an den Flansch des I-Profiles nicht erreicht wurde.



Abbildung 70: Y-Steife 1 (Ansicht)

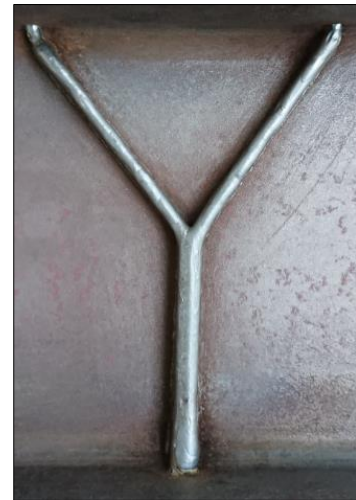


Abbildung 71: Y-Steife 1 (Draufsicht)

Im Zuge der Herstellung der zweiten Y-Steife erfolgte eine Anpassung von Start- und Endpunkt des Schweißpfades. Start- und Endpunkt wurden näher an den Flansch gerückt wodurch eine bessere Anbindung an den Flansch erreicht wurde. Begrenzt ist die Lage und Form des Schweißpfades grundsätzlich nur durch die Abmessungen des Schweißbrenners und die mögliche Kollision mit dem Ausgangsmaterial oder dem Schweißgut selbst. Mit einem drehbaren Schweiß Tisch könnte zusätzlich der Ausrichtung des Schweißbrenners zum Ausgangsmaterial auch das Ausgangsmaterial zum Schweißbrenner ausgerichtet werden, wodurch sich die geometrischen Möglichkeiten der Schweißpfadführung erhöhen würden. Eine weitere Anpassung im Zuge der Herstellung der zweiten Y-Steife bezieht sich auf den Abstand der parallelaufenden Schweißnähte. Dieser Abstand wurde von 3mm auf 4mm erhöht, wodurch eine gleichmäßigere Höhe der Steife erreicht wurde. Das Ergebnis zur Herstellung der zweiten Y-Steife ist in Abbildung 72 und Abbildung 73 ersichtlich.



Abbildung 72: Y-Steife 2 (Ansicht)

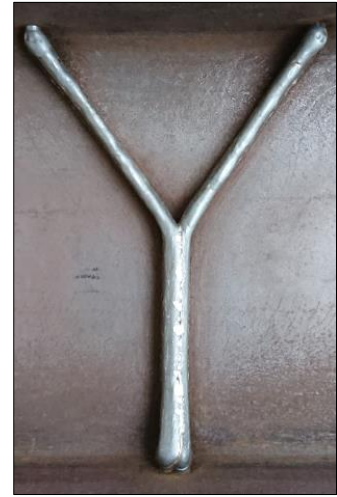


Abbildung 73: Y-Steife 2 (Draufsicht)

7.1.1 Zusammenfassung

Bis auf den Abstand der parallellaufenden Schweißnähte wurden beide Y-Steifen unter den gleichen Randbedingungen und mit den gleichen Schweißparametern hergestellt. Die folgende Tabelle bezieht sich somit auf beide Steifen.

Drahtvorschub erste Lage	[m/min]	4,5
Drahtvorschub restliche Lagen	[m/min]	3,0
Höhenversatz	[mm]	1,0
Nahtstärke	[mm]	4,0
Abkühlzeit	[s]	6,0
Reine Schweißzeit (ohne Abkühlzeit)	[min]	6,0
Gesamte Herstellungszeit (mit Abkühlzeit)	[min]	7,0
Flächenrate (ohne Abkühlzeit)	[cm ² /min]	4,25
Flächenrate (mit Abkühlzeit)	[cm ² /min]	3,64

Tabelle 23: Zusammenfassung - Y-Steife

7.2 Anschlusselemente

Die Herausforderungen, welche sich durch die additive Fertigung der kreuzförmigen Anschlusselemente ergeben, liegen in der Herstellung der Kreuzungspunkte, der Herstellung der um 22,5 Grad geneigten Wände und den, gegenüber den Y-Steifen, größeren Bauteilhöhen. Die Fertigungsversuche der beiden Anschlusselemente erfolgten nacheinander und werden in weiterer Folge als „Versuch 1“ und „Versuch 2“ beschrieben. Im Zuge einer iterativen Vorgehensweise wurden die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuch 1 direkt in Versuch 2 integriert.

7.2.1 Versuch 1

Der wesentliche Unterschied gegenüber den zuvor gefertigten Y-Steifen ergibt sich durch die kontinuierliche Änderung des Querschnittes mit zunehmender Bauteilhöhe. Der verwendete Schweißpfad ist in Abbildung 74 und Abbildung 75 ersichtlich und folgt dem gleichen Prinzip, wie bereits bei der Herstellung der Y-Steifen angewendet. Die Problematik von Schweißnahtunterwölbung und Schweißnahtüberhöhung im Kreuzungsbereich konnte dadurch erneut vermieden werden. Für einen bestmöglichen Ausgleich der Schweißnahtausbildung infolge Schweißstart und Schweißende, wurden die Schweißrichtung sowie Startpunkt und Endpunkt des Schweißpfades laufend gewechselt. Die Reihenfolge sowie die zugehörige Schweißpfadrichtungen sind ebenso in Abbildung 74 und Abbildung 75 dargestellt.

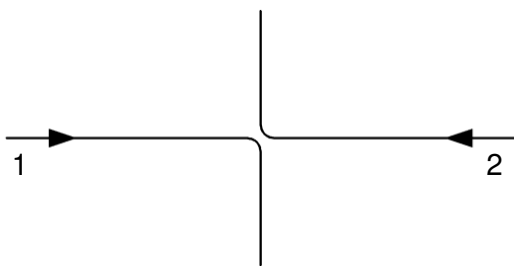


Abbildung 74: Schweißpfad Versuch 1 - Lage 1

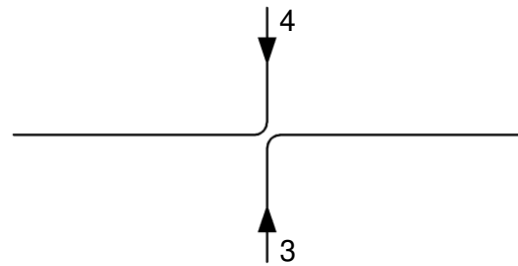


Abbildung 75: Schweißpfad Versuch 1 - Lage 2

Die Änderung des Querschnittes mit zunehmender Höhe erfolgte programmintern durch die schrittweise Änderung der Koordinaten von Schweißstartpunkt, Kreuzungspunkt und Schweißendpunkt. Entsprechend dem Höhenversatz nach jeder Schweißlage, erhalten auch Startpunkt, Endpunkt und Kreuzungspunkt nach jeder Schweißlage einen Versatz in die erforderliche Richtung. Die Abmessungen der gewünschten Geometrie sowie die beschriebenen Versätze sind in Abbildung 76 dargestellt.

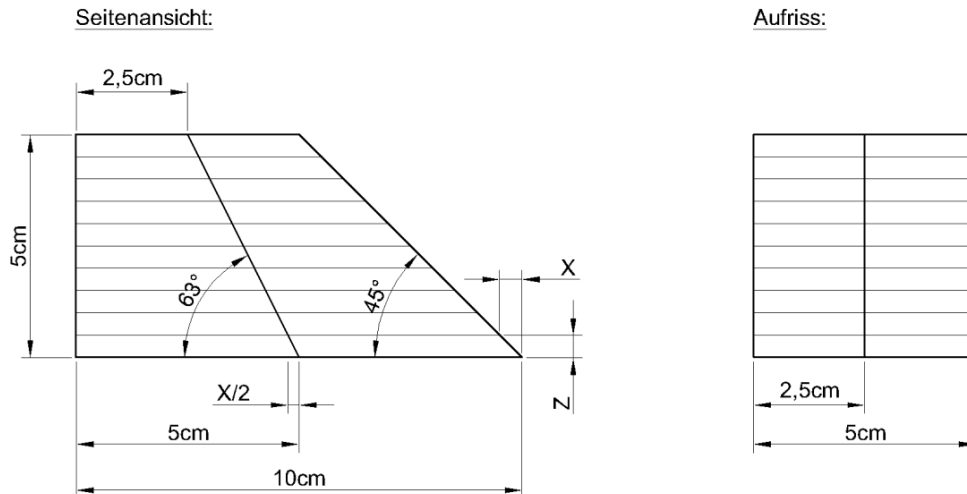


Abbildung 76: Gewünschte Geometrie - Versuch 1

Variable Z beschreibt den Höhenversatz und Variable X den seitlichen Versatz woraus sich, mit zunehmender Bauteilhöhe, die schräge Kante und die geneigte Wand ergeben. Beide Versätze erfolgen nach jeder Schweißlage. Der Höhenversatz Z sowie der seitliche Versatz X bekommen im Zuge dieses Schweißversuchs den Wert 0,8mm zugewiesen.

Wie schon bei den Y-förmigen Aussteifungen erfolgte die Herstellung der ersten Schweißlage mit einem Drahtvorschub von 4,5 m/min. Alle weiteren Schweißlagen wurden mit einem Drahtvorschub von 3,0 m/min erstellt. Die Abkühlzeit zwischen den Schweißlagen wurde ursprünglich mit 10 Sekunden festgelegt, nach Herstellung der ersten Lagen jedoch bald auf 30 Sekunden erhöht. Aufgrund der geometrischen Abweichungen, welche sich mit zunehmender Bauteilhöhe nur weiter verstärken, wurde Versuch 1 bei einer erreichten Bauteilhöhe von 3cm abgebrochen. Die Unregelmäßigkeiten im Materialaufbau wurden zu groß, wodurch eine gleichmäßige Ausführung des Schweißprozesses nicht mehr möglich war. Die Ursachen dieser geometrischen Abweichungen und Unregelmäßigkeiten sind auf einen zu hohen Schweißstrom und eine ungünstig gewählte Geometrie hinsichtlich der zahlreichen übereinanderliegenden Schweißstartpositionen zurückzuführen.



Abbildung 77: Versuch 1 (Ansicht)



Abbildung 78: Versuch 1 (Aufriß)



Abbildung 79: Versuch 1 (Draufsicht)



Abbildung 80: Versuch 2 (Isometrie)

7.2.2 Versuch 2

Im Zuge der Herstellung des zweiten Anschlusselements konnten die gewonnenen Erkenntnisse aus Versuch 1 direkt in den Versuchsablauf integriert werden. Die Unregelmäßigkeiten im Materialaufbau sowie die geometrischen Abweichungen wurden nicht mit der gewählten Schweißpfadführung in Verbindung gebracht. Das Prinzip der Schweißpfadführung aus Versuch 1 wird auch in Versuch 2 angewendet und ist in Abbildung 74 und 75 dargestellt. Eine Verbesserung des Schweißergebnisses wird sich durch eine geometrische Anpassung erhofft. Die Position des Startpunktes wird nach jeder Schweißlage in Richtung Kreuzungspunkt eingerückt, wodurch der Schweißstart nicht immer am äußersten Punkt der darunterliegenden Schweißlage erfolgt. Durch diese Anpassung ergibt sich eine Geometrie wie in Abbildung 81 dargestellt. Die geometrische Änderung bringt nun auch einen Versatz in die Y-Richtung mit sich.

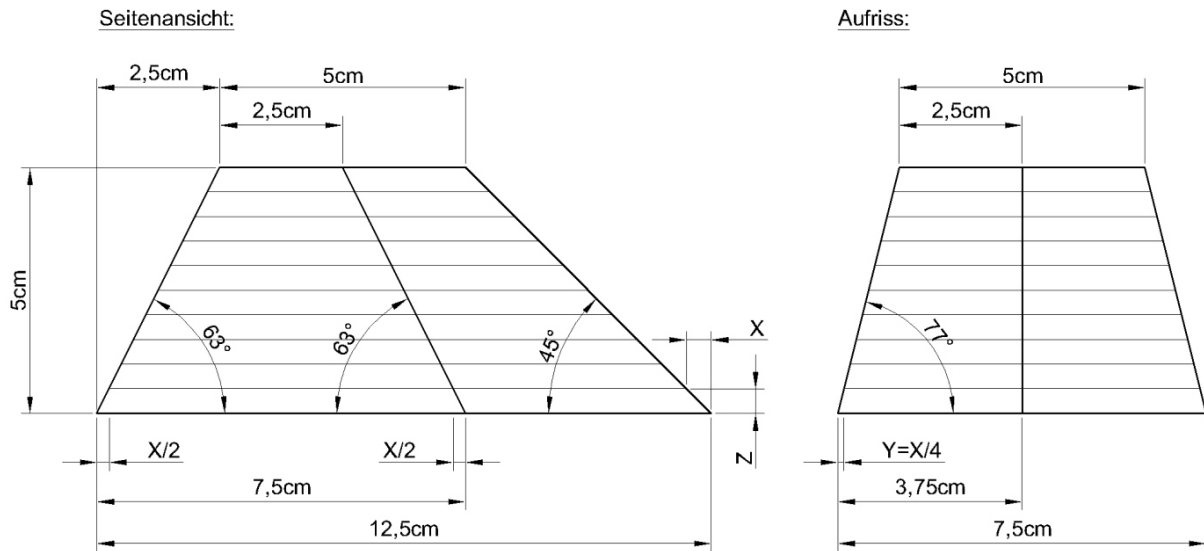


Abbildung 81: Gewünschte Geometrie - Versuch 2

Eine weitere Anpassung gegenüber Versuch 1 betrifft die verwendeten Schweißparameter. Zur Reduzierung des Schweißstroms wird der Drahtvorschub von 3m/min auf 1,9m/min dezimiert. Zusätzlich erfolgt eine Lichtbogenlängen-Korrektur von -3%. Diese Anpassungen sollen einen geringeren Wärmeeintrag und eine feinere Materialablagerung erzielen. Die Abkühlzeit zwischen den Schweißlagen blieb, wie in Versuch 1, unverändert bei 30 Sekunden. Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden 50 Schweißlagen erzeugt wodurch eine Bauteilhöhe von 4,8cm erreicht wurde. Das Versuchsergebnis ist in den folgenden Abbildungen ersichtlich und hat sich gegenüber Versuch 1 sichtlich verbessert.

Drahtvorschub erste Lage	[m/min]	4,5
Drahtvorschub restliche Lagen	[m/min]	1,9
Höhenversatz	[mm]	0,8
Nahtstärke	[mm]	3,0
Abkühlzeit	[s]	30,0
Reine Schweißzeit (ohne Abkühlzeit)	[min]	15,0
Gesamte Herstellungszeit (mit Abkühlzeit)	[min]	40,0
Flächenrate (ohne Abkühlzeit)	[cm ² /min]	5,25
Flächenrate (mit Abkühlzeit)	[cm ² /min]	1,97

Tabelle 24: Zusammenfassung – Anschlusselement



Abbildung 82: Versuch 2 (Ansicht)



Abbildung 83: Versuch 2 (Aufriss)



Abbildung 84: Versuch 2 (Draufsicht)



Abbildung 85: Versuch 2 (Isometrie)

7.3 Erkenntnisse Schweißversuch

Im Zuge des Schweißversuches konnten einige Erkenntnisse gesammelt werden. Bei der Herstellung der Y-Steifen wurde durch die ständige Umkehr der Schweißrichtung je Schweißlage, die unterschiedliche Schweißnahtausbildung infolge Schweißstart und Schweißende bestmöglich ausgeglichen. Eine bessere Anbindung des Flansches wurde durch die Schrägstellung des Schweißbrenners ermöglicht. Ein drehbarer Schweißtisch würde hierzu weitere Verbesserungen erzielen. Im Rahmen der Herstellung der kreuzförmigen Anschlusselemente wurde schnell ersichtlich, dass mit zunehmender Bauteilhöhe eine Reduzierung des Schweißstroms unumgänglich wird. Weiters empfiehlt es sich, die Position des Schweißstarts nach jeder Schweißlage nicht nur in die Höhe zu versetzen, sondern auch in Richtung Kreuzungspunkt. Eine Lichtbogenlängen-Korrektur von -3% trug ebenso positiv zur gleichmäßigen Schweißnahtausbildung bei. Die Herstellung von schrägen Wänden würde sich mit einem drehbaren Schweißtisch wesentlich verbessern. Die Neigung könnte auf diese Weise durch die Schrägstellung des Schweißgrundes hergestellt werden und müsste nicht durch den seitlichen Versatz des Schweißpfades je Schweißlage erfolgen.



Abbildung 86: Schweißversuch - Fachwerkknoten

AUSBLICK

Durch die additive Fertigung ergeben sich für den Stahlbau zahlreiche neue Möglichkeiten. Die herstellbaren Objekte überzeugen hinsichtlich Individualität und Flexibilität. Da es für die Berechnung derartiger Bauteile jedoch noch keine Richtlinien gibt, wird die Anwendung dieser Technologie innerhalb des Stahlbaus wohl noch etwas auf sich warten lassen. Die Entwicklung derartiger Bemessungsansätze wäre somit einer der nächsten erforderlichen Schritte. Des Weiteren ist eine wirtschaftliche Integration der additiven Fertigungsprozesse in den bestehenden Stahlbau eng mit der Fertigungszeit und infolgedessen den Abschmelzleistungen verknüpft. Die Erhöhung der Abschmelzrate und die gleichzeitige Kontrolle von Verzug und Eigenspannungen werden auch in Zukunft zu den großen Herausforderungen zählen.

LITERATURVERZEICHNIS

- ÖNORM EN ISO 17296-2, 15.01.2017: Additive Fertigung - Grundlagen. Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe.
- ÖNORM EN ISO 17296-3, 01.01.2017: Additive Fertigung - Grundlagen. Teil 3: Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren.
- Ahrens, Klaus (2014): Chinesen drucken zehn Häuser an einem einzigen Tag. Online verfügbar unter <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/chinesen-drucken-zehn-haeuser-an-einzigen-tag/>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- Bai, Yun; Williams, Christopher B. (2018): Binder jetting additive manufacturing with a particle-free metal ink as a binder precursor. In: *Materials & Design* 147, S. 146–156. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.03.027.
- Berger, Christoph (2017): Fußgängerbrücke aus dem 3D-Drucker. Online verfügbar unter <https://www.springerprofessional.de/brueckenbau/bauingenieurwesen/fussgaengerbruecke-aus-dem-3d-drucker/12055334>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- Bikas, H.; Stavropoulos, P.; Chryssolouris, G. (2016): Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. In: *Int J Adv Manuf Technol* 83 (1-4), S. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- Bruckner, Jürgen; Egerland, Stephan; Himmelbauer, Karin; Millinger, Andreas; Schörghuber, Manfred; Söllinger, Dominik; Waldhör, Andreas (2013): Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie. Cold Metal Transfer - ein neuer Metallschutzgas-Schweißprozess. Kissing: WEKA-Media (WEKA-Praxislösungen).
- Buchanan, C.; Gardner, L. (2019): Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. In: *Engineering Structures* 180, S. 332–348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.045.
- DebRoy, T.; Wei, H. L.; Zuback, J. S.; Mukherjee, T.; Elmer, J. W.; Milewski, J. O. et al. (2018): Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. In: *Progress in Materials Science* 92, S. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- Delgado Camacho, Daniel; Clayton, Patricia; O'Brien, William J.; Seepersad, Carolyn; Juenger, Maria; Ferron, Raissa; Salamone, Salvatore (2018): Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. In: *Automation in Construction* 89, S. 110–119. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.031.

- Derekar, K. S. (2018): A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. In: *Materials Science and Technology* 34 (8), S. 895–916. DOI: 10.1080/02670836.2018.1455012.
- Ding, Donghong; Pan, Zengxi; Cuiuri, Dominic; Li, Huijun (2015a): A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 31, S. 101–110. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- Ding, Donghong; Pan, Zengxi; Cuiuri, Dominic; Li, Huijun (2015b): Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. In: *Int J Adv Manuf Technol* 81 (1-4), S. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
- Ding, J.; Colegrove, P.; Mehnen, J.; Ganguly, S.; Sequeira Almeida, P. M.; Wang, F.; Williams, S. (2011): Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts. In: *Computational Materials Science*. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.06.023.
- Donoghue, J.; Antonysamy, A. A.; Martina, F.; Colegrove, P. A.; Williams, S. W.; Prangnell, P. B. (2016): The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V. In: *Materials Characterization* 114, S. 103–114. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.02.001.
- Duda, Thomas; Raghavan, L. Venkat (2018): 3D metal printing technology: the need to re-invent design practice. In: *AI & Soc* 33 (2), S. 241–252. DOI: 10.1007/s00146-018-0809-9.
- Feldmann, Markus; Kühne, Ronny; Citarelli, Sandro; Reisgen, Uwe; Sharma, Rahul; Oster, Lukas (2019): 3D-Drucken im Stahlbau mit dem automatisierten Wire Arc Additive Manufacturing. In: *Stahlbau* 88 (3), S. 203–213. DOI: 10.1002/stab.201800029.
- Fritz, Alfred Herbert (Hg.) (2018): *Fertigungstechnik*. 12., neubearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-56535-3>.
- Fronius (Hg.) (2019): Broschüre CMT. Online verfügbar unter https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Brochures/PW_BRO_CMT_DE.pdf, zuletzt geprüft am 07.09.2019.
- Galjaard, Salmone; Hofman, Sander; Perry, Neil; Ren, Shibo (2015): Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing. In: *Proceedings of IASS Annual Symposia*.

- Gao, Wei; Zhang, Yunbo; Ramanujan, Devarajan; Ramani, Karthik; Chen, Yong; Williams, Christopher B. et al. (2015): The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. In: *Computer-Aided Design* 69, S. 65–89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- Geng, Haibin; Li, Jinglong; Xiong, Jiangtao; Lin, Xin; Zhang, Fusheng (2017): Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology* 243, S. 40–47. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.11.027.
- González, J.; Rodríguez, I.; Prado-Cerqueira, J-L.; Diéguez, J. L.; Pereira, A. (2017): Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology. In: *Procedia Manufacturing* 13, S. 840–847. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.09.189.
- Grunwald, R; Mayer, M; Schörghuber, M (2018): WAAM - Technologie und aktuelle Anwendung. In: DVS Congress 2018. Große Schweißtechnische Tagung, DVS-Studentenkongress. Düsseldorf: DVS Media GmbH (DVS-Berichte, Band 344), S. 97–103.
- Heine, Burkhard (2015): Werkstoffprüfung. Ermittlung der Eigenschaften metallischer Werkstoffe. 3., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Hofmeister, Sandra; Schoof, Jakob; Kappelt, Heike (2018): 3D-gedruckte Schalungsformen für Wände und Fassaden. In: *Structure - published by Detail* (4.18), S. 61.
- Holzinger, Christoph (2011): Tragwerksoptimierung durch Materialverteilung und Materialreduktion. Diplomarbeit. Fachhochschule Kärnten, Spittal an der Drau.
- Kah, P.; Suoranta, R.; Martikainen, J. (2013): Advanced gas metal arc welding processes. In: *Int J Adv Manuf Technol* 67 (1-4), S. 655–674. DOI: 10.1007/s00170-012-4513-5.
- Kazanas, Panagiotis; Deherkar, Preetam; Almeida, Pedro; Lockett, Helen; Williams, Stewart (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. DOI: 10.1177/0954405412437126.
- Krujatz, Felix; Lode, Anja; Seidel, Julia; Bley, Thomas; Gelinsky, Michael; Steingroewer, Juliane (2017): Additive Biotech-Chances, challenges, and recent applications of additive manufacturing technologies in biotechnology. In: *New biotechnology* 39 (Pt B), S. 222–231. DOI: 10.1016/j.nbt.2017.09.001.
- Lange, Jörg; Feucht, Thilo (2019): 3-D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of Connection Elements and Beam Reinforcements. In: IABSE Symposium 2019

- Guimarães (Hg.): Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management. Guimarães, Portugal, 27.03.2019.
- Lu, X.; Zhou, Y. F.; Xing, X. L.; Shao, L. Y.; Yang, Q. X.; Gao, S. Y. (2017): Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. In: *Int J Adv Manuf Technol* 93 (5-8), S. 2145–2154. DOI: 10.1007/s00170-017-0636-z.
- Martina, F.; Roy, M. J.; Szost, B. A.; Terzi, S.; Colegrove, P. A.; Williams, S. W. et al. (2016): Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components. In: *Materials Science and Technology* 32 (14), S. 1439–1448. DOI: 10.1080/02670836.2016.1142704.
- Mechtcherine, Viktor; Grafe, Jasmin; Nerella, Venkatesh N.; Spaniol, Erik; Hertel, Martin; Füssel, Uwe (2018): 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction – Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. In: *Construction and Building Materials* 179, S. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202.
- Mehnen, Jörn; Ding, Jialuo; Lockett, Helen; Kazanas, Panos (2014): Design study for wire and arc additive manufacture. In: *IJPD* 19 (1/2/3), S. 2. DOI: 10.1504/IJPD.2014.060028.
- ÖNORM EN ISO 6507-1, 01.08.2018: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers. Teil 1: Prüfverfahren.
- ÖNORM EN ISO 148-1, 01.04.2017: Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy. Teil 1: Prüfverfahren.
- ÖNORM EN ISO 6892-1, 01.02.2017: Metallische Werkstoffe - Zugversuch. Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.
- MX3D (2019): MX3D Bridge. Online verfügbar unter <https://mx3d.com/projects/bridge-2/>, zuletzt geprüft am 18.01.2019.
- Nier, Mathias; Schlaich, Mike (2016): Leicht und Elegant - Die Plazaüberdachung des EY Headquarters in Luxemburg. In: Bundesingenieurkammer (Hg.): *Ingenieurbaukunst 2017*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 96-103.
- Pluta, Werner (2017): Spanische Architekten drucken eine Brücke. Online verfügbar unter <https://www.golem.de/news/3d-druck-spanische-architekten-drucken-eine-bruecke-1701-125902.html>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- Posch, Gerhard; Kalchgruber, Ferdinand; Hackl, Heinz; Chladil, Harald (2014): Manufacturing of turbine blades by shape giving CMT-welding. In: *Metal Additive Manufacturing Conference: Meet the future of industrial manufacturing now!*, 20.11.2014. Wien.

- Queguineur, A.; Rückert, G.; Cortial, F.; Hascoët, J. Y. (2018): Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications. In: *Weld World* 62 (2), S. 259–266. DOI: 10.1007/s40194-017-0536-8.
- Raghavan, Narendran; Dehoff, Ryan; Pannala, Sreekanth; Simunovic, Srdjan; Kirka, Michael; Turner, John et al. (2016): Numerical modeling of heat-transfer and the influence of process parameters on tailoring the grain morphology of IN718 in electron beam additive manufacturing. In: *Acta Materialia* 112, S. 303–314. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.063.
- Ruge, Jürgen; Wohlfahrt, Helmut (2013): *Technologie der Werkstoffe. Herstellung, Verarbeitung, Einsatz*. 9., überarb. u. akt. Aufl. 2013. Dordrecht: Springer. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1317744>.
- Sames, W. J.; List, F. A.; Pannala, S.; Dehoff, R. R.; Babu, S. S. (2016): The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. In: *International Materials Reviews* 61 (5), S. 315–360. DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649.
- Shen, Chen; Pan, Zengxi; Cuiuri, Dominic; Dong, Bosheng; Li, Huijun (2016): In-depth study of the mechanical properties for Fe 3 Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process. In: *Materials Science and Engineering: A* 669, S. 118–126. DOI: 10.1016/j.msea.2016.05.047.
- Somashekara, M. A.; Naveenkumar, M.; Kumar, Avinash; Viswanath, C.; Simhambhatla, S. (2017): Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing. In: *Int J Adv Manuf Technol* 90 (5-8), S. 2009–2025. DOI: 10.1007/s00170-016-9510-7.
- Stockinger, Johannes; Wiednig, Christopher; Enzinger, Norbert; Sommitsch, Christof; Huber, Daniel; Stockinger, Martin (2016): Additive Manufacturing via Cold Metal Transfer. In: *Metal Additive Manufacturing Conference: Industrial perspective in Additive Technologies*, 24.11.2016. Linz, S. 117–125.
- Thum, Marcel (2018): Schwedisches Bauunternehmen NorDan setzt auf 3D-Druck von Fenster und Türen. Online verfügbar unter <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/nordan-3d-druck-fenster-tueren-27343613/>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- TU Graz (2019): Coebro: Der 3D-Drucker lernt, Häuser zu bauen. Online verfügbar unter <https://www.tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/planet-research/einzelansicht/article/der-3d-drucker-lernt-haeuser-zu-bauen/>, zuletzt geprüft am 07.09.2019.

- Unipor (2018): Mauerziegel aus dem Drucker. Online verfügbar unter <https://www.unipor.de/presse/mauerziegel-aus-dem-drucker>, zuletzt geprüft am 07.09.2019.
- Voxeljet (2019): Betonguss mit Sandformen. Online verfügbar unter <https://www.voxeljet.com/de/branchen/cases/betonguss-mit-sandformen/>, zuletzt geprüft am 16.01.2019.
- Wang, Fude; Williams, Stewart; Colegrove, Paul; Antonysamy, Alphons A. (2013): Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V. In: *Metall and Mat Trans A* 44 (2), S. 968–977. DOI: 10.1007/s11661-012-1444-6.
- Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P. (2016): Wire + Arc Additive Manufacturing. In: *Materials Science and Technology* 32 (7), S. 641–647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- Xiong, Jun; Lei, Yangyang; Chen, Hui; Zhang, Guangjun (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. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019.
- Xiong, Jun; Zhang, Guangjun (2013): Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision. In: *Meas. Sci. Technol.* 24 (11), S. 115103. DOI: 10.1088/0957-0233/24/11/115103.
- Xu, Jie; Ding, Lieyun; Love, Peter E.D. (2017): Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing. In: *Automation in Construction* 76, S. 85–96. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.010.
- Yang, Dongqing; Wang, Gang; Zhang, Guangjun (2017): Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. In: *Journal of Materials Processing Technology* 244, S. 215–224. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024.
- Youheng, Fu; Guilan, Wang; Haiou, Zhang; Liye, Liang (2017): Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel. In: *Int J Adv Manuf Technol* 91 (1-4), S. 301–313. DOI: 10.1007/s00170-016-9621-1.
- Z88 (2019): Z88Arion. Online verfügbar unter <https://z88.de/z88arion/>, zuletzt geprüft am 07.09.2019.

Zhan, Qiang; Liang, Yihui; Ding, Jialuo; Williams, Stewart (2017): A wire deflection detection method based on image processing in wire + arc additive manufacturing. In: *Int J Adv Manuf Technol* 89 (1-4), S. 755–763. DOI: 10.1007/s00170-016-9106-2.

Zhang, Jikui; Wang, Xueyuan; Paddea, Sanjooram; Zhang, Xiang (2016): Fatigue crack propagation behaviour in wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress. In: *Materials & Design* 90, S. 551–561. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.10.141.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Funktionsprinzip der Stereolithographie - US-Patent Charles Hull (1986) (Fritz 2018).....	8
Abbildung 2: Prozesskette - Additive Herstellungsverfahren (Fritz 2018).....	9
Abbildung 3: Einfluss- und Zielgrößendarstellung (Fritz 2018).....	10
Abbildung 4: Additiv gefertigte Fußgängerbrücke der Firma MX3D (MX3D 2019).....	13
Abbildung 5: Additiv gefertigter Leichtbauknoten der Firma Arup (Galjaard et al. 2015).....	13
Abbildung 6: Darstellung Verfahrensauswahl.....	17
Abbildung 7: Prozessablauf CMT (Fronius 2019).....	19
Abbildung 8: Blockschaltbild eines CMT-Systems (Bruckner et al. 2013).....	20
Abbildung 9: Vergleich Spritzerbildung M21 (Bruckner et al. 2013).....	22
Abbildung 10: Vergleich Spritzerbildung 100% CO2 (Bruckner et al. 2013).....	22
Abbildung 11: Geometrische Abweichungen (Feldmann et al. 2019).....	26
Abbildung 12: Alternative Schweißpfadführung (Feldmann et al. 2019).....	27
Abbildung 13: Höhe und Breite in Abhängigkeit zur Stromstärke (Stockinger et al. 2016).....	33
Abbildung 14: Schematische Darstellung der gerichteten Energieeinbringung (ÖNORM EN ISO 17296-2).....	35
Abbildung 15: Teil1 - Haupteigenschaften und entsprechende Prüfnormen (ÖNORM EN ISO 17296-3).....	36
Abbildung 16: Teil2 - Haupteigenschaften und entsprechende Prüfnormen (ÖNORM EN ISO 17296-3).....	37
Abbildung 17: Gebräuchliche Probenarten und Erzeugnisformen (ÖNORM EN ISO 6892-1).....	39
Abbildung 18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Heine 2015).....	40
Abbildung 19: Probenmaße Kerbschlagbiegeversuch (ÖNORM EN ISO 148-1).....	41
Abbildung 20: Durchführung Kerbschlagbiegeversuch (Heine 2015).....	42
Abbildung 21: Schweißanlage.....	44
Abbildung 22: Wassergekühlter Schweißstisch.....	44
Abbildung 23 – Ausgangsmaterial 5,3mm (ohne Pendeln).....	44
Abbildung 24: Ausgangsmaterial 12mm (mit Pendeln).....	44
Abbildung 25: Tabelle 2 - Gebräuchliche Probenarten und Erzeugnisformen (ÖNORM EN ISO 6892-1).....	46
Abbildung 26: Definition Abmessungen (ÖNORM EN ISO 6892-1).....	46
Abbildung 27: Probenabmessungen.....	47
Abbildung 28: Probenanordnung - ohne Pendeln.....	48
Abbildung 29: Probenanordnung - mit Pendeln.....	48
Abbildung 30: Ausgearbeitete Zugproben 5,3mm.....	49
Abbildung 31: Ausgearbeitete Zugproben 12mm.....	49
Abbildung 32: RetroLine testControl II AllroundLine.....	50
Abbildung 33: Definition Probenausrichtung.....	51
Abbildung 34: Definition Zugfestigkeit und Dehnungen (ÖNORM EN ISO 6892-1).....	52
Abbildung 35: Definition obere und untere Streckgrenze (ÖNORM EN ISO 6892-1).....	53
Abbildung 36: Bruchformen: a Normalspannungsbruch, b Scherbruch, c Kegel-Tasse-Bruch (Mischbruch), d Mischbruch, e Duktiler Bruch (Ruge und Wohlfahrt 2013).....	53
Abbildung 37: Alle Ergebniswerte - ohne Pendeln, längs zur Schweißnaht.....	55
Abbildung 38: Gültige Ergebniswerte - ohne Pendeln, längs zur Schweißnaht.....	55
Abbildung 39: Bruchform Probe 10.....	56
Abbildung 40: Bruchform Probe 17.....	56
Abbildung 41: Alle Ergebniswerte - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht.....	57

Abbildung 42: Gültige Ergebniswerte - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht	57
Abbildung 43: Bruchform Probe 2.....	58
Abbildung 44: Bruchform Probe 5.....	58
Abbildung 45: Alle Ergebniswerte - mit Pendeln, längs zur Schweißnaht.....	59
Abbildung 46: Gültige Ergebniswerte - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht	59
Abbildung 47: Bruchform Probe 32.....	60
Abbildung 48: Bruchform Probe 33.....	60
Abbildung 49: Alle Ergebniswerte - mit Pendeln, quer zur Schweißnaht	61
Abbildung 50: Gültige Ergebniswerte - mit Pendeln, quer zur Schweißnaht.....	61
Abbildung 51: Bruchform Probe 21.....	62
Abbildung 52: Bruchform Probe 26.....	62
Abbildung 53: konventionelle Steifen (links) und optimierte, additiv hergestellte Steifen (rechts).....	64
Abbildung 54: Optimale Steifenanordnung hinsichtlich Beulen eines Trägers (Unterweger, 2014)	65
Abbildung 55: Querschnittsänderung 1	66
Abbildung 56: Querschnittsänderung 2	66
Abbildung 57: Optimierung Fachwerkträger	67
Abbildung 58: Beispiel additiv hergestellter Fachwerkknoten	68
Abbildung 59: Knotenausarbeitung (Nier und Schlaich 2016)	69
Abbildung 60: Massiver Stahlknoten (Nier und Schlaich 2016)	69
Abbildung 61: Randbedingungen Topologieoptimierung	70
Abbildung 62: Ausgangsgeometrie inklusive FE-Netz	70
Abbildung 63: Iterationsschritt 10	70
Abbildung 64: Iterationsschritt 20	71
Abbildung 65: Iterationsschritt 40	71
Abbildung 66: Topologieoptimiertes linienförmiges Bauteil	71
Abbildung 67: Geometrische Vorlage – Schweißversuch.....	73
Abbildung 68: Schweißpfadführung - Lage 1.....	74
Abbildung 69: Schweißpfadführung - Lage 2.....	74
Abbildung 70: Y-Steife 1 (Ansicht).....	75
Abbildung 71: Y-Steife 1 (Draufsicht)	75
Abbildung 72: Y-Steife 2 (Ansicht).....	76
Abbildung 73: Y-Steife 2 (Draufsicht)	76
Abbildung 74: Schweißpfad Versuch 1 - Lage 1.....	77
Abbildung 75: Schweißpfad Versuch 1 - Lage 2.....	77
Abbildung 76: Gewünschte Geometrie - Versuch 1.....	78
Abbildung 77: Versuch 1 (Ansicht)	79
Abbildung 78: Versuch 1 (Aufriss)	79
Abbildung 79: Versuch 1 (Draufsicht)	79
Abbildung 80: Versuch 2 (Isometrie)	79
Abbildung 81: Gewünschte Geometrie - Versuch 2.....	80
Abbildung 82: Versuch 2 (Ansicht)	81
Abbildung 83: Versuch 2 (Aufriss)	81
Abbildung 84: Versuch 2 (Draufsicht)	81
Abbildung 85: Versuch 2 (Isometrie)	81

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich von DED und PBF (Grunwald et al. 2018; Duda und Raghavan 2018).....	16
Tabelle 2: Vorteile WAAM.....	18
Tabelle 3: Vor- und Nachteile von Mischgas oder 100% CO2 als Schutzgas (Bruckner et al. 2013)	23
Tabelle 4: Forschungsarbeiten WAAM- Bautechnik	27
Tabelle 5: Forschungsarbeiten WAAM- Allgemeines	28
Tabelle 6: Forschungsarbeiten WAAM- Materialeigenschaften	28
Tabelle 7: Forschungsarbeiten WAAM- Eigenspannungen	29
Tabelle 8: Forschungsarbeiten WAAM- Design.....	29
Tabelle 9: Forschungsarbeiten WAAM- Optimierungen	29
Tabelle 10: Forschungsarbeiten WAAM- Prozessüberwachung.....	30
Tabelle 11: Forschungsarbeiten WAAM- Cold Metal Transfer.....	30
Tabelle 12: Verwendete Schweißparameter (Queguineur et al. 2018)	31
Tabelle 13: Schweißparameter (Stockinger et al. 2016).....	32
Tabelle 14: Schweißparameter.....	45
Tabelle 15: Prüfungsparameter	50
Tabelle 16: Übersicht Probennummerierung	51
Tabelle 17: Ergebnisse - ohne Pendeln, längs zur Schweißnaht.....	56
Tabelle 18: Ergebnisse - ohne Pendeln, quer zur Schweißnaht.....	58
Tabelle 19: Ergebnisse – mit Pendeln, längs zur Schweißnaht	60
Tabelle 20: Ergebnisse - mit Pendeln, quer zur Schweißnaht	62
Tabelle 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	63
Tabelle 22: Gültigkeit der Versuchsergebnisse	63
Tabelle 23: Zusammenfassung - Y-Steife.....	76
Tabelle 24: Zusammenfassung – Anchlusselement	80

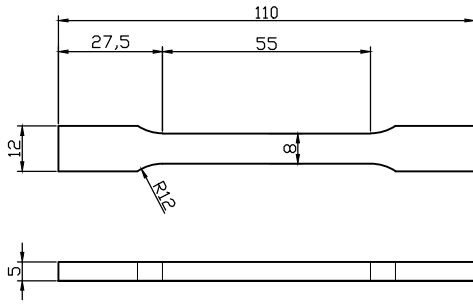
ANHANG

Anhang A Probengeometrie inklusive Probennummerierung

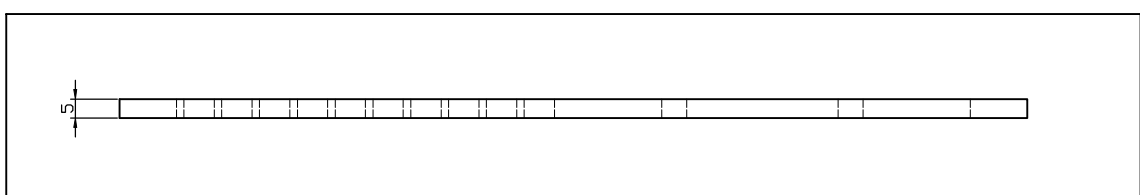
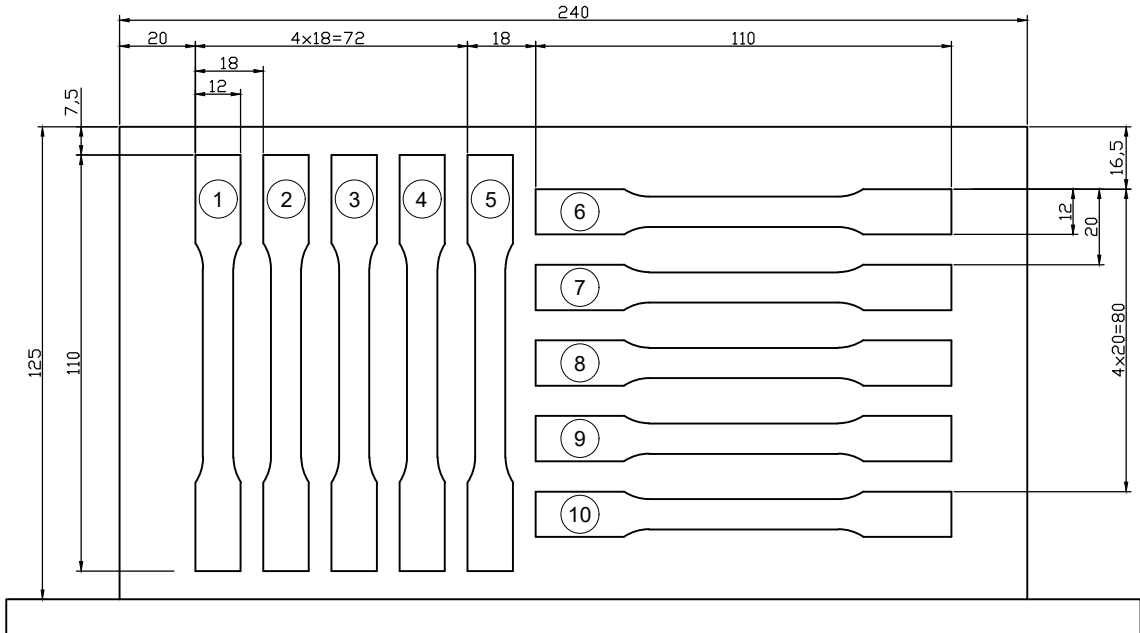
Werkstück 1

Blechstärke:	5mm
Probenanzahl:	10 Stück
Nummerierung:	1-10

Probengeometrie:



Probenanordnung:



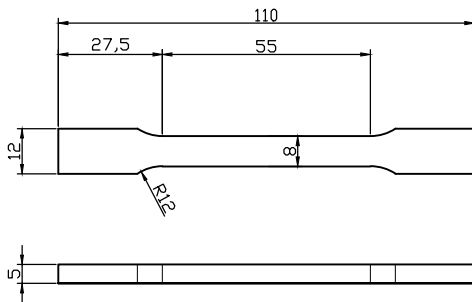
ERZEUGT DURCH EINE AUTODESK-STUDENTENVERSION

ERZEUGT DURCH EINE AUTODESK-STUDENTENVERSION

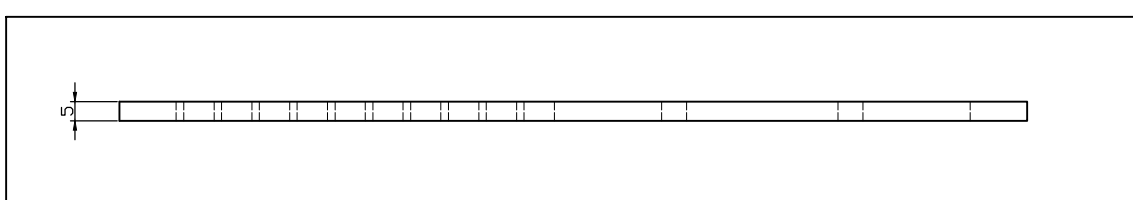
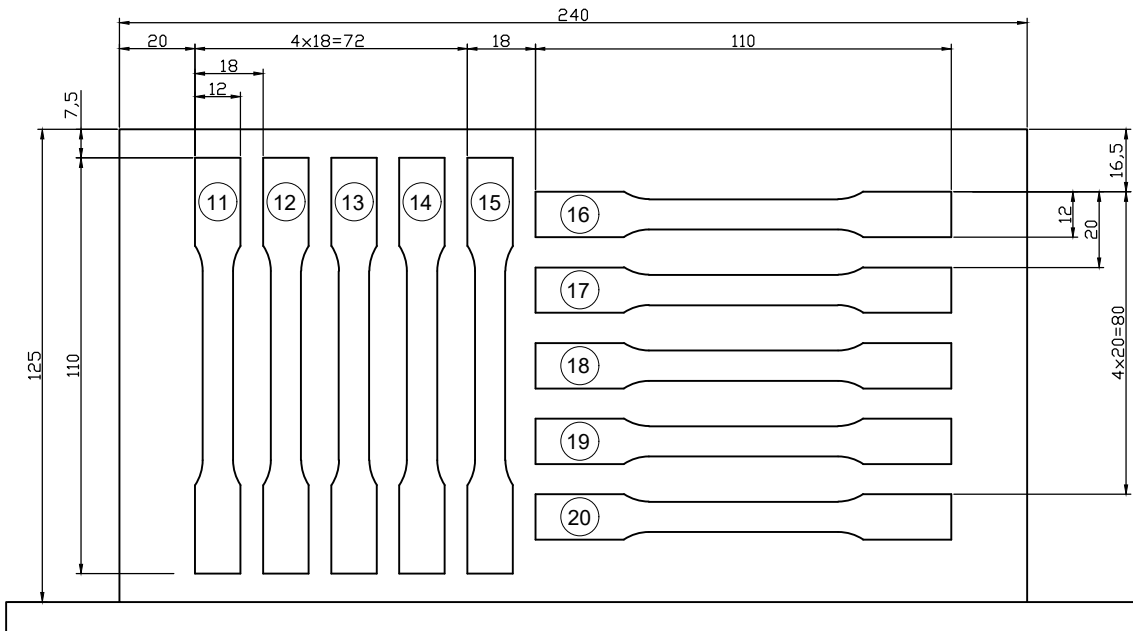
Werkstück 2

Blechstärke: 5mm
 Probenanzahl: 10 Stück
 Nummerierung: 11-20

Probengeometrie:



Probenanordnung:



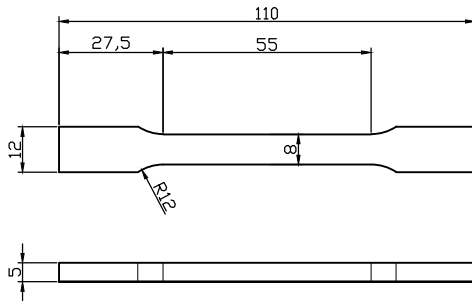
ERZEUGT DURCH EINE AUTODESK-STUDENTENVERSION

ERZEUGT DURCH EINE AUTODESK-STUDENTENVERSION

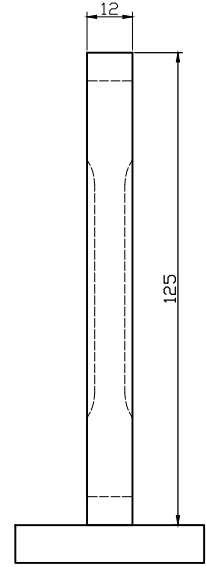
Werkstück 3

Blechstärke:	12mm
Probenanzahl:	16 Stück
Nummerierung:	21-36

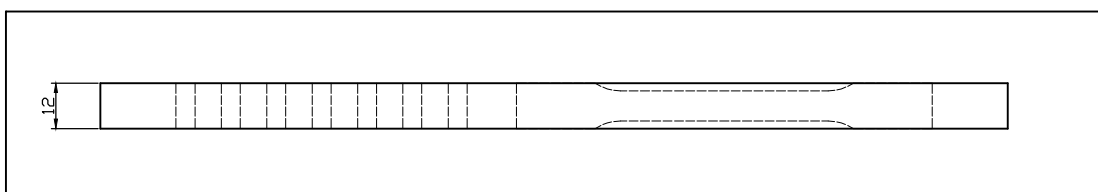
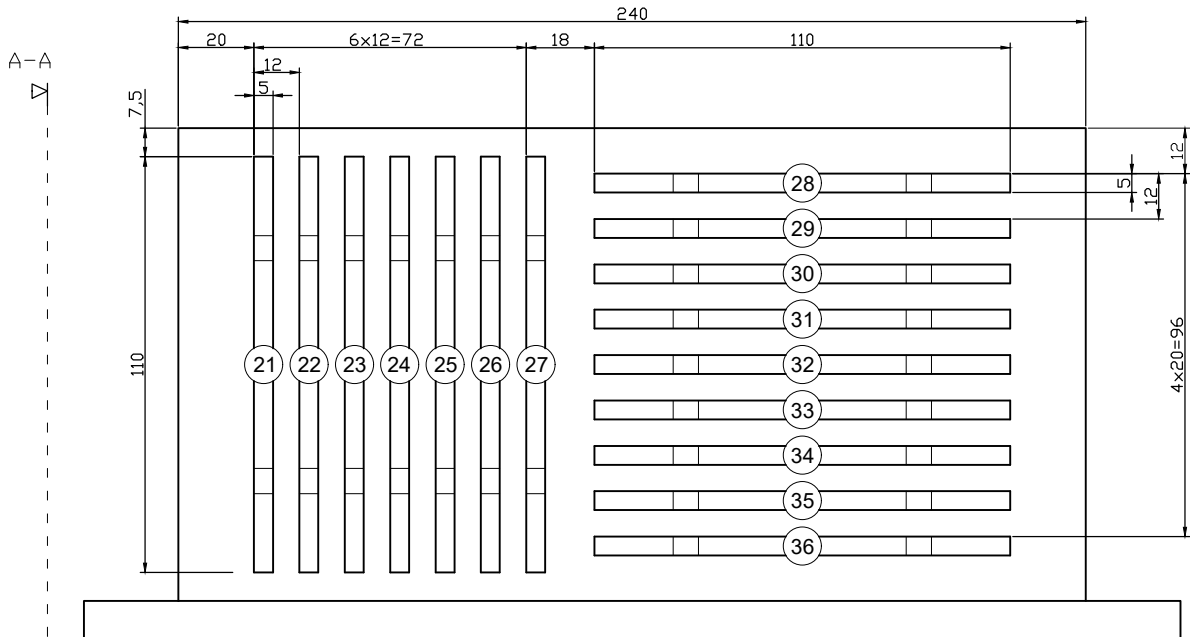
Probengeometrie:



Ansicht A-A



Probenanordnung:

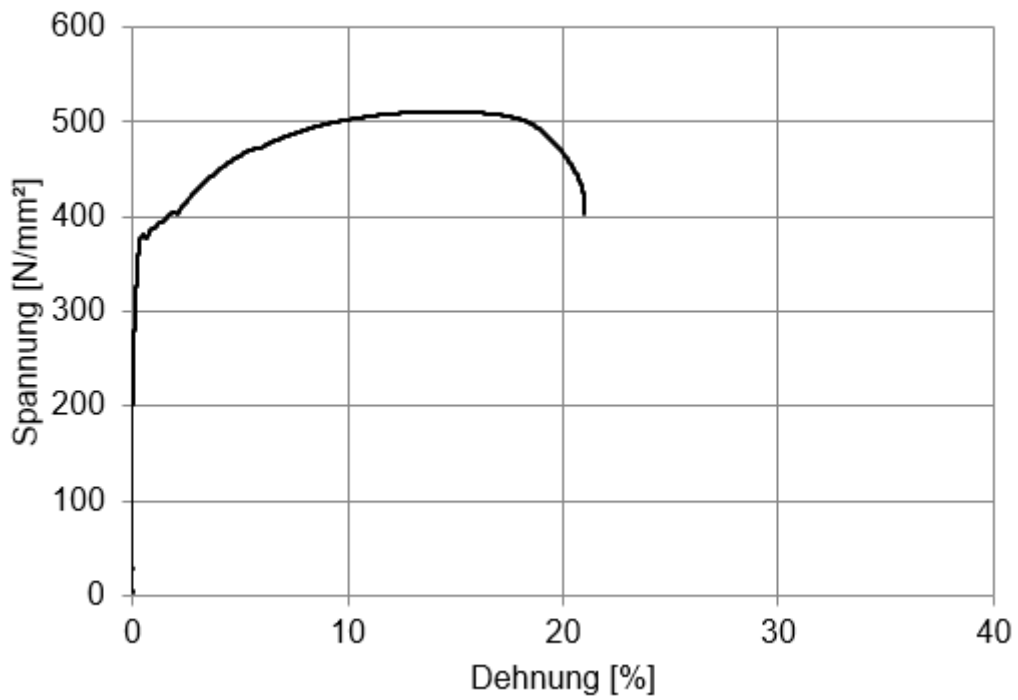


ERZEUGT DURCH EINE AUTODESK-STUDENTENVERSION

ERZEUGT DURCH EINE AUTODESK-STUDENTENVERSION

Anhang B Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Probe 1

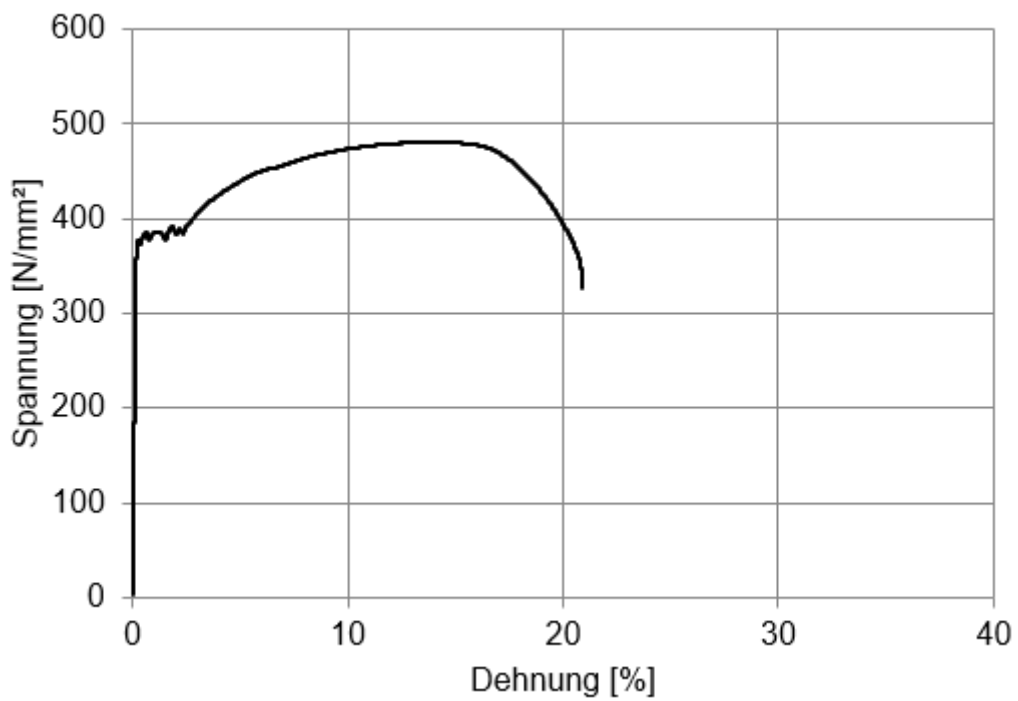


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,70\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 2

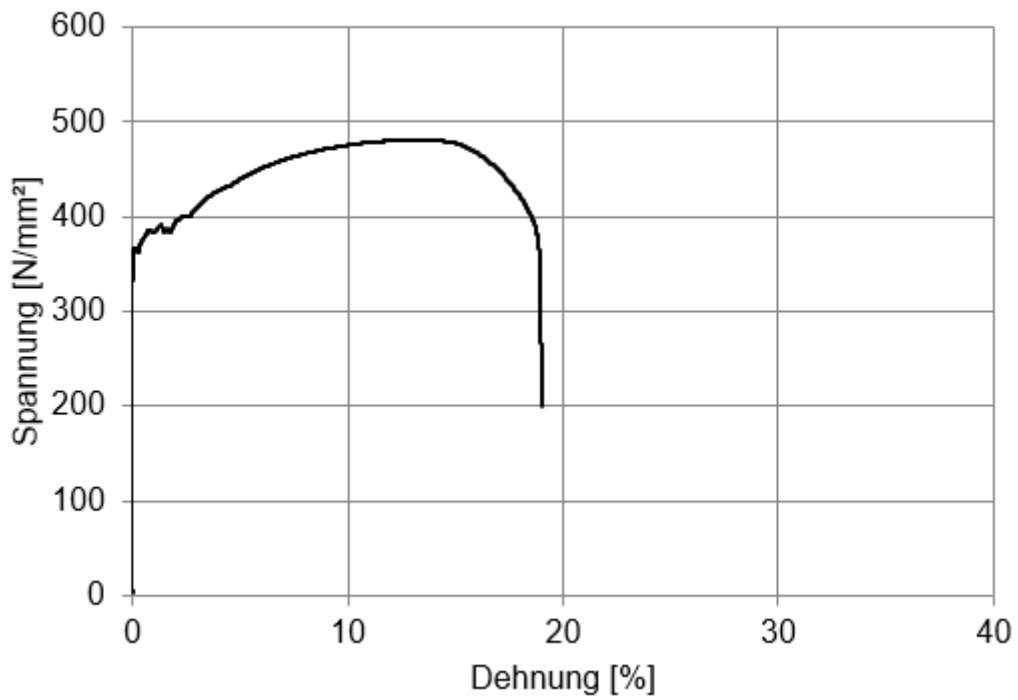


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 3

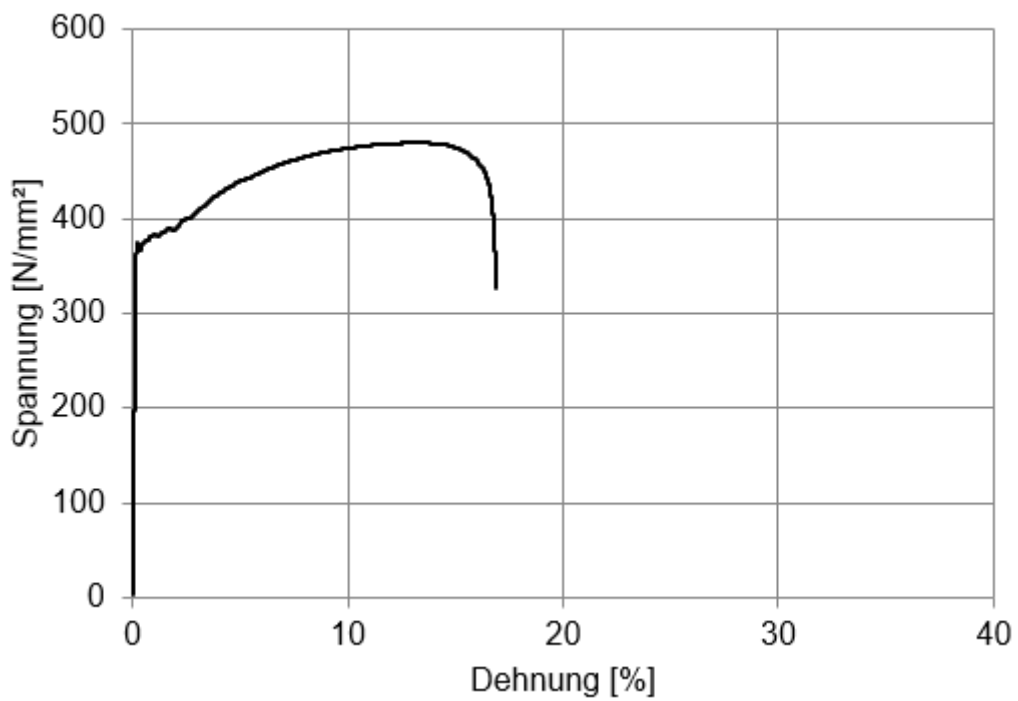


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 4

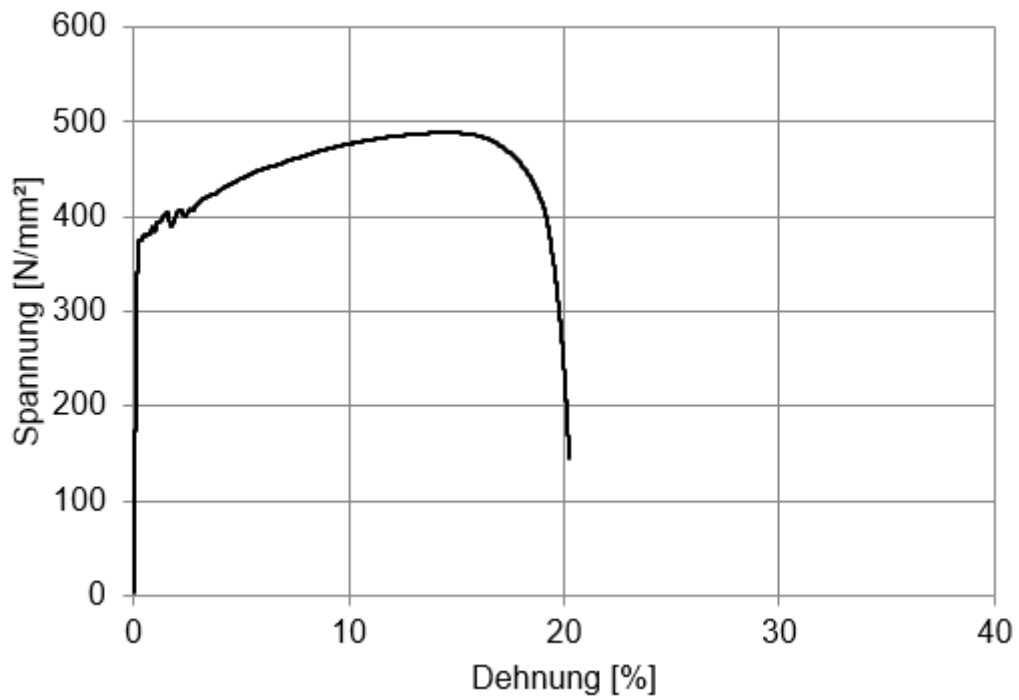


$a_{\min} = 4,80\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 5

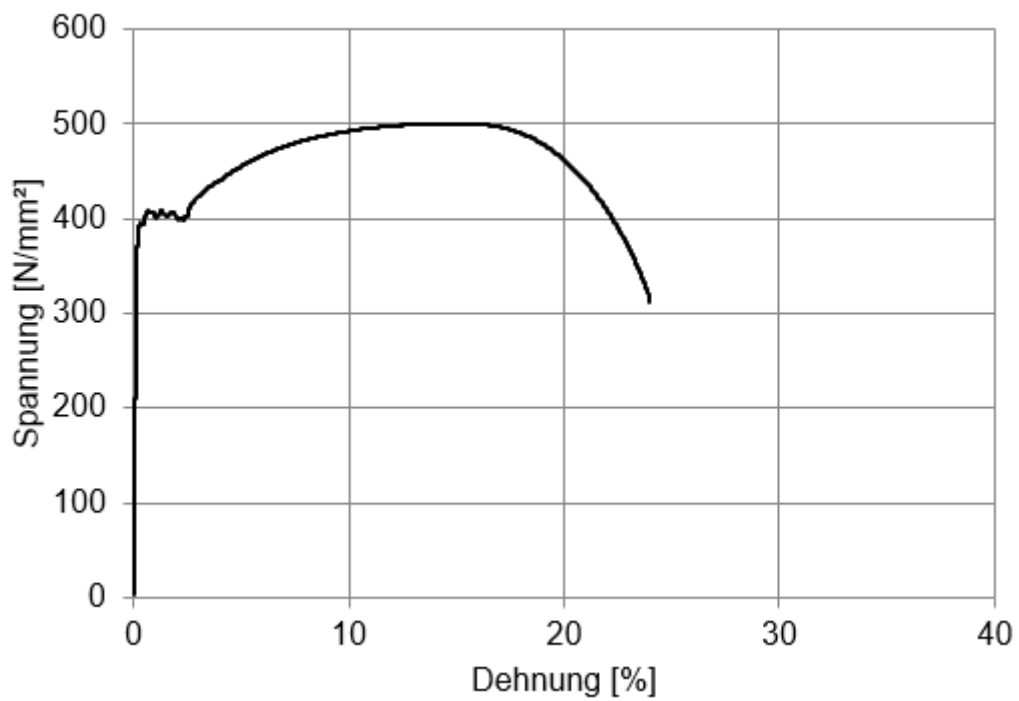


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,20\text{mm}$

$b = 8,10\text{mm}$

Probe 6

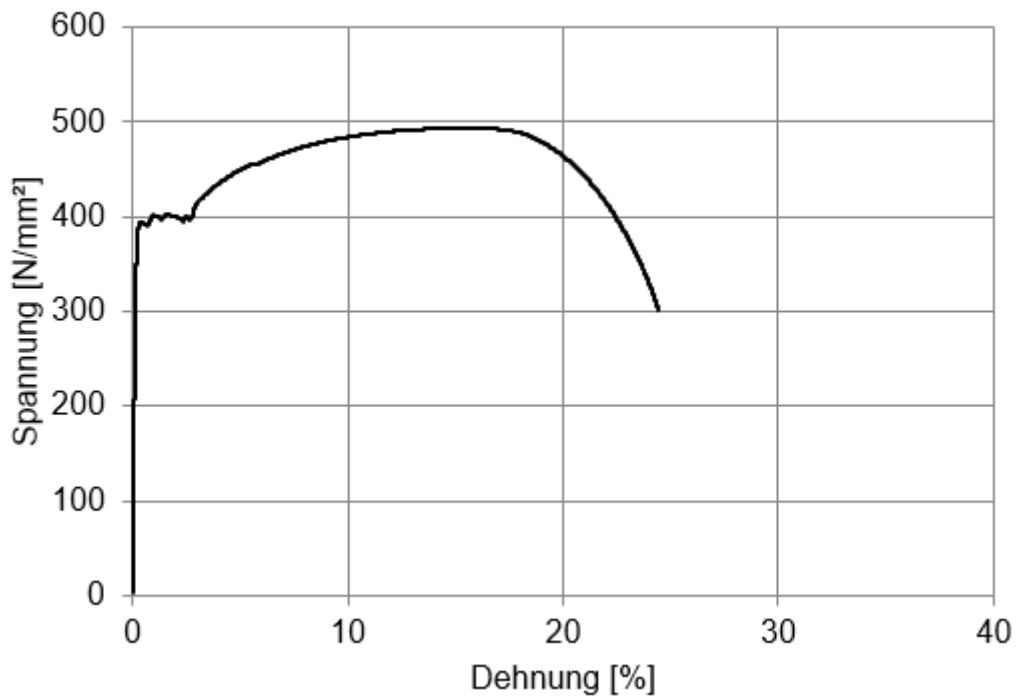


$a_{\min} = 5,30\text{mm}$

$a_{\max} = 5,40\text{mm}$

$b = 8,20\text{mm}$

Probe 7

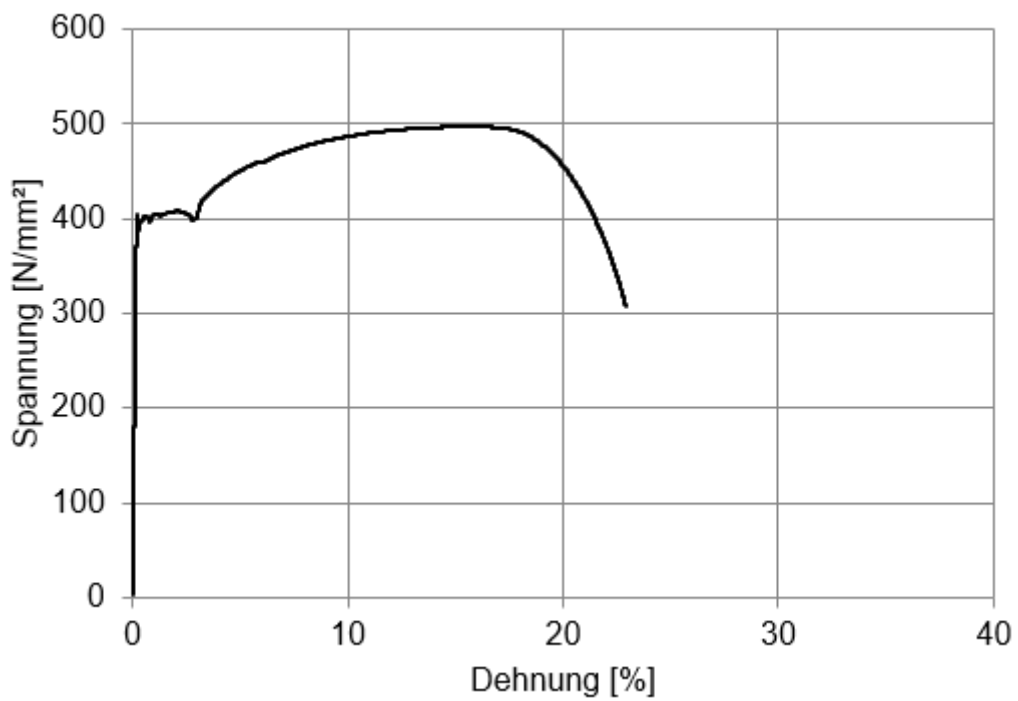


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,35\text{mm}$

$b = 8,10\text{mm}$

Probe 8

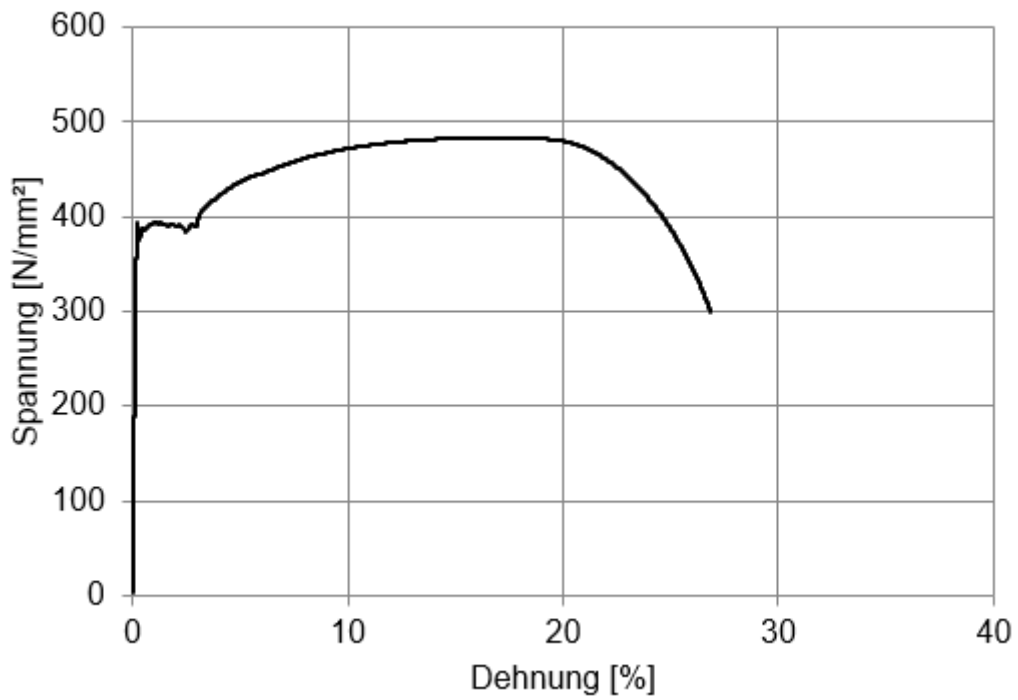


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 9

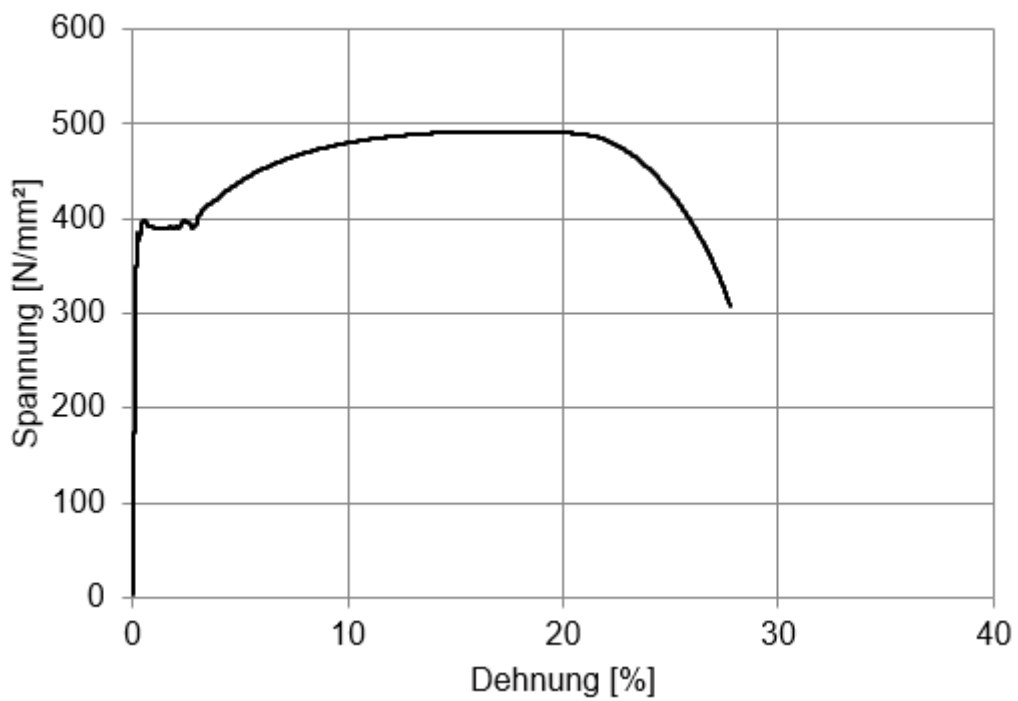


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,40\text{mm}$

$b = 8,10\text{mm}$

Probe 10

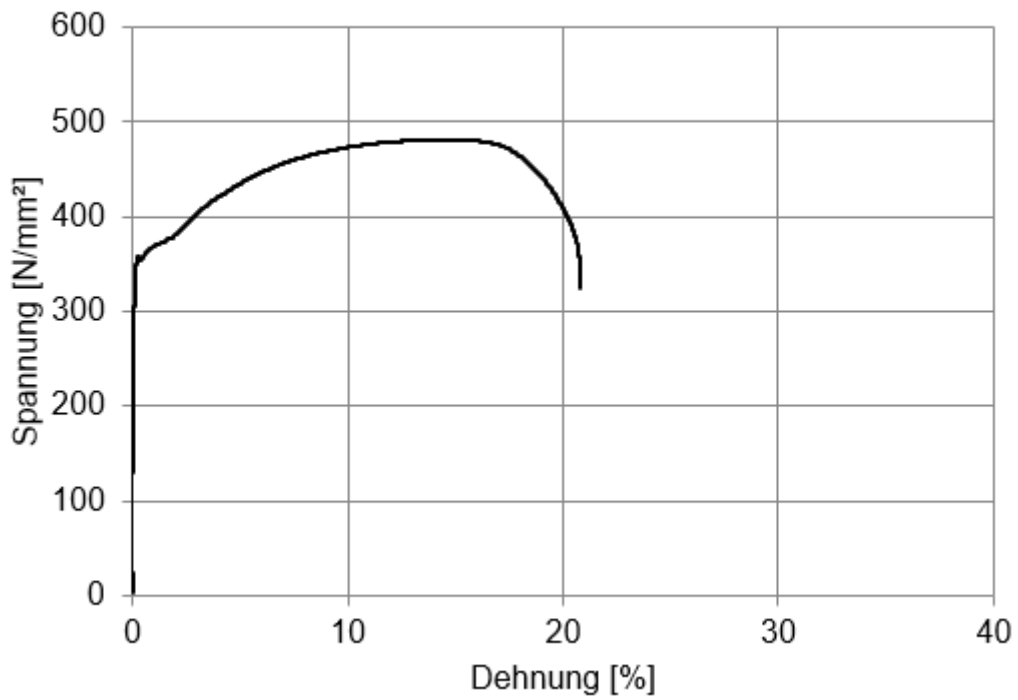


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,05\text{mm}$

Probe 11

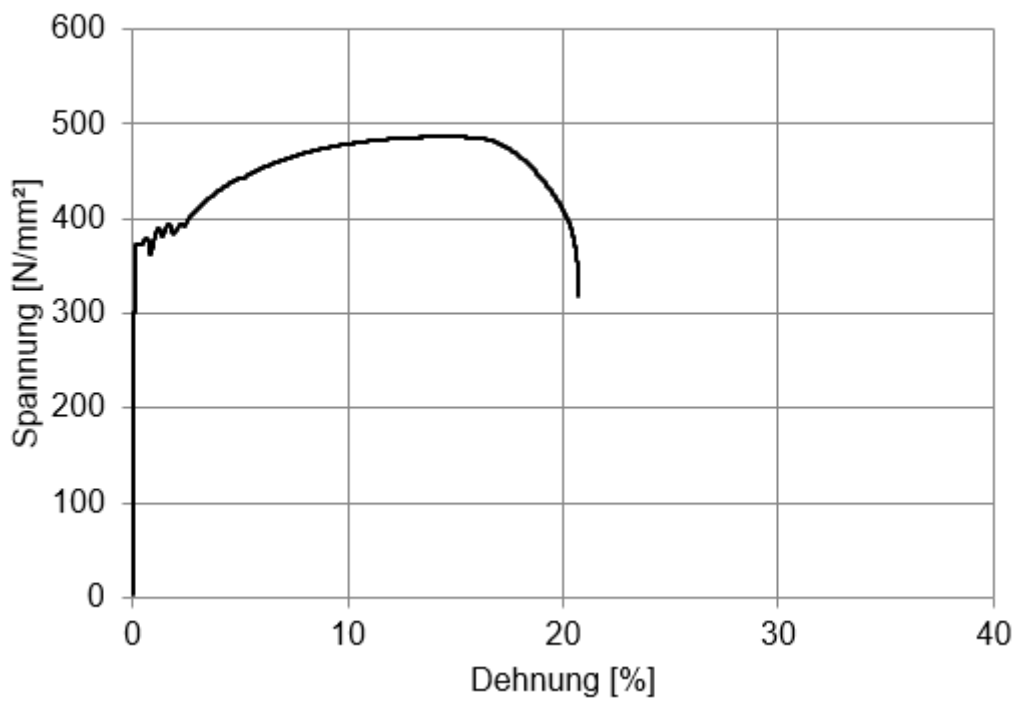


$a_{\min} = 5,25\text{mm}$

$a_{\max} = 5,75\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 12

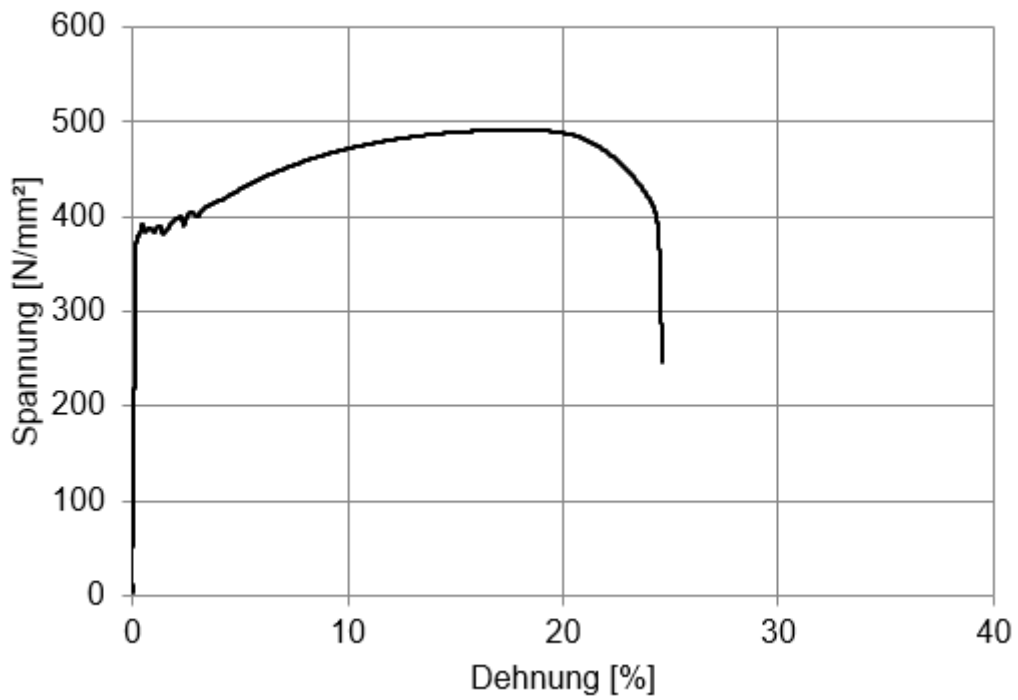


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,35\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 13

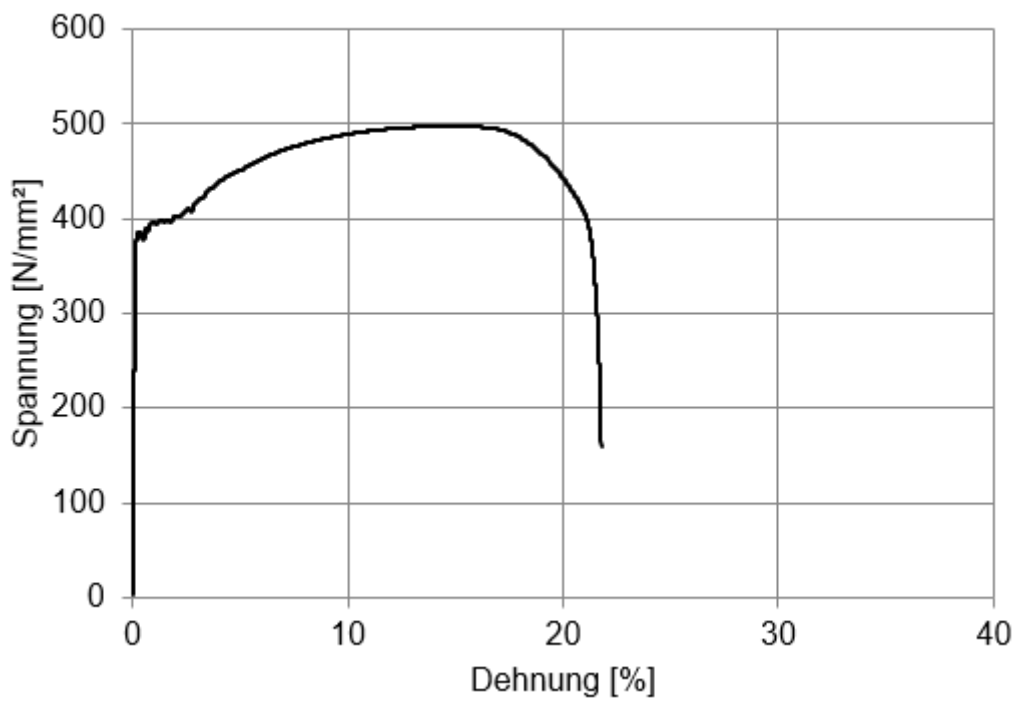


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 7,90\text{mm}$

Probe 14

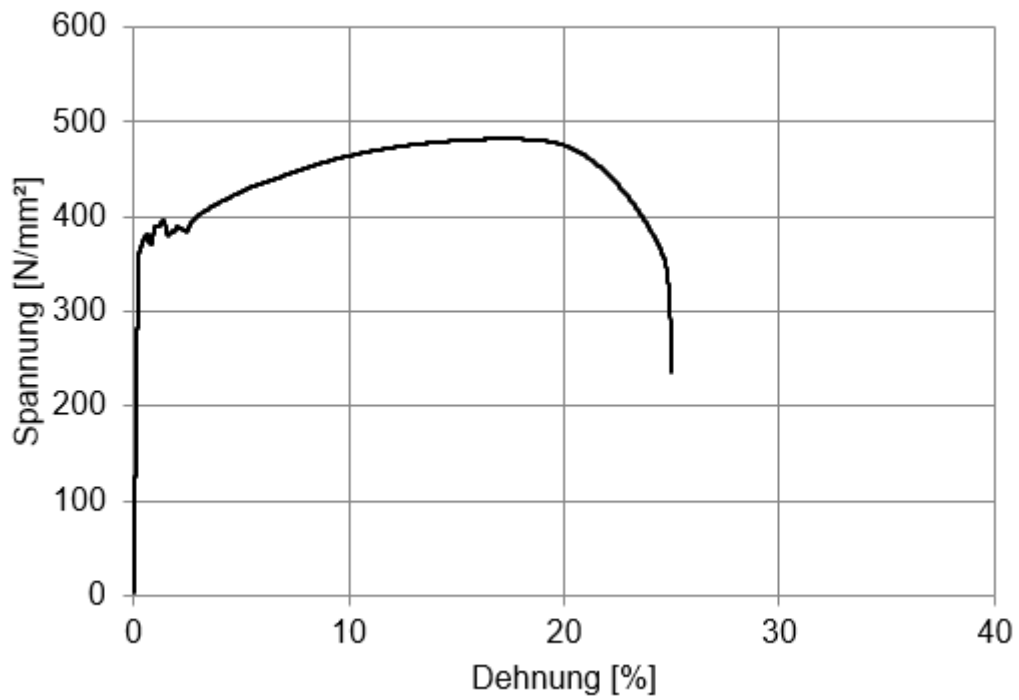


$a_{\min} = 4,85\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 15

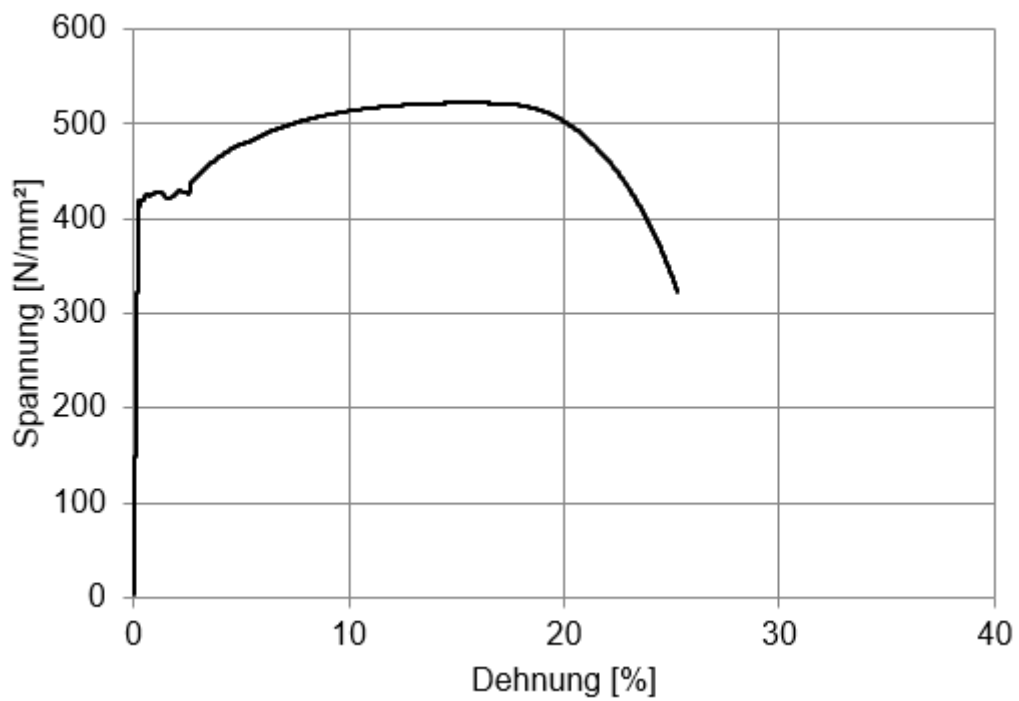


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,05\text{mm}$

Probe 16

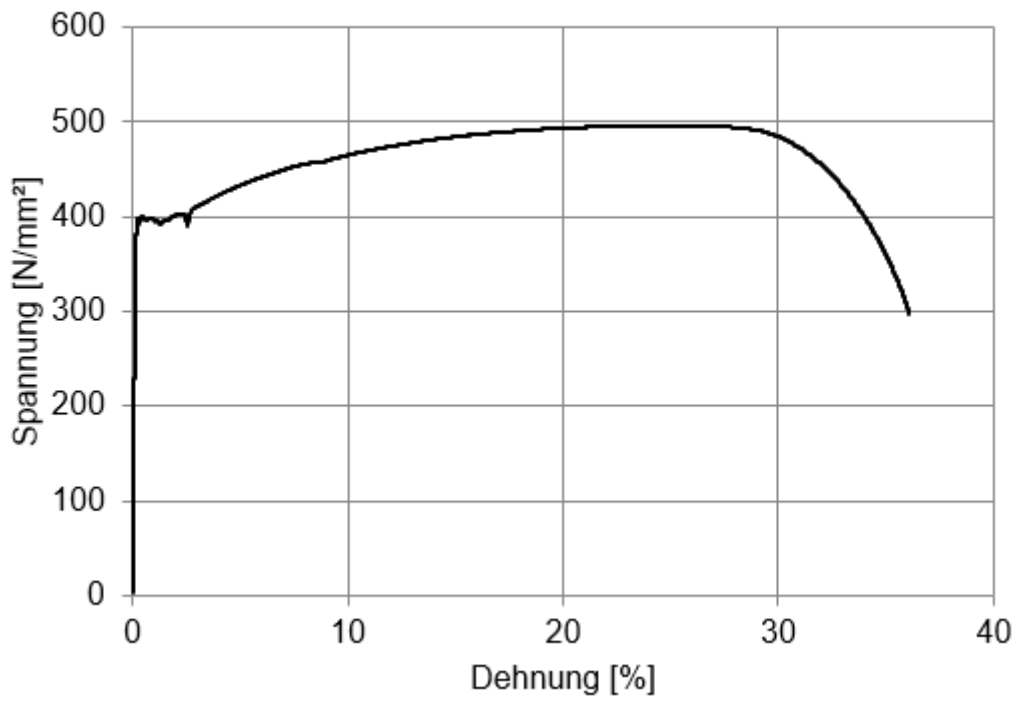


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,35\text{mm}$

$b = 7,95\text{mm}$

Probe 17

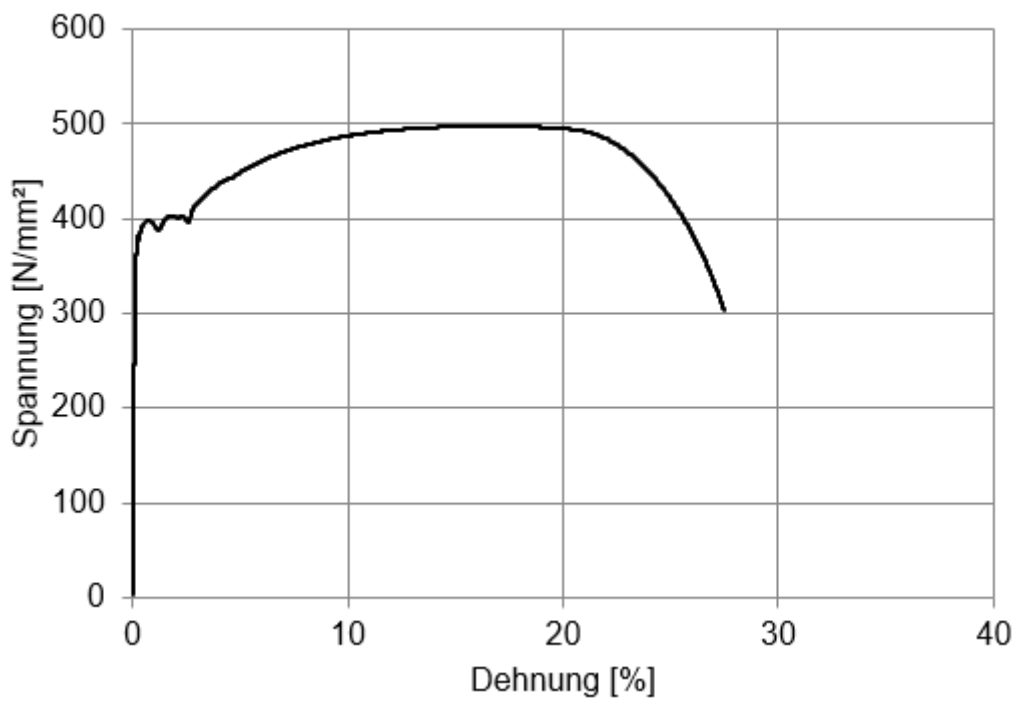


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,25\text{mm}$

$b = 8,00\text{mm}$

Probe 18

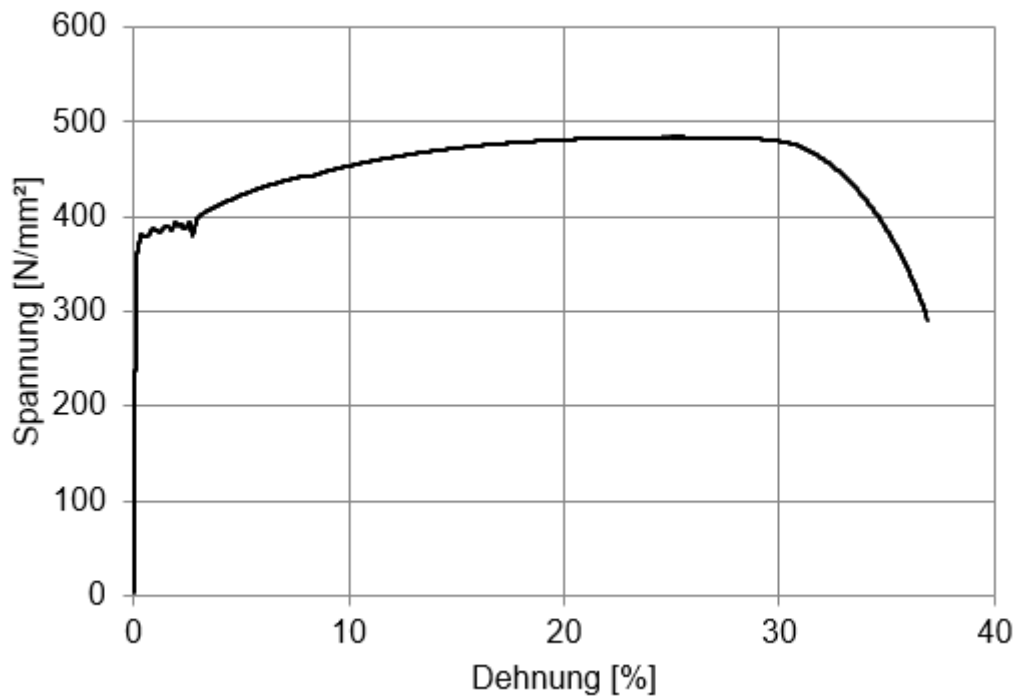


$a_{\min} = 4,95\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 8,10\text{mm}$

Probe 19

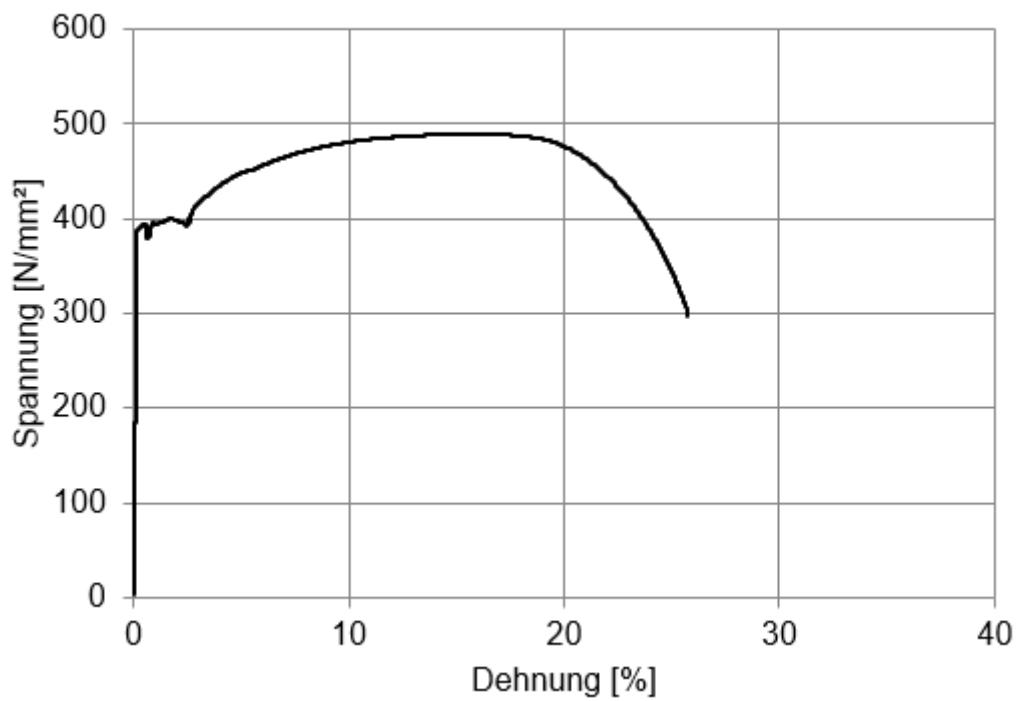


$a_{\min} = 4,90\text{mm}$

$a_{\max} = 5,30\text{mm}$

$b = 7,95\text{mm}$

Probe 20

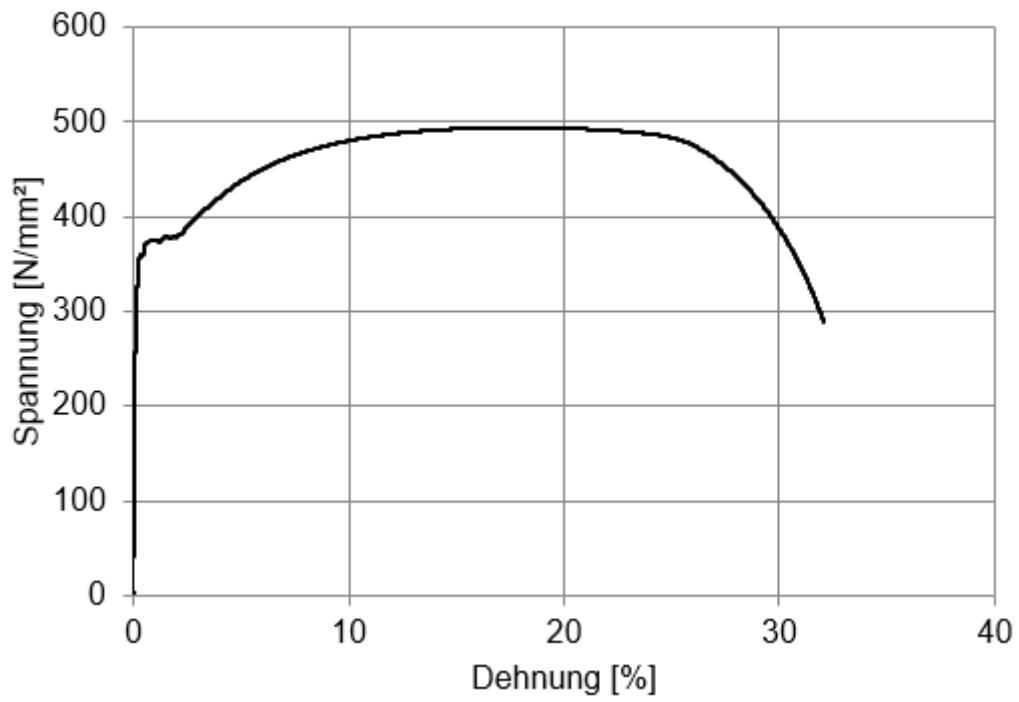


$a_{\min} = 5,00\text{mm}$

$a_{\max} = 5,35\text{mm}$

$b = 8,10\text{mm}$

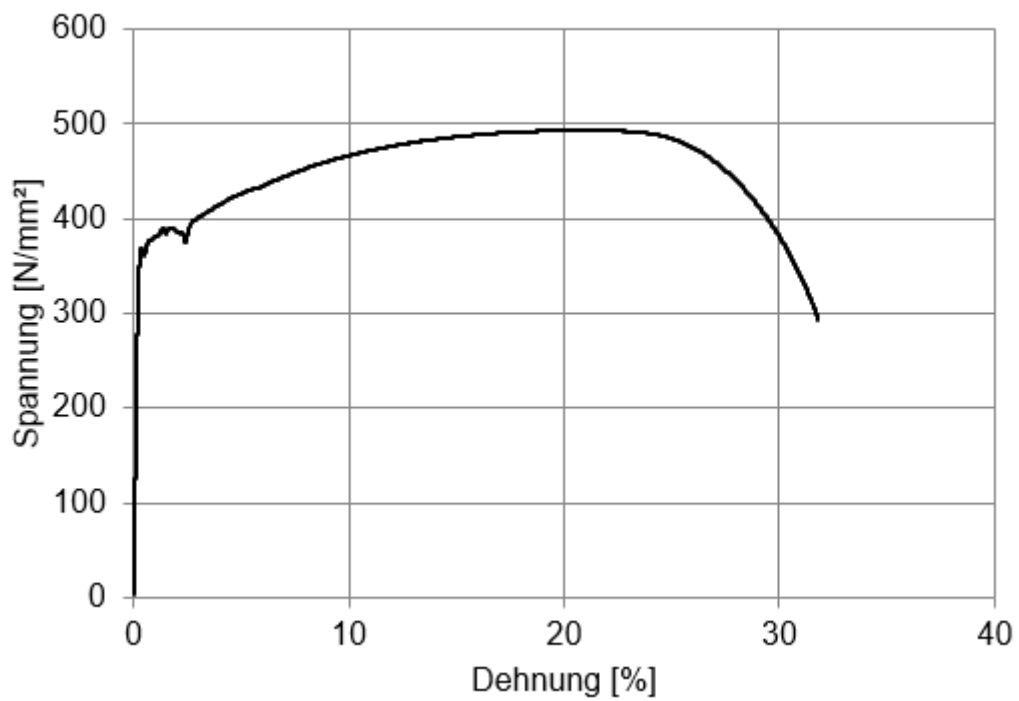
Probe 21



a = 5,20mm

b = 8,15mm

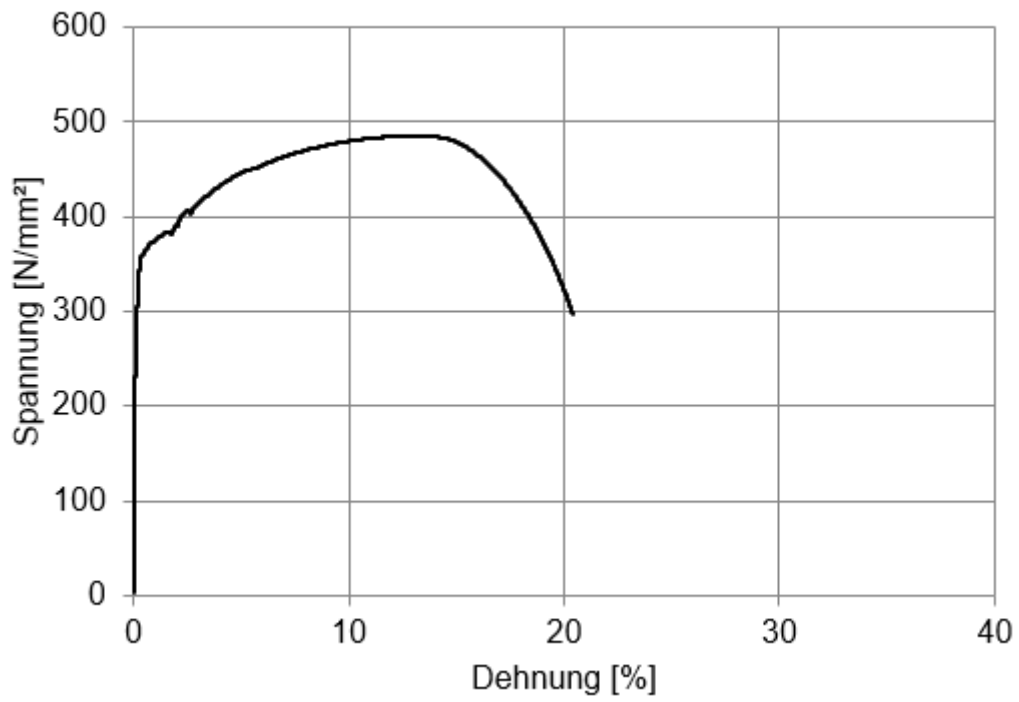
Probe 22



a = 5,20mm

b = 7,90mm

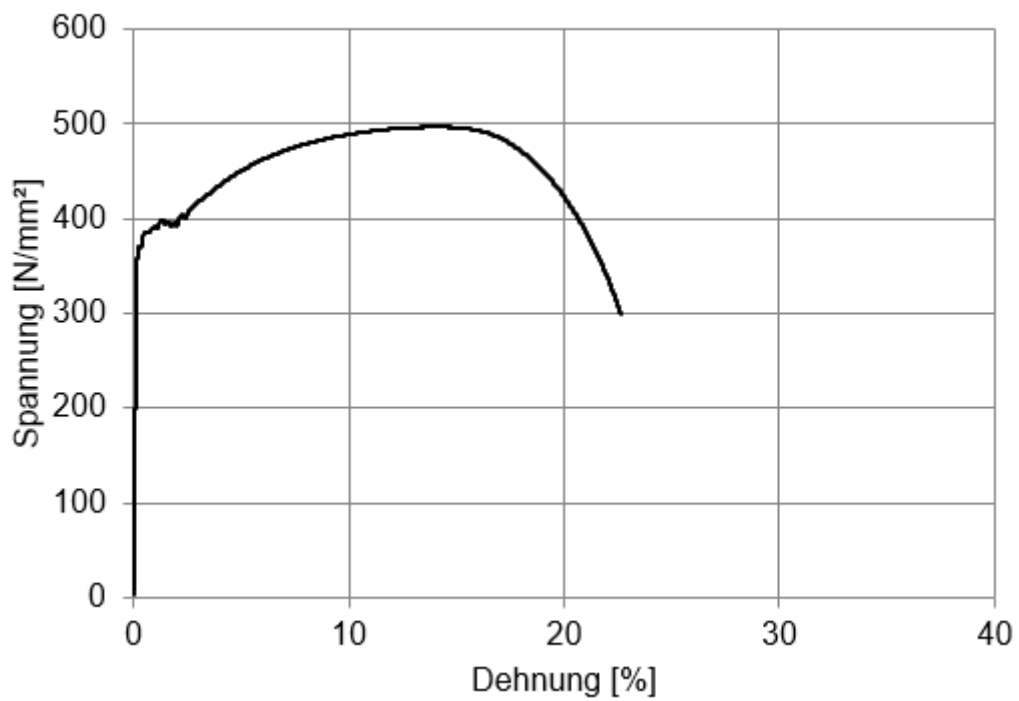
Probe 23



a = 5,20mm

b = 8,05mm

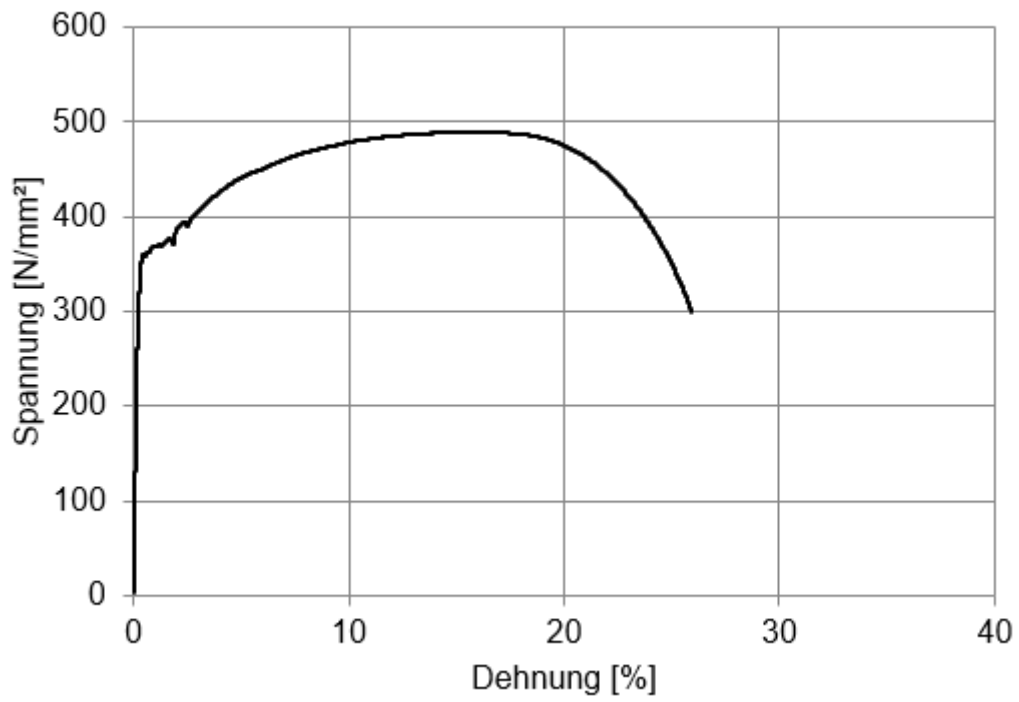
Probe 24



a = 5,15mm

b = 8,10mm

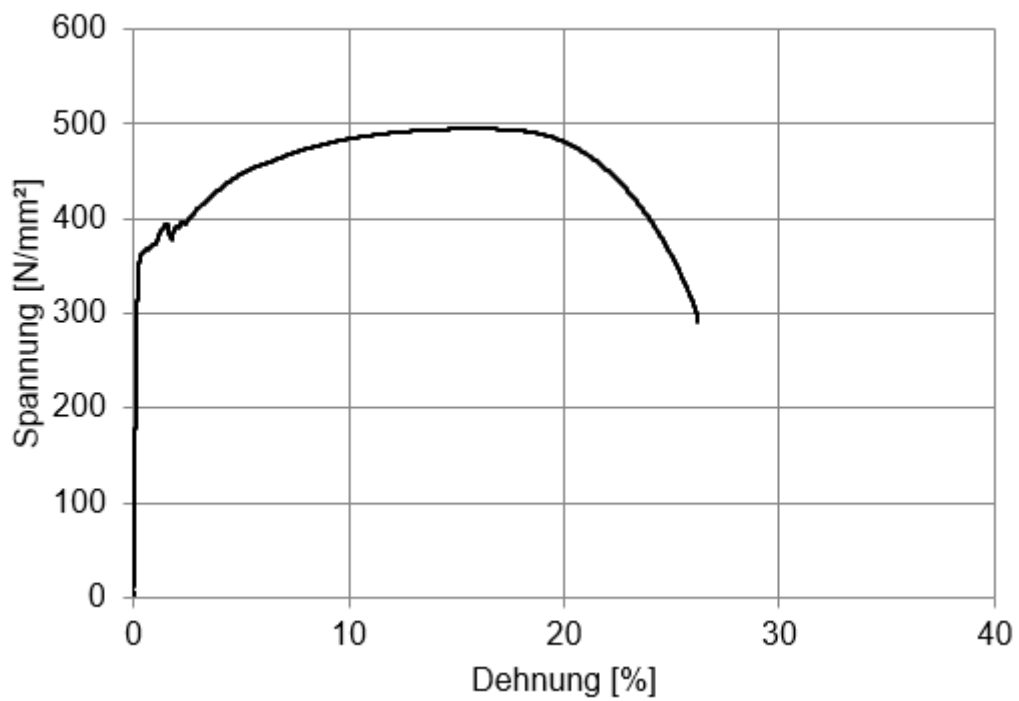
Probe 25



a = 5,10mm

b = 8,05mm

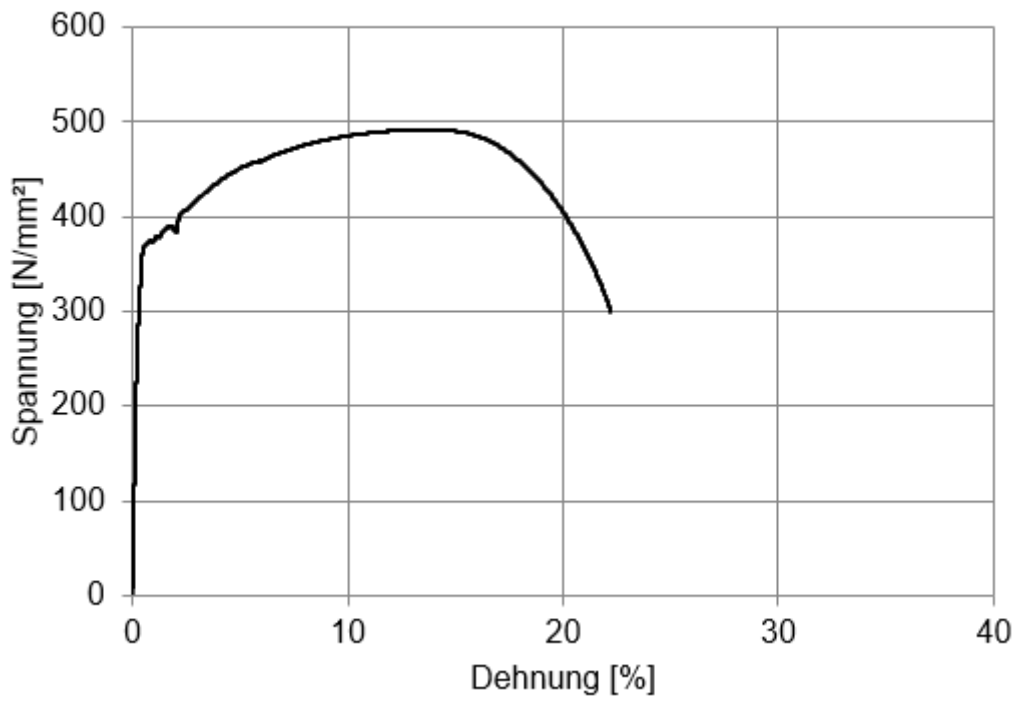
Probe 26



a = 5,15mm

b = 8,00mm

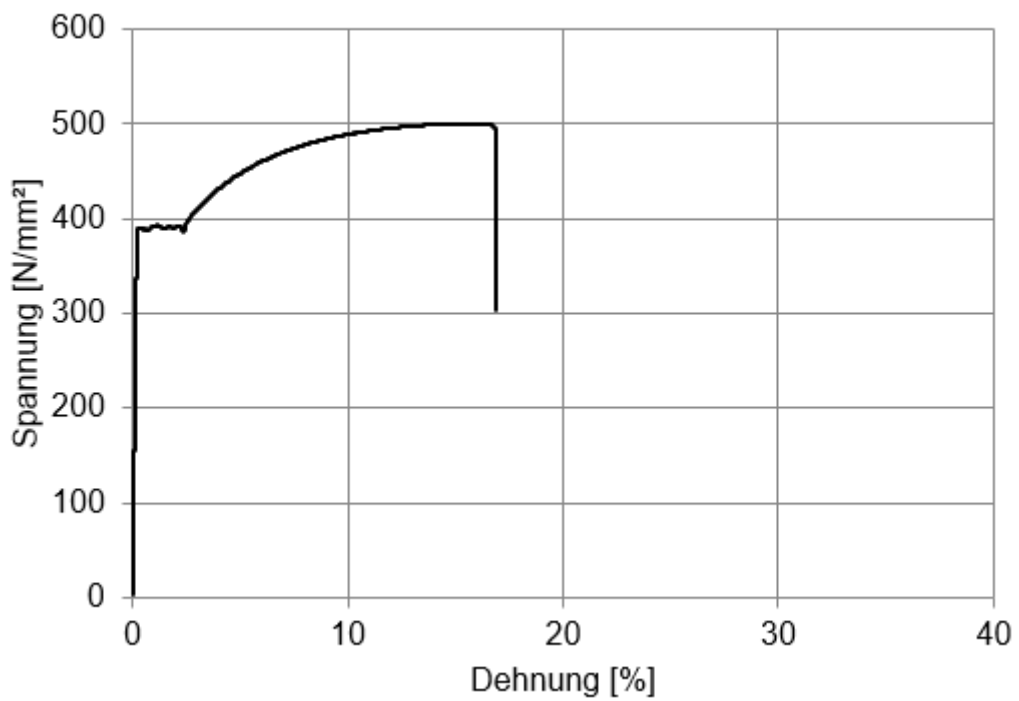
Probe 27



a = 5,20mm

b = 8,20mm

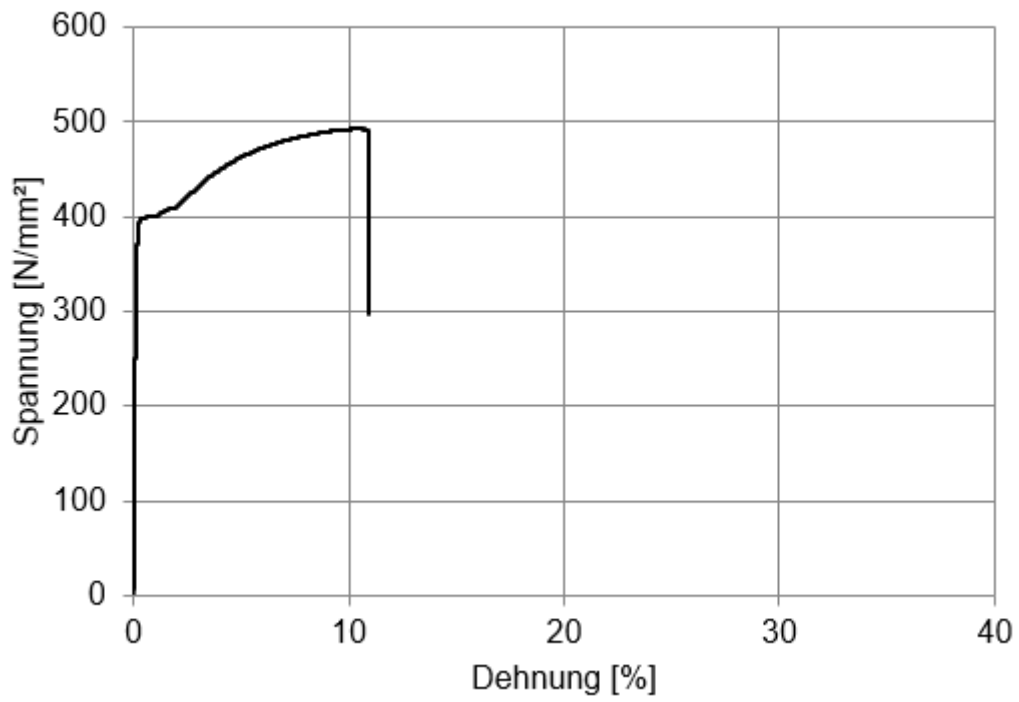
Probe 28



a = 5,20mm

b = 7,60mm

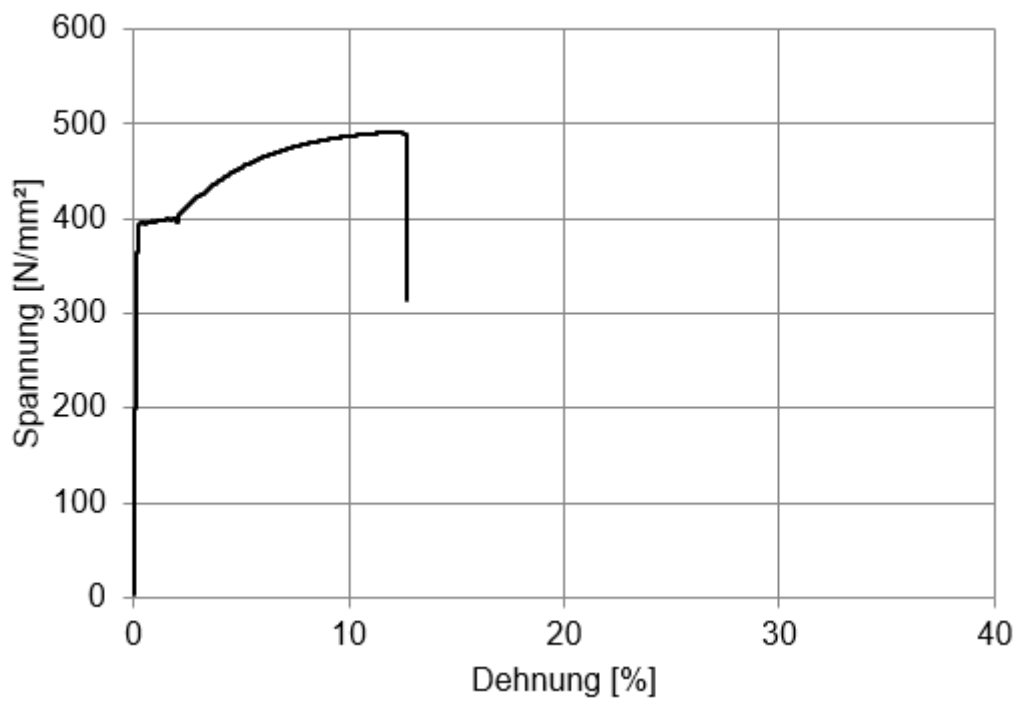
Probe 29



a = 5,10mm

b = 7,80mm

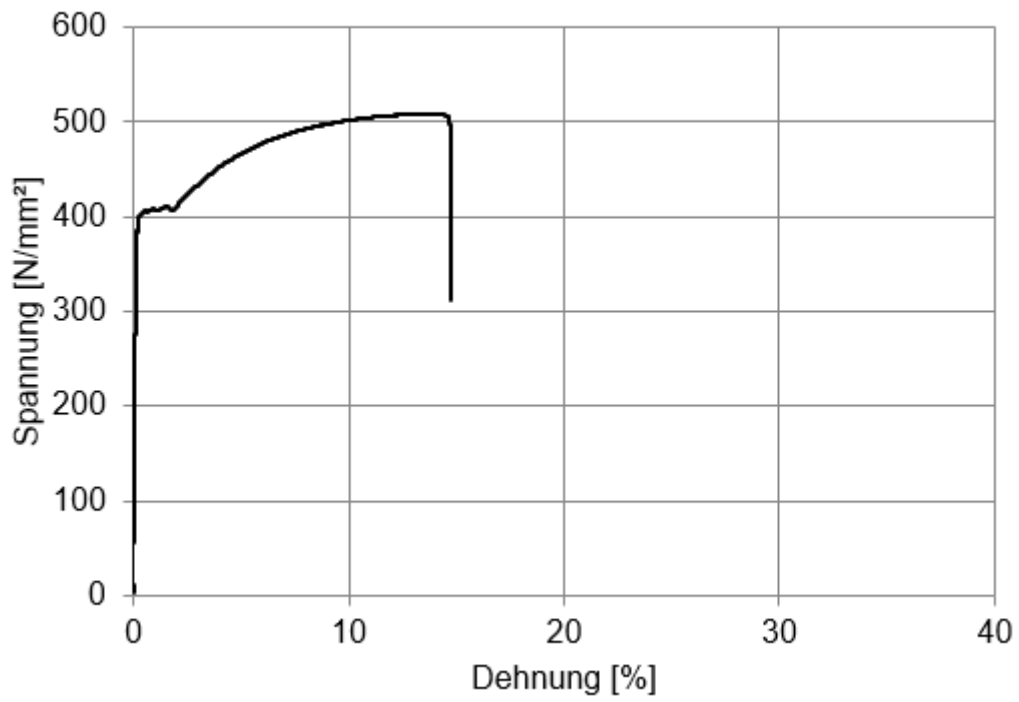
Probe 30



a = 5,10mm

b = 7,80mm

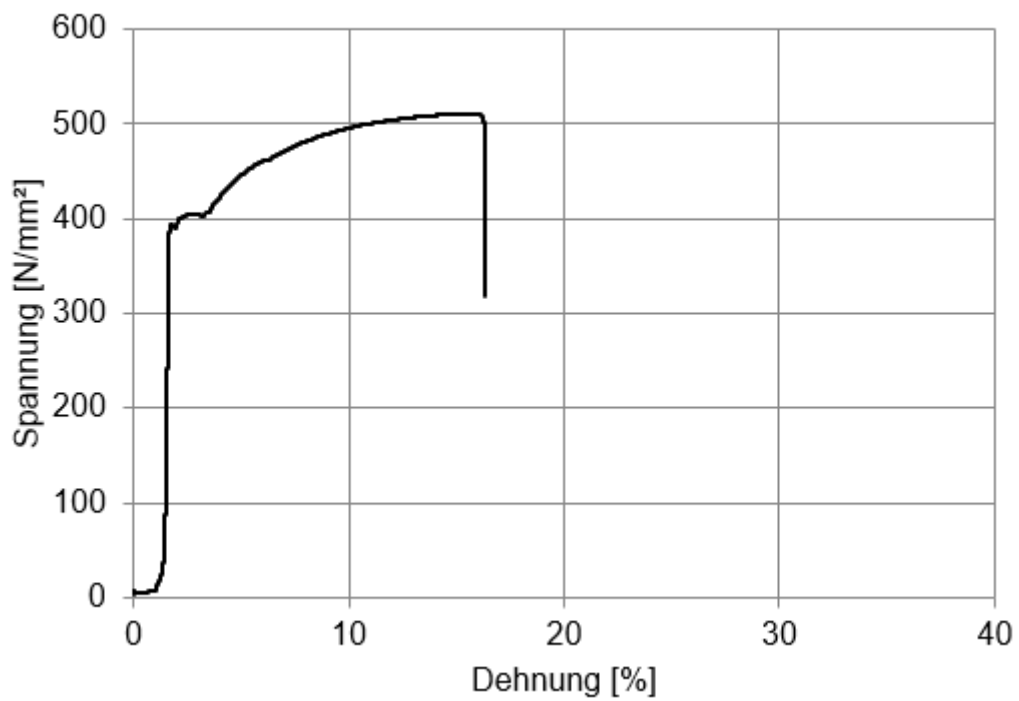
Probe 31



a = 5,10mm

b = 7,80mm

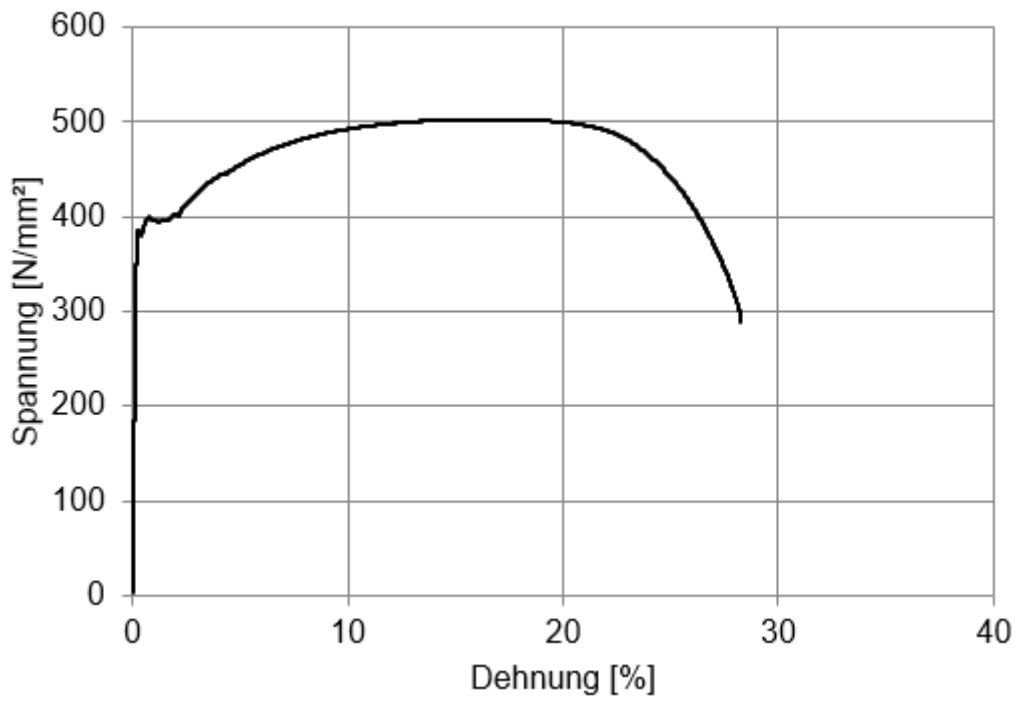
Probe 32



a_{max} = 5,10mm

b = 7,50mm

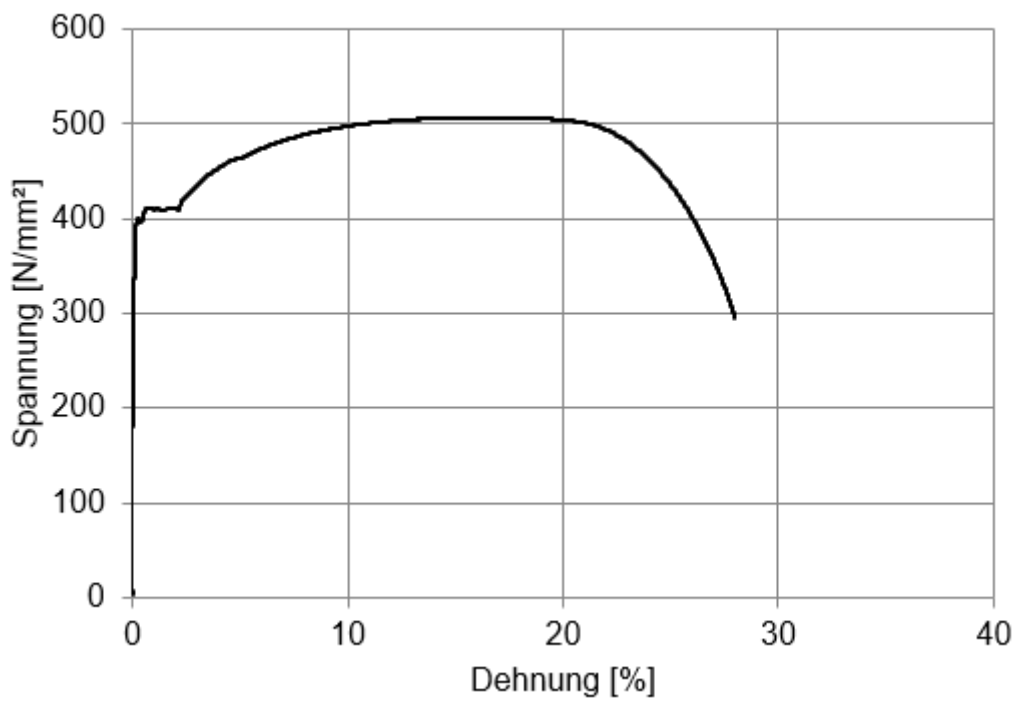
Probe 33



a = 5,00mm

b = 7,70mm

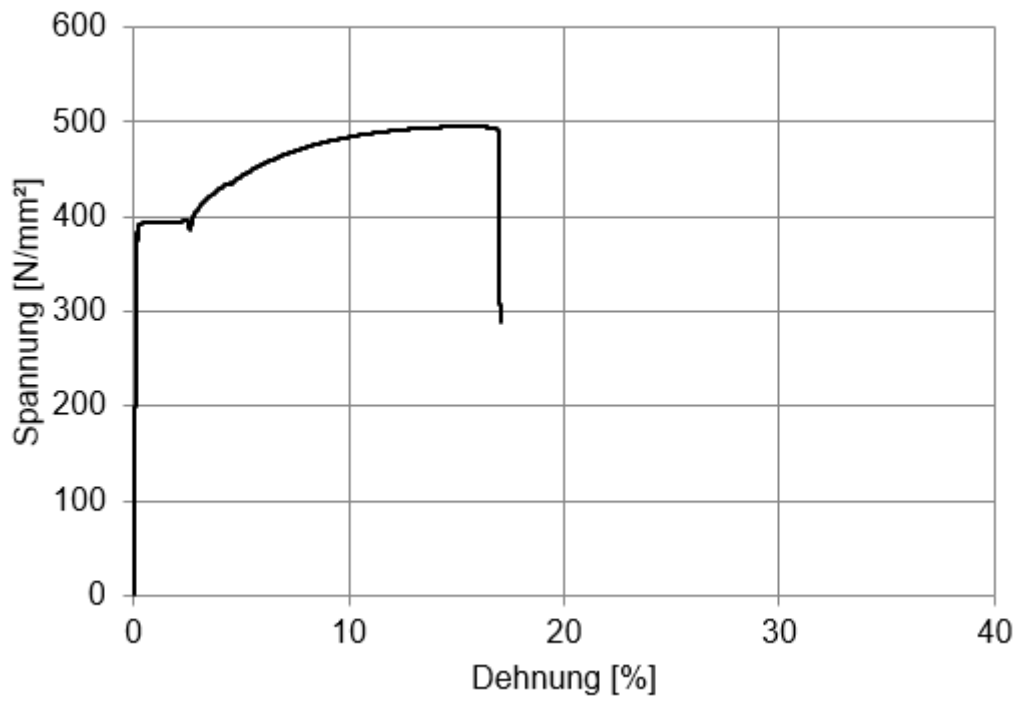
Probe 34



a = 5,20mm

b = 7,00mm

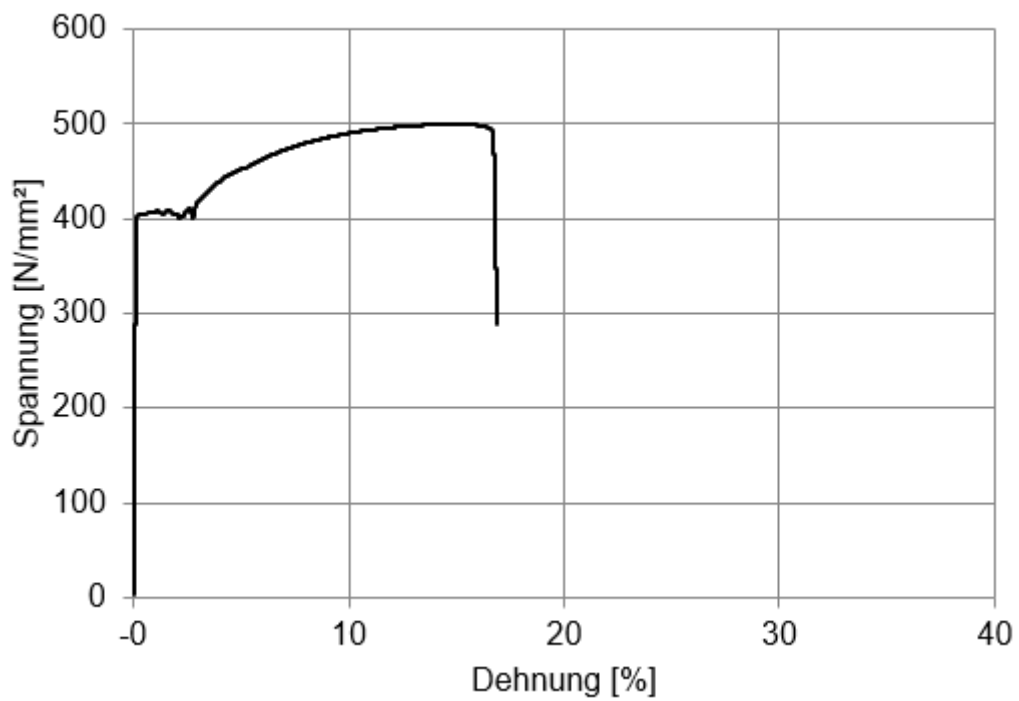
Probe 35



a = 7,55mm

b = 7,40mm

Probe 36



a = 6,50mm

b = 7,10mm

Anhang C Datenblätter Schweißdraht

Normbezeichnungen				
EN ISO 14341-A	EN ISO 14341-A	EN ISO 14341-B	AWS A5.18	AWS A5.18M
G3Si1 (Draht)	G 42 4 M21 3Si1	G 49A 4U M21 S6	ER70S-6	ER48S-6
	G 42 4 C1 3Si1	G 49A 4U C1 S6		

Eigenschaften und Anwendungsgebiete

Verkupferte Drahtelektrode mit weitgehend spritzerfreiem Werkstoffübergang unter Mischgasen und CO₂. Geeignet für Verbindungsschweißungen im Kessel-, Behälter- und Konstruktionsbau. Wegen der hohen Strombelastbarkeit besonders für Dickblechschweißungen geeignet. Als unverkupferte Variante EMK 6 / TOP lieferbar mit optimierten Fördereigenschaften bei hohen Drahtvorschubgeschwindigkeiten speziell für automatisierte Schweißungen.

Grundwerkstoffe

Stähle bis zu einer Streckgrenze von 420 MPa (60 ksi)
 S235JR-S355JR, S235JO-S355JO, S235J2-S355J2, S275N-S420N, S275M-S420M, P235GH-P355GH, P275NL1-P355NL1, P215NL, P265NL, P355N, P285NH-P420NH, P195TR1-P265TR1, P195TR2-P265TR2, P195GH-P265GH, L245NB-L415NB, L245MB-L415MB, GE200-GE240, Schiffbaustähle: A, B, D, E, A 32-E 36
 ASTM A 106 Gr. A, B, C; A 181 Gr. 60, 70; A 283 Gr. A, C; A 285 Gr. A, B, C; A 350 Gr. LF1; A 414 Gr. A, B, C, D, E, F, G; A 501 Gr. B; A 513 Gr. 1018; A 516 Gr. 55, 60, 65, 70; A 573 Gr. 58, 65, 70; A 588 Gr. A, B; A 633 Gr. C; A 662 Gr. B; A 711 Gr. 1013; A 841 Gr. A; API 5 L Gr. B, X42, X52, X56, X60

Richtanalyse des Massivdrahtes (Gew.-%)

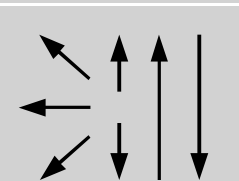
	C	Si	Mn
Gew.-%	0,08	0,9	1,45

Mechanische Gütewerte des Schweißgutes

Zustand	Streckgrenze R _e	Zugfestigkeit R _m	Dehnung A (L ₀ =5d ₀)	Kerbschlagarbeit ISO-V KV J	
				+20 °C	-40 °C
u	440 (≥ 420)	560 (≥ 500 – 640)	30 (≥ 20)	160	80 (> 47)
u2	440 (≥ 420)	540 (≥ 500 – 640)	29 (≥ 20)	120	50 (≥ 47)
s	380	490	30	160	

u unbehandelt, Schweißzustand – Schutzgas Ar + 15 – 25 % CO₂
 u2 unbehandelt, Schweißzustand – Schutzgas 100 % CO₂
 s spannungsarmgeglüht, 600 °C / 2 h – Schutzgas Ar + 15 – 25 % CO₂

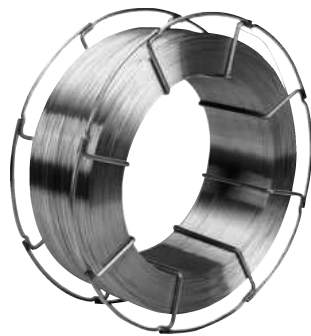
Verarbeitungshinweise

	Stromart DC (+)	Schutzgase: Argon + 15 – 25 % CO ₂ 100 % CO ₂	ø (mm)
			0,8
			1,0
			1,2
			1,6

Zulassungen

TÜV (3036.), DB (42.014.11), ABS (3SA, 3YSA), CWB (X), DNV (III YMS), GL (3YS), LR (3S, 3YS H15, CE)

SCHUTZGAS-SCHWEISSDRAHT



Dieses Produkt ist nur über unsere Verkaufsniederlassung erhältlich.

Adapter für Korbspule K 300
mit einem Innendurchmesser von 180 mm

Art.-Nr. 0982 01
VE/St. 1



Ø mm ²	Lage-gespult	Spule kg	Spulenart	Art.-Nr.	VE/St.
0,8	ja	15	Korbspule	0982 008 01	15
1,0	ja	15	Korbspule	0982 010 01	15
1,2	ja	15	Korbspule	0982 012 01	15

Ø mm ²	Lage-gespult	Spule kg	Spulenart	Art.-Nr.	VE/St.
0,8	ja	15	Korbspule	0982 008 13	15
1,0	ja	15	Korbspule	0982 010 13	15
1,2	ja	15	Korbspule	0982 012 013	15

Werkstoffe für SG 2 und SG 3

Baustähle	DIN 17100 St 33 – St 52.3
Rohrstähle	DIN 1629 St 35 – St 55; St 35.4 – St 55.4
Rohrstähle (warmfest)	DIN 17175 St 35.8; St 45.8
Kesselbleche	SEL HIV, 19 Mn5
Schiffbaustähle	SEL A-E, A32-E32, A36-E36
Feinkornbaustähle	DIN 17102 St.E 255 – St.E 380
Stahlguss	DIN 1681 GS-38 bis GS-52

Ø mm ²	Lage-gespult	Spule kg	Spulenart	Art.-Nr.	VE/St.
1,0	ja	7	Korbspule	0982 020 10	7
1,2	ja	7	Korbspule	0982 020 12	7

Anwendungsbereiche	Grundwerkstoffe
Universell für nahezu alle Aluminium- und Gusslegierungen mit Mg als Hauptlegierungsbestandteil geeignet. * Achtung: Nicht anwendbar bei Reinaluminium. S-AlMg5-Schweißnähte können nicht eloxiert werden. Nicht anwendbar, wenn z. B. durch Bauvorschriften die Verwendung eines Drahtes anderer Legierung festgelegt ist. AlMg3 für eloxierte Schweißnähte.	AlMg5 / AlMg3* AlMgMn / AlZn4,5 Mg1, AlMgSi1 / G-AlMg3 A-AlMg3Si G-AlMg5 / G-AlMg5Si G-AlMg10 G-AlMg3Cu / AlMgSi1

Ø mm ²	Lage-gespult	Spule kg	Spulenart	Art.-Nr.	VE/kg
0,8	ja	12,5	Korbspule	0982 030 08	12,5
1,0	ja	15	Korbspule	0982 030 10	15

Anwendungsbereiche	Grundwerkstoffe
Geeignet für Verbindungsschweißungen an nebenstehenden oder ähnlich legierten Grundwerkstoffen. Bei Nasskorrosion: Höchste Betriebstemperatur +400 °C. Hitze- und zunderbeständig bis ca. +800 °C.	1.4401, 1.4404, 1.4408, 1.4410, 1.4435, 1.4436, 1.4571, 1.4573, 1.4580, 1.4581, 1.4583

	SG 2		SG 3		Edelstahl SG X2 CrNiMo1912/1.4430	Aluminium SG AlMg5
Schutzgas (DIN 32526)	CO ₂	Mischgas	CO ₂	Mischgas	Argon	Argon
Streckgrenze (N/mm ²)	> 420	> 450	> 460	> 495	> 350	> 120
Zugfestigkeit (N/mm ²)	> 520	> 570	> 560	> 590	> 600	> 220
Dehnung A 5%	> 25	> 25	28	28	> 30	16

Schweißdraht für Stahl

DIN 8559 – SG 2

EN 440: G 3 Si1

verkupfert

- Werkstoffnummer: 1.5125
- Lagegespult

DIN 8559 – SG 3

EN 440: G 4 Si1

verkupfert

- Werkstoffnummer: 1.5130
- Lagegespult
- Passende Schutzgase
82% Argon
18% CO₂

Schweißdraht für Aluminium

DIN 1732: S-Al-Mg5

- Werkstoffnummer: 3.3556

- Für Verschweißungen an Aluminium-Legierungen.

- Passendes Schutzgas
100% Argon

Schweißdraht für Edelstahl

DIN 8556

SG X2 CrNiMo 1912

- Werkstoffnummer: 1.4430

- Passende Schutzgase
98% Argon, 2% CO₂

Technische Daten

Gütwerte des reinen Schweißgutes (Richtwerte)