Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

DATIpilot

DATIpilot Modul 1 Innovationssprints

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Kurzbericht und Eingehende Darstellung
öffentlich

Lebensadern für unsere Wirtschaft:
Sichere Verlegung von Gas- und Wasser-Rohrleitungsinfrastruktur durch KI-gestützte Qualitätssicherung

pipe-safe

Institution	Name Projektleitung	Förderkennzeichen
SKZ - KFE gGmbH	Christoph Kugler	03DPS1206

LAUFZEIT: 01.10.2024 – 31.03.2026

Würzburg, den 04.09.2026

Autor*innenschaft: Christoph Kugler, Mingo Kübert, Tobias Eckhardt, Christian Balzer

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Inhalt

1 Kurzbericht 2
1.1 Ausgangslage des Vorhabens 2
1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung 2
1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele 2
1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 2
1.2 Ablauf des Vorhabens 3
1.3 Ergebnisse des Vorhabens 3
1.3.1. Wesentliche Ergebnisse 3
1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 3
2 Eingehende Darstellung 4
2.1 Durchgeführter Arbeitsplan 4
2.2 Erreichte Meilensteine 10
2.3 Erreichte Ergebnisse 11
2.3.1 Erreichung der Gesamtziele 11
2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele 11
2.4 Verwertung 12
2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses 12
2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens 13
2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 13
2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit 13

1 Kurzbericht

1.1 Ausgangslage des Vorhabens

1.1.1. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gesamtziel des Innovations-sprints	Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines KI-Assistenten für Baustellen, der automatisiert Fehler beim Heizelementstumpfschweißen (HS) von Gas- und Wasserrohren erkennt. Bisher erfolgt die Beurteilung von Schweißnähten meist optisch durch erfahrene Fachkräfte, deren Anzahl wegen des Fachkräftemangels sinken wird. Das Vorhaben nutzt Ergebnisse eines früheren Forschungsprojekts, bei dem die Qualität des HS-Prozesses mithilfe eines Wärmestromsensors und Schweißmaschinendaten durch KI erfolgreich beurteilt wurde. Die KI konnte bereits alle Schweißfehler bei Polypropylen und Polyvinylchlorid zuverlässig identifizieren. Der neue Assistent wird einen kommerziellen Microcontroller, ein Display und eine Datenerfassungsschnittstelle umfassen. Bestehende Rohrschweißgeräte auf Baustellen sollen um Heizelemente mit integrierten Wärmestromsensoren erweitert werden. Der gewählte In-Line-Qualitätssicherungsansatz ermöglicht eine sofortige Bewertung der Schweißnaht direkt nach dem Schweißvorgang und benötigt keine zusätzliche Prüftechnik, was nach aktuellem Technikstand auf Baustellen nicht möglich ist. Der Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse in die Praxis erfordert die Bewältigung technischer und soziotechnischer Herausforderungen, wie die Akzeptanz digitaler Assistenten. Hierfür sind frühzeitige, anwendungsorientierte Transfermaßnahmen geplant.

1.1.2. Ursprüngliche wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele
Es wird eine ausreichende Datenbasis für das Training der angestrebten KI-Modelle erarbeitet. Hierfür wird eine am SKZ vorhandene HS-Anlage mit Wärmestromsensoren versehen und eine Hardwareplattform aufgebaut, die alle Prozessüberwachungskenngrößen inklusive Wärmestromsignalen zentral erfasst. Mit dem Gesamtaufbau werden Schweißungen mit einem für Rohre gängigen Polyethylen-Typ durchgeführt, z. B. PE100 RC. Dies beinhaltet sowohl ordnungsgemäße als auch vorsätzlich fehlerhafte Schweißungen. Alle Schweißungen werden zerstörend geprüft, um exakte Werte für deren mechanische Festigkeit zu erhalten und die Prüfdaten den Schweißdaten zugeordnet.
Mit der erstellten Datenbasis wird ein KI-Modell trainiert, das anhand von Prozessdaten die Qualität der Schweißungen hinsichtlich Schweißnahtfestigkeit bewertet. Das KI-Modell soll als Ziel in mindestens 95 % der betrachteten Fälle eine korrekte Aussage darüber zu treffen, ob die Schweißnahtfestigkeit den in den Richtlinien empfohlenen Mindestwert von 90 % der Grundmaterialfestigkeit erreicht hat.
Das trainierte KI-Modell wird in die genannte Hardwareplattform integriert, sodass Prozessüberwachung und -bewertung prozessbegleitend in einem Gerät ablaufen. Die Dauer zwischen Schweißung und Qualitätsaussage soll bei weniger als einer Minute liegen und die Hardwareplattform soll hinsichtlich Größe und Robustheit für den Baustelleneinsatz geeignet sein.

1.1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Vorhaben baut auf langjährigen Arbeiten zum Heizelementschweißen (HS) sowie auf Projekten zur Qualitätssicherung darin auf. Derzeit eingesetzte In-Line-Überwachungssysteme erfassen lediglich indirekte Informationen über die Fügezone, sodass zahlreiche potenzielle Fehler nicht detektiert werden können. Nachgelagerte zerstörungsfreie Prüfverfahren identifizieren nur einen Teil der Defekte. Für belastbare Aussagen zur mechanischen Festigkeit sind weiterhin zerstörende Prüfungen wie Zeitstandzug- oder Zeitstandinnendruckversuche erforderlich, die jedoch keine vollständige Prozesskontrolle ermöglichen. Entsprechend besteht seitens kunststoffschweißender Unternehmen ein hoher Bedarf an kostengünstigen, zerstörungsfreien und zuverlässigen Verfahren zur Vorhersage der Schweißnahtfestigkeit.

Im abgeschlossenen SKZ-Projekt *FloWeld* (IGF 20463N) wurde die Integration von Wärmestromsensoren in das Heizelement untersucht. Diese Sensorik liefert komplementäre Informationen zur etablierten Prozessüberwachung, da sie den tatsächlichen Wärmeeintrag in das Bauteil erfasst. Die Verknüpfung dieser

Daten mit KI-Methoden ermöglichte die zuverlässige Erkennung bewusst eingebrachter Schweißfehler. Eine Patentrecherche zu den Themen Kunststoffschweißen, Qualitätssicherung, Heizelement und KI ergab keine relevanten Konflikte.

Im Projekt *pipeAI* (BayVFP DIK-2005-0034//DIK0143/03) wurden ergänzend Explainable-AI-Ansätze untersucht, ebenfalls anhand eines Anwendungsfalls aus dem Kunststoffschweißen. Die in beiden Projekten verwendeten Datensätze wurden als Open Data veröffentlicht.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Eine kommerzielle Heizelementschweißanlage wurde auf beiden Seiten des Heizelements mit je einem Wärmestromsensor ausgestattet und die Erfassung aller zeitaufgelösten Prozessdaten der Anlage auf einem Messsystem zusammengeführt. Mit der modifizierten Anlage wurden 92 Schweißversuche mit Rohrsegmenten aus PE100 RC, einem für Rohre gängigem Polyethylen-Typ, durchgeführt. Für einige dieser Versuche wurden bewusst Parameter gewählt, die geringe Schweißnahtqualitäten provozierten. Anschließend wurde die Qualität der hergestellten Schweißverbindungen anhand von Kurzzeit-Zugversuchen, technologischen Biegeversuchen und Zeitstand-Zugversuchen bewertet. Die vom Messsystem aufgezeichneten Zeitreihendaten wurden danach so aufbereitet, dass die relevanten Abschnitte des Angleichens und Anwärmens isoliert, die Wärmestromsignale in Wärmestromdichten transformiert sowie eine Verknüpfung mit den Qualitätsmerkmalen der resultierenden Schweißung möglich wurde. Der kombinierte Gesamtdatensatz wurde mit verschiedenen maschinellen Lernverfahren untersucht, um den Schweißfaktor einer Schweißverbindung nur anhand der Prozessdaten vorherzusagen. Das fertig entwickelte Modell wurde exportiert und eine Filewatcher-Architektur auf dem Messrechner bereitgestellt. Dadurch konnte unmittelbar nach Abschluss einer Schweißung der vom Modell vorhergesagte Schweißfaktor angezeigt werden. Das Vorhaben wurde von einem Gremium mit fachlicher und industrieller Expertise begleitet. Die Projektergebnisse wurden regelmäßig vorgestellt und diskutiert; die daraus resultierenden Anregungen flossen in die weitere Projektbearbeitung ein.

1.3 Ergebnisse des Vorhabens

1.3.1. Wesentliche Ergebnisse

Es wurde gezeigt, dass sich der Kurzzeitschweißfaktor bei einem verbreitetem Rohrmaterial prinzipiell mit Zeitreihendaten insbesondere der Wärmestromdichte aus den Schweißdaten inferieren lässt. Allerdings ist für eine größere Genauigkeit eine größere Stichprobe notwendig. Zusätzlich ist es für die Industrie hilfreicher den Zeitstandschweißfaktor zu bestimmen. Auf Grund des enormen experimentellen Aufwands und der langen Prüfzeiten, war dies mit den Mitteln, die im Projekt zur Verfügung standen, nicht abbildbar.

1.3.2. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde vom SKZ allein durchgeführt. Wie geplant wurde jedoch ein Begleitgremium gebildet, welches sich aus Vertretern der Industrie zusammensetzte und dessen Feedback in drei Workshops eingeholt wurde.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Durchgeführter Arbeitsplan

Arbeitspaket	abgeschlossen	nicht abgeschlossen	nicht durchgeführt
Arbeitspaket 1 Kontaktaufnahme und Organisation Zusammenarbeit mit Partnern aus dem industriellen Umfeld	☒	☐	☐
Arbeitspaket 2 Entwicklung der KI für die Vorhersage der Schweißqualität	☒	☐	☐
Unterarbeitspaket 2.1 Aufrüstung der Schweißmaschine	☒	☐	☐
Unterarbeitspaket 2.2 Generierung einer Datenbasis für die KI-Entwicklung	☒	☐	☐
Unterarbeitspaket 2.3 KI-Training und Validierung	☒	☐	☐
Arbeitspaket 3 Aufbau der Hardware für das mobile Gerät	☐	☒	☐
Unterarbeitspaket 3.1 Hardwareauswahl	☐	☐	☒
Unterarbeitspaket 3.2 Bau des Prototyps	☐	☐	☒
Unterarbeitspaket 3.3 Firmwareentwicklung KI-Inferenz System	☒	☐	☐
Arbeitspaket 4 Kontinuierliche Validierung der Projektergebnisse	☒	☐	☐
Unterarbeitspaket 4.1 Projektbegleitende Validierung	☒	☐	☐
Unterarbeitspaket 4.2 Abschlusstest mit Industrieanwendern	☒	☐	☐

Arbeitspaket 1 Kontaktaufnahme und Organisation Zusammenarbeit mit Partnern aus dem industriellen Umfeld

Es wurde Kontakt zu relevanten Stakeholdern aus dem industriellen Umfeld aufgenommen und ein Projektbegleitgremium mit Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen gebildet, darunter Hersteller von Rohrleitungssystemen, Schweißgeräten oder Messtechnik, sowie Prüfdienstleister und Verteilnetzbetreiber. Mit dem Projektbegleitgremium wurden drei Workshops durchgeführt, in denen der Projektstatus kommuniziert und Feedback eingeholt wurde.

Arbeitspaket 2 Entwicklung der KI für die Vorhersage der Schweißqualität
Unterarbeitspaket 2.1 Aufrüstung der Schweißmaschine

Eine am SKZ verfügbare Anlage (2500 S CNC 3.0, Widos) für das Heizelementstumpfschweißen (HS) wurde mit jeweils einem Wärmestromsensor auf beiden Seiten des Heizelements ausgestattet und anschließend mit einem Messverstärker (QuantumX MX840A, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) verbunden, damit die Daten der Wärmestromsensoren parallel zu Kraft und Weg als Funktion der Zeit aufgezeichnet werden konnten. Abschließend wurden fünf Testschweißungen durchgeführt, um den Aufbau zu validieren.

Unterarbeitspaket 2.2 Generierung einer Datenbasis für die KI-Entwicklung

Zusammen mit dem Begleitgremium wurde für die Durchführung des Projekts Polyethylen (PE) 100-RC (Resistant to Crack) als Versuchsmaterial ausgewählt, da es bei Projektbeginn den Standard beim Bau von Kunststoffrohrleitungen darstellte. Da der verfügbare Versuchsaufbau es nicht ermöglichte, komplette Rohre zu fügen, wurden aus vorhandenen Rohren (Durchmesser 110 mm und Wanddicke 10 mm) kleinere Rohrsegmente mit einer Breite von ca. 40 mm präpariert. Dies war die maximale Probegröße, so dass die Fügepartner die Messfläche der verwendeten Wärmestromsensoren (90 mm x 16 mm) nicht überschritten. Für die Schweißparameter wurde sich an der Richtlinie 2207-1 (vgl. Tabelle 1) des DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.) orientiert. Bei den Testschweißungen wurde eine Angleichzeit von 60 s festgelegt, in der im Durchschnitt die geforderte Wulsthöhe von 1,5 mm erreicht wurde. Mit diesen Parametern wurden zunächst 25 Schweißungen durchgeführt.

Tabelle 1: Prozessparameter für das Schweißen von Rohren aus PE gemäß der DVS-Richtlinie 2207-1.

Heizelement-temperatur	Angleich- und Fügedruck	Wulsthöhe nach dem Angleichen bzw. Angleichzeit	Anwärmzeit
220 °C	0,15 N/mm^2	1,5 mm bzw. 60 s	100 s

Für das KI-Training wurden im Anschluss Schweißverbindungen mit der in Arbeitspaket 2.1 umgerüsteten Schweißanlage hergestellt Dabei wurden suboptimale Prozessparameter verwendet, um die mechanischen Eigenschaften der resultierenden Schweißverbindungen gezielt zu mindern. Aus Material- und Prozesssicht war es dafür sinnvoller, die Parameter Zeit, Druck und Temperatur zu verringern als zu erhöhen. Für die erste Versuchsreihe wurde jeweils nur einer der drei Parameter reduziert, während die anderen beiden weiterhin den Werten in Tabelle 1 entsprachen. Die Heizelementtemperatur wurde in 10 °C-Schritten bis 160 °C reduziert (6 Stufen). Die kombinierte Gesamtzeit des Angleichens und Anwärmens von 160 s wurde in 20 s Schritten (Angleichzeit 8 s und Anwärmzeit 12 s) bis 40 s reduziert (6 Stufen). Da der Fügedruck keinen Einfluss auf den Wärmestrom hatte, wurde nur der Angleichdruck in drei Stufen variiert (0,10; 0,05; 0,01 N/mm^2). Damit ergaben sich 15 Parametervariationen, für die je mindestens drei Schweißungen durchgeführt wurden. In Summe wurden so 25 + 15 x 3 = 70 Fügeverbindungen hergestellt.

Begleitend zu den Schweißversuchen wurden die Prozessdaten der in der Schweißanlage integrierten Kraft-, Weg- und Wärmestromsensoren als Funktion der Zeit aufgezeichnet (vgl Abbildung 1) und mit einem Python Skript vorverarbeitet. Durch das Skript wurde der zeitliche Bereich, in dem das Heizelement mit dem Kunststoff in Kontakt war, identifiziert und extrahiert. Anschließend wurde das Wärmestromsignal mit den im Vorgängerprojekt FloWeld bestimmten Systematiken in eine Wärmestromdichte umgerechnet. Damit für das Training eine einheitliche Länge der Datensätze besteht, wurde mit einem sogenannten padding an alle Zeitreihen so viele Nullwerte angehängt, bis die gleiche Länge zum Zeitreihendatensatz mit der maximalen Länge erreicht wurde. Eine Darstellung dieser Daten ist exemplarisch in Abbildung 2 zu sehen. Weiterhin wurden aus den aufbereiteten Daten charakteristische Features der Schweißungen extrahiert. Die Auswahl der Features erfolgte analog zum FloWeld-Projekt (vgl. Abbildung 3). Die extrahierten Features wurden zusammen mit den bereinigten Prozessdaten als .csv Datei abgelegt.

Nach den Schweißversuchen erfolgte eine Bewertung der hergestellten Schweißnahtqualitäten anhand mechanischer Prüfungen. Dazu wurden für jede geschweißte Parametervariation zunächst drei Parallelstäbe mit einer Länge von 170 mm und einer Breite von 15 mm für Kurzzeit-Zugversuche gemäß DVS-

Richtlinie 2203-2 vorbereitet. Bei diesem Versuch wird die Festigkeit einer Schweißnaht durch die Festigkeit des Grundmaterials dividiert und der sogenannte Kurzzeitzug-Schweißfaktor f_Z ermittelt. Die DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 1 fordert für mittels HS gefügtes PE $f_Z \geq 0{,}9$, d. h. eine Schweißnaht muss im Mittel 90 % der Festigkeit des Grundmaterials erreichen. Erfahrungsgemäß erreichen PE-Schweißnähte bei ordnungsgemäßer Durchführung einen f_Z nahe 1,0. Die Durchführung erfolgte mit einer Einspannlänge von 120 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min.

Die Zugprüfungen zeigten, dass alle bis dahin betrachteten Parameterkombinationen trotz teils suboptimaler Zeit-, Temperatur- oder Druckeinstellungen im Mittel einen Kurzzeitschweißfaktor nahe 1,0 erreichten und somit die angestrebte Minderung der Nahtqualität nicht erfolgt war. Deshalb wurde eine zweite Versuchsreihe mit 7 weiteren Parametervariationen durchgeführt, bei der mehrere Parameter gleichzeitig reduziert wurden. Mit der zweiten Versuchsreihe konnten verringerte Schweißfaktoren im Bereich zwischen 0,1 und 0,9 erreicht werden. Insgesamt lagen so 92 Schweißversuche aus 23 Parameterkombinationen als Datenbasis vor.

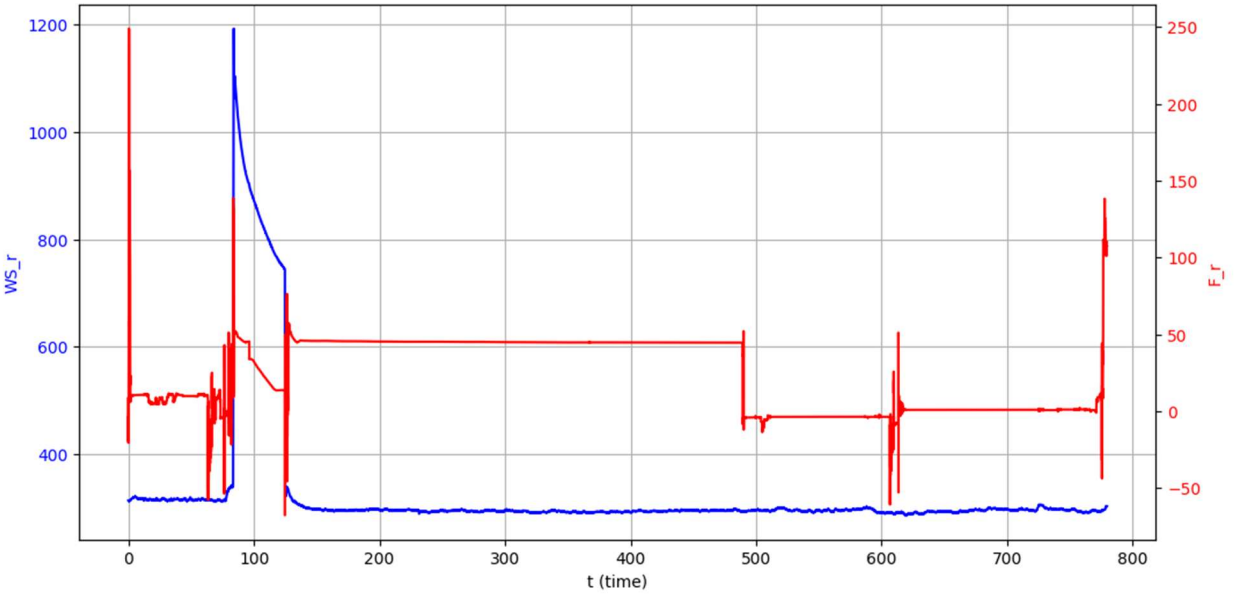


Abbildung 1: Rohdaten der Messung eines Schweißvorgangs. Hier sind das Wärmestromsignal (WS_r) und die Kraft (F_r) auf der rechten Hälfte des Heizelements als Funktion der Zeit in s dargestellt.

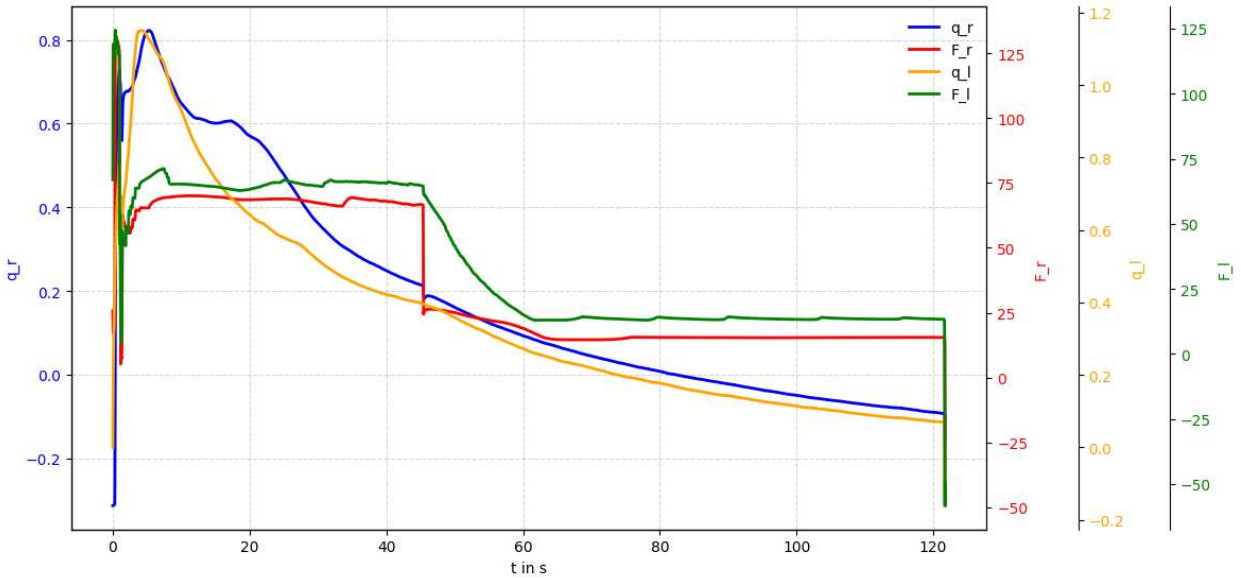
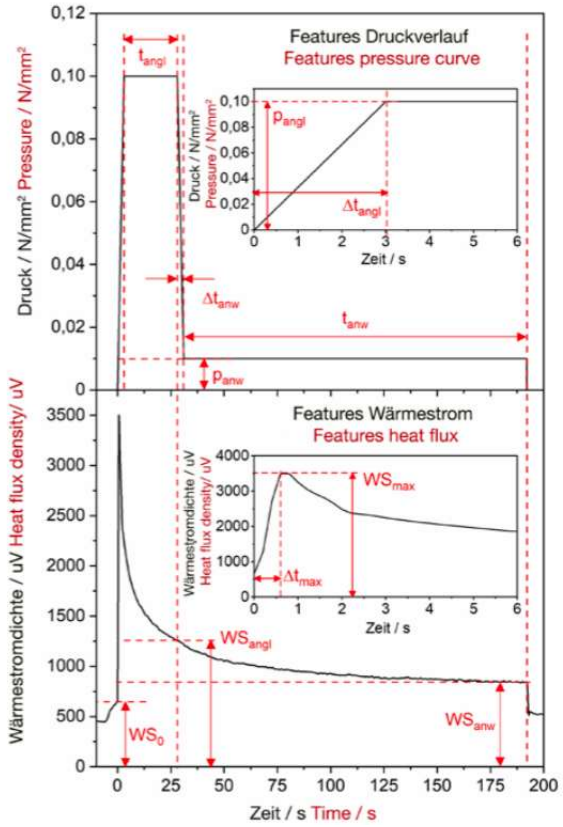


Abbildung 2: Zeitliche Verläufe der Wärmestromdichten (q_r und q_l) und Kräfte (F_r und F_l) jeweils links und rechts vom Heizelement für die 29. Schweißung., nachdem Angleichen und Anwärmen isoliert wurden.



Extrahierte Features (falls verfügbar links und rechts)
Mittlere Kraft beim Anwärmen/Angleichen
Dauer bis das Maximum erreicht wird
Dauer des Anwärmens/Angleichens
Initiale Wärmestromdichte
Wärmestromdichte beim Ende des Angleichens/Anwärmens
Ende des Einschwingvorgangs vor Angleichen
Maximale Wärmestromdichte
Mittlere Kraft beim Anwärmen/Angleichen

Abbildung 3: Schematische Darstellung der extrahierten Features aus FloWeld, zitiert aus https://doi.org/10.53192/JP202403163. Daneben befindet sich die Liste der extrahierten Features für das Modelltraining.

Als weitere Validierung der mechanischen Kurzzeiteigenschaften wurden für jede der 23 Parameterkombinationen technologische Biegeversuche gemäß der DVS-Richtlinie 2203-5 durchgeführt. Dies entspricht einem 3-Punkt-Biegeversuche, bei dem der Winkel bestimmt wird, den der Probekörper vom Start der Messung (Aufsetzen des Biegestempels) bis zu einem sichtbaren Riss oder Bruch zurücklegt. Gemäß der DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 3 muss ein Probekörper abhängig vom Material und seiner Dicke einen Mindestbiegewinkel zurücklegen, bevor es zu einem Riss oder Bruch kommt, um die Anforderungen zu erfüllen. Für eine HS-Verbindung aus PE 100 RC mit einer Probendicke von 10 mm gilt ein Mindestbiegewinkel von 110°. Durchgeführt wurde der technologische Biegeversuch mit einer Stützweite von 90 mm, einer Biegestempeldicke von 8 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min. Die ermittelten Ergebnisse des technologischen Biegeversuchs korrelieren größtenteils mit denen des Kurzzeit-Zugversuchs. D. h. auch beim technologischen Biegeversuch erfüllen alle Probekörper der ersten Versuchsreihe die Anforderungen, während Teile der zweiten Versuchsreihe den Mindestbiegewinkel nicht erreichen. In Summe erfüllte eine Parameterkombination damit entweder den Mindestkurzzeitschweißfaktor und den Mindestbiegewinkel oder keine der beiden Anforderungen.

Als Erweiterung der oben beschriebenen Versuche zur Kurzzeitmechanik der Schweißnähte wurden zur deren Charakterisierung Zeitstand-Zugversuche gemäß der DVS-Richtlinie 2203-4 durchgeführt. Dafür wurden aus den geschweißten Rohrsegmenten Parallelstäbe mit einer Länge von 170 mm und einer Breite von 15 mm hergestellt, die anschließend im oberen und unteren Einspannbereich mit einer Lochbohrung von 4 mm Durchmesser versehen wurden. Vor dem Zeitstand-Zugversuch wurden die Probekörper für mindestens 24 h unter Normklimabedingungen konditioniert und anschließend spannungsfrei für weitere 24 h im Prüfmedium (2%ige Lauraminoxid-Lösung) gelagert. Anschließend wurden die Versuche bei einer Prüfspannung von 4 MPa und einer Prüftemperatur von 90 °C durchgeführt. Dabei kam es in den meisten Fällen zu einer Verstreckung der Probekörper im Bereich der Einspannbohrung, da in diesem Bereich der

kleinste Querschnitt vorliegt. Dies ist hinsichtlich der Schweißnahtqualität als positives Ergebnis zu bewerten, da die Schweißnaht selbst nicht die Schwachstelle des Probekörpers darstellt. Da der Probekörper außerhalb der Schweißnaht versagt, kann bei diesem Befund jedoch kein Zeitstandzug-Schweißfaktor für die geprüfte Schweißverbindung bestimmt werden. Dennoch zeigte sich eine Korrelation der Ergebnisse der Kurzzeit- und Zeitstand-Zugversuche: Alle Probekörper, die im Zeitstand-Zugversuche im Bereich der Einspannung verstreckten, erreichten im Kurzzeit-Zugversuch einen Schweißfaktor von etwa 1,0. Ebenso wiesen die beiden Parameterkombinationen, bei denen im Zeitstand-Zugversuch ein Bruch in der Schweißnaht auftrat, auch verringerten Kurzzeit-Schweißfaktor auf. Insgesamt erlaubten die Ergebnisse der Zeitstandzugversuche allerdings keine weitere Differenzierung der erzielten Schweißnahtqualitäten.

Abschließend wurden die zuvor erfassten mit den Ergebnissen der mechanischen Prüfungen zu einem Datensatz zusammengefasst, der die Basis für das folgende KI-Training darstellte.

Unterarbeitspaket 2.3 KI-Training und Validierung

Zunächst wurde ein sogenannter Train/Test-Split der Daten vorgenommen, bei dem von den insgesamt 92 Datensätzen 73 für das Training vorgesehen und 19 für den späteren Test zurückgehalten wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass in beiden Datensätzen das gleiche Verhältnis an Schweißungen aus der ersten und zweiten Versuchsreihe bestand, um den Bias beider Datensätze so gering wie möglich zu halten. Die Trainingsdaten wurden anschließend nach drei Ansätzen verarbeitet, um den Kurzzeit-Schweißfaktor zu inferieren. Als erstes wurde ein Convolutional Neural Network (CNN) verwendet, für das eine Hyperparameterstudie mit dem optuna-framework durchgeführt wurde, um optimale Parameter zu finden. Dabei wurde der Mean Squared Error (MSE) als Verlustfunktion gewählt und im Verlauf des Trainings optimiert. Im zweiten Ansatz wurden die in AP 2.2 extrahierten Features mit einem XGBoost Modell verarbeitet, dessen Hyperparameter ebenfalls systematisch variiert wurden, um die MSE-Verlustfunktion zu optimieren. Im dritten Ansatz wurde ein weiteres XGBoost Modell trainiert, für das die Zeitreihendaten aller Versuchspunkte durch sogenanntes „flattening“ in ihrer Dimensionalität reduziert wurden, sodass alle Messgrößen (Kraft, Weg, Wärmestrom) nacheinander in nur eine Spalte geschrieben wurden. So konnte das XGBoost Modell die eigentlich tabellarischen Zeitreihendaten verarbeiten, die dabei allerdings ihre zeitliche Dimension verloren.

Die Ergebnisse der drei KI-Trainingsprozessen sind in Tabelle 2 dargestellt. Daran lässt sich erkennen, dass die Performanz der CNN-Architektur in allen Metriken (R^2, MAE, RMSE) hinter den Ergebnissen der beiden XGBoost Architekturen zurückbleibt. Plausibel erscheint, dass mit 73 Trainingsdatensätzen schlicht zu wenig Informationen vorhanden waren, um eine CNN-Architektur aus zwei Schichten mit 128 bzw. 64 Neuronen zu trainieren, ohne zu overfitten. Baummodelle wie XGBoost benötigen für robuste Aussagen hingegen deutlich weniger Datenpunkte, weswegen Ansatz zwei und drei, die den Informationsgehalt der Zeitreihen verdichten bzw. entbündeln, performanter sind als das verwendete CNN.

Tabelle 2: Ergebnisse des KI-Trainings zur Regression des Schweißfaktors.

Trainingslauf Regression	R^2	Mean Absolute Error	Root Mean Squared Error
CNN Zeitreihe	0.7440	0.0946	0.1342
XGBoost Features	0.8213	0.0597	0.1090
XGBoost Flattening	0.8290	0.0666	0.1098

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie gut die oben beschriebenen XGBoost Ansätze Aussagen über die Schweißnahtqualität treffen können, wenn nicht eine Regression, sondern eine Kategorisierung durchgeführt wird. Dafür wurde der laut DVS vorgesehene Kurzzeit-Schweißfaktor > 0,9 als Kategorie „Grün“, ein Schweißfaktor zwischen 0,9 und 0,5 als Kategorie „Gelb“ und Werte < 0,5 als Kategorie „Rot“ festgelegt. Bezogen auf den Gesamtdatensatz ergaben sich so 15 „Rote“, 8 „Gelbe“ und 69 „Grüne“ Datenpunkte. Dabei wurde als Evaluationsmetrik mlogloss gewählt und das F1-macro wurde in einer Hyperparameterstudie optimiert. Die Ergebnisse mit der besten Performanz sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst. Die Abweichungen der F1 scores sind aufgrund des geringen Stichprobenumfangs von 19 Testdatensätzen statistisch nicht abgesichert, d. h. ein Ranking der

beiden Ansätze ist nicht möglich. Die Kategorierisungsergebnisse der optimierten Ansätze sind **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Dabei konnten von 19 Testdatensätzen 17 bzw. 16 richtig kategorisiert werden. Die Mitglieder des Begleitgremiums hoben hervor, dass es sehr wichtig für die Bewertung der Qualität der Modelle sei, dass keine „roten" Schweißungen fälschlicherweise als „gelbe" oder gar „grüne" Schweißungen bewertet werden. Dies war im Rahmen der Untersuchungen nicht der Fall. Allerdings besteht durch die geringe Anzahl an „roten" Schweißungen im Datensatz ein Bias und 19 Datenpunkte im Testdatensatz sind ein sehr kleiner Umfang.

Tabelle 3: Ergebnisse der KI-Trainings zur Kategorisierung des Schweißfaktors.

Trainingslauf Kategorisierung	F1 score micro	F1 score macro
XGBoost Features	**0.8947**	**0.7552**
XGBoost Flattening	**0.8421**	**0.7655**

Tabelle 4: Häufigkeitstabellen der beiden Kategorisierungsverfahren. Links ist die Kategorisierung auf Featurebasis zu sehen und rechts die durch das Flattening.

Kategorisierung auf Featurebasis		
Wahrheit	**Vorhergesagt**	**Anzahl**
Grün	Grün	14
Rot	Rot	2
Gelb	Gelb	1
Gelb	Rot	1
Gelb	Grün	1
Richtig	**Falsch**	**Gesamt**
17	**2**	**19**

Kategorisierung durch Flattening		
Wahrheit	**Vorhergesagt**	**Anzahl**
Grün	Grün	13
Rot	Rot	2
Gelb	Gelb	1
Grün	Gelb	1
Gelb	Grün	2
Richtig	**Falsch**	**Gesamt**
16	**3**	**19**

Arbeitspaket 3 Aufbau der Hardware für das mobile Gerät

Unterarbeitspaket 3.1 Hardwareauswahl

Nach dem Aufrüsten der Schweißmaschine in AP 2.1 stellte sich heraus, dass die Schweißdaten aus dem verwendeten Messverstärker nur mit einer proprietären Software ausgelesen werden konnten. Daher wurde nach reichlicher und umfassender Prüfung der Schnittstellenbeschreibung auf Hard- und Softwareseite beschlossen, dass die Ziele aus AP3 nicht wie avisiert erreicht werden können. Stattdessen sollte der Messrechner, der mit der proprietären Software ausgestattet ist, um eine simple Skriptinfrastruktur erweitert werden, die die Funktionen des eigentlich mobil geplanten Hardwaredemonstrators durchführt. Dafür wurde auf dem Messrechner ein Ordner für ein Filewatcherscript definiert, welches bei jeder neuen Messung aktiv werden und ein python skript starten sollte, um die eingehenden Messdaten zu verarbeiten. Das Skript sollte analog zur Vorverarbeitung in AP2.3 die Schweißdaten bereinigen und nur den Bereich isolieren, der das Angleichen und Anwärmen beinhaltete, sowie das Wärmestromignal in eine physikalische Wärmestromdichte transformieren. Anschließend sollte mit den bereinigten Daten eine Inferenz aus den ML-Modellen errechnet werden und sowohl in einem Fenster auf dem Bildschirm für die Anwendenden deutlich angezeigt als auch in einem Log vermerkt werden.

Unterarbeitspaket 3.2 Bau des Prototyps

Das Ziel in diesem AP war es, die in AP3.1 beschriebene Softwareinfrastruktur zu entwickeln, zu testen und auf dem Messrechner bereitzustellen. Am Ende von AP 3.2 stand eine ausführbare Datei auf dem Messrechner bereit, die einen Hintergrundprozess begann, der über den Windows System-Tray beendet werden konnte. Über eine Config Datei konnten der beobachtete Pfad und der Ablagepfad festgelegt werden. Weiterhin wurde im Filewatcherscript die Schnittstelle für das KI-Inferenz skript hinterlegt.

Unterarbeitspaket 3.3 Firmwareentwicklung KI-Inferenz System

In diesem Arbeitspaket wurden die in AP 2.3 entwickelten KI Modelle mit dem ONNX Framework exportiert und so auf dem Messrechner lauffähig gemacht. Die Modelle wurden in einem simplen python skript hinterlegt, welches auf die vorverarbeiteten Messdaten zugreifen und die Inferenz generieren konnte. Diese Inferenz wurde durch ein Pop-Up auf dem Bildschirm des Messrechners angezeigt sowie in einem Log hinterlegt, um zur späteren Nutzung zur Verfügung zu stehen. Die Architektur war dabei so gestaltet, dass A/B-Testing unterschiedlicher Modelle möglich war. So können zukünftig entwickelte KI-Modelle in Nachfolgeprojekten mit den Modellen aus diesem Projekt verglichen und bei Bedarf ausgewählt werden (Drop-in-KI). Nach Bereitstellung der Modelle im Messrechner wurde die Lösung getestet, indem die Messdaten von bereits durchgeführten Schweißungen in den Ordner kopiert wurden, auf dem das Filewatcherscript aktiv war. Eine Validierung des Setups mit weiteren Schweißversuchen war allerdings im Rahmen der Projektarbeiten allerdings nicht mehr möglich.

Arbeitspaket 4 Kontinuierliche Validierung der Projektergebnisse
Unterarbeitspaket 4.1 Projektbegleitende Validierung

Während der Projektlaufzeit wurde dessen Fortschritt in drei Sitzungen des Begleitgremiums mit den Unternehmen der deutschen Industrie diskutiert. Dabei wurden Anforderungen an eine spätere industrielle Anwendung herausgearbeitet, darunter die zuverlässige Erkennung fehlerhafter Schweißungen, die Übertragbarkeit auf praxisrelevante Rohrdimensionen sowie die Möglichkeit einer zukünftigen Integration in bestehende Qualitätssicherungskonzepte. Besonderes Augenmerk legten die Industrievertreter auf die Bewertung der Langzeitmechanik von Schweißverbindungen, da diese für die praktische Eignung von Rohrleitungssystemen von größerer Bedeutung sind als Kurzzeitkennwerte. Darüber hinaus wurden die erforderlichen Datenmengen für das Training von KI-Modellen sowie die Einbindung zusätzlicher Informationen, wie z. B. eine optischer Wulstbewertung, diskutiert. Die Ergebnisse der späteren Projektphase wurden insgesamt als vielversprechend bewertet, insbesondere da fehlerhafte Schweißungen zuverlässig identifiziert werden konnten. Gleichzeitig wurde betont, dass für eine industrielle Umsetzung weitere Untersuchungen, insbesondere zum Zusammenhang zwischen Prozessdaten, Wärmestromsignalen und Langzeitverhalten der Schweißverbindungen, erforderlich seien. Insgesamt lieferten die Sitzungen wertvolle Impulse für die Ausrichtung der Forschungsarbeiten und bestätigten das Potenzial einer KI-gestützten Qualitätsüberwachung beim Heizelementstumpfschweißen.

Unterarbeitspaket 4.2 Abschlusstest mit Industrieanwendern

Da kein mobiler Schweißassistent entwickelt wurde, konnten die Abschlusstests lediglich von Schweißausbildern des SKZ durchgeführt werden. Positiv hervorgehoben wurde, dass das System unmittelbar nach Abschluss des Schweißvorgangs eine Aussage zur Qualität der Verbindung lieferte. Des Weiteren wurde die Bedienung nach einer kurzen Einweisung als intuitiv und unkompliziert bewertet. Außerdem entstehe kein nennenswerter Mehraufwand, sobald die Wärmestromsensorik in die Schweißmaschine integriert wurde. Für die Testpersonen war jedoch fraglich, ob auf Basis der erfassten Wärmestrom- und Prozessdaten tatsächlich verlässliche Aussagen über die Langzeiteigenschaften der Schweißverbindungen getroffen werden können. Zudem wurde die Wirtschaftlichkeit des Ansatzes hinterfragt, da die Integration der zusätzlichen Wärmestromsensoren mit höheren Investitionskosten verbunden ist. Insgesamt bewerteten die Experten die entwickelte Technologie als praxisnah und anwenderfreundlich, sahen für eine breite industrielle Anwendung jedoch weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der Langzeitanwendungen von Kunststoffrohren und der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit.

2.2 Erreichte Meilensteine

Meilensteine

Beschreibung: messbare Zielparameter, Steuerungsfunktion	Nr.	geplanter Monat	realer Monat	Erläuterung (planabweichend/nicht erreicht)
Die HS-Anlage ist mit Sensorik zur Datenerfassung ausgerüstet. Alle notwendigen Hard-	1	6	7	Leichte Planabweichung aufgrund von Verzögerungen im Betriebsablauf

warekomponenten für den Bau des Prototyps sind ausgewählt und können beschafft werden. Mindestens 5 externe Parteien sind für die Begleitung des Projektes akquiriert.				
Die Datenerfassung aus Schweißungen und mechanischen Prüfungen ist abgeschlossen. Es liegen je Versuchseinstellung bzw. nachgestelltem Anwendungsfehler alle Daten von mindestens 5 Probeschweißungen vor.	2	12	12	Leichte Planabweichung aufgrund von technischen Problemen der Schweißmaschine. Es wurden pro Versuchseinstellung drei Probeschweißungen durchgeführt.
Die Entwicklung des KI-Modells ist so weit abgeschlossen, dass es bei der Validierung mit Testdaten 95 % der Testschweißungen korrekt eingestuft werden. Das KI-Model kann die Inferenz auf dem Hardwareprototyp mit einer Verzögerung von weniger als einer Minute zwischen Schweißung und Qualitätsprognose durchführen. Die Validierung mit Anwendern hat begonnen.	3	16	16	Das beste R^2 was erreicht werden konnte lag für die Regression im Bereich von 82,9 % und die Kategorisierung war in bis zu 89,5 % der Fälle korrekt. Die Inferenz konnte in einer Zeit von deutlich unter einer halben Minute ermittelt und ausgegeben werden.

2.3 Erreichte Ergebnisse

2.3.1 Erreichung der Gesamtziele

Gesamtziel des Innovationssprints	Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines KI-Assistenten für Baustellen, der automatisiert Fehler beim Heizelementstumpfschweißen (HS) von Gas- und Wasserrohren erkennt. Bisher erfolgt die Beurteilung von Schweißnähten meist optisch durch erfahrene Fachkräfte, deren Anzahl wegen des Fachkräftemangels sinken wird. Das Vorhaben nutzt Ergebnisse eines früheren Forschungsprojekts, bei dem die Qualität des HS-Prozesses mithilfe eines Wärmestromsensors und Schweißmaschinendaten durch KI erfolgreich beurteilt wurde. Die KI konnte bereits alle Schweißfehler bei Polypropylen und Polyvinylchlorid zuverlässig identifizieren. Der neue Assistent wird einen kommerziellen Microcontroller, ein Display und eine Datenerfassungsschnittstelle umfassen. Bestehende Rohrschweißgeräte auf Baustellen sollen um Heizelemente mit integrierten Wärmestromsensoren erweitert werden. Der gewählte In-Line-Qualitätssicherungsansatz ermöglicht eine sofortige Bewertung der Schweißnaht direkt nach dem Schweißvorgang und benötigt keine zusätzliche Prüftechnik, was nach aktuellem Technikstand auf Baustellen nicht möglich ist. Der Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse in die Praxis erfordert die Bewältigung technischer und soziotechnischer Herausforderungen, wie die Akzeptanz digitaler Assistenten. Hierfür sind frühzeitige, anwendungsorientierte Transfermaßnahmen geplant.	Es wurde ein Demonstrator eingerichtet, der im Technikum Vorhersagen der Schweißfestigkeit trifft. Dies wurde allerdings aus technischen Einschränkungen nicht in einem Microcontroller mit Display, sondern einem Messlaptop erreicht, auf dem eine Softwareumgebung eingerichtet wurde, die neue Messungen direkt auswertet und Inferenzen für den Schweißfaktor ausgibt. Allerdings ist die Genauigkeit der Vorhersage noch nicht bei 95% angelangt und es wird lediglich der Kurzzeitschweißfaktor bestimmt. Für die Industrie wären Langzeitschweißfaktoren die relevantere Größe.

2.3.2 Erreichung der wissenschaftlichen und/oder technischen Arbeitsziele

Geplante konkrete Arbeitsziele	Erfüllung
Es wird eine ausreichende Datenbasis für das Training der angestrebten KI-Modelle erarbeitet. Hierfür wird eine am SKZ vorhandene HS-Anlage mit Wärmestromsensoren verse-	Es wurden 92 Schweißversuche mit PE100 RC durchgeführt, von denen der Kurzzeitschweißfaktor bestimmt wurde. Dies wurde mit der entspre-

hen und eine Hardwareplattform aufgebaut, die alle Prozessüberwachungskenngrößen inklusive Wärmestromsignalen zentral erfasst. Mit dem Gesamtaufbau werden Schweißungen mit einem für Rohre gängigen Polyethylen-Typ durchgeführt, z. B. PE100 RC. Dies beinhaltet sowohl ordnungsgemäße als auch vorsätzlich fehlerhafte Schweißungen. Alle Schweißungen werden zerstörend geprüft, um exakte Werte für deren mechanische Festigkeit zu erhalten und die Prüfdaten den Schweißdaten zugeordnet.	chend technisch aufgerüsteten Maschine ermöglicht. Die Signale der Wärmestromsensoren und von Weg und Kraft wurden mit einem Messverstärker (QuantumX MX840A, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) erfasst. Diese wurden über einen Messrechner gespeichert.
Mit der erstellten Datenbasis wird ein KI-Modell trainiert, das anhand von Prozessdaten die Qualität der Schweißungen hinsichtlich Schweißnahtfestigkeit bewertet. Das KI-Modell soll als Ziel in mindestens 95 % der betrachteten Fälle eine korrekte Aussage darüber zu treffen, ob die Schweißnahtfestigkeit den in den Richtlinien empfohlenen Mindestwert von 90 % der Grundmaterialfestigkeit erreicht hat.	Die Vorhersage des Kurzzeitschweißfaktors konnte im besten Fall nur einen Wert von R^2 = 82 % erreichen. Der F1-micro Score betrug im besten Szenario 0,89.
Das trainierte KI-Modell wird in die genannte Hardwareplattform integriert, sodass Prozessüberwachung und -bewertung prozessbegleitend in einem Gerät ablaufen. Die Dauer zwischen Schweißung und Qualitätsaussage soll bei weniger als einer Minute liegen und die Hardwareplattform soll hinsichtlich Größe und Robustheit für den Baustelleneinsatz geeignet sein.	Es war technisch nicht möglich die vorgesehene Hardwareplattform zu entwickeln, da die Messdaten nur mit einer proprietären Schnittstelle ausgelesen werden konnten. Deshalb konnte kein tragbares, baustellentaugliches Gerät für die Vorhersage und Anzeige der Schweißnahtfestigkeit entwickelt werden. Allerdings war es möglich diesen Prozess auf einem Laborlaptop zu simulieren.

2.4 Verwertung

2.4.1 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

In der Vorhabensbeschreibung wurde angekündigt, dass zum Ende des Projekts ein Prototyp vorliegt, der in einer Laboranwendung unter realen Bedingungen getestet wurde (voraussichtlich TRL 6) und aufgrund des Aufbaus aus industriellen Komponenten schnell zu einem Prototypen für den Einsatz im realen Feld (TRL 7) weiterentwickelt werden kann. Der tatsächlich entwickelte Demonstrator war wie oben beschrieben allerdings nicht mobil erreichte daher nur TRL 5 bis 6.

Weiterhin wurde in der Vorhabensbeschreibung nach Projektende ein Transfer in die reale Anwendung in Aussicht gestellt - wahlweise in Zusammenarbeit mit Schweißmaschinenherstellern oder unabhängigen Unternehmen aus dem Bereich der Mess- und Regelungstechnik. Nach Rücksprache mit dem industriellen Begleitgremium muss der entwickelte Prototyp allerdings Zeitstandschweißfaktoren mit einer deutlich höheren Genauigkeit vorhersagen können, damit eine entsprechende Produktentwicklung wirtschaftlich erfolgreich sein kann. Basierend auf den bisherigen Ergebnissen erscheint die entsprechende Weiterentwicklung des Projektansatzes möglich, bedarf aber weiterer Forschungsarbeiten. Ebenso müsste eine Hardwarelösung unabhängig von den aktuell genutzten, proprietären Schnittstellen realisiert werden.

Eine weitere Detailierung der Verwertung ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Überarbeiteter Verwertungsplan aus der Vorhabensbeschreibung.

		Zeithorizont	**Anmerkung nach Projektende**
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	Die Ergebnisse können von unterschiedlichen Unternehmen der Wertschöpfungskette der Rohrverlegung genutzt und in kommerzielle Systeme überführt werden. Diese Unternehmen umfassen Hersteller von Schweißmaschinen, Hersteller von Messsystemen und Anwender von Rohrschweißtechnik.	2 Jahre nach Projektende	Für die Industrie ist die Zeitstandschweißfestigkeit die relevante Größe. Deren Vorhersage wird erst weiteren Forschungsarbeiten möglich. Daher sind 5 Jahre realistischer
	Aufbauend auf dem entwickelten Assistenten können auch ähnliche Systeme für andere Schweißprozesse	3-5 Jahre nach Projektende	Prinzipiell vorstellbar, allerdings ist dies abhängig von der

	(Ultraschall-, Muffen-, Reibschweißen etc.) entwickelt und kommerziell angeboten werden.		Realisierbarkeit einer Hardwarelösung.
Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	Die Projektergebnisse fließen direkt in die Ausbildungsaktivitäten des SKZ selbst und der Universität Würzburg sowie der Technischen Hochschule Würzburg-Schweinfurt ein.	Nach Projektende	Wird so bereits durchgeführt.
	Die Ergebnisse werden über Tagungsbeiträge bzw. Zeitschriftenbeiträge und Social Media veröffentlicht, sodass diese sowohl in der Wissenschaft als auch Industrie genutzt werden können.	Nach Projektende	Wird so bereits durchgeführt.
	Die im Projekt erhobene Datenbasis wird als opendata veröffentlicht, sodass auch weitere Entwicklungen von datenbasierten Assistenzsystemen davon profitieren können.	Nach Projektende	Noch ausstehend, aber realisierbar
	Basierend auf den Ergebnissen können KI-Assistenten für verwandte Prozesse entwickelt werden (Ultraschall-, Muffen-, Reibschweißen etc.).	Nach Projektende	Es sind weitere Forschungsvorhaben denkbar und teilweise geplant
	Abhängig vom Projektergebnis ist die Ausgründung eines Unternehmens zur Kommerzialisierung und Vermarktung der Ergebnisse denkbar.	2-3 Jahre nach Projektende	Potenziell denkbar.
Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	Basierend auf den Ergebnissen können KI-Assistenten für verwandte Prozesse entwickelt werden (Ultraschall-, Muffen-, Reibschweißen etc.).	Nach Projektende	Es sind weitere Forschungsvorhaben denkbar und teilweise geplant.
	Die entwickelte Hardwareplattform kann als Ausgangsbasis für weitere KI-Assistenten in handgeführten Werkzeugen genutzt werden.	1-2 Jahre nach Projektende	Nach Lösung der Problematik der Hardwareschnittstellen denkbar. Allerdings 3-4 Jahre.
	Die entwickelten KI-Systeme können als Grundlage für effiziente Qualitätsbewertungssysteme in industriellen Prozessen genutzt werden.	1-2 Jahre nach Projektende	Möglich, sofern ein umfassender Datensatz für Zeitstandzugversuche generiert wurde.

2.4.2 Fortschritt Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens

Der Forschungseinrichtung sind im Verlauf des Vorhabens keine Fortschritte Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

2.4.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgt:

- Veröffentlichung auf SKZ-Website: https://www.skz.de/forschung/projekt/pipe-safe
- Pressemitteilung: https://www.skz.de/presse/wie-kuenstliche-intelligenz-unsere-infrastruktur-sichert
- Vortrag “Ultrasonic TECH DAYS 2026”, 25.06.2026, Karlsbad
- Vorträge Expertenkreise „Thermisches Fügen“, 25.09.2024 und 30.09.2025, Würzburg
- LinkedIn-Post: https://de.linkedin.com/posts/skz-%E2%80%93-das-kunststoff-zentrum_gl%C3%BCckwunsch-activity-7170761478105481216-UzqI

Geplant:

- Vortrag “Digital Innovation Days”, 28./29.09.2026, Würzburg
- Vortrag Expertenkreis „Thermisches Fügen“, 05.10.2026, Würzburg

2.4.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die durchgeführten Arbeiten entsprechen dem begutachteten und bewilligten Antrag. Der Einsatz, der im Rahmen des Forschungsvorhabens beschäftigten Mitarbeiter, erfolgte entsprechend den Erfordernissen der zu leistenden Arbeit und war angemessen sowie notwendig.