

# **Abschlussbericht**

Forschungsvorhaben: 03LB2022B

Verbundvorhaben: SmartWeld - Innovatives Design- und Fertigungskonzept zur Steigerung der Leichtbaupotenziale im Stahlbau

**Teilvorhaben: Industrielle Fertigung von Rohrknotten durch robotergeführte Schweißsysteme**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor  
Duisburg, 02.09.2025

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation .....	6
2	Projektziele und Aufgaben .....	7
3	Stand der Technik .....	8
4	Fertigung von Rohrknotten im industriellen Maßstab .....	9
4.1	Erfassung der Fertigungsbedingungen .....	9
4.2	Fertigungskonzept für das robotergestützte Schweißen .....	10
4.2.1	Schweißnahtvorbereitung .....	11
4.2.2	Schweißlagenaufbaustrategie .....	13
4.2.3	Erstellung der Robotertrajektorie .....	19
4.3	Fertigung von Rohrknotten im Maßstab 1:1 .....	21
4.3.1	Testschweißungen .....	21
4.3.2	Fertigung von Knoten für die Ermüdungsprüfung .....	25
4.4	Fertigung von Rohrknotten im Maßstab 1:1,5 .....	30
4.5	Zusammenfassende Betrachtung der robotergestützten Fertigung von Rohrknotten unterschiedlicher Geometrie .....	34
4.6	Manuelle Fertigung von Rohrknotten .....	35
4.7	Zusammenfassung .....	37
5	Literaturverzeichnis .....	38

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Jacketstruktur mit exemplarischer Darstellung von X- (oben) und K Knoten (unten) .....	7
Bild 2: Darstellung der Geometrie der zu fertigenden Rohrknoten; Maßstab 1:1,5 (links) und Maßstab 1:1 (rechts), Strebenanstellwinkel jeweils 45° .....	8
Bild 3: LabVIEW Bedienoberfläche .....	10
Bild 4: Schweißanlage für die automatisierte Fertigung von Rohrknoten .....	10
Bild 5: Darstellung der Schweißnahtvorbereitung und Schweißnahtgeometrievorgaben; Auszug aus DNVGL-RPC203 [9] für beidseitig geschweißte Anschlüsse .....	12
Bild 6: Maßstabsunabhängig Darstellung der Schweißnahtgeometrie mit den unterschiedlichen Nahtvorbereitungen entlang der Rohrumfangs .....	12
Bild 7: Darstellung der Schweißnahtvorbereitung inkl. der Stützstellen entlang des Rohrumfangs (a und b), Aufteilung der Schweißnaht in Fülllagen und Decklagen (c, d) .....	14
Bild 8: Darstellung des Konzeptes zum adaptiven Schweißen von Rohrknoten .....	15
Bild 9: Exemplarischer Lagenaufbau für den Fülllagenbereich (Bild 7) .....	16
Bild 10: Exemplarisches Ergebnis einer Schweißparameterberechnung (hier: $v_s$ und $P_B$ ) für den Fülllagenbereich .....	16
Bild 11: Schweißversuche an ebenen Ersatzgeometrien zur Bestimmung des nutzbaren Schweißparameterfeldes und der korrespondierenden Schweißprozessstabilität und Schweißnahtqualität .....	17
Bild 12: Exemplarische Darstellung des Schweißlagenaufbaus ohne (a) und mit Optimierungsraupen (B, c) sowie der Darstellung des Schweißnahtöffnungswinkels am Bereich Schweißnaht zu Gurtrohr .....	19
Bild 13: Bewegung des Knotens durch den Manipulator während des Schweißens von Rohrknoten im Maßstab 1:1 .....	19
Bild 14: Softwaretool zur Erstellung der Roboter- und Manipulatorbewegung basierend auf den idealen geometrischen Daten (CAD Model) der Knoten .....	20
Bild 15: HDR Kamera Livebild als Hilfsmittel bei der korrekten Positionierung des TCP (Schweißdrahtposition) in der Schweißfuge .....	21
Bild 16: Testschweißungen an einem Knoten im Maßstab 1:1 mit Darstellung der Schweißnahtgeometrie und Stützstellen .....	21
Bild 17: Exemplarische Darstellung der Flächenänderungen und damit des Füllvolumens in der Schweißnaht an unterschiedlichen Stützstellen .....	22
Bild 18: Exemplarische Darstellung der Schweißparameter Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschung für unterschiedliche einraupige Lagen an den Stützstellen des Bereichs 1 (Fülllagenbereich) .....	22
Bild 19: Auswertung des Lagenaufbaus und der Schweißnahtgeometrie hinsichtlich der Vorgaben aus [9] an unterschiedlichen Bereichen des zweiten Testknotens (Maßstab 1:1) .....	23
Bild 20: Veränderung des Schweißnahtöffnungswinkels durch zusätzliche Optimierungsraupen, Exemplarisch für Stützstelle 14 a), an allen Stützstellen b) und Zuordnung der Messpositionen c) .....	24
Bild 21: Querschliff und Härtewerte nach [28] entnommen aus Testknoten 2 .....	25

Bild 22: Lagenaufbau für den Knoten im Maßstab 1:1, die Optimierungsraupen konnten aufgrund von Kollisionsgefahr nicht bis in den Kehlnahtbereich ausgeführt werden	28
Bild 23: Fertigung des Knotens 3 (von 3) im Maßstab 1:1 (oben), Geometrie der Schweißnaht inkl. Darstellung der Optimierungsraupen (unten).....	29
Bild 24: Verlängerungen von Gurt- und Strebrohre (manuelle schweißtechnische Fertigung) .....	30
Bild 25: Lagenaufbau für den Knoten im Maßstab 1:1,5, die Optimierungsraupen konnten aufgrund von Kollisionsgefahr nicht bis in den Kehlnahtbereich ausgeführt werden.....	32
Bild 26: Fertigung eines Knotens im Maßstab 1:1.5 sowie die resultierende Schweißnahtgeometrie .....	33
Bild 27: Veränderung des Schweißnahtöffnungswinkels durch zusätzliche Optimierungsraupen, Exemplarisch und Zuordnung der Messpositionen .....	34
Bild 28: Vergleich der Fertigungszeiten nach dem Zusammenbau und der Wurzellage zwischen dem manuellen und dem automatisierten Schweißen von Knoten im Maßstab 1:1.....	35
Bild 29: Fertigung manuelle Fertigung von KLnoten im Maßstab 1:1,5 mit zugehöriger Schweißnahtgeometrieausbildung.....	36

## Abkürzungsverzeichnis

$v_s$ : Schweißgeschwindigkeit

$P_B$ : Pendelbreite

$P_F$ : Pendelfrequenz

$v_D$ : Drahtvorschubgeschwindigkeit

OWEA: Offshore-Windenergieanlagen

BAM: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

## 1 Einleitung und Motivation

Die schweißtechnische Fertigung großskaliger Strukturen aus Stahl ist für Unternehmen aufgrund des hohen manuellen Arbeitsanteils von einer Vielzahl an Herausforderungen geprägt. Ziel von „SmartWeld“ ist es daher, für die schweißtechnische Fertigung von Stahlbaustrukturen exemplarisch am Beispiel von Hohlprofilknoten, welche als designrelevante Elemente von Gründungsstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) einsetzbar sind, die Möglichkeiten des Leichtbaus unter konsequenter Digitalisierung der Fertigungskette aufzuzeigen, um einerseits die Ressourceneffizienz zu forcieren und gleichzeitig wettbewerbsfähige Fertigungsstrategien aufzuzeigen. Bezogen auf das Erneuerbare-Energien-Gesetz [1] der Bundesregierung kommt der Offshore-Windenergie mit einer bis 2030 noch zu installierenden Leistung von >10 GW eine besondere Bedeutung auf dem Weg zu einer klimaneutralen Industrie zu. Die zugehörigen Einsparpotenziale an Ressourcen respektive CO<sub>2</sub>-Äquivalent durch Leichtbau sind hinsichtlich einer zu verbauender Stahltonnage von > 2 Mio. t signifikant. Innerhalb von „SmartWeld“ werden daher die Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Fertigung von Leichtbau-Gründungsstrukturen am Beispiel aufgelöster Tragstrukturen (Jackets, siehe Bild 1) aufgezeigt, welche über ein 20 %-30 % geringeres Gewicht gegenüber alternativen Konzepten verfügen [2], [3]. Eine lastgerechte Auslegung der Schweißverbindungen nach bionischen Prinzipien ermöglicht, weitere Einsparpotenziale an Ressourcen bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer zu erschließen.

Die Ausnutzung konstruktiver Prinzipien des Leichtbaus zur Erzeugung innovativer und ressourcenschonender Produkte erfordert den Einsatz digitaler Werkzeuge in der Designphase, der virtuellen Absicherung, der Fertigung und Qualitätsüberwachung sowie nachgelagerten Bauteilprüfung zur Abbildung der Nutzungsphase. Im Verbundprojekt wird der gesamte Produktentstehungs- und Prüfprozess betrachtet. Dies beinhaltet das Design im Kontext des konstruktiven Leichtbaus, den schweißtechnischen Fertigungsprozess, die Bauteilprüfung sowie den Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch serientaugliche Demonstratoren.

Die zunehmende Forderung von Windparkbetreibern nach ressourcenschonenden und langlebigen Gründungen wird zukünftig dazu führen, dass auch an die Lieferanten von einzelnen Bauteilen für Jackets - wie z.B. Jacketknoten (Bild 1) - erhöhte Anforderungen an die Schweißnahtgeometrie gestellt werden. Diese können wirtschaftlich nur durch eine zunehmende Automatisierung realisiert werden. Der Fokus der Arbeiten dieses Teilprojektes ist daher, die Fertigung auch im Umfeld eines für großskalige Stahlstrukturen üblichen hohen Individualisierungsgrades schweißtechnisch zu automatisieren. Die Vorgaben aus der Designphase hinsichtlich einer lastgerechten Gestaltung bzw. Implementierung bionischer Ansätze sollen gezielt durch einen adaptiven, automatisierten Schweißprozess eingestellt werden. Dies soll zu einer Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit und damit einem geringeren Materialeinsatz und geringeren Bauteilgewichten führen.

Das Verbundprojekt „SmartWeld“ und insbesondere das Teilprojekt „Industrielle Fertigung von Rohrknoten durch robotergeführte Schweißsysteme“ ermöglicht somit Leichtbaupotenziale im Stahlbau sowie verwandten Branchen nutzbar zu machen und

automatisierte Fertigungskonzepte effizient für Herstellung von großskaligen Bauteilen zu optimieren und effizient zu nutzen.

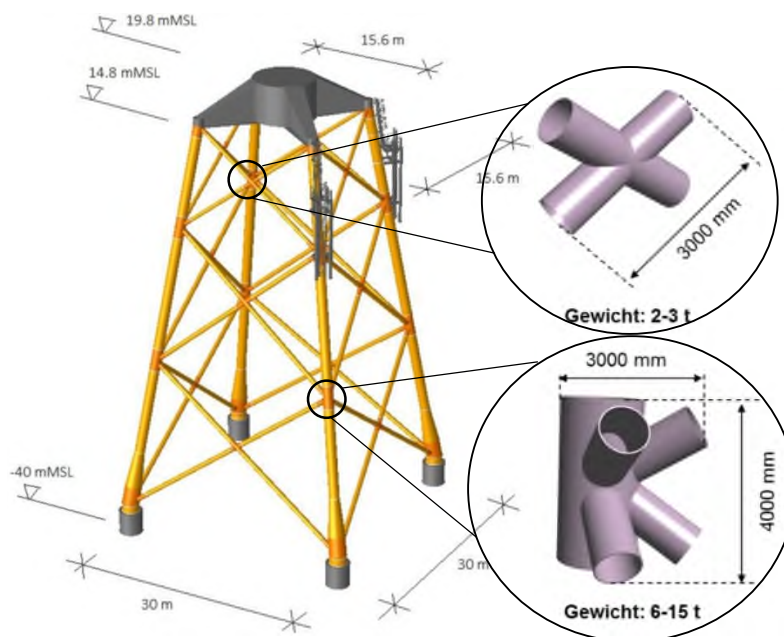


Bild 1: Jacketstruktur mit exemplarischer Darstellung von X- (oben) und K Knoten (unten)

## 2 Projektziele und Aufgaben

Um die Wettbewerbsfähigkeit des Jackets gegenüber anderen Gründungsstrukturen zu steigern, steht die Optimierung der aufwändigen und kostenintensive Fertigung der Hohlprofilknoten zunehmend im Fokus von Entwicklungsarbeiten. Hierfür ist eine Umstellung von der bisher manuellen Einzelfertigung auf eine automatisierte Serienfertigung erforderlich. Darüber hinaus bieten automatisierte Fertigungsprozeduren grundsätzlich die Möglichkeit, die Schweißnahtgeometrien gezielt und reproduzierbar zu modifizieren. Zu erwarten ist, dass dadurch optimierte Schweißnahtöffnungswinkel und Kerbradien erreicht werden, wodurch die realen Ermüdungseigenschaften der Rohrknöten verbessert werden können. Dies kann prinzipiell zu einem geringeren Materialeinsatz und damit zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emission bei gleicher oder erhöhter Lebensdauer der Jacketstruktur führen.

Ziel dieses Teilvorhabens ist es daher, ein Konzept für eine automatisierte schweißtechnische Fertigung auf Basis der vorliegenden Roboterschweißtechnik der Firma IGM Robotersystem zu entwickeln und für die Herstellung von Rohrknöten mit optimierter Schweißnahtgeometrie (Schweißnahtanstiegswinkel) zu nutzen. Dieses Konzept soll eine Vernetzung der Fertigungssysteme sowie eine Erfassung von Fertigungsrandbedingungen und Schweißnahtgeometrien beinhalten. Darüber hinaus sind die Vorgaben aus dem Teilprojekt der TU Hannover [4] hinsichtlich der geometrischen Ausprägung der Schweißnaht bei der Fertigung zu berücksichtigen. Basierend auf den entwickelten Fertigungskonzept sollen 15 Rohrknöten im Maßstab 1 zu 1,5 und 3 Rohrknöten im Maßstab 1 zu 1 im industriellen Umfeld automatisiert gefertigt werden. Die geometrischen Abmessungen der zu fertigen Rohrknöten sind in Bild 2 wiedergegeben. Um

einen Vergleich mit den bestehenden Fertigungsmöglichkeiten im Jacketbau zu erreichen, werden zusätzlich acht Knoten im manuellen Fertigungsprozess und ohne Optimierung der Schweißnahtgeometrie im Maßstab 1 zu 1,5 hergestellt.

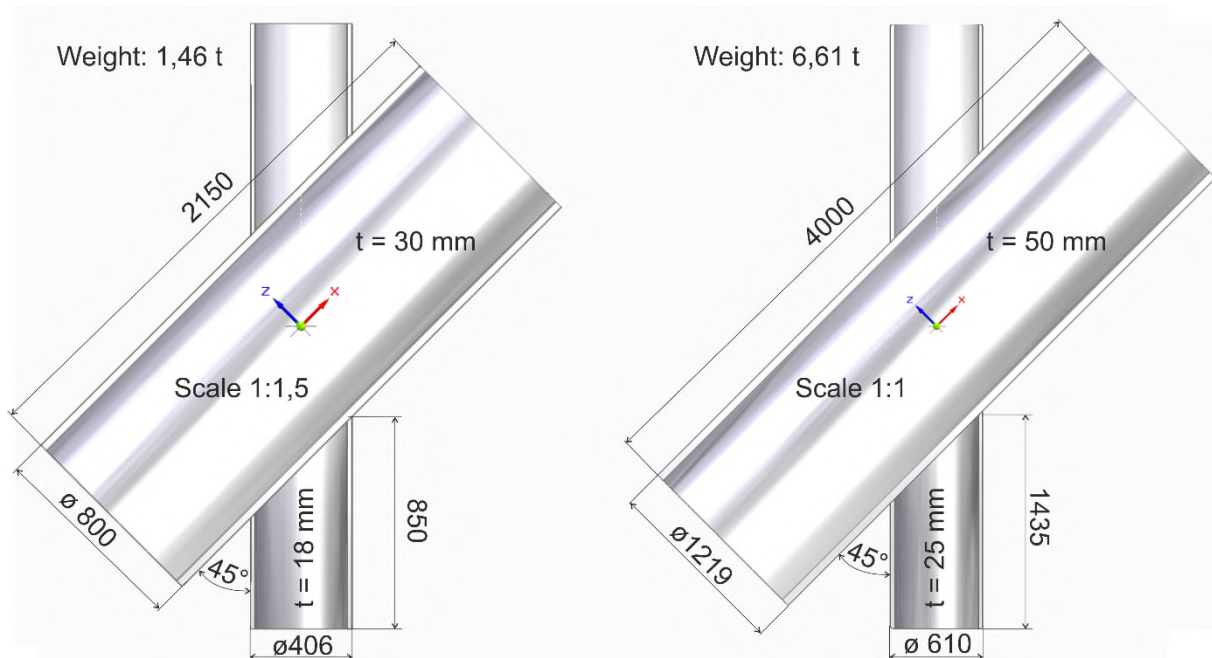


Bild 2: Darstellung der Geometrie der zu fertigenden Rohrknöten; Maßstab 1:1,5 (links) und Maßstab 1:1 (rechts), Strebenanstellwinkel jeweils 45°

### 3 Stand der Technik

Bei geschweißten Konstruktionen, welche einer hohen schwingenden Beanspruchung ausgesetzt sind, stellt die Schweißnahtgeometrie einen maßgeblichen Einflussfaktor auf die Lebensdauer dar [4]-[8]. Nach aktuellen Regelwerken [9], [10] erfolgt der Ermüdungsnachweis von Hohlprofilkonstruktionen nach dem Strukturspannungskonzept (SSK). Jedoch zeigt das SSK auch Anwendungsgrenzen auf, da die Geometrie der Schweißnaht nicht bzw. unzureichend in die Bestimmung des Spannungskonzentrationsfaktors (SCF) eingeht [11]. Somit wird der positive Effekt einer automatisierten Fertigung auf die Nahtgeometrie im Nachweis nach SSK nicht berücksichtigt. Im Gegensatz zum SSK wird beim Kerbspannungskonzept (KSK) der Einfluss der Kerbe auf die Ermüdungsfestigkeit in Form der Kerbformzahl, welche nach den IIW-Empfehlungen [12] abgeleitet wird, bestimmt. Streng genommen gelten die Grundlagen des KSK bis zum Zeitpunkt des technischen Anrisses.

Die darauffolgende Phase der Rissausbreitung wird durch die Methoden der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM) erfasst. Durch Kombination des KSK mit LEBM ergibt sich die Gesamtlebensdauer aus der Summe der Rissinitiierungsphase und der Rissfortschrittsphase. Dies ermöglicht die Berechnung bis zum Wanddurchriss, welches das Versagenskriterium des SSK darstellt. Neueste Entwicklungen in der Ermüdungsfestigkeitsforschung greifen die Digitalisierungsmöglichkeiten bei der automatisierten Fertigung mit integrierter Qualitätskontrolle auf. Die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Stahlverbindungen wird hierbei nicht mehr nur auf Basis approximierter

Ersatzmodelle bestimmt, sondern mit Hilfe von Modellen, die auf der Realgeometrie des zu analysierenden Bauteils basieren [13], [14]. Die Berücksichtigung der realen Schweißnahtgeometrie ermöglicht genauere Lebensdauerberechnungen, sowohl beim KSK als auch bei der Anwendung der LEBM. Jedoch müssen hierfür die bestehenden Ermüdungskonzepte weiterentwickelt und bisherige Arbeiten erweitert werden [15], [16].

Die in den aktuellen Normen verankerte Strukturspannungswöhlerlinie geht auf den OTH-Bericht 92 390 [18] zurück. Hierfür wurden jedoch lediglich Ermüdungsversuche an dünnwandigen Hohlprofilknoten ausgewertet. Daher wurden in den letzten 20 Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten Versuche mit dickwandigen Hohlprofilknoten durchgeführt [18]-[23]. In diesen Projekten wurden jedoch ausschließlich manuell geschweißte Hohlprofilknoten untersucht. Die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit automatisiert geschweißter Hohlprofilknoten erfolgte bislang im JABACO-Projekt des europäischen Research Fund for Coal and Steel an neun automatisiert geschweißten Knoten [24], sowie an einem weiteren Knoten in einem dänischen Forschungsprojekt am LCST (Lindø Component and Structure Testing A/S) [25]. Des Weiteren wurde die Datenbasis mit Hilfe des Forschungsprojektes FATInWeld des IfS und der BAM durch 32 weitere Ermüdungsversuche an automatisiert geschweißten Hohlprofilknoten im Maßstab 1:3,3 erweitert. Im Carbon Trust Project „JACO“ [26], bei dem die wichtigsten europäischen Windparkbetreiber und Jacketbauer vertreten sind, wird die Ermüdungsfestigkeit von automatisch geschweißten Knoten einer Knotengeometrie im Maßstab 1:1 analysiert und bezüglich der aktuellen DNVGL Vorgaben für Wöhlerlinien von Knoten ausgewertet. Die Fertigung der Rohrknöten erfolgt ausschließlich nach den gültigen Normvorgaben und beinhaltet weder eine Optimierung der Schweißnahtgeometrie oder des Schweißprozesses noch die Bewertung von Gewichtseinsparpotenzialen. Da dieses Projekt weitestgehend durch die beteiligten Industriepartner finanziert wird, stehen die Ergebnisse ausschließlich den Projektpartnern zur Verfügung.

Das Forschungsprojekt SmartWeld hat das Ziel, die Datenbasis großskaliger automatisiert geschweißter Hohlprofilknoten weiter zu erhöhen und im Zuge einer innovativen und automatisierten Prozess- und Fertigungskette eine ressourcenschonende und ökonomische Herstellung im Sinne des Leichtbaus zu ermöglichen.

## **4 Fertigung von Rohrknöten im industriellen Maßstab**

### **4.1 Erfassung der Fertigungsbedingungen**

Um die Fertigungsbedingungen der Rohrknöten kontrollieren und bewerten zu können, wurde zunächst mittels der Software LabVIEW ein Programm erstellt, welches eine simultane Erfassung der Mess- (Laserscanner), Schweiß- (Stromquelle) und Roboterbewegungsdaten (Roboteranlage) im Schweiß-/Messprozess orts aufgelöst gewährleistet, Bild 3. Für die Speicherung dieser Daten wurde eine ordnerbasierte Datenbank erstellt.

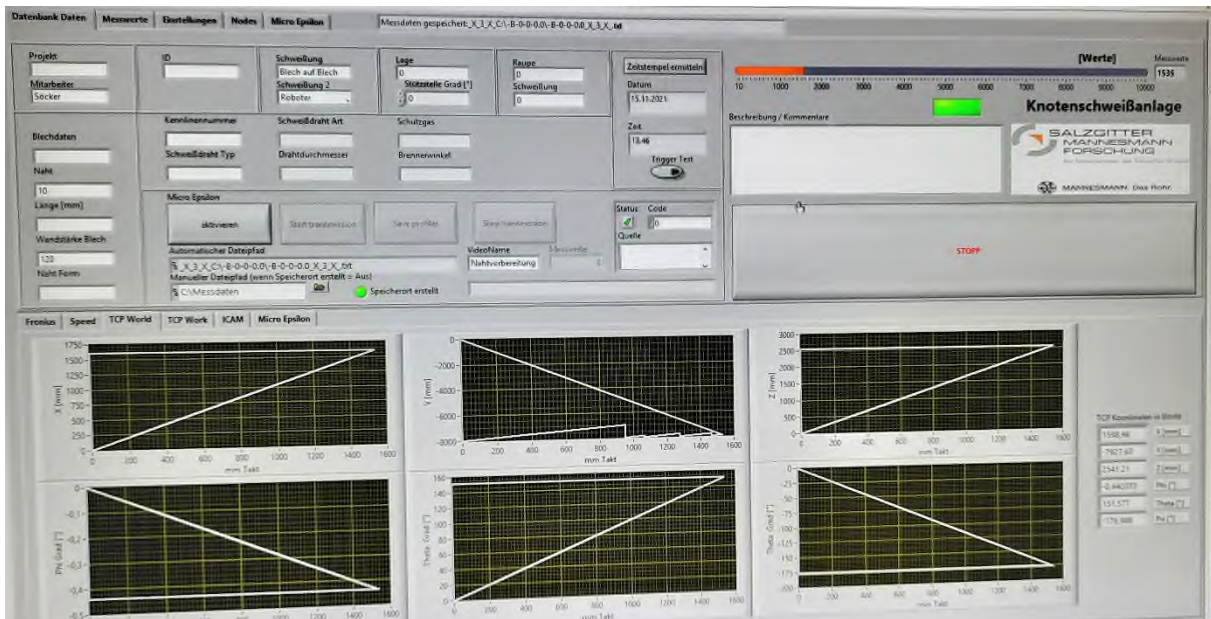


Bild 3: LabVIEW Bedienoberfläche

## 4.2 Fertigungskonzept für das robotergestützte Schweißen

Als Grundlage für das zu entwickelnde industrielle Fertigungskonzept für Rohrknotten dient die Roboterschweißanlage der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, siehe Bild 4. Der Rohrknotten wird dabei stetig in die Wannenlage gedreht, sodass eine ungünstige Schweißpositionen vermieden werden und hohe Abschmelzraten bei reduzierten Fehlerarten erreicht werden können. Die Schweißungen erfolgen wie im Jacketbau üblich im MSG-Eindraht-Schweißprozess unter Nutzung des MSG-Pulsprozess.



Bild 4: Schweißanlage für die automatisierte Fertigung von Rohrknotten

Im Rahmen dieses Teilprojektes sind Rohrknoten mit zwei unterschiedlichen Geometrien zu fertigen, die die realen Jacket-Knoten im Maßstab 1:1,5 und 1:1 abbilden, siehe Bild 2.

Um ein effizientes Fertigungskonzept zu gewährleisten, sind folgende Parameter auf die Randbedingungen einer robotergeführten Schweißung basierend auf der in Bild 4 gezeigten Roboterschweißanlage abzustimmen:

1. Schweißnahtvorbereitung
2. Schweißlagenaufbaustrategie
3. Robotertrajektorie

Die Entwicklung der Schweißlagenaufbaustrategie fand in enger Abstimmung mit dem Projektpartner BAM statt, siehe [27].

#### 4.2.1 Schweißnahtvorbereitung

Entscheidend für den Aufbau des Fertigungskonzeptes ist die durch die Geometrie der Knoten entstehende Schweißnahtvorbereitung, da diese das Füllvolumen und damit dem Schweißlagenaufbau definiert. Demzufolge wurde zunächst eine Schweißnahtvorbereitung so modifiziert, dass eine dem Roboterschweißen förderliche Geometrie gewährleistet ist und gültige Spezifikationen [9] berücksichtigt werden. Zu beachten ist dabei, dass die Geometrie der Schweißnahtvorbereitung wesentlich durch die Anstellwinkel zwischen Gurtrohr und Strebenrohr sowie durch die Rohrdurchmesser von Gurt und Strebe bestimmt wird, Bild 5. Da die Fertigungsrandbedingungen, die sich aus der Knotengeometrie aufgrund der Skalierung ergeben, für beide Knotentypen vergleichbar sind, kann eine identische Schweißnahtvorbereitung genutzt werden.

Die Spezifikation DNVGL-RPC203 [9] gibt für definierte Strebenanstellwinkel zwischen Gurt und Strebe generelle Vorgaben für die Schweißnahtvorbereitung. Diese Vorgaben wurden in Absprache mit qualifizierten Zuschnittunternehmen und Jacketfertigern dahingehend modifiziert, dass über den Rohrumfang der Strebe ein möglichst konstantes Schweißnahtvolumen und eine optimierte Schweißbrennerzugänglichkeit erreicht wird. Ein konstantes Schweißnahtvolumen reduziert die erforderliche lokale Anpassung der Schweißparameter signifikant. Als vorteilhaft hat sich dabei eine über dem Umfang der Strebe konstante Nahtvorbereitung mit einem Öffnungswinkel von 45° erwiesen. Die für beide Knotentypen genutzte Schweißnahtvorbereitung ist in Bild 6 gezeigt. Unter Anwendung von [9] ist bei einem Strebenanstellwinkel von 45° die Schweißnahtvorbereitung in drei Bereiche unterteilt:

1. V Naht mit einem Nahtöffnungswinkel von 45°,
2. Übergangsbereich mit einem abnehmenden Schweißvolumen und einem Nahtöffnungswinkel von 45° und
3. Kehlnahtbereich mit einem Öffnungswinkel von 45°.

- Type 6 (TJ): Tubular joint welds made from both sides. Exemplarily the weld execution is shown below.

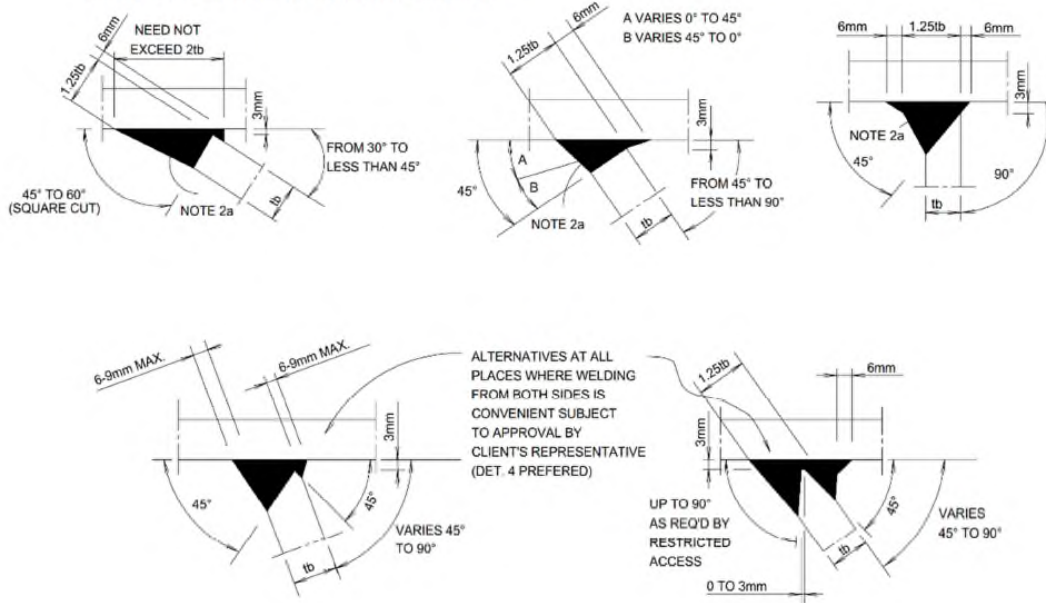


Bild 5: Darstellung der Schweißnahtvorbereitung und Schweißnahtgeometrievorgaben; Auszug aus DNVGL-RPC203 [9] für beidseitig geschweißte Anschlüsse

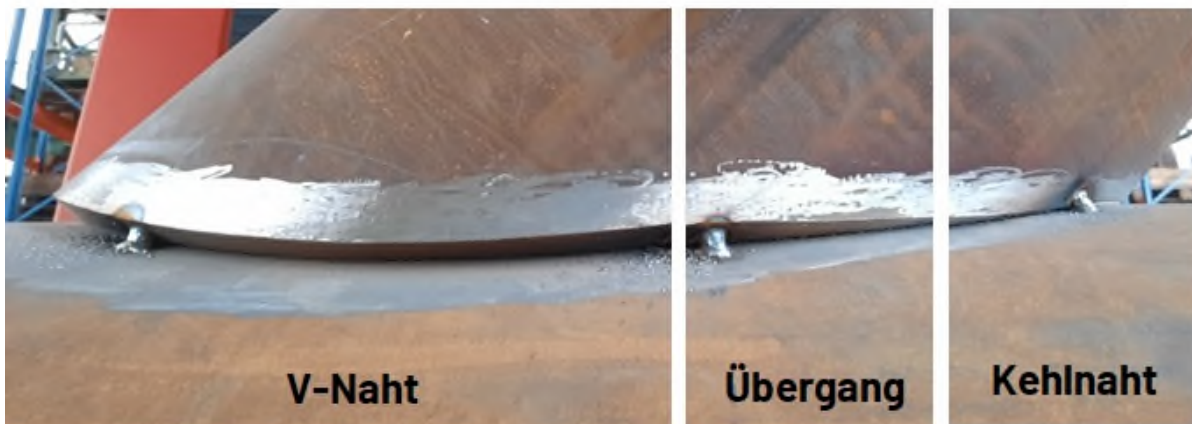


Bild 6: Maßstabsunabhängig Darstellung der Schweißnahtgeometrie mit den unterschiedlichen Nahtvorbereitungen entlang der Rohrfumfangs

#### 4.2.2 Schweißlagenaufbaustrategie

Die Schweißlagenaufbau ist ein zentraler Aspekt der robotergestützten Fertigung von Rohrknoten. Dabei sind die Vorgaben, die u.a. aus der vorliegenden Anlagentechnik entstehen zu berücksichtigen:

- Kontinuierliches Schweißen mit identischer Schweißraupenzahl und minimierter Anzahl an Start-Stopp-Bereichen
- Minimierung der Schweißlagen-/Raupenanzahl durch Pendelraupen
- hohe Abschmelzraten je Schweißlage und Schweißraupe
- Schweißen in Wannennlage
- Vorgaben zur Schweißnahtgeometrie gemäß [9] (Bild 5).

Die komplexe Schweißnahtvorbereitung mit den drei Bereichen V-Naht, Übergang und Kehlnaht erfordert für die robotergestützte Fertigung einen Lagenaufbau, der von einer manuellen Fertigung abweicht. In Kooperation mit dem Projektpartner BAM [27] wurde eine Schweißlagenaufbaustrategie basierend auf einem CAD-Modell der Nahtvorbereitung entwickelt. Demnach wird die Schweißnaht zunächst in zwei Bereiche unterteilt. Der Bereich 1 umfasst die V-Naht und den Übergangsbereich. Dieser Bereich wird im Folgenden als Fülllagenbereich bezeichnet und ist in Bild 7c und Bild 7d als helle Dreieckfläche gekennzeichnet. Der Bereich 2 umfasst die gesamte Schweißnahtlänge (V-Naht, Übergang und Kehlnahtbereich) wird als Decklagen bezeichnet und ist durch die dunkel gefüllte Dreieckfläche gekennzeichnet. Darüber hinaus sind in Bild 7b die 36 Stützstellen (alle  $10^\circ$ ) im CAD-Modell erkennbar. Für diese Positionen erfolgt die Berechnung die Schweißbrennerpositionierung und der Schweißparameter. Zwischen diesen Stützstellen erfolgt schließlich im Schweißprozess eine Interpolation der Schweißparameter und Schweißbrennerbewegung.

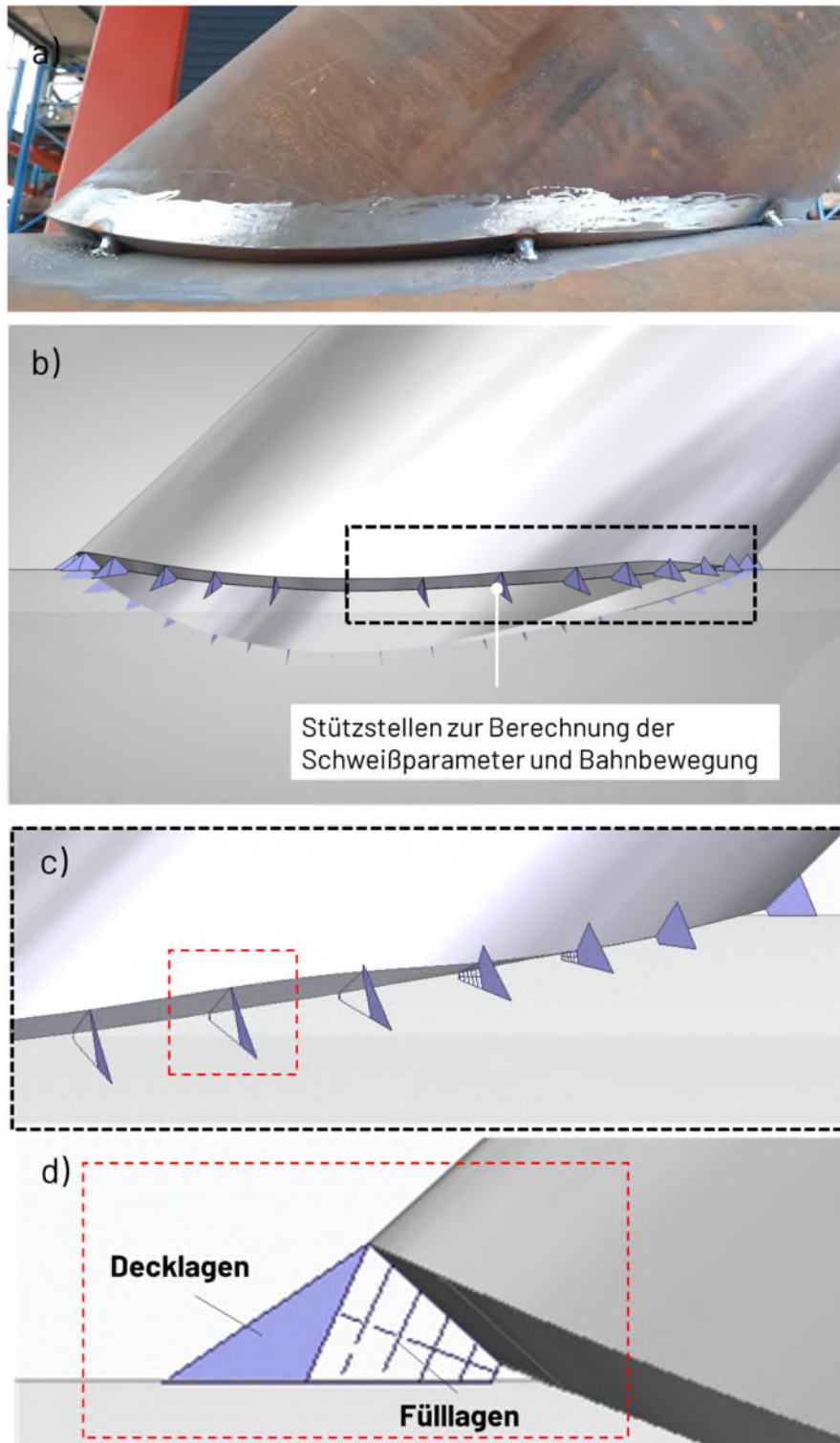


Bild 7: Darstellung der Schweißnahtvorbereitung inkl. der Stützstellen entlang des Rohrumfangs (a und b), Aufteilung der Schweißnaht in Fülllagen und Decklagen (c, d)

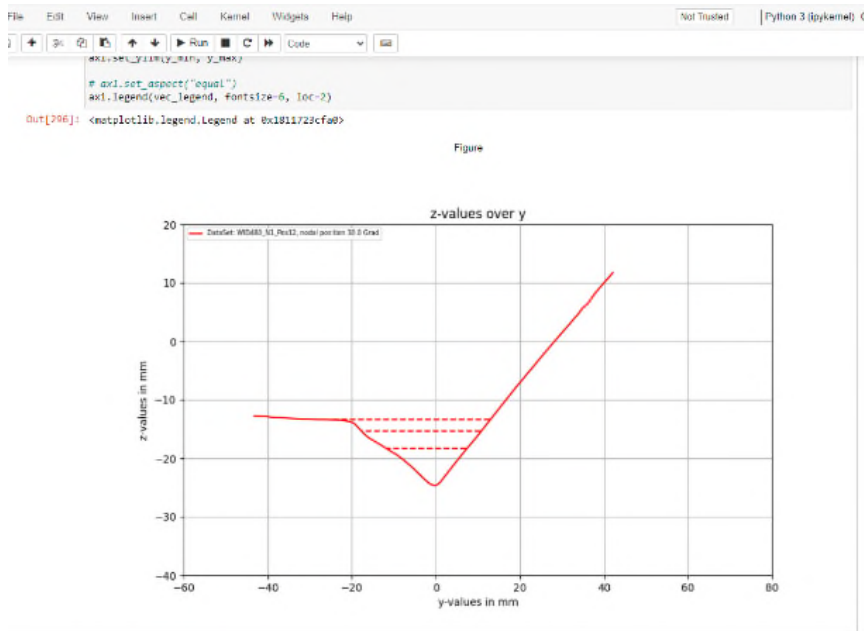
Zentrales Ziel bei der automatisierten Fertigung der Rohrknoten ist es, eine adaptive Schweiß-Prozessführung zu nutzen, die auf lokal variierende Schweißnahtvolumenänderungen durch Anpassung der Schweißparameter reagiert. Das Konzept der adaptiven Schweißprozessführung ist in Bild 8 gezeigt. Demnach wird zunächst das zu füllende Schweißvolumen für Bereich 1 durch eine lokale Messung mittels Laserlinien-

schnittsensor an 22 der 36 Stützstellen (repräsentiert den V Naht und Übergangsbereich) um den Umfang der Strebe ermittelt. Ausgehend von diesem Volumen erfolgt die Berechnung des Lagenaufbaus und der lokalen Schweißparameter für die Stützstellen. Anschließend wird der Bereich 1 (V Naht und Übergang) geschweißt, gefolgt von einer Neuvermessung des verbleibenden Füllvolumens für den Bereich 2 (36 Stützstellen kompletter Umfang) und eine des Lagenaufbaus und der Schweißparameter. Abschließend wird dieser Bereich geschweißt und hinsichtlich der vorliegenden Schweißnahtöffnungswinkels an den Stützstellen vermessen.



Bild 8: Darstellung des Konzeptes zum adaptiven Schweißen von Rohrknotten

Für die Berechnung des Lagenaufbaus und der Schweißparameter an den Stützstellen wurde eine bestehende Software der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH genutzt. Basierend auf einem vorliegenden lokalen Füllvolumen an den Stützstellen werden hier das je Schweißraupe und -lage über den Schweißdraht einzubringenden Schweißdrahtvolumen sowie die hierfür erforderlichen Schweißparameter (u.a. Drahtvorschub/Schweißgeschwindigkeit) berechnet. Zu beachten ist, dass die Optimierung der Schweißnahtgeometrie [4] in der Berechnungssoftware nicht enthalten ist. Exemplarisch zeigen Bild 9 und Bild 10 einen berechneten Lagenaufbau für den Fülllagebereich und die ermittelten Schweißparameter für verschiedene Stützstellen. Das je Raupe eingebrachte Füllvolumen ist abhängig von der Schweißgeschwindigkeit und dem Drahtvorschub.



vec\_velocity = np.zeros(15, 4)

Bild 9: Exemplarischer Lagenaufbau für den Fülllagenbereich (Bild 7)

Parameter Overview

z\_values of layers

In [101]: df\_dict\_SeamwithLayers

	WID480_N1_Pos02	WID480_N1_Pos03	WID480_N1_Pos04	WID480_N1_Pos05	WID480_N1_Pos06	WID480_N1_Pos07
z1	10.728 mm	9.454 mm	9.788 mm	10.269 mm	10.125 mm	11.276 mm
z2	15.975 mm	13.009 mm	13.059 mm	13.022 mm	12.993 mm	15.953 mm
z3	18.818 mm	19.524 mm	15.787 mm	10.003 mm	18.847 mm	18.852 mm
z4	21.597 mm	19.558 mm	19.179 mm	18.972 mm	18.577 mm	21.853 mm

Layer Heights

In [102]: df\_dict\_Layer\_Height

	WID480_N1_Pos02	WID480_N1_Pos03	WID480_N1_Pos04	WID480_N1_Pos05	WID480_N1_Pos06	WID480_N1_Pos07
H1	5.342 mm	2.388 mm	2.017 mm	1.575 mm	3.09 mm	8.012 mm
H2	5.2 mm	4.0 mm	3.5 mm	3.0 mm	3.5 mm	4.8 mm
H3	3.0 mm	4.0 mm	3.5 mm	3.5 mm	3.0 mm	3.0 mm
H4	3.5 mm	3.5 mm	3.5 mm	3.0 mm	3.5 mm	3.5 mm

Difference areas between the layers

In [103]: df\_diffArea\_DesiredSeams = pd.DataFrame.from\_dict(dict\_diffArea\_DesiredSeams)

	WID480_N1_Pos02	WID480_N1_Pos03	WID480_N1_Pos04	WID480_N1_Pos05	WID480_N1_Pos06	WID480_N1_Pos07
z1	42.800154075625014 mm	16.034870247500042 mm	13.181101896974983 mm	11.074501224092429 mm	23.345556454052578 mm	58.432786886230078 mm
z2	88.49895847375008 mm	44.803180551249994 mm	39.878080180312485 mm	33.45134387343785 mm	40.03015999718752 mm	84.70381388840374 mm
z3	52.58993210087428 mm	88.03521979437909 mm	80.08504832488783 mm	80.5037378934375 mm	42.97292888888848 mm	81.8268083431281 mm
z4	58.44099591600237 mm	83.74327231931226 mm	81.23380856125004 mm	51.58182309531281 mm	80.42471848218743 mm	86.8018004974988 mm

Welding Velocities

In [104]: df\_v\_weld = pd.DataFrame.from\_dict(dict\_v\_weld\_desiredSeams)

	WID480_N1_Pos02	WID480_N1_Pos03	WID480_N1_Pos04	WID480_N1_Pos05	WID480_N1_Pos06	WID480_N1_Pos07
z1	29.20343172029491 cm / min	82.74588854549438 cm / min	94.38290520434485 cm / min	112.30849888910791 cm / min	51.954105798280487 cm / min	21.29427398048581 cm / min
z2	21.453799123082344 cm / min	32.81880349882231 cm / min	37.084881322418114 cm / min	43.51297028822174 cm / min	38.72894070378948 cm / min	32.72000902939881 cm / min
z3	27.987184097749238 cm / min	28.33388425883039 cm / min	29.384838429204804 cm / min	29.112010828818328 cm / min	34.21579079228108 cm / min	27.41817792212784 cm / min
z4	21.482328352949008 cm / min	23.054420218758676 cm / min	24.010980838880623 cm / min	28.520142808888117 cm / min	24.32218470788328 cm / min	21.05349058504075 cm / min

Bild 10: Exemplarisches Ergebnis einer Schweißparameterberechnung (hier: vs und P<sub>B</sub>) für den Fülllagenbereich

Um die für die unterschiedlichen Rohrknottengeometrien (Maßstab 1:1 und 1:1,5) erforderlichen Berechnungen ausführen zu können, sind unter Vorgabe eines stabilen Schweißprozesses und der Einhaltung der mechanisch-technologischen Kennwerte der Schweißnaht der nutzbare Schweißparameteraum für die Schweißgeschwindigkeit  $v_s$ , den Drahtvorschub  $D_V$ , die Pendelfrequenz  $P_A$  und die Pendelbreite  $P_B$  experimentell ermittelt worden (Bild 11), siehe auch [27]. Tabelle 1 zeigt den ermittelten nutzbaren Schweißparameteraum. Der Schweißstrom  $I_s$  und Schweißspannungswerte  $U_s$  ergeben sich aus der Vorgabe des Drahtvorschubes, der Schweißgeschwindigkeit und der genutzten Kennlinie (Modus S2T, Kennlinie 3449 Fonus Stromquelle TPSi 600).



Bild 11: Schweißversuche an ebenen Ersatzgeometrien zur Bestimmung des nutzbaren Schweißparameterfeldes und der korrespondierenden Schweißprozessstabilität und Schweißnahtqualität

Tabelle 1: Schweißparameterräume für die Berechnung der lokalen Schweißparameter (Stützstellen) bei der Rohrknottenherstellung (Modus S2T, Kennlinie 3449 Foniuss Stromquelle TPSi 600)

Schweißgeschwindigkeit $v_s$	Drahtvorschub $D_v$	Pendelfrequenz $P_A$	Pendelbreite $P_B$
18-45 cm/min	8-13 m/min	0,8-1,2 Hz	1-18mm
Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang) Schutzgas: M21, Schweißprozess: MSG-Pulsprozess Werkstoff: S355J2+N Vorwärmtemperatur: 90-120°C Zwischenlagentemperatur: max. 250°C			

Eine wesentliche Aufgabe im Gesamtvorhaben ist es, die Schweißnahtgeometrie hinsichtlich der kritischen lokalen Spannungen so zu optimieren, dass eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit der Rohrknotten erreicht werden kann. Basierend auf den Ergebnissen des Teilverhabens der TU Hannover [4] wurde dazu eine Erhöhung des Schweißnahtöffnungswinkels am Übergang von der Schweißnaht zum Gurtrohr als zielführend beschrieben. Hier liegt eine Spannungsüberhöhung im Ermüdungsversuch vor, die durch zusätzliche Raupen und die damit einhergehende Erhöhung des Schweißnahtöffnungswinkels reduziert werden kann. Basierend auf Testschweißungen an ebenen Ersatzgeometrien und Rohrknottensegmenten (siehe Bild 11 und [27]) wurde festgelegt, zwei zusätzliche Decklagenraupen im Bereich des Übergangs zum Gurtrohr (nachfolgend Optimierungsraupen) zu fertigen. Dies ist sowohl für die 3 Knoten im Maßstab 1:1 als auch für die 15 Knoten im Maßstab 1:1.5 angewendet. Diese Optimierungsraupen wurden mit einer erhöhten Pendelbreite (siehe Tabelle 3) gefertigt, da somit eine signifikante Beeinflussung des Schweißnahtöffnungswinkels erreicht werden konnte, ohne die Prozessstabilität negativ zu beeinflussen. Der Lagenaufbau ohne und mit zusätzlicher Optimierung des Schweißnahtöffnungswinkels ist schematisch in Bild 12 gezeigt.

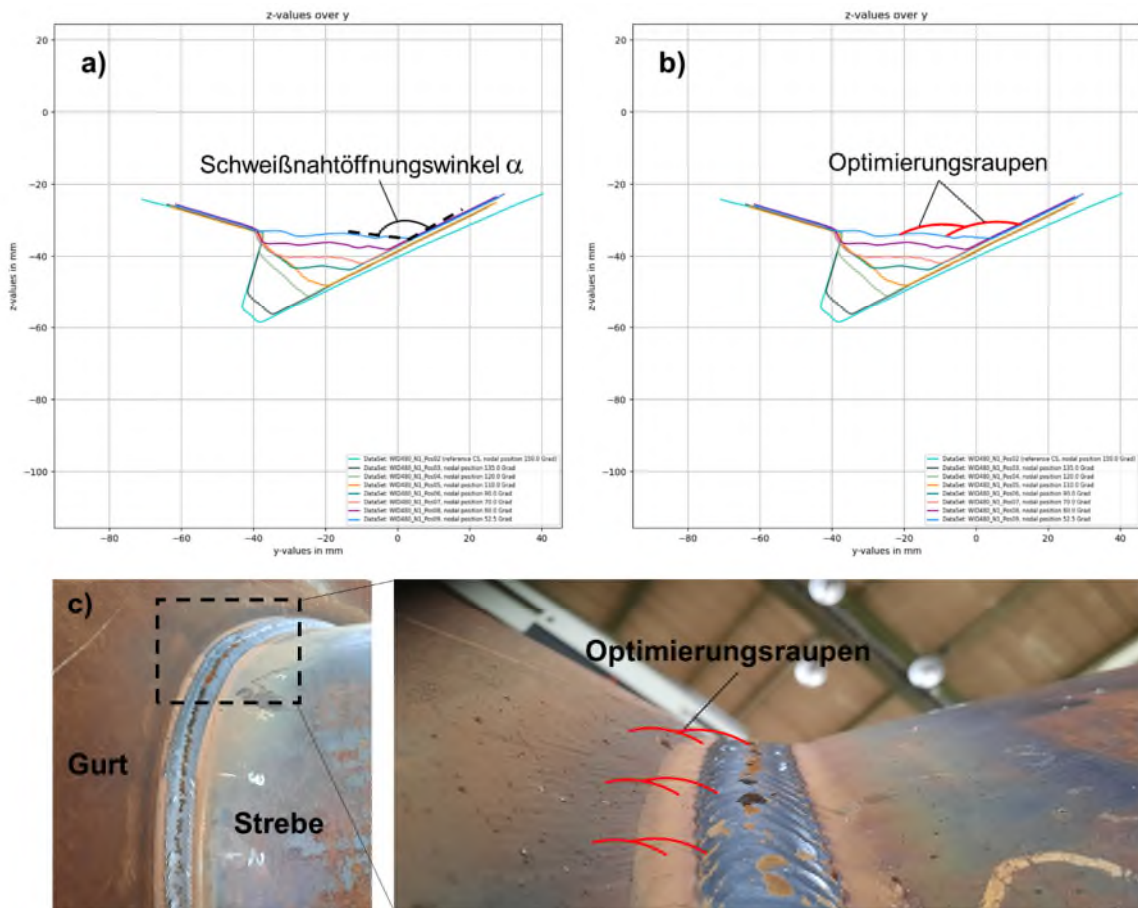


Bild 12: Exemplarische Darstellung des Schweißlagenaufbaus ohne (a) und mit Optimierungsraupen (B, c) sowie der Darstellung des Schweißnahtöffnungswinkels am Bereich Schweißnaht zu Gurtrohr

#### 4.2.3 Erstellung der Robotertrajektorie

Grundlage einer fehlerfreien und reproduzierbaren robotergeführten schweißtechnischen Fertigung ist die präzise Positionierung und Führung des Schweißbrenners entlang der Schweißnahtvorbereitung. Eine ungenaue Schweißbrennerstellung führt zu Schweißfehlern, kostenintensiven Nacharbeiten und ungünstigen Schweißnahtgeometrien. Im Rahmen dieses Projekts erfolgt die Fertigung der Rohrknotten mittels eines Manipulators, der das Bauteil stetig in Wannennlage dreht, siehe Bild 13. Demzufolge muss die Drehbewegung und die Roboterbewegung (Robotertrajektorie) synchronisiert erfolgen.



Bild 13: Bewegung des Knotens durch den Manipulator während des Schweißens von Rohrknotten im Maßstab 1:1

Die Erstellung der synchronisierten Bewegungen des Schweißbrenners und des Manipulators für den jeweiligen Knotentyp erfolgt mittels eines Software-Programms der

Firma IGM Robotersysteme. Hiermit besteht zum einen die Möglichkeit die Zugänglichkeit des Schweißbrenners im Bereich der Schweißfuge zu bewerten, siehe Bild 14b. Zum anderen kann mittels einer Softwareerweiterung die Wannelage an jeder Position exakt eingestellt werden, Bild 14c. Für die Erstellung der Robotertrajektorie wird die Positionierung des Schweißbrenners relativ zur Schweißnahtvorbereitung an jeder der o.g. 36 Stützstellen (Bild 7) und die resultierende Manipulatorstellung im Programm am idealen digitalen Knotenmodell (CAD) festgelegt. Durch Interpolation zwischen den Stützstellen wird schließlich die ideale Robotertrajektorie für den jeweiligen Schweißknotentyp erstellt. Gemäß Kap. 4.2.2. liegen für jeden Knotentyp (Maßstab 1:1 und 1:1,5) zwei Bereiche vor (Fülllagen- und Decklagenbereich), die eine unterschiedliche Manipulator- und Schweißbrennerstellung je Stützstelle erfordern. Als Folge sind zwei Robotertrajektorien je Knotentyp programmiert worden, wobei der Decklagenbereich die Optimierungsraupen (siehe Bild 12) beinhaltet.

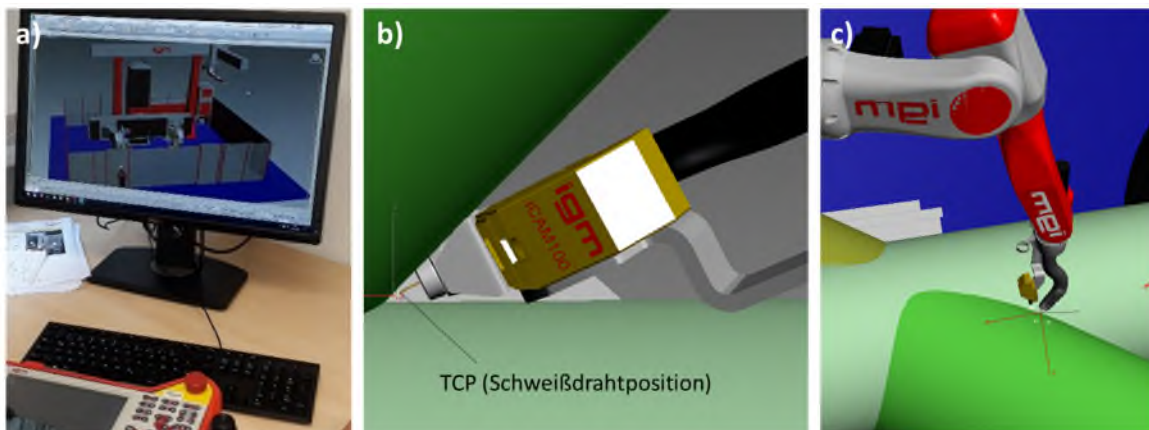


Bild 14: Softwaretool zur Erstellung der Roboter- und Manipulatorbewegung basierend auf den idealen geometrischen Daten (CAD Modell) der Knoten

Da die Bewegungsprogramme auf den CAD-Modellen der Knoten basieren, können die realen Abmessungen der Knotengeometrie nur bedingt genau abbildet werden. So können u.a. Rohrovalitäten und Zusammenbauabweichungen nicht berücksichtigt werden und führen zu Abweichungen des realen Knotens vom CAD-Modell. Um die Abweichung der ideale Robotertrajektorie von der tatsächlich notwendigen Robotertrajektorie zu kompensieren, erfolgt vor Beginn der Schweißarbeiten eine Kalibrierfahrt an der Roboterschweißanlage. Im Rahmen dieser Kalibrierfahrt wird an den 36 Stützstellen mittels eines Laserliniensensor die tatsächliche Position des Schweißbrenners bzw. des TCP (Schweißdrahtposition, Bild 14b) so korrigiert, dass die notwendige Schweißposition erreicht wird. Dies ist jedoch nur für die Bereich 1 (Fülllagenbereich) mit der bestehenden Anlagentechnik möglich. Für den Bereich 2 (Decklagen) erfolgt die Korrektur der Robotertrajektorie und der Schweißbrennerposition im teach-in Betrieb (manuell) auf Basis von Kameraaufnahmen der Schweißbrennerposition in der Schweißfuge, Bild 15 .

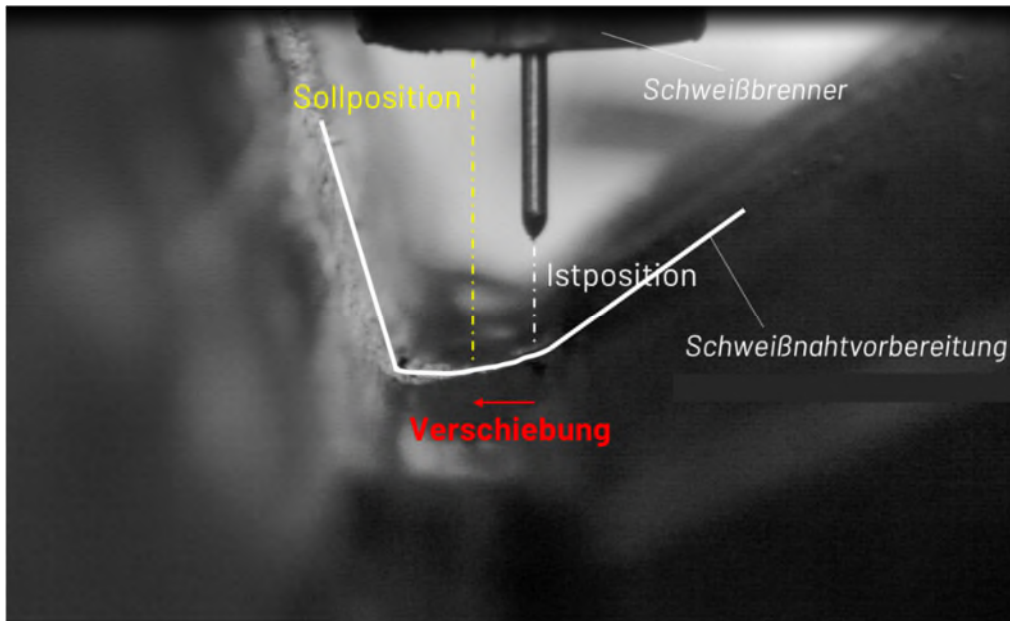


Bild 15: HDR Kamera Livebild als Hilfsmittel bei der korrekten Positionierung des TCP (Schweißdrahtposition) in der Schweißfuge

#### 4.3 Fertigung von Rohrknoten im Maßstab 1:1

##### 4.3.1 Testschweißungen

Um die unter Kap. 4.2 beschriebene Fertigungsprozedur und der Berechnungssoftware für beide Knotentypen zu validieren, wurden umfangreiche Testschweißungen an einem Knoten im Maßstab 1:1 durchgeführt, siehe Bild 16.



Bild 16: Testschweißungen an einem Knoten im Maßstab 1:1 mit Darstellung der Schweißnahtgeometrie und Stützstellen

In Bild 17 sind exemplarisch die für die Berechnung der Schweißdaten erforderlichen Schweißflächen je Stützstelle dargestellt. Die Abweichungen von >20% erfordert eine adaptive Anpassung der Schweißparameter über die gesamte Schweißnahtlänge. Die aus den lokalen Flächeninhalten mittels der Berechnungssoftware bestimmten Schweißgeschwindigkeiten und Drahtvorschübe je Stützstelle für den Bereich der Fülllagen sind exemplarisch in Bild 18 gezeigt. Evident ist, dass eine erhebliche Anpassung der Schweißgeschwindigkeit erforderlich war, um die Abweichung in den lokalen

Füllvolumen auszugleichen und einen gleichmäßigen Schweißlagenaufbau um den Rohrumfang zu ermöglichen.

Die Testschweißungen wiesen nach, dass ein stabiler Schweißprozess mit einer fehlerfreien Schweißnaht mit den berechneten Schweißparametern erreicht wird.

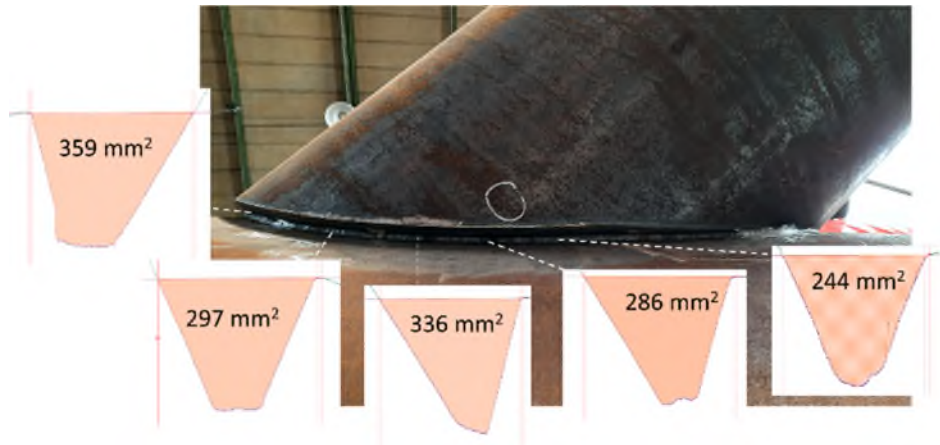


Bild 17: Exemplarische Darstellung der Flächenänderungen und damit des Füllvolumens in der Schweißnaht an unterschiedlichen Stützstellen

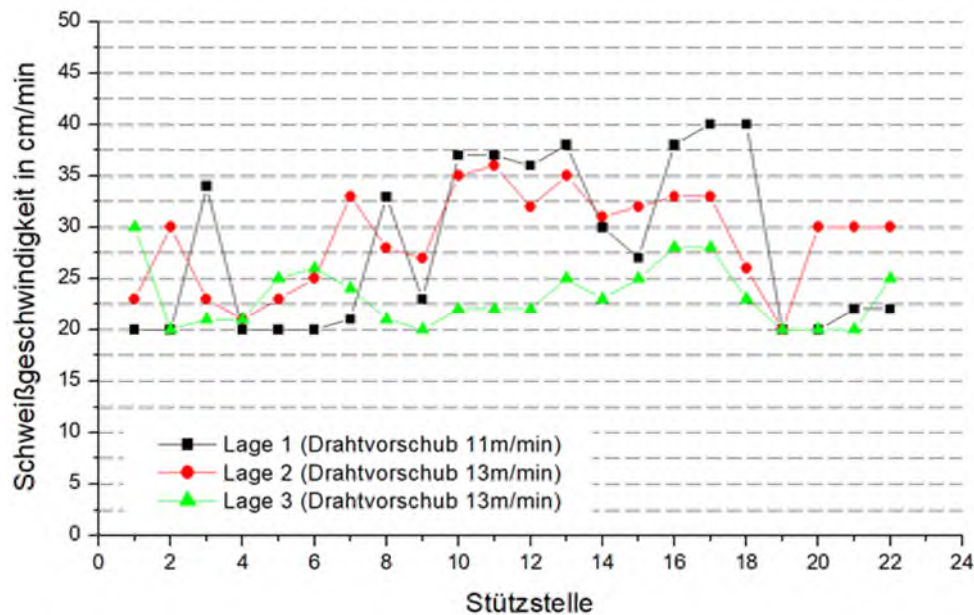


Bild 18: Exemplarische Darstellung der Schweißparameter Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschub für unterschiedliche einraupige Lagen an den Stützstellen des Bereichs 1 (Fülllagenbereich)

Um die Vorgaben der Spezifikation DNVGL-RPC203 [9] hinsichtlich der Schweißnahtgeometrie zu bewerten, wurden Oberflächenscans mittels Laserliniensensorik durchgeführt. Die Vorgaben von [9] (Bild 5) hinsichtlich der Schweißnahtdicke ( $t_w$  Maß) sind mit der 1,25fachen Strebenwandstärke ( $=31,25\text{mm}$ ) definiert. Darüber hinaus ist das a-Maß für den Kehlnahtbereich mit max. 17,5 mm festgelegt. In Bild 19 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Es zeigt sich, dass die geometrischen Vorgaben von [9] für die Schweißnahtdicke mit 33 mm und für das a-Maß mit 17mm erfüllt werden.

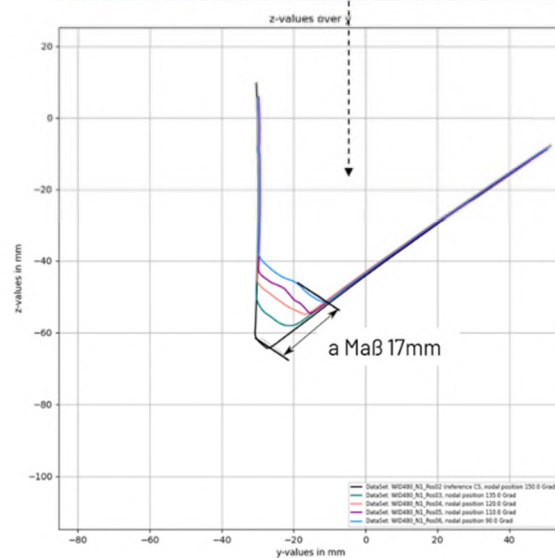
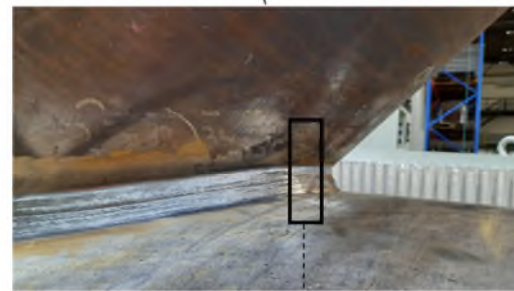
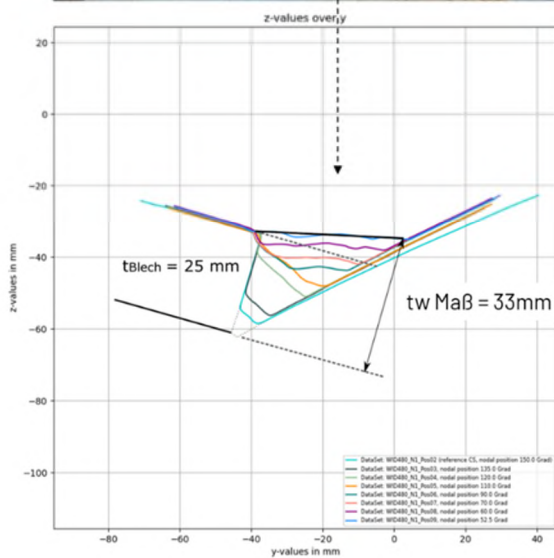
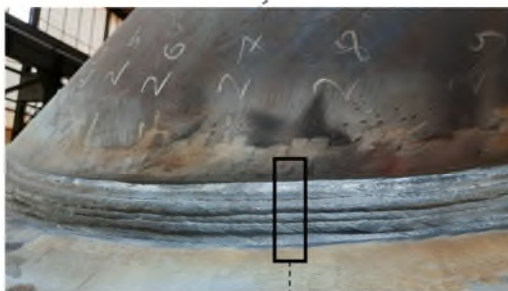


Bild 19: Auswertung des Lagenaufbaus und der Schweißnahtgeometrie hinsichtlich der Vorgaben aus [9] an unterschiedlichen Bereichen des zweiten Testknotens (Maßstab 1:1)

Um den Einfluss der Optimierungsraupen (siehe Kap. 4.2.2) auf den Schweißnahtöffnungswinkels am Rohrknotten zu validieren, wurden die Oberflächenprofile mittels Laserlinienscanning entlang der Schweißnaht vor und nach der Fertigung der Optimierungsraupen erfasst. Die Ergebnisse zeigen für diesen Knotentyp (Maßstab 1:1), dass entlang des Strebumfangs die zusätzlichen Schweißraupen zwischen Gurt und Schweißnaht den Schweißnahtöffnungswinkels um rd.  $10^\circ$  erhöhen, siehe Bild 19, womit die Zielstellung aus dem Teilprojekt [4] erreicht wird. Bemerkenswert ist, dass im Bereich der Rissinitiierung, die maßgeblich von der Schweißnahtgeometrie beeinflusst

wird, der Schweißnahtöffnungswinkels um rd. 12° erhöht werden konnte. Weiterführende Ergebnisse zur Änderung des Schweißnahtöffnungswinkel durch die Implementierung von Optimierungsraupen findet sich in [27].

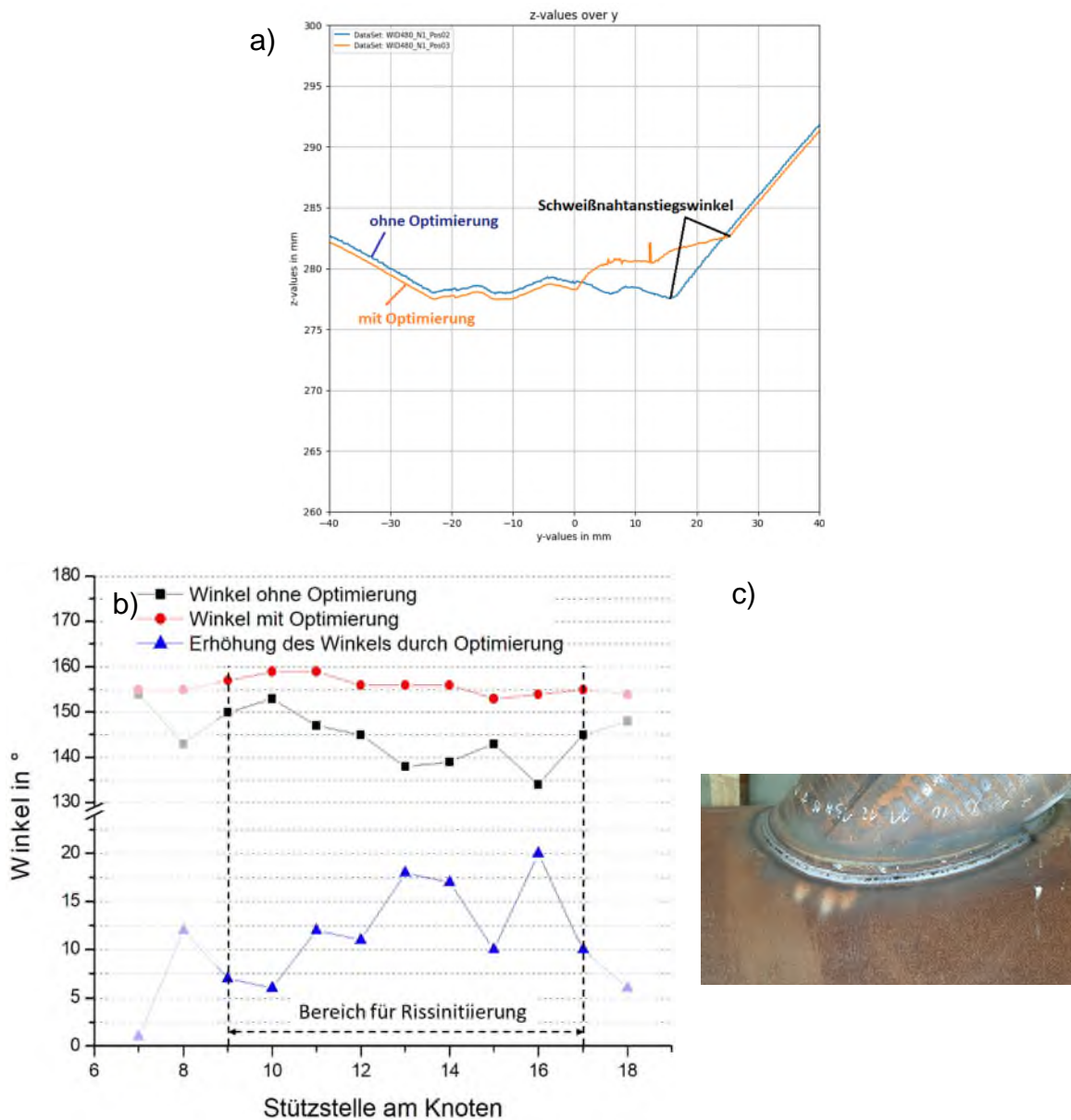


Bild 20: Veränderung des Schweißnahtöffnungswinkels durch zusätzliche Optimierungsraupen, Exemplarisch für Stützstelle 14 a), an allen Stützstellen b) und Zuordnung der Messpositionen c)

Um die berechneten Schweißparameter hinsichtlich des Einflusses auf die mechanisch-technologischen Kennwerte der Schweißnaht zu bewerten, wurden exemplarisch Härtewerte (HV 10) der Schweißnaht gemäß [28] ermittelt. Nach [29] sind HV10-Werte von 350 nicht zu überschreiten. Die Ergebnisse zeigen, dass für das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone die Vorgaben eingehalten werden, siehe Bild 21.

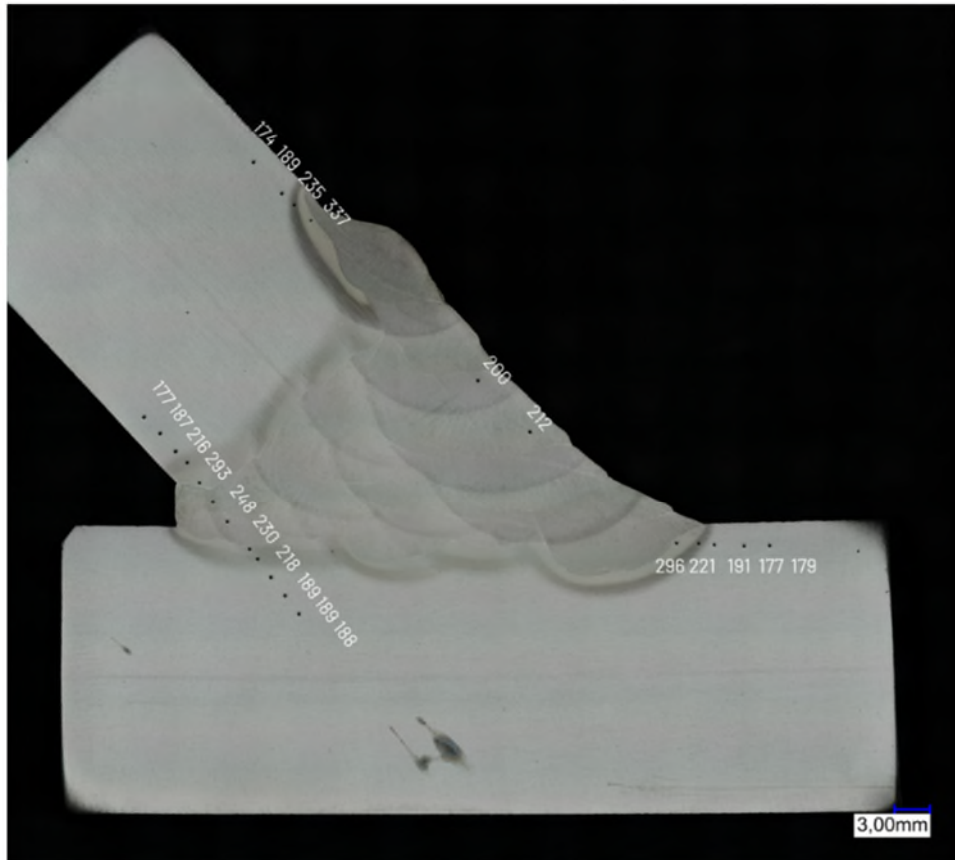
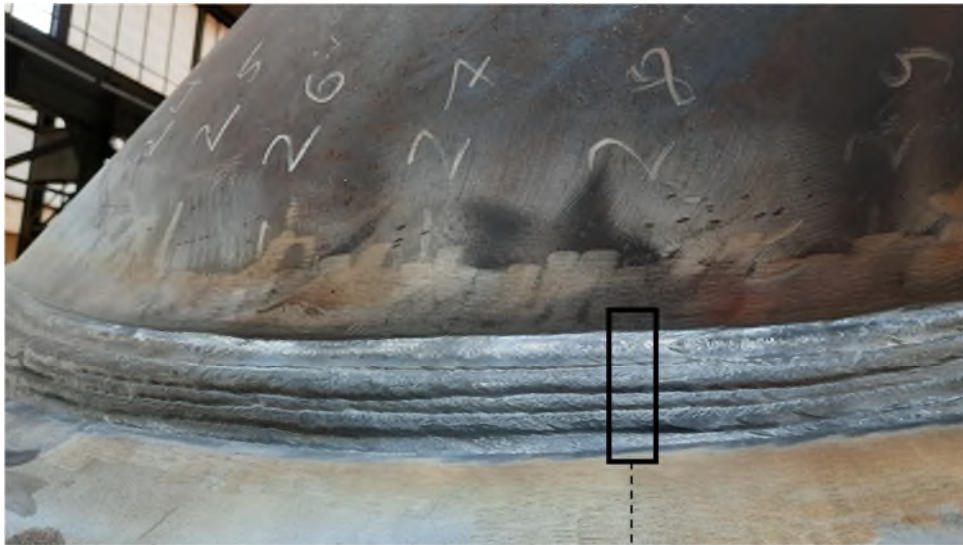


Bild 21: Querschliff und Härtewerte nach [28] entnommen aus Testknoten 2

#### 4.3.2 Fertigung von Knoten für die Ermüdungsprüfung

Gemäß Kap. 4.2.2. wird der Lagenaufbau und die Schweißparameter unter Nutzung der in Tabelle 1 gezeigten Schweißparameterräume berechnet. Tabelle 2 und Tabelle 3 fassen die für den Fülllagenbereich und Decklagenbereich (siehe Bild 7) berechneten und verwendeten Schweißparameter zusammen. Zu beachten ist, dass durch das Projektkonsortium eine Beidseitenschweißung (siehe Bild 5) vorgegeben wurde, wobei die Inneschweißnähte, wie auch die Wurzel im manuellen MSG-Schweißprozess hergestellt wurden.

Tabelle 2: Schweißparameter für den Fülllagenbereich der Knoten im Maßstab 1:1 (Bild 22 und Bild 23)

Lage	Raupe	Bereich 1 Fülllagen	Schweißge- schwindigkeit $v_s$ , in cm/min	Drahtvor- schub $D_v$ in m/min	Pendelfre- quenz $P_F$ in Hz	Pendelbreite $P_B$ , in mm
1	1	1	20-24	11	1	3-5
2	2	1	20-33	11-13	1	7-9
3	3	1	19-30	11-13	1	14-16
4.1	4	1	30	9	1	2
4.2	5	1	30	9	1	2
4.3	6	1	20-30	10-13	1	8-12

Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm [xx]  
 Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang)  
 Schutzgas: M21  
 Schweißprozess: MSG-Pulsprozess  
 Werkstoff: S355J2+N (Protokoll siehe Anhang)  
 Vorwärmtemperatur: 90-120°C  
 Zwischenlagentemperatur: max. 250°C  
 Fronius Kennlinie Nr. 3449

Tabelle 3: Schweißparameter für den Decklagenbereich und Optimierungsraupen der Knoten im Maßstab 1:1 (Bild 22 und Bild 23) für V Naht- und Übergangsbereich

Lage	Raupe	2 Decklagen 3 Optimie- rungsraupen	Schweißge- schwindigkeit $v_s$ , in cm/min	Drahtvor- schub $D_v$ in m/min	Pendelfre- quenz $P_F$ in Hz	Pendelbreite $P_B$ , in mm
5	7	2	25	11	1	3
6	8	2	20-30	13	1	6-10
7.1	9	2	30	9	1	2
7.2	10	2	30	9	1	2
7.3	11	2	20-25	10-13	1	8-12
8.1	12	2	30	9	1	2
8.2	13	2	30	9	1	2
8.3	14	2	20-30	11-13	1	10-16
9	15	3	27	10	1	9
10	16	3	30	8	1	7

Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm [xx]  
 Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang)  
 Schutzgas: M21  
 Schweißprozess: MSG-Pulsprozess  
 a-Maßmax = 17,5 mm  
 Vorwärmtemperatur: 90-120°C  
 Zwischenlagentemperatur: max. 250°C  
 Fronius Kennlinie Nr. 3449

Tabelle 4: Schweißparameter für den Decklagenbereich und Optimierungsraupen der Knoten im Maßstab 1:1 (Bild 22Bild 23) Kehlnahtbereich

Lage	Raupe	2 Decklagen 3 Optimierungsraupen	Schweißgeschwindigkeit $v_s$ , in cm/min	Drahtvorschub $D_v$ in m/min	Pendelfrequenz $P_F$ in Hz	Pendelbreite $P_B$ , in mm
5	7	2	20-25	12	1	2
6	8	2	20-25	12	1	4-6
7.1	9	2	40	8	1	2
7.2	10	2	40	8	1	2
7.3	11	2	30-40	9	1	2-4
8.1	12	2	35	8	1	2
8.2	13	2	35	8	1	2
8.3	14	2	20-30	8-9	1	5-7

Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm [xx]  
 Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang)  
 Schutzgas: M21  
 Schweißprozess: MSG-Pulsprozess  
 a-Maßmax = 17,5 mm  
 Vorwärmtemperatur: 90-120°C  
 Zwischenlagentemperatur: max. 250°C  
 Fronius Kennlinie Nr. 3449

Der exemplarische Lagenaufbau im V-Naht- und Übergangsbereich zeigt Bild 22a. Der exemplarische Lagenaufbau im Kehlnahtbereich ist Bild 22b zu entnehmen. Zu beachten ist, dass die Optimierungsraupen aufgrund von Kollisionsgefahr des Schweißbrenners mit dem Rohrknoten nicht im Kehlnahtbereich ausgeführt werden konnten.

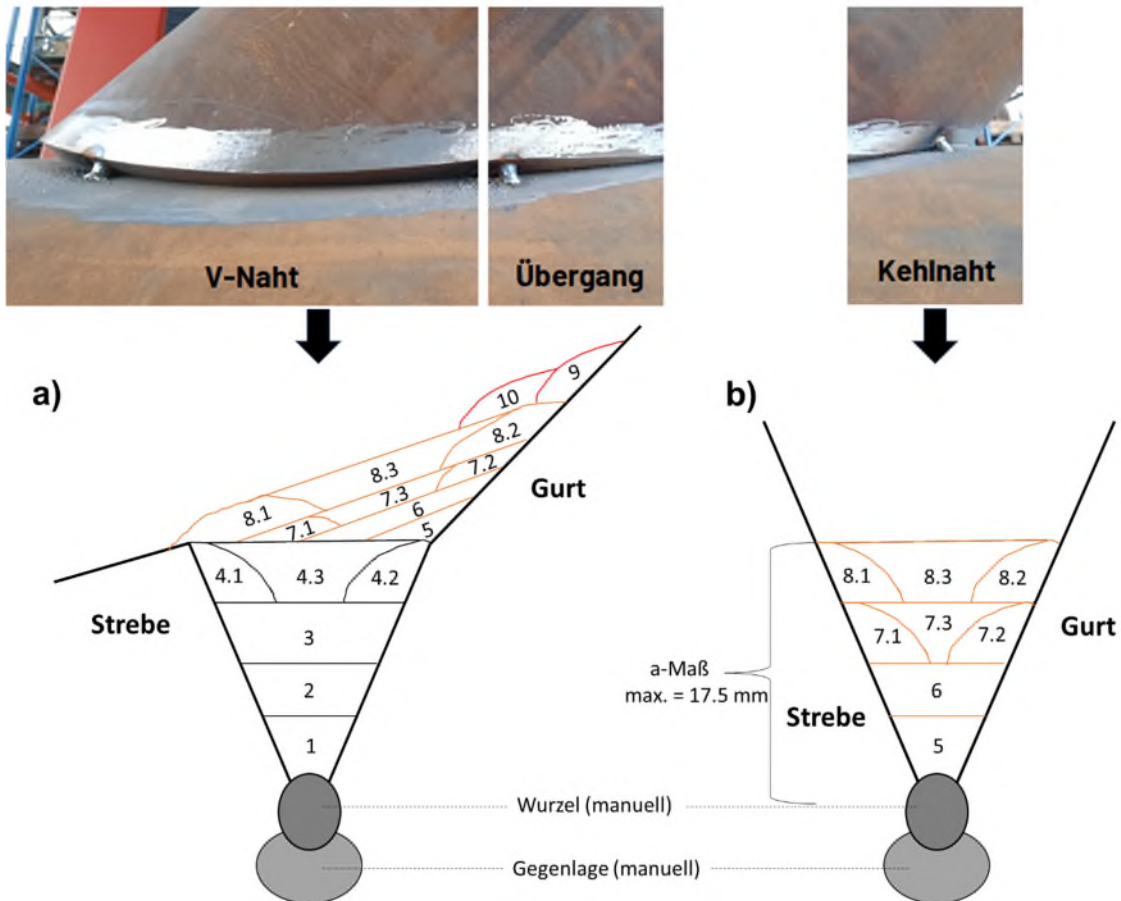


Bild 22: Lagenaufbau für den Knoten im Maßstab 1:1, die Optimierungsraupen konnten aufgrund von Kollisionsgefahr nicht bis in den Kehlnahtbereich ausgeführt werden

In Bild 23 ist exemplarisch die Fertigung der Knoten im Maßstab 1:1 sowie die resultierende Schweißnahtgeometrie dargestellt.

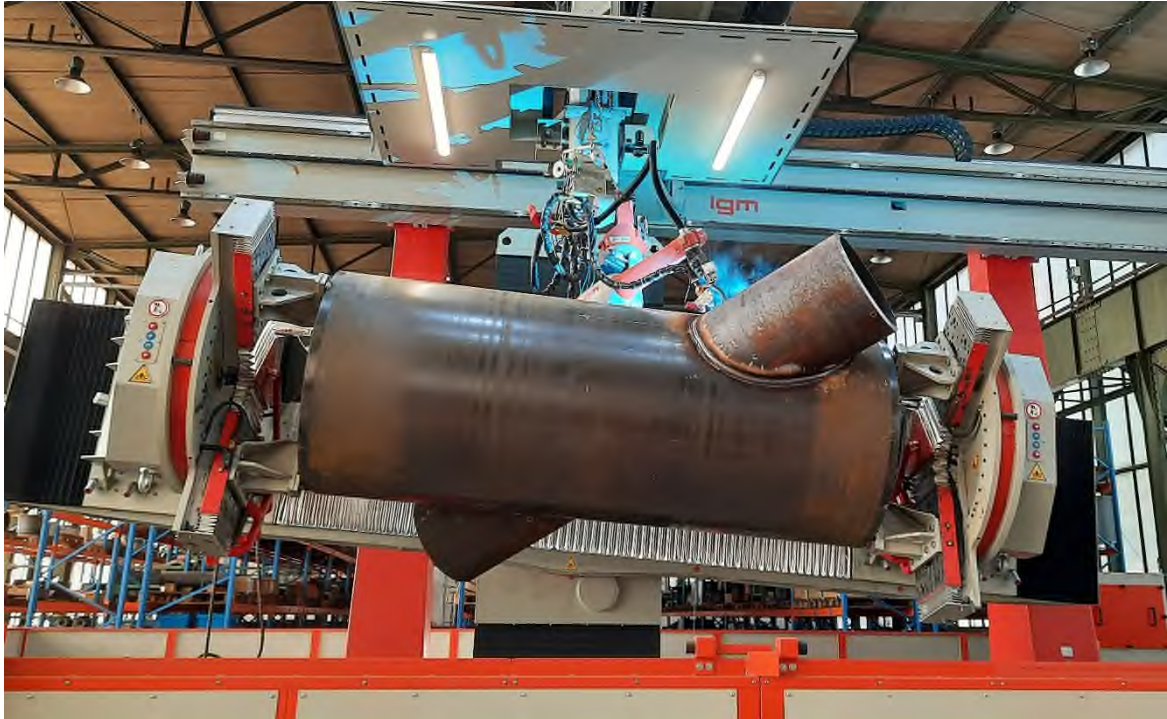


Bild 23: Fertigung des Knotens 3 (von 3) im Maßstab 1:1 (oben), Geometrie der Schweißnaht inkl. Darstellung der Optimierungsraupen (unten)

Um die Einspannung der Rohrknotten in die Prüfeinrichtung der BAM zu gewährleisten, wurden sowohl das Gurtrohr als auch die Streberohre verlängert, siehe Bild 24.



Bild 24: Verlängerungen von Gurt- und Strebrohre (manuelle schweißtechnische Fertigung)

#### 4.4 Fertigung von Rohrknotten im Maßstab 1:1,5

Die Fertigung der 15 Knoten im Maßstab 1:1,5 erfolgte mittels der in Kap. 4.2.3 beschriebenen durch die SZMF erstellten Robotertrajektorie. Die Schweißparameterbereiche für die Berechnung der jeweiligen Schweißraupenparameter sind Tabelle 1 zu entnehmen. In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die für den Fülllagenbereich und Decklagenbereich (siehe Bild 7) berechneten und verwendeten Schweißparameter zusammengefasst. In Übereinstimmung mit den Rohrknotten im Maßstab 1:1 sind durch das Projektkonsortium Beidseitenschweißung (siehe auch Bild 5) vorgegeben worden. Die Inneschweißnähte, wie auch die Wurzel wurden im manuellen MSG-Schweißprozess ausgeführt.

Tabelle 5: Schweißparameter für den Fülllagenbereich der Knoten im Maßstab 1:1,5 (Bild 25)

Lage	Raupe	Bereich 1 Fülllagen	Schweißge- schwindigkeit $v_s$ , in cm/min	Drahtvor- schub DV in m/min	Pendelfre- quenz $P_F$ in Hz	Pendelbreite $P_B$ , in mm
1	1	1	20-30	9-11	1	3-5
2	2	1	20-30	9-11	1	7-9
3	3	1	19-30	10-13	1	10-13
Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm [xx] Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang) Schutzgas: M21 Schweißprozess: MSG-Pulsprozess Werkstoff: S355J2+N (Protokoll siehe Anhang) Vorwärmtemperatur: 90-120°C Zwischenlagentemperatur: max. 250°C Fronius Kennlinie Nr. 3449						

Tabelle 6: Schweißparameter für den Decklängenbereich und die Optimierungsraupen der Knoten im Maßstab 1:1,5 (Bild 25) für den V-Nah und Übergangsbereich

Lage	Raupe	2 Decklagen 3 Optimie- rungsraupen	Schweißge- schwindigkeit $v_s$ , in cm/min	Drahtvor- schub $D_v$ in m/min	Pendelfre- quenz $P_F$ in Hz	Pendelbreite $P_B$ , in mm
4	4	2	25-30	9	1	3
5	5	2	20-30	10	1	10-12
6	6	2	20-30	12	1	14-16
7.1	7	2	30	9	1	2
7.2	8	2	30	9	1	2
7.3	9	2	20-30	11-12	1	10-14
8	10	3	27	10	1	9
9	11	3	30	8	1	7
Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm [xx] Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang) Schutzgas: M21 Schweißprozess: MSG-Pulsprozess a-Maßmax = 17,5 mm Vorwärmtemperatur: 90-120°C Zwischenlagentemperatur: max. 250°C Fronius Kennlinie Nr. 3449						

Tabelle 7: Schweißparameter für den Decklagenbereich und Optimierungsraupen der Knoten im Maßstab 1:1,5 (Bild 22Bild 23) Kehlnahtbereich

Lage	Raupe	2 Decklagen 3 Optimierungsraupen	Schweißgeschwindigkeit $v_s$ , in cm/min	Drahtvorschub $D_v$ in m/min	Pendelfrequenz $P_F$ in Hz	Pendelbreite $P_B$ , in mm
4	4	2	20-25	8-9	1	2
5	5	2	20-25	8-9	1	4-6
6	6	2	20-25	12		9-11
7.1	7	2	40	8	1	2
7.2	8	2	40	8	1	2
7.3	9	2	30-40	9	1	2-4

Schweißdraht: CARBOFIL Ni1, Drahtdurchmesser 1,2mm [xx]  
 Grundwerkstoff: S355J2+N (chemische Zusammensetzung siehe Anhang)  
 Schutzgas: M21  
 Schweißprozess: MSG-Pulsprozess  
 a-Maßmax = 17,5 mm  
 Vorwärmtemperatur: 90-120°C, Zwischenlagentemperatur: max. 250°C  
 Fronius Kennlinie Nr. 3449

Der exemplarische Raupenaufbau im V-Naht- und Übergangsbereich zeigt Bild 25a. Der exemplarische Raupenaufbau im Kehlnahtbereich ist in Bild 25b dargestellt. Zu beachten ist, dass die Optimierungsraupen aufgrund von Kollisionsgefahr des Schweißbrenners mit dem Knoten nicht bis in den Kehlnahtbereich ausgeführt werden konnten.

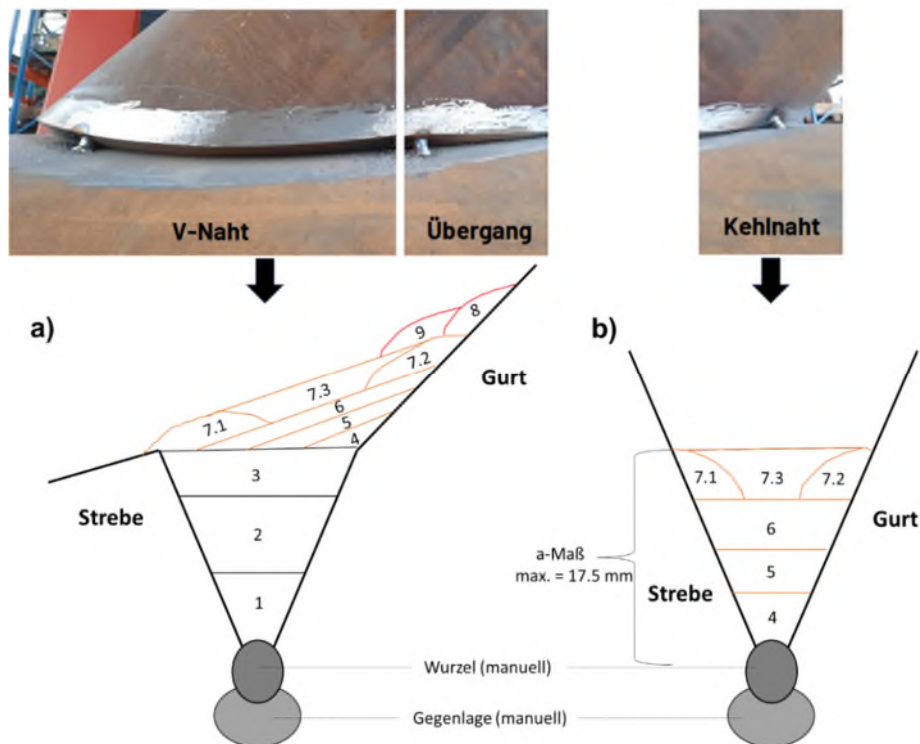


Bild 25: Lagenaufbau für den Knoten im Maßstab 1:1,5, die Optimierungsraupen konnten aufgrund von Kollisionsgefahr nicht bis in den Kehlnahtbereich ausgeführt werden

In Bild 26 ist exemplarisch die Fertigung der 15 Knoten im Maßstab 1:1.5 sowie die resultierende Schweißnahtgeometrie dargestellt.



Bild 26: Fertigung eines Knotens im Maßstab 1:1.5 sowie die resultierende Schweißnahtgeometrie

Basierend auf den Ergebnissen aus [4] wurde die Erhöhung des Schweißnahtöffnungswinkels am Übergang von der Schweißnaht zum Gurtrohr als wesentlicher Optimierungsparameter in Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit identifiziert. Die Optimierung der Schweißnahtgeometrie durch zwei zusätzliche Raupen im Übergang vom Schweißgut zum Gurtrohr ist im Bild 27 gezeigt. Die exemplarischen Messungen zeigen, dass eine Erhöhung des Schweißnahtöffnungswinkels von  $>7^\circ$  (Mittelwert) erreicht werden kann. Im Bereich der Rissinitiierung konnte eine Erhöhung des Schweißnahtöffnungswinkels um  $>8^\circ$  erzielt werden. Eine statistische Auswertung und weiterführende Betrachtungen zur Änderung des Schweißnahtöffnungswinkel durch die Implementierung von Optimierungsraupen findet sich in [27].

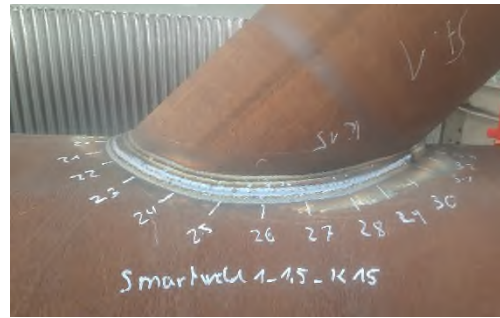
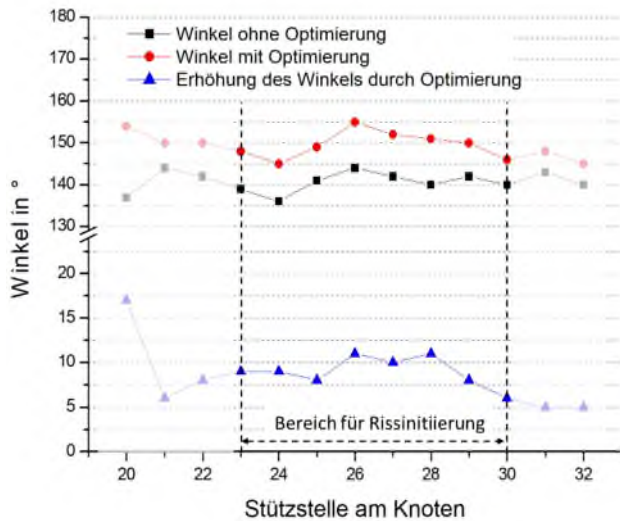


Bild 27: Veränderung des Schweißnahtöffnungswinkels durch zusätzliche Optimierungsraupen, Exemplarisch und Zuordnung der Messpositionen

#### 4.5 Zusammenfassende Betrachtung der robotergestützten Fertigung von Rohrknöten unterschiedlicher Geometrie

Die Ergebnisse dieses Teilprojekts zeigen, dass eine robotergestützte Fertigung von Rohrknöten effizient, reproduzierbar und mit geringen Fehlerquoten umgesetzt werden kann. Die spezifizierten Vorgaben zur Schweißnahtgeometrie [9] werden eingehalten. Darüber hinaus ist eine vorteilhafte Modifizierung des Schweißnahtöffnungswinkels reproduzierbar und mit vergleichsweise geringem Fertigungsaufwand umsetzbar.

Wesentliche Hausforderungen bestehen in der Erstellung einer Robotertrojektorie für den gesamten Schweißlagenaufbau, die eine Fertigung ohne manuellen Eingriff ermöglicht. So ist die für eine fehlerfreie Schweißung erforderliche exakte Positionierung des Schweißbrenners (TCP) in der Schweißfuge maßgeblich. Für den einraupigen Schweißlagenaufbau im Fülllagenbereich kann dies durch eine Lasermessung vor oder während des Schweißens zuverlässig und automatisiert erreicht werden. Für mehrraupige Schweißlagen, bei denen die Schweißbrennerpositionierung aufgrund ungünstiger lokaler Schweißnahtvorbereitungsgeometrie und Schweißlagengeometrie z.T. komplex ist, ist eine automatisierte Schweißbrennerpositionierung herausfordernd und damit störanfälliger.

Hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit des robotergestützten Schweißens gegenüber dem manuellen Schweißen zeigen die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes, dass auch unter teil-automatisierten Fertigungsbedingungen, bei denen die Schweißbrennerpositionierung z.T. manuell (siehe Kap. 4) erfolgte, eine deutlich erhöhte Produktivität erreicht werden kann. In Bild 28 sind exemplarisch für einen Knoten im Maßstab 1:1 die Fertigungszeiten für eine Strebe dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesamtfertigungszeit um rd. 20% reduziert werden kann. Durch weitere Optimierungen bei den Arbeitsschritten Einspannen des Knotens, Scannen der Nahtvorbereitung und Berechnung der Schweißdaten sowie durch veränderte Schweißprozesse (z.B. Tandemschweißen) ist eine Reduktion der Gesamtfertigungszeit um >30% realistisch. Zu beachten ist weiterhin, dass der Produktivitätsvorteil gegenüber dem manuellen

Schweißen mit zunehmenden Streben-Außendurchmesser und ansteigender Strebenwandstärke zunimmt.

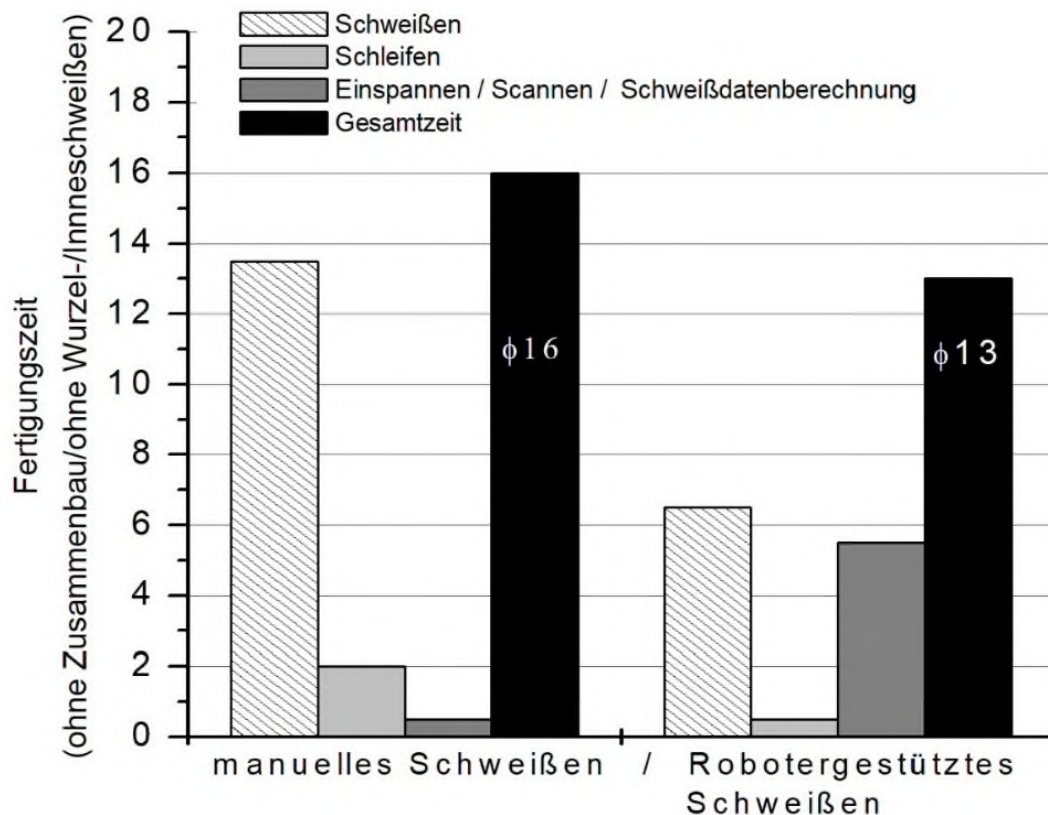


Bild 28: Vergleich der Fertigungszeiten nach dem Zusammenbau und der Wurzellage zwischen dem manuellen und dem automatisierten Schweißen von Knoten im Maßstab 1:1

#### 4.6 Manuelle Fertigung von Rohrknotten

Um eine fundierte Bewertung des Einflusses der Schweißnahtgeometrieoptimierung auf die Rissinitiierung und Rissausbreitung unter Wechselbelastung zu gewährleisten, wurden acht manuell geschweißte Knoten im Maßstab 1:1,5 ohne Schweißnahtgeometrieoptimierung (Optimierungsraupen) hergestellt. Die Schweißnahtvorbereitung ist identisch mit den robotergestützt geschweißten Knoten. Als Vorgabe für die Schweißnahtgeometrie diente [9], wobei ebenfalls eine Beidseitenschweißung ausgeführt wurde. Die Schweißungen erfolgten im gepulsten GMAW-Prozess. Aus Test-Schweißungen an ebenen Erstsatzgeometrien wurde die WPS für die Fertigung abgeleitet, Tabelle 8. Die manuelle Fertigung der acht Rohrknotten ist exemplarisch in Bild 29 gezeigt.

Tabelle 8: Auszug aus der WPS für das manuelle Schweißen von 8 Rohrnoten im Maßstab 1:1,5

Lagen	Zusatzwerkstoff			Schweißstrom [A]	Polung	Streckenenergie [kJ/mm]
	AWS	typ	Name Ø [mm]			
Root pass	ER Ni1	80S-	CARBO-FIL Ni1 1.2	150 – 250	DC+	1.0 – 1.5
Hot pass	ER Ni1	80S-	CARBO-FIL Ni1 1.2	250 – 350	DC+	1.5 – 2.0
Filling passes	ER Ni1	80S-	CARBO-FIL Ni1 1.2	250 – 350	DC+	1.5 – 2.0
Cap passes	ER Ni1	80S-	CARBO-FIL Ni1 1.2	250 – 350	DC+	1.5 – 2.0



Bild 29: Fertigung manuelle Fertigung von KLnoten im Maßstab 1:1,5 mit zugehöriger Schweißnahtgeometrieausbildung

#### 4.7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Teilprojektes erfolgte die robotergestützte Fertigung von 3 Rohrknoten im Maßstab 1:1 und 15 Rohrknoten im Maßstab 1:1,5. Hierfür wurde eine Fertigungsprozedur entwickelt, die basierend auf der bestehenden Anlagentechnik der Firma IGM Robotersysteme eine teil-automatisierte Fertigung unter Einhaltung der Vorgaben zur Schweißnahtgeometrie und der mechanisch-technologischen Kennwerte der Schweißnaht ermöglicht.

Die Ergebnisse dieses Teilprojekts zeigen, dass eine robotergestützte Fertigung von Rohrknoten wirtschaftlich und prozesssicher umgesetzt werden kann. Vorteilhafte geometrischen Modifikationen der Schweißnaht können reproduzierbar erzeugt werden, wodurch ein positiver Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit und damit auf das Gesamtgewicht der Jacketstruktur möglich erscheint.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG 2017), Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien in der ab 20. November geltenden Fassung.
- [2] Tube 2018, FA 09 Tripods, Jackets und Tripiles: Innovative Rohrsysteme für Offshore-Windkraftanlagen, 2018 ([https://www.tube.de/cgi-bin/md\\_wiretube/lib/all/lob/return\\_download.cgi/FA\\_09\\_Innovative\\_Rohrsysteme\\_f%C3%BCr\\_OWEA\\_Fundamente.pdf?ticket=g\\_u\\_e\\_s\\_t&bid=2272&no\\_mime\\_type=0](https://www.tube.de/cgi-bin/md_wiretube/lib/all/lob/return_download.cgi/FA_09_Innovative_Rohrsysteme_f%C3%BCr_OWEA_Fundamente.pdf?ticket=g_u_e_s_t&bid=2272&no_mime_type=0)).
- [3] International Energy Agency (IEA), „Offshore Wind Outlook 2019,“ IEA Publications, Frankreich, 2019.
- [4] Teilprojekt der TU Hannover: Optimierte Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilknoten
- [5] B. Schork, P. Kucharczyk et al., „The effect of the local and global weld geometry as well as material defects on crack initiation and fatigue strength,“ Engineering Fracture Mechanics, Bd. 198, pp. 103-122, 2018.
- [6] Z. Barsoum und B. Jonsson, Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds, Engineering Failure Analysis 18 , 2011, S. 971-979.
- [7] H. Neuber, Kerbspannungslehre, Bd. 3, Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer-Verlag, 1985.
- [8] D. Radaj und M. Vormwald, Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [9] Det Norske Veritas group, DNVGL-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures, 2016.
- [10] DIN EN ISO 19902:2014-01: Erdöl- und Erdgasindustrie - Gegründete Stahlplattformen, 2014.
- [11] P. Schaumann, M. Rethmeier, K. Schürmann und A. Pittner, Quantifizierung der Einflüsse aus Fertigungsautomatisierung und Innenschweißen auf die Ermüdungsfestigkeit von Hohlprofilknoten für OWEA- Schlussbericht FOSTA P1178 - zur Veröffentlichung vorbereitet, Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2020.
- [12] A.F. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components, IIW Document No. IIW-2259-15, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: International Institute of Welding, Springer, 2016.
- [13] R. Lang, Ein Beitrag zur Bestimmung der Anrisslebensdauer geschweißter Bauteile, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2015.
- [14] R. Lang, M. Ladinek und G. Lener, Über die Anpassung des fortschrittlichen Stützwirkungsansatzes für das Kerbspannungskonzept, Berlin, S 470-482: Stahlbau (86), Heft 6, Ernst & Sohn, 2017.
- [15] D. Bowness und M. Lee, „Fracture mechanics assessment of fatigue cracks in offshore tubular structures-Offshore Technology Report 2000/077,“ 2002. [Online]. Available: <https://www.hse.gov.uk/researchH/otopdf/2000/oto00077.pdf>.
- [16] „BS 7910:2013+A1:2015: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures,“ BSI Standards Publication, 2013.
- [17] OTH 92 390, Background to New Fatigue Guidance for Steel Joints and Connections in Offshore Structures, Health and Safety Executive (HSE), 1999.
- [18] A. Schumacher, Fatigue behaviour of welded circular hollow section joints in bridges, Lausanne, Schweiz: Dissertation. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2003.
- [19] C. Borges, „Size Effects in the Fatigue Behaviour of Tubular Bridge Joints,“ Dissertation THÈSE NO 4142- University of Coimbra, Portugal, 2008.

- [20] S. Herion, J. Hrabowski, O. Fleischer, R. J. M. Pijpers, C. Remde und B. Straetmans, Fatigue behaviour of hollow sections joints and high strength steel, CIDECT Report 7AB-3/19-rev1 - Final Draft Report, 2019.
- [21] S. Herion, J. C. Hrabowski, T. Ummenhofer, P. Ladendorf und R. J. M. Pijpers, Erweiterung der Ermüdungsbemessung von K-Knoten mit Spalt aus RHP und KHP auf hochfeste Stähle und dickwandige Profile, Düsseldorf: Final report FOSTA P1132. Hrsg. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., 2020.
- [22] U. Kuhlmann, M. Euler, M. Hubmann, I. Mangerig, A. Hess, Ö. Bucak, A. Fischl, B. Kranz, H. J. und R. Zschech, Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundhohlprofilen mit dickwandigen Gurten, Düsseldorf: Final report FOSTA P815. Hrsg. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., 2014.
- [23] U. Kuhlmann, S. Bove, A. Dürr, Ö. Bucak, J. Roth, R. Steinhausen und C. Pientschke, Wirtschaftliche Auslegung von ermüdungsbeanspruchten, geschweißten Rundhohlprofilknoten unter Berücksichtigung der erforderlichen Schweißnahtqualität, Düsseldorf.: Final report FOSTA P1163. Hrsg. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., 2020.
- [24] G. Zilli, S. A. Karamanos, P. Thibaux, M. Vossbeck, C. Ruiz, F. Gelagoti, R. Kourkoulis, S. A. Mavrakos und D. Manolas, JABACO - Development of Modular Steel Jacket for Offshore Windfarms., Final Report, 2019.
- [25] M. L. Larsen, V. Arora, M. Lützen, R. R. Pedersen und E. Putnam, Use of 3d scan of weld joint in finite element analysis and stochastic analysis of hot-spot stresses in tubular joint fatigue life estimation, Glasgow, Scotland, UK: Proceedings of the ASME 2019 38 th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), 2019.
- [26] CarbonTrust, „JaCo - Improved Fatigue Life of Welded Jacket Connections,“ [Online]. Available: <https://www.carbontrust.com/our-projects/offshore-wind-accelerator-owa/owa-demonstration-projects/jaco-improved-fatigue-life-of>.
- [27] Teilprojekt BAM: Entwicklung adaptiver Prozessführungsstrategien unter Berücksichtigung industrieller Fertigungsrandbedingungen und Bauteileigenschaften
- [28] EN ISO 65071 Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 6507-1:2018
- [29] DNVGL-OS-C401 Fabrication and testing of offshore structures, Edition July 2017