

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18.550 BR

## Thema

Zerstörungsfreie Qualitätsbewertung von MSG-Schweißverbindungen von Stahlfeinblech durch Nutzung geometrischer und thermographischer Kenngrößen

## Berichtszeitraum

01.01.2017 – 31.05.2019

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

## Forschungseinrichtung(en)

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (IWF)

Magdeburg, 20.12.2019

---

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

## Projektbearbeitung

**Titel:** Zerstörungsfreie Qualitätsbewertung von MSG-Schweißverbindungen von Stahlfeinblech durch Nutzung geometrischer und thermographischer Kenngrößen

**IGF-Nr.:** 18.550 BR

**Forschungsvereinigung (FV):** Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS  
Aachener Straße 172  
40223 Düsseldorf

**Forschungseinrichtung (FE):** Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (IWF)  
Universitätsplatz 2  
39106 Magdeburg

**Projektleiter:** Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner  
+49 (0)391 67 58741  
sven.juettner@ovgu.de

**Projektbearbeiter:** Dipl.-Ing. Benjamin Schlosser, IWE  
+49 (0)391 67 52753  
benjamin.schlosser@ovgu.de

## Zusammenfassung

Ein zentrales Qualitätskriterium an MSG-Schweißnähten ist neben der Vermeidung von Bindefehlern die Einbrandtiefe. Diese beschreibt, bis zu welcher Tiefe der Grundwerkstoff der zu verbindenden Bauteile aufgeschmolzen wurde. Von einem Bindefehler wird gesprochen, wenn keine Aufschmelzung stattgefunden hat. Die Gegenüberstellung mit anderen Qualitätsgrößen konnte zeigen, dass die Einbrandtiefe das kritischste Kriterium zum Erreichen der Qualität ist. Weiterhin wurde beobachtet, dass sich qualitätsrelevante Veränderungen an einer Schweißnaht auch an anderer Stelle niederschlagen. So weisen anforderungsgerechte und fehlerbehaftete Schweißnähte eine unterschiedliche äußere Form auf. Basierend auf den bisher erzielten Forschungsergebnissen konnte die äußere Geometrie der Schweißnahtoberfläche als Merkmalsträger identifiziert werden.

Bauteiltoleranzen verändern die Lage der zu verschweißenden Blechkanten und können das Ergebnis des Schweißprozesses massiv beeinflussen. Um Bauteiltoleranzen gezielt im Labormaßstab untersuchen zu können, wurden eigens Probengeometrien entwickelt, die die fertigungsbedingten Bauteilabweichungen Spalt und Versatz gezielt erzeugen. Dabei wird der Spalt durch Distanzelemente realisiert. Das Oberblech des Überlappstoßes hat einen definierten Kantenbeschnitt, der gegenüber der unveränderten Bahn des Schweißbrenners einen gezielten Versatz erzeugt. Auf diese Weise werden Schweißnähte mit definiert anforderungsgerechten und nicht anforderungsgerechten Bereichen hergestellt.

Für den Einsatz der Sensoren wurden Möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt. Der Einsatz von Laser-Triangulations-Sensoren für die Erfassung der Oberflächengeometrie in unmittelbarer Nähe des Schweißbrenners wurde erfolgreich umgesetzt. Sie ist möglich, jedoch mit gewissen Einschränkungen behaftet. Die Anwendung einer Wärmezeilenkamera im nahen Infrarotbereich ist vergleichsweise robust. Bei diesem Sensortyp besteht die Herausforderung vielmehr in der örtlichen Zuordnung der aufgezeichneten Daten.

In der Arbeit mit den Daten wurde ein methodisches Vorgehen erarbeitet und an die spezifischen Besonderheiten der beiden Datentypen angepasst. Die optisch gewonnenen Daten der Oberfläche der Schweißnaht sind Prinzip bedingt anfällig gegenüber Artefakten, die u.a. durch Schweißspritzer verursacht werden. Diese Artefakte werden vor der Analyse der Daten durch eine geeignete Filtermethode entfernt, um Messfehler zu vermeiden ohne dabei die Geometrieinformationen zu verfälschen. Hierfür wurde eine geeignete Methode entwickelt, die für derartige Datenauswertungen industriell verwendet werden kann. Nach dem erfolgreichen Durchlaufen der Qualitätsprüfung der Daten erfolgte die Erhebung der Messwerte. Für die sehr robusten Temperatur-Daten wurde gezeigt, dass Kehlnähte am Überlappstoß im Regelfall ein asymmetrisches Temperaturfeld aufweisen. Durch das Platzieren charakteristischer Referenzpunkte auf der Temperaturkurve konnte diese Asymmetrie durch einen Messwert beschrieben und dieser zu Analyse Zwecken genutzt werden.

Basierend auf einer explorativen Datenanalyse erfolgte die Auswahl geeigneter Messwerte für die Qualitätsbewertung. Da sowohl Schweißnahtqualität als auch die Geometrie und das Temperaturfeld der Schweißnahtoberfläche mit den Bauteiltoleranzen korrelieren, konnten direkte Rückschlüsse der beiden Informationsträger auf die Qualität gezogen werden. Das Zusammenführen und gemeinsame Nutzen der einzelnen Messgrößen aus Schweißnahtgeometrie und Temperaturfeld erfolgt mithilfe der multiplen Regression. Das

Ergebnis sind Vorhersageformeln, mit deren Hilfe die zu erwartende Einbrandtiefe an einer bestimmten Stelle der Schweißnaht berechnet werden können.

Folgende übergeordnete Teilziele des Projektes wurden erreicht:

- Einsatz von Laser-Triangulations-Sensoren zur Nahtgeometrienerfassung in unmittelbarer Nähe des Schweißbrenners
- synchrone Datenerfassung mit Laser-Triangulations-Sensor und Wärmezeilenkamera nachlaufend zu einem MSG-Schweißbrenner
- Methode zur Erstellung geometrischer Prozessfenster für die untersuchten Werkstoff-Prozess-Kombinationen
- identifizieren von Geometrie- und Temperatur-Messgrößen, die mit der Schweißnahtqualität korrelieren
- Aufstellen von Modellen zur Vorhersage der Einbrandtiefe bei Kehlnähten am Überlappstoß durch Zusammenführen der Einzelmessgrößen aus Geometrie und Temperatur
- zuverlässiges Erkennen aller nicht anforderungsgerechten Schweißnahtbereiche

**Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.**

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben mit der IGF-Nr. 18.550 BR / DVS-Nr. 03.128 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung und Unterstützung wird gedankt.

An dieser Stelle sei besonders den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die materielle Unterstützung und die wertvollen fachlichen Hinweise gedankt.

Unser Dank gilt:

Herrn Peter Bergmann	SD Automotive GmbH
Herrn Dr. Peter Daniel	VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH
Herrn Andreas Heidenreich	MSS Magdeburger Schweißtechnik GmbH
Herrn Thomas Köhler	HKS Prozesstechnik GmbH
Herrn Dr. Volker Schauder	HKS Prozesstechnik GmbH
Herrn Torsten König	InfraTec GmbH
Herrn Christian Kotschote	Audi AG
Herrn Daniel Rudolph	Audi AG
Herrn Wolfgang Kruglhuber	Fronius International GmbH
Herrn Oliver Moschner-Schweder	FANUC Deutschland GmbH
Herrn Christian Paul	CARL CLOOS SCHWEISSTECHNIK GMBH
Herrn Marco Queller	ThyssenKrupp Steel Europe AG
Herrn Burkard Tetzlaff	ThyssenKrupp Steel Europe AG
Herrn Michael Rohde	KUKA Deutschland GmbH
Herrn Thomas Rümmler	MICRO-EPSILON Optronic GmbH
Herrn Frank Steller	Linde AG
Herrn Mario Thielicke	Volkswagen AG
Frau Sabrina Vogt	BILSTEIN GmbH & Co. KG
Herrn Eberhard Vorein	Rausch & Pausch GmbH

Außerdem bedanken wir uns für die Unterstützung unserer Studenten bei der experimentellen Arbeit und der Auswertung der Daten. In der Laufzeit des Forschungsprojektes wurden die folgenden studentischen Arbeiten abgeschlossen, die in diesen Schlussbericht eingeflossen sind:

Bernig, Christoph.: Untersuchungen zur Korrelation zwischen Schweißnahtunregelmäßigkeiten und Spalt bzw. Kantenversatz beim MSG-Schweißen am Überlapstoß. Bachelorarbeit, 2018.

Lehmann, Till.: Analyse thermographischer Daten von MSG-Schweißnähten auf Nahtunregelmäßigkeiten. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Masterarbeit, 2018.

Schade, Benjamin.: Prozessbegleitende Digitalisierung von MSG-Schweißnahtoberflächen und Bewertung der Qualität der Datensätze für die Bestimmung geometrischer Merkmale. Projektarbeit, 2018

# Inhaltsverzeichnis

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung .....	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
Projektbearbeitung .....	2
Zusammenfassung.....	3
Danksagung.....	5
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....	9
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	13
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	14
1.1 Anlass für den Forschungsantrag.....	14
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU.....	15
2 Stand der Technik .....	17
2.1 Optische Linien-Messverfahren zur Digitalisierung von Oberflächen .....	17
2.1.1 Fehlereinflüsse und Maßnahmen zur Fehlervermeidung beim Messen mit Lichtschnittsensoren.....	19
2.1.2 Anwendungsgebiete von Lichtschnittsensoren.....	20
2.2 softwaregestützte Auswertung der Schweißnahtgeometrie .....	20
2.3 Thermografie.....	21
2.4 Bewertung der Fähigkeit zerstörungsfreier Prüfsysteme .....	23
3 Forschungsziel und Lösungsweg .....	24
3.1 Forschungsziel.....	24
3.2 Lösungsweg.....	24
4 Versuchsprogramm und verwendete Gerätetechnik.....	26
4.1 Projektplan .....	26
4.2 Arbeitspakete .....	26
4.3 Werkstoffe und Schweißprozesse .....	28
4.4 Versuchsaufbau .....	30
4.4.1 roter Lasertriangulationssensor und Thermoprofilscanner.....	31
4.4.2 blauer Lasertriangulationssensor und Thermoprofilscanner ergänzt durch Seilzugencoder .....	32
4.5 Probengestaltung.....	33
4.6 Versuchsumfang .....	35
4.7 geometrische Kenngrößen .....	35

4.8	Modellentwicklung	36
5	Forschungsergebnisse	37
5.1	Sensor-Einsatz im Umfeld des Lichtbogens	37
5.1.1	Messortwahl für Lasertriangulationsscanner	37
5.2	Prozessfenster	39
5.2.1	Gegenüberstellung der Qualitätsgrößen	39
5.2.2	Einfluss von Spalt und Versatz	43
5.2.3	Prozessfenster der Einbrandtiefe	44
5.3	Überprüfung der Robustheit	46
5.3.1	Sichtprüfung	46
5.3.2	Robustheit der Einbrandtiefe	47
5.4	Datenverarbeitung	49
5.4.1	Vorverarbeitung der Geometrie-Daten	49
5.4.2	Beschreibung der Form des Temperaturfeldes	50
5.5	Algorithmen	52
5.5.1	Bewertung des Informationsgehaltes der geometrischen Messgrößen	52
5.5.2	Informationsgehalt der Temperatur-basierten Messgrößen	55
5.5.3	Modellentwicklung	56
5.5.4	Modell-Typen	57
5.5.5	Spalt-unabhängige Modelle	57
5.5.6	Anpassung der Algorithmen	61
5.6	Ergänzende Forschungsergebnisse außerhalb der Arbeitspakete	62
6	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen	64
7	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen	67
8	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittelständige Unternehmen	68
8.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	68
8.2	Wirtschaftlicher Nutzen	68
9	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen	69
10	Transfermaßnahmen	70
10.1	Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen	70
10.2	Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende	71
10.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	72
11	Literatur	73



## Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

<i>Symbol</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
$\alpha_2$	Nahtübergangswinkel am Unterblech	°
Al-Si	Aluminium-Silizium(-Überzug)	
b	Breite des Einbrandes im Unterblech	mm
B	äußere projizierte Nahtbreite	mm
CMT	Cold Metal Transfer	
$\Delta X_G$	Messort-Abstand für Geometrie-Erfassung	mm
$\Delta X_T$	Messort-Abstand für Temperatur-Erfassung	mm
GPF	Geometrisches Prozessfenster	
h	Einbrandtiefe im Unterblech	mm
h	prozentuale Einbrandtiefe im Unterblech	%
$h_p$	prognostizierte Einbrandtiefe	%
H1	Nahthöhe über dem Oberblech, Nahtüberhöhung	mm
H2	Nahthöhe über dem Unterblech	mm
KLB	konventioneller Kurzlichtbogen	
LTS	Laser-Triangulations-Sensor	
MSG	Metall-Schutzgas(-Schweißen)	
MAG	Metall-Aktivgas(-Schweißen)	
n	Anzahl untersuchter Proben	
n.i.O.	nicht in Ordnung / nicht anforderungsgerecht	
PA	Projektbegleitender Ausschuss	
QS	Qualitätssicherung	
i.O.	in Ordnung / anforderungsgerecht	
S	eingestellter Spalt zwischen den Blechen	mm
$t_{1/2}$	Blechdicke das Ober- bzw. Unterblechs	mm
TPS	Thermo-Profil-Scanner	
V	Versatz des Drahtaufsetzpunktes	mm
$v_{Dr}$	Drahtvorschubgeschwindigkeit	m/min
$v_S$	Schweißgeschwindigkeit	cm/min
VT	Visual Testing / Sichtprüfung	
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung	

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Auswirkung der Form- und Lagetoleranzen von Blechbauteilen auf den Überlappstoß..	15
Bild 2: links: Messprinzip der Lasertriangulation unter Beachtung der Scheimpflug-Bedingung in Anlehnung an [9, 10] , rechts: Versuchsaufbau mit Lasertriangulationssensor .....	18
Bild 3: Thermogramm eines MSG-Schweißprozesses mit Schmelzbad und abkühlender Schweißnaht .....	21
Bild 4: schematische Darstellung der möglichen Ergebnisse einer zerstörungsfreien Prüfung..	23
Bild 5: Arbeitsschritte zum Erreichen des Forschungsziels .....	25
Bild 6: Definition des Koordinatensystems der Schweißproben mit Nullposition für Spalt und Versatz.....	30
Bild 7: Anordnung der Messstellen für roten LTS und TPS.....	31
Bild 8: Versuchsaufbau mit blauem Lasertriangulationssensor und Thermoprofilscanner.....	32
Bild 9: Übersicht der Probentypen .....	33
Bild 10: Details der Probengestaltung für Proben mit kontinuierlicher Kantenauslenkung.....	34
Bild 11: Versuchsmatrix für S420MC KLB M21 .....	35
Bild 12: Versuchsmatrix für 22MnB5+AS150 CMT C1 .....	35
Bild 13: Versuchsmatrix für HX340LAD+Z140 CMT C1 .....	35
Bild 14: Kenngrößen an Schweißnähten – Qualitätskriterien und Kenngrößen zur Beschreibung der Nahtgeometrie.....	36
Bild 15: Geometrie-Rohdaten eines roten Lasers in 30 mm Abstand zum Lichtbogen.....	37
Bild 16: Auslöschung der Schweißnaht bei Messort auf der glühenden Schweißnaht .....	38
Bild 17: Geometrie-Profile, aufgezeichnet mit einem blauen LTS auf der glühenden Schweißnaht unmittelbar hinter dem Schweißbrenner.....	38
Bild 18: S420MC KLB M21 – Veränderung der Nahthöhe H1 in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	40
Bild 19: S420MC KLB M21 – Veränderung des Nahtübergangswinkels in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	40
Bild 20: S420MC KLB M21 – Veränderung der Nahtbreite in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	40
Bild 21: S420MC KLB M21 – Veränderung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	40
Bild 22: Einbrandtiefe für den Werkstoff S420MC in Abhängigkeit von Spalt und Kantenversatz .....	40
Bild 23: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Veränderung der Nahthöhe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	41
Bild 24: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Veränderung des Nahtübergangswinkels in Abhängigkeit von Spalt und Versatz .....	41
Bild 25: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Veränderung der Einbrandbreite in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	41
Bild 26: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Veränderung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	41
Bild 27: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Veränderung der Nahthöhe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz.....	42

Bild 28: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Veränderung des Nahtübergangswinkels in Abhängigkeit von Spalt und Versatz .....	42
Bild 29: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Veränderung der Einbrandbreite in Abhängigkeit von Spalt und Versatz .....	42
Bild 30: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Veränderung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz .....	42
Bild 31: Einfluss des gemessenen Spaltes auf die Einbrandtiefe (S420MC) .....	43
Bild 32: Einfluss des Versatzes auf die Einbrandtiefe (S420MC) .....	43
Bild 33: Einfluss des gemessenen Spaltes auf die Einbrandtiefe (22MnB5+AS150) .....	43
Bild 34: Einfluss des Versatzes auf die Einbrandtiefe (22MnB5+AS150) .....	43
Bild 35: Einfluss des gemessenen Spaltes auf die Einbrandtiefe (HX340LAD+Z140) .....	44
Bild 36: Einfluss des Versatzes auf die Einbrandtiefe (HX340LAD+Z140) .....	44
Bild 37: S420MC KLB M21 – Prozessfenster der Einbrandtiefe mit exemplarischen Schliffbildern .....	45
Bild 38: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Prozessfenster der Einbrandtiefe mit exemplarischen Schliffbildern .....	45
Bild 39: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Prozessfenster der Einbrandtiefe mit exemplarischen Schliffbildern .....	46
Bild 40: S420MC KLB M21 – Sichtprüfung .....	46
Bild 41: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Sichtprüfung .....	47
Bild 42: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Sichtprüfung .....	47
Bild 43: S420MC KLB M21 – Einbrandtiefe einschließlich Proben mit veränderter Probengeometrie .....	48
Bild 44: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Einbrandtiefe einschließlich Proben mit veränderter Probengeometrie .....	48
Bild 45: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Einbrandtiefe einschließlich Proben mit veränderter Probengeometrie .....	48
Bild 46: Schritte der Geometriedaten-Vorverarbeitung Drehen, Sortieren und Filtern an einem Beispiel mit 4 Ausreißern. Nach dem Entfernen der Ausreißer verbleibt an deren ursprünglicher Position eine Lücke von 0,85 mm Breite .....	50
Bild 47: 3D-Darstellung eines Temperaturfeldes aus aneinandergereihten Profilen. Die Profilpunkte haben einen Bereich von 20 mm erfasst .....	50
Bild 48: links: Temperaturprofil mit Messgröße Flächenverhältnis rechts: Verlauf des Flächenverhältnisses über einer unbeeinflussten anforderungsgerechten Schweißnaht .....	51
Bild 49: Links: Messgröße „Isothermer Symmetrie-Quotient (ISQ)“, rechts: Veränderung des ISQ über einer anforderungsgerechten Schweißnaht mit Spalt 0,5 mm ohne Kantenauslenkung .....	51
Bild 50: Verlauf von Flächenverhältnis und ISQ bei 950 °C über einer Schweißnaht .....	52
Bild 51: S420MC KLB M21 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe h und Nahtübergangswinkel $\alpha_2$ (links) bzw. projizierter äußerer Nahtbreite B (rechts) .....	53
Bild 52: S420MC KLB M21 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe h und Nahthöhe H1 (links) bzw. Nahthöhe H2 (rechts) .....	53
Bild 53: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe h und Nahtübergangswinkel $\alpha_2$ (links) bzw. projizierter äußerer Nahtbreite B (rechts) .....	54
Bild 54: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe h und Nahthöhe H1 (links) bzw. Nahthöhe H2 (rechts) .....	54
Bild 55: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe h und Nahtübergangswinkel $\alpha_2$ (links) bzw. projizierter äußerer Nahtbreite B (rechts) .....	55

Bild 56: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe h und Nahthöhe H1 (links) bzw. Nahthöhe H2 (rechts) .....	55
Bild 57: S420MC KLB M21 – Korrelation zwischen isothermem Symmetrie-Quotient und Einbrandtiefe .....	56
Bild 58: S420MC KLB M21 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell .....	58
Bild 59: S420MC KLB M21 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell .....	58
Bild 60: S420MC KLB M21 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell mit Interaktionen .....	58
Bild 61: S420MC KLB M21 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell mit Interaktionen .....	58
Bild 62: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell .....	59
Bild 63: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell .....	59
Bild 64: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell mit Interaktion .....	59
Bild 65: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell mit Interaktionen .....	59
Bild 66: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell .....	60
Bild 67: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell .....	60
Bild 68: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell mit Interaktion .....	60
Bild 69: HX340LAD+Z140 CMT C1 – Einbrandtiefe h gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell mit Interaktionen .....	60
Bild 70: 22MnB5+AS150 CMT C1 – Spalt-spezifische Einbrandmodelle .....	61
Bild 71: Poren-Einfluss auf das Temperaturfeld – HX340LAD+Z140 CMT C1 .....	62
Bild 72: Durchstrahlungsprüfung – HX340LAD+Z140 CMT C1 .....	63

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Geometrische Kenngrößen und ihre Anwendung für Schweißnahteigenschaften ....	20
Tabelle 2. Prozess- und Nahtunregelmäßigkeiten sowie korrespondierende thermografische Messgrößen [47] .....	22
Tabelle 3: Projektplan .....	26
Tabelle 4: Übersicht der Werkstoff-Prozess-Paarungen .....	29
Tabelle 5: Presshärteparameter .....	29
Tabelle 6: Versuchsrandbedingungen .....	29
Tabelle 7: optimale Messort-Abstände zur Aufzeichnung des Temperaturfeldes .....	32
Tabelle 8: Übersicht der realisierten Probengeometrien .....	34
Tabelle 9: Qualitätskriterien für Schweißnähte .....	36
Tabelle 10. Abfolge der methodischen Arbeitsschritte der Datenverarbeitung .....	49
Tabelle 11: Auswahlmatrix von Messgrößen für Einbrand-Prognose.....	56
Tabelle 12: Probenumfänge .....	65

# **1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Neben der Prozesssicherheit von Fertigungsprozessen ist in der industriellen Fertigung vor allem der Nachweis der erzielten Qualität von zunehmender Bedeutung. Durch eine automatische Schweißnahtüberwachung, unmittelbar nach dem Schweißvorgang, kann eine Untersuchung der gefügten Bauteile mit sehr geringem zeitlichem Mehraufwand realisiert werden. Mit dem untersuchten Verfahren sollen Defekte (zum Beispiel Bindefehler) ermittelt werden, die bisher nur zerstörend geprüft werden können. Dadurch kann die fertigungsbegleitende zerstörende Prüfung reduziert werden. Durch einen höheren Automatisierungsgrad in der Bauteilprüfung werden Fehler durch menschliches Versagen reduziert. Weiterhin wird dem Bediener die monotone (ausschließlich beobachtende) Arbeit der Schweißnahtprüfung abgenommen und somit die Ergonomie des Prozesses gesteigert.

## **1.1 Anlass für den Forschungsantrag**

Die Entwicklung der Fertigungstechnologien wird zunehmend durch die Nutzung von Sensorik zur Analyse der Prozesse geprägt und bildet eine wichtige Voraussetzung zur Erreichung von Produktionsabläufen, die unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefasst sind. Ein wesentliches Ziel dabei ist die Selbstorganisation von Prozessen, bei denen die Ergebnisse eines Fertigungsschrittes aus den Prozessgrößen heraus analysiert werden und eine nachfolgende Prüfung der Eigenschaften vermieden werden soll. Ein erster Schritt im Bereich des Lichtbogenschweißens ist die Einführung von Prozesssensorik zum zerstörungsfreien Nachweis von Verbindungseigenschaften.

Bei der Fertigung von Strukturen aus Stahlblechen mit dem Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG) ist eine Abweichung zwischen der Soll-Gestalt der zu verschweißenden Einzelteile und der Ist-Gestalt fertigungsbedingt unvermeidbar. Im Falle des Überlappstoßes äußern sich Toleranzen der Bauteile in Form von Spalt bzw. einem Versatz des Flansches [1], was in Bild 1 skizziert wurde. Diese Konstellation ist u.a. häufig in der Automobilindustrie anzutreffen. Überschreiten die Bauteilabweichungen das zulässige Fenster des Schweißprozesses, treten unzulässige Unregelmäßigkeiten, wie z.B. Bindefehler auf. Der zerstörungsfreie Nachweis von inneren Fehlern an MSG-Schweißnähten stellt nach wie vor eine technologische und wirtschaftliche Herausforderung dar, da aufgrund der spezifischen Begebenheiten bei Kehlnähten am Überlappstoß bei einseitiger Zugänglichkeit die konventionellen ZfP-Verfahren ausscheiden. Die stichprobenartige produktionsbegleitende zerstörende Prüfung ist daher derzeit der etablierte Stand der Technik zum Nachweis der Verbindungsqualität. Die beschriebenen Umstände liefern die Motivation, an einer MSG-Schweißnaht äußerlich erfassbare Daten zur Beurteilung der inneren Qualität heranzuziehen.

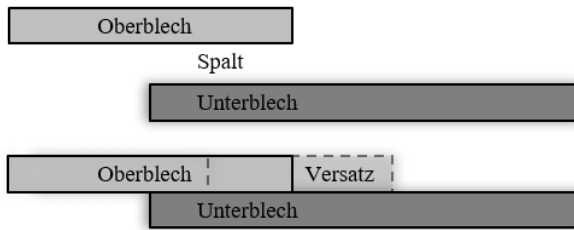


Bild 1: Auswirkung der Form- und Lagetoleranzen von Blechbauteilen auf den Überlappstoß

Bei der Fertigung von Strukturen durch MSG-Schweißen aus Stahlfeinblech stellt der zerstörungsfreie Nachweis von Unregelmäßigkeiten bzw. Fehlern eine technologische und wirtschaftliche Herausforderung dar. Insbesondere in der automatisierten Großserienfertigung ist die zerstörende Prüfung der Standard zum Nachweis häufig auftretender innerer Nahtunregelmäßigkeiten wie Einbrandfehlern und Poren. Mit dem Projekt soll eine fertigungsbegleitende zerstörungsfreie Prüfung erforscht werden, die unmittelbar nach dem Schweißvorgang innere Nahtfehler erkennt. Sie soll mit geringem Aufwand an die jeweilige Fertigungssituation und –aufgabe angepasst werden können.

Der Ansatz des Forschungsvorhabens besteht in der Nutzung mehrerer Sensoren zur Aufnahme von Prozessgrößen und einer Auswertung durch Korrelation der verschiedenen Messgrößen. Durch die kombinierte Auswertung zweier Sensoren sollen die Nachteile der Nutzung der jeweils einzelnen Systeme kompensiert werden. Bei der bisherigen Vorgehensweise mit der Verwendung eines einzelnen Sensors war die Auswertung der Messung auf den jeweiligen Anwendungsfall (Nahtform, Blechdicke, Schweißposition) beschränkt und die Bewertungsgrenzen mussten spezifisch zu der jeweiligen Schweißaufgabe ermittelt werden. Der exakte Abgleich der Sensorsignale an den Anwendungsfall erfordert einen erheblichen Einarbeitungsaufwand und die Nachweissicherheit ist begrenzt, so dass es entweder zu Pseudoausschuss oder nicht gefundenen Fehlern kommt. Durch die Kombination der Sensoren soll die Nachweisgenauigkeit verbessert und der Aufwand für die Bestimmung der Fehlergrenzen verringert werden.

Das Ziel des Projektes MSGeoTherm ist, einen Zusammenhang zwischen der Nahtgeometrie und dem Temperaturfeld anhand der Sensormesssignale zu charakterisieren, sodass eine zuverlässige zerstörungsfreie Abschätzung innerer Nahtunregelmäßigkeiten wie der Einbrandtiefe möglich wird.

## 1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sollen zur Realisierung einer neuen zerstörungsfreien fertigungsbegleitenden Prüfmethode führen, die den Nachweis innerer Nahtunregelmäßigkeiten wie Einbrandfehler unmittelbar nach dem Schweißen ermöglicht. Damit soll die Sicherheit der Produkte verbessert und der Anteil der zerstörenden Prüfung und der damit verbundenen Kosten deutlich vermindert werden. Die Prüfmethode soll durch Hersteller von geschweißten Blechbaugruppen u.a. für die Automobilindustrie und andere Fertigungsbereiche mit automatisierten MSG-Prozessen angewendet werden, von denen viele zu KMU zählen. Diese Lieferanten fertigen Komponenten wie Achsträger, Antriebskomponenten, Fahrwerksteile oder ähnliche Baugruppen durch MSG-Schweißen dreidimensional umgeformter Blechbauteile. Die vorherrschende Stoßart ist der Überlappstoß. Die Blechdicken der oberflächenveredelten oder

unbeschichteten Stahlbleche liegen üblicherweise im Bereich von 1 mm bis 3 mm. Für dieses Anwendungsspektrum stellen Einbrandfehler eine häufige Unregelmäßigkeit dar, die lediglich durch zerstörende Prüfung erkannt werden kann.

Die erforderliche Prüftechnik soll durch die entsprechenden Systemhersteller von Mess-, Sensorsystemen und Auswertesoftware geliefert werden, die größtenteils zu KMU zählen. Diese Hersteller verwenden bereits die im Projekt geplanten Sensorsysteme, jedoch nicht in Kombination. Zu der Sensortechnik liefern diese auch die zur Nutzung im Schweißprozess erforderliche Auswertesoftware, sie unterstützen bei der Umsetzung und Anpassung an die jeweilige Anwendung.

Durch die Einbeziehung von Schweißanlagenherstellern, ebenfalls KMU, soll die Verknüpfung des Messsystems mit den Schweißanlagen erfolgen. Die Anlagenhersteller realisieren immer weiter spezifizierte Lichtbogenvarianten insbesondere im Kurzlichtbogenbereich zur Verminderung der in die Baugruppen eingebrachten Schweißenergie. Durch den verminderten Energieeintrag wird auch die Einbrandtiefe der Schweißnaht vermindert, so dass ein geeignetes Sensorsystem zum Nachweis der Einbrandtiefe von großem Interesse der Hersteller ist, um die jeweiligen Anwendungen mit den neuen Lichtbogenvarianten abzusichern.



## **2 Stand der Technik**

Es bestehen mehrere technischen Möglichkeiten zur Überwachung von Lichtbogenschweißprozessen. [2] Im Folgenden werden einige Ansätze beschrieben, die im Zusammenhang mit diesem Forschungsvorhaben stehen.

Über die Schmelzbadbewegung ist bekannt, dass der Schmelzbadradius mit der Eigenfrequenz der Schmelzbadbewegung korreliert. Bei unvollständiger Durchschweißung besteht ein Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz und Schmelzbadvolumen, also Durchmesser und Tiefe. Das Schwingverhalten von Schmelzbädern mit teilweiser und vollständiger Durchschweißung unterscheidet sich signifikant, so dass der Übergang von teilweiser zu vollständiger Durchschweißung mit einer sprunghaften Verringerung der Eigenfrequenz einhergeht und somit zur Überwachung der Durchschweißung während des Schweißens genutzt werden kann. Eine Bewertung der Einbrandtiefe bei teilweiser Durchschweißung ist hingegen nicht möglich. [3, 4] Für Anwendungen im Überlappstoß sind keine Anwendungen der Methode bekannt.

Mit der emittierten Wärmestrahlung als Informationsquelle zur Schmelzbadanalyse wird der Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Schmelzbades und dem Temperaturfeld über der Schweißnaht genutzt, wobei in das Temperaturfeld neben der Schmelzbadgröße weitere Einflussgrößen wirken, wie beispielsweise die Wärmeableitung in den umgebenden Grundwerkstoff. [5]

Eine Möglichkeit zur praktischen Umsetzung ist die Analyse eines Linienprofils quer zur Schweißrichtung über Schmelzbad und angrenzenden Grundwerkstoff. Durch die Bestimmung der Temperaturverteilung anhand der Wendepunkte der Funktion des Temperaturgradienten können die Grenzen des Schmelzbades bestimmt und somit deren Breite errechnet werden. Die Schmelzbadbreite kann als Eingangsgröße für die Prozessregelung oder als Indikator für die Qualitätssicherung genutzt werden. [6]

Durch die Auswertung des Temperaturlängsprofils über Schmelzbad und Schweißgut kann die Erstarrungszeit bestimmt werden, die stark mit der Einbrandtiefe korreliert. [7]

### **2.1 Optische Linien-Messverfahren zur Digitalisierung von Oberflächen**

Lichtschnittsensoren sind optische Sensoren, die das Verfahren der Triangulation zur Bestimmung einer Geometrie nutzen. Bei der Triangulation handelt es sich um ein rein geometrisches Verfahren zur Abstandsmessung durch Winkelberechnung. Wie Bild 2 zeigt, sendet eine Laserdiode einen definierten Lichtstrahl mit parallelem Strahlengang aus. Um statt eines einzelnen Punktes, eine Messlinie aufzunehmen, wird der Lichtstrahl des Lasers mit einer Optik zu einer Linie aufgefächert. Auf dem Messobjekt wird das Licht diffus reflektiert und durch eine Optik auf die Empfangsmatrix eines Fotosensors gelenkt. Dieser befindet sich im Bereich des gelb-schwarzen Aufklebers. Je nach Abstand des Sensors zum Objekt variiert der Auftreffpunkt des reflektierten Strahls auf der Empfangsfläche des Fotosensors. Durch die bekannte Anordnung von Sender, Empfänger und Optik berechnet der Sensor aus dem Auftreffpunkt den Abstand zum Objekt. Aus der Position und dem Verlauf der auf der Sensormatrix aufgenommenen Liniengeometrie, berechnet der Sensor die Kontur des Messobjekts an der Stelle der reflektierten Laserlinie.

Durch die Bewegung des Sensors, senkrecht zur Laserlinie, und die periodisch wiederholte Aufzeichnung von Messprofilen wird ein dreidimensionales Abbild der Oberfläche erzeugt. [8–10]

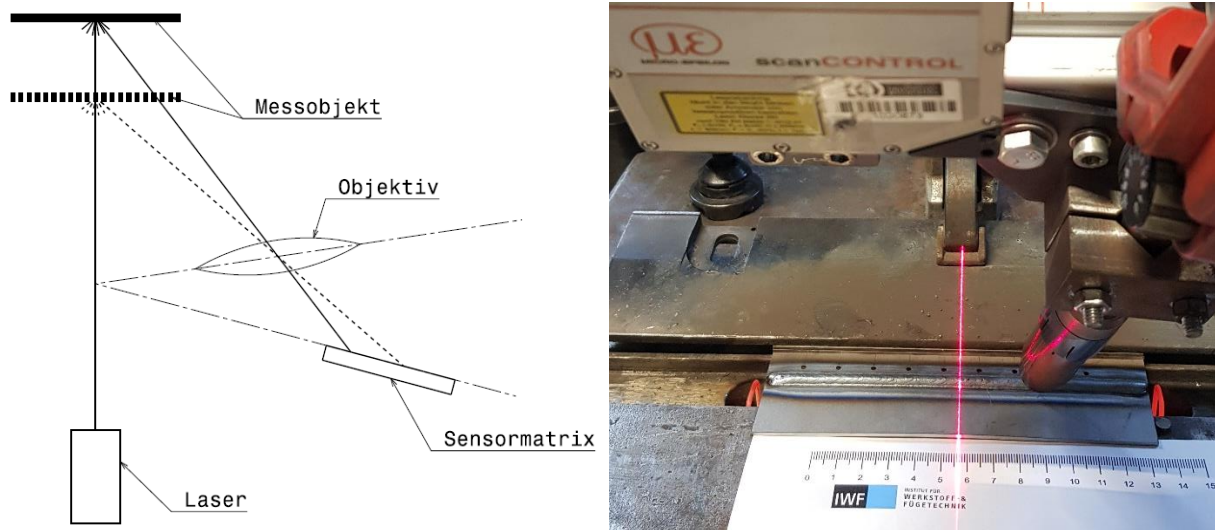


Bild 2: links: Messprinzip der Lasertriangulation unter Beachtung der Scheimpflug-Bedingung in Anlehnung an [9, 10], rechts: Versuchsaufbau mit Lasertriangulationssensor

Damit der Sensor über einen möglichst großen Arbeitsbereich verfügt, muss gewährleistet sein, dass die Bildschärfe bestehen bleibt, wenn sich der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt ändert. Dies ist gegeben, wenn die sogenannte „Scheimpflug-Bedingung“ erfüllt ist. Diese besagt, dass sich die Bildebene, die Objektivenebene und die Objektebene in einer gemeinsamen Achse schneiden müssen, damit ein scharfes Bild entsteht. Übertragen auf die Anordnung von Objektiv, Laser und Empfänger matrix in einem Lasertriangulationssensor resultiert daraus, dass sich die optische Achse des Objektivs und die Empfangsebene der Sensormatrix im Laserstrahl schneiden müssen (siehe Bild 2). Die Winkel zwischen Laser, Matrix und Objektiv bestimmen die Lage des Arbeitsbereiches. Um statt eines einzelnen Punktes, eine Messlinie (Profil) aufzunehmen, wird der Lichtstrahl des Lasers mit einer Optik zu einer Linie aufgefächert. Die Empfänger matrix wird nun von einer einzelnen Photodioden-Zeile zu einer Photodioden-Fläche erweitert. Bei dieser Bauart spricht man von einem Lichtschnittsensor. [11] Aus der Position und dem Verlauf, der auf der Sensormatrix aufgenommenen Liniengeometrie, berechnet der Sensor die Kontur des Messobjekts an der Stelle der reflektierten Laserlinie. Die vom Sensor aufgenommene Linie ist als erstes Messergebnis zu betrachten, welches direkt vom Sensor, aber auch von der nachgelagerten Auswertungssoftware immer weiter interpretiert, korrigiert und verarbeitet wird, um zum finalen Messergebnis zu gelangen. [9, 10]

### **2.1.1 Fehlereinflüsse und Maßnahmen zur Fehlervermeidung beim Messen mit Lichtschnittsensoren**

Das aufgenommene Lichtsignal unterliegt verschiedenen Fehlereinflüssen, welche bei der Reflexion am Messobjekt ausgelöst werden. Typische Fehlerursachen sind:

- Spiegelnde Bauteiloberflächen
- Starke Farbunterschiede auf dem Bauteil
- Nicht reflektierende Bauteiloberflächen
- Reflexion an Umgebungsobjekten
- Interferenz des Laserlichts
- Fremdlicht, bzw. Fremdstrahlung

Die erste typische Fehlerquelle ist eine hochglänzende, beziehungsweise spiegelnde Oberfläche. Auf dieser findet keine ausreichend diffuse Reflexion statt. Entweder wird der Lichtstrahl so reflektiert, dass er die Optik nicht trifft und es kann durch Unterbelichtung kein Signal aufgenommen werden, oder der Strahl wird direkt in die Optik reflektiert. Dann kommt es zu einer Überbelichtung des Fotosensors und das Signal kann keiner eindeutigen Position zugeordnet werden. Deshalb sind spiegelnde Oberflächen für die Messung mit einem Lichtschnittsensor ungeeignet. [12]

Der Reflexionsgrad des Messobjektes darf allerdings auch nicht zu gering sein, damit der Sensor ausreichend belichtet wird. Auch stark wechselnde Farben können Fehler hervorrufen. Da die Belichtungsparameter nur für ein ganzes Profil verändert werden können, sind starke Farbunterschiede als mögliche Fehlerquelle zu betrachten, die vermieden werden sollten. [13]

Ein weiterer Fehler kann durch indirekte Reflexion entstehen. Wird der Lichtstrahl des Lasers nach dem eigentlichen Messobjekt noch an einer anderen Oberfläche (z.B. Werkstückkante oder Vorrichtung) reflektiert und dabei in die Empfangsoptik gelenkt, so wird die Aufzeichnung auf der Sensormatrix durch die zusätzlichen Signale gestört. Dieser Fehlereinfluss muss bei der Konstruktion der Messvorrichtung beachtet werden. [10]

Zusätzlich kann das Messergebnis durch Interferenz bei der Reflexion des kohärenten Laserlichtes beeinflusst werden, den sog. Speckle-Effekt. Diese kann zur Auslöschung des Signals oder zur Überbelichtung durch Superposition führen. Dieser Effekt ist von der Wellenlänge abhängig und bei kürzeren Wellenlängen weniger stark ausgeprägt. [12]

Im vorliegenden Fall, dem Einsatz eines Lichtschnittsensors in der Nähe eines Schweißlichtbogens, ist zusätzlich ein Fehlereinfluss durch Fremdlicht anzunehmen. Normales Umgebungslicht kann, auch wenn die Wellenlänge des Lasers im Spektrum enthalten ist, durch die wesentlich geringere Intensität klar vom reflektierten Laserlicht unterschieden werden. Vom Schweißlichtbogen und dem glühenden Schweißgut geht aber Strahlung mit wesentlich höherer Intensität aus. Diese liegt auch im Bereich der Wellenlänge des Lasers (beim verwendeten Sensor: 658 nm, sichtbar, rot), sodass sie nicht mit einem Interferenzfilter ausgeblendet werden kann. Dies kann zur Störung der Signalaufzeichnung führen. Weiterhin wurde untersucht, inwiefern sich die verwendete Laser-Wellenlänge auf die Messbarkeit von glühenden Oberflächen auswirkt. Es wurde ermittelt, dass mit einem Laser der Wellenlänge 620 nm und einer Leistung von 20 mW, eine Stahloberfläche bis maximal 1100°C vermessen werden kann. Bei höheren Probertemperaturen überdeckte die von der Probe ausgehende Strahlung den Lichtfleck des Lasers so stark, dass dieser nicht mehr von einer Kamera detektierbar sei.

Weiterhin wurde bestätigt, dass die zulässige Oberflächentemperatur mit abnehmender Laser-Wellenlänge steigt. [14]

### 2.1.2 Anwendungsgebiete von Lichtschnittsensoren

Die Lasertriangulation und das Laserlichtschnittverfahren finden ein sehr breites Anwendungsspektrum in der Industrie. [15] Lasertriangulationssensoren, die den Abstand zum Messobjekt an einem Punkt messen, werden beispielsweise zur Füllstandskontrolle in Behältern, zur Prüfung der Dicke eines Blechbandes oder zum Messen der Höhe eines Bauteils auf einem Transportband verwendet. [16, 17] Laserlichtschnittsensoren, die zum Messen einer Bauteilkontur verwendet werden, dienen häufig als Nahtverfolgungssensor. Das heißt, sie werden dem Brenner vorlaufend angeordnet und bestimmen die Position der Fuge. Die Position des Brenners wird dann nachgeregelt. [18–20] Aber auch Systeme zur Untersuchung der geschweißten Nahtgeometrie sind bereits am Markt verfügbar. Sie sind für das Prüfen von Laser- und Schutzgasschweißnähten etabliert. [21–25] Ein weiteres Anwendungsgebiet von Laserlichtschnittsensoren liegt im Reverse-Engineering, dabei wird die Geometrie eines existierenden Bauteils (z.B. ein Prototyp) in ein CAD-Modell überführt, um das Bauteil anschließend reproduzieren zu können. [26]

### 2.2 softwaregestützte Auswertung der Schweißnahtgeometrie

Am Beispiel von Stumpfstoßschweißungen mit dem Impulslichtbogen an 2 mm unlegierten Stahlblechen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl Schmelzbad als auch Schweißgutoberfläche in Abhängigkeit von der Einbrandtiefe bzw. dem Grad der Durchschweißung eine charakteristische Oberflächengeometrie aufweisen. Als Schwierigkeit wurde erkannt, Messgrößen zu identifizieren, die eine gute Echtzeit-Messbarkeit aufweisen. [6, 27]

Im Bereich der optischen Messtechnik existieren diverse Produkte am Markt, die entweder als Nahtverfolgungssystem oder zur optischen Qualitätsbewertung eingesetzt werden können. Die größte Verbreitung haben dabei Lichtschnittsensoren auf Basis sichtbarer Laser, sog. Lasertriangulationssensoren. Die bisherigen Prüfanwendungen beschränken sich auf äußerlich sichtbare Merkmale und können somit als automatisierte Sichtprüfung eingeordnet werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über bisher etablierten Mess- und Prüfanwendungen. [8, 25, 28–30]

Tabelle 1. Geometrische Kenngrößen und ihre Anwendung für Schweißnahteigenschaften

Geometrische Kenngröße	Anwendbar für Eigenschaften
Lotrechter Abstand Punkt-Gerade bzw. Punkt-Kontur	Nahtüberhöhung, Nahthöhe, offene Poren, Einbrandkerben
Abstand zwischen zwei Schnittpunkten	Nahtbreite, Durchbrand
Interpolation unter Punktreihe	Nahtvolumen
Winkel zwischen zwei Geraden	Verzug, Nahtübergangswinkel*

\*eingeschränkte Robustheit der Methode in der industriellen Anwendung

## 2.3 Thermografie

Thermografie wird in DIN 54192 als die Erfassung, Umwandlung und bildliche Darstellung von elektromagnetischen Wellen im Infrarotbereich, die von einer Oberfläche ausgehen, beschrieben. Die Anwendung dient u.a. dazu, Abweichungen der Temperaturemission bei Maschinen oder Bauteilen zu identifizieren. Die emittierte Strahlung des Objekts wird vom Thermografie-Sensor aufgenommen, in eine Temperatur umgerechnet und als Thermogramm dargestellt. [31, 32]

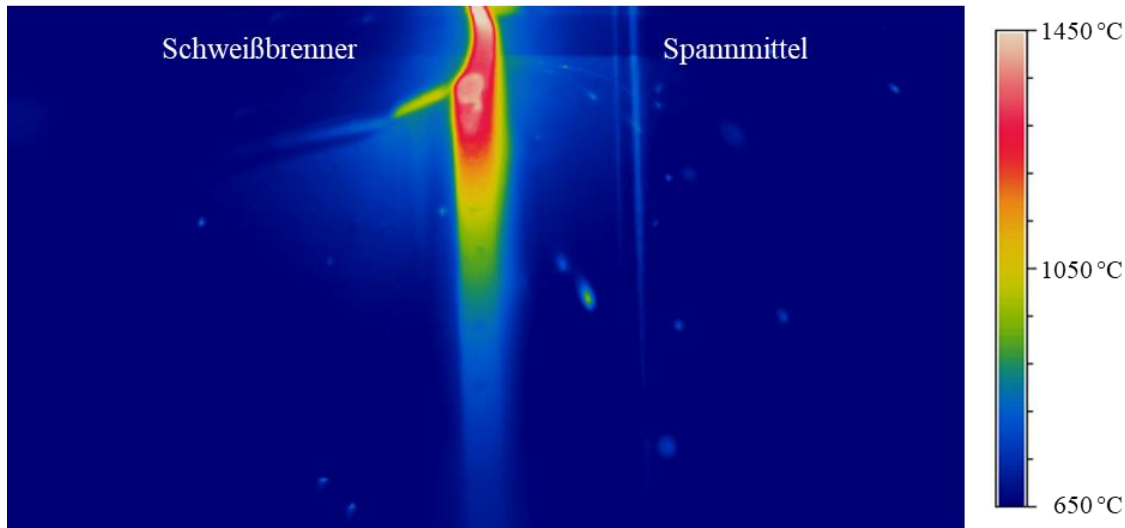


Bild 3: Thermogramm eines MSG-Schweißprozesses mit Schmelzbad und abkühlender Schweißnaht

Auch zur Erkennung von Rissen durch den Einsatz der aktiven Thermografie existieren erste Erkenntnisse. Oberflächenrisse absorbieren IR-Strahlung verstärkt, sodass das Rissumfeld im Wärmebild wärmer erscheint. [33] Auch Risse unterhalb der Oberfläche beeinflussen die Ausbreitung der Wärme und können so im Wärmebild erkannt werden. [34] Ein weiteres Anwendungsfeld ist das Prüfen von Klebeverbindungen auf vollständige Adhäsion und Kohäsion. [35]

Im Gegensatz zur aktiven Thermographie, bei der das Prüfobjekt gezielt mit Wärme beaufschlagt wird, nutzt die passive Thermographie die vom Bauteil abgegebene Wärmestrahlung als Informationsquelle. Im Falle der Schweißnahtprüfung ist dies wenige Sekunden nach dem Erstarren des Schmelzbades durch eine ortsauflösende Thermografie möglich. [36, 37]

Während eines wärmeemittierenden Prozesses oder unmittelbar nach dessen Ende können Temperaturgradienten auf der Objektoberfläche auf Abweichungen hinweisen. So lassen sich Änderungen in der Wärmeableitung im Bauteil, verursacht durch Störungen des Wärmeflusses z.B. durch Defekte, nachweisen, die einen Wärmestau verursachen, da sich das Abkühlverhalten verändert. Bei dieser Anwendung kann der qualifizierte Bediener die Ergebnisse direkt vor Ort interpretieren. Solche Methoden finden Anwendung in der Gebäudeinspektion, in der Steuerung von Industrieprozessen, in der Instandhaltung von Kraftwerken, beim Schweißen und in der Medizin. [38]

Die Auswahl der thermografischen Methode hängt stark von ihrem Einsatzgebiet ab. Bei der Wahl des Sensors ist darauf zu achten, dass dieser für die Wellenlänge ausgelegt ist, in der das Messobjekt strahlt. [39]

Die Bestimmung der realen Temperatur erfordert einen konkreten Emissionskoeffizienten der Oberfläche, der von vielen Einflussgrößen abhängig ist und sich auch über die Temperatur ändert. Bei der Analyse von Temperaturunterschieden kann auf die exakte Bestimmung des Emissionskoeffizienten verzichtet werden. Der Spektralbereich des Sensors ist besonders wichtig für die Aufzeichnung, da sich beim Aktivgas-Schweißen von Stahl Silikatablagerungen auf den Schweißnähten bilden. Diese Silikate haben ähnliche thermografische Eigenschaften wie Glas und weisen im nahen Infrarot-Wellenlängenbereich eine Transmission von über 90 % auf. [40, 41]

Vasudevan et. al. [42] haben für die thermografische Analyse von WIG-Schweißungen am Stumpfstoß nachgewiesen, dass der Temperaturgradient indirekt proportional zur Einbrandtiefe ist. Venkatraman et. al. [43] konnten für den gleichen Anwendungsfall nachweisen, dass die Fläche unter dem Temperaturprofil proportional zur eingebrachten Wärme und somit zur Einbrandtiefe ist. Dieser Zusammenhang kann für eine Leistungsregelung des Schweißprozesses genutzt werden, wobei auch eine Abschätzung der Einbrandtiefe möglich ist. Für das WIG- und UP-Schweißen wurde eine Einbrandregelung auf Basis eines Infrarot-Punkt-Sensors implementiert. [44, 45]

Veränderungen von Blechdicke, Schutzgaszusammensetzung und Legierung, z.B. durch Fremdmaterial in der Fügezone, beeinflussen das Temperaturprofil signifikant. [46] Auch Risse unterhalb der Oberfläche beeinflussen die Ausbreitung der Wärme und können so im Wärmebild erkannt werden. [34] Für MSG-Verbindungen am Überlappstoß an 2 mm Baustahl mit dem Übergangslichtbogen liegen erste Erfahrungen zur Bewertung von thermografisch ermittelten Temperaturprofilen quer zur Schweißnaht vor. Eine Abschätzung der Einbrandtiefe ist bisher nicht möglich. [41]

Aus der Anwendung von Linienpyrometern, besonders im Bereich der Rohrfertigung, ist dokumentiert, welche Prozess- und Nahtunregelmäßigkeiten thermografisch detektierbar sind. Tabelle 2 nennt außerdem Messgrößen, die aus einem 2D-Wärmefeld gewonnen werden können und für welche Unregelmäßigkeiten sie Anzeigen liefern können. Die Signal-Position im Sensor-Messfeld beschreibt die Lage der emittierten Wärmestrahlung relativ zum Sensor. Verändert sich diese, ist eine Veränderung der Lage der Schweißnaht auf dem Bauteil eine mögliche Ursache. [47]

Tabelle 2. Prozess- und Nahtunregelmäßigkeiten sowie korrespondierende thermografische Messgrößen [47]

Prozess- bzw. Naht-Unregelmäßigkeit	äußerlich sichtbar	ausgewertete Messgröße des Temperaturfeldes			
		Breite	Signal-Position im Sensor-Messfeld	Maximal-Temperatur	Symmetrie
einseitiger Einbrand durch lateralen Brennersatz	nein		teilweise		X
Flankenbindefehler	ja		X		teilweise
Nahteinschnürung	ja	X		X	
Durchbrand	ja	X		X	
Poren	offene Poren	X		X	
unregelmäßige Wärme-einbringung (zeitlich)		X			

## 2.4 Bewertung der Fähigkeit zerstörungsfreier Prüfsysteme

Die Bewertung von ZfP-Systemen kann über die Beschreibung ihres Antwortverhaltens auf eine Anregung erfolgen. Dies geht über die Unterscheidung zwischen Akzeptanz oder Zurückweisung einer Signalantwort der Messgröße hinaus. Das Ergebnis einer zerstörungsfreien Prüfung kann vier mögliche Ausprägungen [48, 49] aufweisen. Diese sind anhand von Beispieldaten in Bild 4 dargestellt. Ein ideales Prüfverfahren würde alle fehlerhaften Teile erkennen (true positive, TP) und fehlerfreie Teile entsprechend akzeptieren (true negative, TN).

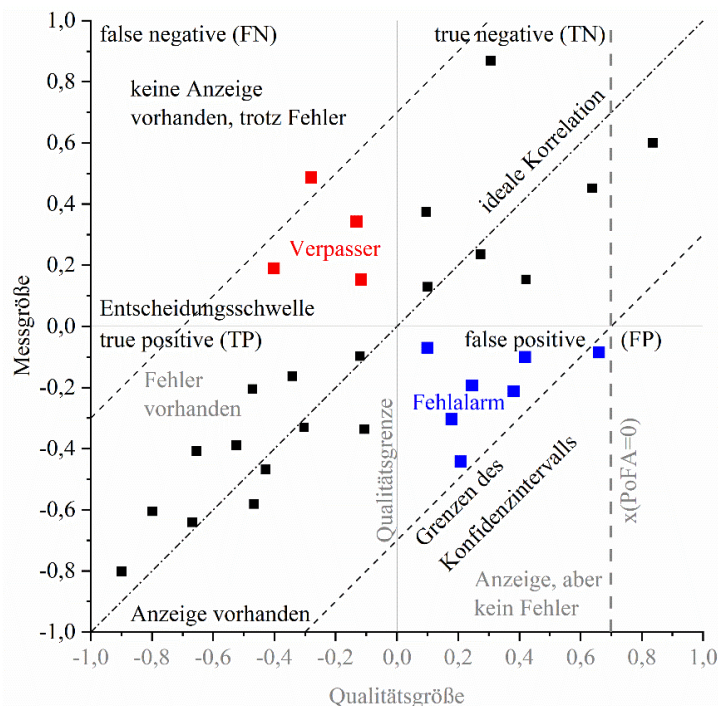


Bild 4: schematische Darstellung der möglichen Ergebnisse einer zerstörungsfreien Prüfung

Als Fehler erster Art bzw. Fehlalarme (false positive, FP) werden Entscheidungen bezeichnet, bei denen ein fehlerfreies Bauteil fälschlicher Weise als fehlerhaft eingestuft wird. Von Fehlern zweiter Art bzw. Verpassern (false negative, FN) spricht man, wenn ein fehlerhaftes Bauteil nicht als solches erkannt wird [50, 51]. Ergänzend enthält Bild 4 die Regressionsgerade der idealen Korrelation und die Grenzen des 95 % Konfidenzintervalls, die die Unschärfe des Systems visualisieren. Zur Quantifizierung der Fähigkeit zerstörungsfreier Prüfmethode kann das Konzept der Probability of Detection (POD) [49, 52], also der Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung, angewendet werden. Sie beschreibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Fehler einer bestimmten Größe erkannt werden kann. Am Beispiel der Ultraschallprüfung kann das Konzept nachvollzogen werden. Hier steigt die Auffindewahrscheinlichkeit eines Risses mit seiner Größe, wobei unterschiedliche Risse gleicher Größe eine signifikant unterschiedliche Auffindewahrscheinlichkeit haben können. Neben der Größe beeinflussen weitere Faktoren die Wahrscheinlichkeit, einen Riss aufzufinden, wie z.B. die räumliche Lage und die Morphologie seines Verlaufs. Definiert ist die POD als Verhältnis aus korrekt erkannten Fehlern (TP) und der Summe dieser und der Verpasser (TP + FN). Um ein vollständiges Bild zu erhalten, muss auch die Fehlalarmrate oder Probability of False Alarms (PoFA) [49] betrachtet werden. Sie ist definiert als das Verhältnis der Fehlalarme (FP) zur Gesamtzahl von Untersuchungsobjekten oberhalb der Qualitätsgrenze (TN + FP). In Bild 4 wurde ergänzend die Grenze  $x(\text{PoFA}=0)$  eingeführt. Sie beschreibt, oberhalb welchen Wertes der Qualitätsgröße keine Fehlalarme mehr zu erwarten sind.

## **3 Forschungsziel und Lösungsweg**

### **3.1 Forschungsziel**

Projektziel ist die Erforschung einer Methode zur Ermittlung innerer Merkmale wie des Einbrandes anhand von Nahtgeometrie und Temperaturprofil zur zerstörungsfreien QS unmittelbar nach dem Schweißprozess mittels nachlaufender Sensoren beim automatisierten MSG-Schweißen. Dabei sollen äußerliche geometrische Kenngrößen der Schweißnaht mit dem nach dem Schweißen auftretenden Temperaturprofil korreliert werden.

Die zerstörungsfrei erfassbaren Daten der Schweißnahtgeometrie und des Temperaturfeldes der abkühlenden Schweißnaht enthalten Informationen über die innere Qualität der Schweißnaht.

Durch geeignete Methoden der Datenverarbeitung ist es möglich Messgrößen aus den Daten zu extrahieren, die eine Korrelation mit einer Größe der Nahtqualität besitzen. Mit Hilfe der Messgrößen ist es möglich, eine oder mehrere Größen der Nahtqualität zu prognostizieren. Je mehr geeignete Messgrößen gemeinsam genutzt werden, desto geringer ist die Unsicherheit der Vorhersage. Durch die Nutzung der Daten aus zwei Sensoren kann ein Mehrwert gegenüber der Nutzung nur eines Sensors erzielt werden.

### **3.2 Lösungsweg**

Aus den Arbeitspaketen (detailliert in Abschnitt 4.2) im Projekt leiten sich eine Reihe von Arbeitsschritten ab, die in Bild 5 schematisch aufbereitet sind. Teilziele des Projektes sind:

- Herstellen von anforderungsgerechten und definiert fehlerbehafteten Schweißverbindungen
- Darstellung der Zusammenhänge zwischen äußeren und inneren Geometriekennwerten
- Herstellen von Korrelationen zwischen Nahtgeometrie und Qualität sowie Temperaturfeld und Qualität
- Ermittlung von mathematischen Zusammenhängen
- zuverlässige zerstörungsfreie Abschätzung innerer Nahtunregelmäßigkeiten wie der Einbrandtiefe





## 4 Versuchsprogramm und verwendete Gerätetechnik

### 4.1 Projektplan

Der Projektplan ist in Tabelle 3 dargestellt. Bedingt durch die sehr kurzfristige Bekanntgabe der Projektfinanzierung und die erforderliche Ausschreibung der Stelle für den wissenschaftlichen Mitarbeiter konnte die Bearbeitung des Projektes erst im fünften Monat begonnen werden. Die Verzögerung zu Projektbeginn wurde durch eine kostenneutrale Verlängerung um fünf Monate ausgeglichen.

Tabelle 3: Projektplan

Arbeitsschritt	2017												2018												2019				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
AP1: Definition des Versuchsprogramms, der Prozessvarianten sowie der Einflussgrößen (Spalt/Versatz)	■	■			■	■																							
AP2: Aufbau Schweißstand und Messsysteme	■	■	■			■	■	■	■	■	■									■	■	■							
AP3: Herstellung von Schweißverbindungen und Ermittlung der GPF			■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
AP4: Konzeption der Datenaufbereitung und Korrelation zwischen äußerlich messbaren und inneren Geometriekennwerten							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						
AP5: Modellierung von Algorithmen													■	■	■	■	■	■				■	■						
AP6: Verifizierung und Anpassung der Algorithmen und Analysemethoden																■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	
AP7: Untersuchung der Robustheit gegenüber Veränderungen der Randbedingungen																			■	■	■			■	■	■	■	■	
AP8: Erstellung des Abschlussberichtes / Dokumentation																					■	■	■				■	■	
geplant	■												■												■				
Durchführung	■												■												■				

### 4.2 Arbeitspakete

Im Laufe der durchgeführten Untersuchungen erfolgte eine Präzisierung der beantragten Arbeitspakete in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss. Die tatsächlich umgesetzten Inhalte der einzelnen Arbeitspakete werden im Folgenden beschrieben.

AP 1: Definition des Versuchsprogramms, der Prozessvarianten sowie der Einflussgrößen (Spalt / Versatz)

Im ersten Arbeitspaket erfolgte die Definition des Versuchsprogramms in Absprache mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses. Dabei wurde definiert, welche MSG-Prozessvarianten, Werkstoffe, Beschichtungen und Nahtgeometrien zum Einsatz kommen. Das ursprünglich skizzierte Programm wurde reduziert:

- Lichtbogenvarianten: Standard-KLB, CMT, CA
- HC340 (+Z), 22MnB5 + AS150, t = 1,5 mm
- Überlapp- und T-Stoß, Kehlnaht am Überlappstoß
- Variation von Prozessparametern, Brennerposition (realisiert durch den Kantenversatz) und Spaltmaßen

Durch den Verzicht auf den ColdArc(CA)-Prozess wurde der Wechsel der Schweißstromquelle vermieden und der Versuchsaufwand reduziert. Die Werkstoffauswahl wurde ergänzt (siehe 4.3), um die im Automobil vorkommenden Stahlvarianten möglichst vollständig zu repräsentieren. Auf den T-Stoß wurde verzichtet, da dieser im skizzierten Anwendungsfeld von untergeordneter Bedeutung ist. Die Prozessparameter wurden als konstant angenommen.

#### AP 2: Aufbau Schweißstand und Messsysteme

Wie bei der Projektbeantragung geplant, erfolgte die geometrische Erfassung der äußeren Nahtausprägung über einen Lichtschnittsensor. Das Temperaturprofil, welches sich in der Schweißnaht einstellt, wurde wie geplant durch einen in den Schweißstand integrierten, nachlaufenden Thermoprofilscanner (TPS) erfasst.

Nach Abschluss und Auswertung der ersten Versuchsreihe erfolgte die Ergänzung des Seilzug-Encoders, um die für die nachgelagerte Synchronisierung der Daten ein gemeinsames Signal zur Verfügung zu stellen.

#### AP 3: Herstellung von Schweißverbindungen und Ermittlung der GPF

Mit der Kenntnis der geometrischen Prozessfenster (GPF) sind definierte Schweißverbindungen herstellbar, die als anforderungsgerecht anzusehen sind bzw. außerhalb des Toleranzfeldes liegen. Inhalt des dritten APs ist es, derartige Schweißverbindungen herzustellen, die anforderungsgerecht als auch gemäß der GPF definiert fehlerbehaftet sind. Als fehlerbehaftet gelten dabei Verbindungen, welche einen ungenügenden Einbrand bzw. Bindefehler aufweisen. Eine reproduzierbare Herstellung von Schweißnähten ist sicherzustellen.

Ergänzt wurde das Arbeitspaket durch die Bewertung der verschiedenen Qualitätskenngrößen hinsichtlich der Relevanz der einzelnen Größen für die Qualitätseinstufung der Schweißnaht.

#### AP 4: Konzeption der Datenaufbereitung und Korrelation zwischen äußerlich messbaren und inneren Geometrie Kennwerten

Gegenüber dem ursprünglichen Projektplan wurde dieses Arbeitspaket um die Datenaufbereitung ergänzt. Die Arbeit mit den Daten zeigte, dass insbesondere die Geometrie-Daten einer intensiven Aufbereitung und Prüfung unterzogen werden müssen, bevor eine zuverlässige Nutzung für Berechnungen sinnvoll ist. Um trotz dieses ungeplanten Zwischenschritts die Projektbearbeitung fortsetzen zu können, erfolgte die Korrelation zwischen äußerlich messbaren und inneren Geometrie Kennwerten zunächst nur auf Basis der Messwerte aus den Schliffbildern. Dazu gruppiert wurden wie geplant die Kenngrößen aus den Temperaturprofilen.

#### AP 5: Modellierung von Algorithmen

Durch die Auswertung der generierten Messdaten und das Erkennen von Korrelationen zwischen äußeren und inneren Geometrie Kennwerten erfolgt eine Modellierung von Algorithmen. Unter Zuhilfenahme mathematischer Methoden sollen Algorithmen ermittelt

werden, mit denen der Zusammenhang, zwischen den in AP 4 ausgewählten Messgrößen und der Qualität beschrieben werden kann. Ziel ist es dabei, einen mathematischen Zusammenhang aufzustellen, der eine Bewertung der Schweißnähte erlaubt.

#### AP 6: Verifizierung und Anpassung der Algorithmen und Analysemethoden

In AP6 gilt es die zuvor aufgestellten Algorithmen und Analysemethoden zu verifizieren. Als Grundlage dienen erneut die GPF, aus denen Spalt-Versatz-Kombinationen hergestellt und ausgewertet werden. Auf Basis der ermittelten Aussagegenauigkeit der Analysemethode erfolgt ggf. eine Anpassung der Auswertalgorithmen.

#### AP 7: Untersuchung der Robustheit gegenüber Veränderungen der Randbedingungen

In AP 7 sollen die zuvor gewonnenen Auswertalgorithmen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf veränderte Randbedingungen überprüft werden. Ursprünglich sollten dazu die Einflüsse anderer Lichtbogenarten sowie die Veränderung von Drahtvorschub und Schutzgas geklärt und unterschiedliche Blechdickenkombinationen untersucht werden.

- ~~Klärung der Übertragbarkeit auf andere Lichtbogenarten~~
- ~~Einfluss des Drahtvorschubs und des Schutzgases~~
- ~~Untersuchung des Einflusses der Blechdickenkombination~~

Zwei Lichtbogenarten sind im Versuchsprogramm berücksichtigt, jedoch erlauben die unveränderlichen Werkstoff-Prozess-Schutzgas-Kombinationen keinen Vergleich der einzelnen Einflussgrößen untereinander. In Abstimmung mit dem PA wurde entschieden, dass eine Erhöhung der Anzahl ähnlicher Versuche sowie Anpassungen der Probengeometrie für die Bewertung der Methodik sinnvoller sind als die Untersuchung zusätzlicher Einflussgrößen.

### **4.3 Werkstoffe und Schweißprozesse**

In Zusammenarbeit mit dem PA erfolgte eine Auswahl relevanter Werkstoffe. Es wurde die Anforderung formuliert, die in einem PKW anzutreffenden Blechwerkstoffe möglichst vollständig zu repräsentieren. Eine Gruppe bilden die Stähle ohne metallische Überzüge und Beschichtungen, die u.a. im Fahrwerksbereich anzutreffen sind. Die zweite Gruppe bilden hochfeste Stähle mit geringer Umformbarkeit, die der Crashesicherheit der Fahrzeuginsassen dienen, abgebildet durch den Werkstoff 22MnB5 +AS150. Werkstoffliche Besonderheit ist der metallische Überzug AS150, eine Al-Si-Schicht mit einer Auflagestärke von 150 g je m<sup>2</sup> und Blechseite. Der Überzug wird beim MSG-Schweißen gewöhnlich nicht vollständig in der Schmelze aufgemischt. Stattdessen tendiert der flüssige Überzug zur Akkumulation an der Blechoberfläche angrenzend an das Schmelzbad. Komplettiert wird die Auswahl durch die ebenfalls in der Karosserie anzutreffende korrosionsbeständige verzinkte Güte HX340LAD +Z140.

Zu den drei ausgewählten Werkstoffen wurden auf Empfehlung des PA industriell relevante Prozessvarianten des MSG-Prozesses in Kombination mit einem geeigneten Schutzgas gewählt, die in Tabelle 4 zusammengefasst sind.

Tabelle 4: Übersicht der Werkstoff-Prozess-Paarungen

Grundwerkstoff, Substrat	Überzug	MSG-Prozessvariante	Schutzgas	Drahtvorschub $v_{Dr}$ in m/min
S420 MC	ohne	KLB, ungeregelt	Ar + 18 % CO <sub>2</sub> (M21)	3,7
22MnB5	AS150	CMT	100 % CO <sub>2</sub> (C1)	4,5
HX340LAD	Z140	CMT	100 % CO <sub>2</sub> (C1)	4,5

Der Stahl 22MnB5 +AS150 wurde wie in der industriellen Anwendung üblich vor dem Schweißen pressgehärtet. Die Parameter sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Werkstoffliche Besonderheit ist der metallische Überzug AS150, eine Al-Si-Schicht mit einer Auflagestärke von 150 g je m<sup>2</sup> und Blechseite, die nicht vollständig in der Schmelze aufgemischt wird. Stattdessen tendiert der flüssige Überzug zur Akkumulation an der Blechoberfläche angrenzend an das Schmelzbad. Erzeugte Schweißungen und Kriterien an eine anforderungsgerechte Schweißnaht sind in Bild 14 aufgeführt.

Tabelle 5: Presshärteparameter

Austenitisierungstemperatur	Ofenliegezeit	Härtezeit
930 °C	6 min	ca. 15 s

Darüber hinaus wurden für eine Reihe von Prozessparametern konstante Werte festgelegt. Diese wurden teilweise bereits in vorgelagerten Versuchsreihen angewendet. Ziel der Anwendung dieser Konstanten ist die Vergleichbarkeit von Versuchsreihen und die Begrenzung des Versuchsumfangs auf ein praktikables Maß.

Tabelle 6 fasst die übrigen Versuchsrandbedingungen zusammen.

Tabelle 6: Versuchsrandbedingungen

Parameter	Wert	Ursprung des Parameters
Blechdicke	1,5 mm	–
Zusatzwerkstoff	G3Si1	–
Drahtdurchmesser	1,0 mm	[53]
Schweißgeschwindigkeit	50 cm/min	[53]
Stromkontaktrahabstand	15 mm	[53]
Brennerneigung	30°	[53]
Brenneranstellung	10° stechend	[53]
Schutzgasmenge	10 l/min	–
Stoßart	Überlappstoß	–
Schweißposition	PB	

#### 4.4 Versuchsaufbau

Der grundsätzliche Aufbau des Versuchsstandes besteht aus einem MSG-Schweißgerät dessen Brenner, mit einer lateralen Neigung von  $30^\circ$  und einem Anstellwinkel von  $10^\circ$ , an einen Portalarm befestigt ist. Dieser ist mit einer Verfahrautomatik versehen, um eine definierte Verfahrgeschwindigkeit zu gewährleisten. Diese beträgt in allen Schweißungen 50 cm/min. In einem geringen Abstand hinter dem Brenner ist zur Aufzeichnung von Thermografiedaten ein Wärmezeilensensor, sowie ein Laser-Triangulationssensor zur Erfassung der Oberflächengeometrie verbaut. Die zu schweißenden Bleche sind eingespannt auf einem Stahltisch befestigt. Als Drahtelektrode wird G3Si1 mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet. Zusammengefasst in

Tabelle 6 sind alle unveränderlichen Versuchsrandbedingungen aufgetragen.

Zunächst mussten die Komponenten Schweißbrenner, Thermographiesensor und Geometriesensor konstruktiv miteinander vereinigt werden. Berücksichtigt wurden die Randbedingungen Brennerausrichtung, Neigung des Geometriesensors und Abstände der Messstelle von der Wirkungszone des Schweißbrenners. Auf der elektronischen Seite wurden geeignete Ein- und Ausgänge identifiziert und Schaltsignale so weitergegeben, dass ein paralleles Ansteuern aller Komponenten möglich war. Da der Thermographiesensor nur 4 Wochen zur Verfügung stand, musste der Versuchsaufbau nach Abschluss der ersten Versuchsserie teilweise demontiert werden. Zur Validierung der konstruktiven und elektronischen Konfiguration erfolgten verschiedene Schweißungen.

Für alle Versuche wurde ein gemeinsames Koordinatensystem vereinbart, welches seinen Nullpunkt auf der Oberfläche des Unterblechs auf der Bahn des Schweißbrenners an der vorderen Blechkante der Schweißprobe hat. Die Bahn des Schweißbrenners wird aufgrund der guten Reproduzierbarkeit durch die Brennerposition definiert, in der die senkrecht abgeschnittene Drahtelektrode die Kante des Oberblechs berührt. Aus Bild 6 geht weiterhin hervor, dass eine Verschiebung der Blechkante zum Schweißbrenner hin als positiver Versatz definiert ist.

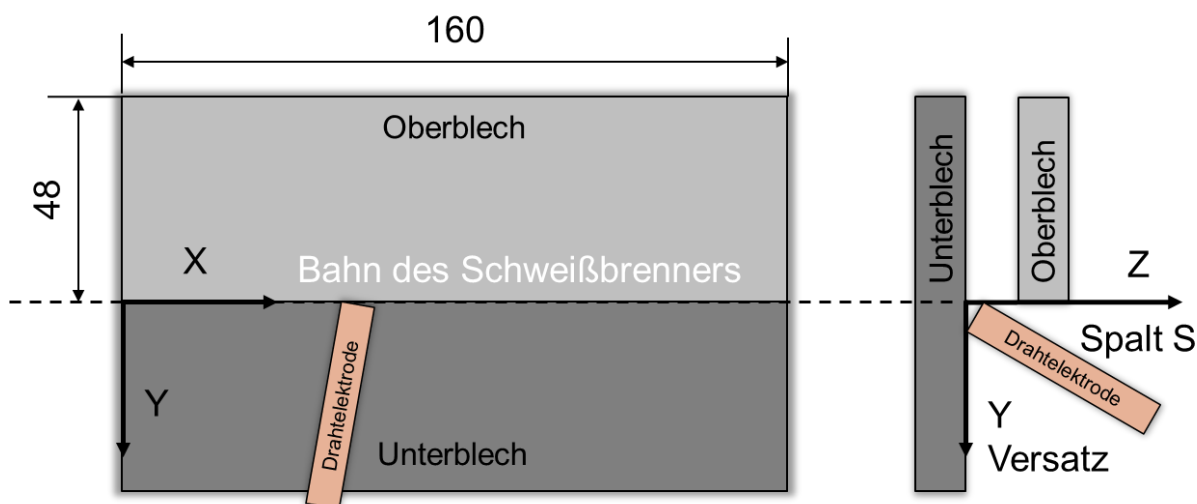


Bild 6: Definition des Koordinatensystems der Schweißproben mit Nullposition für Spalt und Versatz

Bedingt durch die zeitliche Strukturierung des Projektes ergab sich eine Gliederung der Versuchsdurchführung mit jeweils verändertem Versuchsaufbau. Die einzelnen Varianten des Versuchsaufbaus werden im Folgenden im Detail erläutert.

#### 4.4.1 roter Lasertriangulationssensor und Thermoprofilscanner

Als Sensorsysteme wurde in Abstimmung mit dem PbA folgende Festlegung getroffen:

Als Thermographiesensor kommt ein Thermoprofilscanner der Fa. HKS Prozesstechnik GmbH zum Einsatz. Als Geometriesensor wird ein Lasertriangulationssensor der Fa. Micro Epsilon eingesetzt. Zusätzlich wurden die Strom- und Spannungsverläufe des Lichtbogens mit geeigneter Messtechnik aufgezeichnet.

Die beiden Sensorsysteme wurden erfolgreich in den Versuchsstand integriert. Die Aufzeichnung der Geometriedaten und des Temperaturfeldes erfolgt online unmittelbar hinter dem Schweißbrenner profilweise quer zur Schweißrichtung in der Y-Z-Ebene mit einer Frequenz von 100 Hz. Durch das Aneinanderreihen der einzelnen Datensätze entlang der X-Achse ergibt sich ein 3D-Bild der Schweißnahtoberfläche. Die räumliche und zeitliche Synchronisierung der aufgezeichneten Daten erfolgt rechnerisch durch Verschieben der Datensätze um den konstruktiv bedingten Offset. Eine besondere Herausforderung bestand in der Störwirkung des Lichtbogens auf die Messsysteme.

Bild 7 zeigt die räumliche Anordnung der Sensoren. Im Zuge der Validierungsschweißungen wurden für die zur Verfügung stehenden Sensoren optimale Messstellen relativ zum Schweißbrenner ermittelt. Für die Aufzeichnung der Geometriedaten wurde ein Abstand von  $\Delta X_G = 70$  mm gewählt, der Daten in brauchbarer Qualität sicherstellt. Die Abschirmung durch das Spritzerblech reduziert das Aufkommen an Spritzerartefakten. Für den Thermographiesensor wurden 3 individuelle Messabstände für jede Werkstoff-Prozess-Kombination ermittelt, im Bereich von 11 mm bis 25 mm. Das Temperaturfeld wird in einem werkstoff- und prozessabhängigen Abstand  $\Delta X_T$  aufgezeichnet. Der empirisch ermittelte Abstand für diesen Anwendungsfall ist in Tabelle 7 zu finden.

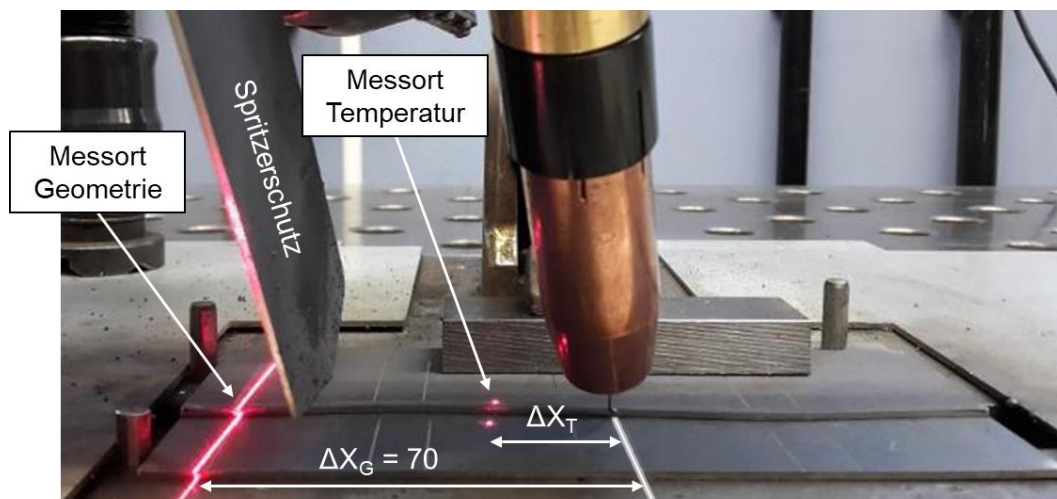


Bild 7: Anordnung der Messstellen für roten LTS und TPS

Während die Aufzeichnung der Geometrie Werkstoff-unabhängig mit dem Abstand  $\Delta X_G$  erfolgen kann, erfordert das Temperaturfeld eine individuell eingestellte relative Lage des Messortes  $\Delta X_T$ . Tabelle 7 gibt für die untersuchten Werkstoff-Prozess-Kombinationen die

Abstände zwischen Drahtaufsetzpunkt und Messort an, bei denen an einer unbeeinflussten Schweißnaht Maximaltemperaturen von ca. 1150 °C bis 1200 °C gemessen werden.

Tabelle 7: optimale Messort-Abstände zur Aufzeichnung des Temperaturfeldes

Grundwerkstoff, Substrat	Überzug	MSG-Eckdaten	$\Delta X_T$ in mm
S420 MC	ohne	KLB, M21, 3,7 m/min	11
22MnB5	AS150	CMT, C1, 4,5 m/min	25
HX340LAD	Z140	CMT, C1, 4,5 m/min	20

#### 4.4.2 blauer Lasertriangulationssensor und Thermoprofilscanner ergänzt durch Seilzugencoder

Um die Erfassung der Schweißnahtgeometrie auf der noch glühenden Oberfläche realisieren zu können, kommt ein blauer Laser vom Typ scanCONTROL 2960-100/BL der Firma MICRO-EPSILON mit einer Wellenlänge von 405 nm zum Einsatz. Die Temperaturerfassung realisierte wie zuvor ein Thermo-Profil-Scanner der Firma HKS Prozesstechnik. Die Aufzeichnung der Geometriedaten und des Temperaturfeldes erfolgte weggesteuert mit einer Abtastrate von 15 Profilen pro Millimeter. Als Signalgeber für die wegabhängige Aufzeichnung wird ein Seilzugencoder genutzt. Damit wurde der Versuchsaufbau gegenüber der ersten Versuchsreihe mit zeitgesteuerter Aufnahme weiterentwickelt. Ein weiterer Geometriesensor mit rotem Laser wurde zur vorlaufenden Erfassung der Blechkante eingesetzt. Diese zusätzlich gewonnenen Daten wurden für zukünftige Analysen aufgezeichnet. Die Abschirmung der Sichtbereiche der Lasersensoren durch Spritzerschutzbleche reduzierte das Aufkommen an Spritzerartefakten in den Daten.

Für die Messabstände  $\Delta X_T$  und  $\Delta X_G$  wurde für einen Teil der Versuche der identische Wert von 30 mm gewählt, um die Orts- und Zeit-synchrone Datenaufzeichnung zu erproben. Bild 8 zeigt den veränderten Versuchsaufbau.

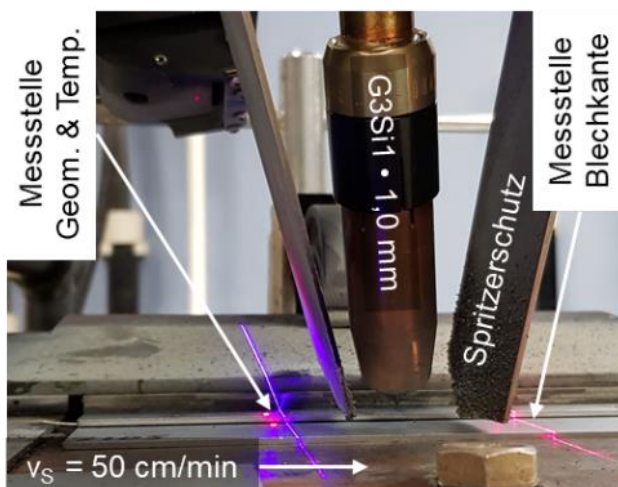


Bild 8: Versuchsaufbau mit blauem Lasertriangulationssensor und Thermoprofilscanner



## 4.5 Probengestaltung

Für die Realisierung der prozessbeeinflussenden Bauteiltoleranzen (Spalt und Kantenversatz) beim Schweißen am Überlappstoß wurden geeignete Probengeometrie entworfen, mit der die Maßabweichungen effektiv abgebildet werden können. Tabelle 8 enthält die vollständige Übersicht. Das Blech mit gerader Kante parallel zur Bahn des Schweißbrenners stellt den Idealzustand dar und dient für Referenzversuche. Oberbleche mit einer Zick-Zack-förmigen Auslenkung bilden einen großen Umfang von Abweichungen innerhalb einer Probe ab und diesen vorrangig für Screening-Versuche. Der Probestyp in Bild 9 unten links hat abschnittsweise parallel verlaufende Blechkanten zur Untersuchung eines konstanten Prozesseingriffs. Die rechts abgebildeten Proben lenken den Prozess vergleichsweise langsam aus und dienen der Beobachtung eines kontinuierlichen Prozesseingriffs kombiniert mit einem parallel verlaufenden Kantenabschnitt für die konstante Beobachtung. Allen Proben gemeinsam ist ein kurzes Stück „Null“-Kante am Anfang und Ende jeder Probe. Es dient neben der Kontrolle der Probenausrichtung einem Prozessstart unter Bei allen Schweißungen wurde der Schweißbrenner entlang der Kantenposition der Referenzprobe verfahren.

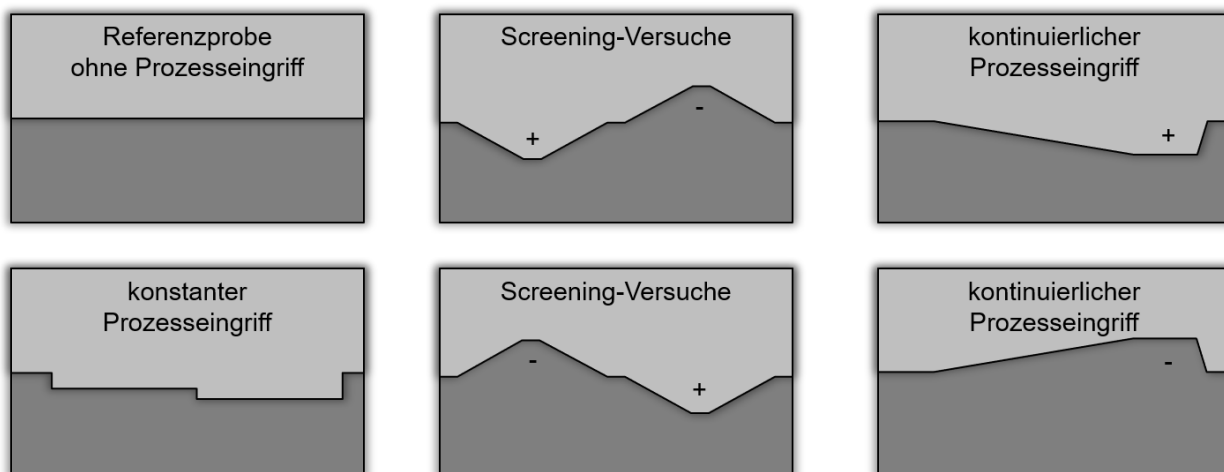


Bild 9: Übersicht der Probestypen

Von den in Bild 9 schematisch dargestellten Probestypen existieren mit Ausnahme der Referenzprobe jeweils verschiedene Varianten, um alle Spalt-Versatz-Kombinationen in den geometrischen Prozessfenstern darstellen zu können. In Summe wurden 22 verschiedene Oberblechtypen hergestellt, die in Kombination mit unterschiedlichen Spalthöhen die Prozessfenster aufgespannt haben.

Tabelle 8: Übersicht der realisierten Probengeometrien

Probentyp	parallele Kantenauslenkung	Länge der parallelen Beobachtungsstrecke
Referenz	0 mm	160 mm
Screening +/-	± 1,0 mm	3 x 10 mm
Screening +/-	± 2,0 mm	3 x 10 mm
Screening -/+	± 1,0 mm	3 x 10 mm
Screening -/+	± 2,0 mm	3 x 10 mm
kontinuierlich +	+ 0,5 mm & + 1,5 mm	2 x 30 mm
kontinuierlich +	+ 1,0 mm & + 2,0 mm	2 x 30 mm
kontinuierlich +	+ 2,5 mm	30 mm
kontinuierlich +	+ 3,0 mm	30 mm
kontinuierlich +	+ 3,5 mm	30 mm
kontinuierlich +	+ 4,0 mm	30 mm
kontinuierlich -	- 0,5 mm & - 1,5 mm	2 x 30 mm
kontinuierlich -	- 1,0 mm & - 2,0 mm	2 x 30 mm
kontinuierlich -	- 2,5 mm	30 mm
kontinuierlich -	- 3,0 mm	30 mm
kontinuierlich -	- 3,5 mm	30 mm
kontinuierlich -	- 4,0 mm	30 mm
konstant	+ 2,0 mm	2 x 75 mm
konstant	+ 2,5 mm	2 x 75 mm
konstant	+ 3,0 mm	2 x 75 mm
konstant	+ 3,5 mm	2 x 75 mm
konstant	+ 4,0 mm	2 x 75 mm

Um die experimentelle Arbeit zu verbessern, wurden die Proben mit einigen Details versehen, die Bild 10 dargestellt sind.

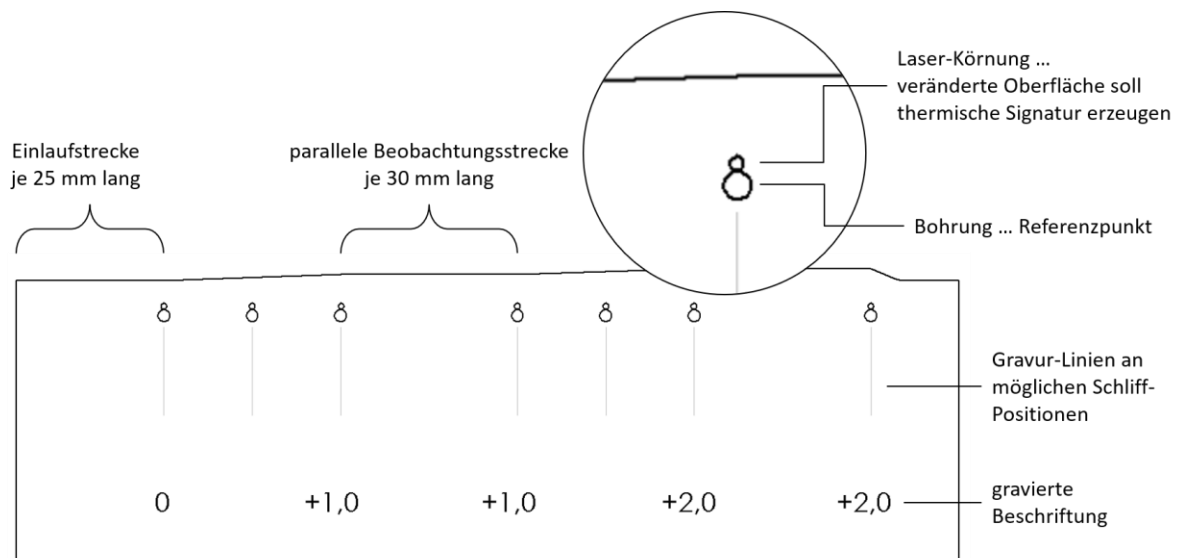


Bild 10: Details der Probengestaltung für Proben mit kontinuierlicher Kantenauslenkung

### 4.6 Versuchsumfang

Der Umfang der hergestellten Kombinationen aus Spalt und Versatz wurde nicht im Vorfeld festgelegt. Um dem Ziel gerecht zu werden, die Grenzen der Prozessfenster zu bestimmen, wurde der Parameterraum iterativ bis zum Erreichen bzw. Überschreiten der Prozessgrenzen erweitert. Der Spalt variierte von 0 mm bis maximal 2 mm in Schritten von 0,5 mm. Die Auslenkung der Blechkante erfolgte bis zum Erreichen nicht anforderungsgerechter Schweißnähte.

In den folgenden Abbildungen (Bild 11 bis Bild 13) kennzeichnet „1“ eine hergestellte Spalt-Versatz-Kombination, ohne Angabe über Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Die Kombinationen „0“ sind entsprechend auf keiner Probe zu finden.

Spalt in mm	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1,5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	0,5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
		-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		Versatz in mm																

Bild 11: Versuchsmatrix für S420MC|KLB|M21

Spalt in mm	2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1,5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		Versatz in mm																

Bild 12: Versuchsmatrix für 22MnB5+AS150|CMT|C1

Spalt in mm	2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	1,5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
		-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		Versatz in mm																

Bild 13: Versuchsmatrix für HX340LAD+Z140|CMT|C1

### 4.7 geometrische Kenngrößen

Für die Bewertung der Schweißnähte wurden unter Berücksichtigung einschlägiger internationaler Regelwerke und der Lieferbedingungen deutscher Automobilhersteller Kriterien definiert, die in Tabelle 9 und Bild 14 zusammengefasst sind. Die Qualitätskriterien für die Bewertung der Schweißnähte orientieren sich an einschlägigen Regelwerken der deutschen Stahl- und Automobilindustrie, die wiederum einige Kriterien unmittelbar aus der Norm DIN EN ISO 5817 – B [55] übernommen haben. Da die Kehlnaht am Überlappstoß in den internationalen Regelwerken keine explizite Berücksichtigung gefunden hat, werden Grenzwerte für Kehl- und Stumpfnähte in übertragenem Sinne angewendet. Daneben wurde zum Zweck der quantitativen Beschreibung der Schweißnahtgeometrie nach geeigneten Kenngrößen gesucht. Sie sollten folgende Kriterien erfüllen:

- Messbarkeit digital und im Schliffbild
- an jeder beliebigen Stelle einer Schweißnaht messbar
- robust gegenüber Messfehlern

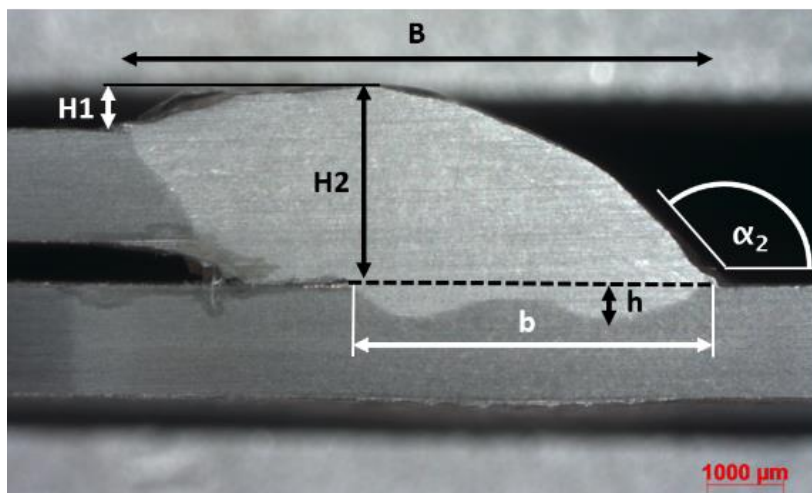


Bild 14: Kenngrößen an Schweißnähten – Qualitätskriterien und Kenngrößen zur Beschreibung der Nahtgeometrie

Zwischen den Kenngrößen für Qualität und Geometrie gibt es bei der Nahthöhe  $H1$  und dem Nahtübergangswinkel  $\alpha_2$  eine Überschneidung. Werden die Kenngrößen zur Beschreibung der Geometrie der Schweißnaht genutzt, so findet der Grenzwert keine Anwendung.

Tabelle 9: Qualitätskriterien für Schweißnähte

Kenngröße	Geometrie	Qualität	Grenzwert
Nahtbreite B	X		ohne – Geometriebeschreibung
Nahthöhe H1	X	X	$H1 \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm} \times B$
Nahthöhe H2	X		ohne – Geometriebeschreibung
Nahtübergangswinkel $\alpha_2$	X	X	$\alpha_2 \geq 110^\circ$
Einbrandtiefe h		X	$h \geq 10 \% \text{ der Blechstärke (hier } h \geq 0,15 \text{ mm)}$
Einbrandbreite b		X	$b \geq \text{Blechstärke (hier } b \geq 1,5 \text{ mm)}$
Bindefehler		X	nicht zulässig

## 4.8 Modellentwicklung

Die erhobenen Daten werden bezüglich ihrer Korrelation zur Einbrandtiefe untersucht. Dazu werden lineare Zusammenhänge angenommen. Für alle Messgrößen werden in Abhängigkeit des Spalts die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  ermittelt, die einen quantitativen Vergleich des Informationsgehalts der jeweiligen Messgröße erlauben. Im zweiten Schritt werden die Messgrößen mit ausreichendem Informationsgehalt für das Modell zur zerstörungsfreien Vorhersage berücksichtigt. Dieses Modell wird für jede beliebige Stelle der Schweißnaht anwendbar sein, sodass die multiple lineare Regression angewendet werden kann. Anschließend wird geprüft, ob das Modell innerhalb des 95 % Konfidenzintervalls Verpasser hervorrufen kann. Da Verpasser vermieden werden sollen, erfolgt in diesem Fall eine Verschiebung der Regressionsgeraden. Können Verpasser ausgeschlossen werden, kann die POD nicht mehr als Vergleichskriterium herangezogen werden. Von Bedeutung für eine potentielle Anwendung wäre hingegen die Qualitätsgrenze, ab derer keine Fehlalarme mehr auftreten. Für diese wird der Wert  $h(\text{PoFA}=0)$  eingeführt, der bereits in Bild 4 auf Seite 23 berücksichtigt ist.

## 5 Forschungsergebnisse

### 5.1 Sensor-Einsatz im Umfeld des Lichtbogens

#### 5.1.1 Messortwahl für Lasertriangulationsscanner

Der Einsatz eines auf Basis von sichtbarem Licht arbeitende Laser-Triangulations-Sensors (LTS) im Umfeld eines MSG-Lichtbogens ist mit Herausforderungen behaftet. Bild 15 zeigt die Rohdaten, aufgezeichnet mit dem roten LTS. Die Punkte oberhalb und unterhalb von Blech und Spannvorrichtung sind Reflexionsartefakte, die durch das Überblenden des Laserstrahls durch den Lichtbogen verursacht werden.

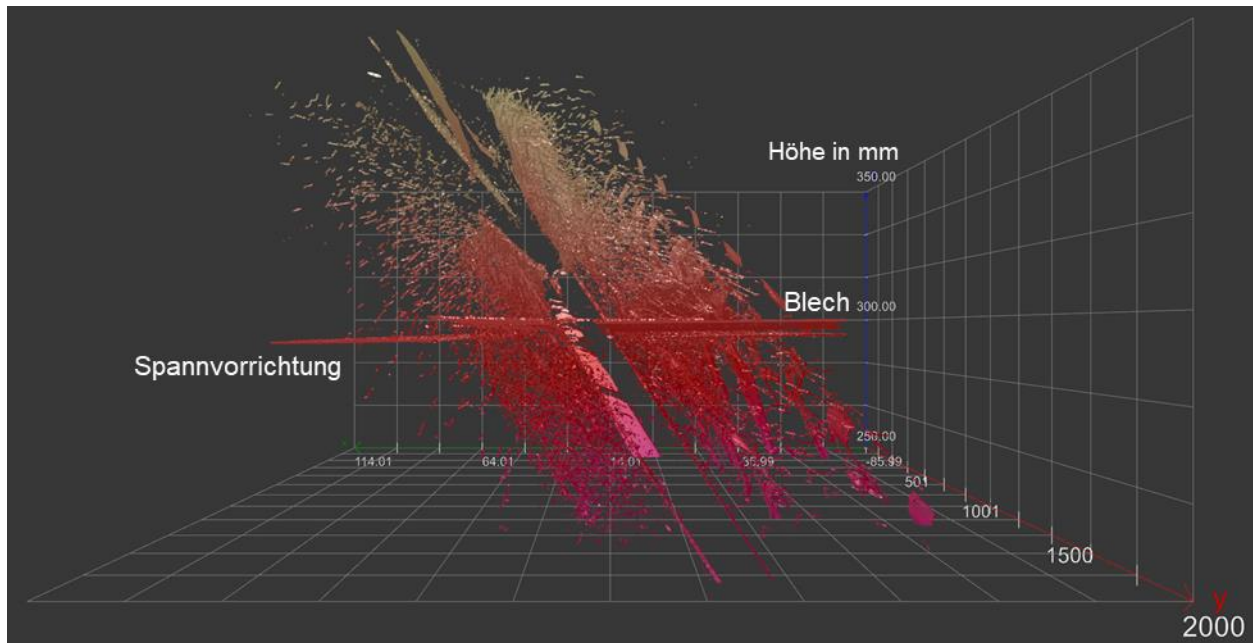


Bild 15: Geometrie-Rohdaten eines roten Lasers in 30 mm Abstand zum Lichtbogen

Werden die Artefakte ausgeblendet, verbleiben die Oberflächen von Spannvorrichtung und Blech im Bild. Wie Bild 16 zeigt, liegen im Bereich der Schweißnaht keine Oberflächeninformationen vor. Der Messort lag mit einem Abstand von 30 mm zum Lichtbogen auf der noch glühenden Schweißnaht, sodass das Licht des roten Lasers durch die Glühfarben des Stahls überblendet wurde. Durch die Wahl eines Messortabstands von mindestens 60 mm konnten die Reflexionsartefakte bei Anwendung des roten Lasers vermieden werden.

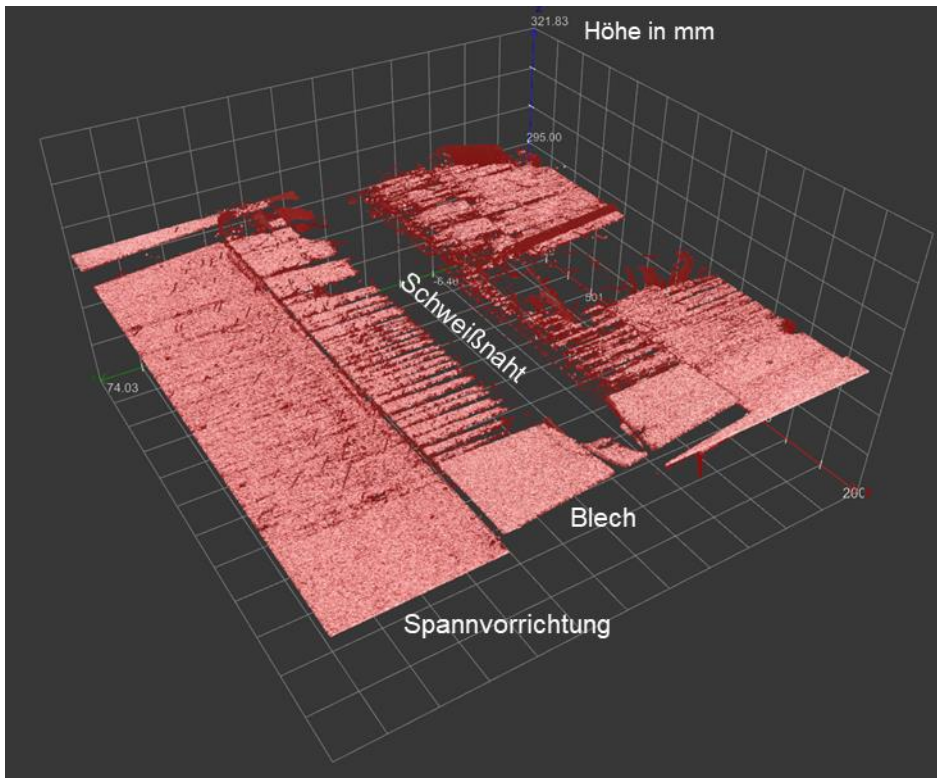


Bild 16: Auslöschung der Schweißnaht bei Messort auf der glühenden Schweißnaht

Bei der Wahl eines Messortes sehr nah am Lichtbogen sind die Reflexionsartefakte unabhängig von der Farbe des Lasers unvermeidbar. Jedoch arbeitet der blaue Laser während der Phasen des Werkstoffübergangs des Kurzlichtbogens auf der glühenden Schweißnahtoberfläche zuverlässig. Dies zeigen in Bild 17 die Positionen bei 85,07 mm und 85,27 mm. Die beobachteten Strecken der Überbelichtung durch den Schweißlichtbogen sind nicht länger als 0,3 mm, sodass der Informationsverlust vertretbar bleibt.

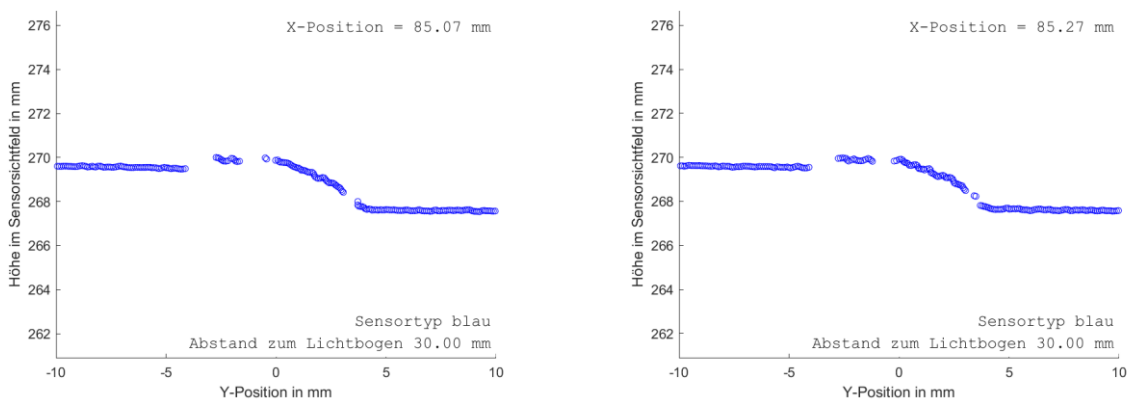


Bild 17: Geometrie-Profile, aufgezeichnet mit einem blauen LTS auf der glühenden Schweißnaht unmittelbar hinter dem Schweißbrenner

## **5.2 Prozessfenster**

### **5.2.1 Gegenüberstellung der Qualitätsgrößen**

Im Folgenden werden die einzelnen Nahtmessgrößen analysiert. Dies geschieht vor dem Hintergrund, die „Qualität“ der Schweißnähte so gut wie möglich durch möglichst wenige Zahlenwerte zu beschreiben. In den folgenden Abschnitten wird mithilfe von grafischer Darstellung analysiert, welche Qualitätsgrößen sich in Abhängigkeit der erzeugten Toleranzen in der Fügezone, also Spalt und Versatz verändern und in wie weit die untersuchten Proben den Qualitätskriterien in Tabelle 9 auf Seite 36 entsprechen. So soll festgestellt werden, welche Nahtmessgrößen die Grenzen des Prozessfensters markieren und welche Größen dies beeinflussen.

*S420MC|KLB|M21*

Bild 18 bis Bild 21 stellen die vier quantitativ beschreibbaren Qualitätsgrößen gegenüber. Die Nahthöhe H1 ist ein unkritisches Kriterium. Bei typischen Nahtbreiten zwischen 4 mm und 5 mm ergibt sich ein Grenzwert von 1,4 mm bzw. 1,5 mm, der nur in zwei Einzelfällen überschritten wurde. Ebenso unkritisch ist die Einbrandbreite, deren Mindestwert für den Werkstoff S420MC in allen Fällen erreicht wurde.

Für den Nahtübergangswinkel wird der Grenzwert von 110° bei Verschiebungen des Brenners zum Oberblech hin und besonders bei Spalten ab 0,5 mm unterschritten. Die größte Ausdehnung des n.i.O.-Bereichs weist die Einbrandtiefe auf. Ab einem Versatz der Kante des Oberblechs von 1 mm zum Brenner hin ist mit einer Unterschreitung der Qualitätsgrenze zu rechnen.



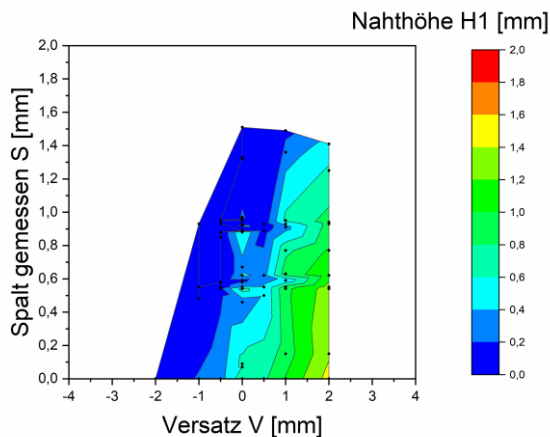


Bild 18: S420MC|KLB|M21 – Veränderung der Nahthöhe H1 in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

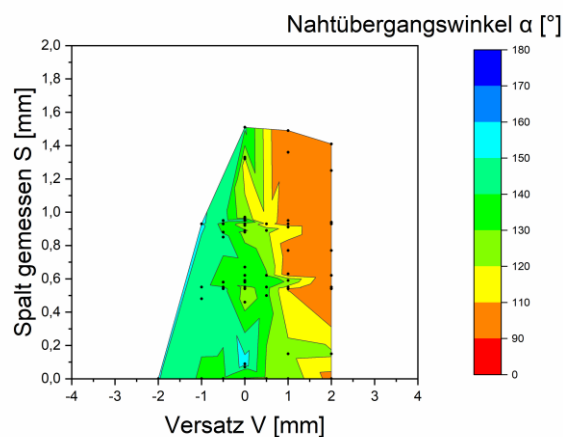


Bild 19: S420MC|KLB|M21 – Veränderung des Nahtübergangswinkels in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

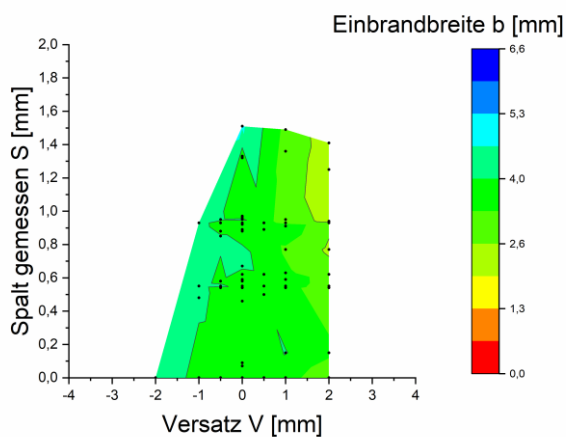


Bild 20: S420MC|KLB|M21 – Veränderung der Nahtbreite in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

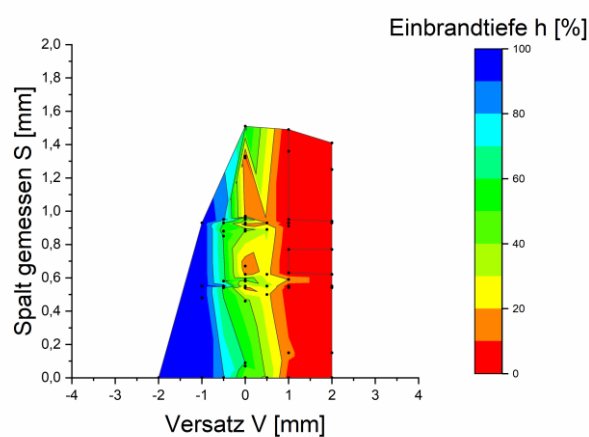


Bild 21: S420MC|KLB|M21 – Veränderung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

Der Zusammenhang zwischen Versatz, Spalt und Einbrandtiefe lässt sich anhand von Beispielen besser nachvollziehen, wie in Bild 22.

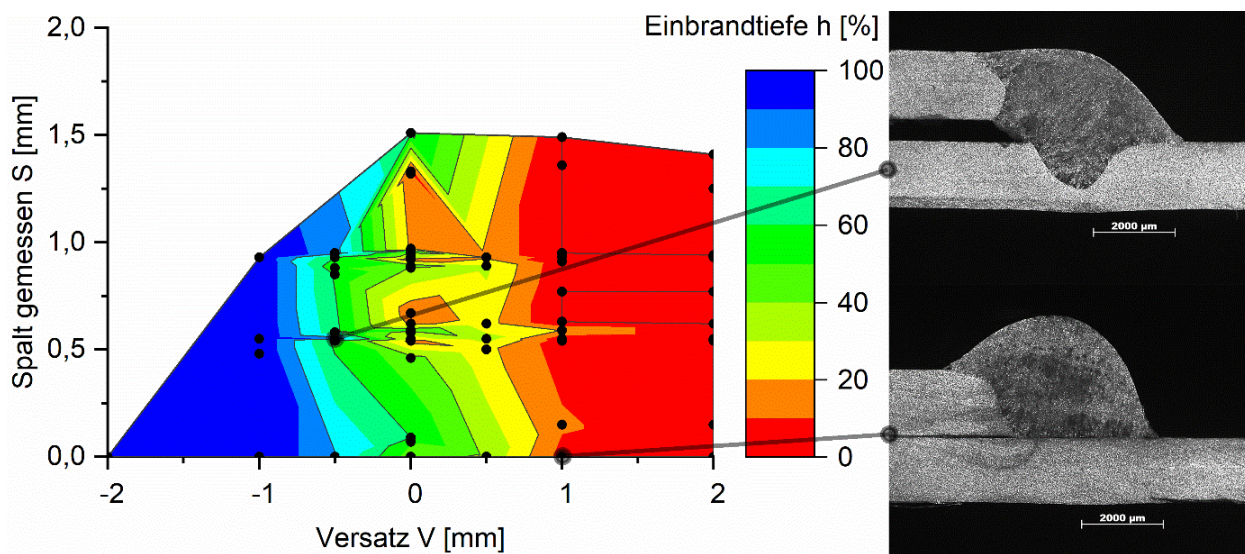


Bild 22: Einbrandtiefe für den Werkstoff S420MC in Abhängigkeit von Spalt und Kantenversatz



### 22MnB5+AS150|CMT|C1

Für die untersuchte Parameterkombination 22MnB5+AS150 geschweißt mit dem CMT-Prozess und C1-Schutzgas zeigt sich eine ähnliche Situation (siehe Bild 23 bis Bild 26). Mit Nahtbreiten überwiegend zwischen 6 mm und 8 mm bewegt sich der Grenzwert für die Nahthöhe H1 zwischen 1,6 mm und 1,8 mm und wird somit fast immer unterschritten. Der Nahtübergangswinkel wird bei Kantenversätzen ab 2 mm häufiger unterschritten. Bereits ab einem Versatz von 1 mm liegt die Einbrandtiefe nah an der oder unter der Qualitätsgrenze, wie der ausgedehnte orange-rote-Bereich zeigt. Unterschreitungen der Einbrandbreite liegen vollständig in diesem Bereich und sind somit von untergeordneter Bedeutung.

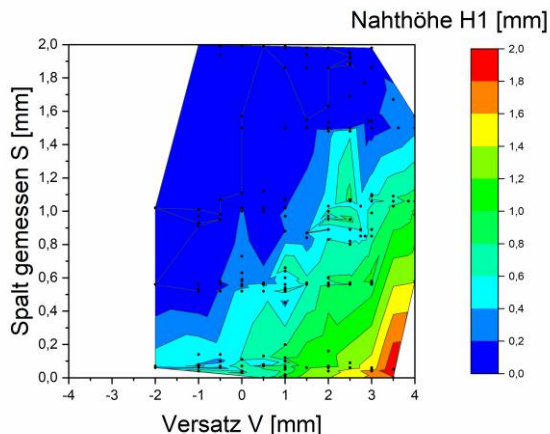


Bild 23: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Veränderung der Nahthöhe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

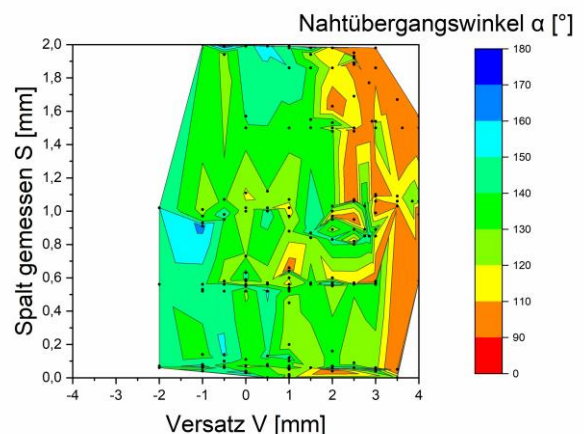


Bild 24: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Veränderung des Nahtübergangswinkels in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

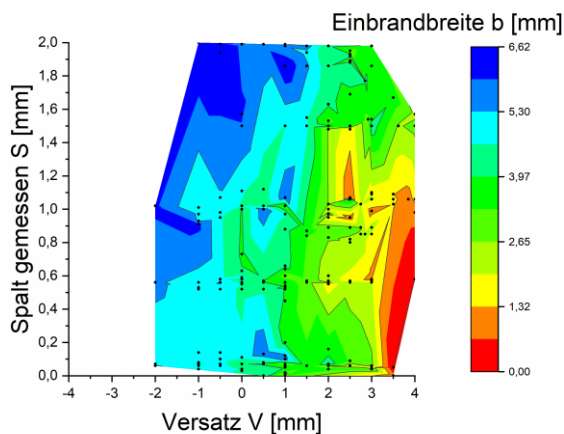


Bild 25: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Veränderung der Einbrandbreite in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

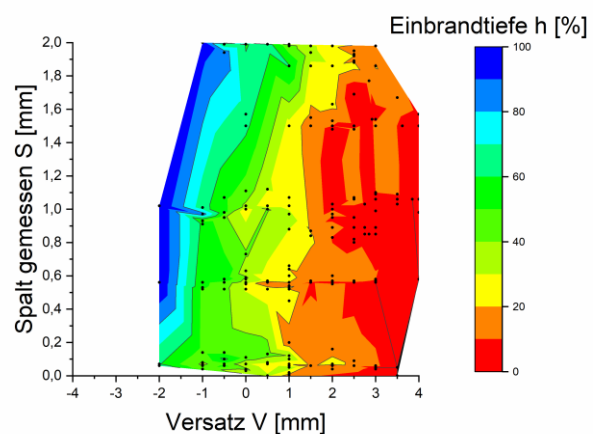


Bild 26: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Veränderung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

### HX340LAD+Z140|CMT|C1

Der Werkstoff HX340LAD+Z140 stellt ein kleineres Prozessfenster zur Verfügung. Eine Verschiebung der Blechkante zum Brenner hin wird weniger stark toleriert. Nahthöhe H1 (siehe Bild 27) sowie Einbrandbreite b (siehe Bild 29) sind unkritische Kriterien, die nur selten oder gar nicht über- bzw. unterschritten werden. Der Nahtübergangswinkel (siehe Bild 28) war an fast allen untersuchten Schliiffpositionen im anforderungsgerechten Bereich. Einzig die Einbrandtiefe h zeigt eine ausgedehnte Zone nah oder unter der Qualitätsgrenze.

Den Diagrammen kann weiterhin entnommen werden, dass die gewählte Spalthöhe keinen direkten Einfluss auf die gemessene Einbrandtiefe hat (siehe Bild 36). Während sich die Proben des Werkstoffs 22MnB5+AS150 bezüglich der Einbrandtiefe überwiegend im Bereich von 0 % – 70 % der Blechdicke bewegen, bewegt sich der Einbrand beim Werkstoff HX340LAD+Z140 überwiegend unterhalb von 60 % der Blechdicke. Außerdem kann den Darstellungen entnommen werden, dass der Kantenversatz die Einbrandtiefe eindeutig beeinflusst. Es ist zu erkennen, dass ein Versatz des Drahtaufsetzpunktes auf das Oberblech ( $V > 0$ ) dazu führt, dass der Einbrand geringer ausfällt. Der Vergleich zwischen dem konventionellen Kurzlichtbogen mit einem Drahtvorschub von 3,7 m/min, angewendet auf den Werkstoff S420MC, und dem CMT-Prozess mit 4,5 m/min bei den beiden anderen Versuchswerkstoffen zeigt, dass sich die Obergrenze, die die Einbrandtiefe erreicht, von 100% auf ca. 60% verschiebt. Im Gegenzug ermöglicht der Prozesswechsel verbunden mit einem erhöhten Drahtvorschub eine größere Versatzüberbrückung. So äußert sich die Gegenüberstellung von Versatz und Einbrandtiefe in Bild 21 anders als in Bild 26 und Bild 30 mit einem steilen Abfall der Einbrandtiefe bei steigendem Versatz.

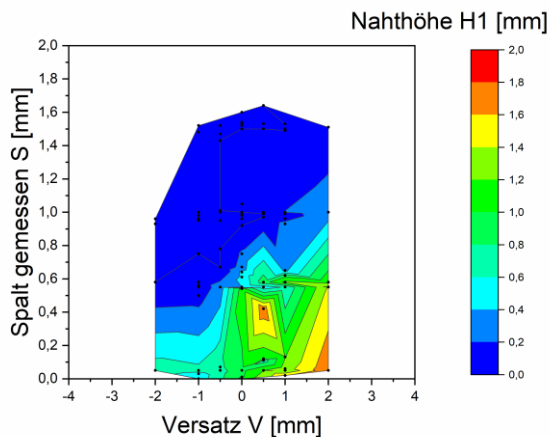


Bild 27: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Veränderung der Nahhöhe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

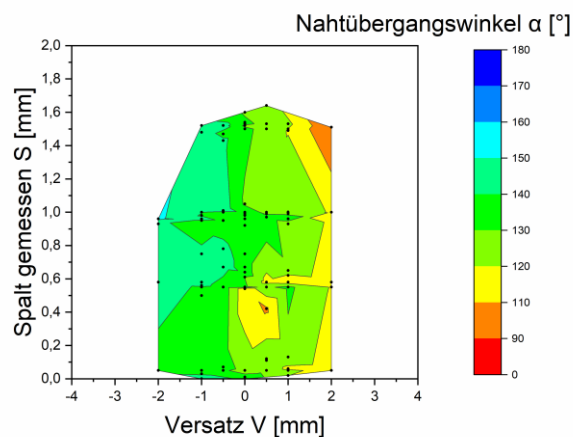


Bild 28: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Veränderung des Nahtübergangswinkels in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

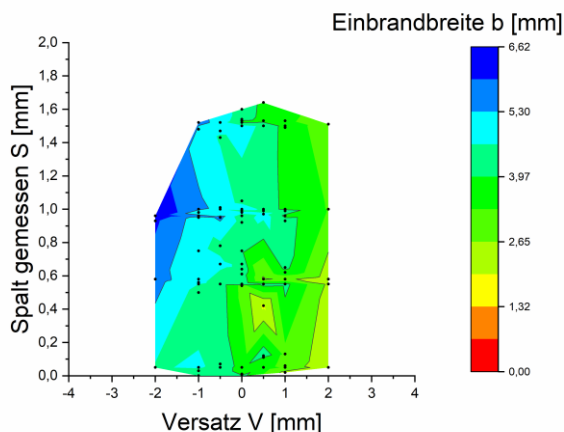


Bild 29: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Veränderung der Einbrandbreite in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

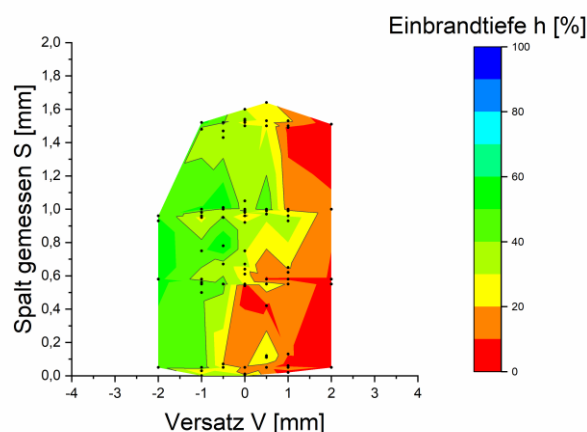


Bild 30: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Veränderung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit von Spalt und Versatz

**Fazit**

Die Gegenüberstellung der Qualitätsgrößen für die drei untersuchten Anwendungsfälle verdeutlicht die starke Abhängigkeit der Schweißnahtqualität vom Erreichen der Einbrandtiefe. Aus diesem Grund wurden die weiteren Untersuchungen auf die Einbrandtiefe konzentriert.

**5.2.2 Einfluss von Spalt und Versatz**

Werden die Darstellungen von Spalt und Versatz entkoppelt, so kann der jeweilige Einfluss auf die Einbrandtiefe deutlicher dargestellt werden. Bild 31 bis Bild 36 zeigen, dass unabhängig von Werkstoff und Prozess für jede Spalthöhe die Einbrandtiefe im kompletten Bereich streut. Für den Versatz hingegen sind diagonal verlaufende Streubänder erkennbar. Mit zunehmendem Versatz des Oberblechs zum Schweißbrenner hin nimmt die Einbrandtiefe ab.

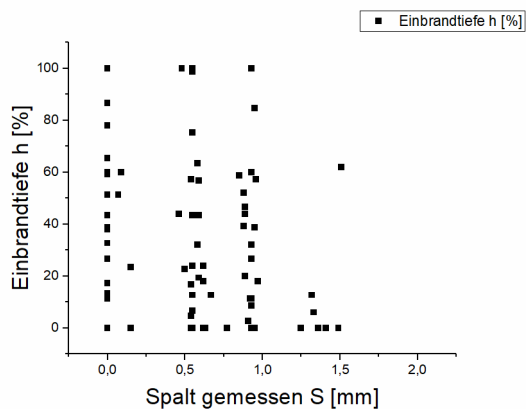


Bild 31: Einfluss des gemessenen Spaltes auf die Einbrandtiefe (S420MC)

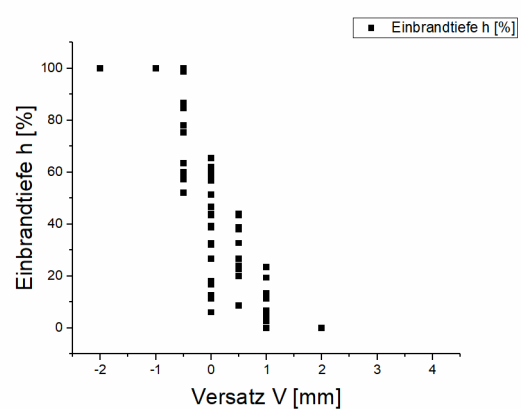


Bild 32: Einfluss des Versatzes auf die Einbrandtiefe (S420MC)

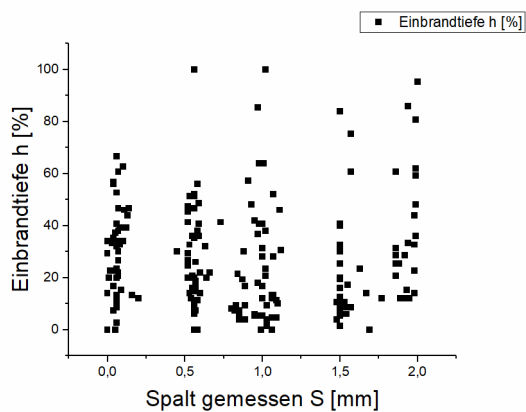


Bild 33: Einfluss des gemessenen Spaltes auf die Einbrandtiefe (22MnB5+AS150)

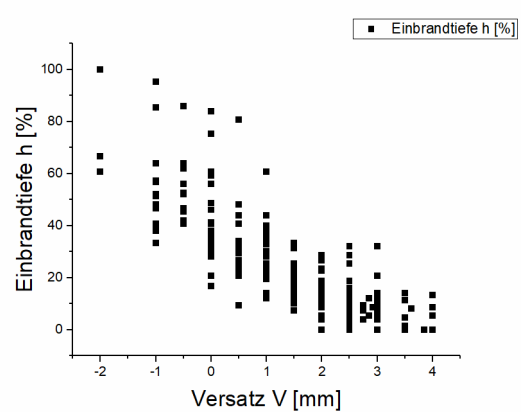


Bild 34: Einfluss des Versatzes auf die Einbrandtiefe (22MnB5+AS150)

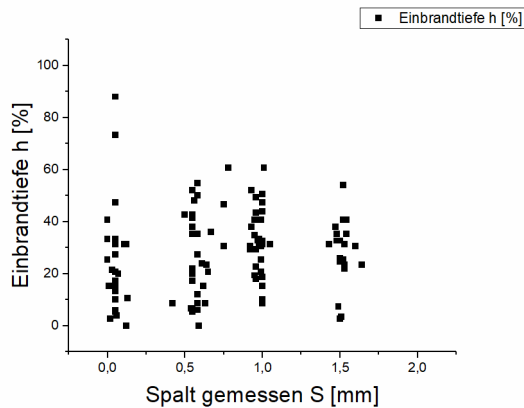


Bild 35: Einfluss des gemessenen Spaltes auf die Einbrandtiefe (HX340LAD+Z140)

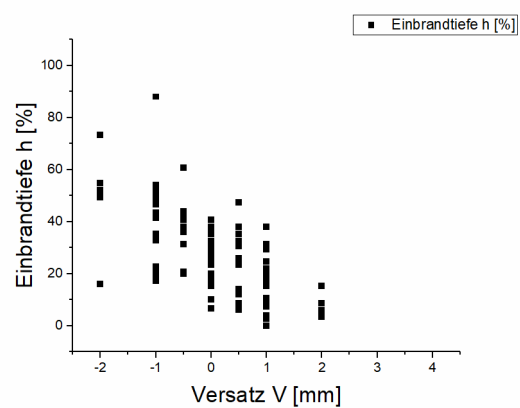


Bild 36: Einfluss des Versatzes auf die Einbrandtiefe (HX340LAD+Z140)

### 5.2.3 Prozessfenster der Einbrandtiefe

Die geometrischen Prozessfenster (GPF) wurden unter den in Abschnitt 4.6 beschriebenen Randbedingungen ermittelt. Wie zuvor in Abschnitt 5.2.1 erläutert, wird die Definition des Prozessfensters auf das Qualitätskriterium Einbrandtiefe fokussiert.

In Bild 37 bis Bild 39 stellen die grau gefärbten Zellen nicht vorhandene Spalt-Versatz-Kombinationen dar. Nicht verzeichnete Kombinationen aus Spalt und Versatz können aus einem der folgenden Gründe fehlen.

- die Spalt-Versatz-Kombination konnte technisch nicht hergestellt werden
- die Spalt-Versatz-Kombination ist in der ersten Versuchsreihe nicht enthalten

Einige Zellen sind mit „VT“ versehen, der Abkürzung für Sichtprüfung (Visual Testing). Für diese Spalt-Versatz-Kombination wurden alle vorhandenen Proben bereits in der Sichtprüfung als nicht anforderungsgerecht eingestuft und von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Somit markiert die Kennzeichnung VT das Überschreiten der Prozessgrenze.

Zunächst soll eine generelle Einteilung über die betrachteten Prozessfenster gegeben werden. Hierfür wurde ermittelt, welche der erstellten Schiffe einen anforderungsgerechten Einbrand aufweisen. Die in Bild 37 bis Bild 39 dargestellten Prozessfenster geben Auskunft über die Lage der anforderungsgerechten Schweißverbindungen. Grüne Zellen mit einem Wert von 100 % beschreiben, dass alle der angefertigten Schiffe die Einbrand-Anforderung gemäß Tabelle 9 erfüllen. Die orangefarben dargestellten Zellen verdeutlichen, dass weniger als die Hälfte der Schiffe als nicht-anforderungsgerecht bewertet wurden. Rote Zellen symbolisieren, dass der überwiegende Teil der angefertigten Schiffe, d.h. mehr als 50 %, als nicht-anforderungsgerecht bewertet wurde und die dunkelroten Zellen markieren ausschließlich nicht anforderungsgerechte Schiffe, was numerisch 0 % entspricht.

Es ist zu erkennen, dass für alle Versuchswerkstoffe ein steigender Kantenversatz die Prozesssicherheit reduziert. Es zeigt sich, dass eine anforderungsgerechte Schweißung eines Kantenversatzes von 1 mm lediglich beim Werkstoff 22MnB5+AS150 realisiert werden konnte. Außerdem ist auffällig, dass der Werkstoff HX340LAD+Z140 zusätzlich nicht-anforderungsgerechte Schweißungen für Konfigurationen mit Nullspalt und Spalthöhe von 0,5 mm erzeugt.

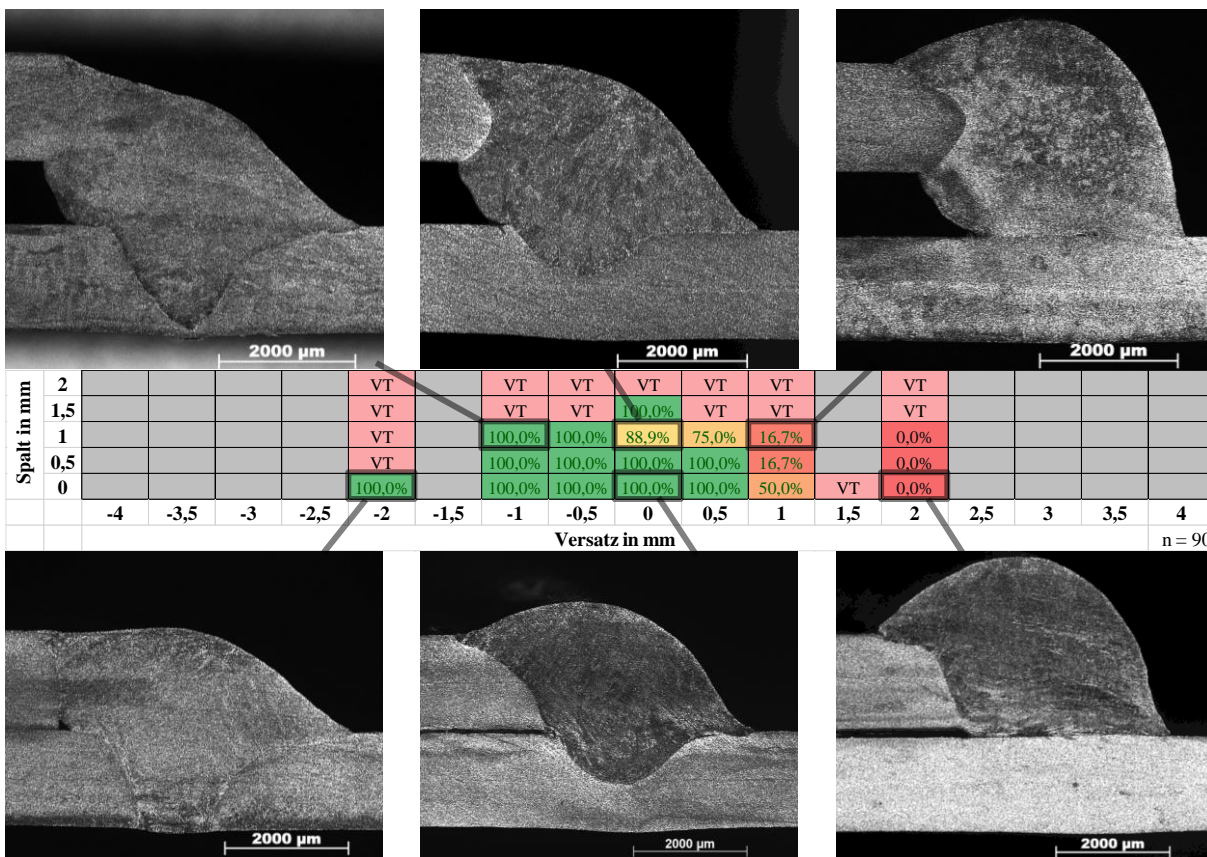


Bild 37: S420MC|KLB|M21 – Prozessfenster der Einbrandtiefe mit exemplarischen Schlibfbildern

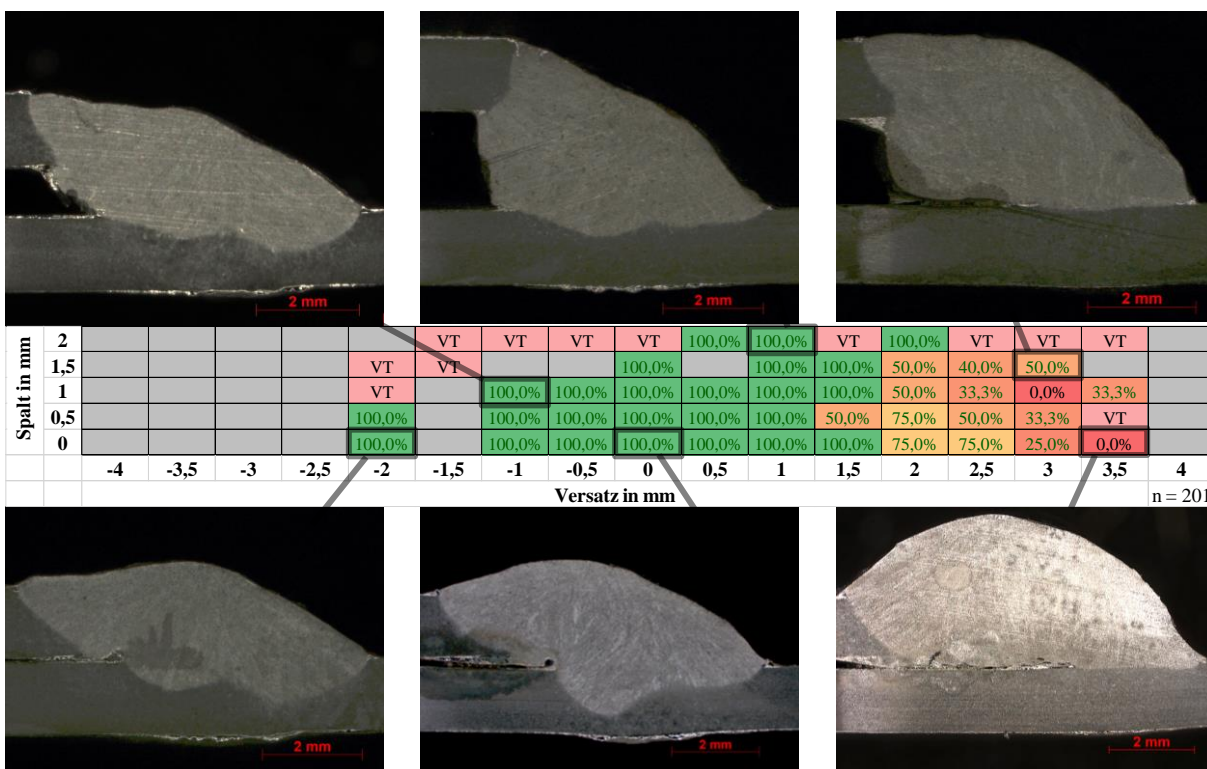


Bild 38: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Prozessfenster der Einbrandtiefe mit exemplarischen Schlibfbildern



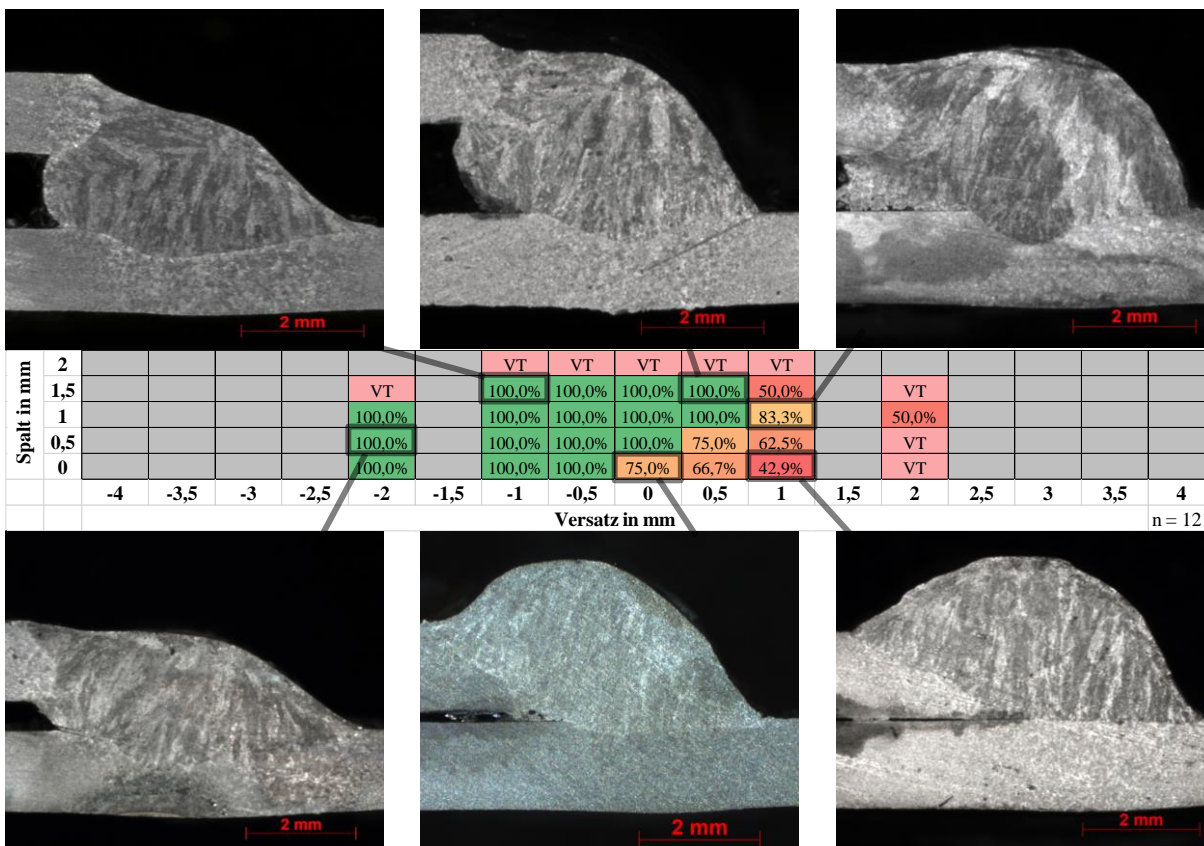


Bild 39: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Prozessfenster der Einbrandtiefe mit exemplarischen Schlifffildern

### 5.3 Überprüfung der Robustheit

Die Robustheit der Versuchsmethodik wurde durch Veränderungen der Probengeometrie geprüft. Die Wiederholung von Versuchen wurde auch genutzt, um Lücken im Prozessfenster zu schließen sowie ergänzende Proben zum Auffinden der Prozessgrenzen zu erstellen. Vor der Beprobung erfolgte zunächst die Sichtprüfung zur Vorauswahl der Schlifffpositionen.

#### 5.3.1 Sichtprüfung

Die Prozessfenster der Einbrandtiefe in Abschnitt 5.2.3 weisen Lücken auf, zusätzlich grenzen Bereiche mit gutem Einbrand an den unbeprobten Bereich des Prozessfensters. Dies wurde mit der Wiederholung von Versuchen behoben. Im Falle des Werkstoffs S420 (siehe Bild 40) ist ein größerer Kantenversatz als -2 mm (vom Brenner weg) nicht berücksichtigt, da bereits bei -2 mm deutlich mehr als die Hälfte der Proben als nicht anforderungsgerecht eingestuft wurde.

Spalt in mm	2					0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	1,5					0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	12,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	1					8,0%	33,3%	77,8%	82,6%	87,6%	51,7%	3,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0,5					30,8%	100,0%	91,3%	81,0%	87,6%	59,3%	14,3%	4,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	0					37,5%	100,0%	90,7%	82,6%	82,4%	48,5%	17,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		Versatz in mm																
		n = 1357																

Bild 40: S420MC|KLB|M21 – Sichtprüfung

Die beiden nachfolgenden VT-Darstellungen der Prozessfenster erlauben aufgrund identischer Prozessparameter eine Vergleichbarkeit der Werkstoffe 22MnB5+AS150 in Bild 41 und HX340LAD+Z140 in Bild 42. Eine Verschiebung der Blechkante in den negativen Bereich vom Brenner weg (siehe Koordinatensystem in Bild 6 auf Seite 30) wird von beiden Werkstoffen bis zu 2,5 mm gut verkräftet. Dieser Wert ist im Wesentlichen von der ausgebrachten

Materialmenge und somit vom Drahtvorschub abhängig. Einer Verschiebung der Blechkante in den positiven Bereich hingegen wird vom Werkstoff 22MnB5+AS150 deutlich besser toleriert als von der verzinkten Güte. Bei letzterer wird die Schweißnahtqualität erheblich durch das Aufschmelzen großer Bereiche des Oberblechs beeinträchtigt.

Spalt in mm	2						0,0%	0,0%	0,0%	30,0%	18,8%	47,1%	70,6%	61,5%	52,9%	17,6%	33,3%	0,0%
	1,5		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	7,7%	22,2%	47,5%	81,3%	68,0%	72,2%	61,1%	57,1%	22,2%	0,0%	0,0%
	1	0,0%	0,0%	10,0%	30,0%	90,0%	100,0%	100,0%	100,0%	90,7%	96,0%	90,4%	94,9%	85,1%	54,2%	3,4%	0,0%	0,0%
	0,5	0,0%	20,0%	40,0%	100,0%	100,0%	100,0%	91,7%	100,0%	91,5%	89,3%	89,3%	90,0%	94,3%	62,1%	3,7%	0,0%	0,0%
	0	0,0%	40,0%	40,0%	80,0%	91,3%	100,0%	82,4%	100,0%	90,8%	81,3%	84,8%	85,4%	82,7%	18,5%	1,9%	0,0%	0,0%
		-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		Versatz in mm																
		n = 2168																

Bild 41: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Sichtprüfung

Spalt [mm]	2							0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%						
	1,5			0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	58,3%	80,0%	91,8%	72,7%	26,2%	0,0%	14,3%	0,0%	0,0%		
	1	0,0%	0,0%	40,0%	100,0%	61,9%	100,0%	96,4%	100,0%	89,3%	84,6%	49,0%	35,3%	9,7%	0,0%	0,0%		
	0,5	0,0%	20,0%	20,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	94,7%	80,8%	52,2%	11,8%	6,5%	0,0%	0,0%		
	0	0,0%	0,0%	40,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	91,2%	89,3%	52,0%	2,6%	5,6%	0,0%	0,0%		
		-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
		Versatz																
		n = 1573																

Bild 42: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Sichtprüfung

### 5.3.2 Robustheit der Einbrandtiefe

Die Einbrandtiefe im Unterblech als wesentliche Qualitätsgröße sollte keinen signifikanten Schwankungen unterliegen. Die Prozessfenster wurden mit den neu erstellten Proben ergänzt und sind in Bild 43 bis Bild 45 mit exemplarischen Schlibfbildern wiedergegeben. Der Vergleich mit Bild 37 bis Bild 39 zeigt eine weitestgehende Übereinstimmung. Der Prozentwert gibt an, wie viele der gemessenen Einbrandtiefen über der Qualitätsgrenze von 10 % liegen. Bei einem Wert von 100 % ist die Einbrandtiefe bei allen Proben anforderungsgerecht.

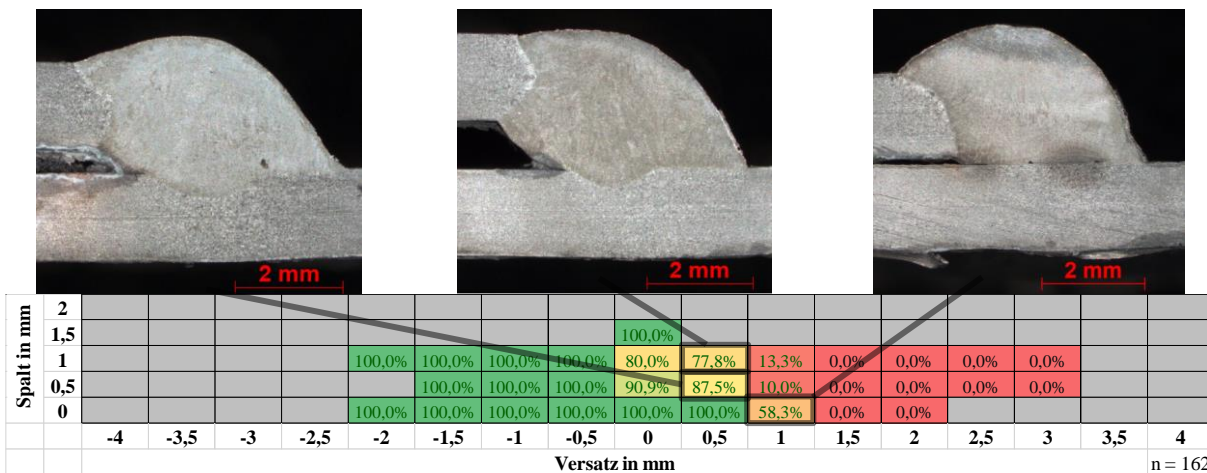


Bild 43: S420MC|KLB|M21 – Einbrandtiefe einschließlich Proben mit veränderter Probengeometrie

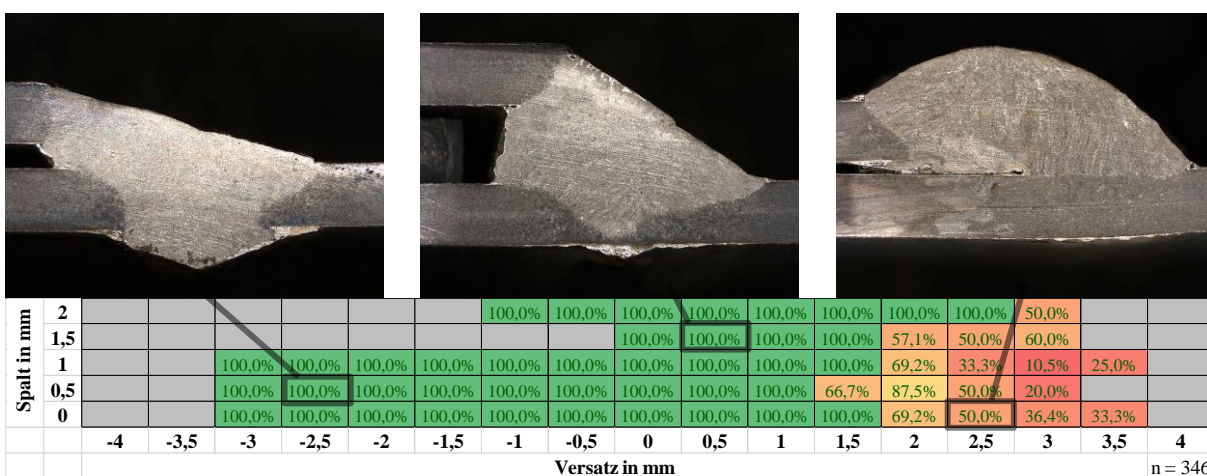


Bild 44: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Einbrandtiefe einschließlich Proben mit veränderter Probengeometrie

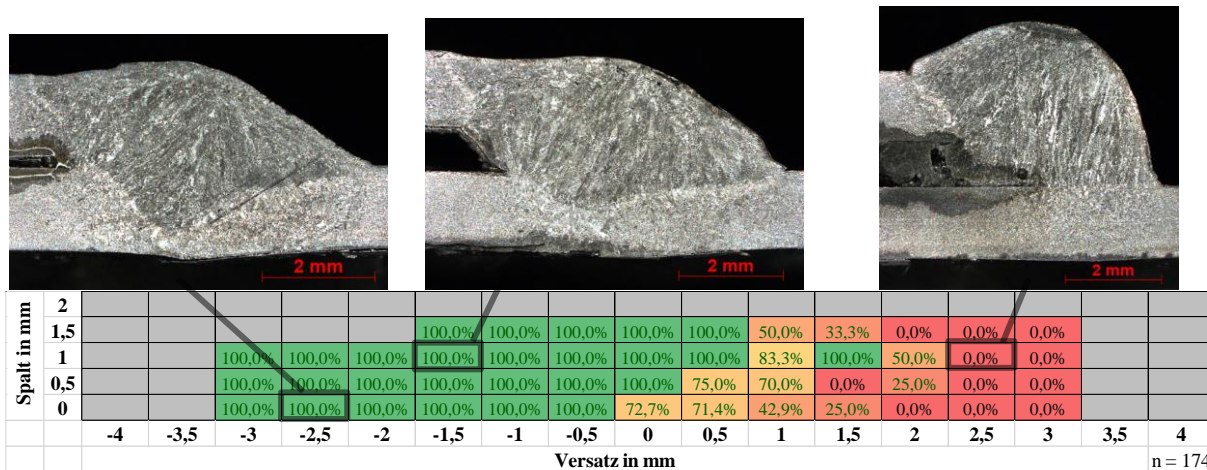


Bild 45: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Einbrandtiefe einschließlich Proben mit veränderter Probengeometrie



## 5.4 Datenverarbeitung

Die Auswertung der gewonnenen Versuchsdaten erfordert jeweils ein angepasstes Vorgehen für die Geometrie- und Temperaturverläufe. Die Geometriedaten sind mit Artefakten behaftet, die häufig auf kleinste Schweißspritzer zurückzuführen sind. Diese müssen durch eine geeignete Filtermethode entfernt werden, ohne dabei die Geometrieinformationen zu verfälschen. Die sehr homogenen Daten des Linienpyrometers bedürfen keiner besonderen Aufbereitung, müssen jedoch nach einer geeigneten Methode ausgewertet werden, die eine Korrelation mit Unregelmäßigkeiten wie Bindefehlern erlaubt. Tabelle 10 führt die Schritte der Datenverarbeitung auf.

Tabelle 10. Abfolge der methodischen Arbeitsschritte der Datenverarbeitung

Datenaufzeichnung bei der Probenherstellung	
Geometrie 1280 Punkte je Profil Abtaste: $15 \text{ mm}^{-1}$ ( $\approx 125 \text{ Hz}$ )	Temperaturfeld 22 Punkte je Profil Abtaste: $15 \text{ mm}^{-1}$ ( $\approx 125 \text{ Hz}$ )
Datenvorverarbeitung	
Sensorausrichtung kompensieren <i>Drehen der Daten <math>30^\circ</math> um X-Achse</i> Filterung <i>Median + Mittelwert</i> Prüfen der Datenqualität	Datenpunktabstand reduzieren <i>Spline-Interpolation <math>\rightarrow 154</math> Punkte</i>
Einzel-Auswertung der Sensordaten	
bestimmen geometrischer Messgrößen aus der Oberflächentopografie	Entwickeln von Modellen und Auswertemethoden
kombinierte Auswertung durch Korrelation der Einzelgrößen mit der Einbrandtiefe	
Multiple lineare Regression der Auswertegrößen beider Sensoren	

### 5.4.1 Vorverarbeitung der Geometrie-Daten

Der Vergleich der in Tabelle 10 aufgeführten Arbeitsschritte verdeutlicht den erhöhten Bearbeitungsaufwand der Geometrie-Daten. Um eine lückenlose und stetige Erfassung der Schweißnahtoberfläche sicherzustellen, wurde der Sensor in der Y-Z-Ebene  $30^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn um die positive X-Achse gedreht. Diese Drehung wird in den Sensordaten rechnerisch kompensiert. Aufgrund der ursprünglichen Ausrichtung der Daten relativ zum Sensor liegen einige Datenpunkte nicht aufsteigend entlang der Y-Achse vor. Darum wird eine Y-Sortierung vorgenommen. Nachfolgend wird ein Medianfilter mit einem gleitenden Fenster der Breite 7 angewendet, um Ausreißer bzw. Artefakte zu filtern. Positiver Nebeneffekt der Sortierung ist die Steigerung der Effektivität der Median-Filterung, da zuvor nebeneinander liegende Ausreißer durch die Sortierung meist vereinzelt werden (vergleiche Bild 46 links und Mitte). Ursache dieser Geometriepunkte außerhalb der Nahtoberfläche können z.B. Spritzer im Sichtfeld LTS oder Fehlreflexionen an Silikaten sein. Die Median-Filterung behebt die meisten einzelnen Ausreißer in den Daten, ohne die Kontur der Schweißnahtoberfläche durch intensive Glättung zu verfälschen. Durch die Kombination von Sortierung und Medianfilter gehen jedoch Hinterschneidungen verloren, die bei Einbrandkerben oder starken Nahtüberhöhungen auftreten können. Dies bedeutet einen Informationsverlust, dessen Auswirkung situationsabhängig zu bewerten ist. Bild 46 zeigt an einem Beispiel die Veränderung der geometrischen Daten durch die Schritte Drehen, Sortieren und Filtern.

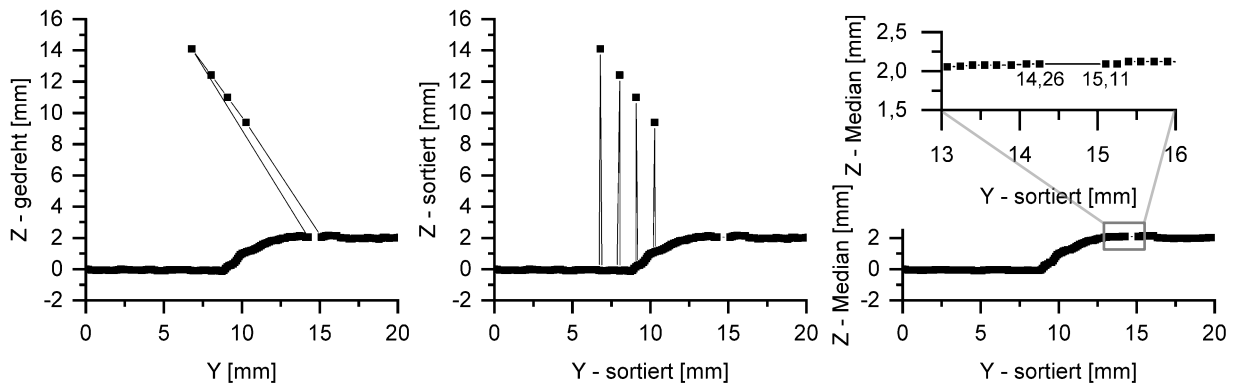


Bild 46: Schritte der Geometriedaten-Vorverarbeitung Drehen, Sortieren und Filtern an einem Beispiel mit 4 Ausreißern. Nach dem Entfernen der Ausreißer verbleibt an deren ursprünglicher Position eine Lücke von 0,85 mm Breite.

### 5.4.2 Beschreibung der Form des Temperaturfeldes

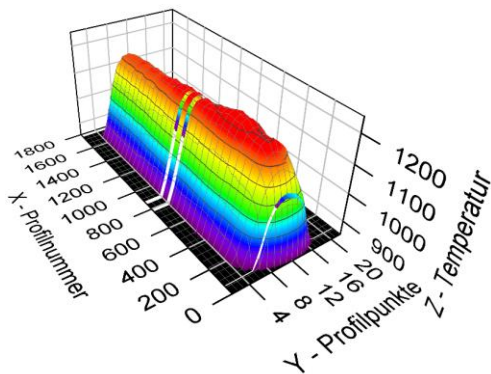


Bild 47. 3D-Darstellung eines Temperaturfeldes aus aneinandergereihten Profilen. Die Profilpunkte haben einen Bereich von 20 mm erfasst

Temperaturfelder wie in Bild 47 werden durch das Aneinanderreihen einzelner Temperaturprofile entlang der X-Achse erzeugt, die quer zur Schweißrichtung aufgenommen werden. In der Mitte der Farbverlaufsdarstellung ist ein solches Profil hervorgehoben.

Bild 48 links zeigt, wie zur Beschreibung der Symmetrie das Flächenverhältnis der Flächenanteile unter dem Temperaturprofil links und rechts der Maximaltemperatur ausgewertet wird. In Bild 48 rechts ist exemplarisch der Verlauf des Messwertes Flächenverhältnis über einer vollständigen Schweißprobe mit 160 mm Länge dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine Referenzprobe ohne Kantenauslenkung mit einem Spalt von 0,5 mm. Das Flächenverhältnis schwankt um den Mittelwert 0,75. Somit kann eine asymmetrische Flächenverteilung unter der Temperaturkurve an einer Kehlnaht am Überkappstoß festgehalten werden.

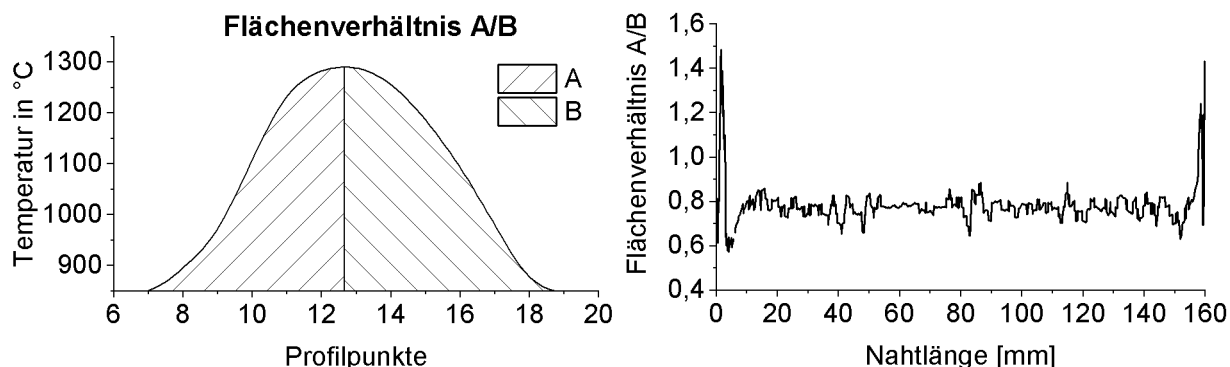


Bild 48. links: Temperaturprofil mit Messgröße Flächenverhältnis  
rechts: Verlauf des Flächenverhältnisses über einer unbeeinflussten anforderungsgerechten Schweißnaht

In Hinblick auf potenziell zu verarbeitenden Datenmengen stellt sich die Frage nach der Reduktion der in die Berechnung einfließenden Daten. Für die Bestimmung des Flächenverhältnisses müssen alle Einzelwerte miteinander verrechnet werden. Alternativ kann anstatt der gesamten Fläche unter der Temperaturkurve nur ein einzelner isothermer Schnitt wie in Bild 49 links ausgewertet werden. Es verbleiben nur drei Zahlenwerte, die durch Division der Teilstrecken a durch b die Messgröße Isothermer Symmetrie-Quotient (ISQ) bilden. Zur Beurteilung dieser Methodik wurden sie auf drei unveränderliche Temperaturebenen angewendet. Eine dynamische Verschiebung der Temperaturebene relativ zur Maximaltemperatur ist nicht sinnvoll, da die Maximaltemperatur auch an homogenen Schweißnähten Schwankungen unterliegt. In Bild 49 rechts ist der ISQ auf drei Isothermen für eine Schweißnaht an gerader Blechkante mit 0,5 mm Spalt aufgetragen.

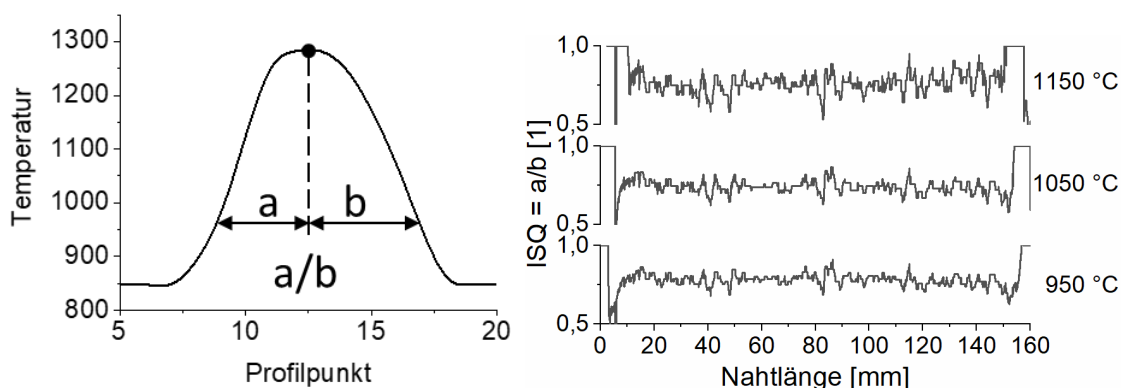


Bild 49: Links: Messgröße „Isothermer Symmetrie-Quotient (ISQ)“, rechts: Veränderung des ISQ über einer anforderungsgerechten Schweißnaht mit Spalt 0,5 mm ohne Kantenauslenkung

Der Vergleich zeigt eine Zunahme der Schwankung mit steigender Temperatur bei qualitativ identischem Kurvenverlauf. Der Vergleich mit dem Flächenverhältnis in Bild 48 zeigt ebenfalls eine Übereinstimmung des qualitativen Kurvenverlaufs.

Werden die Messgrößen Flächenverhältnis und ISQ auf eine Schweißnaht mit unzulässigen Nahtunregelmäßigkeiten angewendet, ergibt sich das folgende Bild. Wie bei der Referenzschweißung an der geraden Blechkante liegen die Werte der Messgrößen in der Größenordnung von 0,75. Im Bereich der maximalen Kantenauslenkung von 2 mm bei etwa 50 mm Nahtlänge weichen beide Messgrößen deutlich von ihrem Normalwert ab. Im Nahtabschnitt zwischen 80 mm und 160 mm findet eine Auslenkung der Blechkante vom Brenner weg statt. Hierbei wird die Schweißnaht nicht negativ beeinflusst, die Messgrößen bleiben unverändert bei 0,75. Bei 75 mm ist bei beiden Messgrößen eine falsch-positive

Abweichung vom Normalwert aufgetreten, die nicht mit einer unzulässigen Nahtunregelmäßigkeit in Verbindung gebracht werden kann.

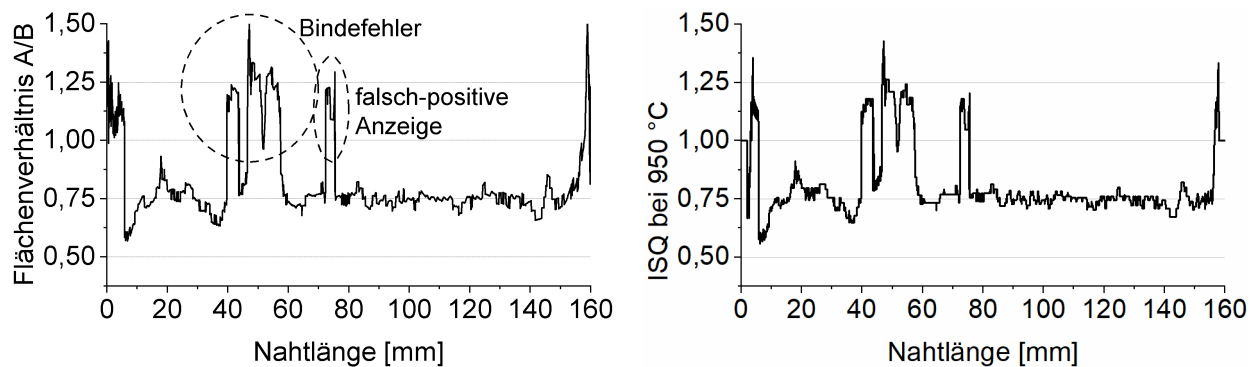


Bild 50: Verlauf von Flächenverhältnis und ISQ bei 950 °C über einer Schweißnaht

## 5.5 Algorithmen

### 5.5.1 Bewertung des Informationsgehaltes der geometrischen Messgrößen

Die Messgrößen aus Bild 14 auf Seite 36 werden bezüglich ihrer Korrelation mit der Einbrandtiefe bewertet. Dazu wird für jede Probe die Einbrandtiefe über der Messgröße aufgetragen. Die Proben werden zunächst nach dem Spalt zwischen Oberblech und Unterblech klassiert, um den Spalteinfluss abbilden zu können. Bei 10 % Einbrandtiefe verläuft die gestrichelt hervorgehobene Qualitätsgrenze zwischen anforderungsgerecht (i.O.) und nicht anforderungsgerecht (n.i.O.). Neben den Symbolen der Einzelmesswerte enthalten alle Abbildungen die lineare Geradenapproximation der jeweiligen Datenreihe.

*S420MC|KLB|M21*

Nahtübergangswinkel und Einbrandtiefe haben einen linearen Zusammenhang, der weitestgehend unabhängig vom Spalt ist, wie Bild 51 zeigt. Die Korrelation unterliegt Streuungen, die mit dem Spalt zunimmt. Jedoch zeigt das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zwischen 0,74 und 0,87 einen sehr hohen Informationsgehalt dieser Messgröße an.

Für gleiche Werte der Nahtbreite ist die vollständige Bandbreite der Einbrandtiefe von 0 % bis 100 % anzutreffen. In Abhängigkeit vom Spalt ergibt sich eine Verschiebung. So wiesen Schweißnähte an einem größeren Spalt eine kleinere Nahtbreite aus, weil das Nahtvolumen stärker in die Höhe gestreckt wird und somit weniger Material in der Breite zur Verfügung steht. Die Bestimmtheitsmaße bescheinigen eine große Streuung, wobei der Informationsgehalt noch im nutzbaren Bereich liegt.

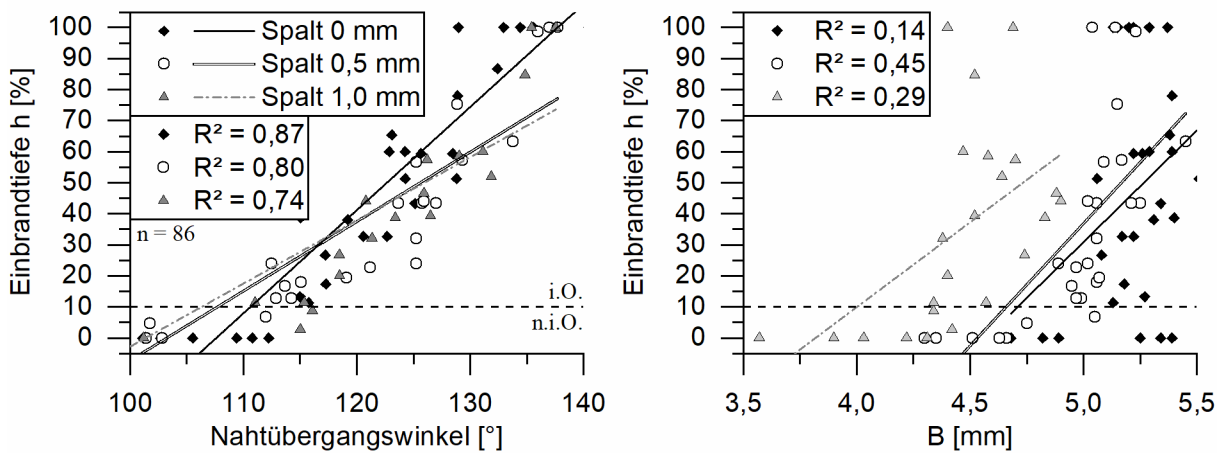


Bild 51: S420MC|KLB|M21 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe  $h$  und Nahtübergangswinkel  $\alpha_2$  (links) bzw. projizierter äußerer Nahtbreite  $B$  (rechts)

Bild 52 zeigt für die Nahthöhen  $H_1$  (Nahtüberhöhung) und  $H_2$  ein gegensätzliches Bild. Während eine kleine Nahthöhe  $H_1$  für einen guten Einbrand spricht, sind große Einbrandtiefen eher bei großen Nahthöhen  $H_2$  zu finden. Für gleiche Werte der Nahthöhe  $H_1$  ist eine Parallelverschiebung zu geringerem Einbrand bei zunehmendem Spalt zu beobachten.

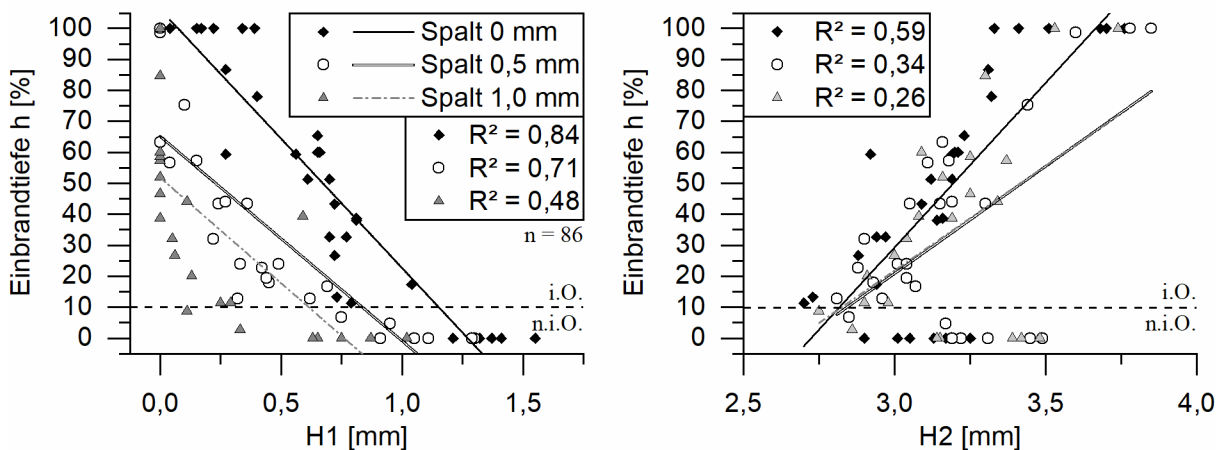


Bild 52: S420MC|KLB|M21 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe  $h$  und Nahthöhe  $H_1$  (links) bzw. Nahthöhe  $H_2$  (rechts)

### 22MnB5+AS150|CMT|C1

Der Verlauf der Regressionsgeraden in Bild 53 und Bild 54 weist jeweils in Abhängigkeit vom Spalt einen veränderten Anstieg und Nulldurchgang auf. Am deutlichsten ist die Veränderung für die Nahthöhe  $H_1$  in Bild 54 links. Hier weisen die Spalt-Klassen die geringste Vermischung auf. Aus Applikationssicht ist der Spalt ein praktikables Werkzeug, da er bei Kenntnis der Blechdicke an der fertigen Schweißnaht nachträglich bestimmt werden kann. Der Vergleich der Bestimmtheitsmaße der untersuchten Korrelationen zeigt eine verschieden stark ausgeprägte Spaltabhängigkeit. Bei Nullspalt ist die Korrelation zwischen Messgröße und Einbrandtiefe am stärksten. Die geringste Spaltempfindlichkeit und gleichzeitig das höchste Bestimmtheitsmaß weist die Nahtüberhöhung  $H_1$  auf. Einen fast ebenso hohen Informationsgehalt trägt die äußere Nahthöhe  $H_2$ . Die äußere Nahtbreite  $B$  liefert nur für den Nullspalt Informationen bezüglich der Einbrandtiefe und ist im Wesentlichen vom Spalt abhängig, was sich mit der Untersuchung einer anderen Schweißprozessvariante [56] deckt. Da für 0,5 mm und 1,0 mm Spalt keine

nutzbare Korrelation festgestellt werden kann, wird diese Messgröße für die weiteren Auswertungen dieser Werkstoff-Prozess-Konstellation nicht berücksichtigt. Die Bestimmtheitsmaße der Korrelationen in Bild 53 und Bild 54, verdeutlicht durch die Streuungen der Datenpunkte, besitzen einzeln betrachtet keine ausreichende Güte, um die Messgrößen für die Vorhersage der Einbrandtiefe nutzen zu können. Darum ist es erforderlich, die brauchbaren Messgrößen zusammenzufassen, um auf diese Weise die Korrelation mit der Einbrandtiefe zu verbessern.

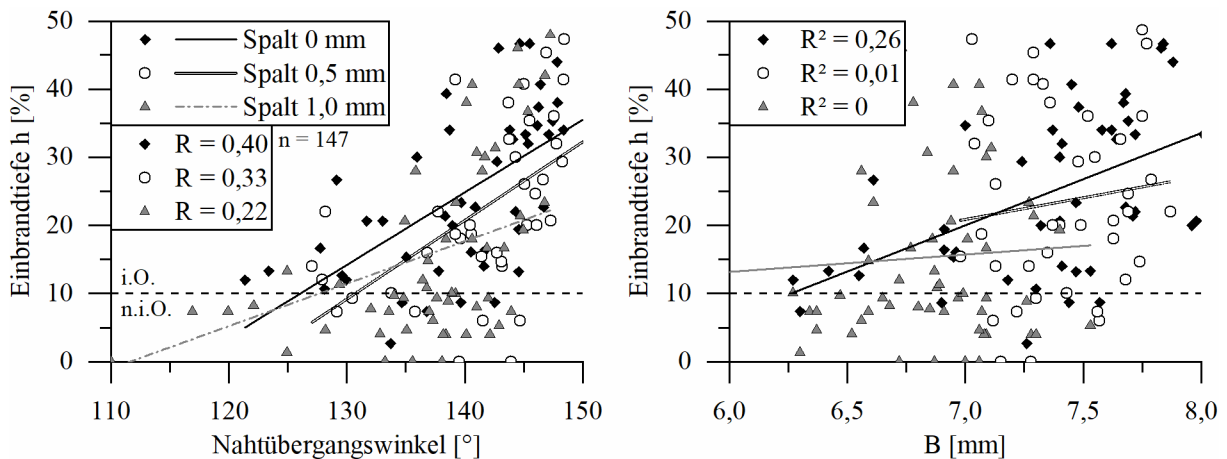


Bild 53: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe  $h$  und Nahtübergangswinkel  $a_2$  (links) bzw. projizierter äußerer Nahtbreite  $B$  (rechts)

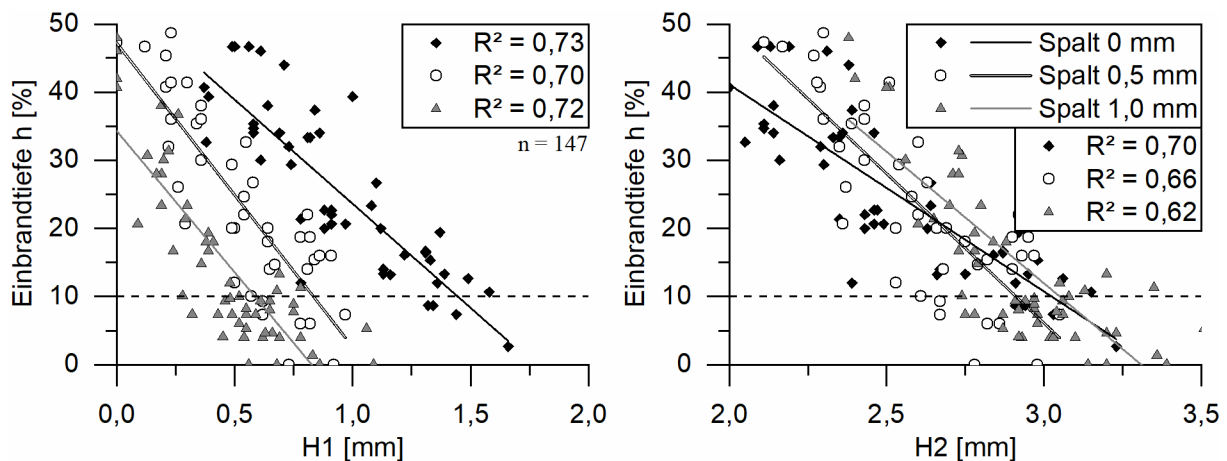


Bild 54: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe  $h$  und Nahthöhe  $H_1$  (links) bzw. Nahthöhe  $H_2$  (rechts)

### HX340LAD+Z140|CMT|C1

Die Nahtbreite der Schweißnähte am verzinkten Stahl ist nicht als Informationsquelle geeignet, was Bild 55 rechts zeigt. Der Nahtübergangswinkel hat mehr Potential. Jedoch variiert das Bestimmtheitsmaß stark mit dem Spalt.

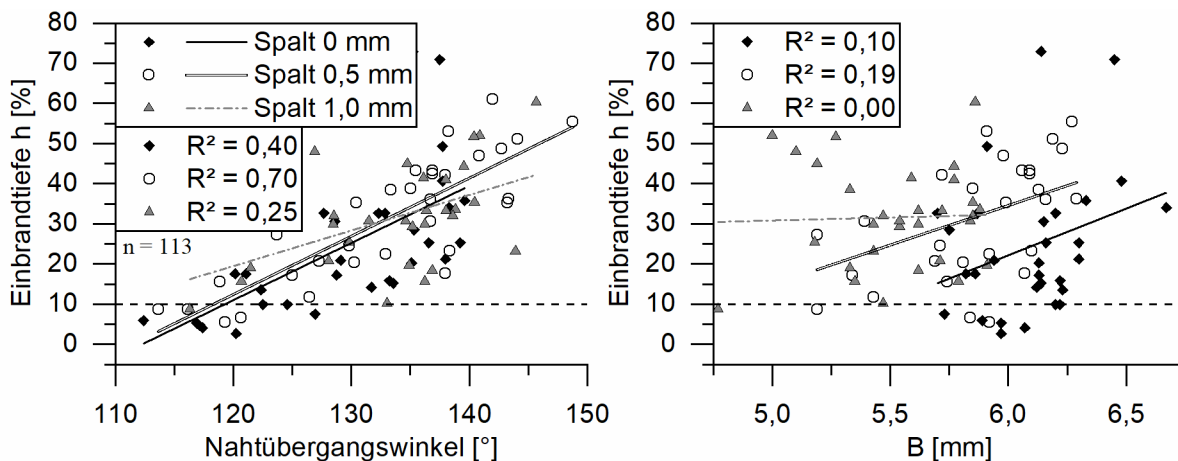


Bild 55: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe  $h$  und Nahtübergangswinkel  $\alpha_2$  (links) bzw. projizierter äußerer Nahtbreite  $B$  (rechts)

Bild 56 stellt die Korrelationen zwischen Einbrandtiefe und den Größen  $H_1$  und  $H_2$  dar, die einen guten Informationsgehalt zeigen. Störend wirkt hier eine größere Anzahl von Proben mit  $H_1 = 0$  mm, die jedoch verschiedene Einbrandtiefen aufweisen. An dieser Stelle kann die Veränderung der Einbrandtiefe nicht mit Hilfe der äußeren Messgröße beschrieben werden, sodass die Aussagekraft für die gesamte Datenmenge reduziert wird.

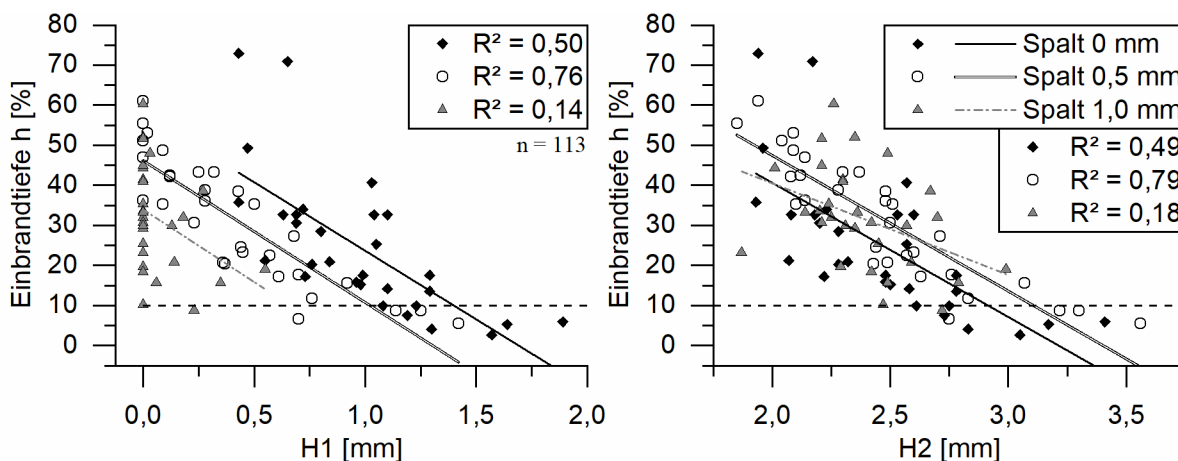


Bild 56: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Korrelation zwischen Einbrandtiefe  $h$  und Nahhöhe  $H_1$  (links) bzw. Nahhöhe  $H_2$  (rechts)

### 5.5.2 Informationsgehalt der Temperatur-basierten Messgrößen

Aus den Temperaturdaten konnten für den Werkstoff S420MC geschweißt mit dem CMT-Prozess unter  $\text{CO}_2$  Informationen gewonnen werden. Wie in Bild 49 skizziert kann aus einem Temperatur-Profil der Isotherme Symmetrie-Quotient gewonnen werden, der die Schiefe des Temperaturfeldes beschreibt. Bild 57 stellt die erhobenen Daten dar. Die senkrechte Strich-Punkt-Linie kennzeichnet die Lage eines symmetrischen Temperaturprofils. Werte kleiner als 1 beschreiben einen stärkeren Temperaturabfall zum Unterblech hin. Eine schlechte Wärmeableitung ins Unterblech verursacht einen Wärmestau gefolgt von einem hohen Temperaturgradienten, der sich in ISQ-Werten um 0,6 niederschlägt. Bei großen Einbrandtiefen hingegen findet eine eher gleichmäßige Temperaturverteilung statt.

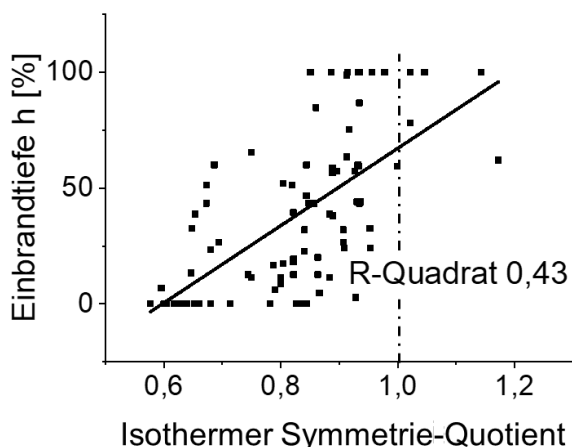


Bild 57: S420MC|KLB|M21 – Korrelation zwischen isothermem Symmetrie-Quotient und Einbrandtiefe

### 5.5.3 Modellentwicklung

Für die Entwicklung der Modelle zur Prognose der Einbrandtiefe werden eine Reihe von Festlegungen getroffen.

Der zulässige Spalt zwischen Ober- und Unterblech wird auf 1,25 mm begrenzt. Für größere Spalte zeigt keine der untersuchten Werkstoff-Prozess-Kombinationen eine ausreichend große Versatz-Toleranz, sodass eine Qualitätsvorhersage nicht sinnvoll ist. Die Interpretation der Korrelationen in Bild 51 bis Bild 56 lässt die Annahme zu, dass Modelle in Abhängigkeit des Spaltes einen Mehrwert bieten könnten. Um die Auswirkung der Spalt-Berücksichtigung quantifizieren zu können, bleibt der Spalt im ersten Schritt unberücksichtigt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  muss in mindestens zwei Spalt-Klassen den Wert 0,25 überschreiten, um die Messgrößen für das Modell zu berücksichtigen. Nach diesen Kriterien kommt die Auswahlmatrix für Messgrößen in Tabelle 11 zustande.

Unter den untersuchten geometrischen Messgrößen konnten für 22MnB5+AS150|CMT|C1 der Nahtübergangswinkel  $\alpha_2$  sowie die Nahthöhen H1 und H2 als Informationsträger identifiziert werden. Die projizierte Nahtbreite B hat nur für Null-Spalt einen eingeschränkten Informationsgehalt und wurde darum nicht für die Modellentwicklung berücksichtigt.

Tabelle 11: Auswahlmatrix von Messgrößen für Einbrand-Prognose

	Nahtübergangswinkel	H1	H2	B	ISQ
S420MC KLB M21	ja	ja	ja	ja	ja
22MnB5+AS150 CMT C1	ja	ja	ja	nein	nein
HX340LAD+Z140 CMT C1	ja	ja	ja	nein	nein



### 5.5.4 Modell-Typen

Ausgangsbasis ist jeweils das lineare Modell ohne Interaktion. Als Summenformel ausgedrückt hat es die folgende Struktur mit den Messgrößen  $x_i$ , deren zugehöriger Koeffizienten  $b_i$  und der Konstanten  $c$ .

$$h_p = \sum x_i \cdot b_i + c \quad (1)$$

Wird die Annahme getroffen, der Zusammenhang zwischen Messgrößen und Einbrandtiefe sei quadratischer Natur, so kommt ein weiterer Term hinzu.

$$h_p = \sum x_j^2 \cdot b_j + x_i \cdot b_i + c \quad (2)$$

Anstelle des quadratischen Modells kann untersucht werden, wie sich der gemeinsame Einfluss zweier Messgrößen  $x_i$  und  $x_j$  auf die Einbrandtiefe auswirkt.

$$h_p = \sum x_i \cdot b_i + x_i \cdot x_j \cdot b_k + c \quad (3)$$

Schließlich können die Interaktion zweier Messgrößen  $x_i$  und  $x_j$  auf die Einbrandtiefe sowie die lineare und quadratische Korrelation in einer Formel vereinigt werden.

$$h_p = \sum x_j^2 \cdot b_j + x_i \cdot b_i + x_i \cdot x_j \cdot b_k + c \quad (4)$$

### 5.5.5 Spalt-unabhängige Modelle

Die folgenden Grafiken in Bild 58 bis Bild 69 stellen der ersten Stufe der Modellentwicklung die Schritte zur Weiterentwicklung durch Modellerweiterung gegenüber. Dargestellt sind jeweils die Grafiken für die Formeln 1 bis 4 von links nach rechts und oben nach unten. Vergleichsgröße für die Modellqualität ist die Einbrandgrenze des Auftretens von Fehlalarmen  $h(\text{PoFA}=0)$ . Je kleiner dieser Wert ist, desto geringer ist die Modellunschärfe.

Für alle drei Werkstoff-Prozess-Kombinationen kann keine gemeinsame Aussage getroffen werden, welcher Modelltyp am besten geeignet ist. Während für den S420 Formel 2 die besten Ergebnisse liefert, werden die anderen beiden Fälle durch Formel 4 am besten beschrieben. Der Vergleich der Werkstoffe 22MnB5+AS150 und HX340LAD+Z140 zeigt spezifische Verhalten. Ersterer Fall weist die größten Streuungen auf während am verzinkten Stahl eine flachere Neigung der Regressionsgeraden zu beobachten ist. Der KLB-geschweißte S420MC zeigt die geringste Streuung kombiniert mit dem steilsten Anstieg, sodass sich hier die mit Abstand geringste Modellunschärfe ergibt.

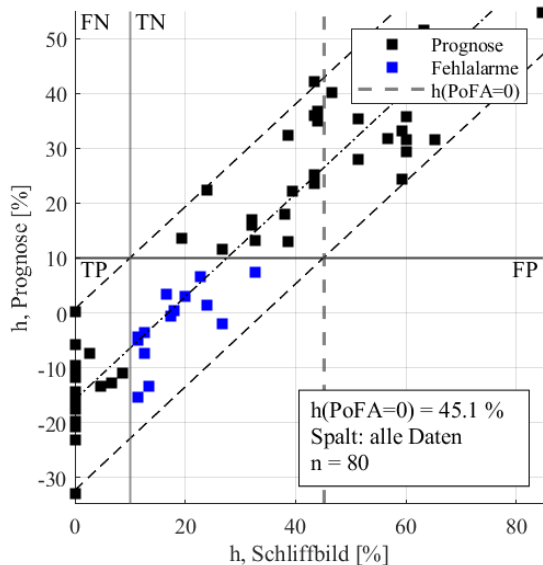


Bild 58: S420MC|KLB|M21 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell

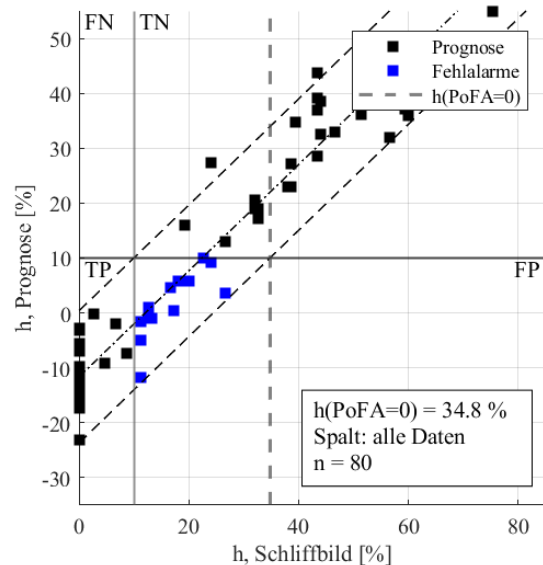


Bild 59: S420MC|KLB|M21 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell

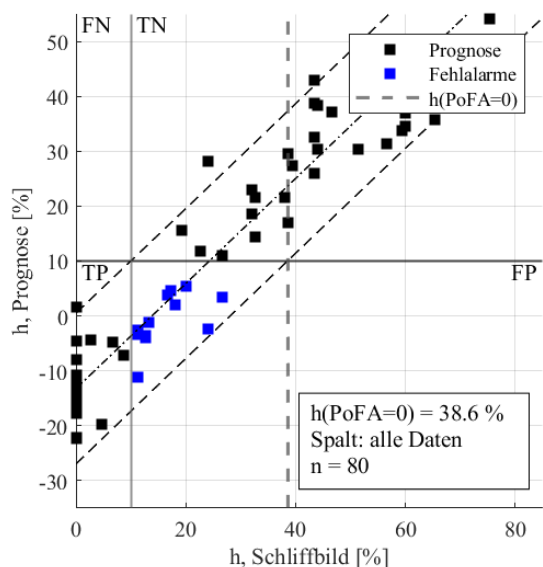


Bild 60: S420MC|KLB|M21 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell mit Interaktionen

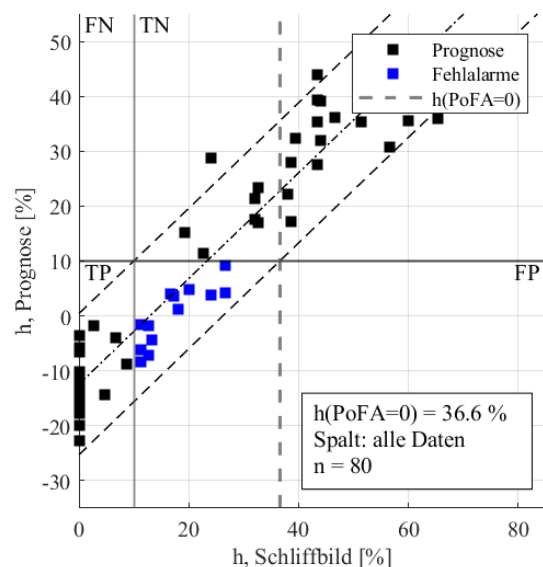


Bild 61: S420MC|KLB|M21 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell mit Interaktionen

Aus Bild 58 bis Bild 61 ergibt sich für den KLB-geschweißten S420MC die bestmögliche Einbrandprognose unter Anwendung des quadratischen Modells nach Formel 2. Durch Einsetzen der spezifischen Koeffizienten lautet die resultierende Formel:

$$h_p = 0,02 \alpha_2^2 - 2,4 \alpha_2 - 13,0 H1^2 + 13,2 H1 - 6,8 H2^2 + 88,8 H2 + 8,4 B^2 - 77,8 B + 138,1 ISQ^2 - 220,5 ISQ + 96,6 \quad (5)$$

Die Formel gilt für den untersuchten Anwendungsfall und für alle Spalthöhen von 0 mm bis 1,25 mm. Alle n.i.O.-Schweißnähte werden erkannt. Ab einer Einbrandtiefe von 34,8 % treten keine Fehlalarme mehr auf.

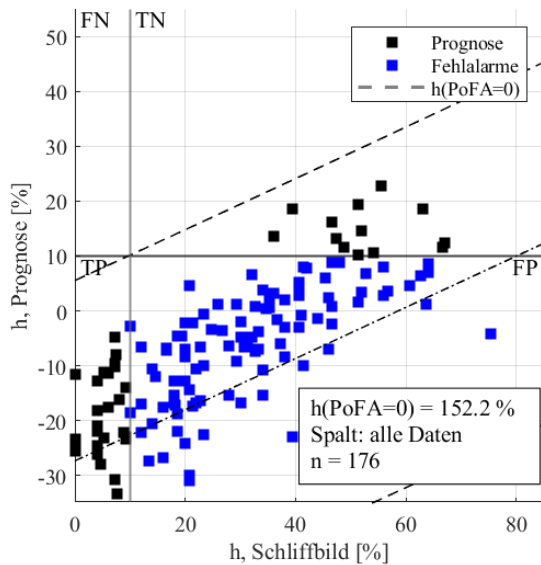


Bild 62: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell

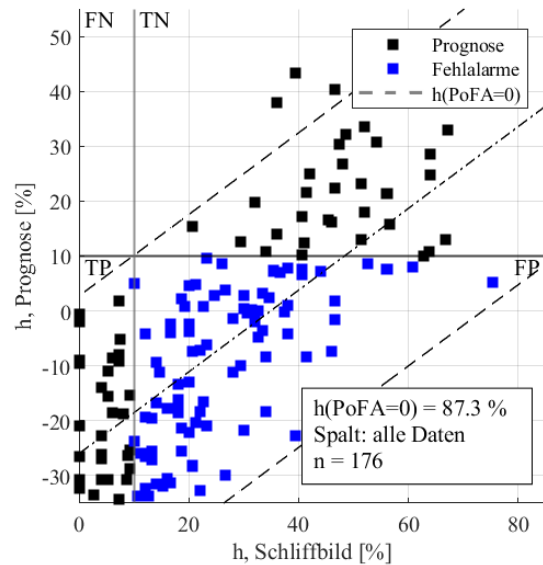


Bild 63: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell

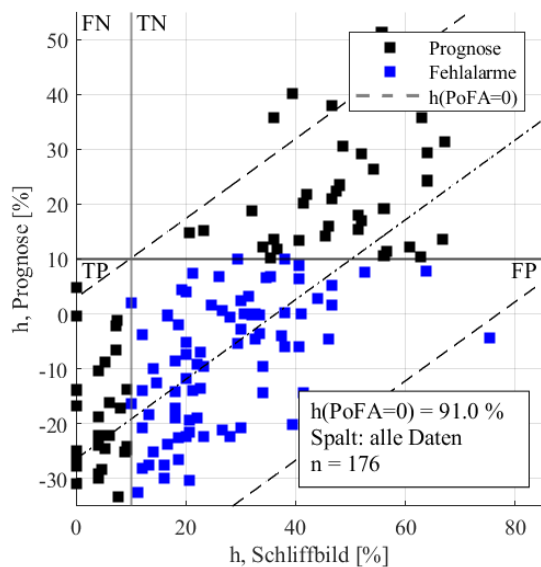


Bild 64: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell mit Interaktion

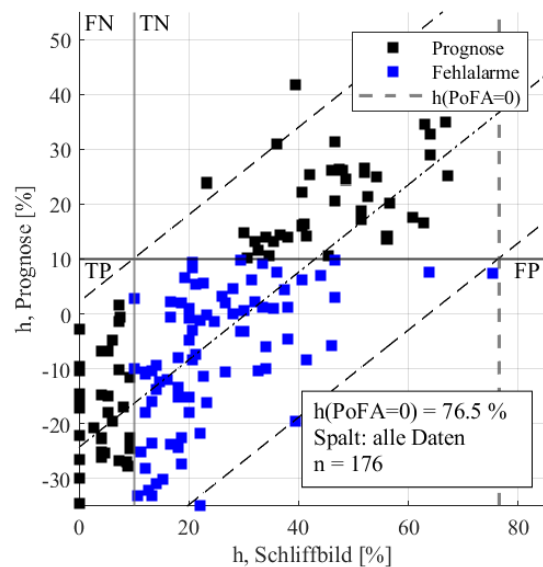


Bild 65: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell mit Interaktionen

Für die Untersuchungen am 22MnB5+AS150 bietet Formel 4 die beste Vorhersage, wie Bild 65 zeigt. Durch Einsetzen der spezifischen Koeffizienten lautet die resultierende Formel:

$$h_p = 0,26 \alpha_2^2 - 87,5 \alpha_2 + 1,16 \alpha_2 \cdot H_1 + 6,37 \alpha_2 \cdot H_2 + 73,3 H_1^2 - 76,1 H_1 - 74,3 H_1 \cdot H_2 + 86,9 H_2^2 - 1320,3 H_2 + 7796,8 \quad (6)$$

Die Formel gilt für den untersuchten Anwendungsfall und für alle Spalthöhen von 0 mm bis 1,25 mm. Alle n.i.O.-Schweißnähte werden erkannt. Ab einer Einbrandtiefe von 76,5 % treten keine Fehlalarme mehr auf.

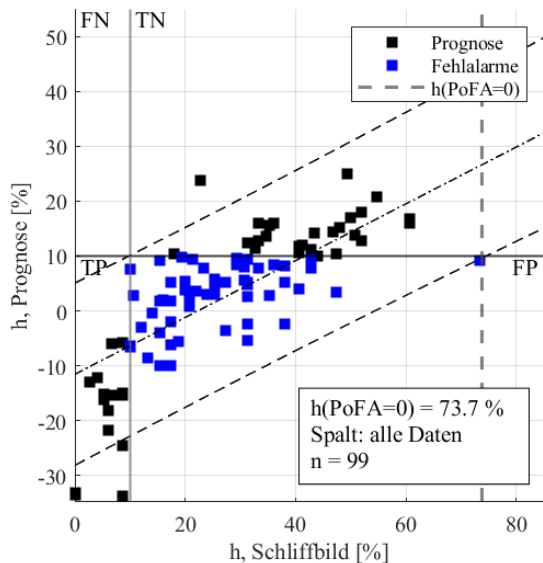


Bild 66: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell

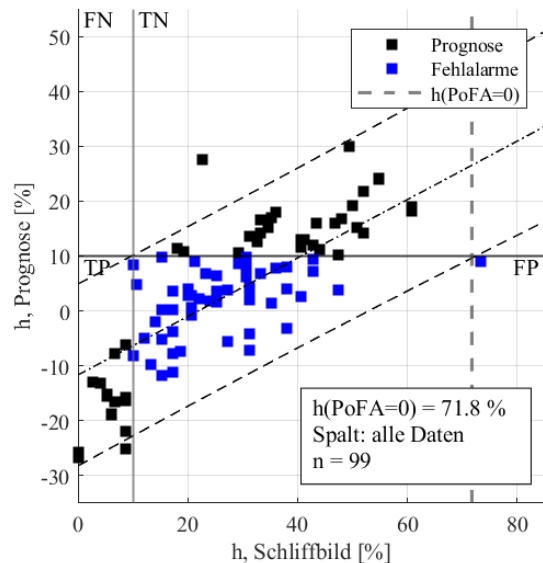


Bild 67: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell

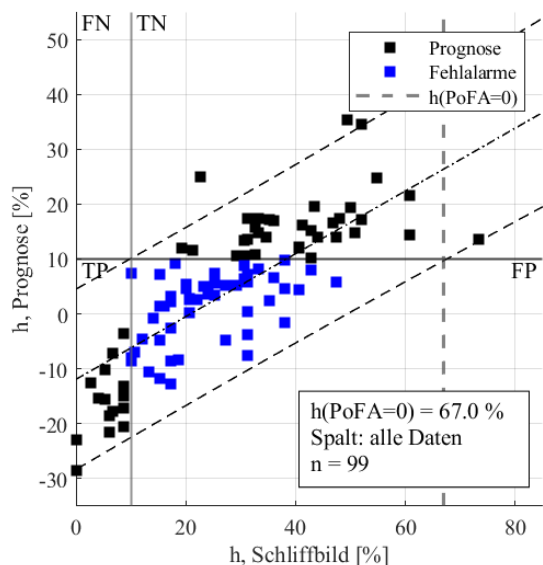


Bild 68: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, lineares Modell mit Interaktion

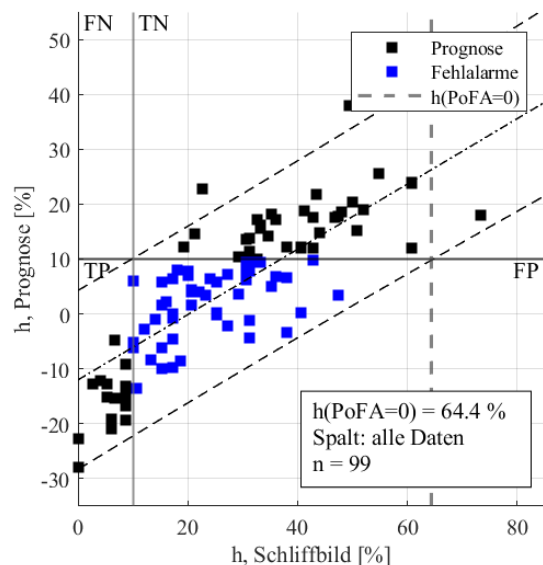


Bild 69: HX340LAD+Z140|CMT|C1 – Einbrandtiefe  $h$  gemessen im Schliffbild und durch Modell prognostiziert, quadratisches Modell mit Interaktionen

Für die Untersuchungen am HX340LAD+Z140 bietet ebenfalls Formel 4 die beste Vorhersage, wie Bild 69 zeigt. Durch Einsetzen der spezifischen Koeffizienten lautet die resultierende Formel:

$$h_p = -0,03 \alpha_2^2 + 9,15 \alpha_2 + 0,01 \alpha_2 \cdot H1 - 0,57 \alpha_2 \cdot H2 - 10,6 H1^2 - 56,0 H1 + 24,5 H1 \cdot H2 - 6,7 H2^2 + 75,8 H2 - 643,7 \quad (7)$$

Die Formel gilt für den untersuchten Anwendungsfall und für alle Spalthöhen von 0 mm bis 1,25 mm. Alle n.i.O.-Schweißnähte werden erkannt. Ab einer Einbrandtiefe von 64,4 % treten keine Fehlalarme mehr auf.

## 5.5.6 Anpassung der Algorithmen

### Spalt-spezifische Teilmodelle

Eine mögliche Maßnahme zur Verbesserung der Modelle zur Vorhersage der Einbrandtiefe ist das Klassieren der Daten nach der Spalthöhe. Die nachweisbare Spaltabhängigkeit der untersuchten Korrelationen hat zur Folge, dass das Spalt-unabhängige Prognosemodell der Einbrandtiefe eine stärkere Unschärfe aufweist, als die Modelle unter Berücksichtigung des Spaltes, wie der Vergleich zwischen Bild 65 und Bild 70 verdeutlicht. Die geringste Unschärfe zur Prognose der Einbrandtiefe mit 47,8 % wurde für die Spalt-Klasse von 0,5 mm erreicht.

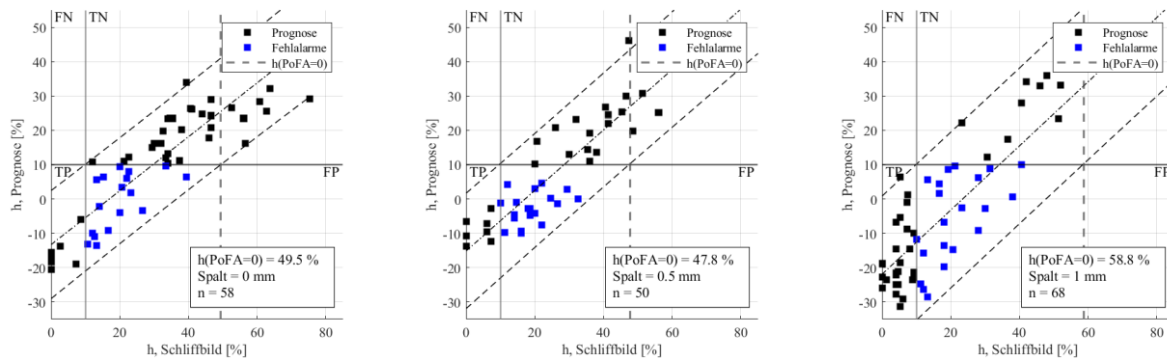


Bild 70: 22MnB5+AS150|CMT|C1 – Spalt-spezifische Einbrandmodelle

Mit der gleichen Maßnahme wurde für die Werkstoff-Prozess-Kombination S420MC, KLB, M21 ebenfalls eine Verbesserung des Modells erzielt, für HX340LAD+Z140, CMT, C1 jedoch nicht. Die Verbesserung der Einbrandvorhersage durch spaltabhängiges Klassieren der Daten ist somit nicht allgemeingültig anwendbar.

### Fokussierung der Regressionsrechnung

Mit einer Fokussierung der Regressionsrechnung auf eine Teilmenge der Daten bezogen auf die Einbrandtiefe konnte keine Verbesserung der Modellqualität erzielt werden. Gegenüber allen Daten wurden in diesem Fall nur Einbrandtiefen von 0 % bis 25 % bzw. von 0 % bis 50 % für die Regressionsrechnung berücksichtigt. Bei dieser Bewertung ist zu berücksichtigen, dass bei einer Regression basierend auf allen Daten die Menge der Stützpunkte größer ist, was die Berechnung stabilisiert und den Einfluss einzelner Datenpunkte reduziert.

## 5.6 Ergänzende Forschungsergebnisse außerhalb der Arbeitspakete

Auf der Basis der vorhandenen Daten wurde die Frage adressiert, ob sich das Auftreten geschlossener Poren auf die Ausbildung des Temperaturfeldes so auswirkt, dass lokale Veränderungen der Oberflächentemperatur messbar sind. Zur Überprüfung der Frage konnten geeignete Daten identifiziert werden.

Beim Trennen einer Probe ohne vorherige Durchstrahlungsprüfung wurde zufällig eine oberflächennahe Pore angeschliffen. Bild 71 zeigt die zugehörige Draufsicht der Probe mit dem schematischen Verlauf der ursprünglichen Blechkante vor dem Schweißen. Im Bereich der Pore betrug der Kantenversatz 3,0 mm bei einem Spalt von 1,0 mm. Damit liegt das Schliffbild außerhalb des nutzbaren Prozessfensters bei 0 % i.O. Das Thermogramm enthält ebenfalls die Positionsmarkierung des Schliffbildes. An der Schliffposition weist das Temperaturfeld eine Anomalie in Form einer kalten Stelle auf. Die dunkelgrün dargestellte Zone mit einer Temperatur um 1150 °C zeigt hier eine vergrößerte Ausdehnung.

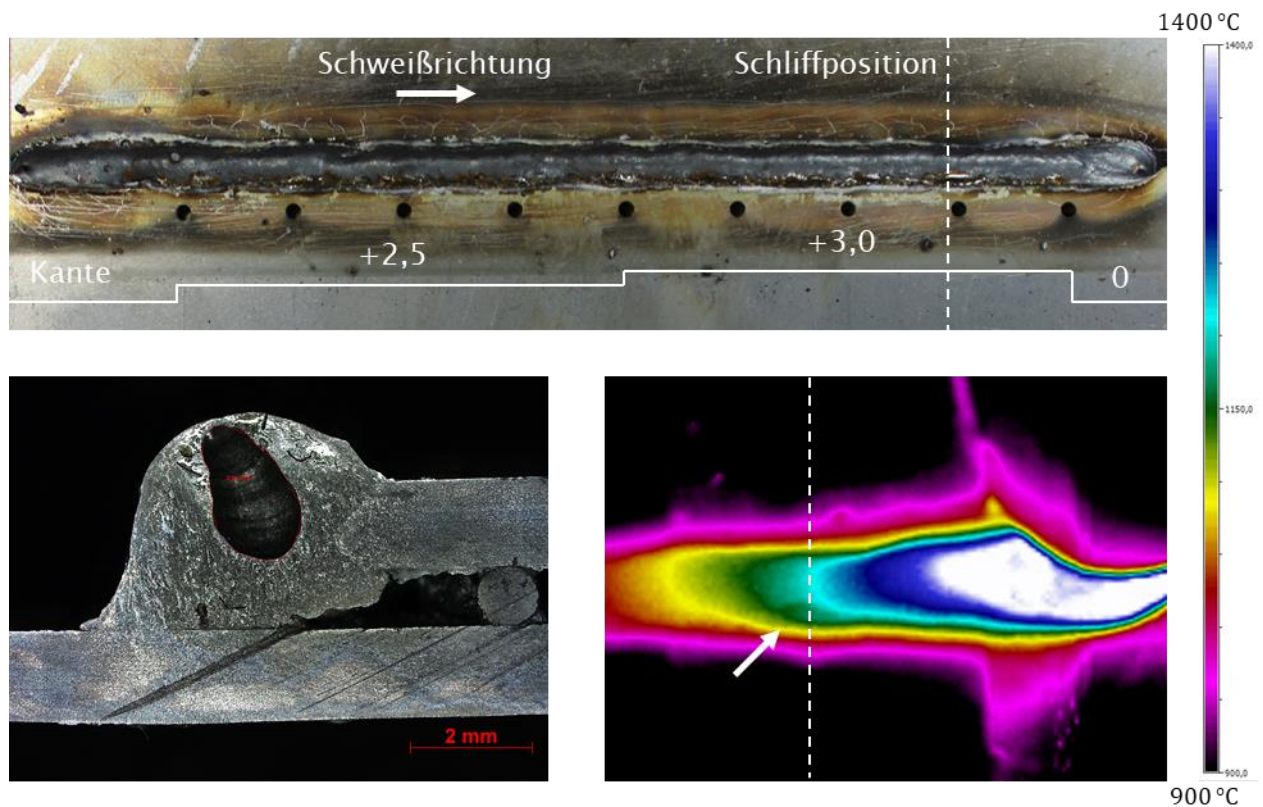


Bild 71: Poren-Einfluss auf das Temperaturfeld – HX340LAD+Z140[CMT]C1

Bei der Durchstrahlungsprüfung an einer verzinkten Probe wurden zwei Schlauchporen erkannt. Im Bereich der Poren befinden sich auch große Silikat-Inseln, wie in Bild 72 links deutlich zu erkennen ist. Im Fall dieser Probe verursachen die Silikate Anomalien im Temperaturfeld, die in ihrem Ausmaß die durch Poren hervorgerufenen Anomalien übertreffen.

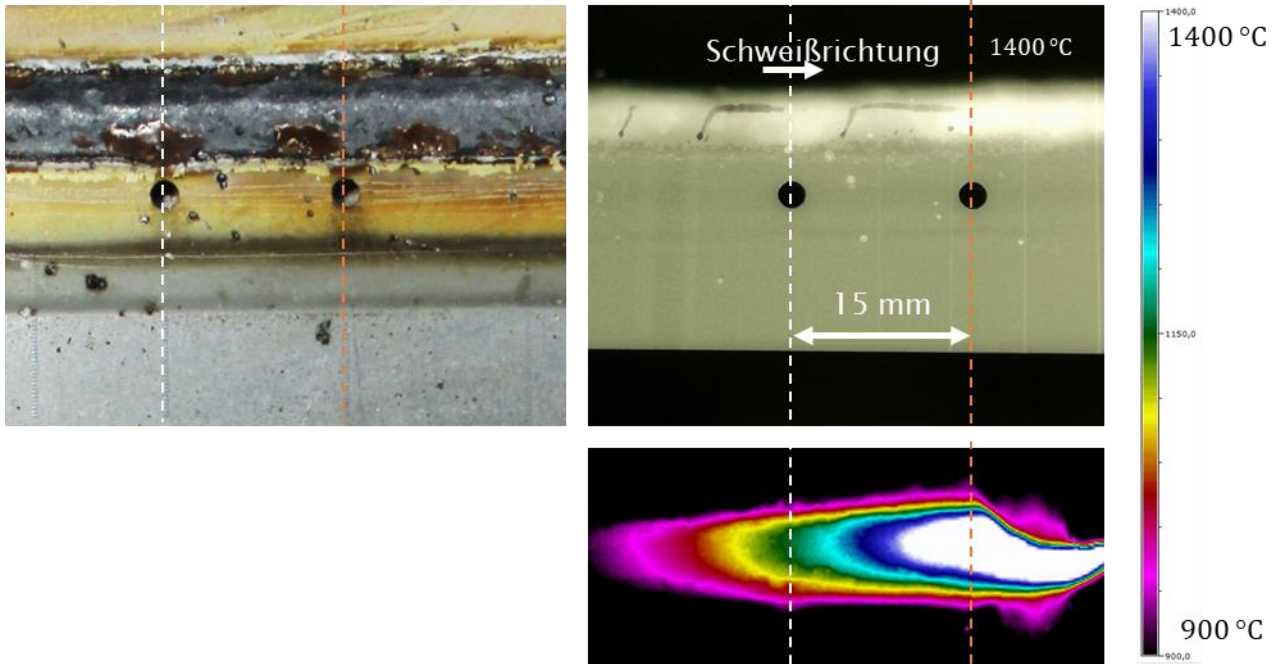


Bild 72: Durchstrahlungsprüfung – HX340LAD+Z140|CMT|C1



## 6 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen

Bei der Gestaltung des Versuchsprogramms wurde in AP 1 in Abstimmung mit dem PA die Werkstoffauswahl so getroffen, dass ein möglichst repräsentativer Teil der im Automobilbau angewendeten technischen Randbedingungen und Werkstoffe abgebildet werden. Die Auswahl von Schweißprozessvarianten und Schutzgasen wurde auf die jeweiligen Werkstoffe angepasst und stellt einen signifikanten Ausschnitt der üblichen Anwendungen dar. Der unbeschichtete Stahl S420 wird mit unregelmäßigem Kurzlichtbogen und Mischgas M21 (18 % CO<sub>2</sub>) verschweißt während für die Stähle mit metallischen Überzügen, also 22MnB5 +AS150 und HX340LAD +Z140, der geregelte Prozess Cold Metal Transfer (CMT) in Kombination mit CO<sub>2</sub> als Schutzgas eingesetzt wurde. Mit dem PA wurde das Versuchsprogramm auf die wesentlichen Aspekte fokussiert und der Versuchsumfang auf einen handhabbaren Umfang begrenzt, sodass verschiedene Parameter als unveränderlich definiert wurden. Dies waren Schweißgeschwindigkeit, Stromkontaktrahabstand, Brennerausrichtung, Schutzgasmenge und Blechdicke. Hieraus resultiert eine Abweichung gegenüber dem Versuchsprogramm, welches im Antrag skizziert wurde (siehe Übersicht der Arbeitspakete in Abschnitt 4.2 ab Seite 26).

Im Versuchsaufbau in AP 2 mussten zunächst die Komponenten Schweißbrenner, Thermographiesensor und Geometriesensor konstruktiv miteinander vereinigt werden. Berücksichtigt wurden die Randbedingungen Brennerausrichtung, Neigung des Geometriesensors und Abstände des Messortes von der Wirkungszone des Schweißbrenners. Da der vom PA bereitgestellte Thermographiesensor für eine Versuchsreihe jeweils nur wenige Wochen zur Verfügung stand, musste der Versuchsaufbau nach Abschluss einer Versuchsserie teilweise demontriert werden. Als Thermographiesensor kam leihweise ein Thermoprofilscanner der Fa. HKS Prozesstechnik GmbH zum Einsatz. Als Geometriesensor wurden Lasertriangulationssensoren vom Typ ScanCONTROL der Fa. Micro Epsilon eingesetzt. Bei den Wiederholungsversuche wurde auf Vorschlag des PA leihweise ein blauer Lasersensor eingesetzt, der das Messen auf glühenden Oberflächen ermöglicht. Durch den Einsatz des blauen Lasersensors war es möglich, Temperatur und Geometrie orts- und zeitidentisch zu erfassen.

In mehreren Iterationsschritten wurde im Projekt ein Sensor-Brenner-Aufbau entwickelt, mit dem die gewünschten Signale aufgenommen werden konnten. Das vorgesehene Ziel entsprechend der Projektplanung wurde erreicht und die Temperatur und Geometriesignale zeitsynchron aufgenommen.

Für die Realisierung der prozessbeeinflussenden Bauteiltoleranzen in Form von Spalt und Kantenversatz beim Schweißen am Überlappstoß in AP 3 wurden geeignete Probengeometrien entworfen, mit der die Maßabweichungen effektiv mit einer möglichst geringen Anzahl an Proben abgebildet werden konnten. Die durchgeführten Schweißungen wiesen so die gewünschten Abweichungen und Nahtunregelmäßigkeiten auf, die zu untersuchen waren. Als Prüfverfahren zur Gewinnung der Referenzinformationen in Form der geometrischen Prozessfenster wurden die Schweißnähte neben der Sichtprüfung zerstörend geprüft und Schliffbilder angefertigt. Auf diese Weise sind drei äußerst detaillierte und vollständige Prozesslandkarten entstand, die in diesem Umfang bisher nicht realisiert wurden.

Für die untersuchten Werkstoff-Prozess-Kombinationen wurden umfangreiche Proben angefertigt, deren Umfang in Tabelle 12 zusammengefasst ist. Zu diesen Proben wurde eine vollständige Datenbasis aufgebaut, die für jede einzelne Schweißung folgende Daten enthält.



- Geometrie der Schweißnahtoberfläche
- Geometrie der Blechkante vor dem Schweißen (bei Wiederholungsversuchen)
- Temperaturfeld der abkühlenden Schweißnaht
- Verläufe von Schweißstrom, -spannung, Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit
- Fotos der Proben von Forderseite und Rückseite
- Schliffbilder mit exakter Angabe der Entnahmeposition und den jeweiligen inneren Nahtgeometrie Größen
- Sichtprüfung für alle potentiellen Entnahmepositionen der Schliffbilder

Tabelle 12: Probenumfänge

	<b>Anzahl Schweiß- proben</b>	<b>Schweißnaht- länge kumuliert</b>	<b>Anzahl der Schliffbilder</b>	<b>Sichtprüfung für Positionen</b>
<b>S420MC KLB M21</b>	166	≈ 25 m	162	1357
<b>22MnB5+AS150 CMT C1</b>	266	≈ 40 m	346	2178
<b>HX340LAD+Z140 CMT C1</b>	182	≈ 27 m	174	1580

Nach unserer Kenntnis existiert bis dato keine vergleichbare Datenbasis zur Untersuchung des Einflusses von Fertigungstoleranzen auf den Schweißprozess und die Schweißnahtqualität für das gewählte Anwendungsgebiet. Die durchgeführten Wiederholungen von Versuchen in Kombination mit der Datenmenge erlauben sogar die Angabe von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einzelner Nahtunregelmäßigkeiten in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden Toleranzen am Füge stoß. Ein zusätzlicher Informationsgewinn der aufgenommenen Prozessfenster besteht in der Aussage, welche Nahtunregelmäßigkeit bei einer Zunahme der Toleranzen zuerst eine unzulässige Ausprägung annimmt. Auf Anfrage können die gesammelten Daten zur Untersuchung weiterer Fragestellungen genutzt werden.

Die Prüfbedingungen orientieren sich an vorangegangenen Untersuchungen [53] mit ähnlicher Zielstellung. In Anlehnung an etablierte Regelwerke wurden Bewertungsgrößen für anforderungsgerechte Schweißnähte festgelegt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Methode der geometrischen Prozessfenster gut geeignet ist, um die Grenzen der Überbrückung von Spalt und Kantenversatz zu bestimmen. Mit Kenntnis dieser Grenzen konnten gezielt fehlerbehaftete Schweißproben hergestellt werden.

Bevor die ursprünglich geplante Arbeit mit Geometriekennwerten in AP 4 beginnen konnte, war eine umfangreiche Vorverarbeitung der aufgezeichneten Geometriedaten erforderlich. Hierfür wurde eine Methode entwickelt, mit der eine direkte Auswertung der generierten Messdaten hinsichtlich ihres nutzbaren Informationsgehaltes durchgeführt zu konnte. Im Falle der Geometriedaten zeigte sich, dass nicht alle aufgezeichneten Datensätze eine brauchbare Datenqualität aufwiesen, sodass eine Vorbewertung der Daten erforderlich wurde. Dabei erfolgte im ersten Schritt eine Ausreißerkennung aufgrund von Schweißspritzern. Der Aufwand für diese Methodenentwicklung war ursprünglich nicht geplant und erforderte eine deutliche Mehrarbeit in diesem AP.

Im zweiten Schritt erfolgte eine Prüfung der Daten auf Unstetigkeiten und Sprünge, die infolge von Spiegelungen oder Abschattungen auftreten können. Anschließend erfolgte eine automatisierte Suche der Schweißnaht innerhalb der Daten gefolgt von der automatisierten Berechnung der Geometrie-Kenngrößen.

Im Ergebnis des Projekts stehen Software-Module zur Auswertung der Sensordaten zur Verfügung, die ...

- das Kompensieren kleiner Datenfehler erlauben
- Daten mit nicht kompensierbaren Anomalien identifizieren und verwerfen
- die Schweißnaht innerhalb eines Geometrie-Querschnitts auffinden
- die Geometrie-Kenngrößen selbstständig berechnen

In die Detailumsetzung der AP 5 und 6 wurde das Institut für Mathematische Stochastik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg eingebunden, um die Strategie zur Realisierung mathematisch abzusichern. Der Fokus zur Entwicklung der Algorithmen wurde infolgedessen auf die Korrelationen der Einzelmesswerte mit der Einbrandtiefe gelegt, sodass nur Messgrößen Berücksichtigung finden, die eine individuelle Korrelation mit der Einbrandtiefe haben. Aufgebaut wurden verschiedene Vorhersage-Modelle, u.a. durch Klassierung der Daten und Fokussierung der Modelle. Auf diese Weise wurde die Effektivität verschiedener Strategien zur Modellbildung bewertet werden. Daneben wurde wie geplant ein Konzept zur quantitativen Bewertung von ZfP-Methoden weiterentwickelt und ein angepasstes Kriterium zum Vergleich der Güte der verschiedenen Modelle geschaffen.

Die Untersuchung der Robustheit gegenüber Veränderungen der Randbedingungen in AP 7 erfolgte durch modifizierte Probengeometrien, die in Abschnitt 4.5 dargestellt sind. Die verschiedenen konstruktiven Details erlauben u.a. die Beobachtung der Unterschiede zwischen einem sprunghaften Auftreten von Toleranzen und einer allmählich zunehmenden Abweichung des Prozesses von der Idealsituation. Diese erneute Versuchsreihe wurde zusätzlich in das AP aufgenommen.

Unter Berücksichtigung einzelner Modifikationen der Arbeitsinhalte kann eine Übereinstimmung der definierten Zielsetzungen vor Projektbeginn mit den erzielten Ergebnissen des Forschungsprojektes bestätigt werden.

## **7 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen**

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag.

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungsstelle erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes. Abweichend davon wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter über 24,5 MM finanziert. Die Finanzierung des Technikers und der wissenschaftlichen Hilfskraft erfolgten planmäßig.

Der ursprüngliche Projektplan war so ausgerichtet, dass die erforderlichen Sensoren über einen längeren Zeitraum durch den PA zur Verfügung gestellt werden. Davon abweichend erfolgte die Bereitstellung der Sensoren durch den PA nur für kurze Zeiträume von wenigen Wochen.

Die Beprobung der Schweißnähte (siehe Tabelle 12) war mit einem erheblichen Arbeitsaufwand verbunden. Ohne Techniker und Hiwi wäre das Projekt im realisierten Umfang nicht durchführbar gewesen.

Im AP 7 wurde das Teilziel zur Überprüfung der Robustheit angepasst, um den Versuchsaufwand auf ein praktikables Maß zu begrenzen.

Einem Antrag auf kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 5 Monate wurde stattgegeben. Die Verlängerung war erforderlich, um die Verzögerung zu Projektbeginn auszugleichen. Sie kam durch die sehr kurzfristige Bekanntgabe der Projektanfinanzierung und die danach erforderliche Stellenausschreibung zustande.

Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) erbracht. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag. Alle durchgeführten Arbeiten erfolgten zielgerichtet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die Auswahl und Koordinierung sowie zur Bearbeitung der durchzuführenden Aufgaben notwendig und vom Zeitumfang her angemessen.

Der Erwerb eines gewerblichen Schutzrechtes wurde zur Prüfung an das Transfer- und Gründerzentrum der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg durch übergeben.

## **8 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittelständige Unternehmen**

### **8.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen**

Das Forschungsvorhaben liefert folgende wissenschaftlich-technische Ergebnisse für die zerstörungsfreie Qualitätsbewertung von MSG-Schweißverbindungen von Stahlblech durch Nutzung geometrischer und thermographischer Kenngrößen:

- Einfluss von Spalt- und Versatz bei Überlappnähten auf die Verbindungseigenschaften und Ableitung von Verarbeitungs- und Konstruktionsvorgaben
- Einfließen der Prozessfenster in die Methodik zur Bewertung der Prozessfähigkeit von MSG-Schweißprozessen unter Einfluss von Fertigungstoleranzen
- Charakterisierung und Beschreibung der kritischen Kenngrößen für die Qualität von Schweißnähten hergestellt mit MSG-Lichtbogenvarianten
- Aussagen über die Nutzbarkeit der Daten aus Oberflächengeometrie und Temperaturfeld für die Vorhersage der Einbrandtiefe
- Definieren geometrischer und thermographischer Nahtgrößen, die eine zerstörungsfreie Nahtprüfungen erlauben
- Übertragung der Ergebnisse in Normen- und Merkblätter, z.B. SEP 1220-5

### **8.2 Wirtschaftlicher Nutzen**

Das Forschungsvorhaben liefert folgende wirtschaftlich nutzbare Ergebnisse für die sichere zerstörungsfreie Qualitätsbewertung von MSG-Schweißverbindungen:

- Definition von Anforderungen an Sensoren zum Einsatz während des Schweißens in Abhängigkeit von Werkstoff und Schweißprozess
- Optimale Prozessrandbedingungen z.B. Brennerausrichtung zur Vermeidung von Ausschuss und Nacharbeit an geschweißten Baugruppen im gewählten Anwendungsbereich
- Grundlagen zum Aufbau eines Qualitätssicherungssystems zum zerstörungsfreien Nachweis von inneren Nahtgeometriegrößen und Unregelmäßigkeiten
- Steigerung der Kosteneffizienz durch Fokussierung und somit Vermeidung von Prüftätigkeiten
- Erhöhung der Produktivität durch Reduzierung der Durchlaufzeit

## **9 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen**

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden bereits durch folgende Beiträge veröffentlicht:

Schlosser, B.; Lehmann, T.; Jüttner, S.: Herausforderungen der Online-Erfassung und Verarbeitung der Daten von Schweißnahtgeometrie und Temperaturfeld beim MSG-Schweißen. DVS Congress 2018, Düsseldorf, 2018.

Schlosser, B.; Jüttner, S.: Qualitätsüberwachung beim MAG-Schweißen mit Geometrie- und Temperatur-Sensoren. In: Zinke, M. (Hrsg.), Schweißtechnische Fachtagung. Verlag Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, [1. Auflage], 2019.

Schlosser, B.; Jüttner, S.: Geometriebasierte zerstörungsfreie Vorhersage der Qualität von MSG-Schweißnähten. 14. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2019 - Magdeburger Ingenieurtag: 24. und 25. September 2019: Tagungsband. Otto von Guericke University Library, Magdeburg, Germany, Magdeburg, 2019.

Vortrag beim 40. Assistentenseminar Fügetechnik vom 25.-27.09.2019 in Braunlage.  
Zugehörige Veröffentlichung erfolgt 2020

## 10 Transfermaßnahmen

### 10.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>A:</b> Informationen an die Unternehmen des PA	Fachliche Betreuung, Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU); gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	1. PA: 03.05.2017 2. PA: 16.11.2017 3. PA: 15.05.2018 4. PA: 20.11.2018 5. PA: 15.05.2019
<b>B:</b> Bereitstellung von Informationen über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen und Landesforschungsdatenbank Sachsen-Anhalt	Informationen über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während und nach der Projektlaufzeit
<b>C:</b> 5 Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses 2 Zwischenberichte 4 Präsentationen vor dem FA	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	PA: siehe Maßnahme A  1. ZB für 2017 2. ZB für 2018  • 1. FA: 18.10.2017 (FA 3) • 2. FA: 13.03.2018 (FA 3) • 3. FA: 10.10.2018 (FA 3) • 4. FA: 13.03.2019 (FA 3)
<b>D:</b> Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungsstelle oder bei den Unternehmen sowie Ansprache von interessierten Firmen im Mitglieder-Netzwerk des DVS durch den DVS-Newsticker	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
<b>E:</b> Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	GST - Große Schweißtechnische Tagung 2018 Industrieinformationsveranstaltung 2018 Schweißtechnische Fachtagung Magdeburg 2019 14. Magdeburger Maschinenbautage 2019 40. Assistentenseminar Fügetechnik 2019

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Zeitraum</b>
<b>F:</b> Beratung von Technologieanwendern	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
<b>G:</b> Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Projekt-/ Bachelor-/Masterarbeiten	Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium)	Für die Lehre und Weiterbildung ab 10/2018 Fortlaufend während der Projektlaufzeit

## 10.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Zeitraum</b>
<b>B:</b> Bereitstellung von Informationen über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen und Landesforschungsdatenbank Sachsen-Anhalt	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend
<b>D:</b> Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungsstelle oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend auf Anfrage
<b>F:</b> Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	
<b>G:</b> Vorstellung der Ergebnisse auf Weiterbildungsveranstaltungen des DVS-Betriebsverbandes Magdeburg für regionale KMU, Projektpräsentation auf regionalen Messen und techn. Ausstellungen	Transfer der Ergebnisse an die persönlichen und industriellen Mitglieder des DVS	Fortlaufend auf Anfrage
<b>H:</b> Beratung von Anlagenherstellern und Technologieanwendern	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend auf Anfrage
<b>I:</b> Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Projekt-/ Bachelor-/Masterarbeiten	Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium)	Fortlaufend für die Lehre und Weiterbildung

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Zeitraum</b>
<b>J:</b> Wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften	Information von potenziellen Anwendern, vor allem KMU, national	Schweißen und Schneiden 2020
<b>K:</b> Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes, Weitergabe an alle Mitglieder des PA und alle interessierten Mitglieder des DVS-Netzwerkes sowie Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	4. Quartal 2019
<b>L:</b> Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	2021

### **10.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts**

Das bei Antragstellung vorgeschlagenen Transferkonzept stimmt mit dem aktualisierten Transferkonzept weitestgehend überein. Diese Übereinstimmung wurde ausführlich in Kap. 10.1 aufgezeigt. Neben einer Vielzahl von Vorträgen und zugehörigen Veröffentlichungen in Tagungsbänden, wurden fünf Sitzungen mit dem projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt. Die hohen Teilnehmerzahlen der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses bestätigten das Interesse an den Forschungsergebnissen und verdeutlichen gleichzeitig die richtige Wahl des verwendeten Transferkonzepts. Ein weiteres Transferkonzept beinhaltet den Einbezug der forschungstechnischen Ergebniserzeugung in Form von studentischen Abschlussarbeiten wie Master- und Bachelorarbeiten und der am Projektende zu erstellende obligatorische Abschlussbericht.



## 11 Literatur

- [1] Meyer, R.: Erhöhung der Prozesssicherheit durch Beherrschung der Bauteilabweichung beim Fügen im Karosseriebau, Dresden, Techn. Univ., Diss.--Dresden, 2011.
- [2] Walther, M.: Sensoren in der Fügetechnik: Einsatzmöglichkeiten und Entwicklungspotentiale. 30. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik, S. 97–102.
- [3] Xiao, Y. H.; Den Ouden, G.: A Study of GTA Weld Pool Oscillation. *Welding Journal*, 69 (08), 1990, S. 289.
- [4] Xiao, Y. H.; Den Ouden, G.: Weld pool oscillation during GTA welding of mild steel. *Welding Journal*, 72 (8), 1993, S. 428.
- [5] Chen, W.H.; Chin, B.A.: Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques. *Welding Journal*, 69 , 1990, S. 181–85.
- [6] Zhang, Y. (Hrsg.): *Real-time weld process monitoring*, Cambridge, England, Boca Raton, 2008.
- [7] Fihey, J. L.; Cielo, P.; Begin, G.: *On Line Weld Penetration Measurement Using An Infrared Sensor. Welding in energy-related projects*. Pergamon Press, Toronto, New York, 1984, S. 177–88.
- [8] Müller-Borhanian, J.; Halschka, M.: Schweiß- und Lötnähte automatisch überwacht. *Laser Technik Journal*, 5 (5), 2008, S. 40–42.
- [9] Gan, Z.; Tang, Q.: *Visual Sensing and its Applications. Integration of Laser Sensors to Industrial Robots*, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [10] Donges, A.; Noll, R. (Hrsg.): *Laser Measurement Technology*, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [11] Müller-Borhanian, J.: *Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen*, Herbert Utz Verlag, [S.I.], 1. Aufl., 2009.
- [12] Reiner, J.; Stankiewicz, M.: Evaluation of the Predictive Segmentation Algorithm for the Laser Triangulation Method. *Metrology and Measurement Systems*, 18 (4), 2011, S. 667–78.
- [13] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (Hrsg.): *Betriebsanleitung scanCONTROL 29xx*.
- [14] Repenning, F.: *Berührungsloses Vermessen von warmen Schmiedeteilen mit Hilfe der Lasertriangulation*, VDI-Verl., Düsseldorf, Als Ms. gedr, 1994.
- [15] Koller, N.; O'Leary, P.; Lee, P.: Comparison of CMOS and CCD cameras for laser profiling, San Jose, CA, Sunday 18 January 2004, S. 108–15.
- [16] Hering, E.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.

- [17] Hesse, S.; Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion - Ausführung - Anwendung, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, Wiesbaden, 4., aktualisierte und erw. Aufl., 2009.
- [18] Nomura, H.: Sensors and control systems in arc welding, Chapman & Hall, London [u.a.], Engl. language ed, 1994.
- [19] He, Y.; Chen, Y.; Xu, Y., et al.: Autonomous Detection of Weld Seam Profiles via a Model of Saliency-Based Visual Attention for Robotic Arc Welding. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 81 (3-4), 2016, S. 395–406.
- [20] Tarn, T.-J.; Chen, S.-B.; Fang, G.: Robotic Welding, Intelligence and Automation, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [21] Daniel, P.: Automatisches 3D-Prüfen, Klassifizieren und Nacharbeiten von Schweißnähten. DVS Congress 2017.
- [22] Daniel, P.; Steiner, F.: Automatisierte Schweißnahtinspektion als objektive QM-Maßnahme. DVS Congress 2015.
- [23] Manfredi, D.; Calignano, F.; Krishnan, M., et al.: Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs), Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs), 2014.
- [24] plasmotechnik GmbH (Hrsg.): schneller als das Auge - profileobserver compact.
- [25] QuellTech: Schweißnaht Prüfung. QuellTech International Ltd. (Hrsg.). URL: <http://www.quelltech.de/DE/solutions-02-weld-seam-inspection.html>. Abrufdatum 23.09.2018.
- [26] Raja, V.; Fernandes, K. J.: Reverse Engineering. An Industrial Perspective, Springer-Verlag, London, 2008.
- [27] Yan, Z. H.; Zhang, G. J.; Gao, H. M., et al.: Determining penetration from topside weld bead and weld pool geometry in PGMAW. Science and Technology of Welding and Joining, 10 (6), 2005, S. 744–49.
- [28] Fuchs, K.; Zunke, L.: Lichtschnittsensor auf Transputerbasis zur Echtzeit-Erfassung der Schweißnahtgeometrie. In: Grebe, R.; Baumann, M. (Hrsg.), Parallele Datenverarbeitung mit dem Transputer. Springer, Berlin, Heidelberg, 1992, S. 231–41.
- [29] Micro-Epsilon: Laser-Linien-Triangulation. URL: <http://www.micro-epsilon.de/glossar/Laser-Linien-Triangulation.html>. Abrufdatum 09.10.15.
- [30] Scansonic: Scansonic TH6D Datenblatt.
- [31] DIN 54190-1:2004-08:2004-08: Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen.
- [32] DIN 19277:2015-12: Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen - Thermografie - Allgemeine Methoden.

- [33] Broberg, P.: Surface crack detection in welds using thermography. *NDT & E International*, 57 , 2013, S. 69–73.
- [34] Rodríguez-Martin, M.; Lagüela, S.; González-Aguilera, D., et al.: Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 67 , 2014, S. 547–54.
- [35] Strajbr, C.; Tanasie, G.; Dilger, K., et al.: Active Thermography for Quality Assurance of joints in automobile manufacturing. *Welding in the World*, 55 (7-8), 2011, S. 90–97.
- [36] ebs Automatisierte Thermographie und Systemtechnik GmbH (Hrsg.): *Thermografie in der Theorie und Praxis*, Landsham, 2007.
- [37] Bockting, W.: Qualitätssicherung beim Lichtbogenschweißen durch den Einsatz moderner Prozessüberwachungsgeräte - Erfahrungen, Möglichkeiten, Grenzen. *DVS Congress 2009*, S. 136–40.
- [38] Pastuszak, P. d.; Muc, A.; Barski, M.: Methods of Infrared Non-Destructive Techniques: Review and Experimental Studies. *Key Engineering Materials*, 542 , 2013, S. 131–41.
- [39] Heller, K.: Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung. Herbert Utz Verlag GmbH; Universität Stuttgart, Dissertation.
- [40] Simmen, K.; Buch, B.; Breitbarth, A., et al.: Multimodal Image Acquisition and Processing System for In-line Quality Monitoring of Welding Processes. *YPIC 2017 - 3rd Young Welding Professionals International Conference*, Halle, 16.-18.08.2017.
- [41] Vorein, E.; Jüttner, S.; Siemer, U., et al.: Einsatz der passiven Thermografie zur Qualitäts-Bewertung von metallschutzgasgeschweißten Feinblechverbindungen. *DVS Congress 2015*.
- [42] Vasudevan, M.; Chandrasekhar, N.; Maduraimuthu, V., et al.: Real-Time Monitoring of Weld Pool during GTAW using Infra-Red Thermography and analysis of Infra-Red thermal images. *Welding in the World*, 55 (7-8), 2011, S. 83–89.
- [43] Venkatraman, B.; Menaka, M.; Vasudevan, M.: Thermography for Online Detection of Incomplete Penetration and Penetration Depth Estimation. *12th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT)*.
- [44] Wikle, H.C.; Kottilingam, S.; Zee, R.H., et al.: Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3), 2001, S. 228–33.
- [45] Wikle III, H. C.; Zee, R. H.; Chin, B. A.: A sensing system for weld process control. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90 , 1999, S. 254–59.
- [46] Banerjee, P.; Govardhan, S.; Wikle, H. C., et al.: Infrared Sensing for On-Line Weld Geometry Monitoring and Control. *Journal of Engineering for Industry*, 117 (3), 1995, S. 323.

- [47] Schauder, V.; Köhler, T.: Thermographie als Alternative zum Wirbelstrom bei der inline Schweißnahtinspektion der Endlosrohrfertigung. 14. Kolloquium Werkstoff- und Bauteilprüfung, Halle, 2013.
- [48] Rummel, W. D.; Christner, B. K.; Long, D. L.: Methodology for Analysis and Characterization of Nondestructive Inspection Capability Data. In: Thompson, D. O.; Chimenti, D. E. (Hrsg.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Springer US, Boston, MA, 1988, S. 1769–76.
- [49] Probability of Detection (POD) for Nondestructive Evaluation (NDE). NTIAC-TA-00-01, Austin TX, 2001.
- [50] Grandt, A. F.: Fundamentals of structural integrity. Damage tolerant design and nondestructive evaluation, Wiley, Hoboken, NJ, 2004.
- [51] Swets, J.: Evaluation of diagnostic systems. Methods from Signal Detection Theory, Elsevier Science, Oxford, 1982.
- [52] Mechanical testing, ASM International, Materials Park, Ohio, [10. ed.], 4. print, 1992.
- [53] Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner (Hrsg.): Metallschutzgasschweißen von pressgehärteten höchstfesten Stählen mit unterschiedlichen Beschichtungskonzepten. Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben, IGF-Vorhaben 17.844 BR, Magdeburg, 2015.
- [54] Schlosser, B.; Lehmann, T.; Jüttner, S.: Herausforderungen der Online-Erfassung und Verarbeitung der Daten von Schweißnahtgeometrie und Temperaturfeld beim MSG-Schweißen. DVS Congress 2018, Düsseldorf, 2018.
- [55] DIN EN ISO 5817:2014-06: Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten.
- [56] Pacific Northwest National Laboratory (Hrsg.): Review of Literature for Model Assisted Probability of Detection, Richland, WA, 2014.