

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19878 BR

## Thema

Entwicklungen und Untersuchungen von Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit hoher Wärmestromdichte

## Berichtszeitraum

01.12.2017 bis 29.02.2020

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

## Forschungsstelle(n)

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Lehrstuhl Fügetechnik

Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr.: 19.878 BR / DVS-Nr.: 04.067 „Entwicklungen und Untersuchungen von Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit hoher Wärmestromdichte“ 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 (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die materielle Unterstützung und die interessanten fachlichen Gespräche. Außerdem danken wir für die wertvollen Hinweise.

Unser Dank gilt:

|   |  |
|---|--|
| Dr. Hans-Jürgen Rusch (Projektpate)<br>Nicolas Stock<br>Niels Mitzschke | Hams & Wende GmbH & Co KG                                |
| Dr. Niels Hammer<br>Bernd Rödder<br>Stepahn Löcherbach                  | Nimak GmbH   |
| Christian Dahmen<br>Marc Hörlacher                                      | Kichhoff Automotive GmbH                                 |
| Karl-Heinz Kumpf  | Kumpf-Schweißtechnik                                     |
| Christian Sinner  | Bertrandt AG   |
| Wilhelm Krüger  | MSZ GmbH Blankenburg                                     |
| Bernd Giggel  | Vorrichtungsbau Giggel GmbH                              |
| Dr. Stefan Schünemann   | Institut für Kompetenz in der AutoMobilität<br>IKAM GmbH |
| Dr. Matthias Graul<br>Markus Tuchtfeld<br>Chris Frohwein                | Volkswagen AG  |
| Peter Weber<br>Harry Werner   | GEDIA Gebrüder Dingerkus GmbH                            |
| Nico Lehmann<br>Robert Geßler   | Porsche Leipzig GmbH                                     |
| Jens Böhmer<br>Benedikt Göddeke   | Mubea TRB GmbH   |
| Dr. Jörn Tölle<br>Carsten Trippe  | Benteler Automobiltechnik GmbH                           |
| Dr. Tino Adam   | Sondermaschinenbau Calvörde                              |
| Dr. Olaf Schwedler  | MKM-Mansfelder Kupfer und Messing GmbH                   |
| Laurent Cretteur  | ArcelorMittal France                                     |
| Jörg-Felix Maier  | Voestalpine Automotive Components GmbH<br>& Co. KG       |
| Robert Sierlinger   | Voestalpine Stahl GmbH                                   |

## Inhalt

|   |    |
|---|----|
| Thema.....  | 1  |
| Berichtszeitraum.....   | 1  |
| Forschungsvereinigung .....   | 1  |
| Forschungsstelle(n) .....   | 1  |
| 1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....  | 9  |
| 1.1. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungs-ergebnisse für KMU .....   | 10 |
| 2. Stand der Forschung und Entwicklung .....  | 12 |
| 3. Arbeitshypothese.....  | 14 |
| 4. Forschungsziele .....  | 14 |
| 5. Versuchsprogramm .....   | 15 |
| 5.1. Zeitlicher Projektplan.....  | 15 |
| 5.2. Inhaltlicher Ablauf des Projektes: Arbeitspakete.....  | 15 |
| 6. Verwendete Werkstoffe und Probenvorbereitung .....   | 18 |
| 6.1. Verwendete Werkstoffe .....  | 18 |
| 6.2. Werkstoffanalyse.....  | 18 |
| 6.2.1. Chemische Analyse .....  | 18 |
| 6.2.2. Überprüfung der Beschichtung.....  | 19 |
| 6.2.3. Presshärten.....   | 20 |
| 6.2.4. Mechanische Werkstoffeigenschaften .....   | 21 |
| 6.3. Probengeometrie.....   | 22 |
| 6.3.1. Probenblechdimensionierung .....   | 22 |
| 6.3.2. Probenpositionierung .....   | 23 |
| 6.2.3. Probenpräparation Metallographische Untersuchung.....  | 23 |
| 6.2.4. Bestimmung der Gewindegängigkeit, der Kopfzugkraft und des Bruchdrehmomentes .....   | 24 |
| 7. Ergebnisse der Arbeitspakete.....  | 26 |
| AP1 Experimentelle Untersuchung von Kurzzeitschweißprozessen mittels MFDC-Inverter- und KE-Schweißanlagen .....                             | 26 |
| AP1.1 Anpassung der Anlagentechnik an Kurzzeitprozesse und Aufbau der Messsensorik  | 26 |
| AP1.2 Experimentelle Bestimmung der Schweißparameterfelder und Ableitung der Prozessgrenzen hinsichtlich der Schweißprozessstabilität ..... | 28 |
| AP1.4 Ermittlung der statischen und dynamischen Verbindungseigenschaften .....  | 31 |
| AP2 Ausarbeitung einer Methodik zur Analyse der Qualitätsmerkmale anhand von Prozessgrößen und Verbindungscharakteristiken .....            | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Bewertung der Funktionalität (Spritzerklassifizierung) .....  | 39 |
| Zusammenhang zwischen Verbindungsfestigkeit und Funktionalität .....  | 40 |
| Zusammenhang zwischen Verbindungsfestigkeit und Prozessgrößen-/ verläufe.....   | 44 |
| Vergleichsschweißungen auf unterschiedlichen Anlagen.....   | 50 |
| Zusammenhang zwischen Verbindungsfestigkeit und geometrische Merkmale.....  | 54 |
| 8. Zusammenfassung.....   | 58 |
| 9. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen.....  | 59 |
| 10. Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen.....   | 61 |
| 10.1 Wissenschaftliche-technisches Personal (Einzelansatz A1 des Finanzierungsplans) .  | 61 |
| 10.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans).....  | 61 |
| 10.3 Leistung Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans).....  | 62 |
| 11. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für<br>kleine und mittlere Unternehmen..... | 63 |
| 12. Transfermaßnahmen .....   | 64 |
| 12.1. Geplante Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit .....  | 64 |
| 12.2. Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens .....   | 65 |
| 12.3. Durchgeführte Transfermaßnahmen .....   | 67 |
| 13. Literatur .....   | 69 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Querschliff von KE-Schweißungen ohne erkennbare Schweißlinse; a) DX 57D (0,7 mm) – HCT 980C (1 mm), b) HX 260 (0,8 mm) – HX 260 (0,8 mm) .....  | 9  |
| Abbildung 2: Schweißverbindung einer Vierkant-Buckelmutter ohne sichtbare Schweißlinse (links), detaillierte Darstellung der Verbindungszone (rechts). Prozessparameter: $I_s = 27$ kA; $t_{sz} = 30$ ms   | 10 |
| Abbildung 3: Zeitplan des Projektes mit geändertem Zeitplan durch Projektverlängerung ....   | 15 |
| Abbildung 4: Veränderte Erscheinungsform der Aluminium-Silizium Beschichtung bei verschiedenen Presshärteparametern.....   | 21 |
| Abbildung 5: Geometrie der verwendeten Flachzugprobe nach DIN 50125 zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Blechwerkstoffe .....  | 21 |
| Abbildung 6: Prinzipskizze einer Schweißprobe .....  | 23 |
| Abbildung 7: Prinzipskizze zur Erleichterung der Probenpositionierung für das Trennen und eine geschweißte Probe .....   | 23 |
| Abbildung 8: Skizze der Probenpräparation für metallographischen Untersuchung .....  | 24 |
| Abbildung 9: Entwickelte Prüfvorrichtung a) für die Bestimmung der Kopfzugkraft – b) für die Bestimmung des Bruchdrehmomentes.....   | 25 |
| Abbildung 10: Explosionsdarstellung der Anlagenkomponenten inklusive der experimentellen Randbedingungen der Sonderelektrode .....   | 26 |
| Abbildung 11: Gemessener zeitlicher Verlauf der Prozessgrößen Schweißstrom,-spannung, Elektrodenkraft und Elektrodenweg beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit einer für das Kurzzeitschweißen optimierten MFDC-Anlage für eine unbeschichtete Schweißmutter mit M5-Gewinde und dem Werkstoff CR340LA - GI50/50 ..... | 27 |
| Abbildung 12: Gemessener zeitlicher Verlauf der Prozessgrößen Schweißstrom,-spannung, Elektrodenkraft und Elektrodenweg beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit konventioneller MFDC-Technik für eine unbeschichtete Schweißmutter mit M5-Gewinde und dem Werkstoff CR340LA - GI50/50.....                             | 28 |
| Abbildung 13: Teilfaktorieller Versuchsplan zur Ermittlung der Parameterfenster mit Zentralpunkt   | 30 |
| Abbildung 14: Lösungsansatz zur Ermittlung von Prozessfenstern mit den entsprechenden Grenzbereichen zur Herstellung schweißlinsenfrier Verbindungen mit gewünschtem Anforderungsprofil .....  | 30 |
| Abbildung 15: Vergleich der Schweißbereichsvorhersage auf Basis der DoE mit den realen Schweißbereichsgrenzen für die Kombination M5 auf CR440 .....   | 31 |
| Abbildung 16: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 12 kA bis 25 kA für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150 .....   | 32 |
| Abbildung 17: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 13 kA bis 23 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150 .....   | 32 |
| Abbildung 18: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 8 kA bis 22 kA für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf CR340LA+GI50/50 .....   | 33 |
| Abbildung 19: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 8 kA bis 24 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR340LA+GI50/50 .....   | 33 |
| Abbildung 20: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 7 kA bis 19 kA für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf CR440Y780T+GI50/50 .....  | 34 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 21: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 7 kA bis 22 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR440Y780T+GI50/50 .....  | 34 |
| Abbildung 22 Aufbau des Fallturmes.....  | 35 |
| Abbildung 23 Ergebnis der dynamischen Prüfung für CR340 (M5 untere Grenze bei 10,5 kA, obere Grenze bei 22 kA; M6 untere Grenze bei 10 kA, obere Grenze bei 22 kA – bei 40 ms Schweißzeit und 4 kN Elektrodenkraft), CR440Y780T (M5 untere Grenze bei 10 kA, obere Grenze bei 19 kA; M6 untere Grenze bei 10 kA, obere Grenze 20 kA – bei 40 ms Schweißzeit und 3 kN Elektrodenkraft) und 22MnB5 (M5 untere Grenze bei 16 kA, obere Grenze bei 19 kA; M6 untere Grenze 15 kA, obere Grenze 22 kA – bei 20 ms Schweißzeit und 4 kN Elektrodenkraft) | 36 |
| Abbildung 24: Entwicklung der Kopfzugkräfte über einen Umfang von 40 Einzelschweißungen mit den Schweißparametern 20 ms, 4,0 kN und 19 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150 .....  | 37 |
| Abbildung 25: Entwicklung der Kopfzugkräfte über einen Umfang von 40 Einzelschweißungen mit den Schweißparametern 20 ms, 3,0 kN und 16 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR340LA – GI50/50.....  | 37 |
| Abbildung 26: Entwicklung der Kopfzugkräfte über einen Umfang von 40 Einzelschweißungen mit den Schweißparametern 40 ms, 3,0 kN und 17 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR440Y780T – GI50/50 .....  | 38 |
| Abbildung 27: Einflussgrößen auf die Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen und ihre gegenseitige Beeinflussung .....  | 39 |
| Abbildung 28: Klassifizierung der Schweißspritzer beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit MFDC in Anlehnung an IGF-Vorhaben 18.987BR .....   | 40 |
| Abbildung 29: Analysierter Zusammenhang zwischen der Verbindungsfestigkeit (Kopfzugkraft) und der Funktionalität.....  | 40 |
| Abbildung 30: Einteilung der Spritzerklassen für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150.....  | 41 |
| Abbildung 31: Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150.....  | 41 |
| Abbildung 32: Einteilung der Spritzerklassen für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf CR340LA – GI50/50 .....  | 42 |
| Abbildung 33: Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR340LA – GI50/50 .....  | 42 |
| Abbildung 34: Einteilung der Spritzerklassen für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf CR440Y780T – GI50/50 .....   | 43 |
| Abbildung 35: Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR440Y780T – GI50/50 .....   | 43 |
| Abbildung 36: Analysierter Zusammenhang zwischen der Verbindungsfestigkeit (Kopfzugkraft) und den Prozessgrößen .....  | 44 |
| Abbildung 37: Übersicht über die elektrischen und mechanischen Führungsgrößen beim Widerstandsschweißen .....  | 45 |
| Abbildung 38 Möglichkeiten der Auswertung des Wegsignals der Elektrode .....   | 45 |
| Abbildung 39 Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für M5 a) für CR340 LA – b) für CR4440Y780T .....   | 46 |
| Abbildung 40 Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für M6 a) für CR340 LA – b) für CR4440Y780T .....   | 46 |
| Abbildung 41 Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für 22MnB5 a) M5 – b) M6.....   | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 42 Vergleich der Leistung, der Energie und der Kopfzugkraft in Abhängigkeit des Schweißstromes bei 22MnB5 + AS150, wärmebehandelt bei 900 °C und 6 Minuten, für das Funktionselement M5 .....   | 48 |
| Abbildung 43 Vergleich der Leistung, der Energie und der Kopfzugkraft in Abhängigkeit des Schweißstromes bei 22MnB5 + AS150, wärmebehandelt bei 900 °C und 6 Minuten, für das Funktionselement M6 .....   | 48 |
| Abbildung 44 Vergleich der Vorhersage von Schweißbereichen auf Basis der Regressionsgerade für Kopfzugkräfte und den tatsächlichen Schweißbereichen für Vierkantschweißmutter M6 auf CR440Y780T .....   | 49 |
| Abbildung 45 Vergleich der Vorhersage von Schweißbereichen auf Basis der Regressionsgerade der Leistung und den tatsächlichen Schweißbereichen für M6 auf CR440Y780T .....  | 49 |
| Abbildung 46 Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M5 auf 22MnB5+As150 (pressgehärtet bei 930°C 6 Min.) an einer C-Ständeranlage mit pneumatischer Nachsetzeinheit.....   | 50 |
| Abbildung 47 Vergleich der Entwicklung des Wegmaximums und der Energie in Abhängigkeit des Schweißstroms bei M5 auf 22MnB5+AS150 (pressgehärtet bei 930 °C und 6 Min.) an einer C-Ständeranlage mit pneumatischer Nachsetzeinheit .....   | 51 |
| Abbildung 48 Vergleich der Vorhersage von Schweißbereichen auf Basis der Regressionsgerade für Kopfzugkräfte und den tatsächlichen Schweißbereichen für CR440Y780T mit M5 an der Schweißanlagen der Firma Harms und Wende.....  | 52 |
| Abbildung 49 a) Vergleich der spezifischen Fügeenergie des benutzten Anordnung mit dem Kurzzeitschweißen bei (Parameter ergänzen) – b) Vergleich der erreichbaren Kopfzugkräfte beim KE-Schweißen mit dem Kurzzeitschweißen bei.....  | 53 |
| Abbildung 50: Übersicht über die geplanten Untersuchungen mit dem Schwerpunkt dieses Kapitels .....   | 54 |
| Abbildung 51 Übersicht über die möglichen geometrischen Merkmale .....  | 55 |
| Abbildung 52 a) Übersichtsaufnahme einer Mutter-Blech-Schweißung nach der Drehmomentenprüfung - b) Detailaufnahme einer Bruchfläche mit eingezeichneter Anbindungsfläche (schwarz umrandet, graue Füllung) und der Fläche mit verdrängter Beschichtung (schwarz gepunktet)..... | 56 |
| Abbildung 53 Vergleich der Kopfzugkraft mit der Anbindungsfläche in Abhängigkeit des Schweißstroms bei M5 CR340 bei 3kN Schweißkraft und 40 ms Schweißzeit .....  | 57 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Werkstoffe.....  | 18 |
| Tabelle 2 Vergleich der ermittelten chemischen Zusammensetzung mit den Sollwerten aus VDA 239-100 für HX340LA .....  | 19 |
| Tabelle 3 Vergleich der ermittelten chemischen Zusammensetzung mit den Sollwerten aus VDA 239-100 für CR440Y780 .....  | 19 |
| Tabelle 4 Vergleich der chemischen Zusammensetzung mit den Sollwerten des Hersteller ArcelorMittal für 22MnB5+AS150 .....  | 19 |
| Tabelle 5 Chemische Zusammensetzung der verschiedene Mutterntypen mittels AES.....   | 19 |
| Tabelle 6 Vergleich der experimentell bestimmten Auflagenmasse mit den Richtwerten aus Norm und VDA .....  | 20 |
| Tabelle 7 Überprüfung der Schichtdicke des Werkstoffes 22MnB5 .....  | 20 |
| Tabelle 8 Vergleich der experimentell ermittelten mechanischen Kennwerte mit den geforderten Eigenschaften .....   | 22 |
| Tabelle 9 Vergleich der erzielten Ergebnisse aus dem Zugversuch für 22MnB5 in den beiden verwendeten Wärmebehandlungsstufen .....  | 22 |
| Tabelle 10: Abmessungen der Proben.....  | 22 |
| Tabelle 11 Auswahl der Parameter für die zweite DoE .....  | 29 |
| Tabelle 12 Übersicht über die gewählten Parameterkombinationen zur Bestimmung von Prozessindizes .....   | 36 |
| Tabelle 13: Kennwerte der statistischen Auswertung aller 3 Stahlgüten mit: $X_{min}$ als Minimal- und $X_{max}$ als Maximalwert, $\bar{X}$ als Mittelwert, $s_X$ als Standardabweichung, $V$ als Variationskoeffizient ( $s_X/\bar{X}$ ) sowie $c_p$ als Prozessbeherrschbarkeit und $c_{pk}$ als Prozessfähigkeit | 38 |
| Tabelle 14 Vergleich der verwendeten Parameter beim KE-Schweißen .....   | 52 |

## 1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Das Widerstandsschweißen stellt ein sehr kosten- und energieeffizientes Schweißverfahren für den Dünnpblechbereich dar, wie die weite Verbreitung u.a. in der Automobil- und Fahrzeugproduktion belegt. Für viele Anwendungen ist es wünschenswert, den Wärmeeintrag beim Widerstandsschweißen zu reduzieren, was durch die Verkürzung der Schweißzeit möglich wird. Gleichzeitig muss in diesem Fall die Stromstärke erhöht und die Kontaktfläche begrenzt werden, so dass eine hohe Wärmestromdichte erreicht wird. Dies tritt beim Buckelschweißen auf, kann aber auch bei anderen Anwendungen des Widerstandspunktschweißens genutzt werden. Für diese als Kurzzeitschweißen bezeichnete Prozessvariante liegen derzeit nur wenige Kenntnisse in Regelwerken vor, eine Abgrenzung hinsichtlich der Schweißzeit besteht nicht [1]. Für das untere Qualitätskriterium wird immer davon ausgegangen, dass die Schmelzlinse eine Mindestgröße erreicht [2]. Bei einer Optimierung von Prozessen hinsichtlich sehr kurzer Schweißzeiten mit entsprechend konzentrierter Energieeinbringung ist jedoch im Schliff häufig keine Schmelzlinse mehr erkennbar, was die Bewertung anhand zugrunde gelegter Regelwerke nicht zulässt. In Abbildung 1 sind zwei beispielhafte Punktschweißverbindungen ohne erkennbare Schweißlinse aus der Praxis dargestellt.



Abbildung 1: Querschliff von KE-Schweißungen ohne erkennbare Schweißlinse; a) DX 57D (0,7 mm) – HCT 980C (1 mm), b) HX 260 (0,8 mm) – HX 260 (0,8 mm)

Zur Einhaltung der Regelwerke müsste bei derartigen Verbindungen die Schweißzeit erhöht werden, bis eine Schweißlinse geforderter Größe entstanden ist. Dies führt zu einem unnötig hohen Energieeintrag und wirkt sich auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindung nicht immer positiv aus. So zeigen Scherzugversuche von Verbindungen ohne und mit erkennbarer Schmelzlinse ähnliche Festigkeiten und Bruchbilder. Daraus lässt sich ableiten, dass das Qualitätskriterium der minimalen Schmelzlinsegröße nicht ausschlaggebend ist für eine anforderungsgerechte Fügeverbindung und dass somit eine Erweiterung der Klassifikationen hinsichtlich Prozessbeschreibung und Qualitätskriterien erforderlich ist.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Verbindungen mit Funktionselementen wie Schweißmuttern, vgl. Abbildung 2. Hergestellt wurde die Verbindung auf einer Schweißanlage mit Mittelfrequenztechnik und auch hier ist keine Schweißlinse in der Fügeebene erkennbar.

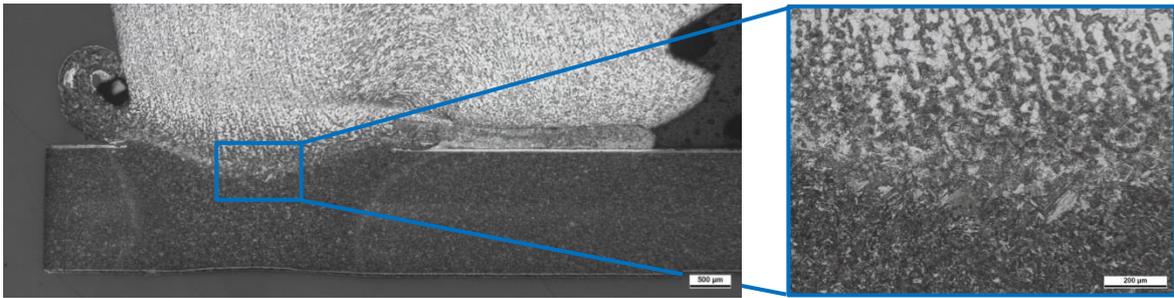


Abbildung 2: Schweißverbindung einer Vierkant-Buckelmutter ohne sichtbare Schweißlinse (links), detaillierte Darstellung der Verbindungszone (rechts). Prozessparameter:  $I_s = 27 \text{ kA}$ ;  $t_{sz} = 30 \text{ ms}$

Ziel dieses Vorhabens ist die Analyse von Schweißverbindungen, bei denen keine Schmelzlinse im Querschliff mehr erkennbar ist. Dazu wird eine geeignete Anlagentechnik auf Basis der Mittelfrequenztechnik (MFDC) verwendet, als Referenz dienen Schweißungen mit Kondensatorentladungsanlagen. Die für den Anwender erforderlichen Kenntnisse zum Prozessablauf, den werkstofflichen Beeinflussungen und den qualitativen Anforderungen an die Verbindungen sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet werden. Diese Schweißverbindungen werden im Folgenden, unabhängig von der eingesetzten Anlagentechnik, als Kurzzeitschweißungen bezeichnet. Eine Definition gemäß geltendem Regelwerk kann nicht wiedergegeben werden, da der Begriff bisher nicht eindeutig definiert ist.

Die Innovation des angestrebten Forschungsvorhabens liegt einerseits in der wissenschaftlichen Beschreibung sehr kurzer Schweißprozesse, andererseits soll anhand der Ausarbeitung von Qualitätskriterien für Schweißverbindungen ohne Schmelzlinse Aussagen über deren Verbindungscharakteristik getroffen werden, um deren Nutzung in der industriellen Praxis abzusichern.

### **1.1. Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU**

Das Forschungsvorhaben soll insbesondere der Zuliefererindustrie für den Fahrzeug- und Automobilbau, den Anlagenherstellern und den Lieferanten von Funktionselementen dienen, ihr Angebot und Lieferspektrum zu erweitern, bzw. wirtschaftlicher zu fertigen. Das Zielgebiet sind Baugruppen im Bereich der Komponentenfertigung im Karosserie-, Anbauteile- und Sitzbereich aus höchstfesten Stählen, Funktions- und Verbindungselemente, bis hin zu Mischverbindungen formgehärteter Bauteile mit Leichtbauwerkstoffen.

Das Potenzial von Kurzzeitschweißungen wird heute nicht ausgeschöpft, weil bestehende Qualitätskriterien nicht anwendbar sind und Kenntnisse zu den Prozessgrenzen fehlen. Zu den Grenzen zählt zum einen das Nichtvorhandensein einer Schmelzlinse wie auch das bisher nicht zulässige Auftreten von Schweißspritzern. Aus Sicht der Forschungsstelle wäre eine Klassifizierung zwischen zulässigen bzw. unzulässigen Spritzern notwendig, da eine derartige Betrachtung bisher nicht stattgefunden hat. Dazu sollen durch das Projekt die Regelwerke zur Qualitätssicherung um Schweißverbindungen mit sehr kurzen Schweißzeiten anhand derer spezifischen Eigenschaften erweitert werden. Derzeit findet das Kurzzeitschweißen nur Anwendung, wenn die Fügeaufgabe keine längeren Schweißzeiten zulässt. Daher muss eine Abschätzung der Verbindungsqualität auch bei nicht sichtbarer Schmelzlinse erarbeitet werden, weil die entsprechenden Regelwerke dies bisher nicht beschreiben bzw. nicht zulassen.

Das mögliche Anwendungsspektrum ist sehr groß. Wenn als potenzieller Nutzerkreis nur die Zuliefererindustrie für den Fahrzeugbau zugrunde gelegt wird, kann bei geschätzten 50 Anwendungen pro Fahrzeug z.B. für Funktionselemente wie Schweißmuttern von ca. 500 Mio. Schweißverbindungen jährlich ausgegangen werden. Durch neue Anwendungen in der Mischbauweise kann sich diese Zahl noch einmal verdoppeln. Bei einer erwarteten Energiereduktion auf höchstens noch 30 % wären so Einsparungen von elektrischer Energie im Bereich von 103 MWh möglich. [3]

Neben dem energetischen Einsparungspotenzial bietet das Kurzeitschweißen auch werkstoffliche Vorteile, weil der Wärmeeintrag in die Bauteile einen geringeren Verzug und eine kleinere WEZ verursacht. Außerdem werden die Elektroden geringer belastet und der Prozesswirkungsgrad erhöht sich.

Die zu erarbeitenden Erkenntnisse können sowohl für das Buckelschweißen, das Fügen von Funktionselemente wie Schweißmuttern als auch für Widerstandsschweißverbindungen von höchstfestem Stahl genutzt werden, für die ähnliche Geometrien und Anforderungen gelten.

Im Rahmen dieses Vorhabens soll eine Präzisierung bzw. Erweiterung der bestehenden Qualitätskriterien erfolgen und aus der gesammelten Erfahrung zur Verbindungscharakterisierung am Schliffbild ein Abgleich mit den ermittelten Prozessparameter abgeleitet werden. So lassen sich Kosten in der Prüfung einsparen und die Ausschussrate reduzieren. Für die technische Realisierung geeigneter Prozessverläufe sind möglicherweise Modifikationen der Anlagentechnik erforderlich. Durch die Beteiligung von Anlagenherstellern im Projekt können diese die neuen Erkenntnisse direkt in ihre Produkte und zu geeigneten Anwendern transferieren. Für die Anpassung von Funktionselementen sind die Hersteller von derartigen Elementen beteiligt, die ebenfalls ihr Angebot für neue Anwendungen erweitern können.

## 2. Stand der Forschung und Entwicklung

Kurzzeitschweißen wird derzeit hauptsächlich beim Buckelschweißen verwendet, häufig mit Kondensatorentladungsschweißanlagen. Das Verfahren zeichnet sich aus durch sehr hohe Spitzenströme (bis 1000 kA) bei Schweißzeiten im niedrigen Bereich  $< 20$  ms. Eine Schweißverbindung wird durch eine konduktive Erwärmung einer oder mehrerer Schweißbuckel unter gleichzeitiger Krafteinwirkung und gleichzeitiger Verformung dieser erzielt. Eine hohe Dynamik, aufgrund sehr kurzer Schweißzeiten verbunden mit hoher Wärmestromdichte, ist kennzeichnend für diesen Prozess. Die Bauteilprüfung erfolgt nahezu ausschließlich über zerstörende Prüfverfahren. Dabei werden vor allem die Belastbarkeit der Fügeverbindung, das Bruchbild sowie metallographische Schliffe bewertet. [4] Bei der Bewertung der Fügeverbindung anhand metallographischer Schliffe besteht die Schwierigkeit, dass es zu einer Grenzflächenbildung kommt und eine Schweißlinse nicht erkennbar ist.

Im Bereich der Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen gibt es eine Reihe von Normen und Regelwerken, die sowohl generelle Grundlagen für Qualitätssicherung beim Widerstandspunkt-, und Buckelschweißen [5, 6] nach der Güteklasse der Schweißverbindung vorschreiben [6]. Die Spezifizierung der Qualitätsmerkmale für extrem kurzzeitige Schweißprozesse von Verbindungen ohne Schmelzlinse wird im neuerarbeiteten DVS-Merkblatt 2911 [7, 8] zwar beschrieben, eine Vorgehensweise zur Bewertung der Verbindung im Schliff ist dem Dokument jedoch nicht zu entnehmen. In [4] wird vorgeschrieben, die Verbindungsfestigkeit der Schweißverbindung als Qualitätsgrenzen anzunehmen was jedoch eine Zerstörung der Verbindung und einen hohen experimentellen Aufwand erfordert. Die in der Literatur beschriebenen Forschungsvorhaben [9, 10] beziehen sich auch auf o. g. Qualitätskriterien.

Es wurden Methoden zur Bewertung von Prozessverläufen entwickelt, die anhand der Überwachung von energetischen (Strom, Spannung, Widerstand) oder mechanischen [11] Prozessparametern eine Aussage über die Qualität von Schweißverbindungen liefern [12]. Weiter werden zerstörungsfreie Methoden entwickelt, die eine Qualitätsbetrachtung über die Oberflächenanalyse [13], Thermografie [14] und Ultraschall [15, 16] erlauben. Außerdem existieren die integrierten Ansätze die mehrere o.g. Methoden nutzen, um die Qualität der Schweißverbindung zu betrachten [17–20].

Alle o.g. Methoden basieren auf Anwendung der beim klassischen Widerstandspunktschweißen üblichen Qualitätskriterien, dem Mindestpunktdurchmesser als untere und Schweißspritzer als obere Qualitätsgrenze. Bei sehr kurzen Schweißzeiten tritt keine übliche Schmelzlinsenbildung mehr auf. Die Schweißverbindung entsteht wahrscheinlich durch Diffusionsvorgänge in der Grenzschicht der Fügezone, was im Rahmen des Projektes näher zu betrachten ist. Eine Bewertung der Schweißverbindung anhand der üblichen Kriterien wie Schmelzlinsendurchmesser ist in diesem Fall nicht mehr möglich. Für das obere Qualitätskriterium der Spritzergrenze existieren nach derzeitigem Stand keine Kriterien, die eine Unterscheidung zwischen „schädlichen“ und „unschädlichen“ Spritzern ermöglichen. Lediglich in [9] erfolgt die differenzierte Bewertung von Schweißspritzern beim Buckelschweißen von Schweißmuttern, was jedoch anhand der Sichtprüfung durchgeführt wird und daher subjektiv ist. In [21] erfolgte eine Untersuchung von Imperfektionen auf die Eigenschaften eines Schweißpunkts im Crashfall, bei der u.a. auch Schweißspritzer untersucht wurden. Dabei stellte sich heraus, dass Spritzer einen Einfluss auf unterschiedliche Belastungsarten hatten, wenn der Mindestpunktdurchmesser unterschritten wurde. Die Beeinflussung ist aber nur minimal, wenn trotz Spritzern ein ausreichender Schweißpunkt entsteht. In

den Gremien der Forschungsvereinigung des DVS wird die Differenzierung von Spritzern kontrovers differenziert. Aus Sicht der Forschungsstelle ist aber auch hier eine wissenschaftliche Analyse erforderlich, ähnlich wie die Differenzierung von Rissen. Mittlerweile sind die Risse in Merkblättern differenziert beschrieben, so dass dem Anwender hier eine fundierte Bewertung derartiger Unregelmäßigkeiten möglich ist.

Die Weiterentwicklung integrierter Konzepte zur Qualitätssicherung beim Widerstandsschweißen mit dem Ziel, die bestehenden Normen und Regelwerke [4, 8] mit Bezug auf Fügeverfahren mit sehr kurzen Schweißzeiten zu erweitern, ist notwendig und soll im Rahmen dieses Projektes erarbeitet werden. Speziell sind hier die DVS-Merkblätter 2916 zu nennen, die um die erarbeiteten Erkenntnisse erweitert werden sollen.

Das Fügen von Schweißmuttern mittels Buckelschweißen ist Stand der Technik und wird in der Automobilindustrie und bei Stahlherstellern angewendet [9]. Die bisher zur Abschätzung der Qualität von Schweißverbindungen angewendeten Kriterien beziehen sich auf die Festigkeit der Schweißverbindung. Als obere Grenze der Schweißparameter wird die Spritzergrenze angewendet, wobei die Unterscheidung zwischen zulässigen und unzulässigen Spritzern anhand der Betrachtung des Verschmutzungsgrades des Gewindes der Schweißmutter erfolgt [9]. Solch eine Definition der oberen Qualitätsgrenze ist stark anwendungsabhängig. Ebenfalls ist es üblich, dass eine Bewertung aufgrund von Erfahrungswerten und einer Überprüfung des Prozessergebnisses erfolgt.

Die beim Widerstandsschweißen üblichen Qualitätskriterien basieren auf dem Schmelzlinse Durchmesser und lassen sich in diesem Fall nicht anwenden, da aufgrund sehr kurzer Schweißzeiten keine Schmelzlinse im Querschliff sichtbar ist (siehe Abbildung 2). Hier besteht ein Bedarf an einer Präzisierung der oberen und unteren Qualitätsgrenze im Allgemeinen, sowie einer genaueren Betrachtung mit dem Fokus auf der Mittelfrequenztechnik, was im Rahmen des Projektes für Schweißmuttern, sowohl mit segmentierten als auch mit Ringbuckel, erfolgen soll. Aktuelle Ergebnisse aus den Untersuchungen in [22] mit dem Schwerpunkt auf der Kondensatorentladung können im geplanten Projekt ebenfalls genutzt werden, um die Verbindung hinsichtlich ihrer Qualität zu validieren. Mit der Forschungsstelle besteht eine enge Zusammenarbeit, u. a. in einem laufenden AIF-Projekt. [23]

### **3. Arbeitshypothese**

Für das Anschweißen von Funktionselementen auf und mit wärmeempfindlichen Werkstoffen existieren derzeit keine Erkenntnisse zu Prozessabläufen mit minimierter Energieeinbringung. Hierfür werden sowohl Kondensatorentladungs- als auch Mittelfrequenzanlagen genutzt. Der Einsatz kurzer Stromimpulse mit erhöhten Stromstärken ermöglicht die Herstellung von Widerstandspunktschweißverbindungen mit kleiner WEZ. Neben den elektrischen Parametern hängt die Qualität einer Schweißverbindung mit sehr kurzen Schweißzeiten sehr stark von den mechanischen Kenngrößen Elektrodenkraft und Nachsetzweg ab. Um einen Einbruch der Elektrodenkraft über die Stromflusszeit zu verhindern, bieten sich Möglichkeiten zur Kompensation mittels Nachsetzeinheiten bestehend aus Polymer- oder Tellerfedern bzw. elektromagnetischen Systemen an. Eine wissenschaftliche Betrachtung zum Einfluss von Nachsetzeinheiten beim Buckelschweißen mit Kondensatorentladung erfolgt in [23]. Richtlinien über den Einsatz von Nachsetzeinheiten und deren Einfluss auf das Schweißergebnis existieren zum aktuellen Zeitpunkt nicht.

Hinzukommend existieren für Schweißungen mit starker Energiekonzentration keine Kriterien zur Bewertung der Verbindungsqualität. Daher werden vor allem Prozessabläufe zum Kurzzeitschweißen und die dazu erforderlichen Randbedingungen hinsichtlich elektrischer Parameter (Strom-, Spannungsverlauf) wie auch der mechanischen Parameter (Kraftverlauf und Elektrodenweg) entwickelt, sowie die Anforderungen an die Anlagentechnik abgeleitet.

Weiter soll anhand der ermittelten Qualitätskriterien eine Methode zur Schliffbildanalyse erarbeitet werden, mit welcher derartige Schweißverbindungen zu beurteilen sind, da die bisher üblichen Bedingungen wie die Schmelzlinsegröße bei den Kurzzeitschweißungen nicht mehr anwendbar sind.

### **4. Forschungsziele**

- Formulierung einer Aussage über Zulässigkeit von Schweißspritzern
- Klärung des Verbindungsmechanismus an Schweißungen ohne erkennbare Schweißlinse
- Ausarbeitung von Qualitätskriterien für Schweißverbindungen ohne Schmelzlinse anhand von Prozessgrößen und Verbindungscharakteristiken
- Ableitung von Qualitätskriterien für Kurzzeitschweißungen mit Rücksicht auf Prozessstabilität, geometrische Änderungen der Fügestelle sowie Festigkeit der Fügeverbindung

## 5. Versuchsprogramm

### 5.1. Zeitlicher Projektplan

Der Zeitplan des Projektes ist in Abbildung 3 dargestellt. Bedingt durch die verzögerte Lieferung des Versuchswerkstoffe und der Funktionselemente, sowie des zweiwöchigen Ausfalls der Schweißanlage, wurde eine dreimonatige kostenneutrale Verlängerung der ursprünglichen Projektdauer beantragt und genehmigt.

| Arbeitsschritt<br><br>Projektmonat |  | Zeitraum |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |      |    |   |   |
|------------------------------------|--|----------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|------|----|---|---|
|                                    |  | 2017     | 2018 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 2019 |   |   |   |   |   |   |   |   |    | 2020 |    |   |   |
|                                    |  | 12       | 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 |
| 1.1                                | Anlagentechnik +<br>Messensorik  | ■        | ■    | ■ | ■ | ■ |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |      |    |   |   |
| 1.2                                | Schweißparameterfelder +<br>Prozessgrenzen                               |          |      |   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■    | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■    | ■  | ■ | ■ |
| 1.3                                | Eigenschaftsänderungen<br>von Kurzzeitschweiß-<br>verbindungen           |          |      |   |   |   | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■    | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■    | ■  | ■ | ■ |
| 1.4                                | Statische / dynamische<br>Verbindungseigenschaften                       |          |      |   |   |   |   |   | ■ | ■ | ■ | ■  | ■  | ■  | ■    | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■    | ■  | ■ | ■ |
| 2.1                                | Qualitätsmerkmale<br>(Prozessgrößen +<br>Festigkeiten)                   |          |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | ■  | ■    | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■  | ■    | ■  | ■ |   |
| 2.2                                | Charakterisierungskriterien<br>Kurzzeitschweißungen<br>(metallografisch) |          |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |      |    |   |   |
| 3                                  | Auswertung,<br>Zusammenfassung,<br>Abschlussbericht                      |          |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |      |   |   |   |   |   |   |   |   |    |      |    |   |   |

geplanter Bearbeitungszeitraum
angepasster Bearbeitungszeitraum

Abbildung 3: Zeitplan des Projektes mit geändertem Zeitplan durch Projektverlängerung

### 5.2. Inhaltlicher Ablauf des Projektes: Arbeitspakete

Im Laufe der durchgeführten Untersuchungen erfolgte eine Präzisierung der beantragten Arbeitspakete in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Im Weiteren werden diese Änderungen in einem inhaltlichen Projektplan beschrieben.

AP1 Experimentelle Untersuchung von Kurzzeitschweißprozessen mittels MFDC-Inverter- und KE-Schweißanlagen

AP1.1 Anpassung der Anlagentechnik an Kurzzeitprozesse und Aufbau der Messsensorik

- Umrüstung der Ständeranlagen auf Mutternschweißen durch Sonderelektroden
- Erweiterung der Messsensorik um externe Wegmessung an konventioneller Ständeranlage mit pneumatischer Nachsetzeinheit

AP1.2 Experimentelle Bestimmung der Schweißparameterfelder und Ableitung der Prozessgrenzen hinsichtlich der Schweißprozessstabilität

Im Rahmen des AP1.2 werden mit Anwendung der o.g. Anlagentechnik die Prozessgrenzen für Kurzzeitschweißprozesse beim Schweißen von Vierkant-Schweißmuttern abgetastet. Es erfolgen eine Variation von Prozessparameter sowie der Eingangsparameter (Steifigkeit der Schweißan-

lage und der Nachsetzeinheit). Die Festlegung und Bestimmung der unteren und oberen Qualitätsgrenze erfolgte in Anlehnung an bestehende Regelwerke. Als oberes Qualitätskriterium dienen in erster Linie die Gewindegängigkeit welche durch eine zunehmende Spritzerbildung beeinträchtigt wird, wobei zusätzlich die Differenzierung zwischen einer zulässigen und unzulässigen Spritzerbildung, anhand der Prozessgrößenüberwachung, hergeleitet werden soll. Das untere Qualitätskriterium für Schweißverbindungen wird zunächst anhand der quasistatischen Verbindungsfestigkeit im Kopfzugversuch abgeleitet. Störgrößen, wie z.B. der produktionsbedingte Elektrodenkappenverschleiß, werden ebenfalls mitberücksichtigt. Als Referenz gelten dabei die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Kondensatorentladungsschweißungen.

Als Ziel gilt die Ableitung der oberen und unteren Qualitätsgrenzen für Verbindungen auch ohne im Schlibbild sichtbare Schmelzlinse. Zudem sollen die Parameterfenster bestimmt werden um die Basis für weitere Untersuchungen zu schaffen. Darüber hinaus soll eine Klassifizierung von zulässigen und unzulässigen Schweißspritzern getroffen werden. Das Verschleißverhalten der Elektrode wird ebenfalls dokumentiert.

#### AP1.3 Analyse der Eigenschaftsänderungen (Gefüge, Geometrie) von Kurzzeitschweißverbindungen anhand experimenteller Untersuchungen

Im AP1.3 werden die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der geometrischen Ausbildung der Wärmefelder und der Schweißverbindung, Größe der WEZ, Anwesenheit der Schmelzlinse, usw. abgeleitet. Diese werden durch umfangreiche metallografische Untersuchungen ermittelt. Zudem soll der Verbindungsmechanismus bei Schweißungen ohne erkennbare Schweißlinse näher untersucht und geklärt werden.

Ziel ist die Auswahl geeigneter Qualitätskriterien anhand der geometrischen und werkstofflichen Veränderungen in der Fügeebene.

#### AP1.4 Untersuchung der statischen und dynamischen Verbindungseigenschaften

Die abzuleitenden differenzierten Qualitätskriterien sollen nicht nur die Prozessstabilität und Verbindungsgeometrie berücksichtigen, sondern auch die statischen und dynamischen Verbindungsfestigkeiten mit einbeziehen. Vor allem sind diese zur Beurteilung der Zulässigkeit von Schweißspritzern und Schweißungen ohne sichtbare Schmelzlinse notwendig, speziell bei den Verbindungen von Werkstoffen mit unterschiedlichen Festigkeiten. Im Rahmen des AP1.4 ist die Durchführung von quasistatischen Kopfzugversuchen und einer dynamischen Prüfung mit Hilfe eines Fallturms geplant, deren Ergebnisse eine Aussage über den Einfluss von vorher definierten Qualitätsgrenzen auf die Eigenschaften von Kurzzeitschweißverbindungen liefern.

Das Ziel des AP1.4 ist die Ermittlung der Verbindungsfestigkeiten in Abhängigkeit der aufgestellten Prozessfenster. Innerhalb der Prozessfenster wird zudem der Einfluss von Schweißspritzern und Haftschweißungen auf die Verbindungsfestigkeit bestimmt und eine Aussage über die Zulässigkeit von Schweißspritzern präzisiert.

#### AP2 Ausarbeitung einer Methodik zur Analyse der Qualitätsmerkmale anhand von Prozessgrößen und Verbindungscharakteristiken

Die Betrachtung sehr kurzer Schweißprozesse unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten, dient zur Ausarbeitung von Qualitätskriterien für Schweißverbindungen ohne Schmelzlinse anhand von Prozessgrößen und Verbindungscharakteristiken.

#### AP2.1 Analyse der Qualitätsmerkmale anhand von Prozessgrößen und Festigkeiten

Die Qualitätsmerkmale, die im Rahmen der AP1.2 und AP1.3 abgeleitet wurden, werden mit Bezug auf die Festigkeitseigenschaften aus AP1.4 präzisiert. Die resultierenden Qualitätskriterien werden in Zusammenhang mit den Prozessparameterverläufen (Schweißstrom, -spannung, Elektrodenkraft, Elektrodenweg), äußeren Erscheinungen, z.B. Intensität der Spritzerbildung betrachtet. Es werden daraus die Richtlinien zur Beurteilung der Qualität von Schweißverbindungen abgeleitet. Anhand der neuentwickelten Qualitätskriterien erfolgt die Ableitung und Überprüfung von Prozessfenstern, die weiter direkt als Vorgaben beim Schweißen genutzt werden.

Das Ziel ist die Verifizierung der Prozessfenster aus AP1.2 für Kurzzeitschweißprozesse. Des Weiteren erfolgt die Ableitung von Qualitätskriterien für Kurzzeitschweißungen mit Rücksicht auf Prozessstabilität, geometrische Änderungen der Fügestelle sowie Festigkeit der Fügeverbindung

#### AP2.2 Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung von Kurzzeitschweißungen anhand metallographischer Untersuchungen

Auf Basis der Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen sollen anhand metallographischer Untersuchungen Kriterien abgeleitet werden, welche es ermöglichen, Qualitätsaussagen für Kurzzeitschweißungen am Schliffbild zu ermöglichen. Von der Forschungsstelle wird eine Methode zur Schliffbildanalyse angestrebt welche es ermöglicht, anforderungsgerechte Schweißungen von Haftschweißungen zu unterscheiden.

#### AP3 Zusammenfassung der Ergebnisse, Abschlussbericht

## 6. Verwendete Werkstoffe und Probenvorbereitung

### 6.1. Verwendete Werkstoffe

Für die Untersuchungen wurden drei verschiedene Blechgüten mit einer Blechdicke von 1,5 mm und zwei verschiedene Funktionselemente ausgewählt, siehe Tabelle 1. Der Werkstoff CR340LA ist ein niedriglegierter und gut umformbarer Stahl, welcher im Karosseriebau häufig für Bestandteile der Außenhaut verwendet wird. Der zweite Versuchswerkstoff ist CR440Y780T, ein Dualphasenstahl mit höheren Festigkeiten als CR340LA. Beide Versuchswerkstoffe sind feuerverzinkt mit einer nominellen beidseitigen Auflagenmasse von 50-70 g/m<sup>2</sup>. Beim dritten Blechwerkstoff handelt es sich, um einen presshärtbaren Mangan-Bor-Stahl. Dieser ist mit einer Aluminium-Silizium-Beschichtung mit 150 g/m<sup>2</sup> überzogen und wird in zwei verschiedenen Wärmebehandlungsstufen verwendet.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Werkstoffe

| Grundwerkstoff       | Beschichtung | Blechdicke / mm |
|----------------------|--------------|-----------------|
| CR340LA              | +GI50/50     | 1,5             |
| CR440Y780T           | +GI50/50     | 1,5             |
| 22MnB5               | +AS150       | 1,5             |
| Elementwerkstoff     | Beschichtung | Gewinde         |
| Unlegierter Baustahl | unverzinkt   | M5              |
| Unlegierter Baustahl | verzinkt     | M6              |

Bei den Funktionselementen handelt es sich um zwei verschiedene Vierkantschweißmuttern aus unlegiertem Baustahl. Die Varianten sind zwei verschiedene metrische Gewinde – M5 und M6 – und die Beschichtung. Die M5 Vierkantschweißmutter ist unverzinkt, die M6 Vierkantschweißmutter ist verzinkt.

### 6.2. Werkstoffanalyse

Zunächst werden Werkstoffe hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung charakterisiert. Dabei erfolgt eine Bestimmung der Elemente und deren Gehalt mittels Atomemissionsspektroskopie (AES). Eine Bestimmung der Zinkauflagemasse erfolgt durch die chemische Entzinkung. Zur Sicherstellung der getroffenen Aussagen wird das verwendete Material hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften untersucht.

#### 6.2.1. Chemische Analyse

Die chemische Zusammensetzung des Materials wird mittels AES ermittelt. Dabei werden jeweils drei verschiedenen Stellen Messungen durchgeführt. Ein Vergleich der Mittelwerte der Messung mit den Angaben aus VDA 239-100 ist in Tabelle 2 zu sehen. Der Werkstoff erfüllt damit die Forderungen.

Für den zweiten benutzten Werkstoff erfolgte dies ebenfalls, vergleiche Tabelle 3. Auch hier zeigte die stichprobenartige Untersuchung, dass der Werkstoff die Forderungen der Norm hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung erfüllt.

Tabelle 2 Vergleich der ermittelten chemischen Zusammensetzung mit den Sollwerten aus VDA 239-100 für HX340LA

| Werkstoff |                               | C         | Si       | Mn        | P          | S          | Al         | Ti        | Nb        |
|-----------|-------------------------------|-----------|----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| HX340LA   | Sollwerte aus VDA239-100 [24] | Max. 0,12 | Max. 0,5 | Max. 1,00 | Max. 0,030 | Max. 0,025 | Min. 0,015 | Max. 0,15 | Max. 0,09 |
|           | AES                           | 0,0717    | 0,0090   | 0,868     | 0,0065     | 0,0053     | 0,0376     | 0,001     | 0,0472    |

Tabelle 3 Vergleich der ermittelten chemischen Zusammensetzung mit den Sollwerten aus VDA 239-100 für CR440Y780

| Werkstoff |                               | C         | Si        | Mn        | P          | S          | Al        | Ti+Nb     | Cr+Mo    | B          |
|-----------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|----------|------------|
| CR440Y780 | Sollwerte aus VDA239-100 [24] | Max. 0,18 | Max. 0,80 | Max. 2,50 | Max. 0,080 | Max. 0,015 | 0,015-2,0 | Max. 0,15 | Max. 1,4 | Max. 0,005 |
|           | AES                           | 0,1237    | 0,1823    | 2,044     | 0,0097     | 0,0037     | 0,0405    | 0,0255    | 0,2639   | 0,0008     |

Die Ergebnisse der chemischen Zusammensetzung für 22MnB5 ist in Tabelle 4 dargestellt. Die ermittelten Werte erfüllen die Anforderung aus der Norm.

Tabelle 4 Vergleich der chemischen Zusammensetzung mit den Sollwerten des Hersteller ArcelorMittal für 22MnB5+AS150

| Werkstoff |                             | C      | Si     | Mn    | P      | S     | Al         | Ti+Nb  | Cr+Mo  | B       |
|-----------|-----------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|------------|--------|--------|---------|
| 22MnB5    | Nach Herstellerangaben [25] | 0,25   | 0,4    | 1,4   | 0,03   | 0,01  | 0,01 – 0,1 | 0,12   | 1,0    | 0,005   |
|           | AES                         | 0,2138 | 0,2426 | 1,236 | 0,0124 | 0,002 | 0,031      | 0,0525 | 0,2247 | <0,0030 |

Aufgrund der fehlenden chemischen Zusammensetzung für die verwendeten Mutterwerkstoffen, wurden deren Zusammensetzung mit AES ebenfalls bestimmt. Das Ergebnis für die verwendeten Muttern ist in Tabelle 5 dargestellt. Die Messungen lassen den Schluss zu, dass beide aus demselben Werkstoff bestehen, einen einfachen Baustahl ohne komplexe Legierungszusammensetzung. Die beiden Muttertypen unterschieden sich somit nur aufgrund der Beschichtung. Die Schweißelemente des Typ M6 besitzen eine Zinkbeschichtung. Die Auflagemasse dieser wird anschließend noch bestimmt.

Tabelle 5 Chemische Zusammensetzung der verschiedene Muttertypen mittels AES

| Muttertyp | Fe in wt% | C in wt% | Si in wt% | Mn in wt% | P in wt% | S in wt% | Cr in wt% | Ni in wt% | Al in wt% |
|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| M5        | 99,32     | 0,1341   | 0,0064    | 0,3774    | 0,0126   | 0,0078   | 0,0333    | 0,0081    | 0,03777   |
| M6        | 99,35     | 0,1357   | 0,0063    | 0,3665    | 0,0118   | 0,0049   | 0,0195    | 0,0077    | 0,0369    |

### 6.2.2. Überprüfung der Beschichtung

Um die Auflagemasse des aufgetragenen Zinkes zu bestimmen wird ein gravimetrisches Verfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse nach DIN EN ISO 1460 angewandt. Bei den

Blechwerkstoffen wurde eine quadratische Geometrie mit 75x75 mm genutzt. Bei den Muttern wurde das Funktionselement benutzt. Zur Bestimmung der Auflagenmasse werden die Proben zunächst mit einer Feinwaage gemessen. Anschließend werden sie in ein Gefäß gefüllt mit 20%iger Salzsäure mit 3,5 mg/l Urotropin gelegt. Dabei wird die Zinkbeschichtung aufgelöst und es bildet Wasserstoff in Form von Blasen an der Probe. Die Probe liegt dabei solange in dem Reagenz bis keine Blasenbildung mehr auftritt. Die Probe wird dann herausgenommen und zunächst unter fließendem Wasser. Im Anschluss wird sie in ein Tauchbad aus Alkohol gelegt und anschließend getrocknet. Abschließend wird die Probe mit derselben Feinwaage gewogen. Mit Hilfe der Massendifferenz und der Probenflächen kann die Auflagenmasse berechnet werden.

Tabelle 6 Vergleich der experimentell bestimmten Auflagenmasse mit den Richtwerten aus Norm und VDA

| Werkstoff  | Experiment                        |                    | Nach VDA 239-100 |  |                                   | Nach DIN EN 10346 |   |
|------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|--|-----------------------------------|-------------------|---|
|            | Auflagenmasse in g/m <sup>2</sup> | Schichtdicke in µm | GI               | Auflagenmasse je Seite (Einflächenprobe) in g/m <sup>2</sup> | Dicke je Seite (informativ) in µm | Z                 | Theoretische Anhaltswerte für Schichtdicken je Seite bei der Einzelflächenprobe in µm |
| CR340LA    | 46,53                             | 6,46               | GI40/40          | 40-60  | 5,6-8,5                           | Z100              | 5-12  |
| CR440Y780T | 54,55                             | 7,58               | GI50/50          | 50-70  | 7,0-10                            | Z100              | 5-12  |

In Tabelle 6 ist das Ergebnis der Bestimmung der Auflagenmasse und die Einordnung nach VDA 239-100 und nach DIN EN 10346 dargestellt. Beide verzinkte Werkstoffe erfüllen nach DIN EN 10346 die Anforderungen an Z100.

Die Beschichtung des Werkstoffs 22MnB5 ist eine Aluminium-Silizium-Beschichtung. Diese lässt sich nicht auf obige Weise bestimmen. Um dennoch die Auflagenmasse zu überprüfen wird ein Mikroschliff angefertigt und anhand dessen die Dicke der Beschichtung ausgemessen. Die Messung erfolgt an zwei verschiedenen Schliffen mit jeweils mehr als 10 Einzelmessungen. Das Ergebnis ist in Tabelle 7 dargestellt und bestätigt, dass die Schichtdicken der Norm entsprechen.

Tabelle 7 Überprüfung der Schichtdicke des Werkstoffes 22MnB5

| Probe     | Schichtdicke in µm | Nach DIN EN 10346    |               |             |
|-----------|--------------------|----------------------|---------------|-------------|
|           |                    | Typischer Wert in µm | Bereich in µm | Bezeichnung |
| Schliff 1 | 25,53±2,26         | 25                   | 19 – 33       | AS150       |
| Schliff 2 | 25,98±3,35         | 25                   | 19 – 33       | AS150       |

### 6.2.3. Presshärten

Der Werkstoff 22MnB5 wird in zwei verschiedenen Wärmebehandlungsstufen pressgehärtet. Dafür werden ein geeigneter Ofen und eine geeignete Presse benötigt. Diese sind in AiF 18.939B [26] beschrieben. Die Wärmebehandlung erfolgt bei zwei verschiedenen Ofentemperaturen, 900 °C und 950 °C. Die Ofenhaltezeit beträgt jeweils 6 Minuten. Anschließend wird das Blech zügig in die Presse gelegt und diese geschlossen.

Ziel der Wärmebehandlung ist die Erzeugung eines martensitischen Gefüges. Durch die Wärmebehandlung werden in der Beschichtung verschiedene Phasen ausgebildet. Diese Phasen und deren Anteil haben Einfluss auf den Schweißprozess hinsichtlich der Prozessfenster. Umfangreiche Ergebnisse dazu sind in AiF 18.939B erarbeitet worden. Entsprechend dieser Resultate wurden zwei Wärmebehandlungen mit unterschiedlicher Schweißignung ausgewählt, vgl. Abbildung 4. Durch die Wärmebehandlung wird ein Gefüge aus Martensit bei beiden Parametern erzeugt, es treten jedoch Unterschiede in der Beschichtung auf. Im Ausgangszustand besteht die

Beschichtung aus einer kleinen intermetallischen Schicht und Metallischen Aluminium-Silizium. Daneben treten silliziumreiche Nadeln (grau) auf. Im wärmebehandelten Zustand ist besteht die Beschichtung aus verschiedenen intermetallischen Verbindungen. Bezüglich weiterer Informationen hinsichtlich Zusammensetzung und ihre Auswirkungen auf das Schweißergebnis wird auf AIF18.939B [26] verwiesen.[26][25]

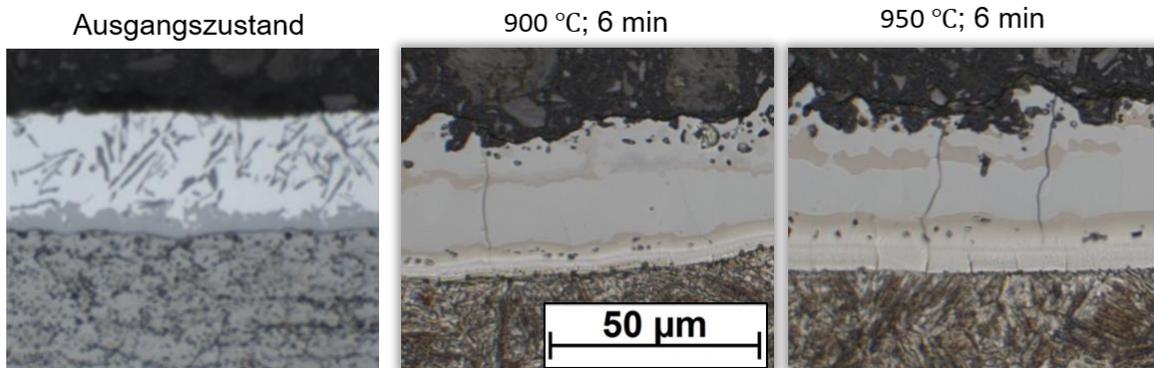


Abbildung 4 Veränderte Erscheinungsform der Aluminium-Silizium Beschichtung bei verschiedenen Presshärteparametern

#### 6.2.4. Mechanische Werkstoffeigenschaften

Zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften werden Zugversuche durchgeführt. Es werden je 5 Proben in Längs- und Querrichtung pro Werkstoff entnommen. Die Proben selbst sind Zugproben nach DIN 50125. Eine solche ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Zugversuche werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,002 1/s statt.

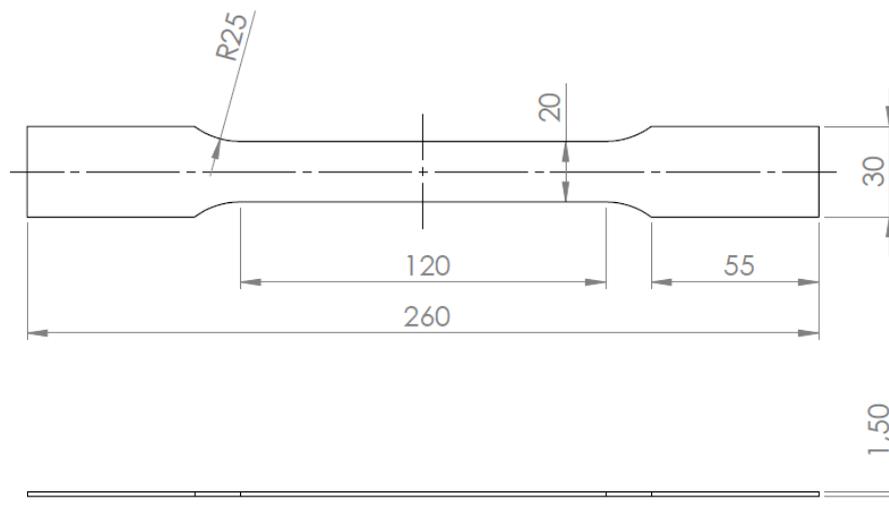


Abbildung 5 Geometrie der verwendeten Flachzugprobe nach DIN 50125 zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Blechwerkstoffe

Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Zugversuchen mit den genormten Werkstoffeigenschaften ist in Tabelle 8 aufgelistet. Die ermittelten Kennwerte entsprechen den Vorgaben an dem Werkstoff. Die Eigenschaften des pressgehärteten 22MnB5 sind in AiF 18.939 ausführlich beschrieben

[26]. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse aus den Zugversuchen für die beiden Wärmebehandlungszustände dargestellt.

Tabelle 8 Vergleich der experimentell ermittelten mechanischen Kennwerte mit den geforderten Eigenschaften

| Werkstoff               | Streckgrenze $R_{p0,2}$ MPa |        |      |      | Zugfestigkeit $R_m$ in MPa |        |      |      |
|-------------------------|-----------------------------|--------|------|------|----------------------------|--------|------|------|
|                         | Experiment                  |        | Norm |      | Experiment                 |        | Norm |      |
|                         | Längs                       | Quer   | Min. | Max. | Längs                      | Quer   | Min. | Max. |
| CR340LA                 | 432±4                       | 404±48 | 340  | 430  | 505±4                      | 489±6  | 410  | 520  |
| CR440Y780T              | 492±12                      | 494±26 | 440  | 550  | 836±17                     | 846±12 | 780  | 900  |
| 22MnB5<br>900°C<br>6min |                             |        |      |      |                            |        |      |      |

Tabelle 9 Vergleich der erzielten Ergebnisse aus dem Zugversuch für 22MnB5 in den beiden verwendeten Wärmebehandlungsstufen

| Ofentemperatur in °C | Ofenhaltezeit in s | Streckgrenze $R_{p0,2}$ in MPa | Zugfestigkeit $R_m$ in MPa |
|----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 900                  | 360                | 1022±57                        | 1488±23                    |
| 950                  | 360                | 1038±43                        | 1481±16                    |

## 6.3. Probengeometrie

### 6.3.1. Probenblechdimensionierung

Die Fügeverbindung wird zwischen einem Funktionselement und einem Blechprobenkörper hergestellt. Für alle Blechprobenkörper wird eine einheitliche Abmessung in Anlehnung der Standardproben für die Meißelproben nach SEP 1220-2 von 45 x 45 mm gewählt. In Abhängigkeit des zu verschweißenden Funktionselements ist der Lochdurchmesser zu dimensionieren. Für Funktionselemente mit M5 Regelgewinde beträgt der nach DIN 928 vorgeschlagene Lochdurchmesser  $d = 7$  mm, für Funktionselemente mit M6 Regelgewinde beträgt der Lochdurchmesser  $d = 8$  mm. Der gewählte Durchmesser beträgt jedoch abweichend zu den DIN Angaben  $d=6,1$  mm und  $d=7,1$  mm wodurch mehr Grundwerkstoff Fläche zur Anbindung der Buckel zur Verfügung steht. Zur Übersicht sind die genannten Größen im nachfolgenden tabellarisch (Tabelle 10) aufgelistet. Eine Prinzipskizze ist Abbildung 6 zu entnehmen.

Tabelle 10: Abmessungen der Proben

| Parameter             | Regelwerk | Gewählte Abmessung / mm |
|-----------------------|-----------|-------------------------|
| Außenabmessung Proben | SEP1220-2 | $a = 45,0$ ; $b = 1,5$  |
| Lochdurchmesser M5    | DIN 928   | $d_4 = 6,1$             |
| Lochdurchmesser M6    | DIN 928   | $d_4 = 7,1$             |

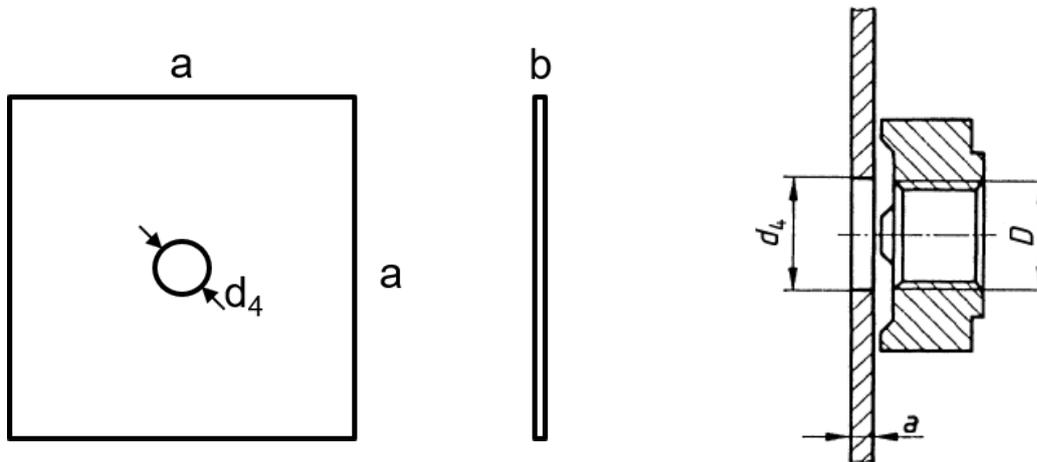


Abbildung 6: Prinzipskizze einer Schweißprobe

### 6.3.2. Probenpositionierung

Abbildung 7 zeigt die gewählte Anordnung von Vierkantschweißmutter zum Blech. Diese Anordnung ermöglicht eine leichtere Probenpräparation für die Metallographische Untersuchung. Das Probenblech kann problemlos in der Einspannung der Schneidvorrichtung platziert werden und ein diagonaler Trennschnitt durch die Fügezone erfolgen.

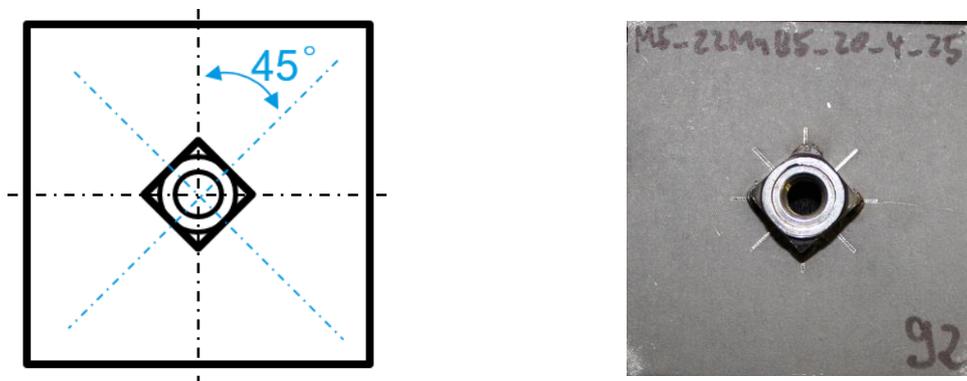


Abbildung 7: Prinzipskizze zur Erleichterung der Probenpositionierung für das Trennen und eine geschweißte Probe

### 6.2.3. Probenpräparation Metallographische Untersuchung

Die Entnahme der Querschliffproben erfolgt mit einem Abstand von ca. 0,5 mm zur Symmetrieachse, siehe Abbildung 8. Die Annäherung an die Querschlifffläche erfolgt nach Einbettung der Querschliffprobe durch Abschleifen auf dem Tellerschleifer. Somit wird gewährleistet, dass im späteren Schliffbild die Symmetrieebene betrachtet werden kann. Anschließend werden die Proben mit Nital geätzt.

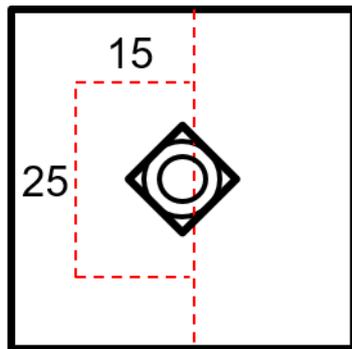


Abbildung 8: Skizze der Probenpräparation für metallographischen Untersuchung

#### **6.2.4. Bestimmung der Gewindegängigkeit, der Kopfzugkraft und des Bruchdrehmomentes**

In den ersten Untersuchungen wurde verschiedene Prüfpläne mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung erstellt. Diese benötigen Kriterien zur Bewertung der erzeugten Zustände, um eine Aussage treffen zu können. Als Kriterien wurde die Gewindegängigkeit, die Kopfzugkraft, das Bruchdrehmoment und die mögliche Schweißlinsenbildung gewählt. Die Gewindegängigkeit wurde durch das Einschrauben von beiden Seiten der Verbindung getestet. Die Bewertung beläuft sich auf gewindegängig und nicht gewindegängig. Dabei ist zu vermerken, dass eine Verbindung als nicht gewindegängig eingestuft wird, wenn das beidseitige Einschrauben misslingt. Die Bestimmung der Kopfzugkraft und des Bruchdrehmomentes erfolgt unter Zuhilfenahme einer entwickelten Prüfvorrichtung. Diese ist in Abbildung 9 dargestellt und erlaubt das Sperren von Freiheitsgraden bei der Prüfung. Die Schweißprobe wird in das Blech auf dem Grundbock gelegt. Anschließend wird der Aufnahmeblock aufgeschraubt.

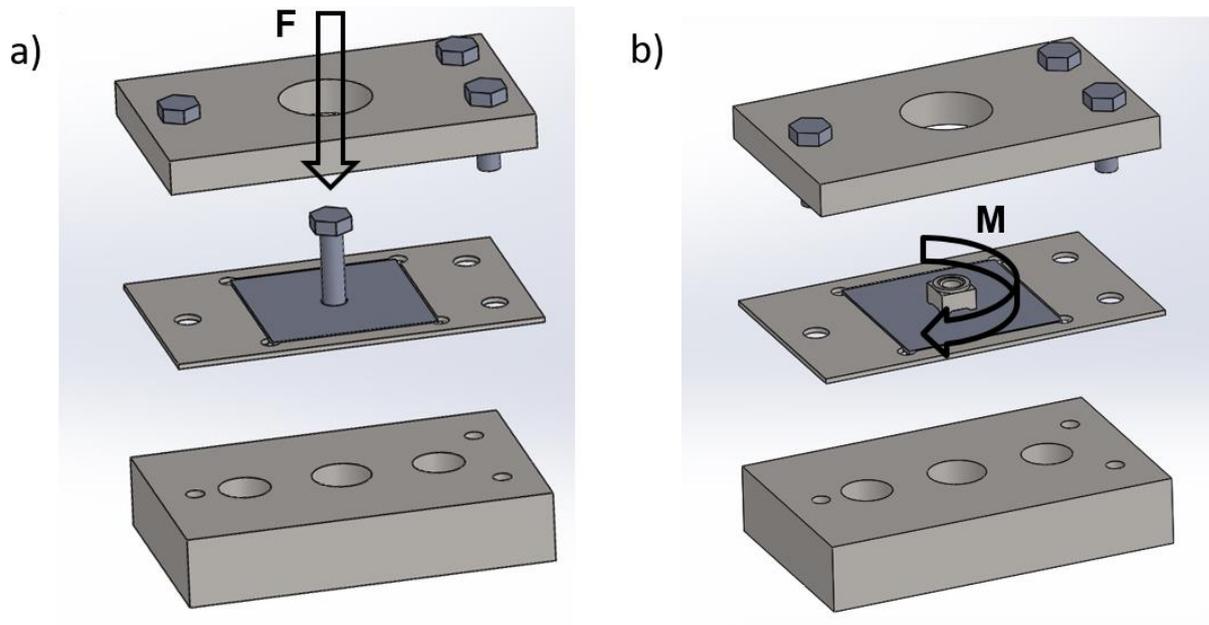


Abbildung 9 Entwickelte Prüfvorrichtung a) für die Bestimmung der Kopfzugkraft – b) für die Bestimmung des Bruchdrehmomentes

Bei der Kopfzugprüfung wird eine Schraube auf der Blechseite in die Verbindung eingeschraubt. Anschließend wird die Aufnahme in eine Zugmaschine der Firma der Zwick eingespannt. Die Kraft wird über den Schraubenkopf auf die Verbindung aufgebracht. Für die Schraube empfiehlt es dieselbe Festigkeitsklasse wie die Mutter zu wählen. Zur Bestimmung des Bruchdrehmoments wird die Probe in die Vorrichtung eingespannt. Das Drehmoment wird mit einem digitalen Drehmomentschlüssel bestimmt. Dieser wird mit einem entsprechenden Adapter auf das Funktionselement angebracht.

## 7. Ergebnisse der Arbeitspakete

### AP1 Experimentelle Untersuchung von Kurzzeitschweißprozessen mittels MFDC-Inverter- und KE-Schweißanlagen

Im Rahmen der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses wurde entschieden die Schweißungen des AP1 zunächst auf einer Schweißanlage durchzuführen und die vergleichende Betrachtung zwischen den Anlagen in Stichversuchen mit ausgewählten Parametersätzen durchzuführen.

#### AP1.1 Anpassung der Anlagentechnik an Kurzzeitprozesse und Aufbau der Messsensorik

Im Rahmen des AP1.1 wurde die Tauglichkeit zweier Schweißanlagen (MFDC-Ständermaschinen) hinsichtlich der Bereitstellung schneller Stromanstiegsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig sehr kurzen Schweißzeiten überprüft. Dazu wurde die Messtechnik dahingehend angepasst, dass die Parametererfassung von Schweißstrom und -spannung, Elektrodenweg, Elektrodenkraft an beiden Anlagen unter denselben Bedingungen erfolgt. Zum Einsatz kommt dabei ein Überwachungssystem der Firma HKS-Prozesstechnik. Für die Aufzeichnung des Schweißstroms wird ein Rogowski-Gürtel genutzt. Die Messung der Schweißspannung im Sekundärkreis erfolgt durch einen Abgriff an den Elektrodenkappen und die Bestimmung der Elektrodenkräfte erfolgt durch Quarzkristall-Kraftsensoren. Die Erfassung der relativen Elektrodenbewegung wird über einen Absolutwegmesssensor erfasst.

Abbildung 10 zeigt die Einzelkomponenten in einer Explosionsdarstellung der einzelnen Anlagenkomponenten. Für die Untersuchungen wurde eine Basiselektrode mit gefedertem Zentrierstift verwendet. Diese Sonderelektrode ermöglicht eine Reproduzierbarkeit der Positionierung der Schweißmutter zum Basisblech und bietet dem Gewinde Schutz vor Schweißspritzern.

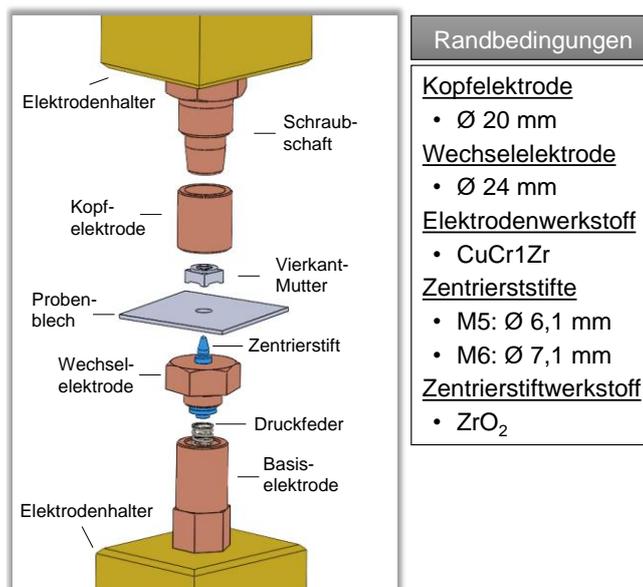


Abbildung 10: Explosionsdarstellung der Anlagenkomponenten inklusive der experimentellen Randbedingungen der Sonderelektrode

Die beiden Anlagen weisen verschiedene Systeme zur Kraftaufbringung und -steuerung auf, so dass ein Vergleich unterschiedlichen Nachsetzverhaltens im weiteren Versuchsverlauf möglich ist. Darüber hinaus haben beide Anlagen unterschiedliche Inverter-Stromquellen, sodass die Auswirkungen des Stromanstiegsverhaltens auf das Schweißergebnis betrachtet werden können. Die Modifikation der Elektrodenhalter macht es möglich auf beiden Anlagen dieselben Elektrodenpaarungen verwenden zu können, was eine noch bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch Reduzierung der Störeinflüsse möglich macht.

Abbildung 11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Prozessgrößen Schweißstrom und -spannung, Elektrodenkraft und Elektrodenweg beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit für kurze Stromflusszeiten angepasster Mittelfrequenz-Invertertechnik. Die verwendete Schweißanlage der Fa. NIMAK GmbH erreicht dabei schnelle Stromanstiegs- und abfallzeiten von rund 7 kA/ms. Zudem verfügt das System über eine integrierte elektromagnetischer Nachsetzeinheit mit der die Elektrodenkraft über den Schweißprozess dem Sollwert nachgeregelt werden kann.

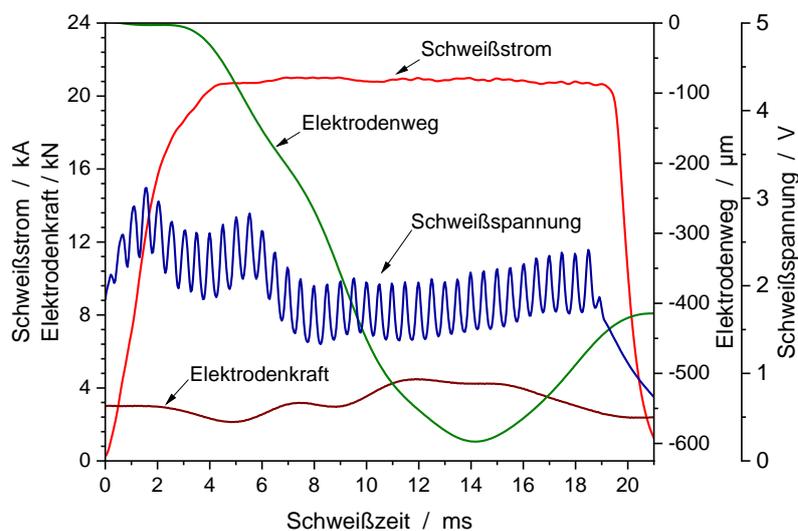


Abbildung 11: Gemessener zeitlicher Verlauf der Prozessgrößen Schweißstrom, -spannung, Elektrodenkraft und Elektrodenweg beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit einer für das Kurzzeitschweißen optimierten MFDC-Anlage für eine unbeschichtete Schweißmutter mit M5-Gewinde und dem Werkstoff CR340LA - GI50/50

Abbildung 12 stellt den zeitlichen Verlauf der Prozessgrößen Schweißstrom und -spannung, Elektrodenkraft und Elektrodenweg beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit konventioneller Mittelfrequenz-Invertertechnik dar. Die verwendete Schweißanlage erreicht dabei deutlich langsamere Stromanstiegs- und -abfallzeiten im Vergleich zur optimierten Anlagentechnik. Die Krafterzeugung erfolgte pneumatisch und ohne zusätzliche Kraftregelung. Die zeitlichen Verläufe der Elektrodenbewegung sind für beide Ständeranlagen vergleichbar.

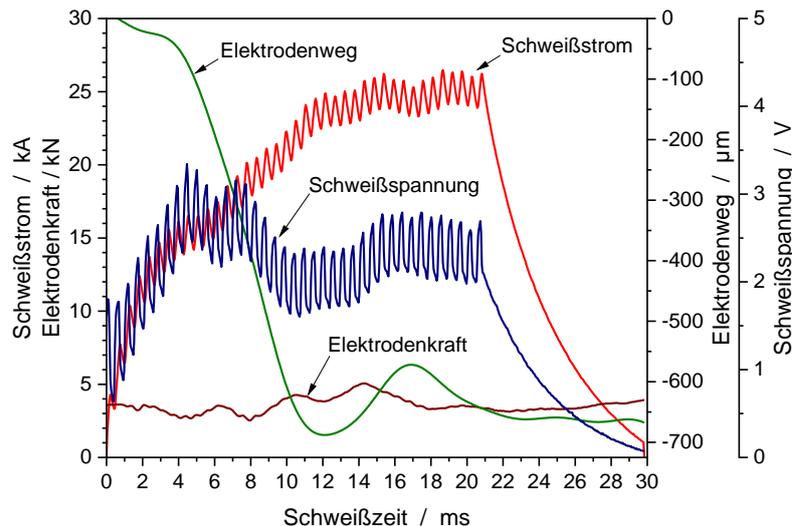


Abbildung 12: Gemessener zeitlicher Verlauf der Prozessgrößen Schweißstrom, -spannung, Elektrodenkraft und Elektrodenweg beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit konventioneller MFDC-Technik für eine unbeschichtete Schweißmutter mit M5-Gewinde und dem Werkstoff CR340LA - GI50/50

## AP1.2 Experimentelle Bestimmung der Schweißparameterfelder und Ableitung der Prozessgrenzen hinsichtlich der Schweißprozessstabilität

Den Ausgangspunkt für die nachfolgenden Untersuchungen bilden die Ermittlung der Schweißparameterfelder und die Ableitung der Prozessgrenzen hinsichtlich der Schweißprozessstabilität.

Um konkrete Qualitätskriterien für schweißlinsenfreie Schweißungen zu formulieren, ist es notwendig, diese prozesssicher und wiederholbar herzustellen. Im ersten Schritt erfolgt die Ermittlung von Schweißparameterfeldern, die das Anforderungsprofil *Schweißlinsenfreiheit*, *hinreichende* und *unzureichende Festigkeit* sowie eine *vollständige* bzw. *eingeschränkte Funktionserfüllung* abdecken. Hierfür werden Prozessgrenzen mit Hilfe der zerstörenden Prüfung, entsprechend der Kriterien aktuell gültiger Werksnormen [27] aus dem Automobilbau abgeleitet. Diese schreiben für die verwendeten Funktionselemente an der unteren Qualitätsgrenze eine Mindestkopfzugkraft und ein Mindestdrehmoment in Abhängigkeit der Gewindegröße und der Blechdicke vor. Die obere Qualitätsgrenze wird durch die Prüfung der Gewindegängigkeit (GG) festgelegt. Zusätzlich wurde das Auftreten von Schweißspritzern dokumentiert, um eventuelle Zusammenhänge zwischen ihrem Auftreten und der Gewindegängigkeit feststellen zu können. Als Ergebnis wurde die Definition von Schweißbereichen mit oben genannten Grenzen angestrebt.

Um den Versuchsaufwand bei der Ermittlung der Schweißbereiche einzugrenzen, wurde der Ansatz der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE) gewählt, um eine möglichst große Parametervariation bei gleichzeitig möglichst geringem Versuchsumfang zu erzielen. Die Planung und Auswertung erfolgte mit der Software *Minitab18*. Die Parameter der DoE ergeben sich aus den variabel einstellbaren Größen beim Buckelschweißen. Diese sind die Schweißzeit, die Schweißkraft und der Schweißstrom.

Bei der Verwendung einer DoE stellen sich im Wesentlichen zwei Fragen. Wie viele Punkte bzw. welches Modell einer DoE ist notwendig, um eine hinreichend genaue Vorhersage treffen zu können. Die zweite Frage ist welche Zielgrößen müssen betrachtet werden, um eine hinreichende Genauigkeit durch die DoE zu erhalten.

Mit Hilfe der gewählten DoE gelingt eine erste Eingrenzung der Schweißparameter zur gezielten Generierung von Verbindungen mit für AP1.2 spezifizierten Eigenschaftsprofil. Es können gezielt

Schweißungen mit unzureichender Festigkeit, linsenfremde und anforderungsgerechte Schweißungen, spritzerbehaftete Schweißungen, Schweißungen mit eingeschränkter Gewindegängigkeit und Verbindungen mit Schweißlinsenentstehung erzeugt werden. Ein Nachteil des gewählten Modells ist, dass durch die Wahl des Sternmodells mit Parameterkombinationen außerhalb des Würfels führen zu nicht schweißbaren Verbindungen. Dies wirkt sich negativ auf die Prognose aus, da sich für die Auswertung in Minitab Werte benötigt werden. Diese fiktiven Werte führen zu einer Verfälschung des Modells. Die wiederum wirkt sich auf die Güter der Prognose aus. Die Prognose selbst unterliegt teilweise sehr großen Schwankungen an beiden Grenzen über alle Kombinationen. Daher ist es nötig die DoE anzupassen. Ziel ist es Parameter, welche nicht schweißbar sind zu eliminieren. Um dies zu erreichen, wird die Elektrodenkraft auf einen Bereich von 3 bis 5 kN beschränkt. Ebenfalls wird die Schweißzeit auf den Bereich zwischen 20 und 60 ms begrenzt. Auch die Auswahl der Bewertungskriterien muss überarbeitet werden. Das Kriterium des Bruchdrehmoments war bei allen prüfbar Verbindungen erfüllt und ist daher als Kriterium nicht geeignet. Die Kopfzugkraft hingegen unterliegt einer gewissen Streuung ist jedoch als Kriterium sehr gut geeignet. Die Bewertung der Gewindegängigkeit ist schwierig in der DoE abzubilden. Bisher wurden für die drei Proben Werte zwischen 0 (keine Probe gewindegängig) bis 3 (alle Proben gewindegängig) vergeben.

In den ersten Untersuchungen wurde eine DoE bestehend aus einem Stern- und einem Würfelmodell gewählt. Durch die Wahl des Modells entstehen 20 Parameterkombinationen, welche geschweißt werden müssen. Als Kriterien wurde die Gewindegängigkeit, die Kopfzugkraft, das Bruchdrehmoment und die mögliche Schweißlinsenbildung gewählt.

Aufbauend aus den Ergebnissen der ersten DoE wurde eine zweite mit enger umrissenen Parametern entwickelt. Die Parameter sind in Tabelle 11 aufgezeigt. Die Bewertungskriterien für die DoE wurden ebenfalls modifiziert. Die Gewindegängigkeit, die Drehmomentenprüfung und die metallografischen Untersuchungen werden nicht mehr durchgeführt, da diese sich nicht für die Beurteilung geeignet haben. Die Kopfzugkraft wird weiterhin als Bewertungskriterium verwendet. Darüber hinaus werden neue Kriterien entwickelt und verwendet. Diese sind die Einbeziehung des Elektrodenwegs, der Energie und der Leistung.

Tabelle 11 Auswahl der Parameter für die zweite DoE

|               | Schweißzeit in ms | Elektrodenkraft in kN | Schweißstrom in kA |
|---------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Untere Grenze | 20                | 2                     | 10                 |
| Obere Grenze  | 60                | 5                     | 22                 |

Durch die Einschränkung der Parameter wurden alle Kombinationen schweißbar. Somit ist die Verbesserung der DoE gelungen. Dennoch traten große Abweichungen an den Bereichsgrenzen auf. Um die Bereichsgrenzen möglichst exakt zu ermitteln, wurden zusätzlich die unteren und oberen Bereichsgrenzen bestimmt.

Diese DoE lieferte gute Ergebnisse für die Werkstoffe CR340LA und CR440Y780T. Bei 22MnB5 zeigte sich, dass die gewählte Stromstärke nicht geeignet war, den sicheren Schweißbereich abzubilden. Daher wurde für diesen Werkstoff eine abweichende DoE mit angehobener Schweißstrom beginnend ab 15kA verwendet. Zusätzlich wurden weitere Punkte der DoE hinzugefügt, so dass ein teilfaktorieller Wirkungsflächenversuchsplan mit 27 verschiedenen Parametern entsteht. Ein Schema für einen solchen Versuchsplan zeigt Abbildung 13. Diese Versuchsplan wurde bei den Vergleichsschweißungen für beide benutzten Anlagen benutzt.

| Würfelmodell               |     |     |
|----------------------------|-----|-----|
| Parameter                  | Min | Max |
| Schweißstrom $I_s$ / kA    | 8   | 22  |
| Elektrodenkraft $F_E$ / kN | 3   | 5   |
| Schweißzeit $t_s$ / ms     | 20  | 60  |

| Sternmodell                |     |     |
|----------------------------|-----|-----|
| Parameter                  | Min | Max |
| Schweißstrom $I_s$ / kA    | X   | Y   |
| Elektrodenkraft $F_E$ / kN | X   | Y   |
| Schweißzeit $t_s$ / ms     | X   | Y   |

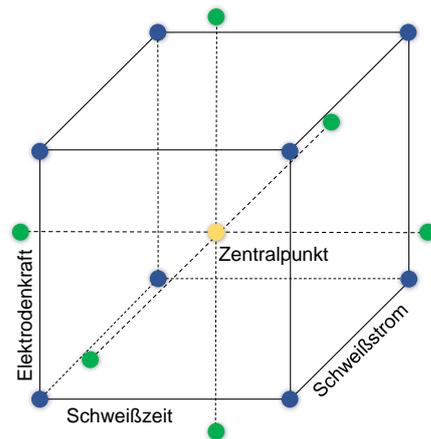


Abbildung 13: Teilfaktorierter Versuchsplan zur Ermittlung der Parameterfenster mit Zentralpunkt

Abbildung 14 zeigt zusammenfassend den gewählten Lösungsansatz. Dabei ist zu beachten, dass die Qualitätskriterien die Wahl der DoE beeinflussen. Es ist wichtig für die Verwendung einer DoE, dass die Qualitätskriterien unabhängig voneinander sind. Dies ist durch die Wahl der Gewindegängigkeit, der Kopfzugkraft, und des Mindestdrehmoments garantiert. Auch muss die Bewertung der Kriterien klar sein.

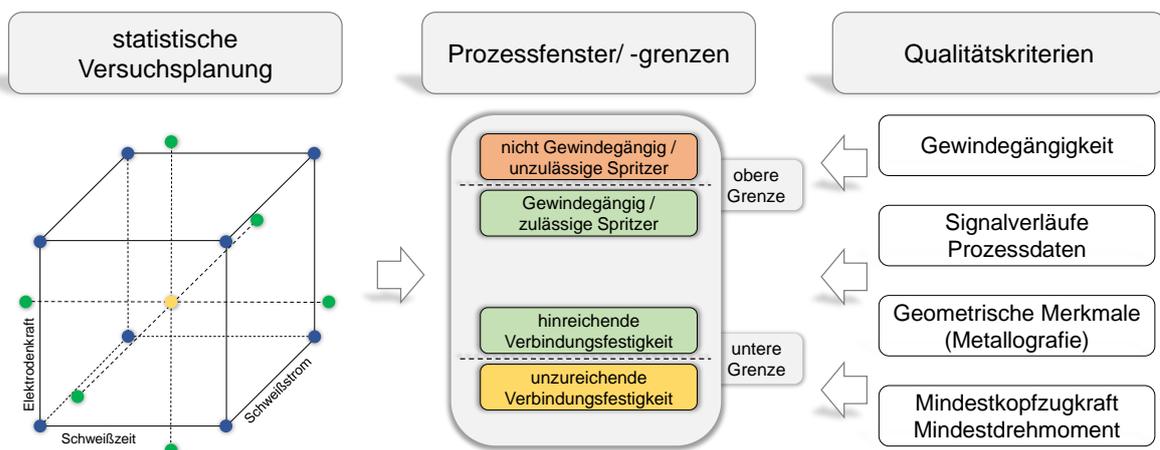


Abbildung 14: Lösungsansatz zur Ermittlung von Prozessfenstern mit den entsprechenden Grenzbereichen zur Herstellung schweißlinsenfreier Verbindungen mit gewünschtem Anforderungsprofil

Das Ergebnis der statistischen Versuchsplanung (DoE) sind Regressionsgeraden für die jeweiligen Ergebnisgrößen (Kopfzugkraft und Gewindegängigkeit). Mit diesen und der Kenntnis der gestellten Qualitätsanforderungen kann eine Prognose des Schweißbereichs erfolgen. Um einen Vergleich zum tatsächlichen Schweißbereich, wurden diese ermittelt. Exemplarisch ist dies in Abbildung 15 dargestellt.

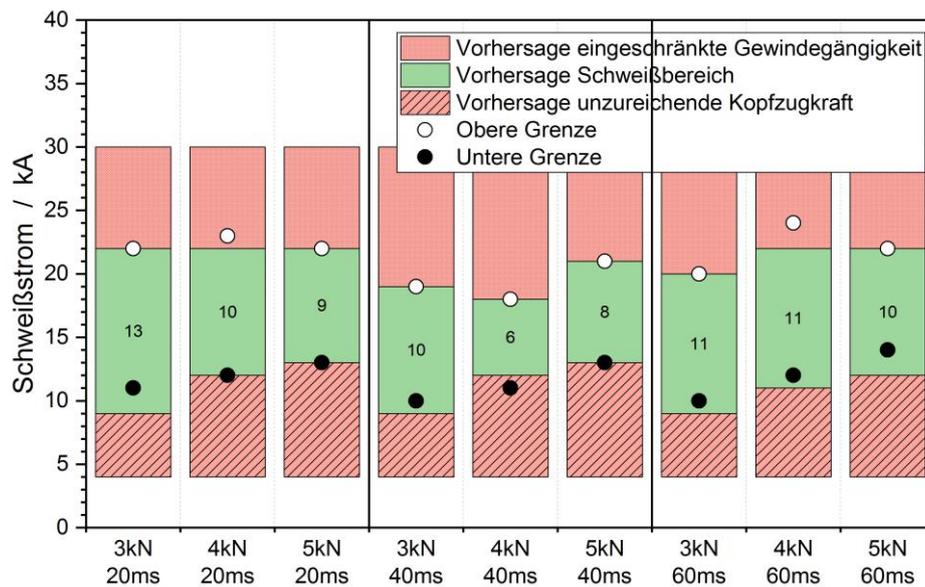


Abbildung 15 Vergleich der Schweißbereichsvorhersage auf Basis der DoE mit den realen Schweißbereichsgrenzen für die Kombination M5 auf CR440

## AP1.4 Ermittlung der statischen und dynamischen Verbindungseigenschaften

### Statische Verbindungseigenschaften

#### 22MnB5+AS150 – M5 /M6

Die Bestimmung der statischen Verbindungseigenschaften erfolgt anhand der Kopfbzugkräfte. Diese werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzeugen, für den Werkstoff 22MnB5 für die Gewindegrößen M5 und M6 bei denselben Parameter, Schweißkraft 4 kN und Schweißzeit 20 ms, ermittelt. Der Schweißstrom wird dabei in 1 kA Schritten variiert beginnend bei 12 kA. In näher der unteren von 12 bis 15 kA und der oberen Grenzen von 20 bis 25 kA des Schweißbereiches wird die Schrittweite halbiert, also auf 0,5 kA verringert. Dies liefert eine genauere Auflösung der Untersuchung. Das Abbruchkriterium der oberen Grenze ist die nicht-ausreichende Funktionserfüllung. Die Funktionserfüllung ist gewährleistet solange 2 von 3 Schweißungen bei gleichen Parametern gewindegängig sind. Die Untere Grenze wird durch Überschreiten der Mindestkopfbzugkraft erreicht. Zusätzlich werden auftretende Spritzer in Anlehnung an AiF 18.987 [22] klassifiziert und dokumentiert.

Das Ergebnis der Kopfbzugkräfte für M5 ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Mindestkopfbzugkraft wird bei 15 kA erreicht. Die Kopfbzugkräfte stagnieren bei hohen Schweißströmen um 6 kN.

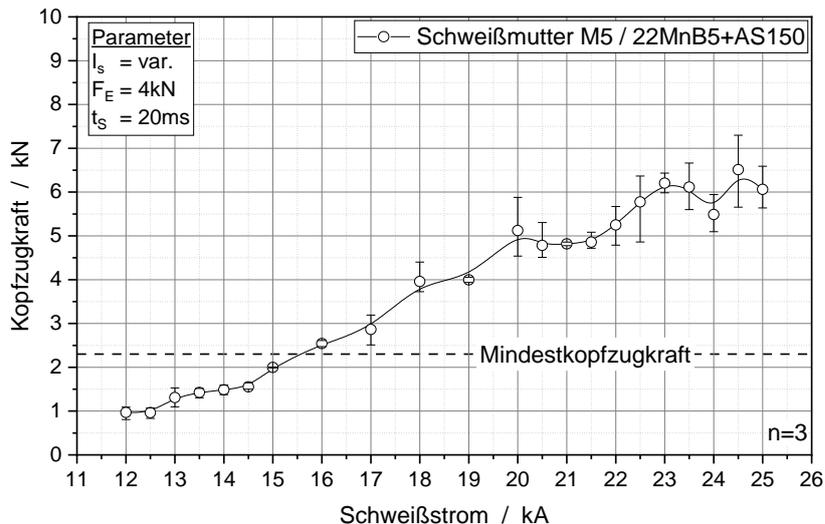


Abbildung 16: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 12 kA bis 25 kA für unbeschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M5-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150

Die Kopfzugkräfte werden für M6 analog zu M5 bestimmt. Die untere Grenze liegt im Bereich zwischen 13 und 16 kA. Dieser Bereich wurde in 0,5 kA Schritten untersucht. In gleicher Schrittweite wurden die Kopfzugkräfte für die obere Grenze zwischen 21 und 23 kA ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Mindestkopfzugkraft wird bei 15 kA erreicht. Die Kopfzugkraft stagniert bei hohen Schweißströmen. Sie erreicht ein Maximum von 8 kN.

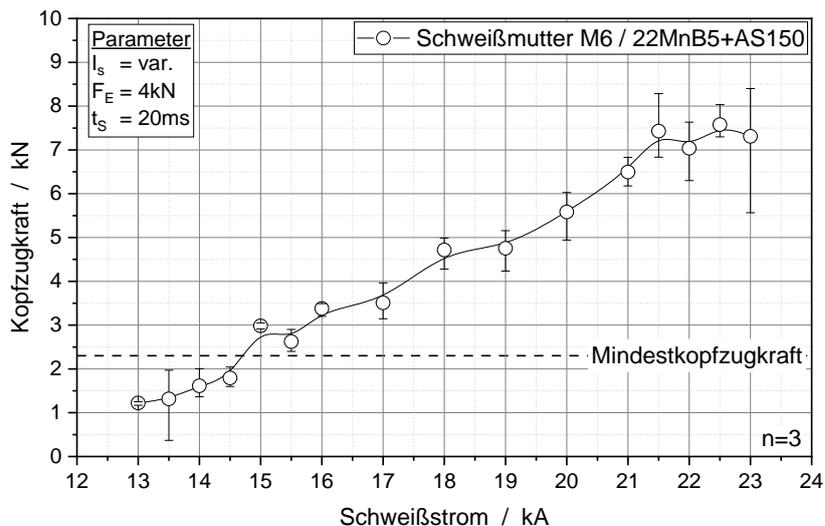


Abbildung 17: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 13 kA bis 23 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150

### CR340LA – GI50/50 – M5/M6

Für den zweiten untersuchten Werkstoff CR340LA wurden die Kopfzugkräfte für M5 bei 2 verschiedenen Parametersätzen ermittelt. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden sowohl M5 als auch M6 bei denselben Parametern geschweißt. Diese waren eine Schweißkraft von 4 kN und eine Schweißzeit von 40 ms. Als Abbruchkriterium für die obere Grenze des Schweißbereiches wurde die Gewindegängigkeit benutzt. Dies ist die mangelnde Gewindegängigkeit bei 2 von 3 Proben. Bei beiden ermittelten Bereichen wurden die Spritzerklasse zusätzlich dokumentiert.

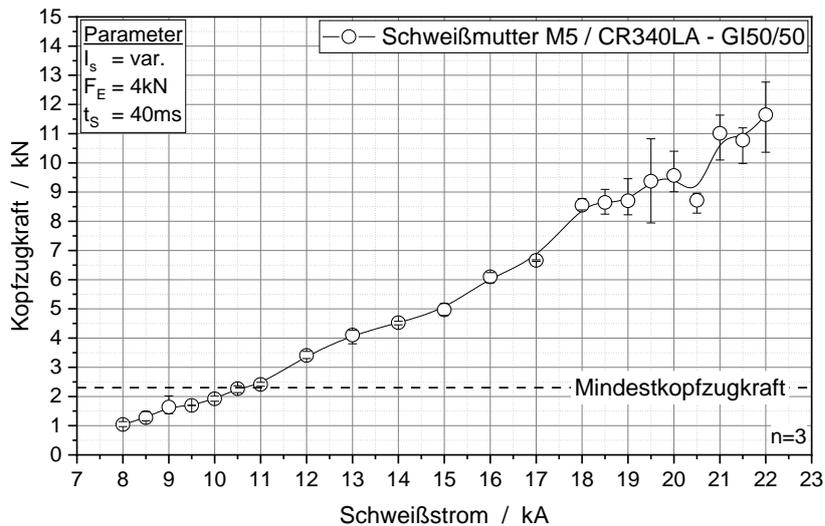


Abbildung 18: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 8 kA bis 22 kA für unbeschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M5-Gewinde auf CR340LA+GI50/50

Der Schweißbereich für 40 ms und 4 kN ist in Abbildung 18 dargestellt. Die Mindestkopfzugkraft wird bei einem Schweißstrom von 11 kA erreicht. Mit steigendem Schweißstrom steigt auch die Kopfzugkraft. Bei hohen Schweißströmen stagniert das Wachstum der Kopfzugkraft bei 12 kN. Der Schweißbereich für M6 bei 40 ms und 4 kN ist in Abbildung 19 zu sehen. Der Schweißbereich zeigt Ähnlichkeiten zu M5. Die Mindestkopfzugkraft wird ebenfalls bei 11 kA erreicht. Die maximal erreichbare Kopfzugkraft liegt ebenfalls bei 12 kN. Dies wird jedoch bei etwas höheren Schweißströmen erreicht.

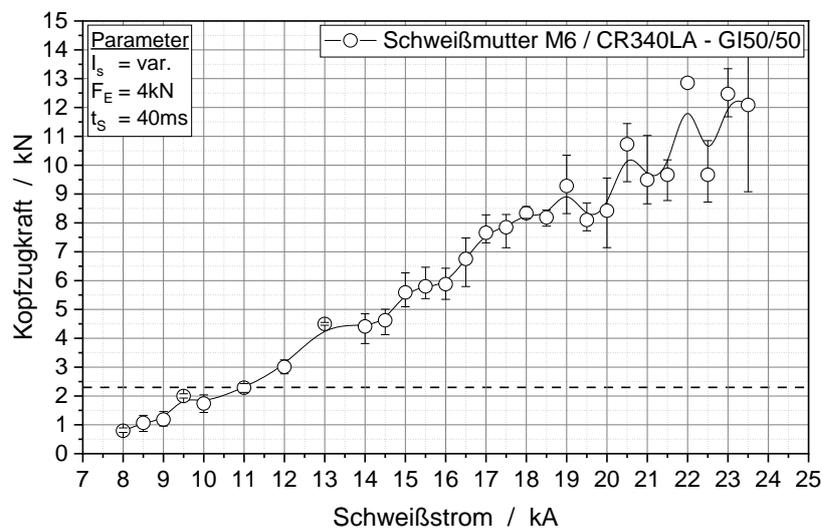


Abbildung 19: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 8 kA bis 24 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf CR340LA+GI50/50

- Kopfzugkräfte erreichen einen Maximalwert 12kN für beide Gewindegrößen

### CR440Y780T – GI50/50 – M5/M6

Die Ermittlung der Kopfzugkräfte für die Schweißbereiche findet analog zu den beiden anderen Werkstoffen statt. Um eine verbesserte Vergleichbarkeit zu erhalten werden bei CR440Y780T die

gleiche Schweißzeit von 40 ms und Schweißkraft von 3 kN verwendet. In den erwarteten Bereichen der unteren und oberen Grenzen wird eine Schrittweite von 0,5 kA verwendet. Auch hier werden die Spritzerklassen zusätzlich dokumentiert.

Das Resultat für M5 ist in Abbildung 20 zu sehen. Die Mindestkopfzugkraft wird bei einer Schweißstromstärke von 10 kA erreicht. Es ist wie bei den anderen Werkstoffen eine Zunahme der Kopfzugkraft mit Steigerung des Schweißstromes zu vermerken. Ebenfalls tritt im Bereich der oberen Grenze eine Stagnation der Kopfzugkraft auf. So erreicht M5 eine maximale Kopfzugkraft von etwa 12 kN.

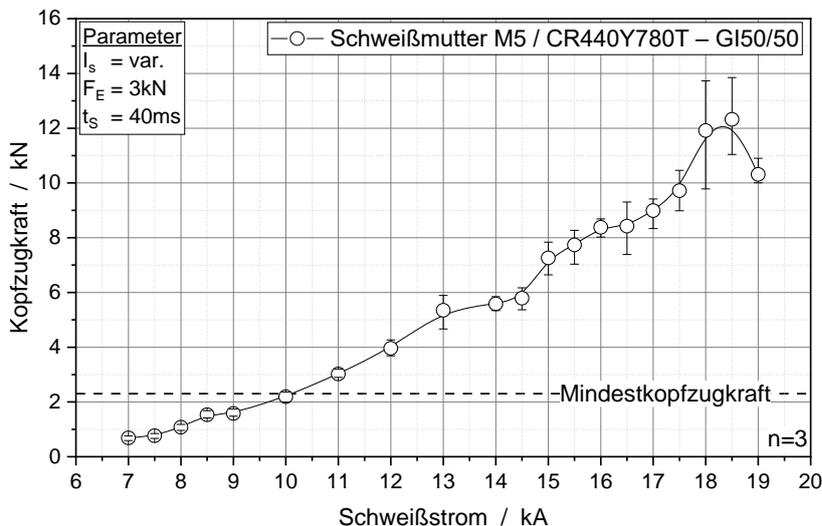


Abbildung 20: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 7 kA bis 19 kA für unbeschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M5-Gewinde auf CR440Y780T+GI50/50

Die Kopfzugkräfte in Abhängigkeit des Schweißstromes ist Abbildung 21 aufgezeigt. Es zeigen sich Ähnlichkeiten zu M5. Die Mindestkopfzugkraft wird bei 10 kA erreicht. Ebenfalls tritt eine Stagnation der Kopfzugkraft bei hohen Schweißströmen auf. Auch die maximal erreichbare Kopfzugkraft liegt wie bei M5 bei etwa 12 kA. Es ist jedoch zu vermerken, dass Streuung der Kopfzugkraft bei M6 größer ist.

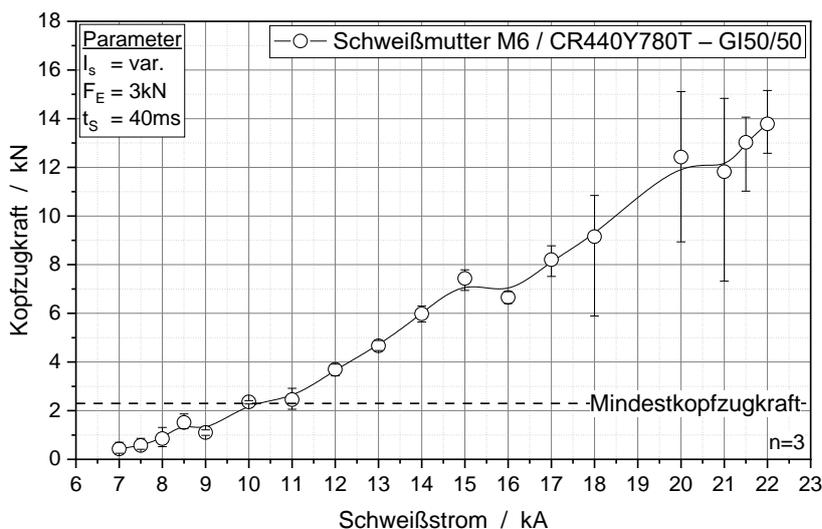


Abbildung 21: Entwicklung der maximalen Kopfzugkraft im Strombereich von 7 kA bis 22 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf CR440Y780T+GI50/50

## Dynamische Verbindungseigenschaften

Um dynamische Verbindungseigenschaften zu bestimmen, müssen die Anforderungen nach DIN EN ISO erfüllt werden. Diese beinhalten eine Prüfgeschwindigkeit oberhalb von 5 m/s. Dafür wurde ein Fallturm am IWF entwickelt. Dieser ist in Abbildung 22 zu sehen.

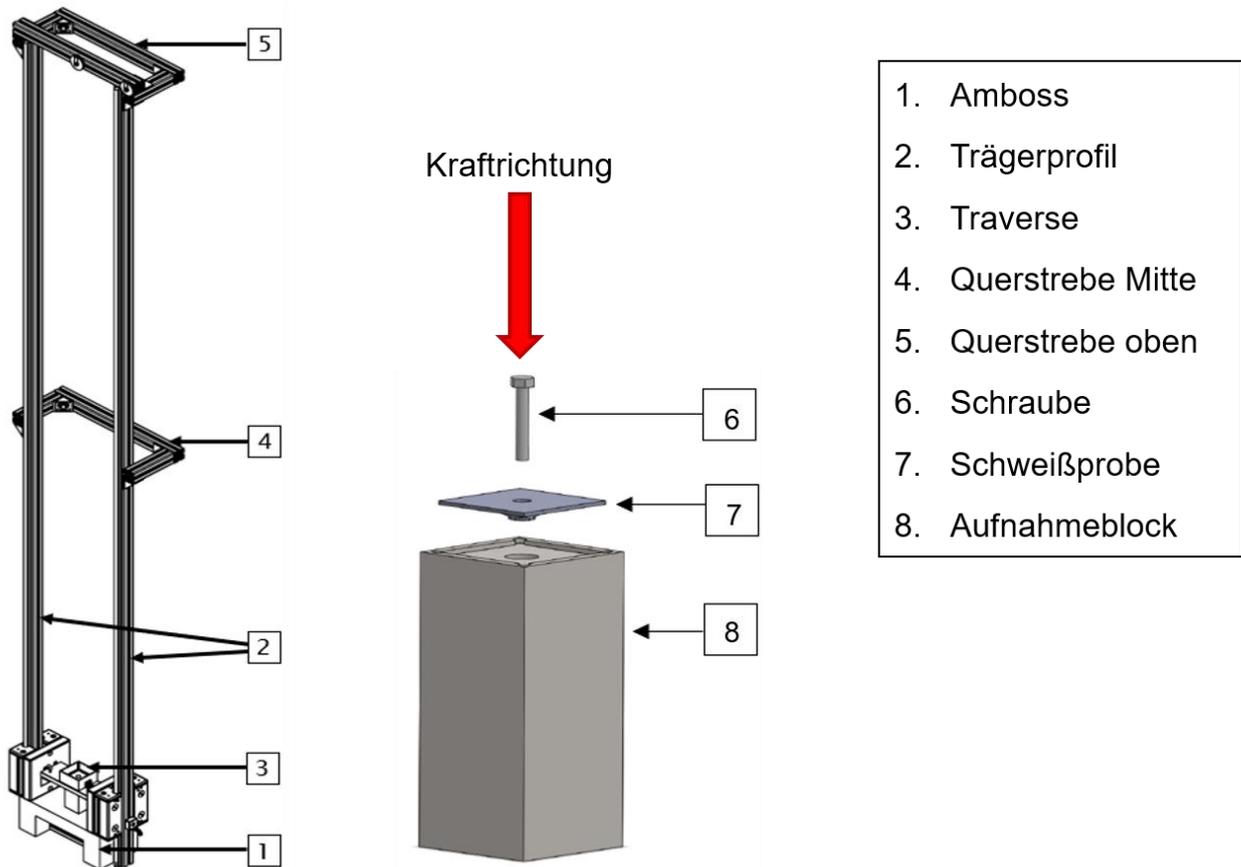


Abbildung 22 Aufbau des Fallturmes

Die geschweißten Proben wurden mit verschiedenen Aufprallenergie belegt. Dies geschieht durch Variation des Gewichts auf der Traverse. Um eine konstante kinetische Energie zu erreichen wird neben dem Fallgewicht auch die Geschwindigkeit benötigt. Diese wird durch die Fallhöhe des Gewichts bestimmt. Zu Überprüfung der erreichten Geschwindigkeit ist eine Lichtschranke enthalten, wodurch eine Geschwindigkeitsmessung erfolgen kann. Während der Evaluierung des Fallturmes hat sich eine hohe Zuverlässigkeit der erreichten Geschwindigkeit gezeigt. Die Gewichte wurden so gewählt, dass ein Unterschied von 0,1 Joule realisiert wird.

Proben einer Werkstoff-/ Parameterkombination werden nacheinander mit unterschiedlichen Gewichten mit zunehmender Masse beaufschlagt, bis ein Versagen auftritt. Dies wird für die unteren und oberen Grenzen der bestimmten Schweißbereiche der verschiedenen Werkstoffe durchgeführt. Typischer Werte für die dynamischen Prüfung sind in Abbildung 23 dargestellt. Besonders fällt auf, dass die Werte der dynamischen Prüfung für die untere Grenze in einem gemeinsamen Bereich liegen. An der unteren Grenze liegen ebenfalls vergleichbare Kopfbzugkräfte vor, nämlich die geforderte Mindestkopfbzugkraft. An der oberen Grenze zeigen die beiden duktileren Werkstoffe, CR340 und CR440, eine größere Energieaufnahme. Der Werkstoff 22MnB5 zeigt an der

oberen Grenze eine geringe Energieaufnahme. Dies ist auf das sprödere Gefüge im pressgehärteten Zustand zurückzuführen.

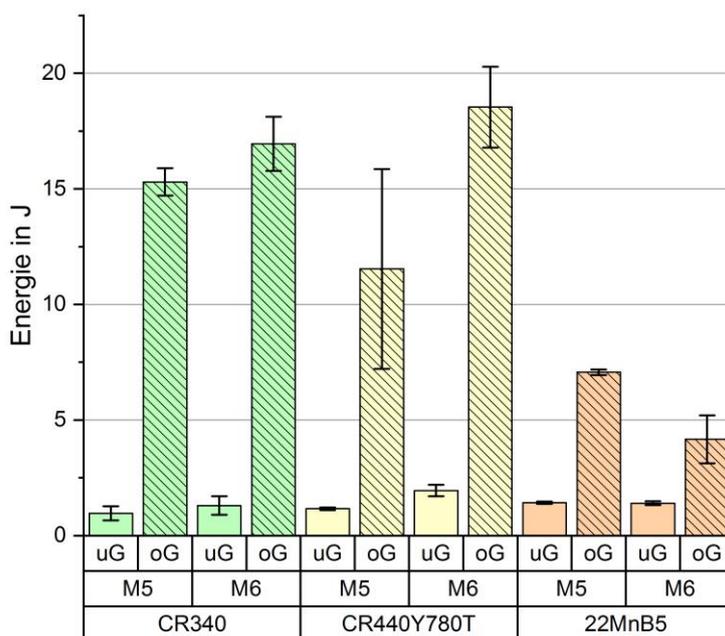


Abbildung 23 Ergebnis der dynamischen Prüfung für CR340 (M5 untere Grenze bei 10,5 kA, obere Grenze bei 22 kA; M6 untere Grenze bei 10 kA, obere Grenze bei 22 kA – bei 40 ms Schweißzeit und 4 kN Elektrodenkraft), CR440Y780T (M5 untere Grenze bei 10 kA, obere Grenze bei 19 kA; M6 untere Grenze bei 10 kA, obere Grenze 20 kA – bei 40 ms Schweißzeit und 3 kN Elektrodenkraft) und 22MnB5 (M5 untere Grenze bei 16 kA, obere Grenze bei 19 kA; M6 untere Grenze 15 kA, obere Grenze 22 kA – bei 20 ms Schweißzeit und 4 kN Elektrodenkraft)

### **Bewertung der Prozessindizes (Cp- und Cpk-Werte)**

Die Bewertung der Prozessfähigkeit wird durch die Ermittlung von Prozessindizes ermittelt. Dafür wurde eine Parameterkombination gewählt, welche die Mindestanforderungen an die Kopfzugkraft erfüllt. Diese beträgt 2,3 kN. Die benutzten Parameter sind in Tabelle 12 zu sehen.

Tabelle 12 Übersicht über die gewählten Parameterkombinationen zur Bestimmung von Prozessindizes

| Materialkombination | Schweißzeit in ms | Elektrodenkraft in kN | Schweißstrom in kA |
|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| 22MnB5/M6           | 20                | 4,0                   | 19,0               |
| CR340LA/M6          | 20                | 3,0                   | 16,0               |
| CR440Y780T/M6       | 40                | 3,0                   | 17,0               |

Für die Kombination 22MnB5 mit Vierkantschweißmutter M6 wurde die doppelte Mindestkopfzugkraft angestrebt. Die angestrebte Kopfzugkraft beträgt etwa 4 kN. Als Parameter wurde eine Schweißzeit von 20 ms, eine Schweißkraft von 4 kN und ein Schweißstrom von 19 kA gewählt. Zur Bewertung wurden 40 Schweißungen durchgeführt und die Kopfzugkräfte ermittelt. In Abbildung 24 sind die Kopfzugkräfte dargestellt.

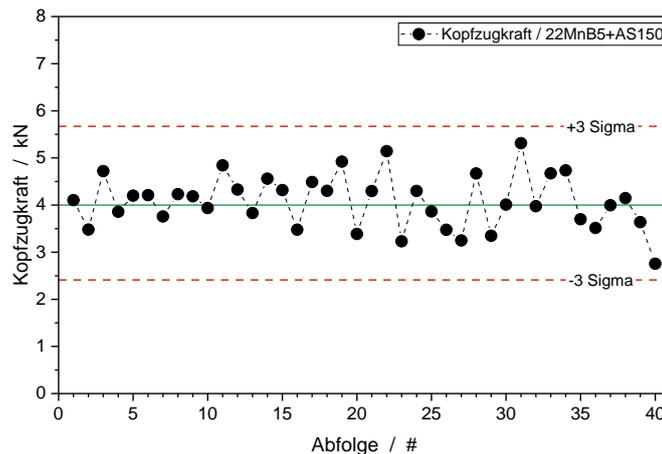


Abbildung 24: Entwicklung der Kopfzugkräfte über einen Umfang von 40 Einzelschweißungen mit den Schweißparametern 20 ms, 4,0 kN und 19 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150

Die Parameter für den Werkstoff CR340LA wurden gewählt, um in der Mitte des Schweißbereiches abzubilden. Die erzielten Kopfzugkräfte sind in Abbildung 25 dargestellt.

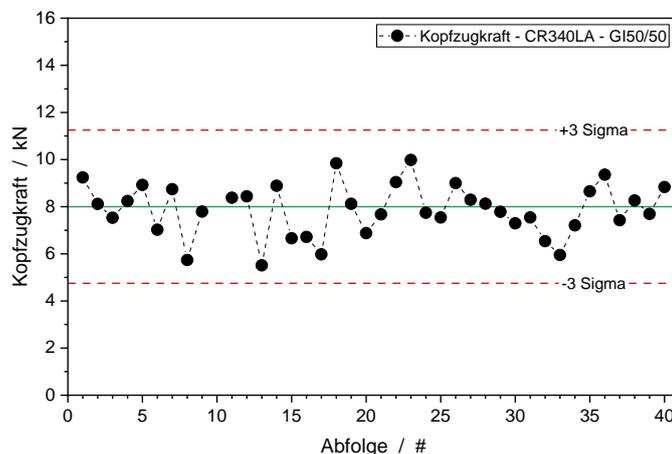


Abbildung 25: Entwicklung der Kopfzugkräfte über einen Umfang von 40 Einzelschweißungen mit den Schweißparametern 20 ms, 3,0 kN und 16 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf CR340LA – GI50/50

In Abbildung 26 sind die erzielten Kopfzugkräfte in Abhängigkeit der Abfolge der Schweißung aufgezeigt. Die Parameter wurden gewählt, um in der Mitte des Schweißbereiches zu liegen. Damit war eine Kopfzugkraft von 8 kN zu erwarten.

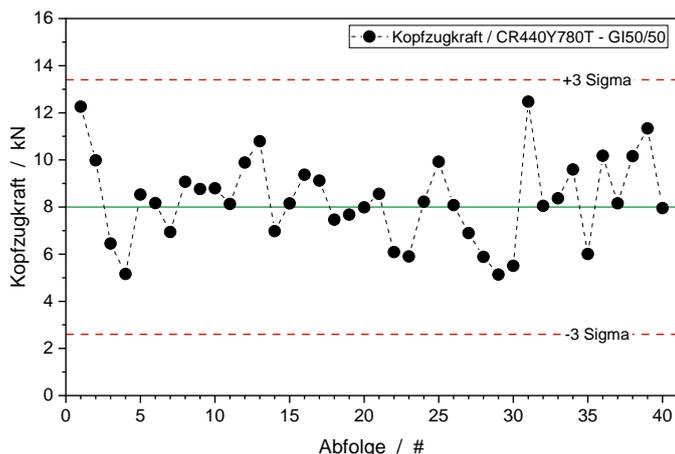


Abbildung 26: Entwicklung der Kopfzugkräfte über einen Umfang von 40 Einzelschweißungen mit den Schweißparametern 40 ms, 3,0 kN und 17 kA für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf CR440Y780T – GI50/50

Auf Basis der Kopfzugkräfte wird der Prozessfähigkeitsindex für die jeweiligen Parameter bestimmt. Die berechneten Größen sind in Tabelle 13 aufgelistet. Die Bewertung der Prozessfähigkeit erfolgt anhand des  $c_p$  und  $c_{pk}$  Wertes. Für den Einsatz in der Produktionstechnik werden typischerweise Werten von  $c_{pk} > 1,00$  angestrebt. Bei einem Wert von 1,00 bedeutet dies, dass 2699 von einer Million angefertigten Schweißungen die Kopfzugkraft nicht erfüllen. Betrachtet man die einzelnen Prozessfähigkeitsindizes für die Werkstoffe, so erreicht 22MnB5 mit AS150 einen höheren Wert. Dies bedeutet, dass ein geringerer Ausschuss erzeugt wird und der Prozess einer geringeren Streuung unterliegt. Eine Ursache kann die Beschichtung sein. Die beiden anderen untersuchten Werkstoffe zeigen einen ähnlichen  $c_p$ -Wert und haben ebenfalls dieselbe Beschichtung. Für einen industriellen Einsatz muss für alle benutzten Werkstoffe der Prozess verbessert werden. Dies könnte durch den Einsatz von Strom- oder Kraftprofilen erfolgen.

Tabelle 13: Kennwerte der statistischen Auswertung aller 3 Stahlgüten mit:  $X_{min}$  als Minimal- und  $X_{max}$  als Maximalwert,  $\bar{X}$  als Mittelwert,  $s_x$  als Standardabweichung,  $V$  als Variationskoeffizient ( $s_x/\bar{X}$ ) sowie  $c_p$  als Prozessbeherrschbarkeit und  $c_{pk}$  als Prozessfähigkeit

|                      | $X_{min}$ / kN | $X_{max}$ / kN | $\bar{X}$ / kN | $s_x$ / kN | $V$ / % | $c_p$       | $c_{pk}$    |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|------------|---------|-------------|-------------|
| 22MnB5+AS150         | 2,76           | 5,31           | 4,08           | 0,55       | 13,67   | <b>0,76</b> | <b>0,74</b> |
| CR340LA – GI50/50    | 5,51           | 9,98           | 7,86           | 1,08       | 13,79   | <b>0,69</b> | <b>0,65</b> |
| CR440Y780T – GI50/50 | 5,13           | 12,48          | 8,30           | 1,78       | 21,55   | <b>0,68</b> | <b>0,59</b> |

## AP2 Ausarbeitung einer Methodik zur Analyse der Qualitätsmerkmale anhand von Prozessgrößen und Verbindungscharakteristiken

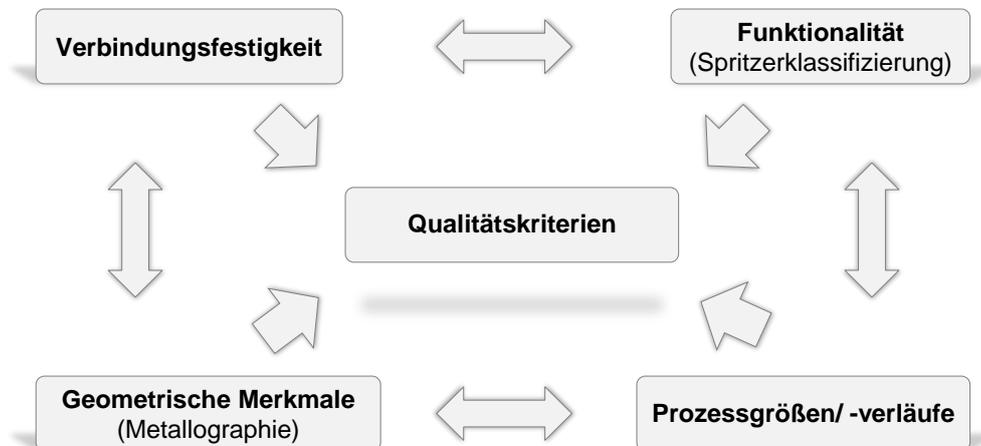


Abbildung 27: Einflussgrößen auf die Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen und ihre gegenseitige Beeinflussung

Ziel der folgenden Darstellungen ist es, aus den vorrausgegangen Arbeitspaketen Zusammenhänge zu ermitteln, die Rückschlüsse auf die Verbindungsqualität ermöglichen. Dies geschieht durch Analyse von Prozessgrößen und durch Untersuchung der Verbindungscharakteristik. Um dieses Ziel zu erreichen, werden einzelne Aspekte miteinander abgeglichen, zum Beispiel die Wirkung der aufgetretenen Spritzer auf die erreichte Verbindungsfestigkeit.

### Bewertung der Funktionalität (Spritzerklassifizierung)

Die beim Schweißen auftretenden Spritzer können bei den Funktionselementen eine beeinträchtigende Wirkung auf das Element haben. Dies äußert sich in mangelnder Gewindegängigkeit durch anhaftende Spritzer und einer unzulässigen Elementstauchung. Jedoch ist zu bedenken, dass nicht jeder Schweißspritzer automatisch zu einer Beeinträchtigung der Gewindegängigkeit führt. Um dies genauer zu untersuchen wird eine Klassifizierung der auftretenden Schweißspritzer vorgenommen, vgl. Abbildung 28. Die Einteilung erfolgt in Anlehnung an das IGF-Vorhaben 18.987BR [22]. Es ist zu bemerken, dass die Einstufung der Spritzer sich als sehr subjektiv erweist. Insbesondere ist es schwierig zwischen den Spritzerklassen 2 und 3 unterscheiden, da keine objektive Bewertungskriterien zur differenzierten Beurteilung existieren. Eine Nutzung dieser Klassifizierung stellte sich für die hier vorliegende Aufgabe als bedingt geeignet dar, wie in den folgenden Ausführungen dargestellt wird.

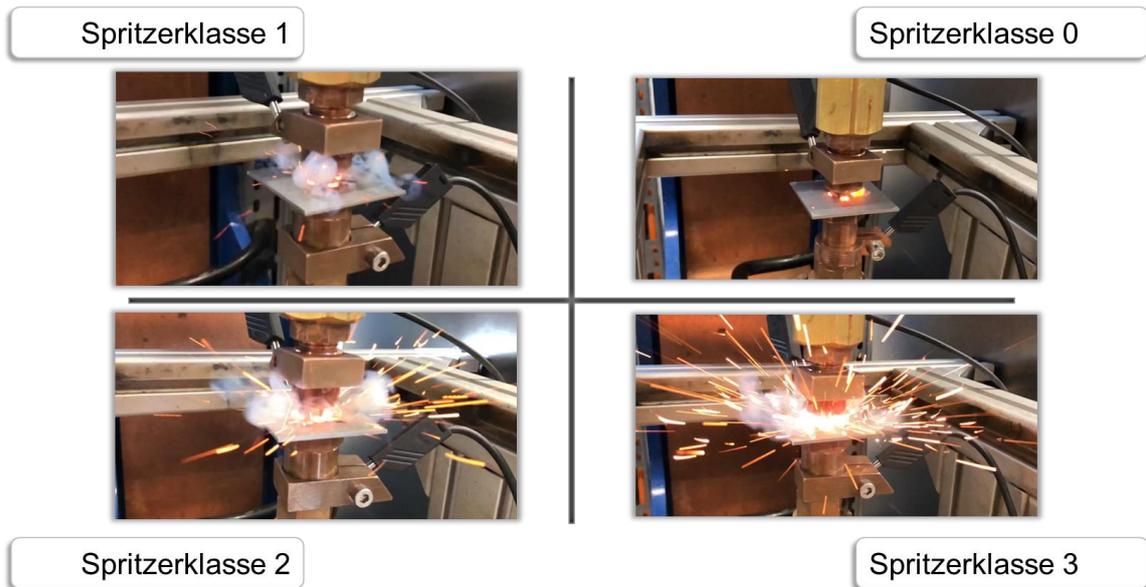


Abbildung 28: Klassifizierung der Schweißspritzer beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit MFDC in Anlehnung an IGF-Vorhaben 18.987BR

## Zusammenhang zwischen Verbindungsfestigkeit und Funktionalität



Abbildung 29: Analysierter Zusammenhang zwischen der Verbindungsfestigkeit (Kopfzugkraft) und der Funktionalität

Der Zusammenhang zwischen der Verbindungseigenschaft als Kopfzugkraft und der Funktionalität in Form der GG und der ermittelten Spritzerklasse wird anhand der folgenden Diagramme dargestellt, getrennt nach untersuchten Werkstoffkombinationen. Der Beginn der SB wird anhand der Mindestkopfzugkraft bestimmt, die obere Grenze durch die nicht mehr vorhandene GG.

### 22MnB5+AS150 – M5 /M6

Zusammen mit den Kopfzugkräften wurden die Spritzerklassen dokumentiert. Werden diese überlagert, so erhält man Abbildung 30. Es fällt auf, dass bei M5 (unbeschichtete Schweißmutter) ein spritzerfreier Bereich zwischen 16-20 kA existiert. Ebenfalls tritt mit einem Wechsel der

Spritzerklasse ein Anstieg in der mittleren Kopfzugkraft auf. Die Streuung der Kopfzugkraft nimmt ab dem Erreichen der Mindestkopfzugkraft zu. Der Schweißbereich endet mit dem Beginn von Spritzerklasse III.

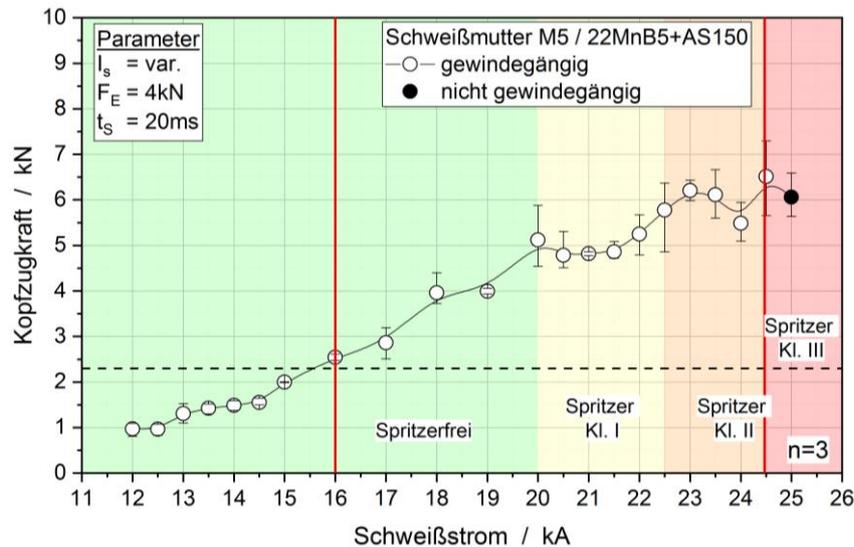


Abbildung 30: Einteilung der Spritzerklassen für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150

In Abbildung 31 ist die Kopfzugkraft für M6 mit der Spritzerklasse überlagert. Im Unterschied zu M5 existiert kein spritzerfreier Bereich. Die liegt an der Zinkbeschichtung der Schweißmutter. Im Bereich der Spritzerklasse III bildet sich ein Maximum der Kopfzugkraft aus. Ebenfalls endet der Schweißbereich am Beginn des Bereiches von Spritzerklasse III.

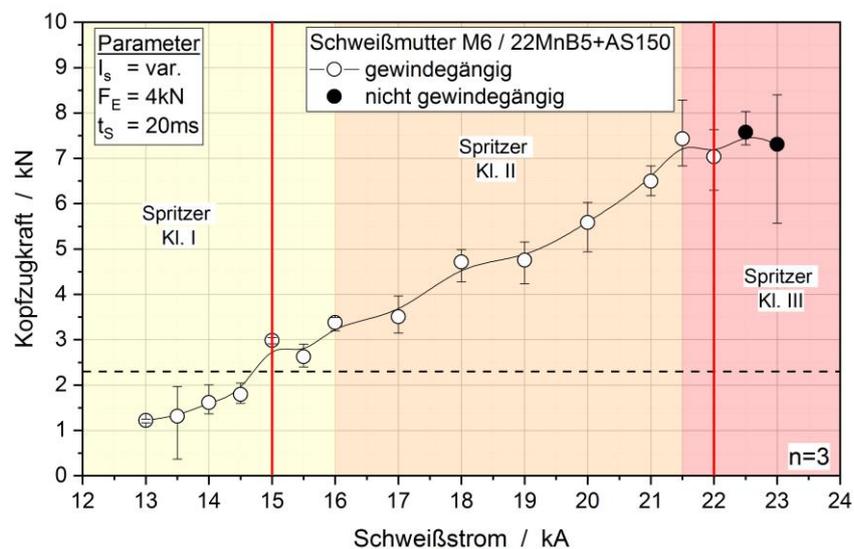


Abbildung 31: Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf pressgehärtetem 22MnB5+AS150

Die Spritzerklasse wird für M5 mit der Kopfzugkraft überlagert. Dies ist in Abbildung 32 dargestellt. Es existiert wie bei M5 für 22MnB5 einen spritzerfreien Bereich. Dieser ist von 10-12 kA. Der spritzerfreie Bereich ist kleiner als bei M5 für 22MnB5. Der Bereich von Spritzerklasse I beginnt bei 12 kA und endet bei 14 kA. Dieser ist klein. Spritzerklasse II bildet den größten Bereich des Schweißbereiches. Ebenfalls bildet der Beginn des Bereiches von Spritzerklasse III das Ende des Schweißbereiches. Darüber hinaus bildet die Kopfzugkraft ein Plateau im Bereich der Spritzerklasse III.

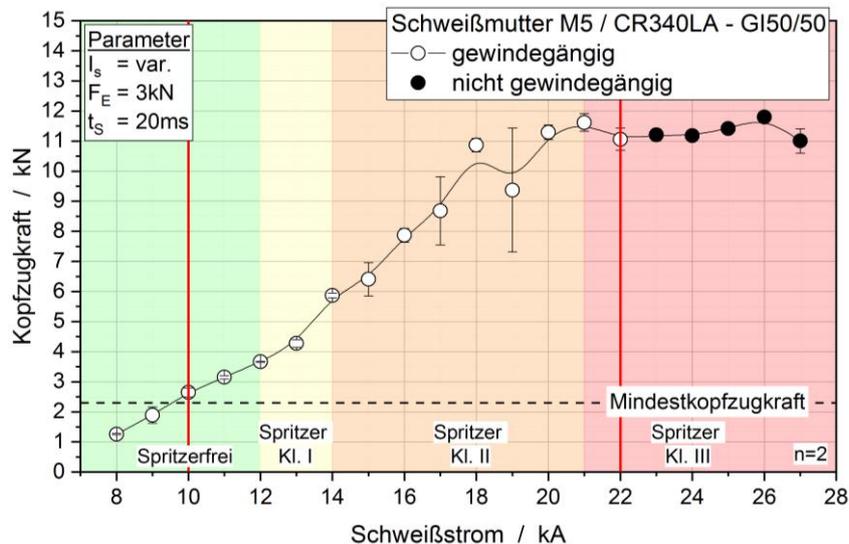


Abbildung 32: Einteilung der Spritzerklassen für unbeschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5-Gewinde auf CR340LA – GI50/50

In Abbildung 33 ist die Spritzerklasse mit der Kopfzugkraft verknüpft. Auffällig ist, dass im Gegensatz zu den anderen Werkstoffkombinationen, ein spritzerfreier Bereich für M6 existiert. Die Kopfzugkraft steigt mit steigendem Schweißstrom. Die Streuung der Kopfzugkraft nimmt mit der Spritzerklasse zu. Der Schweißbereich endet mit Beginn von Spritzerklasse III.

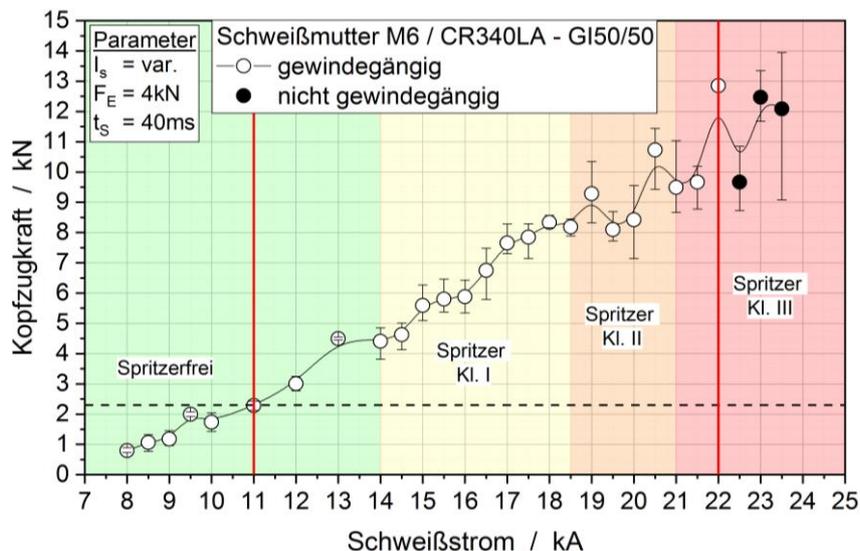


Abbildung 33: Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M6-Gewinde auf CR340LA – GI50/50

**CR440Y780T – GI50/50 – M5/M6**

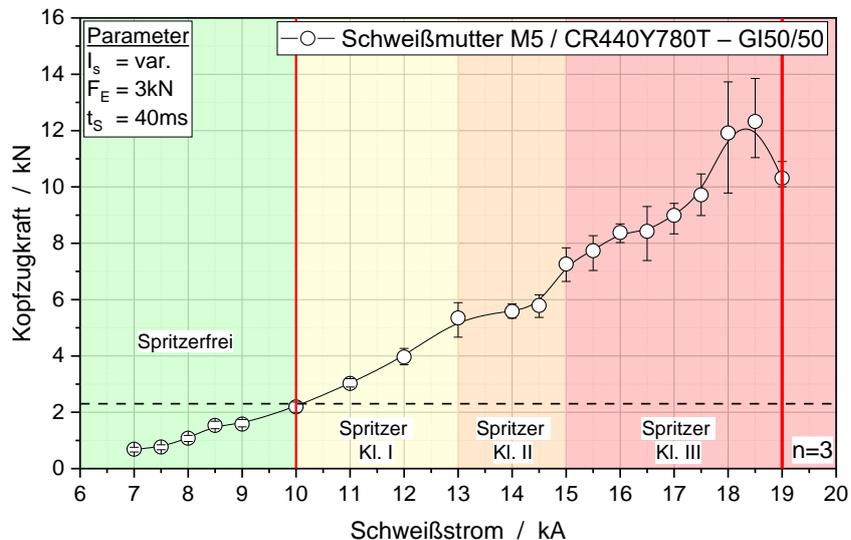


Abbildung 34: Einteilung der Spritzerklassen für unbeschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M5-Gewinde auf CR440Y780T – GI50/50

Im Gegensatz zu den anderen M5 Schweißmuttern existiert hier kein spritzerfreier Bereich, welcher die Mindestkopfzugkraft überschreitet, vgl. Abbildung 34. Ein weiterer Unterschied ist, dass ein großer Bereich mit Spritzerklasse III im Schweißbereich existiert. Gemeinsam ist jedoch, dass mit steigender Spritzerklasse die Kopfzugkraft ansteigt.

Für M6 ist die Spritzerklasse in Relation zur Kopfzugkraft in Abbildung 35 dargestellt. Analog zu den anderen M6 Schweißbereich mit anderen Werkstoffen, existiert kein spritzerfreier Bereich. Eine weitere Gemeinsamkeit ist, dass das Ende des Schweißbereiche mit Beginn der Spritzerklasse III koinzidiert.

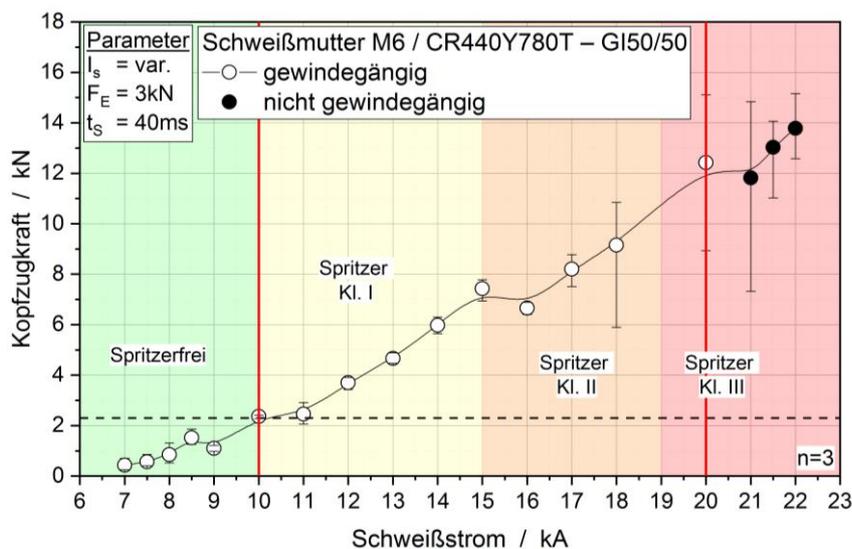


Abbildung 35: Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmuttern mit M6-Gewinde auf CR440Y780T – GI50/50

Zusammenfassend zeigen sich einige Gemeinsamkeiten. Der Schweißbereich beginnt bei den unverzinkten Schweißmuttern (M5) mit einem spritzerfreien Bereich. Im Gegensatz dazu tritt bei M6 kein spritzerfreier Bereich aufgrund der Zinkbeschichtung auf. Eine Ausnahme bildet dabei jedoch das Material CR340LA.

Im Bereich der Spritzerklasse III endet bei allen Materialien der Schweißbereich. Dies findet bis auf eine Ausnahme am Beginn der Spritzerklasse III statt. Ein weiterer gemeinsamer Trend ist, dass mit Zunahme der Spritzerklasse die Streuung der Kopfzugkräfte zunimmt.

Für die Erstellung des Schweißbereiches wurde die Gewindegängigkeit als oberes Qualitätskriterium gewählt. Aus den Untersuchungen geht eindeutig hervor, dass die erst mit dem Auftreten von sehr heftigen Spritzern der Klasse III die Gewindegängigkeit eingeschränkt und die obere Grenze des SB erreicht wird. Die Spritzer der Klasse I und Klasse II wirken sich nicht negativ auf die Gewindegängigkeit aus. Ursache hierfür ist die Menge an Material, die durch den Spritzer in den Gewindegang gebracht werden kann. Bei geringer Spritzerklasse und damit geringen Spritzervolumen kann das Material durch die Schraube aus dem Gewinde geschoben werden, so dass die Funktion der Schweißmutter erfüllt wird.

### **Zusammenhang zwischen Verbindungsfestigkeit und Prozessgrößen-/verläufe**



Abbildung 36: Analysierter Zusammenhang zwischen der Verbindungsfestigkeit (Kopfzugkraft) und den Prozessgrößen

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Möglichkeiten zur Vorhersage der Verbindungseigenschaft (Kopfzugkraft) anhand der gemessenen Prozessgrößen bzw. -verläufe analysiert. Die Möglichkeiten der Signalauswertung sind in Abbildung 36 noch einmal verdeutlicht. Ziel ist es, ein verlässliches Qualitätskriterium zu entwickeln.

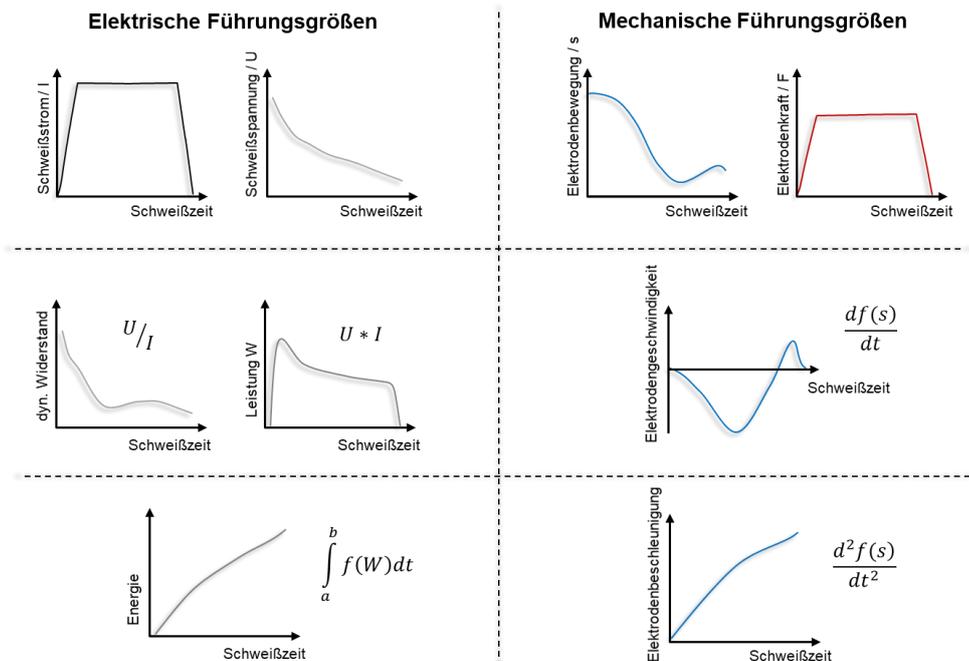


Abbildung 37: Übersicht über die elektrischen und mechanischen Führungsgrößen beim Widerstandsschweißen

Zunächst stellt sich die Frage welche Prozessgröße und deren Verlauf sich für diese Unterfangen eignet. Abbildung 37 zeigt die möglichen Führungsgrößen und deren abgeleiteten Größen beim Widerstandsschweißen. Im Rahmen der Untersuchungen haben sich der Leistung, die Energie und der Elektrodenweg als geeignet gezeigt.

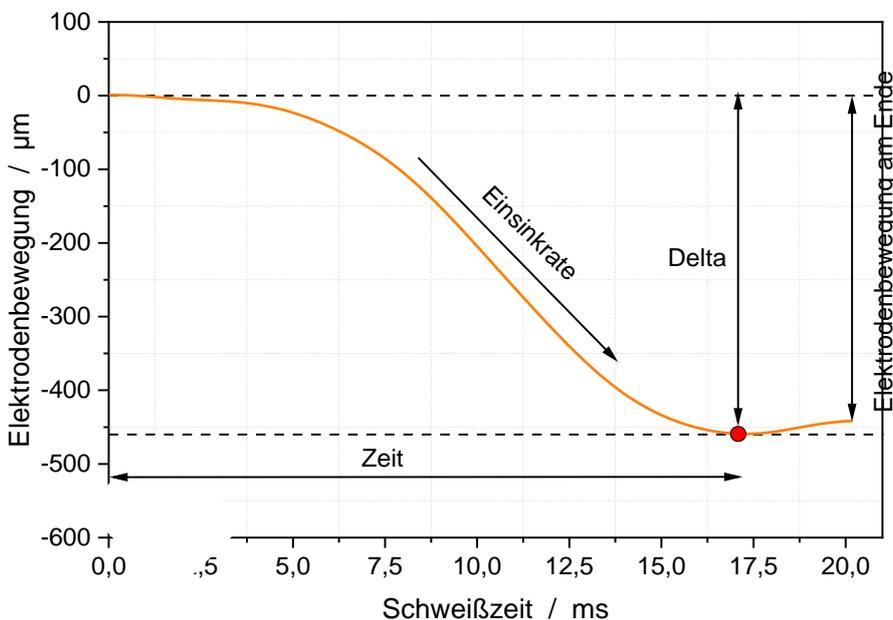
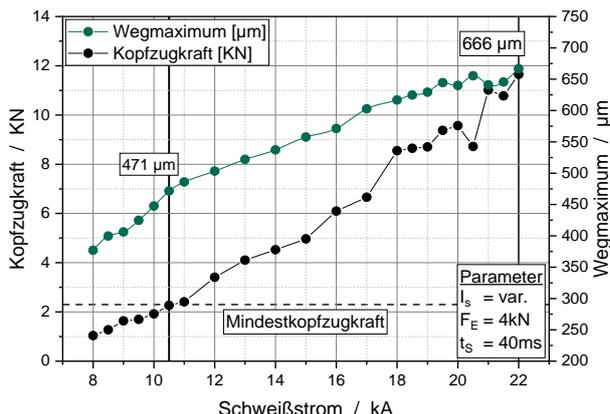


Abbildung 38 Möglichkeiten der Auswertung des Wegsignals der Elektrode

Die Möglichkeiten den Elektrodenweg auszuwerten sind in Abbildung 38 verdeutlicht. Im Rahmen des Projektes hat sich das Wegmaximum der Elektrode (Delta der Elektrodenbewegung) als am besten geeignet gezeigt. Ein Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit

der Schweißstromstärke ist in Abbildung 39 für Schweißmuttern M5 für CR340LA und CR440Y780T zu sehen. Es ist ersichtlich, dass das Wegmaximum und die Kopfzugkraft ein lineares Verhalten zeigen. Ebenfalls scheinen die beiden eine ähnliche Steigung zu besitzen. Beim Vergleich der beiden Werkstoffe zeigt, dass das Wegmaximum sowohl an der unteren Grenze des Schweißbereiches, als auch an der oberen Grenze einen ähnlichen Wert haben.

a)



b)

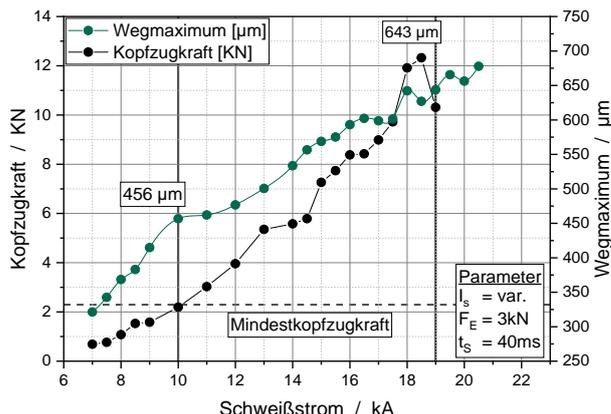
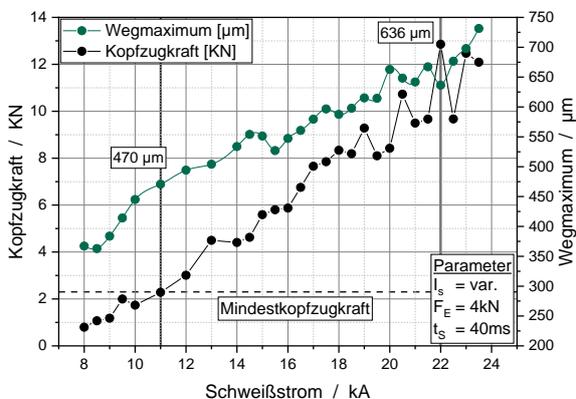


Abbildung 39 Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für M5 a) für CR340 LA – b) für CR440Y780T

Ein ähnliches Ergebnis ist für die Schweißmuttern M6 festzustellen. Dies ist in Abbildung 40 dargestellt. Das Wegmaximum an der unteren Grenze liegt bei ähnlichen Werten. Ebenfalls ist die für die obere Grenze der Fall. Vergleicht man das Wegmaximum für den jeweiligen Werkstoff mit verschiedenen Funktionselementen, so kann man erkennen, dass die unteren Grenzen beinahe identisch sind. Der Unterschied beträgt dabei 1 µm. Die obere Grenze weicht jedoch stärker ab.

a)



b)

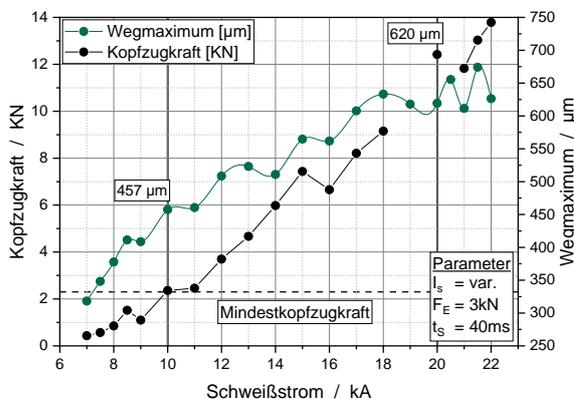
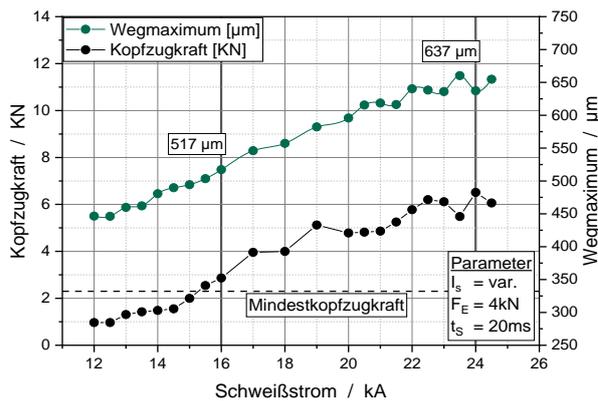


Abbildung 40 Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für M6 a) für CR340 LA – b) für CR440Y780T

Der Werkstoff 22MnB5 zeigt ein etwas abweichendes Verhalten, siehe Abbildung 41. Das Wegmaximum liegt sowohl für M5 als auch M6 höher als bei den anderen untersuchten Werkstoffkombinationen. Das Wegmaximum für 22MnB5 ist an der unteren Grenze für M5 und M6 sehr nahe. Das Wegmaximum an der oberen Grenze ist identisch. Das Verhalten des Wegmaximums ist ebenfalls annähernd linear.

a)



b)

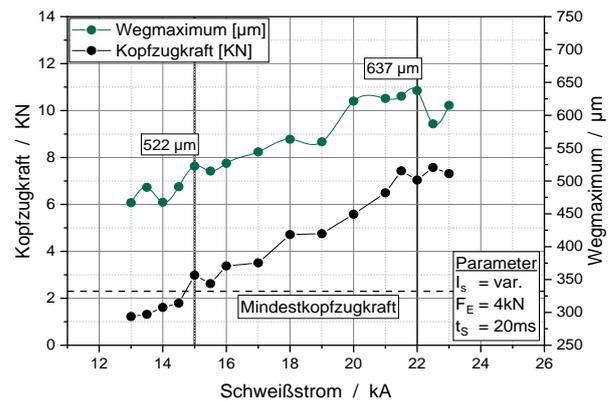


Abbildung 41 Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft in Abhängigkeit der Schweißstromstärke für 22MnB5 a) M5 – b) M6

Im Nachfolgenden werden die Leistung und die Energie im Hinblick auf die Verbindungsfestigkeiten genauer untersucht. Es hat sich als geeignet erwiesen die Leistung und die Energie über den Prozess über die Schweißversuche zu ermitteln.

In Abbildung 42 ist zu erkennen, dass die sowohl die Leistung als auch die Energie ein fast lineares Verhalten zeigen. Vergleicht man dies mit der Kopfzugkraft, so ergibt sich ein ähnliches Verhalten.

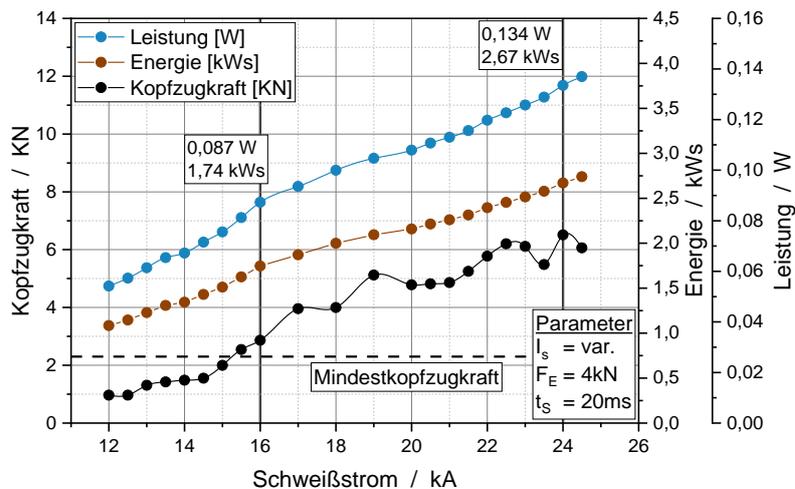


Abbildung 42 Vergleich der Leistung, der Energie und der Kopfzugkraft in Abhängigkeit des Schweißstromes bei 22MnB5 + AS150, wärmebehandelt bei 900 °C und 6 Minuten, für das Funktionselement M5

Abbildung 43 zeigt das Verhalten von Leistung, Energie und Kopfzugkraft für das verzinkte Funktionselement M6 für 22MnB5. Auch hier ist wieder ein annähernd lineares Verhalten von Leistung und Energie beobachtbar.

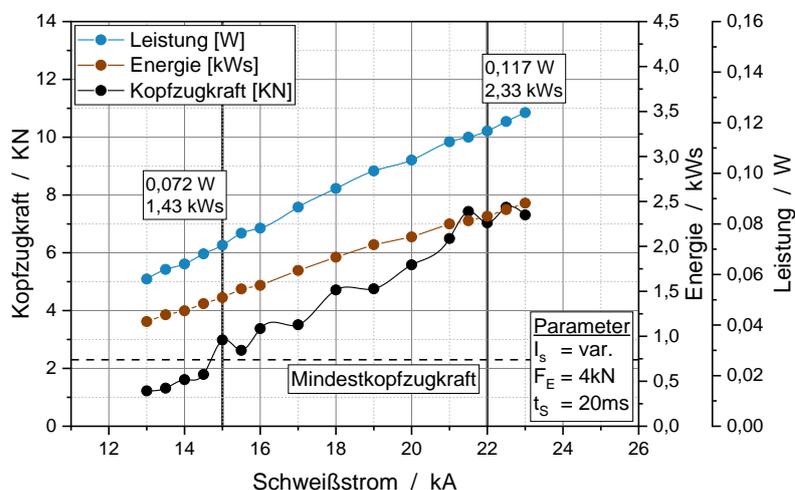


Abbildung 43 Vergleich der Leistung, der Energie und der Kopfzugkraft in Abhängigkeit des Schweißstromes bei 22MnB5 + AS150, wärmebehandelt bei 900 °C und 6 Minuten, für das Funktionselement M6

Auf Basis der DoE wurde eine Vorhersage über die möglichen Schweißbereiche erstellt. Diese wurden anschließend durch Versuche ermittelt. In Abbildung 44 ist der Vergleich der Prognose auf Basis der Regressionsgerade für die Kopfzugkräfte zu sehen. Die Vorhersage ist für eine gute Näherung der Grenze des Schweißbereiches geeignet.

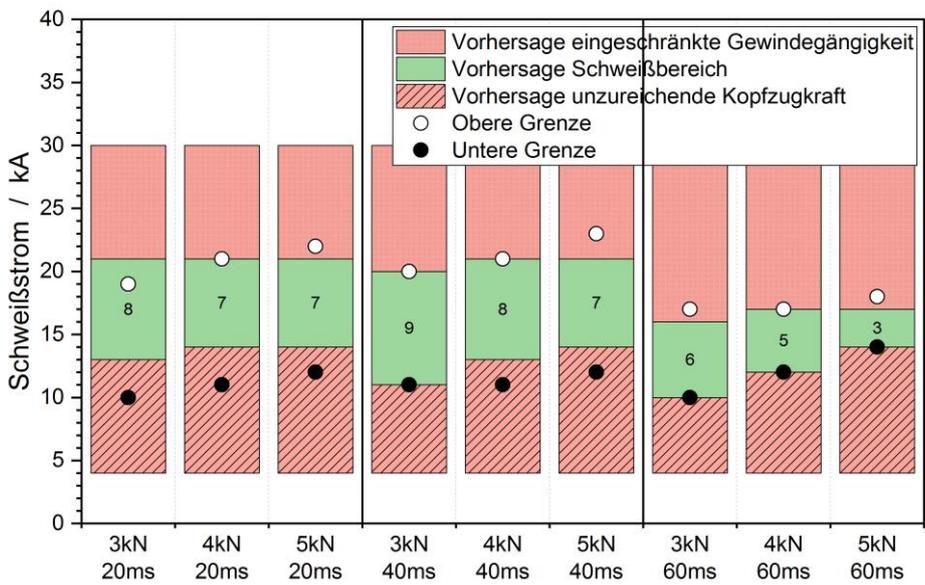


Abbildung 44 Vergleich der Vorhersage von Schweißbereichen auf Basis der Regressionsgerade für Kopfbzugkräfte und den tatsächlichen Schweißbereichen für Vierkantschweißmutter M6 auf CR440Y780T

In Abbildung 45 ist die Vorhersage auf Basis der Regressionsgerade der Leistung dargestellt. Eine Vorhersage liefert eine sehr genaue Prognose der Schweißbereiche. Im Vergleich zur Prognose auf Basis der Kopfbzugkraft ist die Abweichung zu den realen Schweißbereichen noch einmal geringer. Somit eignet sich die Regression der Leistung besser eine Prognose zu erstellen. Die auftretenden Abweichungen beschränken sich auf etwa 1 kA.

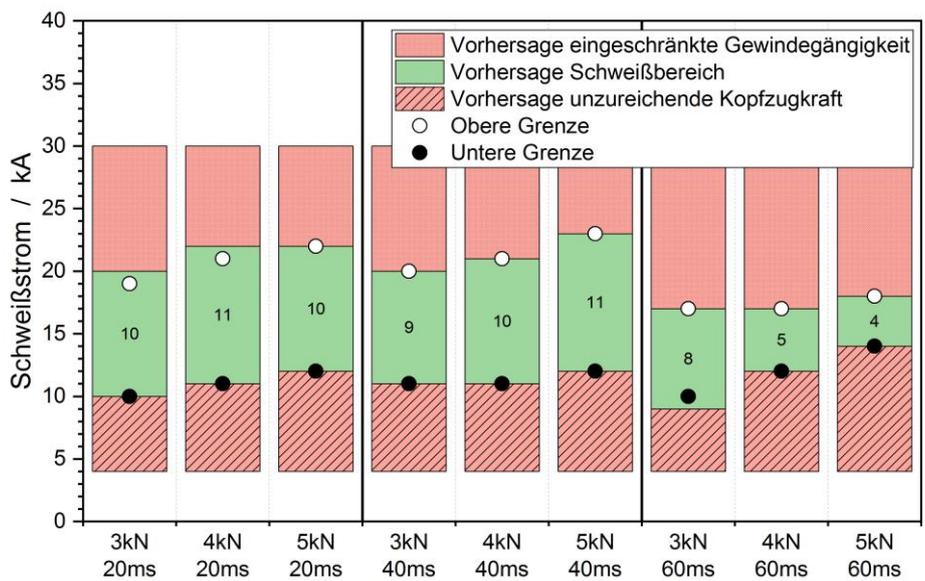


Abbildung 45 Vergleich der Vorhersage von Schweißbereichen auf Basis der Regressionsgerade der Leistung und den tatsächlichen Schweißbereichen für M6 auf CR440Y780T

## Vergleichsschweißungen auf unterschiedlichen Anlagen

Neben den Schweißungen an einer C-Ständeranlagen der Firma Nimak mit Magnetic Drive, also einer magnetischen Nachsetzeinheit, wurde eine weitere C-Ständeranlage der Firma Harms und Wende mit pneumatischer Nachsetzeinheit verwendet. Darüber hinaus wurden Vergleichsschweißungen an einer Kondensatorsentladungsanlage der Firma KapKon durchgeführt. Die KE-Anlage ermöglichte das neben dem konventionellen KE-Schweißen auch die Mehrkondensator-entladungstechnik benutzt werden.

Zunächst werden mit Hilfe einer DOE die schweißbaren Parameter an der pneumatischen Ständeranlage der Firma Harms und Wende ermittelt. Es wurde eine DOE mit 27 Punkten und denselben Parametern wie für die Ständeranlage mit Magnetic Drive benutzt. Zusätzlich werden die tatsächliche Schweißbereiche ermittelt. Dies erfolgte analog zu den Schweißbereichen mit der Nimak-Ständeranlage.

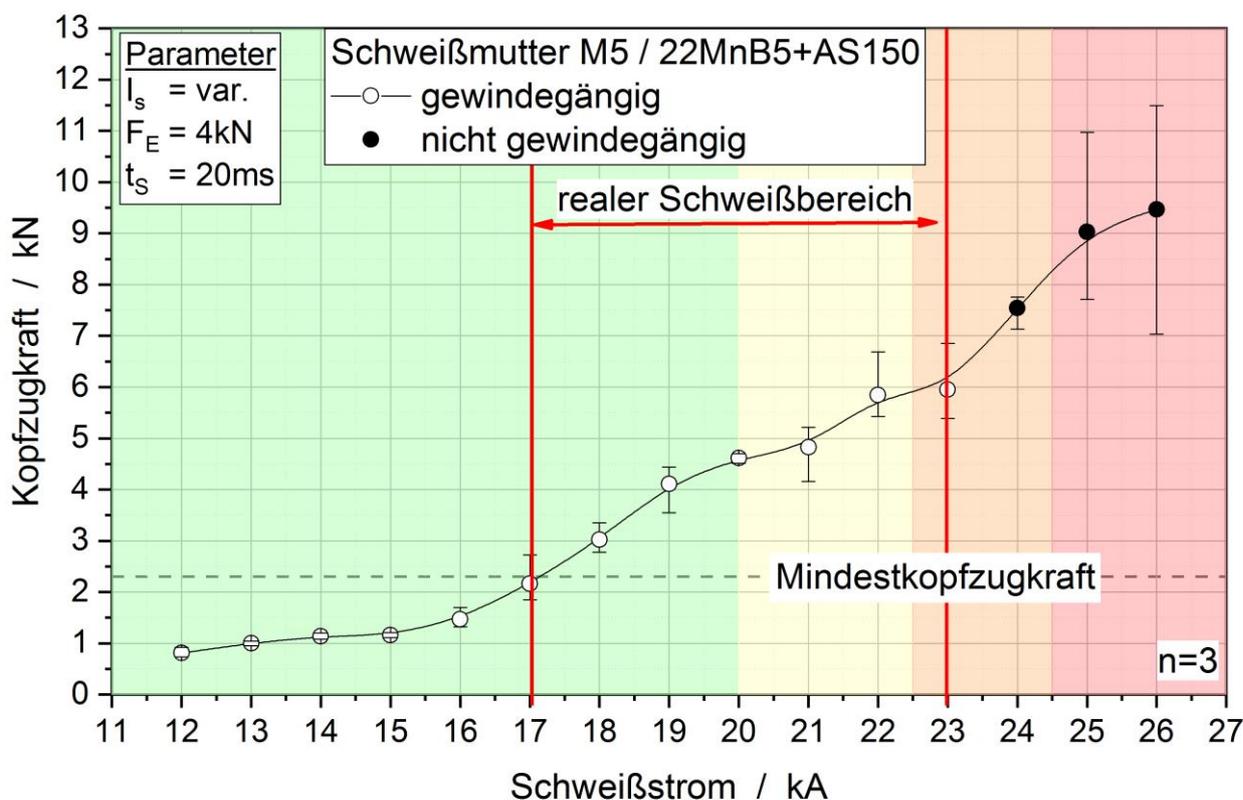


Abbildung 46 Einteilung der Spritzerklassen für beschichtete Vierkant-Schweißmutter mit M5 auf 22MnB5+As150 (pressgehärtet bei 930°C 6 Min.) an einer C-Ständeranlage mit pneumatischer Nachsetzeinheit

Die Einteilung der Spritzerklassen und deren Auswirkung auf die Kopfbzugkraft, ist exemplarisch in Abbildung 46 zu sehen. Dabei lassen sich die Beobachtung an hinsichtlich der Streuung der Kopfbzugkraft bestätigen. Diese steigt ebenfalls mit der Spritzerklasse. Tritt ein Ende des Schweißbereiches mit dem Auftreten von Spritzern der Klasse III. Ähnlich wie es bei den Versuchen zuvor der Fall ist ein Bereich, welcher spritzerfrei ist, auf.

Ebenfalls zeigt sich ein annähernd lineares Verhalten des Wegmaximums in Abhängigkeit des Schweißstroms, wie es bei der Nimak-Ständeranlage der Fall war. Dies ist in Abbildung 47 zu

sehen. Des Weiteren zeigt sich ebenfalls ein ähnlicher Trend für die Energie, wie sie bei der magnetischen Nachsetzeinheit beobachtet wurde.

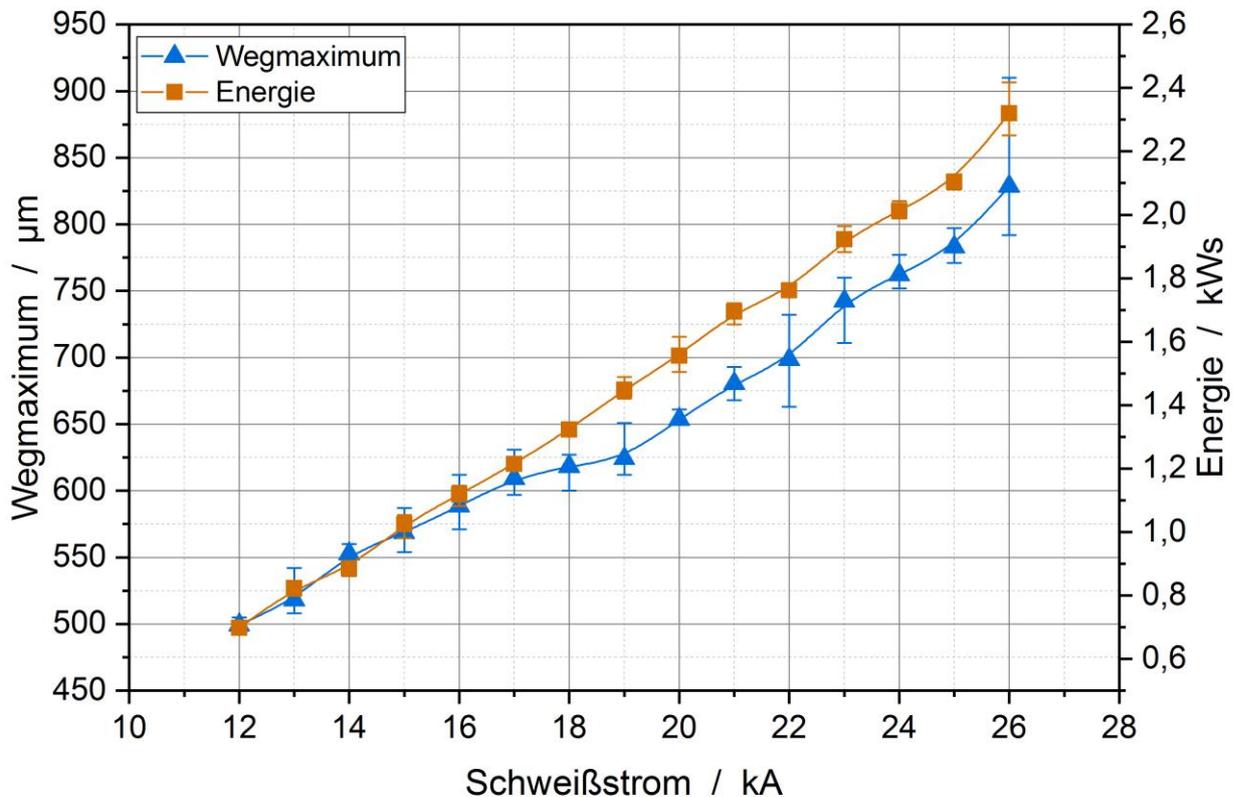


Abbildung 47 Vergleich der Entwicklung des Wegmaximums und der Energie in Abhängigkeit des Schweißstroms bei M5 auf 22MnB5+AS150 (pressgehärtet bei 930 °C und 6 Min.) an einer C-Ständeranlage mit pneumatischer Nachsetzeinheit

Die Vorhersage der Schweißbereich mittels DoE auf Basis der Kopfzugkraft ist beispielhaft in Abbildung 48 für M5 auf CR440Y780T dargestellt. Es zeigt sich ähnlich wie es beim Schweißen an der anderen Anlage der Fall war, dass die Vorhersage der Schweißgrenzen mit etwa einer Abweichung von 1-2 kA erfolgt. Dabei liegt eine Übereinstimmung der Grenzen bei einigen Parameterkombinationen vor.

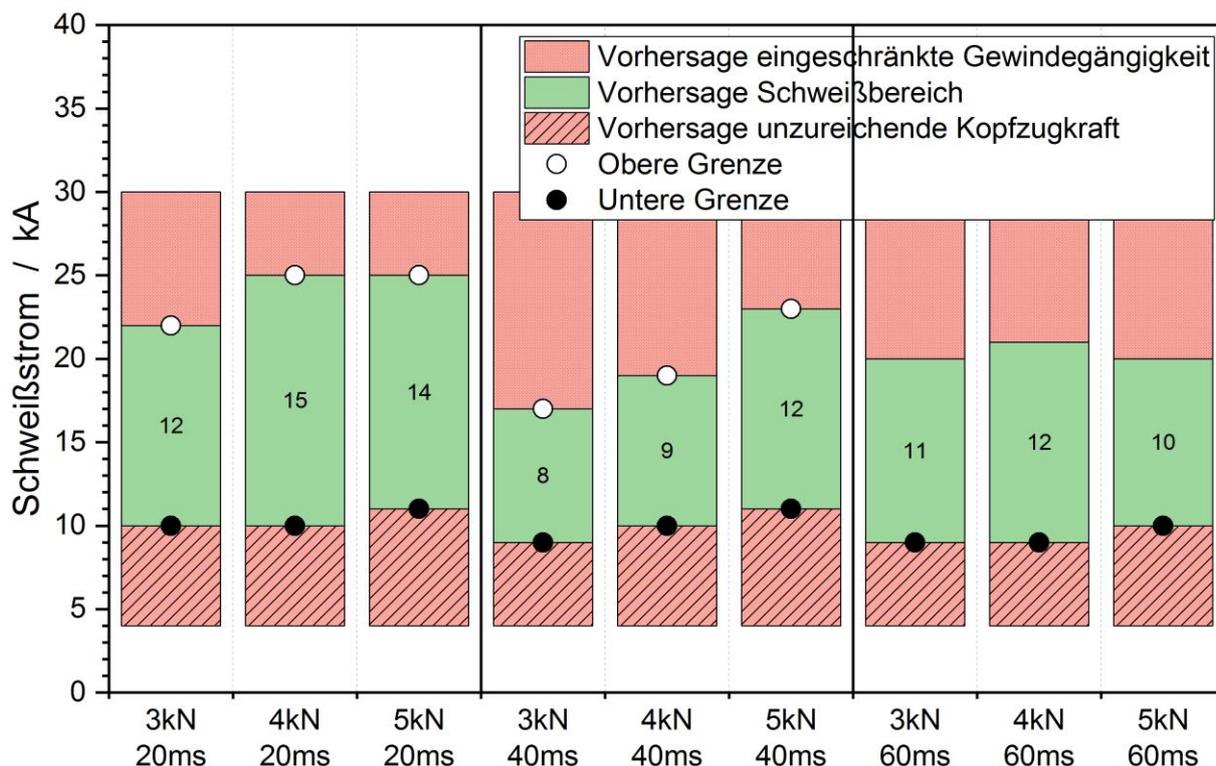


Abbildung 48 Vergleich der Vorhersage von Schweißbereichen auf Basis der Regressionsgerade für Kopfbzugkräfte und den tatsächlichen Schweißbereichen für CR440Y780T mit M5 an der Schweißanlagen der Firma Harms und Wende

Da das KE-Schweißen eine ähnliche Verfahrenscharakteristik wie das Kurzzeitwiderstandsschweißen hat, bieten sich ein Vergleich der beiden Verfahren an. Die verwendete KE-Anlage der Firma KapKon ermöglicht neben der konventionellen KE-Technik die Benutzung der Mehrkondensatorentladungstechnik. Dabei können verschiedene an der KE-Anlage verschiedene Kondensatoren genutzt werden. Die verwendeten Kondensatoren und deren Anordnung ist in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14 Vergleich der verwendeten Parameter beim KE-Schweißen

|                | Kraft in kN | Ladespannung Kondensator H (820µF) in V | Zündverzögerung in ms | Ladespannung Kondensator G (1640µF) in V | Zündverzögerung in ms | Ladespannung Kondensator B (5740µF) in V |
|----------------|-------------|---|-----------------------|--|-----------------------|--|
| 1-C Variante   | 8           |   |                       |  |                       | 470-570                                  |
| MCS Variante 1 | 8           | 1000                                    | 1,2                   | 750/780                                  |                       |  |

|                |   |      |     |     |     |             |
|----------------|---|------|-----|-----|-----|-------------|
| MCS Variante 2 | 8 | 800  | 1,3 |     |     | 545/530/500 |
| MCS Variante 3 | 8 | 1000 | 1,2 | 780 | 2,7 | 350         |

Um eine Vergleichbarkeit beim KE Schweißen zwischen verschiedenen Kondensatoren bzw. Kondensatoranordnungen zu erreichen, wird häufig die auf  $50 \mu\Omega$  bezogenen spezifischen Fügeenergie  $\epsilon_{50}$  genutzt. In Abbildung 49 sind die erreichten spezifischen Fügeenergien aufgezeigt. Es zeigt sich, dass beim Kurzzeitschweißen die spezifischen Fügeenergie deutlich höher liegt, die erreichbaren Kopfzugkräfte sind jedoch in einem vergleichbaren Intervall.

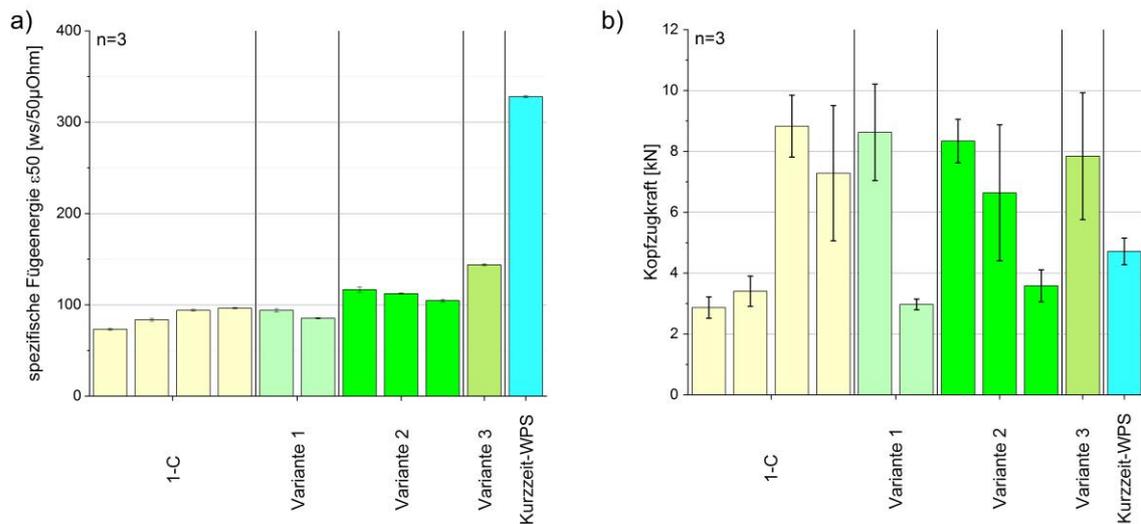


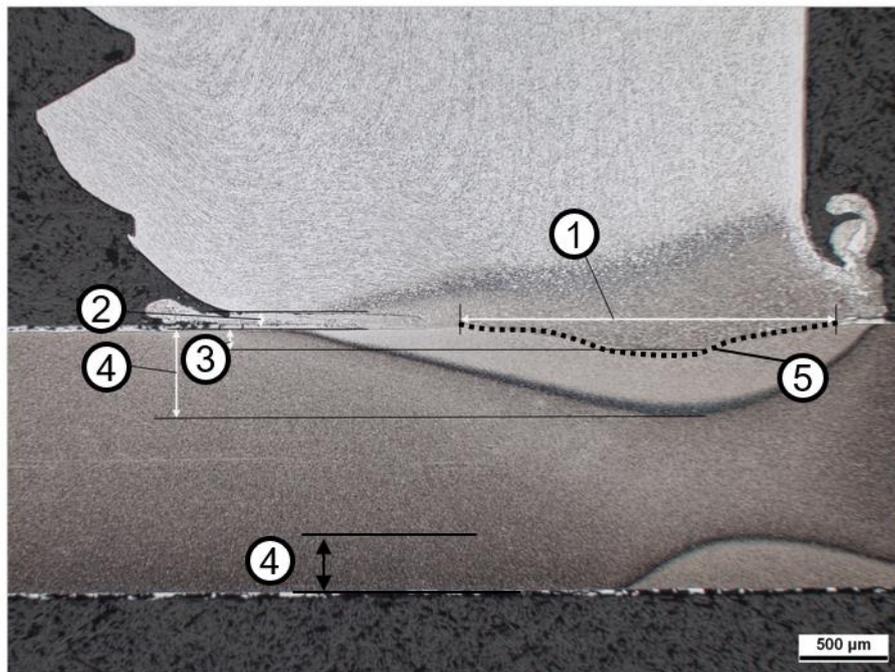
Abbildung 49 a) Vergleich der spezifischen Fügeenergie des benutzten Anordnung mit dem Kurzzeitschweißen bei (Parameter ergänzen) – b) Vergleich der erreichbaren Kopfzugkräfte beim KE-Schweißen mit dem Kurzzeitschweißen bei

## Zusammenhang zwischen Verbindungsfestigkeit und geometrische Merkmale



Abbildung 50: Übersicht über die geplanten Untersuchungen mit dem Schwerpunkt dieses Kapitels

Im Folgenden werden die geometrischen Merkmale der erzeugten Verbindungen im Hinblick auf die Verbindungsfestigkeiten untersucht. Beim Buckelschweißen können am Schliff typische Merkmale bestimmt werden. Diese sind der Buckelquerschnitt, die Buckelhöhe und Linsendurchmesser. Im Rahmen des Projektes wurden Schweißungen ohne Linsen erzeugt. Dadurch ist das Ausmessen des Linsendurchmesser nicht möglich. Auch sind die beiden anderen geometrischen Merkmale nicht immer bestimmbar. Abbildung 51 zeigt mögliche bestimmbare Größen an Kurzzeitschweißverbindungen.



- |                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| 1 Anbindungsbreite | 4 Ausdehnung WEZ            |
| 2 Restspalt        | 5 Länge der Anbindungslinie |
| 3 Einbrand         |                             |

Abbildung 51 Übersicht über die möglichen geometrischen Merkmale

Da die Auswertung der Schliffe keine geeigneten Zusammenhänge aufgezeigt hat und die Präparation von Mikroschliffen aufwändig ist, wurde nach einer einfachen alternative gesucht. Dabei wird die Anbindungsfläche einer Probe nach der Drehmomentprüfung untersucht. Dies ist in Abbildung 52 beispielhaft dargestellt. Es zeigen sich dabei charakteristische Bereiche. Diese bestehen aus dem Grundmaterial, einen Teil der angeschmolzenen Beschichtung und einem kristallinen Bereich in der Mitte der ehemaligen Buckel. Dieser kristalline Bereich wird vermessen und mit dem Kopfzugfestigkeit korreliert.

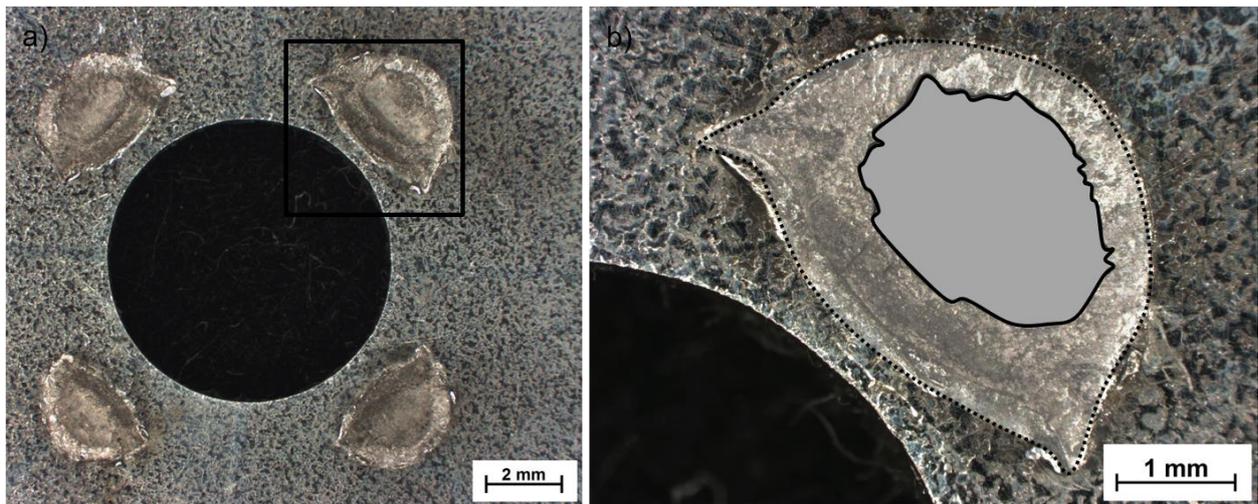


Abbildung 52 a) Übersichtsaufnahme einer Mutter-Blech-Schweißung nach der Drehmomentenprüfung - b) Detailaufnahme einer Bruchfläche mit eingezeichneter Anbindungsfläche (schwarz umrandet, graue Füllung) und der Fläche mit verdrängter Beschichtung (schwarz gepunktet)

Die auf obige Weise beschriebene gemessene Anbindungsfläche wird mit der Kopfzugkraft korreliert. Die Kopfzugkraft wird gewählt, da diese im Vergleich zum Drehmoment eine höhere Sensitivität aufweist. In Abbildung 53 ist die Entwicklung der Kopfzugkraft und die Entwicklung der Anbindungsfläche in Abhängigkeit des Schweißstromes dargestellt. Beide zeigen ein stetiges lineares Wachstum mit dem Schweißstrom. Dies ist bei allen untersuchten Element-Material-Kombinationen der Fall. Eine Korrelation der Kopfzugkraft und der Anbindungsfläche ergibt einen Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 0,91945. Es liegt also eine starke Korrelation der beiden Werten vor. Ein ähnlicher Korrelationskoeffizient existiert bei den anderen untersuchten Parameterkombination. Mit diesem Wissen lässt sich eine Mindestanbindungsfläche definieren, welche als Kriterium für das Erreichen der Mindestkopfzugkraft geeignet ist formulieren.

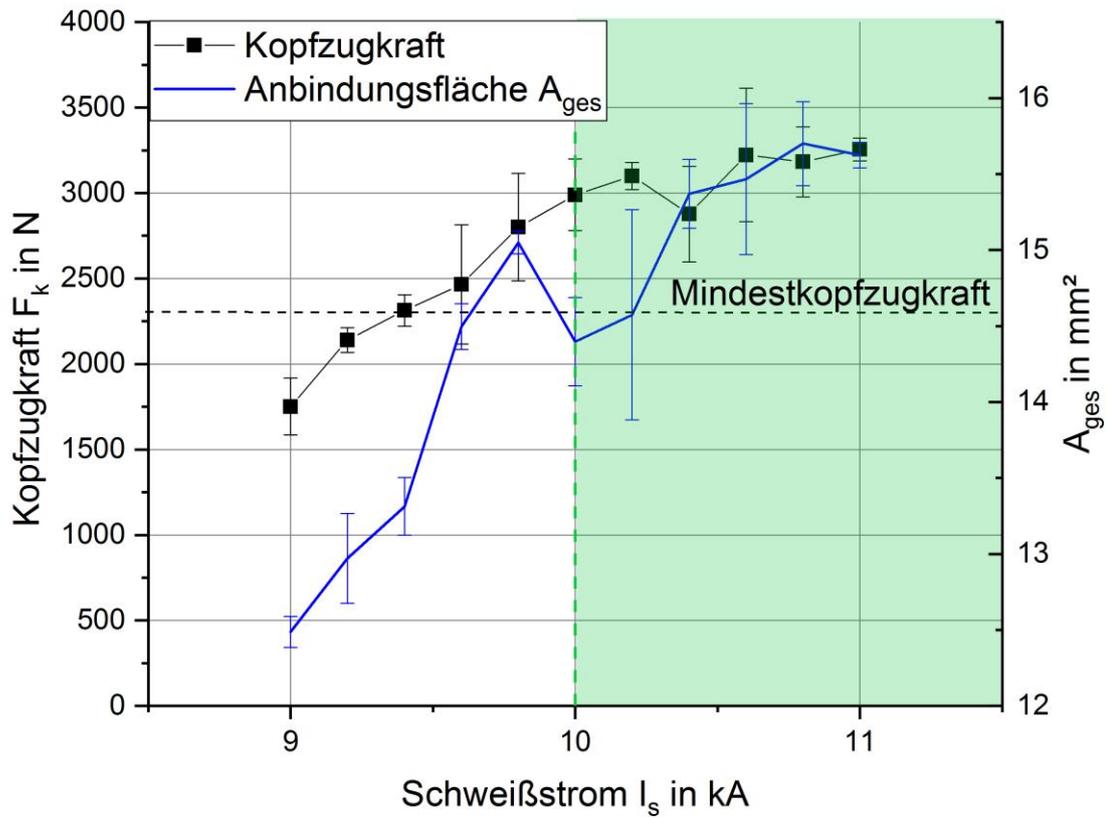


Abbildung 53 Vergleich der Kopfzugkraft mit der Anbindungsfläche in Abhängigkeit des Schweißstroms bei M5 CR340 bei 3kN Schweißkraft und 40 ms Schweißzeit

## **8. Zusammenfassung**

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Versuchspläne für die statistische Versuchsplanung untersucht. Es zeigten sich, dass die Vorhersagen zuverlässiger wurden, wenn alle Zielgrößen messbar waren, d.h. im Falle des Widerstandsschweißens schweißbare Parameter benutzt wurden.

Eine wichtige erste Erkenntnis im Projekt war, dass die Kopfzugkraft ein wesentlich sensitiverer Faktor zur Bestimmung der unteren Grenze des Schweißbereiches war als das Drehmoment. Bei allen untersuchten Proben war mit Erfüllung der Mindestkopfzugkraft auch das Mindestdrehmoment erfüllt war.

Durch die Prozesscharakteristik der konzentrierten Energieeinbringung treten vermehrt Spritzer auf. Die getroffene Einteilung der Spritzer in Spritzerklassen hat sich als bedingt geeignet gezeigt, da Einteilung anhand der Beobachtung erfolgt. Dies stellt insbesondere bei Spritzern der Klasse II und III eine Herausforderung dar. Eine Erweiterung der Klassifizierung aufgrund von Messgrößen wäre empfehlenswert, zum Beispiel Benutzung von Schwellwerten im Wegsignal. Trotz dieser Schwierigkeit lässt sich festhalten, dass Spritzer der Klasse I und zu einem großen Teil Spritzer der Klasse II keinen Beitrag zur ungenügenden Gewindegängigkeit tragen. Somit können Schweißungen bei welchen dies Auftritt als i.O. angesehen werden. Es hat sich außerdem gezeigt, dass bei verzinkten Vierkantschweißmuttern die spritzerfreiheit zu n.i.O. Schweißungen bei 22MnB5 führte. Diese wiesen eine zu geringe Kopfzugkraft auf.

Ziel war es neben dem Mindestdrehmoment, der Kopfzugkraft und der Gewindegängigkeit weitere Qualitätsgrößen zu entwickeln. Zunächst wurden die mechanischen und elektrischen Führungsgrößen und deren abgeleitete Größen untersucht. Es stellte sich heraus, dass das Wegmaximum der Elektrode, die eingebrachte Energie und die eingebrachte Leistung geeignet sind. Alle drei Größen können ebenfalls zur Prozessüberwachung und -bewertung genutzt werden. Dabei ist aufgrund der geringeren Streuung der eingebrachten Leistung den Vorzug zu geben.

Darüber hinaus wurden metallografische Untersuchungen angestrebt um Qualitätskriterien zu entwickeln. Als ein geeignetes Mittel hat sich die Vermessung der Anbindungsfläche erwiesen. Diese korreliert sehr gut mit dem Schweißstrom.

## 9. Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden folgenden Ziele angestrebt:

- a) Formulierung einer Aussage über die Zulässigkeit von Schweißspritzern
- b) Klärung des Verbindungsmechanismus an Schweißungen ohne erkennbare Schweißlinse
- c) Ausarbeitung von Qualitätskriterien für Schweißverbindungen ohne Schmelzlinse anhand von Prozessgrößen und Verbindungscharakteristiken
- d) Ableitung von Qualitätskriterien für Kurzzeitschweißungen mit Rücksicht auf Prozessstabilität, geometrische Änderungen an der Fügestelle sowie Festigkeit der Fügeverbindung

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden durch die festgelegten Schritte des Arbeitsplans erreicht.

Ziel a) die Formulierung einer Aussage über die Zulässigkeit von Schweißspritzern wurde durch umfangreiche Schweißversuche in Arbeitspaket 2 erreicht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Schweißspritzer der Klasse 0, 1 und 2 keinen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit haben. Außerdem wurde beobachtet, dass mit steigender Spritzerklasse die Festigkeiten einer größeren Streuung unterliegen. Bei Spritzern der Klasse 3 war die Streuung am größten und zeigten sich am Ende des Schweißbereiches, da mit dem Auftreten von starken Spritzern die Gewindegängigkeit negativ beeinflusst wurde.

Ziel b). Die Untersuchungen der Schweißungen konnte den Verbindungsmechanismus nicht abschließend klären. Gegen die Theorie, welche dem AIF18.987 [22] entwickelt wurde, spricht, dass ein Verdampfen der Beschichtung und ein anschließendes Aktivieren der Oberfläche nicht immer gegeben sein muss. So können durchaus Schmelzlinen bei hohen Schweißströmen auch bei kurzen Schweißzeiten auftreten. Die Detektion einer solchen Schmelzlinse kann sich als schwierig erweisen, da in einem metallographischen Schliff lediglich ein sehr geringer Ausschnitt untersucht werden kann. Eine weitere Untersuchung über den Verbindungsmechanismus ist daher zu empfehlen. Grundsätzlich erreichen jedoch auch Schweißungen ohne sichtbare Schmelzlinse eine mindestens anforderungsgerechte Festigkeit.

Ziel c). Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte mittels eines Prozessmodells eine Analyse unterschiedlicher Zielgrößen in Bezug auf ihre Aussagefähigkeit zur Verbindungsqualität. Neben den elektrischen Führungsgrößen Spannung und Schweißstrom wurden auch deren abgeleiteten Größen wie der dynamische Widerstand, die Energie und die Leistung untersucht. Zusätzlich wurden die mechanischen Führungsgrößen in Form der Elektrodenkraft und Elektrodenbewegung, sowie die abgeleiteten Größen Elektrodengeschwindigkeit und Elektrodenbeschleunigung analysiert. Bei den elektrischen Führungsgrößen hat sich die Energie und Leistung als Qualitätskriterium geeignet erwiesen. Beide Größen zeigen ein annähernd lineares Verhalten bei steigendem Schweißstrom. Die Untersuchung der mechanischen Führungsgrößen lieferte die Erkenntnis, dass der Elektrodenweg zur weiteren Betrachtung geeignet ist. Da der Elektrodenweg im Prozess einen charakteristischen Verlauf mit signifikanten Punkten besitzt, wurde dieser einer genaueren Analyse unterzogen, mit dem Ergebnis, dass der Punkt der maximalen Elektrodenbewegung sich als geeignet erwiesen hat. Ein Einfluss der Beschichtung des Funktionselements auf die untere Grenze war bei allen Werkstoffen nicht feststellbar. Zusätzlich zeigte sich, dass das Wegmaximum für 22MnB5 auch an den oberen Grenzen übereinstimmt.

Ziel d). Zusätzlich zu der Prozessanalyse erfolgten metallographische Untersuchungen an den Schweißungen. Durch das teilweise Fehlen einer Schweißlinse ist die Anwendbarkeit vieler Qualitätsmerkmale, wie zum Beispiel die Anbindungslinie, nicht möglich. Daher erfolgten umfangreiche Bruchflächenanalysen. Die Anbindungsfläche im Bruchbild zeigte eine gute Korrelation zur Kopfzugkraft und eignet sich als ein Qualitätskriterium. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Anbindungsfläche ohne weitere Präparationsschritte möglich, da diese nach der Drehmomentenprüfung durch eine optische Bildanalyse ermittelt werden kann.

Die Ermittlung von Schweißbereichen mittels statistischer Versuchsplanung wurde erfolgreich dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer geeigneten Wahl des Versuchsplans eine sehr gute Vorhersage der Schweißbereiche möglich ist, mit einer geringen Anzahl an Schweißungen.

## **10. Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen**

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

Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet. Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet. Dies ist auch zukünftig nicht geplant.

### **10.1 Wissenschaftliche-technisches Personal (Einzelansatz A1 des Finanzierungsplans)**

Aufgrund der Neueinstellung des Projektbearbeiters kam es mit Projektbeginn zu einer einmonatigen Verzögerung. Ebenfalls wirkte sich die verspätete Lieferung der Versuchswerkstoffe (KW 18, 2018) und der Funktionselemente (KW 28-29, 2018) negativ auf den Bearbeitungsbeginn der Arbeitspakete 1,2, 1.3 und 1.4 um zwei Monate. Die verwendete Schweißanlage war aufgrund eines Sensorschaden in KW 37-38 (2019) nicht einsatzfähig. Da alle folgenden Arbeitspakete auf diese Prozessdaten aufbauen, konnten diese nicht vorgezogen oder parallel bearbeitet werden, sodass sich diese Verzögerung negativ auf die geplante Bearbeitungszeit ausgewirkt hat. Des Weiteren kam es zu einem Wechsel des Projektbearbeiters in KW 4 (2019) und KW 44 (2019) wodurch es zu einer weiteren Verzögerung kam.

Ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 Monate wurde stattgegeben. 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.

Folgendes Personal wurde während der Projektlaufzeit an der Forschungsstelle IWF eingesetzt.

Für die durchzuführenden Arbeiten wurden an der Forschungseinrichtung ein wissenschaftlicher Mitarbeiter in Vollzeit für 26 Personenmonate beschäftigt.

### **10.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)**

Aufgrund der oben genannten Verzögerungen kam es zur Verschiebung der Anschaffung von Axialkraftsensoren für das Arbeitspaket 2.2 „Ableiten von Kriterien zur Charakterisierung von Kurzzeitschweißungen anhand metallografischer Untersuchungen“, sodass die notwendige Beschaffung von ursprünglich März 2019 auf November 2019 verschoben wurde. So wurde bei den bis dato stattgefundenen Schweißversuchen festgestellt, dass eine Kraftungleichverteilung beim Kurzzeitschweißen zu einer differenzierten Anbindung des Funktionselementes führte. Vermutet wird, dass aufgrund der neuartigen Maschinenkonstruktion, bei welcher die Krafterzeugung elektromagnetisch erzeugt wird, es aufgrund der Konstruktionstoleranzen zu einer Elektrodenschiefstellung und somit zu einer Kraftungleichverteilung kommen kann. Dadurch kann die Verbindungsfestigkeit reduziert werden. Durch die beschaffte vorzuspannende Piezo-Axialkraftsensoren war, es möglich die ungleichmäßige Krafteinleitung zu detektieren und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Es wurden somit Geräte in Höhe von 4281,50 € angeschafft.

### **10.3 Leistung Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)**

Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

## **11. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen**

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitete Forschungsergebnisse können in Unternehmen umgesetzt werden, die in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie tätig sind, sowie für Entwickler und Hersteller von Schweißanlagen, Technologien und zugehörigen Methoden und Einrichtungen zur Qualitätssicherung in der schweißtechnischen Verarbeitung. In diesen Bereichen sind vorwiegend Mittelständische Unternehmen tätig.

Die Ergebnisse des Projektes hinsichtlich der Zuverlässigkeit bei Schweißungen mit Spritzern haben einen signifikanten Einfluss für kleine und mittlere Unternehmen. Bei vielen Anwendungen wird das Auftreten von Schweißspritzern nicht toleriert, wodurch diese Schweißungen als nicht in Ordnung gehandhabt werden. Mit der Kenntnis der im Projekt eingeführten Spritzerklassen und deren Einfluss auf die Festigkeiten der Verbindung. Dadurch kann die Menge an Ausschuss reduziert werden, wodurch es dem Unternehmen möglich ist Kosten zu reduzieren.

Zusätzlich kann die Methode der Bestimmung von Schweißbereichen mittels DoE und der im Projekt erarbeiteten Qualitätskriterien genutzt werden, um einen Schweißbereich zu finden. Durch die Verwendung dieser Methode kann der Aufwand zur Bestimmung eines solchen Bereiches deutlich reduziert werden. Neben der Reduktion des Probenaufwandes wird auch die benötigte Zeit reduziert. Beides sind Kostenfaktoren, die dadurch verringert werden können. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen kann dies von Vorteil sein.

Die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Qualitätskriterien können für kleine und mittlere Unternehmen genutzt werden, um ein solches Schweißen mit hoher Wärmestromdichte in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie für Verbindungen umzusetzen. Durch die Benutzung dieser Verfahrensvariante werden Kosten durch geringere Energiekosten eingespart, welches zu einem Wettbewerbsvorteil führt.

Über die regelmäßige Berichterstattung im Rahmen von DVS AGV 3.9 wurden die Kenntnisse sowohl in das DVS-Merkblatt 2916-3 „Prüfen von Widerstandsschweißverbindungen – Zerstörende Prüfung, schlagartig“ eingebracht, sowie den dort beteiligten Unternehmen zur Verfügung stellt.

## 12. Transfermaßnahmen

### 12.1. Geplante Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

|   | Ziel   | Rahmen/Ort  | Datum/Zeitraum   |
|---|--|---|--|
| <b>Maßnahme A:</b><br>News  | Eine rasche und umfassende Verbreitung wird durch elektronische Medien sichergestellt.   | <b>A1</b> Einstellung der Kurzfassung in das Forschungsportal Sachsen-Anhalt (www.forschung-sachsen-anhalt.de)  | bei Projektstart   |
| <b>Maßnahme B:</b><br>Projektbegleitender Ausschuss (PA)  | Aktive Einbeziehung der PA-Mitglieder durch kontinuierliche Vorstellung des jeweiligen Projektstatus und Diskussion der laufenden Arbeiten.  | <b>B1</b> Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten<br><b>B2</b> Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse<br><b>B3</b> Abschlusspräsentation und Diskussion der Ergebnisse | ca. 2 x/Jahr während der Projektlaufzeit                                 |
| <b>Maßnahme C:</b><br>Weiterbildung / Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über Fachtagungen | Transfer von Zwischenergebnissen in die Wirtschaft   | <b>C1</b> Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik<br><b>C2</b> DVS-Congress 2018<br><b>C3</b> DVS-Congress 2019<br><b>C4</b> 16. Sommerkurs Werkstoff und Fügen der FST                       | 3. Quartal 2018<br>3. Quartal 2018<br>3. Quartal 2019<br>2. Quartal 2018 |
| <b>Maßnahme D:</b><br>Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch den Verband                        | Ergebnistransfer in die Wirtschaft   | <b>D1</b> Projektdarstellung im Geschäftsbericht der Forschungsvereinigung des DVS. und Verbreitung durch den Verband<br><b>D2</b> Mitarbeit AGV3, Aktualisierung der DVS-Merkblätter 2916        | 1 mal jährlich   |
| <b>Maßnahme E:</b><br>Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren                                   | Mitarbeiter der FST sind aktive Mitglieder in zahlreichen Gremien. Die aufgeführten Gremien tagen ca. 1 bis 2mal pro Jahr, so dass die Ergebnisse bereits während der Laufzeit mit vielen Experten diskutiert werden können. | <b>E1</b> IIW-Select Committee SC-AUTO “Automotive and Road transport”  | 1-2 mal jährlich   |
| <b>Maßnahme F:</b><br>Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung                                    | Vermittlung der Ergebnisse aus erster Hand an die Studierenden durch die enge Verzahnung von Forschung und Lehre   | <b>F1</b> Vorlesungen und Seminare an der Forschungsstelle  | laufend<br>laufend   |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  | <b>F2</b> Einbeziehung der Ergebnisse in die Doktorandenausbildung |  |
|--|--|--|--|

## 12.2. Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

|  | Ziel   | Rahmen/Ort  | Datum/Zeitraum  |
|--|--|---|---|
| <b>Maßnahme G:</b><br>Weiterbildung / Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über Fachveranstaltungen       | Weiterbildung von Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen ohne eigene Forschungskapazität mit Referenten der FST  | <b>G1</b> 17. Sommerkurs Werkstoff und Fügen der FST  | 2. Quartal 2021   |
| <b>Maßnahme H:</b><br>Weiterbildung / Transfer der Projektergebnisse in die Industrie über Vorträge auf Fachtagungen | Transfer von Forschungsergebnissen in die Wirtschaft   | <b>H1</b> DVS-Congress 2020<br><b>H2</b> Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik<br><b>H3</b> DVS-Tagung Widerstandsschweißen 2019<br><b>H4</b> Schweißtechnische Fachtagung in Magdeburg<br><b>H5</b> Fügen im Automobilbau<br><b>H6</b> Kolloquium Bericht AGV3 | 3. Quartal 2020<br>3. Quartal 2019<br>2. Quartal 2019<br>1. Quartal 2019<br>2. Quartal 2019<br>1x in Jahr |
| <b>Maßnahme I:</b><br>News   | Eine rasche und umfassende Verbreitung wird durch elektronische Medien sichergestellt.   | <b>I1</b> Einstellung der Projektveröffentlichungen in das Forschungsportal Sachsen-Anhalt ( <a href="http://www.forschung-sachsen-anhalt.de">www.forschung-sachsen-anhalt.de</a> )   | laufend   |
| <b>Maßnahme J:</b><br>Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch den Verband                                     | Ergebnistransfer in die Wirtschaft   | <b>J1</b> Darstellung ausgewählter Ergebnisse im Geschäftsbericht der Forschungsvereinigung des DVS   | 4. Quartal 2019   |
| <b>Maßnahme K:</b><br>Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren  | Mitarbeiter der FST sind aktive Mitglieder in zahlreichen Gremien. Die aufgeführten Gremien tagen ca. 1 bis 2mal pro Jahr, so dass die Ergebnisse bereits während der Laufzeit mit vielen Experten diskutiert werden können. | <b>K1</b> Kolloquium Bericht AGV3<br><b>K2</b> Bericht im DVS AGV 3.9<br><b>K3</b> Bericht im Fachausschuss 4 des DVS   | 2x jährlich   |

|  |   |   |   |
|--|---|---|---|
| <p><b>Maßnahme L:</b><br/>Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung</p>                           | <p>Vermittlung der Ergebnisse aus erster Hand an die Studierenden durch die enge Verzahnung von Forschung und Lehre</p>   | <p><b>L1</b> Vorlesungen und Seminare an der Forschungsstelle<br/><b>L2</b> Einbeziehung der Ergebnisse in die Doktorandenausbildung</p>  | <p>laufend<br/>laufend</p>  |
| <p><b>Maßnahme M:</b><br/>Veröffentlichung</p>   | <p>Ergebnistransfer in die Wirtschaft</p>   | <p><b>M1</b> Bericht auf der Website der FV/FS<br/><b>M2</b> Jahresbericht auf der Homepage der Forschungsstelle (www.iwf.ovgu.de)<br/><b>M3</b> Beitrag in Fachzeitschriften (Schweißen und Schneiden, Jahrbuch Schweißtechnik, Welding in the World)<br/><b>M4</b> Beitrag in DVS-Berichtsbänden (DVS Congress (GST) 2018, Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik)<br/><b>M5</b> DVS-Newsletter/Newsticker</p> | <p>Nach Abschluss<br/>2019<br/>Nach Abschluss<br/>Nach Abschluss<br/>Nach Abschluss</p> |
| <p><b>Maßnahme N:</b><br/>Beratung der Industrie basierend auf den erzielten Forschungsergebnissen</p> | <p>Maßgeschneiderter Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis</p>  | <p><b>N1</b> Bei Anfragen aus der Industrie weiterer Transfer der Ergebnisse in die betriebliche Praxis</p>   | <p>laufend</p>  |
| <p><b>Maßnahme O:</b><br/>Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten</p>                         | <p>Weitergabe ausführlicher Forschungsberichte in Form von Hardcopys (gebundene Ausgaben) und in Dateiform im DVS -Netzwerk an die Mitglieder insbesondere aus der Industrie durch:</p> | <p><b>O1</b> Versendung auf gezielte Anforderung aus den Unternehmen<br/><b>O2</b> Verteilung an alle Mitglieder des PA und die interessierten Unternehmen außerhalb des PA durch die FST<br/><b>O3</b> Vertrieb über den DVS</p>   | <p>laufend<br/>Nach Abschluss<br/>laufend</p>   |

### 12.3. Durchgeführte Transfermaßnahmen

| Maßnahme   | Ziele  | Ort/Rahmen  | Datum/Zeitraum   |
|--|--|---|--|
| Projektkurzfassung                                   | Information der Öffentlichkeit über Forschungsaktivität                                      | Forschungsportal Sachsen-Anhalt (www.forschung-sachsen-anhalt.de) | Letzte Aktualisierung November 2019  |
| Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)   | Vorstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen, Abstimmung, Maßnahmen, Beschlüsse fassen | Forschungseinrichtung   | 1.PA: 01.03.2018<br>2.PA: 16.10.2018<br>3.PA: 25.04.2019<br>4.PA: 18.11.2019       |
| Sitzungen des Fachausschusses 4 und AG V3-Kolloquium | Vorstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen, Anregungen der Experten aufnehmen        | Düsseldorf<br>Düsseldorf<br>Düsseldorf<br>Düsseldorf              | 12.06.2018<br>26.11.2018<br>26.06.2019<br>27.11.2019                               |
| Jahresbericht  | Information der Öffentlichkeit über Forschungsziele und Zwischenergebnisse                   | Homepage der Forschungseinrichtung                                | Januar 2018<br>Januar 2019<br>Januar 2020  |
| Sitzungen der AfT-DVS-AG V 3.9                       | Vorstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen   | Oyten<br>Hamburg<br>Dortmund<br>Wissen<br>Online                  | 23./24.05.2018<br>06./07.11.2018<br>08./09.05.2019<br>08./09.10.2019<br>09.06.2020 |
| Bachelor- und Masterarbeiten                         | Wissensvermittlung / Ausbildung des ingenieurwissenschaftlichen Personals                    | Forschungseinrichtung   | 1x Bachelorarbeit<br>1x MAP<br>1x Masterarbeit                                     |
| Sondertagung Widerstandsschweißen                    | Vorstellung der Ergebnisse   | Vortrag, DVS-Berichtband Widerstandsschweißen                     | 25.05.2019   |
| IIW Online Annual Assembly 2020                      | Vorstellung von Ergebnissen  | Vortrag   | 24.07.2020   |

| <b>Maßnahme</b>  | <b>Ziele</b>   | <b>Ort/Rahmen</b>                       | <b>Datum/Zeitraum</b> |
|------------------|--|---|-----------------------|
| Vorlesung        | Aktualisierung der Ausbildungsinhalte/Aufnahme in die Lehre    | Forschungseinrichtung                   | Ab WS 2019-20         |
| Abschlussbericht | Bericht über Ziele, Vorgehensweise und detaillierte Ergebnisse | Forschungsvereinigung des DVS           | III. Quartal 2020     |
| Publikation      | Vorstellung der Schlussergebnisse                              | Fachzeitschrift Schweißen und Schneiden | III. Quartal 2020     |

Die aufgeführten bereits erfolgten und noch ausstehenden Transfermaßnahmen werden somit insgesamt hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit als voll realisierbar eingestuft.

### 13. Literatur

- [1] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke - Übersicht (2001) 2902-1. Düsseldorf.
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Widerstandsschweißen - Verfahren für das Bestimmen des Schweißbereichsdiagramms für das Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen (2004) 14327. Berlin.
- [3] Böhme, D.: Widerstandsschweißen von höherkohlenstoffhaltigen Stählen mit sehr kurzer Wärmeeinbringung: Bericht 5128/2003 2003.
- [4] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Gütesicherung beim Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen - Grundlagen (1979) 2915-1. Düsseldorf.
- [5] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Zerstörende Prüfung, quasistatisch (2014) 2916-1. Düsseldorf.
- [6] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen - Metallografische Prüfung (2006) 2916-4. Düsseldorf.
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V.: Widerstandspunktschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen - Brucharten und geometrische Messgrößen für Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen 25.160.40 (2003) 14329. Berlin.
- [8] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik (2016) 2911. Düsseldorf.
- [9] Wagner, P.: Untersuchungen zum Anschweißen von Widerstandsschweißmuttern an Blechen aus höher- bis höchstfesten Werkstoffen. Abschlussbericht zu Forschungsvorhaben DVS-Nr. 04.039 (AiF-Nr. 14.435) 2007.
- [10] N.N.: Untersuchung des Beschichtungseinflusses beim Indirekt-Kurzzeit-Schweißen von einseitig kunststoffbeschichteten Stahlblechen. Abschlussbericht zu Forschungsvorhaben DVS-Nr. 04.036 (AiF-Nr. 13.773) 2005.
- [11] Luo, Y.; Li, J.; Wu, W.: Characterization of nugget nucleation quality based on the structure-borne acoustic emission signals detected during resistance spot welding process. In: Measurement 46 (2013) 3, S. 1053–60.
- [12] Ma, Y.; Wu, P.; Xuan, C.; Zhang, Y.; Su, H.: Review on Techniques for On-Line Monitoring of Resistance Spot Welding Process. In: Advances in Materials Science and Engineering 2013 (2013) 5, S. 1–6.
- [13] Ruisz, J.; Biber, J.; Loipetsberger, M.: Quality evaluation in resistance spot welding by analysing the weld fingerprint on metal bands by computer vision. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33 (2007) 9-10, S. 952–60.
- [14] Schlichting, J.; Brauser, S.; Pepke, L.-A.; Maierhofer, C.; Rethmeier, M.; Kreutzbruck, M.: Thermographic testing of spot welds. In: NDT & E International 48 (2012), S. 23–29.

- [15] Ambroziak, A.; Maev, R. G.; Korzeniowski, M.; Kustroń, P.; Chertov, A. M.: Real-time ultrasonic control of spot-welded steel joints. In: *Welding International* 25 (2011) 6, S. 419–23.
- [16] Karloff, A. C.; Chertov, A. M.; Gr. Maev, R.; Thompson, D. O.; Chimenti, D. E.: Real-time ultrasonic expulsion detection and indentation measurement in resistance spot welds: 36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 2010.
- [17] Wen, J.; Wang, C. S.; Xu, G. C.; Zhang, X. Q.: Real Time Monitoring Weld Quality of Resistance Spot Welding for Stainless Steel. In: *ISIJ International* 49 (2009) 4, S. 553–56.
- [18] Stibel, A.; Ulmer, C.; Kodrack, D.; Holmes, B. B.: Monitoring and Control of Spot Weld Operations: SAE International Congress and Exposition 1986.
- [19] Cho, Y.; Kim, Y.; Rhee, S.: Development of a quality estimation model using multivariate analysis during resistance spot welding. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 215 (2001) 11, S. 1529–38.
- [20] Chien, C.-S.; Kannatey-Asibu, E., JR.: Investigation of monitoring systems for resistance spot welding. In: *Welding Journal (Miami, Fla)* 81 (2002) 9, S. 195–99.
- [21] N.N.: Bestimmung des Einflusses von fertigungsbedingten Imperfektionen und betriebsbedingten Eigenschaftsänderungen auf die Festigkeit von Punktschweißverbindungen unter Crashbelastung. Abschlussbericht zu Forschungsvorhaben DVS-Nr. 04.043 (AiF-Nr. 15.259) 2009.
- [22] Institut für Fertigungstechnik, TU Dresden: Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden. Antrag zu Forschungsvorhaben DVS-Nr. 04.069 (AiF-Nr. 18.987) 2015.
- [23] Institut für Fertigungstechnik, TU Dresden; Institut für Werkstoff und Fügetechnik, OvGU Magdeburg: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe. Forschungsvorhaben DVS-Nr. 04.062 (AiF-Nr. 18.456) 2015.
- [24] Verband der Automobilindustrie e.V.: Flascherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung. *Sheet Steel for Cold Forming* (2016) 239-100.
- [25] ArcelorMittal: Steels for hot stamping - Usibor and Ductibor. URL: [https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor\\_ductibor](https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/PHS/usibor_ductibor). Abrufdatum 22.08.2020.
- [26] Institut für Werkstoff und Fügetechnik, OvGU Magdeburg: Untersuchungen zum Einfluss des Oberflächen- und Werkstoffzustandes auf die Widerstandspunktschweißbarkeit formgehärteter Bleche. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben DVS-Nr. 04.060 (AiF-Nr. 18.939 B).
- [27] Volkswagen AG: Festigkeitsprüfung der Schweißverbindung von Schweißmuttern/ -schrauben 60560.