Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben 01IF22120N

Thema

Berührungslose Temperaturüberwachung zur Qualifizierung des Flammrichtens von Aluminium im Schiffbau (SpectroStraight)

Zeitraum

01.01.2022 bis 30.06.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM)

Forschungseinrichtungen

Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. (INP)

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FSM-Bericht 10/2026

Berührungslose Temperaturüberwachung zur Qualifizierung des Flammrichtens von Aluminium im Schiffbau (SpectroStraight)

von

Dipl.-Phys. Gregor Gött, Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uhrlandt

Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. (INP)

M.Sc. Anton Konstanz, Dr.-Ing. Oliver Brätz, Dr.-Ing. Andreas Gericke,
Prof. Dr.-Ing. habil. Knuth-Michael Henkel

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM*)*
Steinhöft 11
20459 Hamburg
Deutschland

Tel.: +49 40 69 20 876-0
E-Mail: info@fsm-net.org
Internet: www.fsm-net.org

© 2026
Alle Inhalte dieses Berichtes,
wie Text, Abbildungen und Tabellen,
sind urheberrechtlich geschützt

Projektträger für das

DLR Projektträger

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Schlussbericht vom 31.10.2025

zum IGF-Vorhaben 01IF22120N

Thema

Berührungslose Temperaturüberwachung zur Qualifizierung des Flammrichtens von Aluminium im Schiffbau (SpectroStraight)

Berichtszeitraum

01.01.2022 bis 30.06.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e. V. (FSM)
Steinhöft 11
20459 Hamburg

Forschungseinrichtung(en)

INP Greifswald
Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e. V. (INP)
Felix-Hausdorff-Str. 2
17489 Greifswald

Fraunhofer-Gesellschaft e. V.,
Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP
Albert-Einstein-Str. 30
18059 Rostock

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Inhaltsverzeichnis

Projektmotivation **5**

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse **15**

1.1 Arbeitspaket 1: Analyse der Flammenstrahlung [INP] 15

1.2 Arbeitspaket 2: Materialcharakterisierung und Auswahl geeigneter Verfahren und Prozessparameter zum Schweißen und Flammrichten [IGP] 16

1.3 Arbeitspaket 3: Ermittlung der Wellenlängenbereiche für Aluminium [INP] 19

1.4 Arbeitspaket 4: 3D-Temperaturfeldverteilung und Reaktionskräfte aus Schweißprozess an Kleinprüfkörpern [IGP] 22

1.5 Arbeitspaket 5: 3D-Temperaturfeldverteilung und Reaktionskräfte während des Flammrichtens an Kleinprüfkörpern [INP, IGP] 23

1.6 Arbeitspaket 6: Messtechnikentwicklung [INP] 25

1.7 Arbeitspaket 7: Mechanisch technologische Prüfungen nach thermischer Exposition [IGP] 28

1.8 Arbeitspaket 8: Integration Temperaturfeld-/Reaktionskräftedaten in das Messsystem [INP, IGP] 29

1.9 Arbeitspaket 9: Übertragung auf repräsentatives schiffbauliches Modell (Mikropaneel) [IGP] .. 30

1.10 Arbeitspaket 10: Feldversuche und Ableitung optimierter Richtparameter [INP, IGP] 34

2 Verwendung der Zuwendung **36**

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit **36**

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten **37**

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft **38**

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen **39**

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit **40**

8 Literaturverzeichnis **41**

9 Anhang **42**

Projektmotivation

Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Der deutsche Schiffbau ist geprägt von einer starken Ausrichtung nach Spezialschiffen und innovativen Lösungen sowie Einzelprodukten. Dazu zählen insbesondere zivile Kreuzfahrtschiffe, Großyachten sowie staatlich-institutionell genutzte Wasserfahrzeuge, wie Küstenschutz- und Patrouillenboote. [1]

Aufgrund der ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit sowie der geringen Dichte im Zusammenhang mit der geforderten Einsparung von Treibstoff und schädlicher Emissionen wird verstärkt auf unterschiedliche Aluminiumlegierungen bei der Fertigung des Schiffskörpers zurückgegriffen (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Aluminium-Yacht in Fertigung (Quelle: MegaYachts).

Bei der Fertigung dieser Aluminiumbaugruppen und -konstruktionen tritt üblicherweise ein hoher schweißbedingter Verzug auf. Dies ist auf die Kombination von vergleichsweise hohem Wärmeausdehnungskoeffizienten, der hohen Wärmeleitfähigkeit sowie des temperaturabhängigen Festigkeitsgradienten von Aluminium zurückzuführen. Zum thermischen Richten von Metallkonstruktionen wird u. a. aufgrund der hohen erzielbaren Wirtschaftlichkeit im Schiffbau, aber auch im Fahrzeugbau, Kranbau und in der metallverarbeitenden Industrie eine gezielte Wärmeeinbringung insbesondere mittels eines Azetylen-Sauerstoff-Brenners eingesetzt (vgl. Abbildung 2).

Abbildung 2: Thermischer Richtprozess mit Richtspuren im Schiffbau (Quelle: Eigene Darstellung)

Dies erfordert die Einhaltung bestimmter Temperaturbereiche (z. B. für Stahl zwischen 600 bis 900 °C [2], für verschiedene Aluminiumlegierungen bzw. Reinaluminium 150 bis 450 °C, [3][4]), um einerseits den Richteffekt zu erzielen und andererseits unzulässige Struktur- und Eigenschaftsveränderungen des Werkstoffes zu vermeiden. Beim manuellen Flammrichten besteht die Gefahr, dass der Flammrichter die Temperatur des Werkstücks nicht genau genug einschätzen kann und das Werkstück überhitzt, da die Flammentemperaturen mehr als 3000 °C betragen. Dies kann zu kritischen Veränderungen der Werkstoffeigenschaften führen und erfordert dann umfangreiche Nacharbeiten. So kann beispielsweise bei den häufig im Schiffbau verwendeten Aluminiumlegierungen der 6xxxer-Reihe (AlMgSi) eine zu hohe

Richttemperatur zu Korngrenzendefekten und signifikanten Entfestigungseffekten führen. Bei den nicht aushärtbaren Al-Legierungen können schon bei Temperaturen von 400 °C Entfestigungserscheinungen aufgrund von Rekristallisationseffekten auftreten.

Während für Serienfertigungen durchaus Ansätze zur numerischen Simulation von Verzug und thermischen Richtprozessen entwickelt wurden [5][6][7], existieren in der schiffbaulichen Praxis kaum technische Richtlinien und Empfehlungen für den Richtschmied bei der Ausführung und in den allermeisten Fällen auch nicht die Möglichkeit bzw. Kapazität der numerischen Simulation aufgrund geringer Losgrößen.

Aufgrund der niedrigen Temperaturbereiche beim Flammrichten von Aluminiumlegierungen ist eine optische Kontrolle der Temperatur des Werkstücks durch den Flammrichter nahezu unmöglich. Zudem treten bei Aluminium keine Glühfarben zur Abschätzung der Oberflächentemperatur auf. Wegen des hohen Risikos der Materialschädigung wird folglich das Flammrichten bisher kaum bei Aluminiumkonstruktionen angewendet. Im Falle von Verzügen des Materials werden bei Aluminium bisher sehr aufwendige Verfahren, etwa das Auftragsschweißen und nachträgliche Schleifen, genutzt, um Vertiefungen auszugleichen, was allerdings auch zu örtlichen Materialdegradierungen führen kann. Ein Ersatz durch einen qualifizierten Flammrichtprozess würde die Produktivität erheblich steigern können oder das Richten bzw. die Behebung von Verzügen überhaupt erst möglich machen. Für die Anwendung des Flammrichtens bei Aluminium ist ein zuverlässiges, möglichst berührungsloses Verfahren zur Temperaturmessung notwendig, das bisher nicht existiert. Da sich ein Maximum der Temperatur in etwa unterhalb der Flamme ausbildet, ist die Oberflächentemperaturbestimmung im Flammauftreffpunkt erforderlich.

Ein berührungsloses Temperaturüberwachungsverfahren mit einfacher Bedienung in Form eines autonomen Geräts, angebracht am Flammrichtgerät, würde dem Flammrichter die geforderte Wärmeeinbringung wesentlich vereinfachen, Fehlern vorbeugen und eine Qualifizierung des Flammrichtprozesses ermöglichen. Darüber hinaus könnte der Anwendungsbereich des Flammrichtens auf andere Werkstoffe, wie etwa Aluminiumlegierungen, die bisher aufgrund der hohen Temperaturempfindlichkeit und der durch Sichtprüfung nicht möglichen Einschätzung der Temperatur mit Flammrichten nur schwer zu bearbeiten sind, einfacher erweitert werden.

Angesichts der weiten Verbreitung von Aluminiumkonstruktionen über den Schiffbau hinaus und der steigenden Bedeutung des Leichtbaus, in dem viele KMU tätig sind, hat die Qualifizierung des Flammrichtens für Aluminium eine besondere Relevanz für KMU. Zudem könnten Hersteller von Flammrichtbrennertechnik, ebenfalls mehrheitlich KMU, ihre Geschäftsfelder erweitern.

Ein wesentlicher Grund, weshalb ein solches qualifiziertes Flammrichtverfahren bisher nicht verfügbar ist, besteht in der Anforderung, die Oberflächentemperatur des Werkstücks berührungslos direkt im Bereich des Flammauftreffpunktes zu analysieren. Insbesondere soll die Temperatur an der Oberfläche des Werkstücks optisch aus einem Blickwinkel, bei dem die Flammenstrahlung die Oberflächenstrahlung überlagert, quantifiziert werden. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, die Oberflächenstrahlung von der Flammenstrahlung durch geeignete spektrale Diagnostik zu trennen und mittels pyrometrischer Verfahren auszuwerten. Hier sind aber umfangreiche physikalische Untersuchungen zum Strahlungsverhalten von Flamme und Werkstück erforderlich, die unter anderem Gegenstand dieses Projekts sein sollen.

Ein weiteres wissenschaftliches Problem ist die geeignete Festlegung von Prozesstemperaturen und –zeiten, um optimale Richteffekte zu erzielen, was ebenfalls im Fokus dieses Projekts steht. Dabei sollen

legierungsabhängig Veränderungen der Materialeigenschaften des Werkstücks vermieden oder in den geforderten Grenzen gehalten werden, um beispielsweise eine Entfestigung der Werkstoffe zu vermeiden.

Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Das angestrebte Forschungsergebnis, das „Verfahren zur berührungslosen Temperaturüberwachung beim Flammrichten“, zielt insbesondere auf die breite Anwendung für das Flammrichten von Aluminiumblechen und dessen Qualifizierung im Schiffbau ab. Hier gewinnt das Richten von Blechen und Profilen zur qualitätsgerechten Ausführung insbesondere von Rumpf-, Decks- und Seitenbereichen, welche mit Längs- oder Querspanten ausgesteift werden müssen, zunehmend an Bedeutung. Erforderliche Nacharbeiten bei alternativen Verfahren stellen für KMU infolge des teilweise erheblichen Umfangs und der schweren Vorhersagbarkeit bei kleineren Serien oder sich häufig ändernden Konstruktionen im Rahmen eines flexiblen Produktportfolios ein besonderes Problem dar. Dazu zählt insbesondere das im Vergleich zum Flammrichten erheblich langsamere und aufgrund der hohen Lichtbogentemperaturen schwer zu kontrollierende Richten mittels WIG-Lichtbogen. Das induktive Richten ist aufgrund der paramagnetischen Eigenschaften sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit mit geringen Wirkungsgraden verbunden und kann nach aktuellem Stand nur im Feinblechbereich eingesetzt werden.

Eine Erweiterung des Anwendungsbereichs des Flammrichtens auf Aluminiumlegierungen im Schiffbau bietet ein erhebliches Innovationspotential durch Einsparung von Material und Arbeitszeit gegenüber alternativen Nachbehandlungsverfahren. Der hierdurch mögliche Übergang zu dünneren Blechdicken würde auch die Ressourceneffizienz steigern.

Eine Übertragung auf andere Bereiche der Metallverarbeitung, etwa den Fahrzeugbau und den Kranbau, bietet ein vielfältiges Potenzial insbesondere für die in diesem Bereich tätigen KMU.

Stand der Forschung und Entwicklung

Zur berührungslosen optischen Messung bzw. Kontrolle von Oberflächentemperaturen sind eine Reihe von Verfahren etabliert. Diese basieren generell auf der Auswertung der Oberflächenstrahlung, deren Intensität mit der Temperatur skaliert und deren Wellenlängenabhängigkeit sich zumeist durch eine Planck’sche Funktion beschreiben lässt und einer Kontinuumsstrahlung entspricht. Die wellenlängenabhängige Strahlungsintensität von realen Oberflächen (z. B. Metalle) liegt unterhalb der eines idealen schwarzen Strahlers und unterscheidet sich um die ebenfalls wellenlängen- und temperaturabhängige Emissivität. Bei Kenntnis dieser Emissivität können Verfahren bzw. Geräte, beispielsweise Thermokameras, eingesetzt werden, deren Bilder bei ausgewählten Wellenlängen zumeist im Infrarotbereich gemäß der sogenannten Ein-Farben-Pyrometrie in Temperaturprofile umgerechnet werden können. Im Falle unbekannter Emissivität können sogenannte Zwei-Farben-Pyrometer eingesetzt werden, die bei Annahme gleicher Emissivität die Temperatur aus dem Vergleich von Bildern in zwei Wellenlängenbereichen ermitteln [8]. Beide Prinzipien werden sowohl für bildgebende Verfahren als auch für punktförmige oder räumlich integrierende Messungen eingesetzt.

Wird die zu vermessende Oberfläche abgeschattet, ist im Allgemeinen keine Messung möglich. Bei Abschattung durch ein selbst strahlendes Objekt wie etwa eine Flamme oder einen Lichtbogen besteht jedoch die Aussicht, dass diese Objekte in Wellenlängenbereichen, in denen sie selbst nicht oder nur wenig strahlen, auch kaum absorbieren und für die dahinter erzeugte Oberflächenstrahlung transparent sind. Um diese so modifizierte Strahlung auszuwerten, sind detaillierte Kenntnisse insbesondere zur

wellenlängenabhängigen Transmission notwendig. Entsprechende Ansätze wurden unter anderem in Forschungsarbeiten zum Lichtbogenschweißen untersucht [9]. Verfahren für das Flammrichten auf dieser Basis existieren nach den bisherigen Recherchen nicht.

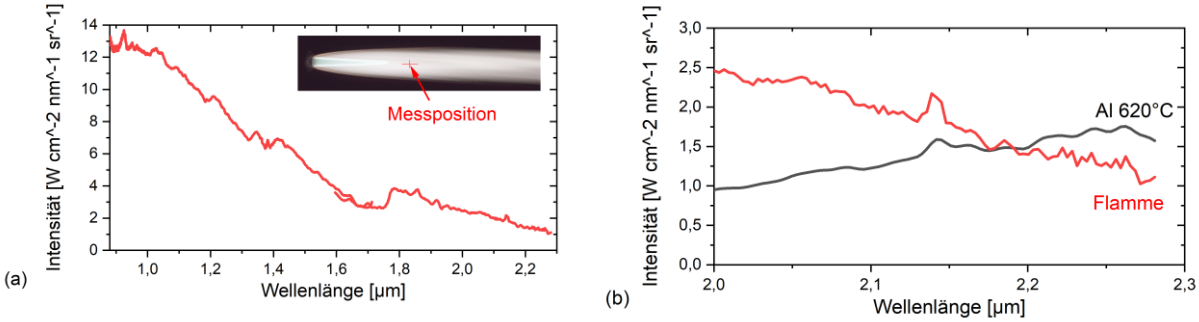


Abbildung 3: Messungen der absoluten Strahlungsintensität einer Azetylen-Sauerstoff-Flamme (a) und eines durch Ohmsche Wärme erhitzten Aluminiumdrahtes im Vergleich (b)

Voruntersuchungen zur spektralen Charakteristik erfolgten bei Forschungsstelle 1 (INP) insbesondere zu Azetylen-Flammen, wie sie beim Richten von Stahl- und Aluminiumblechen angewendet werden. Es zeigte sich, dass Azetylen-Flammen nur in begrenzten Wellenlängenbereichen emittieren bzw. absorbieren**.** Parallel dazu wurde die Kontinuumsstrahlung erhitzter Bleche aus Aluminium untersucht. Sie ist bei den hier zu untersuchenden Temperaturen im Wellenlängenbereich von 1 bis 10 µm von Interesse.

Wie Abbildung 3a zeigt, sinkt die Intensität der Flammenstrahlung mit steigender Wellenlänge im Bereich von 1 bis 2 µm deutlich ab. Die Kontinuumsstrahlung von Aluminium-Oberflächen bei Temperaturen um 600 °C steigt dagegen bei Wellenlängen um 2 µm bei Erhöhung der Wellenlänge an und übersteigt die spektrale Intensität der Flamme im Beispielexperiment bei ca. 2,2 µm, wie in Abbildung 3b anhand der Messungen für eine eingestellte Temperatur eines Aluminiumdrahtes illustriert ist. Die Flamme wird also zunehmend transparent für die Strahlung der Aluminiumfläche mit wachsender Wellenlänge. Die Voruntersuchungen zur spektralen Charakteristik mussten sich auf Grund der zur Verfügung stehenden Spektrometer auf den Bereich bis knapp über 2 µm beschränken, sollen aber im Forschungsvorhaben erweitert werden.

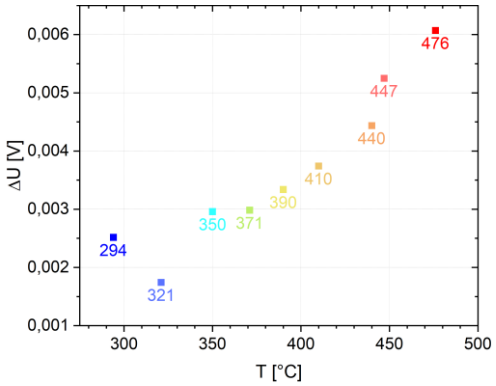


Abbildung 4: Messsignal eines Pyrosensors in Abhängigkeit der Temperatur des erhitzten Aluminiumblechs.

Betrachtet man für das Richten von Aluminium Temperaturen bis hinab zu 350 °C, so reichen die Maxima der Kontinuumstrahlung bis in den fernen Infrarotbereich (Maximum bei ca. 3 µm für 700 °C und bei ca. 5 µm für 350 °C). In weiteren Voruntersuchungen konnten erste potenzielle Infrarot-Photodioden

identifiziert werden, die voraussichtlich für den relevanten Temperaturbereich geeignet sind. Als Beispiel wurde ein Pyrosensor mit einem Empfindlichkeitsbereich ab 5 µm Wellenlänge untersucht. Das Signal des Sensors wurde für Aluminiumbleche aufgenommen, die auf Temperaturen von 300 bis 500 °C erhitzt wurden. Die Empfindlichkeit der Messung wurde erhöht, in dem ein rotierender Chopper vor dem Sensor eingesetzt wurde. Abbildung 4 zeigt das Differenzsignal des Sensors bei geöffnetem und geschlossenen Chopper über der durch Thermoelemente vermessenen Temperatur des Aluminiumblechs. Mindestens oberhalb 350 °C ergibt sich eine klare Korrelation zwischen dem Sensorsignal und der Temperatur, d.h. das Sensorsignal lässt sich auf eine Temperaturmessung kalibrieren.

Es wird davon ausgegangen, dass die Flammenstrahlung im fernen Infrarotbereich weiter mit der Wellenlänge abfällt und somit auch Messungen der Kontinuumstrahlung von Aluminium durch die Flamme hindurch möglich sind. Diese Annahme steht unter dem Risiko, dass die Aluminiumstrahlung bei Temperaturen unterhalb 500 °C in Folge der Emissivität sehr geringe Intensitäten aufweist und auch durch geringste Anteile der Flammenstrahlung gestört werden könnte. Aufgabe der Forschung im Projekt ist es dementsprechend möglichst empfindliche Infrarotsensoren und Messprinzipien zu identifizieren, geeignete Wellenlängenbereiche zu bestimmen und die Grenzen einer Beeinflussung durch die Flammenstrahlung genau zu ermitteln. Im Projekt sollen dafür unter anderem Spektrometer für den Wellenlängenbereich von 2 bis 6 µm aufgebaut und eingesetzt werden, um optimale Methoden zur Separation der Strahlungsanteile von Flamme und Blech abzuleiten.

Wie bei anderen Metallen auch beruht der Erfolg des Warmrichtens komplexer Strukturen auf der Einbringung sogenannter Richtfiguren (z. B. Keile), welche aufgrund der thermischen Expansion bei gleichzeitiger Dehnungsbehinderung zu einer lokalen Materialstauchung bei geringeren Festigkeitseigenschaften führt. Beim Abkühlen kommt es zu einer Kontraktion des vormals erwärmten Bereiches und einem resultierenden Richteffekt. (vgl. Abbildung 5). Materialseitig sind die physikalischen Charakteristika der Wärmeausdehnung bzw. -kontraktion sowie der temperaturabhängigen Warmfestigkeit in Form der Schrumpfkraft beim Erkalten entscheidend für das Richtergebnis. Dieses wird wiederum von den jeweiligen äußeren Faktoren (Einspanngrad, Eigenspannungen/Eigenspannungsabbau, transientes Wärmefeld) beeinflusst. [10]

Aufgrund der komplexen Wirkzusammenhänge wird das thermische Richten bis heute fast ausschließlich manuell ausgeführt und beruht auf der praktischen Erfahrung des Richtschmieds. Wie unter Punkt 2 beschrieben, existieren vielversprechende Ansätze zur numerischen Simulation zur Planung der Schweiß- und Richtfolge komplexer Strukturen (vgl. Abbildung 5). [5] Es existieren allerdings keine Hilfsmittel und Werkzeuge, welche dem Warmrichter bei den praktischen Herausforderungen im Rahmen der Ausführung – insbesondere bei Aluminium – Unterstützung geben zur Einhaltung der Richtfolge.

Der weltweite Stand der Technik zum thermischen Richten von Aluminium ist begrenzt und beschränkt sich überwiegend auf Anwendungsempfehlungen von Herstellern. Hinweise zu konkreten Temperaturfeldern bzw. zur Temperatursensitivität und resultierenden Richteffekten in Abhängigkeit von Material und Halbzeugen sind nicht bekannt. [10][11][12][13]

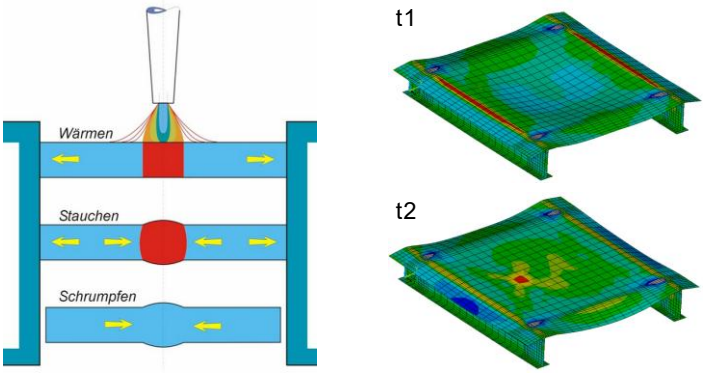


Abbildung 5: Prinzip des thermischen Richtens (links) und numerische Simulation des thermischen Richtens zu zwei unterschiedlichen Prozesszeitpunkten t1 und t2 (Quelle: BTU Cottbus).

In Vorversuchen bei Forschungsstelle 2 (Fraunhofer IGP) konnte in einem eigens konzipierten Versuchsstand gezeigt werden, dass für Aluminiumwerkstoffe eine direkte Abhängigkeit zwischen eingebrachter Wärme und der infolge des Flammrichtvorganges auftretenden Reaktionskraft besteht. Abbildung 6 zeigt den experimentellen Aufbau für die Reaktionskraft- und Temperaturmessung für das Flammrichten an einem Hohlprofil der Aluminiumlegierung EN AW-6082.

Das Hohlprofil wurde für die Behinderung der Wärmeausdehnung und folglich Verstärkung der Richtwirkung einseitig mit einem Niederhalter eingespannt. Das Flammrichten an dem Aluminium-Hohlprofil selbst erfolgte gemäß dem Stand der Technik mit einer leicht Azetylen überschüssigen Flammeneinstellung, einem abstehenden Flammenkegelabstand und einem Wärmekeil als Flammrichtfigur. Für die Ermittlung der Reaktionskraft wurde ein Messbolzen aus Cr/Ni-Stahl verwendet, der mit einem zylindrischen Dehnmessstreifen (DMS) präpariert wurde. Tritt infolge des Flammrichtvorgangs eine Krümmung bzw. ein Verzug am Aluminiumprofil auf, ermöglicht dieser DMS eine Dehnungsmessung, aus der sich die Reaktionskraft bestimmen lässt. Die Temperaturmessung mittels Thermoelement Typ K erfolgte an der Innenseite des Profils im Bereich des eingebrachten Wärmekeils (s. a. Abbildung 6 unten).

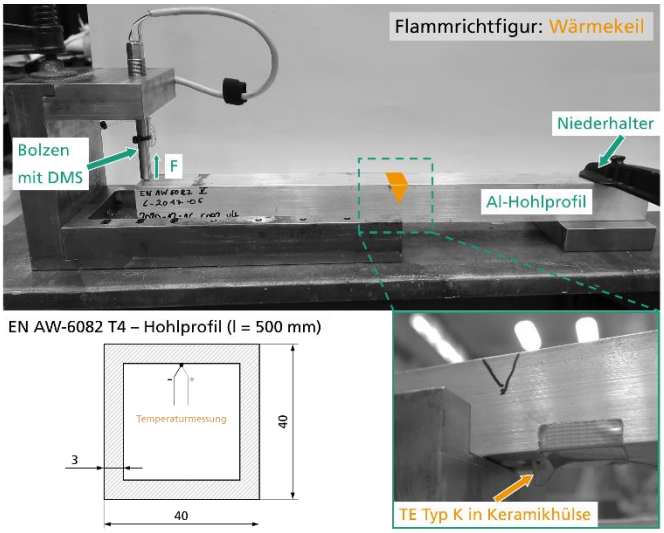


Abbildung 6: Versuchsstand (oben) sowie Abmessungen und Präparation des Thermoelements (unten) zur Reaktionskraft- und Temperaturermittlung für das Flammrichten an einem Aluminium-Hohlprofil.

In Abbildung 7 ist beispielhaft der ermittelte Reaktionskraft- und Temperaturverlauf während eines vierstufigen Richtvorgangs dargestellt. Das Flammrichten als Wärmekeil erfolgte immer an der identischen Richtstelle am Hohlprofil. Während das erste Flammrichten nur einen marginalen Kraftanstieg von 65 N bei einer eingebrachten Temperatur von etwa 130 °C („indirekte“ Flammrichttemperatur) zeigt, lassen sich im zweiten und dritten Flammrichtschritt deutliche Reaktionskraftzuwachse von 450 N (ca. 155 °C) und 300 N (ca. 175 °C) ermitteln. Das vierte Flammrichten bei einer Temperatur von etwa 150 °C weist hingegen wieder nur eine geringe Reaktionskraft auf – hier scheint das Potenzial des Richtvorgangs an ein und derselben Richtstelle erschöpft zu sein.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Temperaturermittlung nicht der realen Flammrichttemperatur entspricht, da die Temperaturmessung an der Innenseite des Profils erfolgte. Nichtsdestotrotz zeigen diese Vorversuche einen direkten Zusammenhang zwischen eingebrachter Wärme (Temperatur) und des entstehenden Verzuges (Reaktionskraft) während des Flammrichtvorganges. Die berührungslose Temperaturmessung der realen Flammrichttemperatur soll dementsprechend Gegenstand des vorliegenden Forschungsantrages sein und folglich zuverlässige Aussagen zwischen korrelierender Temperatur und Richteffekt erzielen.

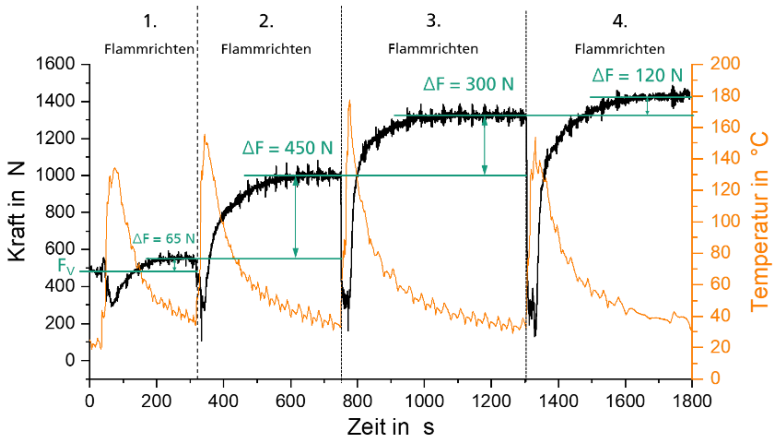


Abbildung 7: Reaktionskraft- und Temperaturverlauf während eines mehrstufigen Flammrichtens an einem Aluminium-Hohlprofil.

Aktuell basieren die Erfolgskontrolle des Richtprozesses, insbesondere beim Richten von Aluminium, sowie dessen Ausführung überwiegend auf der Erfahrung des Flammrichters. Dieser kontrolliert simultan mehrere entscheidende Faktoren (Flammenkegelabstand, -winkel, -richtfigur u. a.), welche zum resultierenden Temperaturprofil im Bauteil beitragen. Entscheidend ist dabei oftmals die subjektiv wahrgenommene Glühfarbe des Bauteils, die aber im Falle von Aluminium nicht zur Verfügung steht. Es kommen derzeit auch Messmittel wie Kontakt- und Infrarotthermometer zum Einsatz. Kontaktthermometer sind allerdings aufgrund der Messträgheit unpraktisch, um die Dynamik des Flammrichtprozesses ausreichend abzubilden. Infrarotthermometer sind, wie oben beschrieben, ungenau aufgrund der Beeinflussung durch die Flamme selbst [4][14][15].

Aufgrund der Komplexität von Eingangsparametern und deren kombinierter Wirkweise (z. B. aus dem Schweißprozess unvorhersehbare resultierende Eigenspannungs- und Verzugszustände der Materialien) sind auch Automatisierungsansätze daher nur bei einfachen Konturen und wiederkehrenden Richtaufgaben anwendbar [16]. Hinzu kommt, dass die örtlich einzubringende thermische Energie sowie das notwendige Temperaturprofil im Bauteil nur mit sehr großem numerischem Aufwand und einem stetigen Grad an Ungewissheit vorab berechnet werden können. Ansätze in [5][6][16][17] zeigen, dass dies prinzipiell

möglich, aber für komplexe Bauteile in Einzel- und Kleinserienfertigungen nicht wirtschaftlich anwendbar ist. Eine exakte Echtzeit-Messmethode zur genauen Temperaturbestimmung ist daher auch eine Grundvoraussetzung zur Erhöhung der Reproduzierbarkeit, der Zuverlässigkeit und des Mechanisierungsgrades beim Flammrichten.

Beim Flammrichten von Aluminium(-legierungen) sind gegenüber Stahl abweichende wärmephysikalische Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Aluminium dehnt sich unter Wärme viel stärker aus als (z. B. unlegierter) Stahl, zieht sich danach aber auch stärker zusammen. Dieses größere Schrumpfungsmaß (lt. [10] für Aluminium ca. Faktor 2,0 gegenüber Stahl mit 1,0) wird bestimmend sein für den Richterfolg am Aluminium.

Günstig für das Vorhaben bzgl. des Flammrichtens an Aluminium sind demnach dessen Eigenschaften wie größere Richtwirkung, geringere Empfindlichkeit der Aluminiumoberfläche gegenüber der Flamme und die Eignung für eine schnelle Abkühlung. Eher herausfordernd sind Faktoren wie das Fehlen von Glühfarben, die Gefahr von (lokalen) Anschmelzungen (Richttemperatur knapp unterhalb der Schmelztemperatur) und die um Faktor fünf höhere Wärmeleitfähigkeit des Materials beim Erwärmen der Richtstelle (λ_{Al} = 220 W/(m·K)) im Vergleich zu Baustahl (λ_{Fe} = 50 W/(m·K)).

Arbeitshypothese

Die Grundannahme zur Erarbeitung eines berührungslosen Temperaturmess-verfahrens für das Flammrichten besteht darin, dass Azetylen-Flammen für die Kontinuumsstrahlung von Aluminiumblechen in bestimmten Wellenlängenbereichen transparent sind. Voruntersuchungen bestätigen diese Hypothese. Bei Auswahl dieser Wellenlängenbereiche können entweder pyrometrische Ein-Farben- oder auch Zwei-Farben-Ansätze verfolgt werden, um die Oberflächentemperatur zu ermitteln. Ein Kontrollverfahren lässt sich zudem ableiten, wenn für den entsprechenden Werkstoff und die Blechdicke der für das Flammrichten optimale Temperaturbereich, mindestens aber die maximal erlaubte Temperatur bekannt sind.

Ferner wird angenommen, dass aus der zu ermittelnden transienten Oberflächentemperatur auf das resultierende Wärmefeld in geeigneter Ausprägung geschlossen werden kann und sich daraus die resultierenden Reaktionskräfte mit ausreichender Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bestimmen und vorhersagen lassen. Die Vorversuche zum Schweißen und thermischen Richten bestätigen diese Vermutung.

Das Forschungsziel besteht in der Qualifizierung das manuellen Flammrichtens von Aluminiumlegierungen mittels Azetylen-Sauerstoff-Brennern insbesondere durch:

- die Konzeption eines berührungslosen Temperaturmessverfahrens durch die Flamme mit der Funktion einer Echtzeit-Kontrollanzeige für den Richtschmied,
- die dafür notwendige Ermittlung geeigneter Wellenlängenbereiche,
- die Konzeption gerätetechnischer Umsetzungsvarianten für pyrometrische Verfahren sowie deren erzielbare Genauigkeit,
- die Ermittlung optimaler Temperaturbereiche für das effektive Flammrichten von Aluminiumlegierungen durch anwendungsnahe Korrelation von Wärmeeinbringung und Reaktionskraft unter Berücksichtigung bereits eingebrachter Spannungen und des Einspanngrades,

- die Ableitung eines Kontrollverfahrens für den Richtschmied durch Kombination berührungsloser Temperaturmessung und Reaktionskraftdaten,
- die Erprobung der Umsetzbarkeit anhand repräsentativer Verfahrensmuster und Feldversuche.

Für die Qualifizierung des Flammrichtens an Aluminium wurden in dem Projekt zwei parallele, aber interagierende Entwicklungsansätze verfolgt werden, die zur Erreichung der Projektziele notwendig waren. Aufgrund der thermophysikalischen Eigenschaften von Aluminium sowie des engen Prozessfensters zum Richten bei nicht vorhandenen optischen Orientierungen durch Glühfarben ist die Kenntnis der aktuellen Oberflächentemperatur an der Flammrichtstelle eine unabdingbare Grundvoraussetzung. Dies soll durch die Entwicklung eines berührungslosen Temperaturmessverfahrens, welche vor allem der Forschungseinrichtung 1 (INP) obliegt, erreicht werden. Zum anderen muss das daraus resultierende Materialverhalten für das tatsächliche Richtergebnis auf Grundlage experimentell ermittelter Modelle an Klein- und schiffbautypischen Großprüfkörpern (Mikropaneele) prognostizierbar gemacht werden, um der Arbeitsvorbereitung sowie dem ausführenden Richtschmied die notwendigen Informationen für eine korrekte und schnell ausgeführte Richtaufgabe zur Verfügung zur stellen. Dafür sollen durch Forschungseinrichtung 2 (IGP) die Zusammenhänge zwischen ursächlichem Schweißverzug, eingebrachter Richttemperatur und resultierenden Reaktionskräften umfassend für verschiedene Richtdetails dokumentiert werden.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet, deren Zusammenwirkung in Abbildung 8 dargestellt ist.

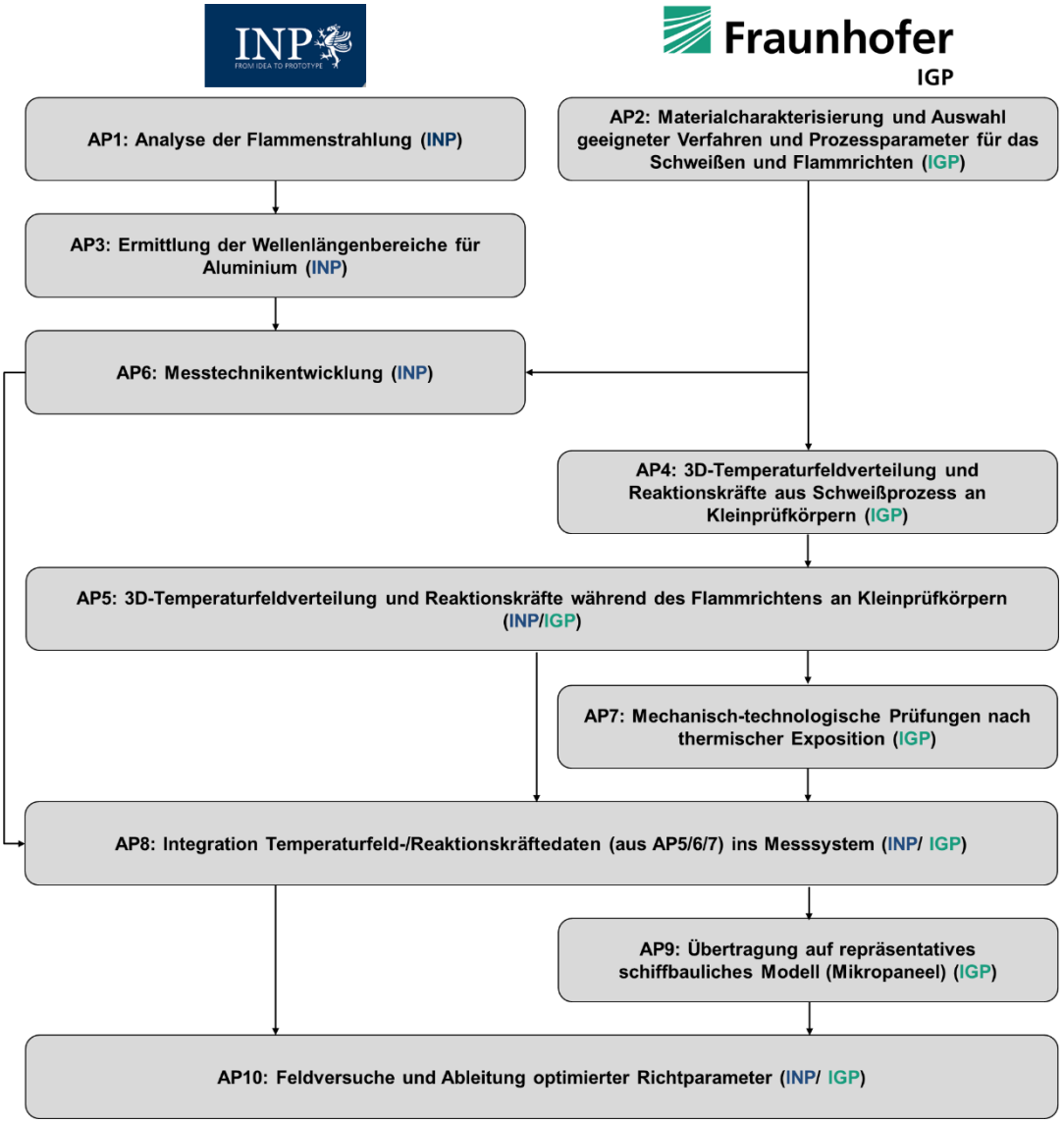


Abbildung 8: Arbeitsplan und Aufteilung der Arbeitspakete beider Forschungsstellen.

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Analyse der Flammenstrahlung [INP]

Abbildung 9 zeigt dazu die spektrale Strahlungsintensität der Azetylen-Flamme im Vergleich zur Wärmestrahlung eines Aluminiumdrahtes, der über seinen elektrischen Widerstand auf 620 C erwärmt wurde. Die Messposition der Strahlungsintensität in der Flamme ist in der Abbildung mit einem roten Kreuz markiert. Die spektralen Verläufe sind über einen Wellenlängenbereich von 2 – 2,3 µm aufgetragen. Ab einer Wellenlänge von ca. 2,2 µm übersteigt die Strahlungsintensität des erhitzten Aluminiums die der Flamme. Eine Differenzierung zwischen der Flammen- und Kontinuumsstrahlung könnte so durch eine geeignete Diagnostik aus AP6 möglich werden und ließe weiterhin eine Rückrechnung auf die Oberflächentemperatur am Messpunkt zu.

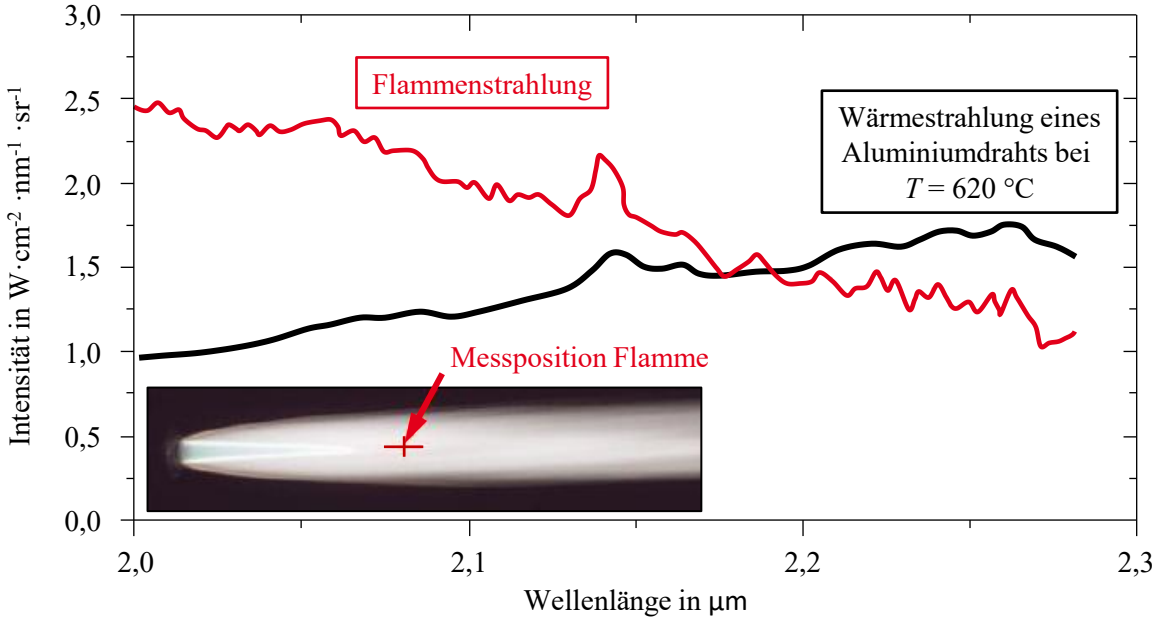


Abbildung 9: Messungen der absoluten Strahlungsintensität einer Azetylen-Sauerstoff-Flamme mittels Infrarot-Spektrometer im Vergleich zu einem durch ohmsche Wärme erhitzten Aluminiumdrahtes (Quelle: INP).

Dies berücksichtigt nur die Zunahme des spektralen Anteils der heißen Aluminiumoberfläche. Betrachtet man des Weiteren die spektrale Verteilung der Flamme unter Berücksichtigung der Molekularstrahlung, lassen sich mögliche Lücken für eine Beobachtung in anderen Wellenlängenbereichen finden (siehe Abbildung 2). Diese transparenten Bereiche können mittels Filter so ausgewählt werden, dass die Störung durch die Flamme so klein ist, dass sie den Sensor kaum noch beeinflusst. Abbildung 2b zeigt zwischen 3500 und 4000 nm eine solchen potenziell nutzbaren Bereich. Generell sollten die Banden von OH*, CH*, C2* und CO2 gemieden werden.

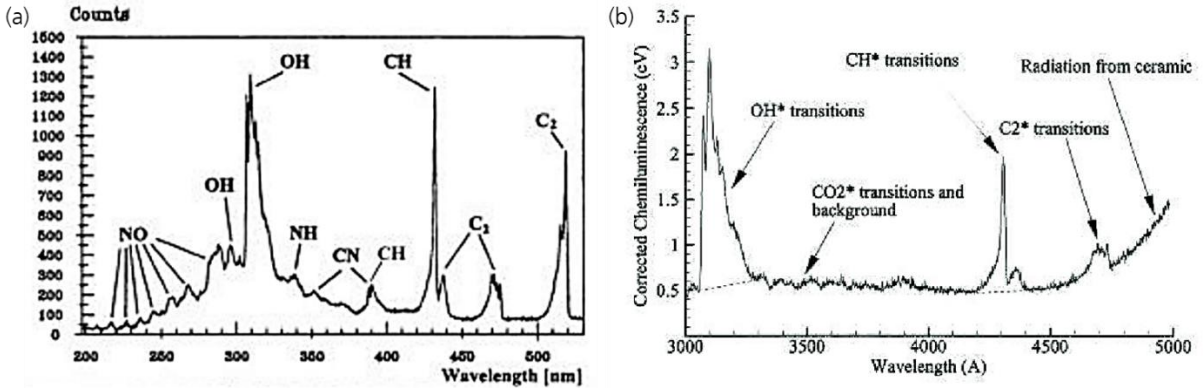


Abbildung 10: (a) Spektrum einer Butan-Sauerstoff-Flamme (Quelle: Obertacke 1969); (b) Spektrum (Quelle: Kathrotia 2011)

1.2 Arbeitspaket 2: Materialcharakterisierung und Auswahl geeigneter Verfahren und Prozessparameter zum Schweißen und Flammrichten [IGP]

Während des ersten Treffens des projektbegleitenden Ausschusses wurde sich vorerst auf eine Aluminiumlegierung für die Untersuchungen geeinigt, da die Legierungszusammensetzung nicht entscheidend für das zu entwickelnde Messsystem ist. Die Legierung EN AW 5083 (AlMg4,5Mn; Zustand: H111) ist demnach für die ersten Schweiß- und Richtversuche zu verwenden. Es wurde sich weiterhin auf zwei Blechdicken (t = 6,0 mm und 20,0 mm) geeinigt. Die Materiallieferung für die chemische und metallurgische Charakterisierung sowie die Schweiß- und Richtversuche fanden durch die Mitglieder des Projektausschusses (PA) statt. Ebenfalls wurden die auf den Werften verwendeten Schweißparameter und Schweißanweisungen von den PA-Mitgliedern zu Verfügung gestellt.

Prozessparameter Schweißen

Als Schweißverfahren wurde PA-übergreifend das MIG-Verfahren festgelegt. Die häufig verwendeten Prozessparameter wurden bei den beteiligten Werften angefragt.

Prozessparameter Richten

Es ist eine Parameterstudie zu verschiedenen Flammeinstellungen der Acetylen-Sauerstoffflamme durchgeführt worden. Dazu wurden die Volumenströme der Prozessgase Sauerstoff O_2 und Acetylen C_2H_2 von Forschungsstelle2 vor Ort bei den beteiligten Werften und relevanten Einrichtungen aufgenommen. Ziel der Studie war es Klarheit darüber zu gewinnen, ob ein zugrundeliegendes festes Verhältnis zwischen den Gasen für die Richtflamme existiert und ob dieses Verhältnis wiederholgenau von Richtschmieden durch die optische und akustische Kontrolle eingestellt werden kann. Die Ergebnisse sind nötig, um reproduzierbare Laboruntersuchungen durchzuführen, die den praktischen Anwendungsfall abbilden.
Die Richtschmiede in den relevanten Einrichtungen wurden gebeten wiederholt folgende Flammenarten einzustellen:

- Neutrale Flamme
- Acetylenüberschuss
- Sauerstoffüberschuss
- spezifische Flamme zum Richten von Aluminium

Tabelle 1 zeigt den aktuellen Stand der Parameterstudie.

Tabelle 1: Stand der Parameterstudie zur Aufnahme der Flammeinstellungen der Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Standort	***Person***
Fraunhofer IGP Rostock	Techn. Mitarbeiter
TAMSEN Maritim GmbH	Richtschmied
SLV Duisburg	Lehrgangsleiter Richtlehrgang
Lürssen Werft GmbH & Co. KG	Richtschmied

Folgende Schweißeinsätze/Düsengrößen wurden für die Parameteraufnahme verwendet:
0,5 – 1 | 1 – 2 | 2 – 4 | 4 – 6 | 6 – 9

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 gezeigt. In Abbildung 11 sind die gemittelten O_2/C_2H_2 – Verhältnisse über die Flammeneinstellung bzw. den Standort der Parameteraufnahme aufgetragen. Sowohl „neutrale Flamme“ als auch „Acetylenüberschuss“ werden sehr ähnlich mit Standardabweichungen von max. 14 % von den Mitarbeitern über die verteilten Standorte eingestellt. Für die Flammeneinstellung „Sauerstoffüberschuss“ bestehen größere Diskrepanzen zum Standort Duisburg und allgemein höhere prozentuale Streuungen von bis zu 34 %.

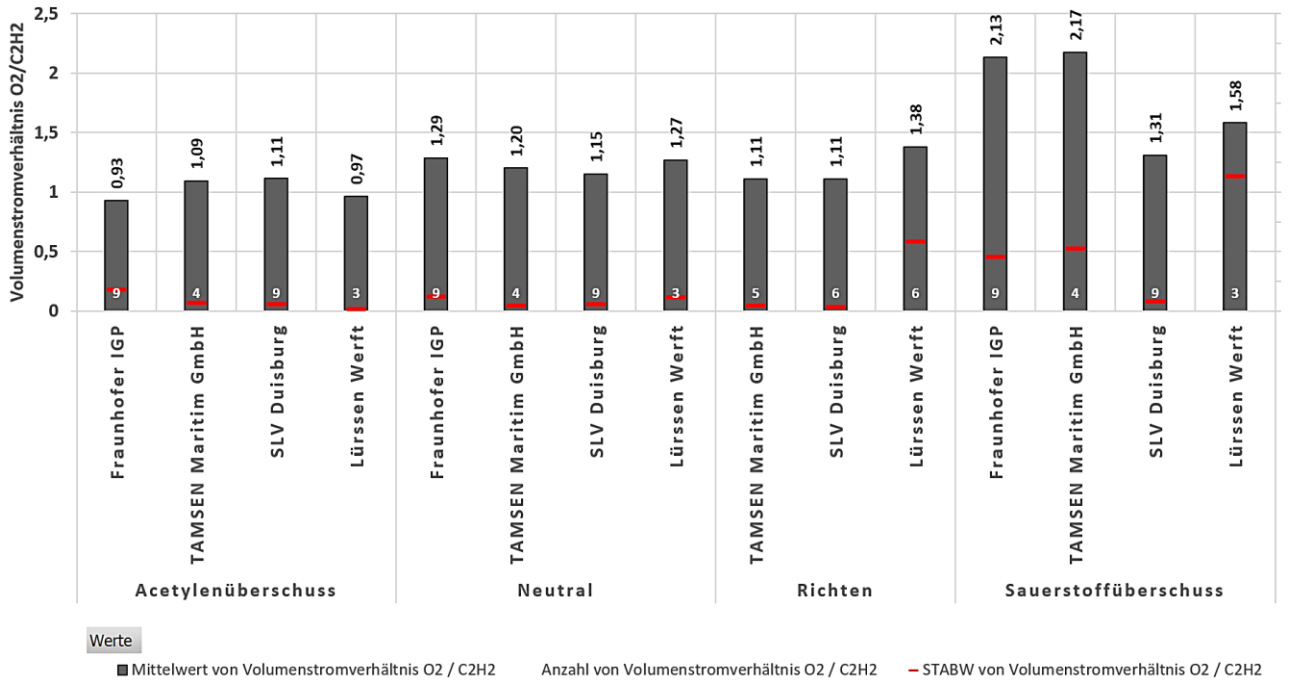


Abbildung 11: Abweichung der mittleren Volumenstromverhältnisse O_2/C_2H_2 nach Flammenart und Standort

Die zusammengefassten standortübergreifenden Ergebnisse sind in Abbildung 12 gezeigt. Mit jeweils 25 Werten je Referenzflammeneinstellung bzw. 17 Werten für die Richtflammeneinstellung errechnen sich die ausgewiesenen Mittelwerte der O_2/C_2H_2 – Verhältnisse mit den folgenden Standardabweichungen:

- Neutrale Flamme: 1,22 ± 0,11 (± 8,7 %)
- Acetylenüberschuss: 1,03 ± 0,14 (± 13,9 %)
- Sauerstoffüberschuss: 1,78 ± 0,61 (± 34,4 %)
- Richtflamme: 1,21 ± 0,35 (± 29,4 %)

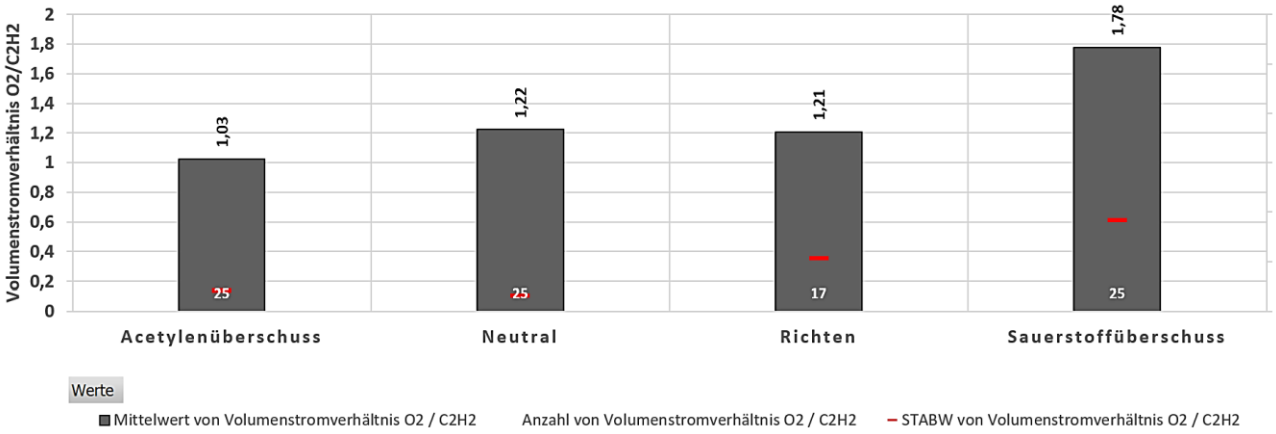


Abbildung 12: Mittlere Volumenstromverhältnisse O_2/C_2H_2 in Abhängigkeit der Flammenart

Ergänzend zu den bereits durchgeführten Tätigkeiten sind im Berichtszeitraum in diesem Arbeitspaket noch weitere Arbeiten durchgeführt worden. Um den Werkstoff zu charakterisieren wurden mechanische und metallurgische Eigenschaften untersucht. Die Untersuchung mechanischer Eigenschaften mittels einer Härteprüfung belegt, dass bei einer Härte von 75 ± 2 HV 0,3 die Zugfestigkeit des Werkstoffes laut gängiger Tabellenwerke bei etwa R_m = 250 MPa liegt.
Die metallurgische Untersuchung zwecks der Identifizierung potenzieller Isotropie des Werkstoffes hat ergeben, dass trotz einer gewalzten Fertigung in allen drei Raumrichtungen keine Richtungsabhängigkeit vorherrscht, siehe Abbildung 13. Das bedeutet, dass sich sowohl der Temperaturgradient als auch die thermische Dehnung in allen Raumrichtungen äquivalent verhält.

Prozessparameter Schweißen

Die von den Werften zur Verfügung gestellten MSG-Prozessparameter waren aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen, bei denen diese ermittelt wurden, nicht zielführend. Die einzelnen Parametersätze sind zum einen von der Charakteristik der verwendeten Schweißanlage und zum anderen von der Strom-Spannungs-Kennlinie der Anlage abhängig, die von jedem Anlagenhersteller individuell entwickelt wird. Eine eigenständige Parameterfindung inklusive einer Parameterstudie war notwendig. Diese ist sowohl für einen Stumpfstoß als auch für eine Kehlnaht ermittelt worden, siehe Abbildung 13.

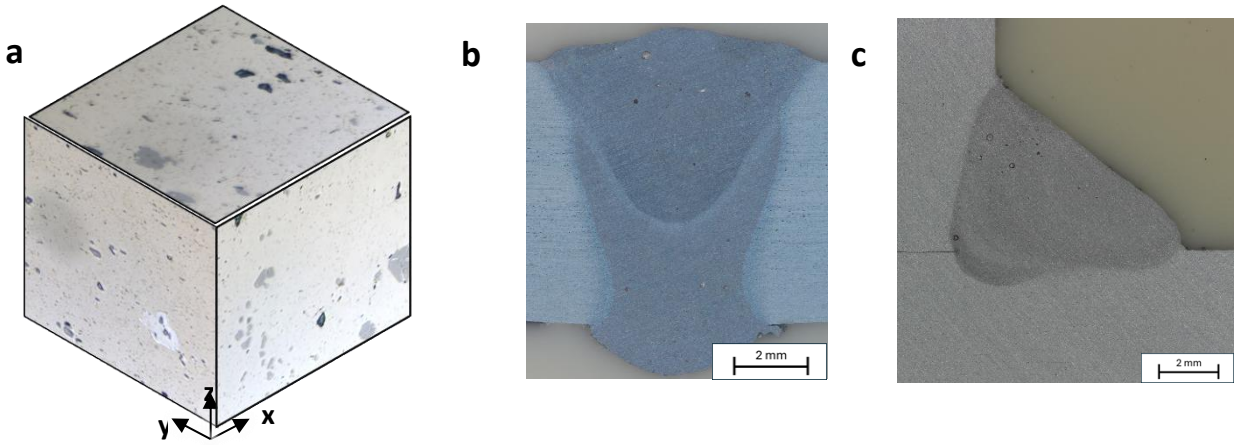


Abbildung 13: a) Schliffbild in 3 Raumrichtungen, Maßstab 25 µm; b) und c) Schliffbilder Stumpf- und Kehlnaht

Um den Flammrichtprozess nummerisch zu modellieren, sind temperaturabhängige mechanische und thermomechanische Materialkennwerte notwendig. Dabei handelt es sich um Fließkurven, Elastizitätsmodul, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und thermische Dehnung bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Werte werden mit der Calphad-Methode simulativ ermittelt. Diese Simulation basiert auf der realen chemischen Zusammensetzung, den physikalischen Gleichgewichtszuständen und thermodynamischen Eigenschaften des Werkstoffes.

1.3 Arbeitspaket 3: Ermittlung der Wellenlängenbereiche für Aluminium [INP]

Für die Planung des berührungslosen Temperatursensors in diesem Projekt ist es notwendig, einen passenden Wellenlängenbereich zu bestimmen, in dem er sinnvoll arbeiten kann. Dafür ist zum einen die zu detektierende Strahlung und zum anderen die störende Strahlung zu berücksichtigen. Aluminiumrichten findet bei geringeren Temperaturen statt, als das Richten von Stahl. Das führt dazu, dass die thermisch emittierte Strahlung ihr Maximum bei höheren Wellenlängen hat (Abbildung 14). Die Abbildung 14 zeigt den berechneten Intensitätsverlauf für einen schwarzen Strahler mit einer Oberflächentemperatur von 500°C, 400°C und 300°C, was eine Näherung der zu detektierenden Strahlung repräsentiert. Man erkennt, dass sich das Maximum der Intensitätsverläufe für sinkende Temperaturen immer weiter nach rechts verschiebt. Außerdem nimmt auch der Absolutwert des Maximums dabei ab. Bereits dieses Verhalten schränkt die Wahl für einen Sensor bezüglich seines Wellenlängenbereiches und der Empfindlichkeit stark ein. Für den hier dargestellten Temperaturbereich, der auch beim Richten von Aluminium relevant ist, sollte die Sensorempfindlichkeit daher im Wellenlängenbereich zwischen 3 und 6 µm liegen.

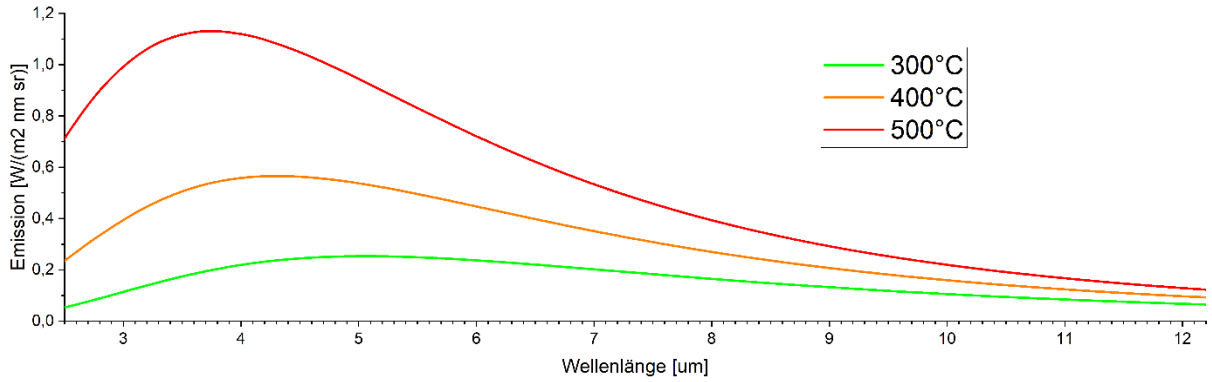


Abbildung 14: Thermische Emission in Abhängigkeit von der Wellenlänge für verschiedene Oberflächentemperaturen.

Die zweite Einschränkung für den Sensor ist die Störstrahlung durch die Richtflamme selbst. Um einen relevanten Wellenlängenbereich für den Sensor festzulegen, sollte diese in einem Bereich liegen, wo wenig bis keine eigene Strahlung der Flamme emittiert wird. Da eine Flamme immer dort absorbierend ist, wo sie auch selbst emittiert, wurden für die Bestimmung dieser Eigenstrahlung Absorptionsmessungen mit dem FT-IR-Spektrometer „Bruker Alpha“ durchgeführt. Diese Absorptionsmessungen sind genauer und empfindlicher als Emissionsmessungen und waren mit weniger Mittelaufwand innerhalb des Projektes zu bewerkstelligen. Für die Messungen wurden Gase verwendet, die auch in einer brennenden Azetylenflamme zu erwarten sind.
In Abbildung 15 ist eine Sammlung aller daraus resultierenden Absorptionsspektren dargestellt. Zur Sicherheit sind auch Gase dabei, die unter Umständen gar nicht in der Flamme vorhanden sind oder nur in geringen Mengen durch Dissoziationsprozesse entstehen könnten. Daraus ergeben sich zwei freie Fenster, in denen vermutlich wenig Emission stattfinden sollte. Das erste liegt zwischen 3,7 µm und 4,2 µm und das zweite zwischen 8,4 µm und 9,1 µm. Da die stärkste Emission vom heißen Aluminium um die 4 µm zu erwarten ist, wurde der erste Wellenlängenbereich bevorzugt.
Dieser Bereich kann an einer breitbandigen Photodiode mit Hilfe eines Metallinterferenzfilters eingegrenzt werden. Das erfordert einen passenden Filter zu finden, der nur in dem Bereich um 4 µm durchlässig ist. Die Kosten für einen solchen Filters liegen im vierstelligen Euro-Bereich, und daher wird der Ansatz mit einem Metallinterferenzfilter hier als nicht geeignet für einen kommerziellen Sensor angesehen. Dafür sind die Anschaffungskosten zu hoch, und diese würden den Preis des Messsystems unattraktiv machen.

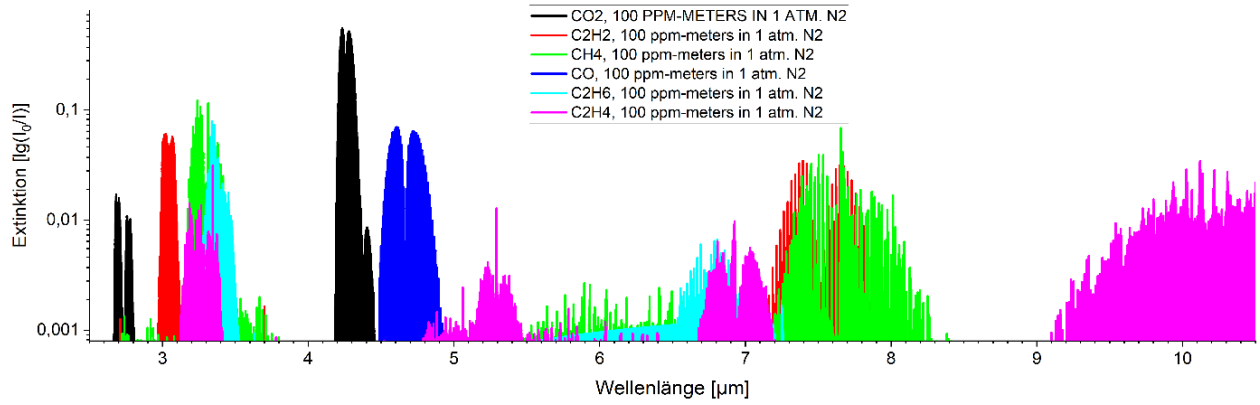


Abbildung 15: Absorptionsspektren für Kohlendioxid, Ethin, Methan, Kohlenmonoxid, Ethan und Ethen gemessen mit einem FT-IR-Spektrometer Alpha von Bruker

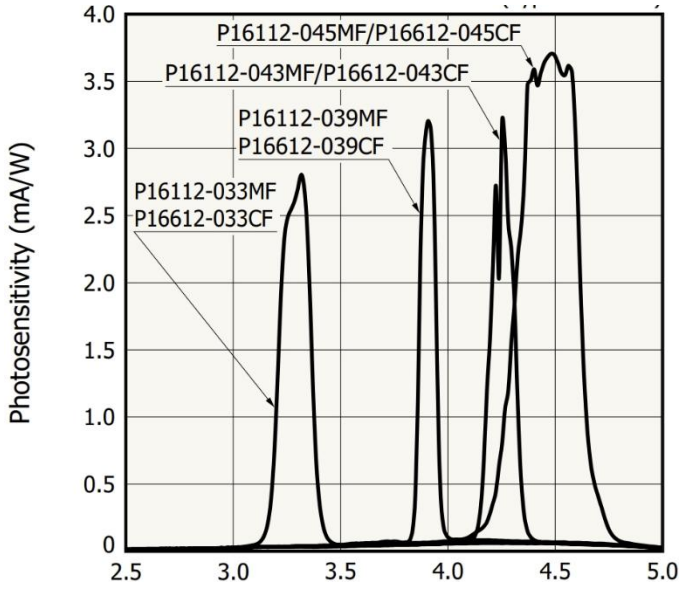


Abbildung 16: Empfindlichkeiten der Photodioden von Hamamatsu im Wellenlängenbereich 2,5 µm bis 5 µm

Nach weiteren Recherchen aktueller Anbieter fielen Photodioden von der Firma Hamamatsu in näheren Betracht. In Abbildung 16 sind die Empfindlichkeitskurven für einige kommerziell erhältliche Photodioden abgebildet. Diese zeigen mögliche Kandidaten für den gewünschten Wellenlängenbereich. Ein wichtiges Kriterium für eine passende Photodiode ist, dass sie quasi blind ist für die Störstrahlung der Acetylenflamme selbst. Überlappungen mit dem Spektrum der Flamme sollten also möglichst gering oder am besten gar nicht vorhanden sein.
Für diese Voraussetzung kamen nur die Photodioden mit der Typenbezeichnung P16112-039 in die nähere Wahl. Um das im Vorfeld zu überprüfen, wurde in Abbildung 17 ihre Empfindlichkeitskurve mit den bereits in Abbildung 15 gezeigten Absorptionsspektren der Acetylenflamme verglichen. Das machte deutlich, dass diese Photodioden in ihrer Messung kaum durch die Flamme gestört werden sollten. Die Schmalbandigkeit der Dioden wird durch die Integration eines kleinen Filters erreicht. Darüber hinaus sind die Kosten für die gesamte Einheit nur noch im zweistelligen Euro-Bereich. Dadurch ist dieser Diodentyp sehr attraktiv und ein potenzieller Kandidat für den Temperatursensor.
Die Signale der Photodioden sind sehr schwach und müssen mit einem Transimpedanzverstärker aufbereitet werden, damit sie durch weitere Elektronik verarbeitet werden können. Die unverstärkten Signale der Photodioden sind außerdem sehr störanfällig. Darum sollte der Übertragungsweg zwischen Diode und Verstärker so kurz wie möglich sein.

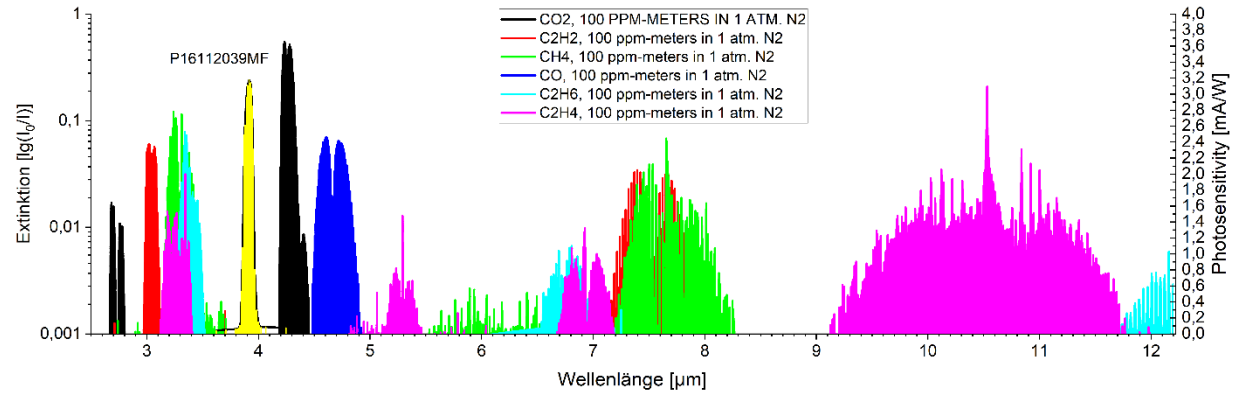


Abbildung 17: Daten aus Abbildung 15 mit der Empfindlichkeit von der Photodiode P16112-039MF in gelb

Aus diesem Grund wurde der Ansatz verfolgt, ein kleines Vorverstärkermodul zu konstruieren, auf dem die Dioden direkt verbaut sind. Das verstärkte Signal kann über fast beliebig lange Wege weitergeleitet werden, um dann von einem nächsten Modul weiterverarbeitet zu werden. Das Design und die Ausführung dieses Ansatzes wird in den folgenden Arbeitspaketen umgesetzt werden.

1.4 Arbeitspaket 4: 3D-Temperaturfeldverteilung und Reaktionskräfte aus Schweißprozess an Kleinprüfkörpern [IGP]

Nachdem die Schweißparameter ermittelt worden sind, sind mehrere Schweißproben geschweißt worden. Die Schweißnähte sind automatisiert geschweißt worden, um einen konstanten Energieeintrag in den Grundwerkstoff gewährleisten zu können.
Um das Temperaturfeld auf der Oberfläche des Werkstoffes zu messen, kam eine Thermografiekamera zum Einsatz, Abbildung 18. Diese misst die Temperaturstrahlung auf der Werkstoffoberfläche im Infrarotbereich. Da das Aluminium eine glänzende Oberfläche aufweist, wodurch die Infrarotkameraaufnahmen infolge geringer Oberflächenemissivität verfälscht werden, ist die Oberfläche mit einem speziellen Spray benetzt worden. Hierdurch wurde die Oberfläche mattiert und damit ihre Emissivität erhöht. Die Sichtbarkeit und somit die Messgenauigkeit des Temperaturgradienten sind dadurch verbessert worden.

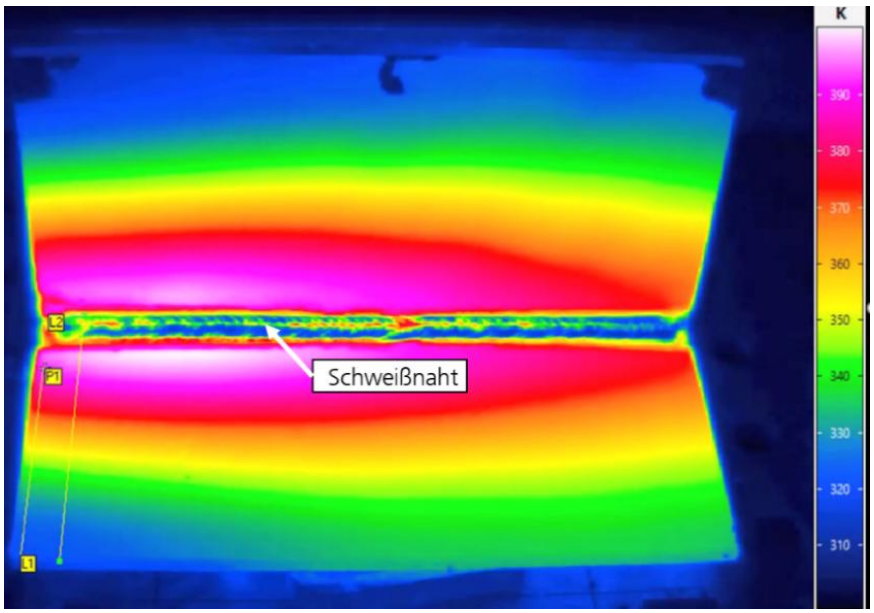


Abbildung 18: Temperaturgradient an einer Kehlnaht unmittelbar nach dem Schweißvorgang

Aluminium weist eine nahezu dreifache Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Stahl auf. Aufgrund der hohen Leitfähigkeit und der geringen Blechdicke von t = 6,0 mm ist ein sehr kleiner Temperaturgradient über die Dicke zu erwarten, weshalb die Temperaturverteilung nur auf der Oberfläche gemessen wird. Um die Temperaturverteilung dennoch zu ermitteln, wird die FE-Methode verwendet. Dabei wird die Schweißprobe und der Schweißprozess in ein numerisches Modell übertragen, und es werden die Temperaturverläufen an äquivalenten Werkstückkoordinaten verglichen.

Der Vergleich zwischen Schliffbild und modellierter Schnittebene sowie der Aufwärm- und der Abkühlphase zeigt eine gute Übereinstimmung. Zudem zeigt der Verzug der geschweißten und simulierten Probe ein nahezu identisches Verhalten auf, siehe Abbildung 19. Bei genauer Betrachtung der Abbildung 19a ist auch zu erkennen, dass das FE-Modell einen ähnlichen Schmelzbadumriss (weiße Farbe) im Vergleich zum Schliffbild aufweist.

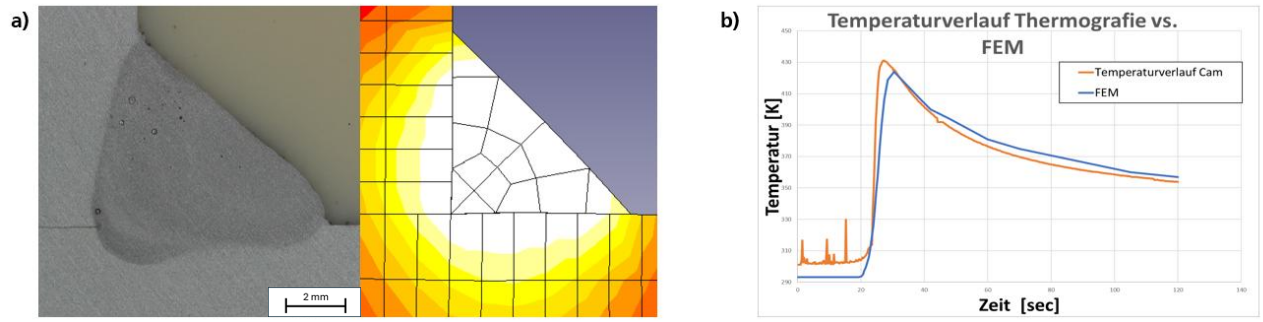


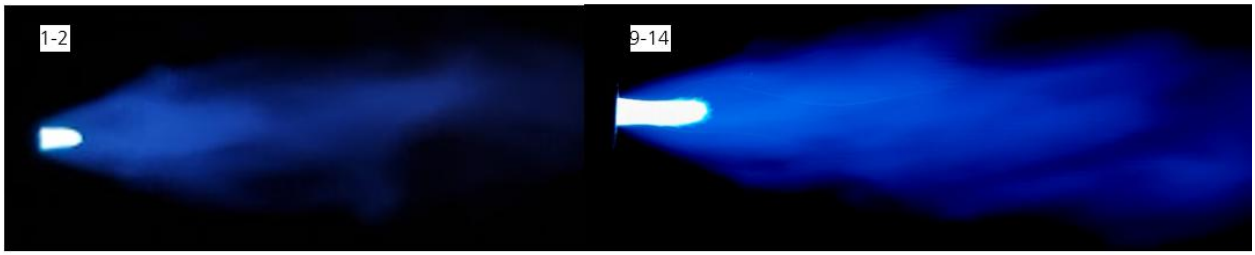
Abbildung 19: a) Vergleich Schliffbild vs. FE-Modell; b) Temperaturverlauf an gleicher Ortskoordinate, Kamera vs. FEM

Diese Erkenntnis belegt, dass das FE-Modell einen legitimen Ersatz für umfangreiche Versuchsreihen darstellt und verlässliche Ergebnisse liefert.
Die Messung der Reaktionskräfte hat sich im Laufe der Versuche als eine ungeeignete Methode zur Bewertung des Materialverhaltens herausgestellt. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf des Projektes die transient und stationär gemessene Deformation der Körper zur Bewertung des Verhaltens herangezogen.

1.5 Arbeitspaket 5: 3D-Temperaturfeldverteilung und Reaktionskräfte während des Flammrichtens an Kleinprüfkörpern [INP, IGP]

Für das Verständnis der Flammenwirkung auf eine metallische Oberfläche muss das Verhalten und die Leistungsentfaltung der Flamme qualifiziert werden. Hierzu wurden Versuche mit verschiedenen Brennergrößen und verschiedenen Durchflussraten durchgeführt.
Die eingestellten Durchflussraten sind das Ergebnis einer Parameterstudie basierend auf Messungen, die zu Beginn des Projektes bei mehreren PA-Mitgliedern vor Ort erfolgt sind. Dafür haben erfahrene Flammrichter nach ihrer persönlichen Erfahrung und für verschiedene Brennergrößen ein Flammenbild eingestellt, welches sie zum Richten von Aluminiumstrukturen verwenden würden. Die eingestellten Durchflussraten für Acetylen und Sauerstoff sind mithilfe von Durchflusssensoren erfasst und statistisch ausgewertet worden.

a)



b)

Brennergröße	C_2H_2 [slph]	O_2 [slph]	Q [W]
1-2	1,42	1,56	24,5
2-4	6,95	8,03	120,8
6-9	6,14	6,92	106
9-14	12,73	18,81	219,7

c)

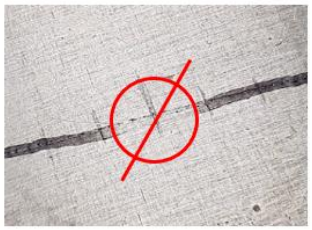


Abbildung 20: a) Flammentfaltung in Abhängigkeit der Brennergröße, b) brennergrößenabhängige Durchflussraten und erzeugte Flammleistung, c) Messung des Flammdurchmessers

Zur Charakterisierung der Wärmefeldverteilung im Werkstoff wurde eine 20 mm dicke Aluminium Platte mit mehreren Thermoelementen bestückt. Diese sind in unterschiedlichen Radien und in unterschiedlichen Tiefen so angebracht, dass die Messung auf der gegenüberliegenden Seite zu der beflammten Fläche liegt, siehe Abbildung 21. Um einen durchweg konstanten Abstand der Flamme zur Blechoberseite und eine definierte Dauer zu gewährleisten, ist die Flammapplizierung automatisiert worden. Hierzu wurde die Flamme robotergesteuert bewegt. Dabei wurden die Temperierungsdauer, der Flammkegelabstand und die Durchflussrate des Acetylen- und des Sauerstoff-Gases als konstant definiert.
Die Messergebnisse wurden anschließend zur Validierung eines numerischen Modells, das in diesem Arbeitspaket ebenfalls entwickelt worden ist, herangezogen.

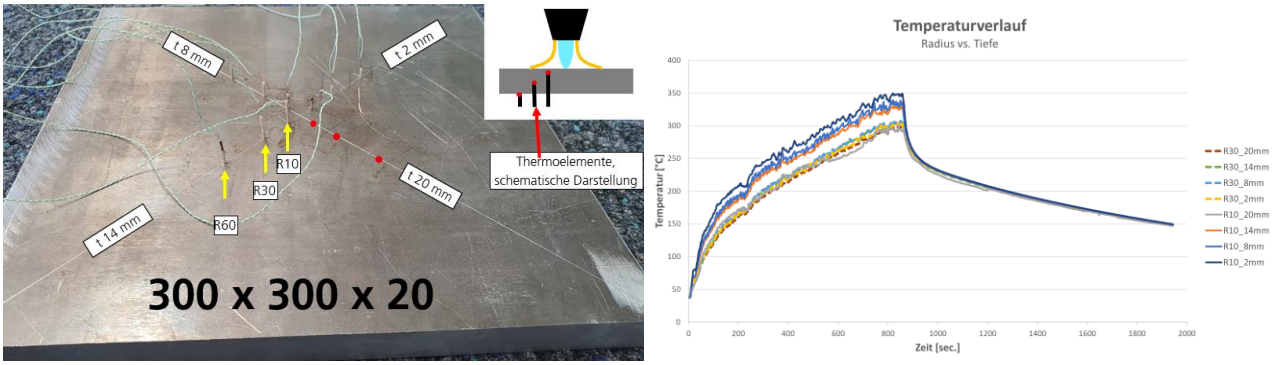


Abbildung 21: Position der Thermoelemente und die dazugehörige Wärmefeldverteilung

Das numerische Modell soll dazu beitragen, dass in nachfolgenden Arbeitspaketen eine maximal effektive Richtstrategie entwickelt werden kann bei möglichst geringem Materialverbrauch. Dieser Ansatz trägt zu einem nachhaltigen Umgang mit Material bei. Die Flamme wird als normalverteilte kreisrunde Wärmequelle angenommen. Dieser Annahme liegt der Zusammenhang zugrunde, bei dem die Temperatur im Werkstück der Gauß- normalverteilten Form annimmt. Das numerische Ergebnis zeigt einen nahezu kongruenten Temperaturverlauf an identischen Messkoordinaten, siehe Abbildung 22. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das FEM-Modell mit der gaußnormalverteilten Wärmeersatzquelle zur Abbildung des Flammverhalten geeignet ist.

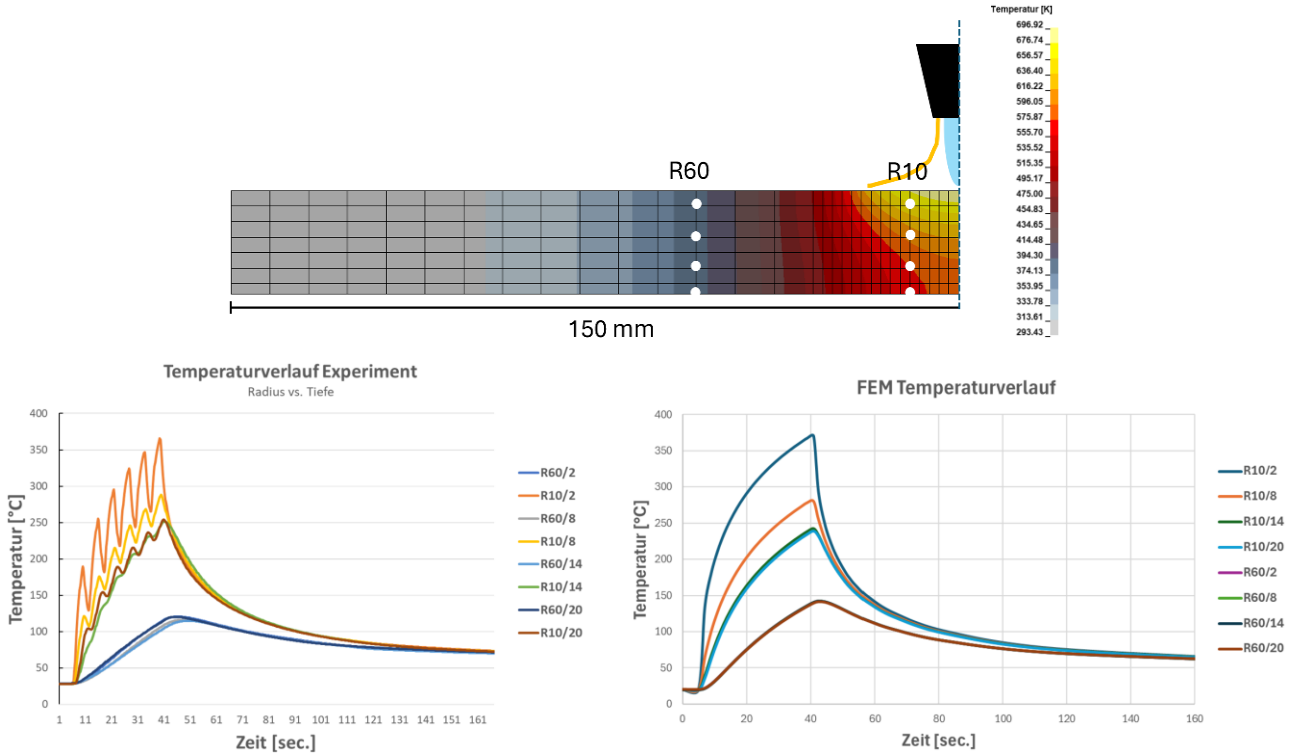


Abbildung 22: Temperaturverteilung im Vergleich zwischen Experiment und FEM-Modell

1.6 Arbeitspaket 6: Messtechnikentwicklung [INP]

Hardwareentwicklung

Die Arbeiten zur Messtechnikentwicklung lassen sich in zwei Bereiche unterteilen. Im ersten Bereich geht es um die Hardwareentwicklung und im zweiten um die Softwareentwicklung. Die Grundlage für die Hardwareauswahl wurde in AP3 gelegt. Basierend auf den dort durchgeführten Untersuchungen sind passende Photodioden ausgewählt worden, die potentiell ein auswertbares Signal liefern können. Die Photodioden erzeugen einen kleinen Strom, der mittels Transimpedanzverstärker in ein auswertbares Spannungssignal umgewandelt werden muss. Die Grundlage dafür legt der Transimpedanzverstärker OPV TS912D und die Schaltung in Abbildung 23. Der Verstärker kann zwei Diodensignale verstärken und als Spannungssignal ausgeben.

Die beiden ausgegebenen Spannungssignale müssen danach analysiert, in ein verarbeitbares Signal umgewandelt oder an eine Anzeige weitergeleitet werden. Das könnte über eine analoge Schaltung oder einen Mikrokontroller erfolgen. Ein Mikrokontroller hat den Vorteil, dass sowohl die Signalauswertung, als auch die Signalausgabe für verschiedene Anwendungen modifiziert werden kann und für zukünftige Ergänzungen erweiterbar ist. Um für die Erweiterungen bereit zu sein und auch genügend Speicher zur Verfügung zu haben ist ein Arduino Nano Every ausgewählt worden. Dieser hat 48 kB Flashspeicher im Gegensatz zum Nano mit 32 kB. Der größere Vorteil liegt aber im 3-mal größeren SRAM von 6 kB für die Variabeln. Außerdem kostet der Nano Every aktuell etwa nur die Hälfte vom Nano.

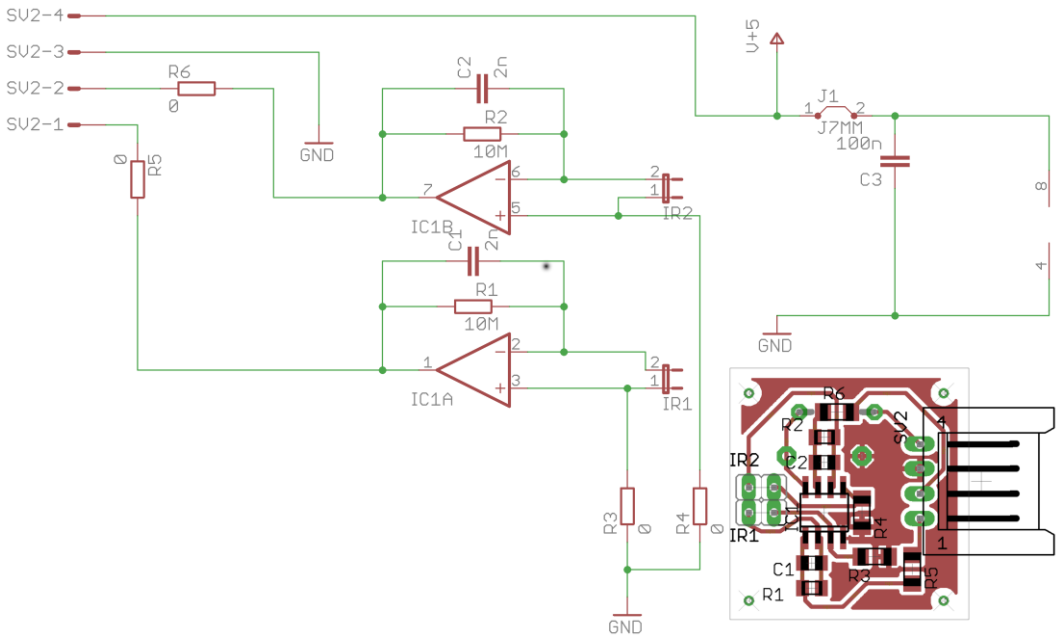


Abbildung 23: Schaltplan und PCB-Bestückung des Sensormoduls mit Transimpedanzverstärker (OPV TS912D)

Die Abbildung 24 zeigt den Aufbau des Auswertemoduls. Auf diesem ist Platz für einen Nano Every und dem Eingang für den oben beschriebenen Diodenverstärker (IR-AMP). Die verstärkten Signale können so über Distanz an den Mikrokontroller weitergeleitet werden. So kann die Sensoreinheit an einer zur Messung günstigen Position befestigt werden, und die Auswerteeinheit mit Stromversorgung (Vcc 6 V – 16 V) und Anzeigen an einem leicht zugänglichen und gut sichtbaren Platz.
Als Anzeige könnten einfache Lichtsignale dienen. Daher sind für zwei LED-Balkenanzeigen bereits entsprechenden Anschlüsse (LED-Bar_1 und LED-Bar_2 siehe: Abbildung 32c) vorbereitet. Diese sind optional und müssen nicht unbedingt genutzt werden. Sie wären aber eine Möglichkeit, um leicht visuell wahrnehmbar den Temperaturbereich während des Richtprozesses anzuzeigen.
Damit notwendige Konfigurationsdaten in den Mikrokontroller geladen werden können, ist auch eine Datenübertragung über einen SPI-Bus (SD-Card) vorgesehen. An diesen kann beispielsweise ein SD-Kartenschreibgerät angeschlossen werden. Verschiedene Konfigurationsdaten können später noch verändert werden und dann vom Mikrokontroller darüber eingelesen werden. Das erhöht die Flexibilität, und man kann den Sensor an eine Vielzahl von Aufgabenstellungen anpassen. So können zum Beispiel verschiedene Kalibrationsdateien geladen werden, die ein Anpassen der Sensoren zulassen. Oder man passt den Arbeitsbereich an die verschiedene Materialien an, indem man die Temperaturbereiche und -schwellen anpasst. Theoretisch könnte man auch die Messdaten auf die SD-Karte schreiben und sie hinterher auswerten.
Eine weitere Kommunikationsschnittstelle, die flexibel einsetzbar ist, ist der sogenante I²C-Bus (I2C). Dabei handelt es sich um einen seriellen Datenbus, an den auf kurzer Distanz parallel verschiedene Geräte, Sensoren oder Speicher angeschlossen werden können. Auch dafür gibt es einen Anschluss auf der Auswerteeinheit. Es ist geplant hier ein LCD (Abbildung 32b) anzuschliessen, der in der Testphase die Rohdaten der Sensoren und die dazugehörigen Temperaturwerte ausgibt. Außerdem lassen sich für Debuggingzwecke verschiedene Informationen während des Startvorganges ausgeben.

Bei einem endgültigen Produkt wären nicht unbedingt alle Schnittstellen nötig und könnten eingespart werden. So können Kosten für die Produktherstellung reduziert werden. Alle Teile dieser Sensoreinheit sind aber kommerziell leicht erhältlich und reduzieren so die Materialkosten erheblich.
Trotzdem gab es im Projektverlauf erhebliche Lieferschwierigkeiten, was unweigerlich zu Verzögerungen in der Projektbearbeitung geführt hat. Zum Beispiel wurden einige Bauteile falsch deklariert, was zu funktionsgestörten Mustern führte, die eine lange Fehlersuche nach sich zogen.

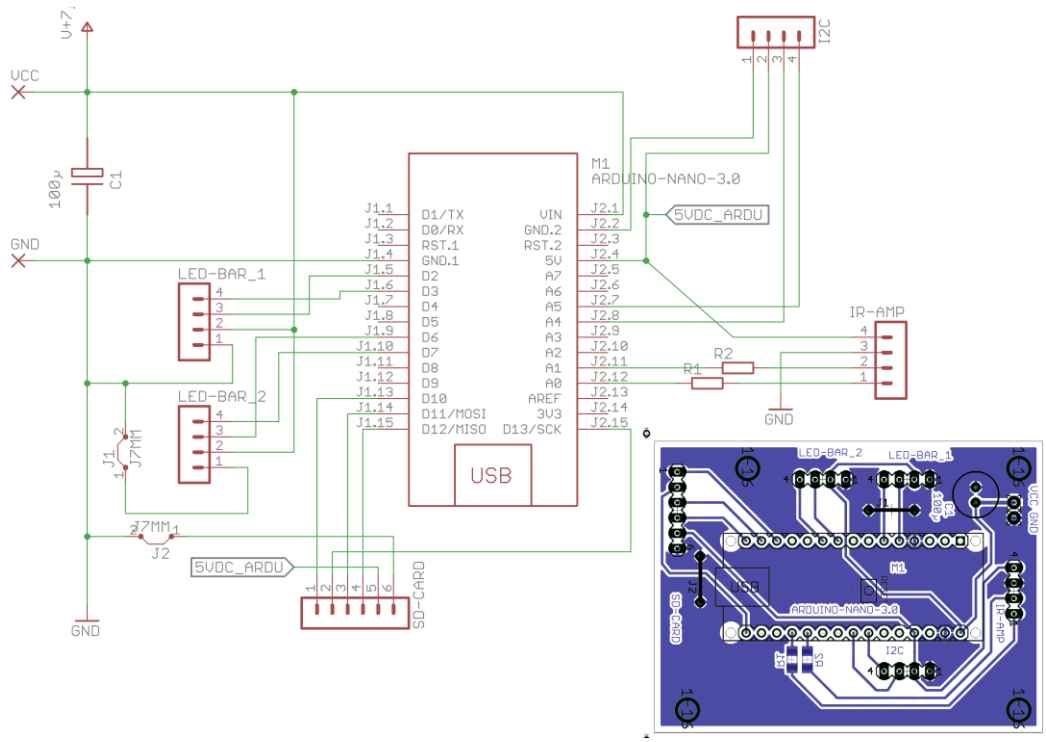


Abbildung 24: Schaltplan und PCB-Bestückung der Auswerteeinheit (Arduino Nano Every)

Softwareentwicklung

Der zweite Teil der Messtechnikentwicklung beinhaltet die Softwareentwicklung (siehe Anhang). Damit der Mikrokontroller aus dem vorherigen Teil als Auswerteeinheit benutzt werden kann, muss die notwendige Software darauf geflasht werden. Diese benötigt mehrere Funktionen, um korrekt zu arbeiten.
Als erstes muss sie die Diodensignale auslesen und umrechnen, um auf Temperaturwerte zu kommen. Dafür werden entsprechende Kalibrationsmessungen durchgeführt, um die korrekten Parameter der Kalibrationsfunktion zu ermitteln. Diese werden dann auf der SD-Karte hinterlegt und vom Programm beim Start des Mikrokontrolers ausgelesen.
Dann müssen die Temperaturwerte mit den entsprechenden Schwellwerten verglichen werden. Diese können auch von der SD-Karte gelesen werden. Dieser Vergleich kann dann in ein Signal umgerechnet werden, welches in irgendeiner Form an den Benutzer weitergegeben werden muss. Das muss auf so eine Weise geschehen, dass er intuitiv und ohne nachdenken zu müssen mit der korrekten Reaktion darauf eingehen kann. Ideen dafür werden im nächsten Treffen des projektbegleitenden Ausschusses gesammelt. Wie oben bereits erwähnt, sind einige digitale Pins (D2, 3 und D6, 7) vorgesehen, um daran Balkenanzeigen anzuschließen. Diese können mit einem Blick leicht erfasst werden. Dafür wird das Temperatursignal mit den vorgegebenen Schwellwerten verrechnet und in ein digitales Signal transponiert. Falls in Zukunft

andere Lösungen angestrebt werden, können diese leicht durch Änderung der Hard- und Software umgesetzt werden.
Gleiches gilt für die I²C- und SPI-Busse. An ihnen können verschiedene Hardwarelösungen angeschlossen werden. Für die Entwicklung ist dort ein LCD mit 16 mal 2 Zeichen angeschlossen. Das Programm gibt an diese Anzeige verschiedene Werte aus, um eine Fehlersuche und die weitere Entwicklung der Auswerteeinheit zu erleichtern.
Um die Grundlage für die Kalibrierung und Schwellwertvorgabe zu legen, waren im Projekt genaue Analysen der Werkstoffe nötig. Diese wurden in den folgenden Arbeitspaketen erarbeitet.

1.7 Arbeitspaket 7: Mechanisch technologische Prüfungen nach thermischer Exposition [IGP]

Um sicherzustellen, dass die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Werkstoffes durch die Beflammung nicht negativ beeinflusst werden, bedarf es metallographischer Untersuchungen. Die Untersuchungen werden für eine naturharte Legierung EN AW-5083 und eine härtbare Legierung EN AW-6082 durchgeführt. Zunächst wurde untersucht, in welchem Temperaturfenster die Flammapplizierung des Werkstoffes möglich ist, sodass die Werkstoffeigenschaften erhalten bleiben. Die Fachliteratur empfiehlt hierzu für das EN EW-5083 ein Temperaturfenster von 150 … 350°C und für das EN AW-6082 ein Temperaturfenster von 150 … 200°C. Dazu wurden Probenoberflächen auf ca. 200°C, 300°C, 400°C und 500°C erwärmt. Zur Kontrolle der Temperatur wurden Thermoelemente Typ-K verwendet. Da die direkte Messung an der Oberfläche nicht möglich ist, wurden die Thermoelemente 2,0 mm unter der Oberfläche rückseitig platziert.

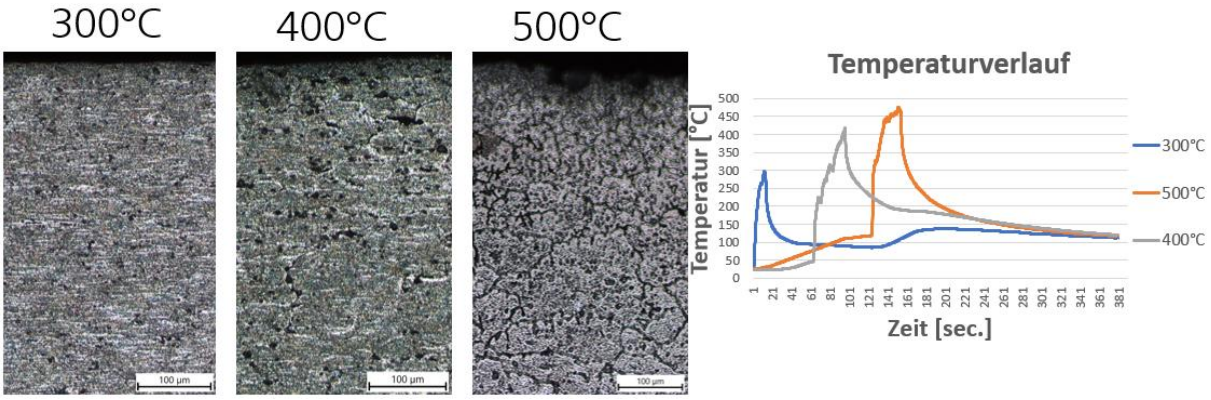


Abbildung 25: Gefüge im oberflächennahen Bereich nach Beflammen und die dazugehörige gemessene Temperaturverläufe für EN AW-5083

Das Gefügebild der Legierung EN AW-5083 zeigt, dass sobald die Oberflächentemperatur 400 °C erreicht, erste Gefügeänderungen einsetzen. Um den Einfluss der hohen Oberflächentemperatur auf die Festigkeit zu bestimmen, wurde der Härteverlauf unter der Oberfläche untersucht. Diese Untersuchung zeigt, dass ab 400 °C eine vernachlässigbar kleine Erweichung des Werkstoffes unter der Oberfläche einsetzt, siehe Abbildung 26.

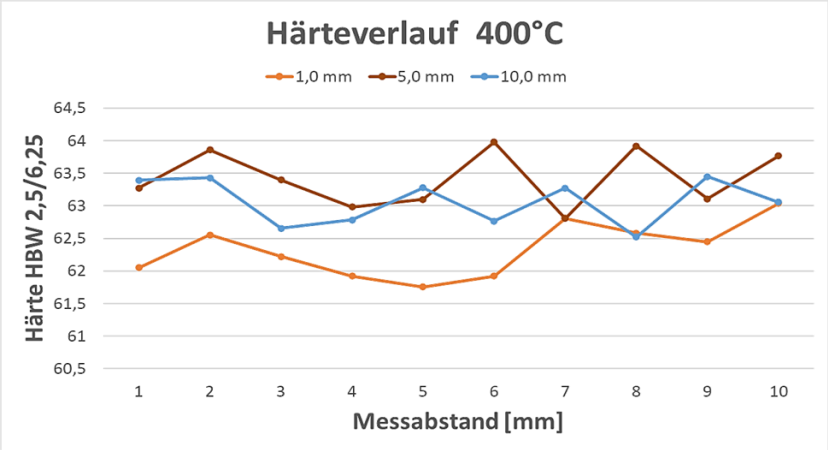


Abbildung 26: Härteverlauf bei 400 °C parallel zur Oberfläche in 1 mm, 3 mm und 6mm Tiefe für ENAW-5083

Das Gefügebild der Legierung EN AW-6082 zeigt hingegen, dass sobald die Oberflächentemperatur 200 °C erreicht, keine Gefügeänderungen erkennbar sind. Um dennoch einen Einfluss der Oberflächentemperatur auf die Festigkeit zu bestimmen, wurde der Härteverlauf unter der Oberfläche untersucht. Diese Untersuchung zeigt ebenfalls, dass keine Erweichung des Werkstoffes unter der Oberfläche stattfindet, siehe Abbildung 27.

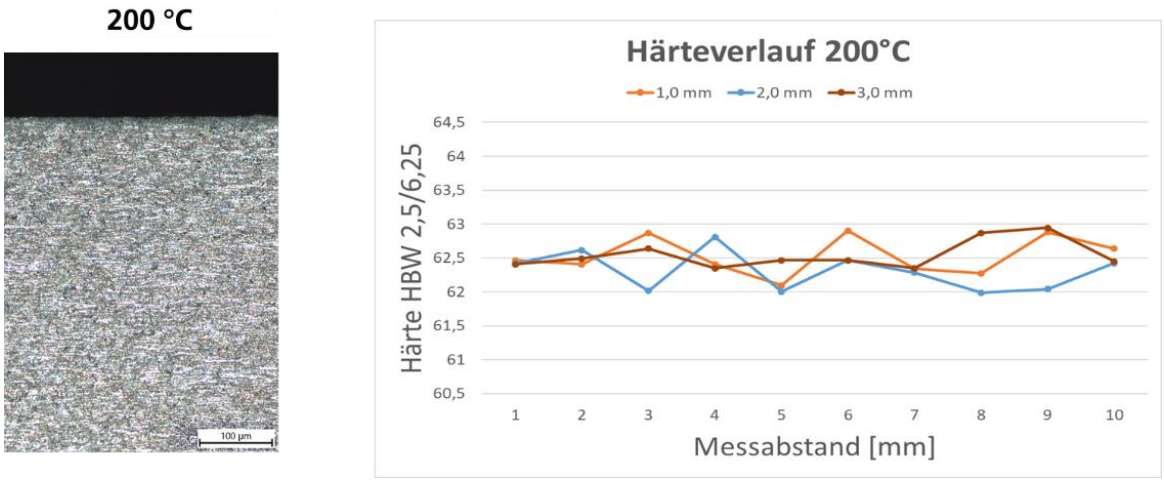


Abbildung 27:Härteverlauf bei 200 °C parallel zur Oberfläche in 1 mm, 2 mm und 3mm Tiefe für ENAW-6082

Zur Untersuchung des Eigenspannungszustandes wurde das numerische Modell herangezogen. Die Bohrlochmethode erlaub nur eine lokale Ermittlung des Spannungszustandes, wohingegen das FEM-Modell eine ganzheitliche Betrachtung der ganzen Struktur sowie die Bestimmung des Spannungsgradienten in alle Raumrichtungen erlaubt.

1.8 Arbeitspaket 8: Integration Temperaturfeld-/Reaktionskräftedaten in das Messsystem [INP, IGP]

Es ist zunächst ein Konzept, das in Rücksprache mit den PA-Mitgliedern entstanden ist, ausgearbeitet worden. Demnach wird die vom Sensor in situ erfasste Temperatur in einer Art dargestellt, die sowohl eine

direkte Ablesung der Temperatur ermöglicht als auch eine Farbskala beinhaltet, die anzeigt, ob die Oberflächentemperatur zu niedrig, zu hoch oder im zulässigen Prozessfenster liegt. Diese Option erlaubt einem unerfahrenen Flammrichter augenblicklich zu entscheiden, wie er mit der Flammenführung fortfahren muss. Des Weiteren ist eine Speichermöglichkeit der erfassten Daten vorzusehen, zum Beispiel in Form einer SD-Karte, die eine spätere Auswertung der Temperaturbelastung hinsichtlich Überhitzung ermöglicht.

1.9 Arbeitspaket 9: Übertragung auf repräsentatives schiffbauliches Modell (Mikropaneel) [IGP]

Die Übertragung der charakterisierten Schweiß- und Flammrichtprozesse begann mit dem Aufbau eines Simulationsmodells des Schweißprozesses an einem Mikropaneel. Hierbei wurde das zuvor unter Werftbedingungen geschweißte Paneel nachmodelliert und entsprechend den realen Schweißparametern simuliert. Eines der von PA-Mitgliedern bereitgestellten Paneele wurde optisch vermessen, um es mit dem Ergebnis der Schweißsimulation vergleichen zu können. Die Abbildung 28 zeigt den Vergleich zwischen dem realen Paneel und dem entsprechenden FEM-Modell. Erkennbar ist die äquivalente Tendenz in der Mitte des Paneels zwischen den Versteifungen. An den äußeren Rändern ist die Diskrepanz deutlich höher, was zum einen an der während der Fertigung nicht eingehaltener Schweißpfadfolge liegt, als auch an der unbekannten Dauer einzelner Pausen zwischen den Schweißungen und der Dauer der Einspannung. Dennoch kann mit diesem Modell ein vergleichbarer Eigenspannungszustand in dem Mikropaneel erzeugt werden, welcher bei der Modellierung des Flammrichtprozesses berücksichtigt werden kann.

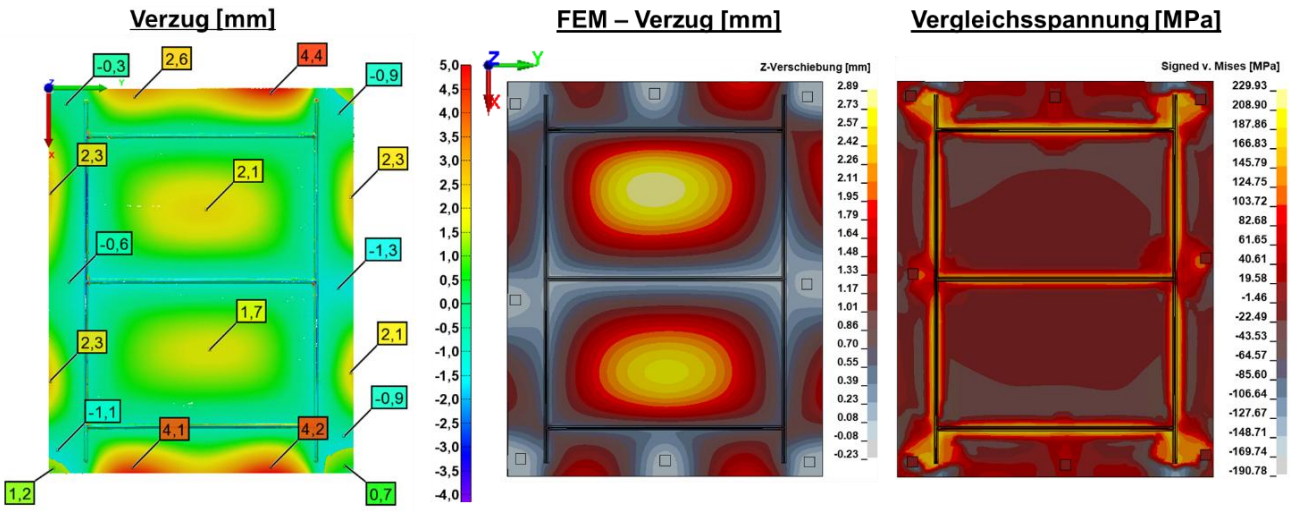


Abbildung 28: Vergleich der Deformation nach dem Schweißen entlang der Z-Achse, links: 3D-Scan des realen Paneels, mittig: das entsprechende FEM-Modell, rechts: der entsprechende Vergleichsspannungszustand

Im nächsten Schritt erfolgt die Modellierung des Flammrichtprozesses. Hierfür werden die geometrischen Deformationen, die Eigenspannungen und die plastischen Dehnungen aus der Schweißprozesssimulation herausgeschrieben und als initialer Zustand vor der Flammapplizierung definiert. Das Modellieren der vollständigen Prozesskette unter Berücksichtigung vorhandener Spannung-Dehnung-Zustände ermöglicht

eine Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit und macht das rechtzeitige Einleiten präventiver Maßnahmen möglich.
Vorab werden mehrere Richtstrategien an mehreren Paneelen experimentell getestet. Die Abbildung 29 zeigt beispielhaft falsch gewählte Richtstrategien, die zu einer noch größeren Deformation führten. Eine weitere Richtstrategie ist aus der Fachliteratur für paneelartige Strukturen entnommen. Hierbei werden strichartige Brennertrajektorien mittig auf der zu richtenden Fläche empfohlen. Die Abbildung 30 zeigt die umgesetzte Brennertrajektorie an einem geschweißten Paneel und in dem FEM-Modell. Dieses Paneel ist im nachfolgenden vermessen worden, um die Auswirkung der gewählten Trajektorie geometrisch zu erfassen.

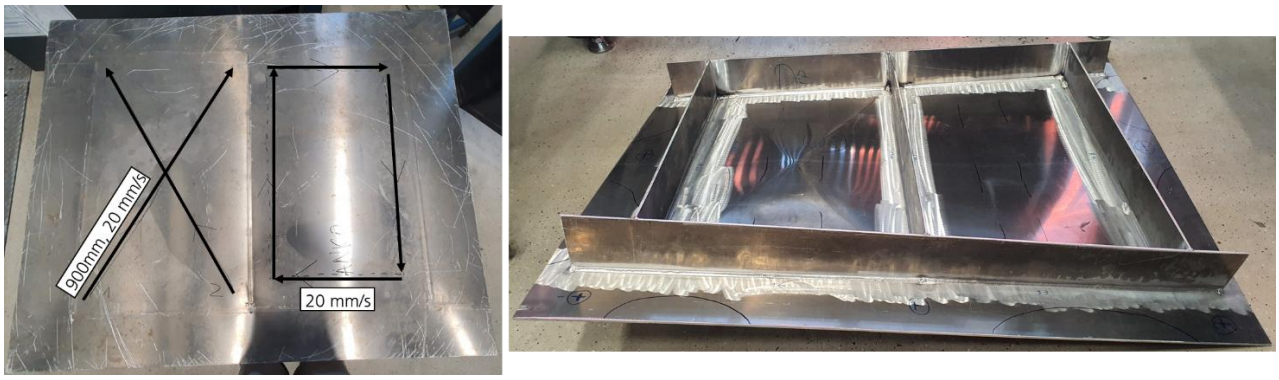


Abbildung 29: links: 2 unterschiedliche Richtstrategien (Flammtrajektorien, schwarze Pfeile), recht: das Resultat dieser Flammtrajektorien

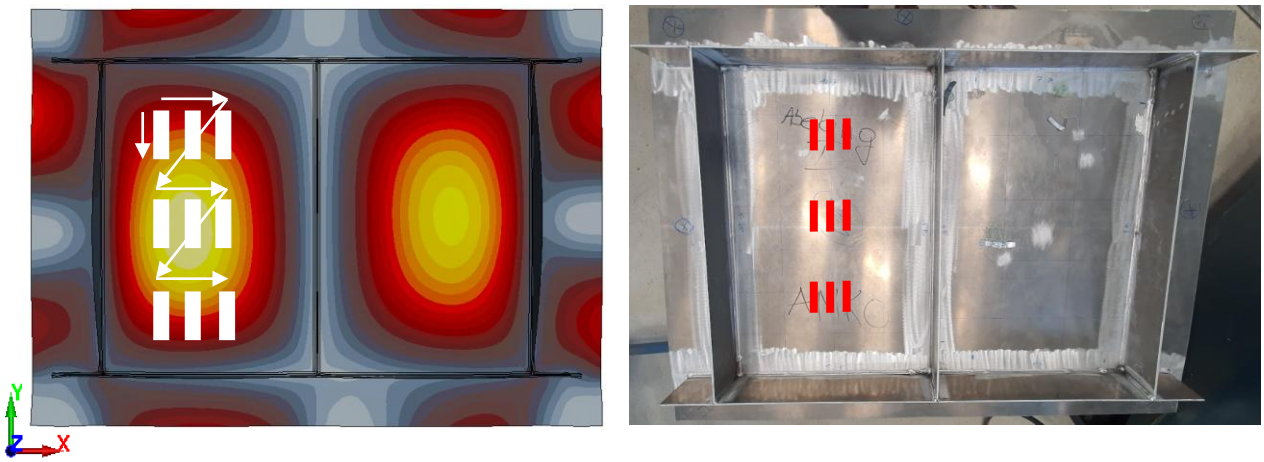


Abbildung 30: links: numerisch modellierte Brennertrajektorie, rechts: experimentell umgesetzte Brennertrajektorie

Die zuletzt gewählte Trajektorie ist als FEM-Modell umgesetzt worden, siehe Abbildung 30. Die in den vorläufigen Arbeitspaketen charakterisierte Flamme wurde hierin numerisch appliziert. Der Vergleich zwischen dem experimentellen und dem simulierten Richtergebnis ist in der Abbildung 31 dargestellt. Unter der Prämisse, dass die Ausganggeometrie des Flammricht-Simulationsmodells bereits vorverformt ist, das lokale Koordinatensystem des Paneels jedoch genullt ist, müssen die Verformungen aus der Schweißsimulation mit der Verformung der Richtsimulation kumuliert werden, um die gesamte Verformung im globalen Koordinatensystem zu erhalten. Unter Berücksichtigung der Deformationsergebnisse aus der Schweißsimulation (Abbildung 28) ist die tendenziell äquivalente Deformationsneigung infolge des Richtprozesses hervorzuheben. Somit können prinzipiell verschiedenen Richtstrategien numerisch vorab geprüft werden, bevor die zu richtende Stelle fälschlicherweise unumkehrbar plastisch verformt wird. Diese

Methode könnte nicht nur bei der Ermittlung einer optimalen Richtstrategie nützen, sondern könnte auch potenzielle Mehrkosten durch Materialschädigung von unerfahrenen Flammrichtern größtenteils vorbeugen. Das Potential dieser Methode steckt darin, als eine weitere Hilfestellung für unerfahrene Flammrichter zu fungieren. Weiterführende Untersuchungen diesbezüglich werden auch nach Projektende durchgeführt.

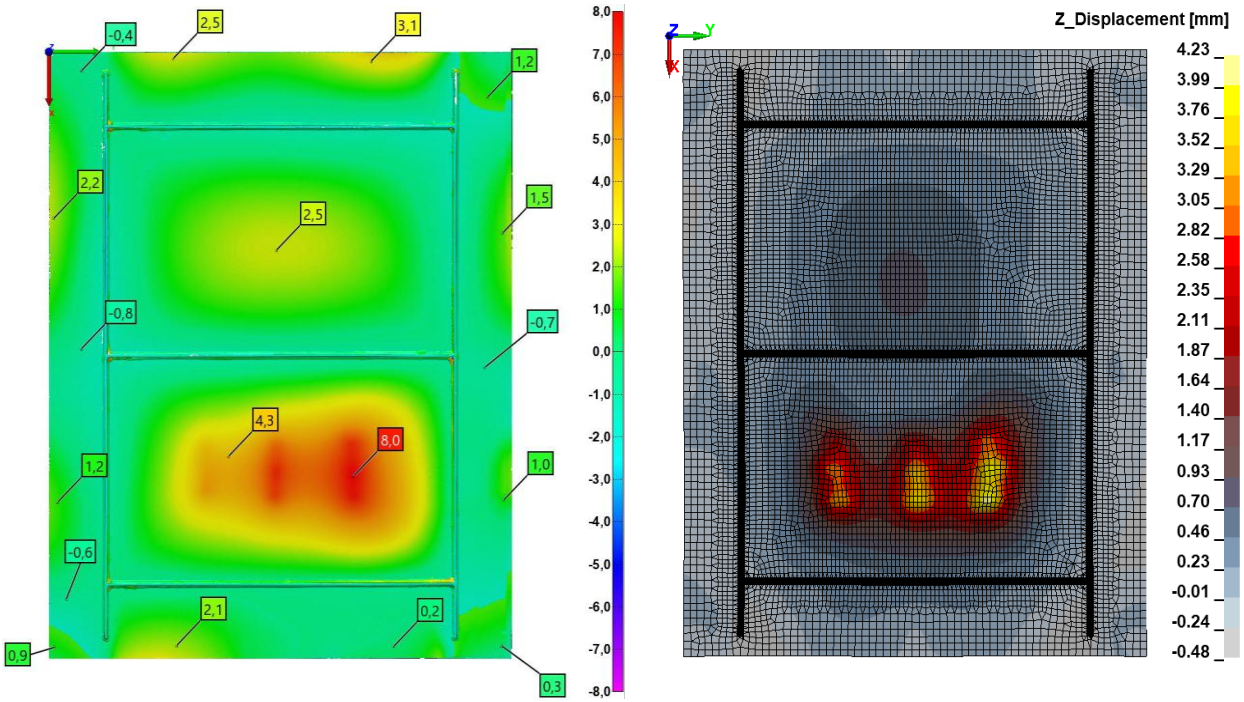


Abbildung 31: Vergleich der Richtstrategie zwischen Experiment (links) und Simulation (rechts)

Ebenfalls innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden Messungen mit der konzipierten Messsensorik vor Ort am Fraunhofer Institut durchgeführt. Dabei ging es im ersten Schritt um die Prüfung der Funktionstüchtigkeit des Labormusters und der Kalibration. Das Sensormodul (Abbildung 32a), die Auswerteeinheit mit LCD und Balkenanzeige (Abbildung 32b und c) wurden an einem Brenner (Abbildung 34) montiert. Das erfolgte auf eine solche Weise, dass der Sensor auf den Auftreffpunkt der Flamme auf dem Blech gerichtet war und nur diesen Ausschnitt beobachtete.

Abbildung 32: a) Sensormodul, b) LCD zur Anzeige von Informationen, c) Balkenanzeige für den Richtbetrieb

Als Proben wurden zunächst Bleche verschiedener Dicken genutzt, um mit den unterschiedlichen Aufwärmgeschwindigkeiten das Ansprechverhalten des Sensors zu prüfen.

Während der Versuche zeichnete ein PC über USB am Mikrokontroller die Daten mit (s. Abbildung 33). So konnten die Messergebnisse sofort überprüft und Änderungen in der Programmierung und der Kalibration direkt vorgenommen werden.

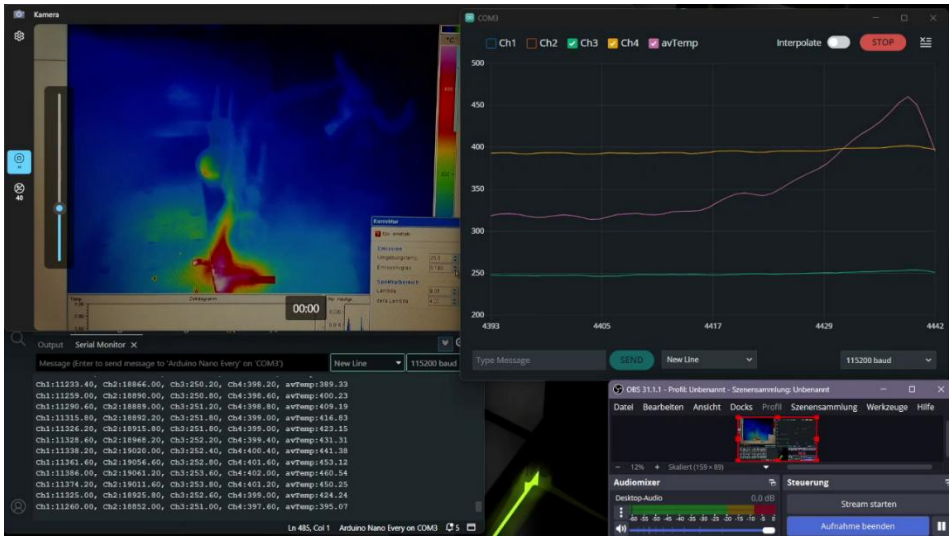


Abbildung 33: PC-Oberfläche mit Thermogramm und Messwerten der Sensorsignale

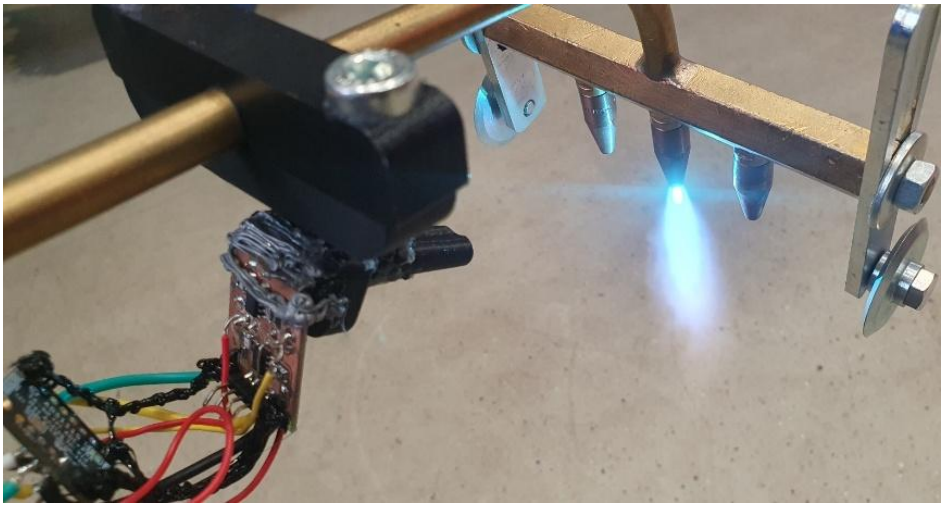


Abbildung 34: Sensormodul am unteren Teil des Brenners

Zunächst wurde die Reaktion des Sensors auf den Start der Flamme getestet. Sobald die Flamme korrekt eingestellt war, gab es keine Signaländerung vom Sensor, was dem gewünschten Arbeitsverhalten entsprach. Es ist zu beachten, dass es bei sauerstoffarmer Flamme zu Messabweichungen kommt. Eine solche Flamme rußt erheblich. Der Ruß besteht aus feinen Partikeln, die in der Flamme erhitzt werden und starke Wärmestrahlung abgeben. Das führt zu einer Erhöhung der gemessenen Temperatur, weil der Sensor auf die Kontinuumsstrahlung der Rußpartikel reagiert und deren Temperatur misst. Darum ist im Betrieb immer auf eine korrekte Einstellung der Flamme zu achten. Auch verrußte Oberflächen geben aufgrund ihrer erhöhten Emissivität ein verfälschtes Ergebnis. Besonders bei der geringen Emissivität von Aluminium fällt dies aber sehr deutlich auf und sollte eine Fehldetektion durch einen aufmerksamen Benutzer ausschließen. Im normalen Richtbetrieb zeigte der Sensor einen Anstieg der

Oberflächentemperatur des Bleches wie gewünscht an. Die Flamme selbst störte auch hier die Messungen nicht.

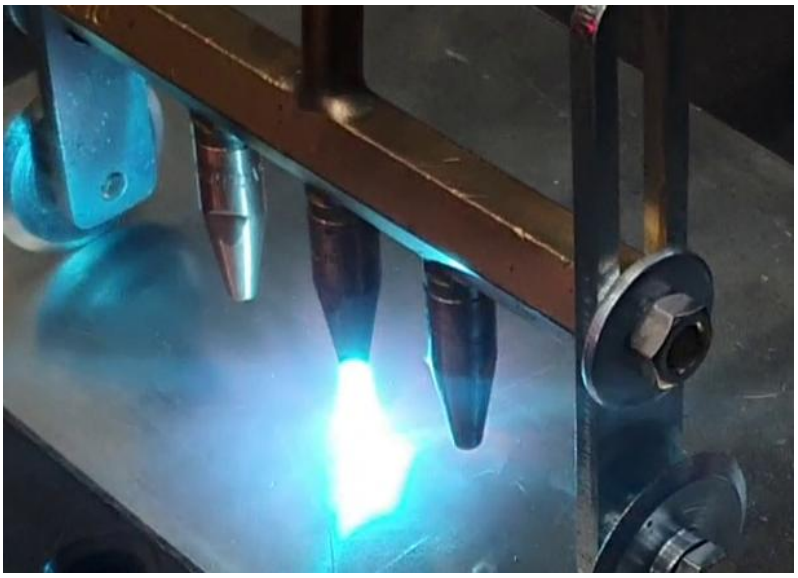


Abbildung 35: Mehrflammenbrenner mit Flamme auf dem Blech

1.10 Arbeitspaket 10: Feldversuche und Ableitung optimierter Richtparameter [INP, IGP]

Es wurden auch Messungen an schiffbaulichen Modellen geplant, um die Praxistauglichkeit der Sensorik zu testen. Praxistauglichkeit bedeutet in dem Fall, dass die Temperaturänderungen über einen eingestellten Schwellwert leicht zu erkennen sind und durch den Bediener abgewendet werden können. Da bei den Versuchen ein Modellaufbau des Sensors verwendet wurde, der noch ohne Gehäuse und robuste Verkabelung zu benutzen war, bedarf es erhöhter Vorsicht während der Tests.
Die Tests zeigten, dass bei vorschriftsmäßig eingestellter Flamme und einer korrekten Bedienung des Brenners eine gut messbare Reaktion des Sensors ein frühzeitiges Eingreifen in den Richtprozess ermöglicht. Die Art des Vorverstärkers für die IR-Dioden zeigte allerdings eine starke Temperaturdrift. Diese ist im Labor durch die klimatisierte Umgebung und die starke Kühlung während der Richtversuche nicht bemerkt worden. Daher ergibt sich aus den Feldversuchen die Empfehlung den Sensorkopf selbst zu überarbeiten, um einen stabilisierten Betrieb in der Praxis möglich zu machen. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten der Temperaturkompensation. Es könnte auch in Erwägung gezogen werden sogenannte Instrumentenverstärker zu verwenden (siehe Abbildung 36).
Da dieser Effekt erst zum Ende der Projektlaufzeit entdeckt wurde, konnte die Empfehlung nicht innerhalb des Projektes geprüft werden. Dies sollte für einen Elektronikentwickler jedoch kein Problem darstellen.
Der Vorteil der in diesem Projekt entwickelten Messtechnik ist, dass eine Anpassung des Sensorkopfes, also des Diodenverstärkers keinen negativen Einfluss auf den Rest des Messsystems hat. Jeder Sensorkopf kann einfach über Software angepasst werden, solange er ein proportionales Signal in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des zu richtenden Bleches durch die Flamme hindurch detektieren kann. Die Flexibilität des Systems macht es adaptierbar an die Unterschiedlichsten Gegebenheiten und könnte sogar für das Richten von verschiedenen anderen Metallen genutzt werden. Es muss lediglich die entsprechende Kalibrierkurve in der Software (auf der SD-Karte) hinterlegt werden und eine entsprechende

Auswahlmöglichkeit programmiert werden. Die Auswahl kann über ein Bedienelement an einem der vorgesehenen Eingänge der Auswerteeinheit angeschlossen werden und über das LC-Display angezeigt werden.

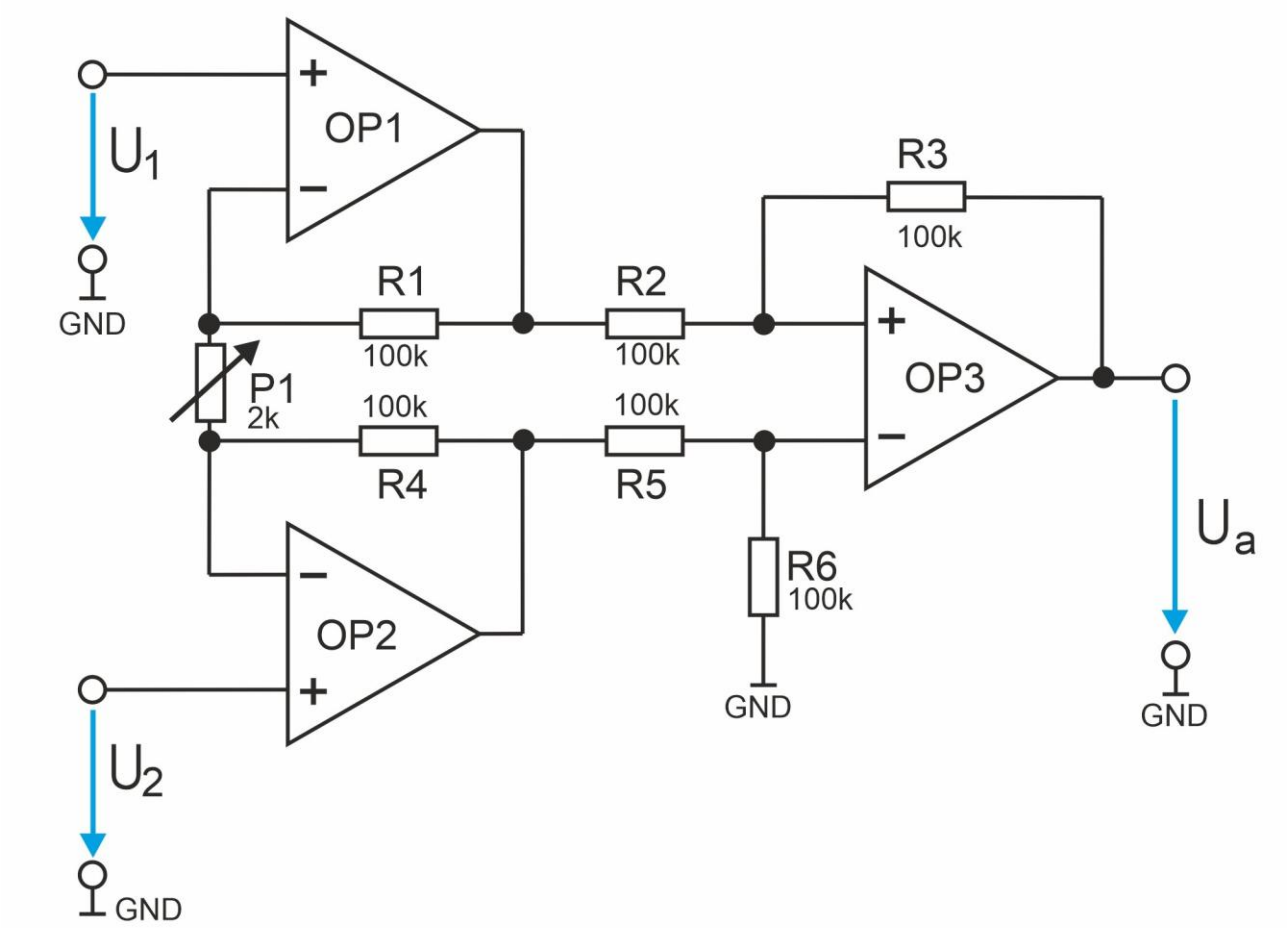


Abbildung 36: Schaltung Instrumentenverstärker (LM324 Quelle: https://www.conrad.de/de/ratgeber/industrie-40/elektronik-bauteile/lm324.html)

Da die Messsensorik zu diesem Zeitpunkt nicht im vollen Umfang funktionierte, konnten auch keine weiteren Richtversuche hinsichtlich der Ableitung einer optimalen Richtstrategie im Rahmen der Feldversuche durchgeführt werden. Weiterführende numerische Untersuchungen sind jedoch auch nach Projektende angestrebt. Hierzu ist das Interesse der PA-Mitglieder innerhalb der durchgeführten PA-Treffen deutlich zum Ausdruck gebracht worden.

2 Verwendung der Zuwendung

Forschungseinrichtung 1 [INP]

wissenschaftlich-technisches Personal:	Es wurden 25,5 PM wissenschaftliches Personal im Berichtzeitraum abgerechnet.
Geräte:	Flammrichtbrenner, Gase
Leistungen Dritter:	keine

Forschungseinrichtung 2 [IGP]

wissenschaftlich-technisches Personal:	Es wurden 23,25 PM wissenschaftliches Personal im Berichtzeitraum abgerechnet.
übriges Fachpersonal:	Es wurden 4,78 PM technisches Personal im Berichtzeitraum abgerechnet.
Geräte:	Schweißanlagen, Flammrichtequipment
Leistungen Dritter:	Beratung, Material, Schweißung

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Forschungseinrichtung 1 [INP]

Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal: Die Durchführung der o. g. Arbeiten erfolgte im Berichtszeitraum durch den Einsatz eines wissenschaftlichen Mitarbeiters. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Forschungseinrichtung 2 [IGP]

Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal: Die Durchführung der o. g. Arbeiten erfolgte im Berichtszeitraum durch den Einsatz eines wissenschaftlichen Mitarbeiters sowie technischer Mitarbeiter. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Das im Projekt entwickelte Verfahren zur berührungslosen Temperaturüberwachung beim Flammrichten von Aluminiumstrukturen stellt einen bedeutenden wissenschaftlich-technischen Fortschritt mit hohem wirtschaftlichem Nutzen dar – insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) in der Metallverarbeitung. Durch die gezielte Erweiterung des Anwendungsbereichs des Flammrichtens auf Aluminiumbleche, insbesondere im Schiffbau, wird eine reproduzierbare und kontrollierte Bearbeitung ermöglicht, die bisherige Verfahren wie das WIG-Richten oder das induktive Richten in Bezug auf Effizienz, Prozesskontrolle und Materialeinsatz deutlich übertrifft. Der innovative Beitrag des Projekts liegt in der Integration eines berührungslosen Temperaturmonitorings, das eine präzise Prozessführung beim thermischen Richten erlaubt und so qualitätsgerechte Ergebnisse bei gleichzeitig reduziertem Ressourcen- und Zeitaufwand liefert. Weiterhin wurde eine Methodik zur Erprobung geeigneter Richtansätze mittels numerischer Simulation entwickelt. Die genaue Abbildung der Richtflamme als Wärmequelle in der FEM bietet die Möglichkeit für komplexe Strukturen effektive Richtstrategien zu entwickeln. Für KMU mit häufig wechselnden Fertigungsaufträgen und kleinen Losgrößen bedeutet dies eine erhebliche Erhöhung der Flexibilität und Planungssicherheit bei gleichzeitiger Reduktion von Nacharbeit und Ausschuss. Insbesondere in Hinblick auf die begrenzte Verfügbarkeit von Richtschmieden und fehlenden Wissenstransfer der stark erfahrungsbasierten Ausführung bietet die thermomechanische Simulation des Richtprozesses großes Potenzial. Neben einer direkten industriellen Anwendung im Schiffbau eröffnet das Verfahren ein breites Transferpotenzial in andere Branchen wie den Fahrzeug- und konstruktiven Ingenieurbau, was die industrielle Verwertbarkeit und die volkswirtschaftliche Bedeutung der erzielten Ergebnisse zusätzlich unterstreicht.

Im Projekt ist eine grundlegende Hardwarelösung skizziert und aufgebaut worden, die durch Weiterentwicklung in ein marktfähiges Gerät umgewandelt werden kann. Die reinen Hardwarekosten, um ein Messsystem zu bauen liegt bei etwa 200 €. Dieser Betrag kann durch Massenproduktion signifikant gesenkt werden.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel	Rahmen		Zeitrahmen
A Projekt-begleitender Ausschuss	Informationsaustausch und Diskussion zum Projektfortschritt, ggf. gemeinsames Abstimmen von Maßnahmen zur Zielerreichung	**A1**	Projektvorstellung und Diskussion geplanter Arbeiten Vorstellung der ersten erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	Januar 2023
B Projekt-begleitender Ausschuss	Informationsaustausch und Diskussion zum Projektfortschritt, ggf. gemeinsames Abstimmen von Maßnahmen zur Zielerreichung	**B1**	Ergebnispräsentation und Diskussion des weiteren Vorgehens	September 2023
		B2	Ergebnispräsentation und Diskussion des weiteren Vorgehens	Juni 2024
		B3	Ergebnispräsentation und Diskussion des weiteren Vorgehens	Februar 2025
C Projekt-begleitender Ausschuss	Informationsaustausch und Diskussion zum Projektfortschritt, ggf. gemeinsames Abstimmen von Maßnahmen zur Zielerreichung	**C1**	Projektabschlusstreffen mit umfassender Ergebnispräsentation und Diskussion	August 2025
D Konferenz-beitrag	Ergebnistransfer in die Wirtschaft bei Fachtagung	**D1**	DVS-Kongress 2025, Essen: Konstanz, A.: *Einsatz der FE-Methode zu verzugsreduzierenden MSG-Schweißfolgeplanung an schiffbaulichen Aluminiumstrukturen*	September 2025
E Gremienarbeit	Ergebnistransfer an potenzielle Anwender aus der Wirtschaft	**E1**	Mitarbeit und Ergebnisdiskussion in Fachausschüssen/Arbeitsgruppen: DVS Arbeitsgruppe A6 Schweißen im Schiffbau und in der Meerestechnik: - AG A6.1 – *Schweißverfahren, Fertigung* - AG A 6.2 – *Schäden an schiffbaulichen Schweißkonstruktionen*	fortlaufend während Projektlaufzeit
F Event/ Workshop	Vorstellung neuer Entwicklungen und Forschungsergebnisse an Interessierte und potenzielle Anwender	**F1**	Fachaussteller bei *14. Rostocker Schweißtage*	November 2024
		F2	Event „Innovationen in der maritimen Industrie“ am Fraunhofer IGP in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Tourismus und Arbeit Mecklenburg-Vorpommern	Mai 2025

6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen		Zeitrahmen
G Veröffent-lichungen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Bekanntmachung von Forschungsergebnissen für Anwender aus der Praxis	**G1**	Veröffentlichung der Ergebnisse in „Schiff&Hafen“: Wickmann, C.; Osten, J.; Gericke, A.; Henkel, K.-M.; Uhrlandt, D.; Gött, G.: Entwicklung eines Flammricht-Prozesses für Aluminium. *Schiff & Hafen 3* (2022), 32-34	März 2022
		G2	Veröffentlichung der Ergebnisse in „Schiff&Hafen“: Konstanz, A.; Brätz, O.; Gericke, A.; Henkel, K.-M.; Gött, G.; Uhrlandt, D.: Qualifizierung des Flammrichtens von Aluminium. *Schiff & Hafen 9* (2025), 28-30	September 2025
		G3	DVS-Kongress / Große Schweißtechnische Tagung, Essen: Konstanz, A.; Brätz, O.; Gericke, A.; Henkel, K.-M.; de Payrebrune, J.: *Einsatz der FE-Methode zu verzugsreduzierenden MSG-Schweißfolgeplanung an schiffbaulichen Aluminiumstrukturen*. In: DVS-Berichte Band 401, Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2025, S. 192-199. ISBN: 978-3-96144-299-7	September 2025
		G4	Veröffentlichung der Teilergebnisse in „HTM – Journal of Heat Treatment and Materials“: Konstanz, A.; Brätz, O.; Gericke, A.; Henkel, K.-M.: FE-Simulation des FE Simulation of the Flame Straightening Process on Shipbuilding Aluminum Structures Made of EN AW-5083. *HTM J. Heat Treat. Mat.* 80 (2025) 5, 257-270. DOI: 10.1515/htm-2025-0024	Oktober 2025
H Lehre / Weiterbildung	Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung	**H1**	Wissensvermittlung im Rahmen von Lehrveranstaltungen des Lehrstuhl Fügetechnik an der Universität Rostock: - Vorlesung: *Schweißtechnologie* Praktikum: *Schweißtechnologisches Praktikum zu Eigenspannung, Verzug und Richten*	fortlaufend seit April 2024
I Projekt-vorstellung	Werbung für Projekt	**I1**	Tätigkeitsbericht Fraunhofer IGP, Jahresbericht 2023	2024
		I2	Social Media Posts des Fraunhofer IGP	fortlaufend

7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen		Zeitrahmen
E Lehre / Weiterbildung	Ingenieurwissenschaftliche Ausbildung	**E1**	Wissensvermittlung im Rahmen von Lehrveranstaltungen des Lehrstuhl Fügetechnik an der Universität Rostock: - Vorlesung: *Schweißtechnologie* - Praktikum: *Schweißtechnologisches Praktikum zu Eigenspannung, Verzug und Richten*	fortlaufend
J Leitfaden	Aufbereitung der Ergebnisse	**J1**	Veröffentlichung des Schlussberichts	Januar 2026
K wissenschaftl. Qualifizierung	Dissertationsvorhaben	**K2**	Nachweis wissenschaftlicher Qualifikation der Bearbeiter des Forschungsvorhabens	nach Projektende
L Normung	Ergebnistransfer in die Normung/Standardisierung; Ausarbeitung eines Vorschlags zur Anpassung von Anwendungsrichtlinien/ Merkblättern	**L1**	Umsetzung der Forschungsergebnisse in einen Vorschlag für ergänzende Regeln zur Anwendung des Flammrichtens von Aluminiumstrukturen	nach Projektende

8 Literaturverzeichnis

[1] FSM: Jahresbericht 2019/2020, Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V., Hamburg 2020

[2] Merkblatt DVS 0301: Flammrichten. Düsseldorf, Berlin: DVS Media GmbH, 2020

[3] Schuler, V.; Twrdek, J.: Flammrichten. In: Schuler, V. u. Twrdek, J. (Hrsg.): Praxiswissen Schweißtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2019, S. 315–326

[4] Steller, F.: Werkstoffe und Arbeitsweise: Flammrichten von Schweißkonstruktionen, Teil 2. Der Praktiker 66 (2014) 5, S. 196-201

[5] FOSTA P 1008: Anwendungsnahe Simulation des thermischen Richtens. Forschungsvorhaben P 1008/IGF-Nr. 17970 BR. Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH 2016

[6] Ferreño, D., Portilla Carral, J., Lacalle Calderón, R., Álvarez, J. A.;. Gutiérrez-Solana, F.: Development and experimental validation of a simplified Finite Element methodology to simulate the response of steel beams subjected to flame straightening. Construction and Building Materials 137 (2017), S. 535-547

[7] Hofer, P., Kaschnitz, E.; Schumacher, P.: Messung und Simulation von Verzug und Eigenspannungen in Druckgussteilen. Giesserei 99 (2012) 1, S. 30-41

[8] Araújo, A.: Multi-spectral pyrometry—a review. Measurement Science and Technology 28 (2017) 8, 82002

[9] Zhang, G., Goett, G., Kozakov, R., Uhrlandt, D., Reisgen, U., Willms, K., Sharma, R., Mann, S.; Lozano, P.: Study of the wire resistance in gas metal arc welding. Journal of Physics D: Applied Physics 52 (2019) 8, 85201

[10] Steller, F.: Workshop Flammrichten - Grundlagen. Hamburg 2007

[11] Linde: Fundamentals of Flame Straightening. Technical information for flame processes., BOC, Linde Group 2009

[12] PanGas: Flammrichten. Stahlwerkstoffe und Aluminium., PanGas AG, Linde Group 2010

[13] Linde: Tipps für Praktiker: Flammrichten, Linde Gas GmbH, 2016

[14] Steller, F.: Prinzip und Technik: Flammrichten von Schweißkonstruktionen, Teil 1. Der Praktiker 66 (2014) 4, S. 148–154

[15] Seyffahrt, P.: Entwicklung neuer Verfahren und Werkzeuge zum thermischen Richten im Schiffbau - WaRiS (WarmRichten im Schiffbau). Schlussbericht, 2007

[16] Ryu, C.; Kim, K. S.: Advanced and automatic determination of initial configuration of curved shell plates for flame bending. Journal of Materials Processing Technology 203 (2008) 1-3, S. 232–240

[17] Schäfer, D., Rinaldi, V., Beg, D., Može, P., Lacalle, R.; Portilla, J.: Optimisation and improvement of the flame straightening process (Optistraight). Final report. Research Fund for Coal and Steel series, Bd. 25120. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2012

9 Anhang

Software Sensorcontroller

```
// =============
// || Version ||
// =============
//  Sensor 3 (for Arduino Nano Every)
//
// calibration (on SD) for diode sensors 1 and 2 with two 3.3 um detectors
// Measuring distance to diodes: 370 mm (aperture attached)
// P:\2022\PST-9400-SpectroStraight\00_Data\Programmierung\SpectroStraight_V2_4
// Adjustments have to be done at four places for the different calibrations/sensors:
// 1) Setup - Display - Version -> choose correct version shown at start-up    [*Vers*]
// 2) Loop  - Calibration 1&2 -> choose correct calibration for Temp1&2        [*Temp*]
// 3) Loop  - Calibration 1&2 -> chose correct String calStr1&2 to show on LCD [*cal*]
// 4) Loop  - LED-Bar -> maxRichttemp set to read(A2)                          [*LED*]
// 5) Setup - For the use of a second LED-Bar                                  [*LED-Bar*]
#include <math.h>
// ---------------
// | Thresholds  |
// ---------------
// upper and lower limits for the LED-Bar:
  const int minRichttemp =   200;
        int maxRichttemp =   600; // adjusted via R1 in "Loop" under "LED-Bar" from //
                                  // (minRichttemperatur + 100°C) to               //
                                  // (minRichttemperatur + 100°C + 400°C)          //
        int oldmaxRT;             // variable to check if R1 is changed            //

// ---------------
// |   LED-Bar   |    ||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
// ---------------
#include "Grove_LED_Bar.h" // Seeed-Studio/Grove_LED_Bar
// pins for LED-Bar (D2-D3)  // still has to be setup for the new LED-Bars!!
  int LEDbar1DI = 2; int LEDbar1DCKI = 3;   // settings for Grove LED-Bar (10 LED's)
  //  [*LED-Bar*] int LEDbar2DI = 6; int LEDbar2DCKI = 7;   // settings for Grove LED-Bar (10
LED's)
  Grove_LED_Bar bar1(LEDbar1DCKI, LEDbar1DI, 0);  // DCKI, DI, 0
  //   [*LED-Bar*]Grove_LED_Bar bar2(LEDbar2DCKI, LEDbar2DI, 0);  // DCKI, DI, 0
  int    LEDBar1 = 0; // for the 10 individual bars on the LED Bar V2.1
  //   [*LED-Bar*]int    LEDBar2 = 0; // for the 10 individual bars on the LED Bar V2.1
  int LEDbit[] = {0,512,768,896,960,992,1008,1016,1020,1022,1023};
  /*{0b1000000000, 0b1100000000, 0b1110000000, 0b1111000000, 0b1111100000,
  0b1111110000, 0b1111111000, 0b1111111100, 0b1111111111};*/

//=================================================================
// ----------------------                                         //
// | 2x 16x2 LCDisplay:  |                                        //
// ----------------------                                         //
```

```
#include <Wire.h>  // I2C-communication                                  //
#include <LCD_I2C.h>  // Library: LCD_I2C by Blackhack V2.3.0          //
// LCD1 @ 0x27                                                         //
LCD_I2C lcd1(0x27, 16, 2); // I2C address 0x27, 16 column and 2 rows//
void lcd16x2_1(String Row1, String Row2){lcd1.backlight();            //
  lcd1.setCursor(0,0); lcd1.print(Row1);                              //
  lcd1.setCursor(0,1); lcd1.print(Row2);                              //
}                                                                     //
// LCD2 @ 0x24                                                         //
// LCD_I2C lcd2(0x24, 16, 2); // I2C address 0x24, 16 column and 2 rows//
// void lcd16x2_2(String Row1, String Row2){lcd2.backlight();          //
//   lcd2.setCursor(0,0); lcd2.print(Row1);                            //
//   lcd2.setCursor(0,1); lcd2.print(Row2);                            //
// }                                                                   //
//=====================================================================//

const int blink = 500;
// ------------------------
// | PINs and Variables:  |
// ------------------------
// Pins for I2C (Display)
  int I2CSCL = 5; int I2CSDA = 4;

//=====================================================

// -------------------
// |    Settings     |
// | for the sensors |
// -------------------
// // On-board analog input pins of the Arduino
  int PinD1 = A0; int PinD2 = A1;
// // optional: int PinD3 = A6; int PinD4 = A7;

// Analog input from the ADS1X15
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
Adafruit_ADS1115 ads;
const int adcsize = 5;
// Arrays to hold raw readings, buffers, and indices
int32_t adcSums[adcsize] = {0};
int16_t adcOffsets[adcsize] = {0};
unsigned int sampleCount = 0;
const int smoothSamples = 6;              // Number of samples for moving average
int16_t chBuffer[adcsize][smoothSamples]; // Buffer for smoothing
uint8_t chIndex[adcsize] = {0};           // Current position in buffer per channel
float   Ch[adcsize];                      // Final processed ADC values
int16_t pwmValue[adcsize];
int16_t preAmp = 0;
int16_t Amp = 0;
```

```
// variables to store the read values
// mapping to bring values to mV equivalent range
// map(value, fromLow, fromHigh, toLow, toHigh)
// adjustable maximum analog values for the mapping procedure
  int16_t maxD1 = 32767; int16_t maxD2 = 32767;

// maximum values to which the analog values are mapped
// 5000 => Value in mV if operating voltage is 5 V
  int mapD1 = 5000; int mapD2 = 5000;

// variable to store T-values in °C
  float Temp1 = 0; float Temp2 = 0;
  float Temp3 = 0; float Temp4 = 0; float avTemp = 0;
//=====================================================

// loop time for debugging
  unsigned int loopTime = 0;
  unsigned int       dt = 0;

//=================================
// ==============               //
// || SD-Card: ||               //
// ==============               //
// PINs for SD-Card reader:     //
//1 D10 (CS)                    //
//2 D13 (SCK)                   //
//3 D11 (MOSI)                  //
//4 D12 (MISO)                  //
//5 +5V                         //
//6 GND                         //
#include <SPI.h>                //
#include <SD.h>                 //
  const int chipSelect = 10;    //
// set up variables using the   //
// SD utility library functions: //
  Sd2Card card;                 //
  SdVolume volume;              //
  SdFile root;                  //
  File configFile;              //
  File dataFile;                //
//                              //
  int fileindex = 0;            //
// is an SD-Card inserted?      //
  bool SDin = false;            //
//                              //
//==============================//

// Calibration of Diode-signal             //
// {Log3P1: Temp = a - b * log(Ch[x] + c);} //
```

```
            float a1; float b1; float c1;
            float a2; float b2; float c2;
            float a3; float b3; float c3;
            float a4; float b4; float c4;

//================================================================================
//||                                Setup                                       ||
//================================================================================
void setup() {
  // activate reading the AREF connected to the R2 poti in Sensor Version 2
//  analogReference(EXTERNAL); // to deactivate: change (EXTERNAL) to (DEFAULT);
  analogReference(DEFAULT); //  to activate: change (DEFAULT) to (EXTERNAL);
// activate serial communications for SD-Card and Display and wait for port to open:
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) { // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }

// ==============
// || ADS1115: ||
// ==============
  if (!ads.begin()) {
    Serial.println("Error: ADS1115 not found. Check wiring!");
    while (1);
  }

  // Set the gain (Gain)
  // Uncomment the gain that fits your needs
  ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // (± 6.144 V)
  // ads.setGain(GAIN_ONE);       // (± 4.096 V)
  // ads.setGain(GAIN_TWO);       // (± 2.048 V)
  // ads.setGain(GAIN_FOUR);      // (± 1.024 V)
  // ads.setGain(GAIN_EIGHT);     // (± 0.512 V)
  // ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);   // (± 0.256 V)

  // Initialize buffer with zeros
  for (int i = 0; i < adcsize; i++) {
    for (int j = 0; j < smoothSamples; j++) {
      chBuffer[i][j] = 0;
    }
  }

// ==============
// || Display: ||
// ==============
  Wire.begin(); // join i2c bus (address optional for writer)
  lcd1.begin(); //lcd2.begin();
// _____________
// | Version: |
// Software-version shown at start-up: [*Vers*]
```

```
  lcd16x2_1("SpecStrgt V02.4", "Sensor V3");
  // lcd16x2_2("SpecStrgt V02.4", "Sensor V1.2 - S1  ");
//================================

// Startup - Blink Test
  for (int i = 0; i < 3; i++){
    lcd1.backlight(); //lcd2.noBacklight();
    delay(blink);     //lcd2.backlight();
    lcd1.noBacklight(); delay(blink);
  } lcd1.backlight();

// ==============
// || LED-Bar: ||
// ==============
  bar1.begin();
  bar1.setBits(LEDbit[0]);
  // bar2.begin();  [*LED-Bar*]
  // bar2.setBits(LEDbit[0]);
// Startup - Blink Test
  for (int i = 0; i < 11; i++) {
    bar1.setBits(LEDbit[i]); //   [*LED-Bar*]bar2.setBits(LEDbit[i]); delay(blink);
  }
  bar1.setBits(LEDbit[0]); //   [*LED-Bar*]bar2.setBits(LEDbit[0]);
//_____________________________________
  // declare pins to be an in- or output:
  pinMode(LEDbar1DCKI, OUTPUT);
  pinMode(LEDbar1DI,   OUTPUT);
  //   [*LED-Bar*]pinMode(LEDbar2DCKI, OUTPUT);
  //   [*LED-Bar*]pinMode(LEDbar2DI,   OUTPUT);

  pinMode(I2CSCL, OUTPUT); pinMode(I2CSDA, OUTPUT);
  // pinMode(PinD1,   INPUT); pinMode(PinD2,   INPUT); // when on-board inputs are in use
//_____________________________________

// ==============
// || SD-Card: ||
// ==============
//&  Serial.print("\nInitializing SD card...");  delay(100);
  // see if the card is present and can be initialized:
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
  //&    Serial.println(" SD-Card failed, or not inserted");
      lcd1.clear(); lcd16x2_1("Please insert SD", "with calibration");
      SDin = false;
      delay(1000);
      lcd1.clear(); lcd16x2_1(" Calibration is ", "   not valid.   ");
  } else {
      Serial.println("SD-Card initialisiert ");
      lcd1.clear(); lcd16x2_1("SD-Card found,  ", "and ready to use");
      SDin = true;
```

```
    }
delay(1300); lcd1.clear(); //lcd2.clear();

// --------------------------------
// || Check if config.ini exists ||
// --------------------------------
    if (!SD.exists("config.ini")) {
      Serial.println("config.ini not found. Creating with default values...");
      lcd1.clear(); lcd16x2_1(" no config.ini  ", "   on SD-Card   ");
      delay(2000); lcd1.clear(); //lcd2.clear();
      // --------------------------------
      // ||  Generate standard values  ||
      // --------------------------------
        dataFile = SD.open("config.ini", FILE_WRITE);
          if (dataFile) {
            dataFile.println("# Fit function for temperature calculation:");
            dataFile.println("# Temp[x]: Temp = a - b * log(Ch[x] + c)");
            // dataFile.println("# Temp2 = c2 - m2 * pow(decay2, mVD2)");
            dataFile.println("a1=-889.26");
            dataFile.println("b1=-144.235");
            dataFile.println("c1=-9739.697");
            dataFile.println("a2=-967.99");
            dataFile.println("b2=-144.914");
            dataFile.println("c2=-16199.828");
            dataFile.println("a3=-339.82");
            dataFile.println("b3=-145.569");
            dataFile.println("c3=-217.296");
            dataFile.println("a4=-494.05");
            dataFile.println("b4=-158.371");
            dataFile.println("c4=-326.357");
            dataFile.println("# Fit function End");
            dataFile.close();
            Serial.println("Default config.ini created with values: ");
            Serial.println("a1=-889.26, b1=-144.235, c1=-9739.697");
            Serial.println("a2=-967.99, b2=-144.914, c2=-16199.828");
            Serial.println("a3=-339.82, b3=-145.569, c3=-217.296");
            Serial.println("a4=-494.05, b4=-158.371, c4=-326.357");
          } else {
            Serial.println("Error creating config.ini");
            lcd1.clear(); lcd16x2_1("   Could not    ", " write config.  ");
            }
    } else {
      Serial.println("config.ini found. Reading...");
      lcd1.clear(); lcd16x2_1("  Found valid   ", "config.ini on SD");
    }

    dataFile = SD.open("config.ini");
      if (dataFile) {
        while (dataFile.available()) {
```

```
          String line = dataFile.readStringUntil('\n');
          Serial.println(line); // Display each line on Serial Monitor
            line.trim(); // Remove whitespace
            if (line.startsWith("#")) {
                    continue; // Ignore lines that start with '#'
            }
            int separatorIndex = line.indexOf('=');
            if (separatorIndex > 0) {
              String key = line.substring(0, separatorIndex);
              String value = line.substring(separatorIndex + 1);

              // Assign to variables based on key
              if(key.equals("a1")) {
                a1 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("b1")) { b1 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("c1")) { c1 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("a2")) { a2 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("b2")) { b2 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("c2")) { c2 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("a3")) { a3 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("b3")) { b3 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("c3")) { c3 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("a4")) { a4 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("b4")) { b4 = value.toFloat();
              } else if(key.equals("c4")) { c4 = value.toFloat();}
            }
        }
        dataFile.close();
        lcd16x2_1(" Read Data from ", "   config.ini   ");
      } else { Serial.println("Error opening config.ini");
        lcd16x2_1(" Error opening  ", "   config.ini   ");
        }
delay(1000);

// ==============================
// || Write Header to SD-Card: ||
// ==============================
  switch (SDin) {
      case true: {
          // open the file. only one can be open at any time,
          File dataFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
          // if the file is available, write to it:
          if (dataFile) {
              dataFile.println("T1 in °C, T2 in °C");
              dataFile.close();
              Serial.println("Wrote Data.txt header");
              lcd16x2_1(" Wrote Data.txt ", "   to header    ");
delay(1000);
          }
```

```
          // if the file isn't open, pop up an error:
          else { Serial.println("error opening Data.txt");} delay(2000);
          break; // End case true
      }
      case false: break; // End case false
  }
lcd16x2_1("   Setup done   ", "               ");
delay(2000);
}


//================================================================================
//                                    Loop                                       |
//================================================================================
void loop() { loopTime = millis();
//____________________________________________________________


// ================================================       |
// ||      ***    read, smooth, and     ***     ||       |
// ||      ***       process each       ***     ||       |
// ||      ***          channel         ***     ||       |
// ================================================       |
  for (int i = 0; i < adcsize; i++) {
    int16_t raw = ads.readADC_SingleEnded(i); // Read raw ADC value
    chBuffer[i][chIndex[i]] = raw; // Store raw reading into circular buffer
    chIndex[i] = (chIndex[i] + 1) % smoothSamples; // Advance buffer index
    // Compute average for smoothing
    int32_t sum = 0;
    for (int j = 0; j < smoothSamples; j++) {
      sum += chBuffer[i][j];
    }
    Ch[i] = (float)sum / smoothSamples;
  }

// ================================================       |
// ||      ***    read sensor values    ***     ||       |
// ||      ***       and normalize      ***     ||       |
// ||      ***        to mV range       ***     ||       |
// ================================================       |
// Mapping analo signal to mVD[mV]                        |
// map(value, fromLow, fromHigh, toLow, toHigh)           |
    // mVD1 = map(analogRead(PinD1), 0, maxD1, 0, mapD1); //|
    // mVD2 = map(analogRead(PinD2), 0, maxD2, 0, mapD2); //|
    //  Serial.println("Read Diode signals");          //|
//_______________________________________________________|

// ================================================
// |       ***        Calibration       ***      | [*Temp*]
// ================================================
```

```
// see P:\2022\PST-9400-SpectroStraight\00_Data\Messungen\T-Cal...
// ...Sensor3_V2_4-P13243-039MF_T-Cal.opju
// calibration formular {Log3P1: Temp = a - b * log(Ch[x] + c);}
// ____________________________________________________________________
//  Calibration for Al
Temp1 = - 2961.86 +  389.95 * log(Ch[0] -  8625.437); // 2. ampstage Sensor 1
Temp2 = -20285.06 + 1964.71 * log(Ch[1] + 13728.461); // 2. ampstage Sensor 2
Temp3 = - 4260.21 +  831.54 * log(Ch[2] -    42.369); // 1. ampstage Sensor 1
Temp4 = - 3791.51 +  705.43 * log(Ch[3] -   124.269); // 1. ampstage Sensor 2
avTemp = (Temp1 + Temp2 + Temp3 + Temp4) / 4;
// ____________________________________________________________________
// ____________________________________________________________________
//  Calibration for steel
// Temp1 = -889.26 + 144.235 * log(Ch[0] -  9739.697); // 2. ampstage Sensor 1
// Temp2 = -967.99 + 144.914 * log(Ch[1] - 16199.828); // 2. ampstage Sensor 2
// Temp3 = -339.82 + 145.569 * log(Ch[2] -   217.296); // 1. ampstage Sensor 1
// Temp4 = -494.05 + 158.371 * log(Ch[3] -   326.357); // 1. ampstage Sensor 2
// ____________________________________________________________________
//  Temp1 = Ch[0];     // no Calibration Sensor 1
//  Temp2 = Ch[1];     // no Calibration Sensor 2
// ================================================

// averaging the two diode signals:
int Temp = (Temp1 + Temp2 + Temp3 + Temp4) / 4; // average of Temp1 to Temp4

// String to show calibration on display for debugging
  // String calStr1 = "-2962+390log(x-8625)";    // Cal Diode1 sec-stage
  // String calStr2 = "-20285+1965log(x+13728)"; // Cal Diode-Head1

//================================================
//|       ***          LED-Bar         ***       | [*LED*]
//================================================
// Setting upper temperature limit for the LED-Bar:
//    maxRichttemp = minRichttemp + 100 + map(analogRead(A2), 0, 1023, 0, 400) ;
    maxRichttemp = minRichttemp + 100;  // + 400; before
    String maxRTstring = String(maxRichttemp);

// Mapping Temp[degres] to LED[Bars 1-10]
    LEDBar1 = map(avTemp, minRichttemp,   maxRichttemp, 0, 10); // Bar shows average Temperature
    //   [*LED-Bar*]LEDBar2 = map(Temp, minRichttemp,   maxRichttemp, 0, 10);
    if (LEDBar1 > 10){LEDBar1 = 10;}
    if (LEDBar1 <  0){LEDBar1 =  0;}
    //   [*LED-Bar*]if (LEDBar2 > 10){LEDBar1 = 10;}
    //   [*LED-Bar*]if (LEDBar2 <  0){LEDBar1 =  0;}
//    LEDBar1 = map(analogRead(A2), 0, 1023, 0, 10); // can be removed, only for debug
// switching
    bar1.setBits(LEDbit[LEDBar1]);
    //   [*LED-Bar*]bar2.setBits(LEDbit[LEDBar2]);
```

```
//=============================================
//|  ***      write Data to SD-Card        ***   |
//=============================================
// make a string for assembling the data to log:
    String dataString = ""; String txtSensor1 = ""; String txtSensor2 = ""; String LCDString = "";
    // txtSensor1 +=   "Temp: ";
    txtSensor1 += String(avTemp);
    // txtSensor2 +=   "Temp2: ";
    txtSensor2 += String(avTemp);
    dataString += txtSensor1; dataString += ", "; dataString += txtSensor2;
    LCDString += String(millis()/1000.0); LCDString += " s, ";

switch (SDin) {
  case true:
  // open the file. only one can be open at any time,
  File dataFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
  if (!dataFile) {dataFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE | O_CREAT);}
  // if the file is available, write to it:
  if (dataFile) {
    dataFile.println(dataString);
    dataFile.close();
  }
  // if the file isn't open, pop up an error:
  else { Serial.println("error opening Data.txt");}
  case false: break;
}

//=====================================================================
//|          ***             Serial Monitor            ***          |
//=====================================================================
  Serial.print("Temp1:"); Serial.print(Temp1);   // Serial.println(" ");
  Serial.print(", ");
  Serial.print("Temp2:"); Serial.print(Temp2); // Serial.print("\n");
  Serial.print(", ");
  Serial.print("Temp3:"); Serial.print(Temp3);   // Serial.println(" ");
  Serial.print(", ");
  Serial.print("Temp4:"); Serial.print(Temp4); // Serial.print("\n");
  Serial.print(", ");
  Serial.print("avTemp:"); Serial.print(avTemp); // Serial.print("\n");
  Serial.print(", ");
  Serial.print("maxRTemp:"); Serial.print(maxRichttemp); // Serial.print("\n");
  // Serial.print("Ch1:"); Serial.print(Ch[0]);   // Serial.println(" ");
  // Serial.print(",");
  // Serial.print("Ch2:"); Serial.print(Ch[1]); // Serial.print("\n");
  // Serial.print(",");
  // Serial.print("Ch3:"); Serial.print(Ch[2]);   // Serial.println(" ");
  // Serial.print(",");
  // Serial.print("Ch4:"); Serial.println(Ch[3]);
```

```
    String LEDBar1string = String(LEDBar1);
    // String LEDBar2string = String(LEDBar2);
  Serial.print("\n");

// ====================================================================

//============================================
//|       ***         Display        ***      | [*cal*]
//============================================
  lcd16x2_1("              ", "              "); //lcd16x2_1(LCDString, dataString);
  int Sensor1offset = 0; int Sensor2offset = 0;
  Sensor1offset = 4-txtSensor1.length();
  // lcd1.setCursor(Sensor1offset,0); lcd1.print(String(mVD1));
  lcd1.setCursor(Sensor1offset,0); lcd1.print(String(avTemp));
  lcd1.setCursor(Sensor1offset,1); lcd1.print(txtSensor1);
  lcd1.setCursor(4,1); lcd1.print((char)223); // degree symbol
  lcd1.setCursor(5,1); lcd1.print("C, ");
  lcd1.setCursor(13,0); lcd1.print(dt);

  Sensor2offset = 12-txtSensor2.length();
  // lcd1.setCursor(Sensor2offset,0); lcd1.print(String(mVD2));
  lcd1.setCursor(Sensor2offset,0); lcd1.print(String(avTemp));
  lcd1.setCursor(Sensor2offset,1); lcd1.print(txtSensor2);
  lcd1.setCursor(12,1); lcd1.print((char)223); // degree symbol
  lcd1.setCursor(13,1); lcd1.print("C  ");

//  Serial.println(Sensor1offset); Serial.println(Sensor2offset); // for debugging only
// shows an "SD" on the LCD if SD-Card is recognized, if not it shows "no"
switch (SDin) {
  case true:  lcd1.setCursor(14,0); lcd1.print("SD");
              // lcd2.setCursor(14,0); lcd2.print("SD");
              break;
  case false: lcd1.setCursor(14,0); lcd1.print("no");
              // lcd2.setCursor(14,0); lcd2.print("no");
              break;
  }

// Showing the max T-value for the LED-Bar on Display 1 set by R1
    if(oldmaxRT != maxRichttemp)
      {
        lcd1.clear();
        lcd16x2_1("obere Richttemp:", maxRTstring); //lcd16x2_1(Row1, Row2);
        oldmaxRT = maxRichttemp;
        delay(200); // to be able to read the setting
        lcd1.clear();
      }

//  lcd16x2_2(calStr1, calStr2);
  dt = millis() - loopTime;
```

```
delay(1);
}
//================================================================================
//================================================================================
```