



**Nutzung vorhandener Standmengenpotentiale,
Verschleißverringerung durch angepasste
Elektrodenwerkstoffe und Elektrodenverschleiß-
diagnose beim Widerstandspunktschweißen**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

Dipl.-Ing. Christoph Großmann
geb. am 21.01.1984 in Räckelwitz

Tag der Einreichung: 03. Mai 2018

Tag der Verteidigung: 29. April 2019

Promotionskommission: Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. A. Brosius
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel
Prof. Dr.-Ing. habil. J. P. Bergmann
Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans-Jürgen Ullrich

Vorwort

Die experimentellen Anteile der vorliegenden Arbeit entstanden in den Jahren 2009 bis 2015 während meiner Zeit als Promotionsstudent an der Professur für Fügetechnik und Montage, unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel, im Institut für Fertigungstechnik der Fakultät Maschinenwesen an der TU Dresden. Herrn Prof. Füssel gilt mein besonderer Dank für die Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Referats. Vor allem möchte ich mich für die wertvollen Anregungen sowie die motivierenden und ergebnisreichen Diskussionen bedanken, die den Fortschritt der Arbeit prägten.

Besonderen Dank möchte ich darüber hinaus Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans-Jürgen Ullrich für die Zusammenarbeit bei den zahlreichen wertvollen Messungen und für die intensiven Fachgespräche sowie für die Übernahme des Koreferats aussprechen. Auch die enge wissenschaftliche Zusammenarbeit mit zahlreichen Kollegen gestaltete den Inhalt der Arbeit. Zu ihnen gehören unter anderem Dipl.-Ing. Christian Mathiszik, Dipl.-Ing. Raffael Hipp, Dipl.-Ing. Ingo Boersch, Dr.-Ing. Frank Schubert, Dr.-Ing. Eike-Christian Klages, Dr.-Ing. Michael Pejko und Dr.-Ing. Jörg Zschetzsche.

Neben allen aufgezählten Unterstützern gilt der besondere Dank meiner Frau Cornelia, die mir den Rücken freihielt, damit diese Arbeit auch neben dem Beruf abgeschlossen werden konnte. Auch meiner Tochter Evalyn gehört mein Dank, weil sie durch ihre wundervolle Ausstrahlung immer Kraft für die nächsten Stunden am Schreibtisch gab.

„Wer alles durchschaut, sieht nichts mehr.“ C. S. Lewis

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 2. Grundlagen zur Prozessweiterentwicklung | 5 |
| 2.1. Das Kontaktelement Elektrodenkappe | 6 |
| 2.1.1. Elektrodenkontaktfläche | 9 |
| 2.1.2. Elektrodenwerkstoffe | 10 |
| 2.1.3. Elektrodenherstellung | 11 |
| 2.2. Bewerten der Verbindungsqualität | 14 |
| 2.3. Verbindungsbewertung durch zerstörende Prüfung | 16 |
| 2.4. Verbindungsbewertung durch zerstörungsfreie Prüfung | 18 |
| 2.4.1. Merkblätter | 20 |
| 2.4.2. Fachliteratur | 21 |
| 2.5. Messwertgewinnung beim Widerstandspunktschweißen | 26 |
| 2.5.1. Messen nichtelektrischer Größen | 27 |
| 2.5.2. Messen elektrischer Größen | 29 |
| 2.5.3. Umgang mit elektromagnetischen Einflüssen | 31 |
| 2.5.4. Abschätzung von Messunsicherheiten | 32 |
| 3. Stand der Wissenschaft zu Elektrodenverschleiß und Verschleißverständnis | 35 |
| 3.1. Verschleißerscheinungen | 36 |
| 3.1.1. Verschleißerscheinungen zwischen Cu(Cr)Zr-Elektroden und verzinkten Stählen | 36 |
| 3.1.2. Verschleißerscheinungen zwischen dispersionsgehärteten Elektroden und verzinkten Stählen | 38 |
| 3.1.3. Verschleißerscheinungen zwischen CuCr1Zr und 22MnB5+AS sowie zwischen W- bzw. Mo-Elektroden und verzinkten Stählen | 38 |
| 3.2. Verschleißmechanismen | 39 |
| 3.2.1. (Warm-)Verformung | 40 |
| 3.2.2. Entfestigung | 40 |
| 3.2.3. Diffusion | 40 |
| 3.2.4. Abreißen der Grenzflächen | 41 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.5. | Thermisch induzierte mechanische Spannungen | 41 |
| 3.3. | Verschleißgrößen | 41 |
| 3.3.1. | Elektrodenkappen | 42 |
| 3.3.2. | Kühlung | 43 |
| 3.3.3. | Bleche | 45 |
| 3.3.4. | Kraft | 47 |
| 3.3.5. | Elektrischer Strom | 48 |
| 3.3.6. | Taktzeit | 50 |
| 3.3.7. | Auswahl von Prozessgrößen und Prozessparametern | 52 |
| 3.4. | Schlussfolgerungen aus dem Elektrodenkappenverschleiß | 52 |
| 3.4.1. | Prozessbedingungen | 53 |
| 3.4.2. | Elektroden | 54 |
| 3.4.3. | Kontaktbedingungen | 56 |
| 3.4.4. | Verständnis des Elektrodenverschleißes | 56 |
| 4. | Experimente zum Bewerten der Verbindungsqualität bei Standmengenversuchen | 59 |
| 4.1. | Randbedingungen bei Standmengenversuchen | 59 |
| 4.2. | Einsatz von Kenngrößen aus zerstörenden Prüfungen | 61 |
| 4.3. | Einsatz von Kenngrößen aus zerstörungsfreien Prüfungen | 65 |
| 4.3.1. | Magnetfeldprüfung | 66 |
| 4.3.2. | Elektrische Leitfähigkeitsprüfung | 69 |
| 4.3.3. | Thermographische Prüfung | 70 |
| 4.3.4. | Durchstrahlungsprüfung | 72 |
| 4.3.5. | Ultraschallprüfung | 74 |
| 4.4. | Festlegung auf eine charakteristische Größe aus Standmengenversuchen für Data-Mining-Analysen | 80 |
| 5. | Versuchsaufbau, -planung und -durchführung der Standmengen-Experimente | 85 |
| 5.1. | Versuchsaufbau | 85 |
| 5.2. | Versuchsplanung | 87 |
| 5.2.1. | Werkstoffauswahl - Bleche und Elektroden | 87 |
| 5.2.2. | Prozessparameterauswahl und Versuchsmatrix | 90 |
| 5.3. | Versuchsdurchführung | 91 |
| 5.3.1. | Wachstumskurven | 92 |
| 5.3.2. | Standmengen- und Stufenversuche | 93 |
| 5.3.3. | Verschleißdokumentation | 94 |
| 5.3.4. | Metallographische Analyse | 99 |

| | |
|---|------------|
| 6. Verschleiß und Standmenge von Standard-CuCr1Zr-Elektroden | 105 |
| 6.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix | 106 |
| 6.2. Standmengen | 109 |
| 6.3. Verschleißdokumentation | 113 |
| 6.3.1. Kontaktflächen-Geometrie | 113 |
| 6.3.2. Kontaktflächen-Härte | 118 |
| 6.3.3. Kontaktflächen-Legierung | 119 |
| 6.4. Ergebnisdiskussion | 123 |
| 7. Verschleißverringern durch modifizierte CuCr1Zr-Elektroden | 127 |
| 7.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix | 128 |
| 7.2. Standmengen | 130 |
| 7.3. Verschleißdokumentation | 133 |
| 7.4. Ergebnisdiskussion | 138 |
| 8. Verschleißverringern durch dispersionsgehärtete Cu-Elektroden | 141 |
| 8.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix | 142 |
| 8.2. Standmengen | 143 |
| 8.3. Verschleißdokumentation | 146 |
| 8.3.1. Kontaktflächen-Geometrie | 146 |
| 8.3.2. Kontaktflächen-Härte | 148 |
| 8.3.3. Kontaktflächen-Legierung | 148 |
| 8.4. Ergebnisdiskussion | 151 |
| 9. Methodik zur Optimierung bzw. optimalen Auswahl von Elektrodenkappenwerkstoffen | 153 |
| 10. Standmengenausnutzung und Elektrodenverschleißerkennung mittels Data-Mining | 159 |
| 10.1. Definition Data-Mining und Auswahl eines geeigneten Teilgebietes | 160 |
| 10.2. Verwandte Arbeiten | 160 |
| 10.3. Aufbau und Durchführung des Data-Mining | 162 |
| 10.3.1. Datenbasis | 162 |
| 10.3.2. Datenauswahl und -bereinigung | 163 |
| 10.3.3. Datenreduktion | 165 |
| 10.3.4. Modellbildung und Auswahl relevanter Modelle | 167 |
| 10.4. Ergebnisse des Data-Mining | 168 |
| 10.5. Ergebnisdiskussion und Ausblick auf die Praxis | 171 |
| 11. Zusammenfassung und Ausblick | 173 |
| Literatur | 179 |

| | |
|--|------------|
| A. Anhang – Grundlagen | 207 |
| B. Anhang – Bewerten der Verbindungsqualität | 215 |
| C. Anhang – Versuchsaufbau, -planung und -durchführung | 223 |
| D. Anhang – Verschleiß und Standmenge von Standard-CuCr1Zr-Elektroden | 227 |
| E. Anhang – Verschleißverringern durch modifizierte CuCr1Zr-Elektroden | 231 |
| F. Anhang – Verschleißverringern durch dispersionsgehärtete Cu-Elektroden | 233 |
| G. Anhang – Data-Mining | 235 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|--|
| BSE | back scattered electrons, Rückstreuelektronen |
| CT | Computer Tomograph |
| EDX | Energiedispersive Röntgenspektroskopie |
| EI. | Elektrode |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| EU | Europäische Union |
| IACS | International Annealed Copper Standard |
| IR-Kamera | Infrarot-Kamera |
| MK | Mischkristall/e |
| M5P | Quinlan Modell Tree M5 / dt.: M5 Entscheidungsbaum |
| N/A | not available (nicht verfügbar) |
| Pkw | Personenkraftwagen |
| SAM | Scannendes Akustisches Mikroskop |
| SE | Sekundärelektronen |
| sg | startgefräst als Zustand einer Elektrodenkontaktfläche |
| stm | Standmenge vorrangig Versuchsreihe einer Standmengenkurve |
| RMSE | Root Mean Squared Error / dt.: Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme |
| RSW | Resistance Spot Welding / dt.: Widerstandspunktschweißen |
| RSW-Q | Qualitätsbild aus US Z-Scan einer Widerstandspunktschweißverbindung |
| SRKK | Spearman's Rangkorrelationskoeffizient |
| UDE | User Defined Error, dt.: nutzerdefinierter Fehler |
| ug | ungefräst als Zustand einer Elektrodenkontaktfläche |
| US | Ultraschall / engl.: Ultrasonic |

Symbolverzeichnis

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|-------------------|--|----------|
| A_c | Wahre Kontaktfläche / true contact area | mm^2 |
| A_w | Fläche des aufgeschmolzenen Bereiches | mm^2 |
| b | Probenbreite / Blechbreite | mm |
| d_c | Durchmesser der Haftzone | mm |
| d_{eu} | Durchmesser des oberen Elektrodeneindrucks | mm |
| d_n | Linsendurchmesser | mm |
| d_p | Ausknöpfdurchmesser (ausgeknöpfter Bereich) | mm |
| d_w | Punktdurchmesser (aufgeschmolzener Bereich) | mm |
| f | Frequenz | Hz |
| F_{El} | Elektrodenkraft | kN |
| $F_{S_{max}}$ | Maximale Zugkraft bei Scherzugprüfung | kN |
| I_w | Stromstärke | kA |
| $I_{w,post}$ | Nachwärm-Stromstärke | kA |
| $I_{w,pre}$ | Vorwärm-Stromstärke | kA |
| l_t | Länge eines einzelnen Probenbleches | mm |
| $M_{T_{max}}$ | Maximales Drehmoment bei Torsionsprüfung | Nm |
| p | Schalldruck | Pa |
| \dot{Q} | Wärmestrom | W |
| $Q_{Kuehlwasser}$ | Durchflussmenge des Kühlwassers | l/min |
| r_c | Radius von A_c bei Annahme einer Kreisfläche | mm |
| R_E | Engewiderstand | Ω |
| R_F | Fremdschichtwiderstand | Ω |
| R_K | Kontaktwiderstand | Ω |
| $R_{p0,2}$ | Dehngrenze | MPa |
| s_{El} | Elektrodenweg | mm |
| t | Blechdicke | mm |
| t_i | Blechdicke, $i=1$ bis x , beginnend mit oberem Blech | mm |
| t_{chill} | Pausenzeit / chill time | ms |
| $t_{F_{El},fall}$ | Kraftabfallzeit / force fall time | ms |

| Symbol | Beschreibung | Einheit |
|---------------------------|--|-------------------------------|
| $t_{F_{El,hold}}$ | Nachhaltezeit / hold time | <i>ms</i> |
| $t_{F_{El,maintain}}$ | Krafthaltezeit / force maintenance time | <i>ms</i> |
| $t_{F_{El,rise}}$ | Kraftanstiegszeit / force rise time | <i>ms</i> |
| $t_{I_w,delay}$ | Stromverzögerungszeit / current delay time | <i>ms</i> |
| $t_{I_w,ds}$ | Stromabfall / down slope | <i>ms</i> |
| $t_{I_w,post}$ | Nachwärmzeit / post-heat time | <i>ms</i> |
| $t_{I_w,pre}$ | Vorwärmzeit / preheat time | <i>ms</i> |
| $t_{I_w,up}$ | Stromanstieg / upslope | <i>ms</i> |
| $t_{squeeze}$ | Vorhaltezeit / squeeze time | <i>ms</i> |
| t_w | Stromzeit | <i>ms</i> |
| T_{El} | Temperatur der Elektrode | <i>K</i> |
| U | Spannung / Schweißspannung | <i>V</i> |
| \dot{V} | Volumenstrom | <i>m³/s, l/min</i> |
| W_S | Scherzugarbeit | <i>J</i> |
| W_T | Torsionsarbeit | <i>J</i> |
| α | Wärmeausdehnungszahl | $10^{-6}K^{-1}$ |
| $\vartheta_{Kuehlwasser}$ | Kühlwassertemperatur | $^{\circ}C$ |
| ξ | Teilchenauslenkung / Schallauslenkung | <i>m</i> |
| χ_i | Einflussgröße innerhalb einer Messkette | vorw. <i>mV</i> |
| σ | elektrische Leitfähigkeit / Konduktivität | <i>MS/m</i> oder <i>IACS</i> |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1. | Hauptmerkmale des Fertigungsverfahrens Widerstandspunktschweißen . . . | 5 |
| 2.2. | Grundlegende Prozesswirkung auf Elektroden und Verbindungsqualität . . | 6 |
| 2.3. | Struktur der Kontaktfläche, angelehnt an [159] | 9 |
| 2.4. | Stadien des mechanischen Legierens, angelehnt an [258] | 13 |
| 2.5. | Elektrodenherstellung aus Stangenmaterial mittels Kaltumformen | 14 |
| 2.6. | Merkmale im Querschliff an Widerstandspunktschweißverbindungen | 15 |
| 2.7. | Beeinflussungsmodell der EMV in Anlehnung an [145] [264] [118] | 31 |
| 2.8. | Spannungsmessung für Punktschweißverbindung Nummer 997 Mod-3_stm2 | 34 |
| 3.1. | Chem. Zusammensetzung der Kontaktfläche nach 5 000 Schweißungen | 36 |
| 3.2. | Einflussmöglichkeiten auf Wärmeabtransport, Widerstandspunktschweißen | 45 |
| 3.3. | Einfluss von Kraft, Strom und Kühlung auf die Standmenge | 49 |
| 3.4. | Einfluss der Taktzeit auf die Elektrodentemperatur [113] | 51 |
| 3.5. | Ansätze zum Umgang mit Elektrodenkappenverschleiß | 53 |
| 4.1. | Prüfstücke für Standmengenversuche nach ISO 8166 | 60 |
| 4.2. | Entwickeltes Drehmomentwerkzeug für Torsionsprüfung | 61 |
| 4.3. | Bruchbild nach Meißel- und nach Torsionsprüfung & Verfahrensgrenzen . . | 64 |
| 4.4. | Messungen am Querschliff in Abhängigkeit zur Lage der Schnittebene . . . | 64 |
| 4.5. | Veränderungen im Punktdurchmesser über eine Standmenge | 65 |
| 4.6. | Mögliche Signalwechselwirkungen bei der zfP | 66 |
| 4.7. | Prozessabläufe beim Magnetisieren senkrecht zur Blechebene | 67 |
| 4.8. | Magnetfeld-Visualisierung an zwei ausgewählten Verbindungen | 69 |
| 4.9. | Schematischer Aufbau der durchgeführten Thermografischen Prüfung . . . | 71 |
| 4.10. | Wärmestrahlung und Wärmefeld an Widerstandspunktschweißverbindung . | 71 |
| 4.11. | Amplitudenbild und Auflichtmikroskopische Betrachtungen | 72 |
| 4.12. | Versuchsaufbau bei der Computertomographie | 73 |
| 4.13. | Ergebnis einer 3D-Computertomographie für Prüfblechstreifen | 73 |
| 4.14. | Fügeebene aus 3D-Computertomographie und Meißelprüfung | 74 |
| 4.15. | Versuchsaufbau bei der Ultraschallprüfung | 75 |
| 4.16. | C-Bild aus Fügeebene mit drei repräsentativen A-Bildern | 75 |

| | |
|---|-----|
| 4.17. C-Bild aus Fügeebene, RSW-Q-Bild, ausgeknöpfter Butzen und Merkmale der US-Bilder | 76 |
| 4.18. Kreuzkorrelation zwischen den drei Bildern aus Abbildung 4.17 | 78 |
| 4.19. Schallsignal bei der Inline-Ultraschallprüfung mittels Transversalwellen . . | 78 |
| 4.20. Verlauf der Durchschallung mittels Transversalwellen | 79 |
| | |
| 5.1. Kühlbedingungen während der Experimente | 87 |
| 5.2. Wirbelstromprüfung an Elektrodenkappen zur el. Leitfähigkeitsbestimmung | 90 |
| 5.3. Wachstumskurve mit Legende, beispielhaft | 92 |
| 5.4. Zerstörtes Prüfblech für Standmengen- und Stufenversuche, schematisch . . | 93 |
| 5.5. Beispielhafte Standmengenkurve mit Legende | 94 |
| 5.6. Klassifizierung zu Abbildung C.4, optisch aktive Verfahren | 95 |
| 5.7. Konfokal chromatisches Messprinzip und Beispielmessergebnis | 97 |
| 5.8. Freistellung der Kontaktflächenmerkmale am Beispielmessergebnis | 98 |
| 5.9. Echtfarbdokumentation für Elektrodenkontaktfläche und Bruchbild | 99 |
| 5.10. Markierung und Kennzeichnungen an geschnittenen Elektrodenkappen . . . | 100 |
| 5.11. Mikrohärtemessung, beispielhaftes Messergebnis mit Legende | 101 |
| 5.12. Legierungsschichtausprägung, beispielhaft | 101 |
| 5.13. Legierungsschichtzusammensetzung, beispielhaftes Messergebnis | 102 |
| | |
| 6.1. Wachstumskurven CuCr1Zr sg an 1,0 mm DX53D bei 100 ms + 300 ms . . | 106 |
| 6.2. Wachstumskurven CuCr1Zr sg an 1,5 mm 22MnB5+AS, t_w 600 + 800 ms . | 107 |
| 6.3. Standmengen für CuCr1Zr sg an 1,0 mm DX53D+Z, t_w 100 ms + 300 ms . | 109 |
| 6.4. Standmengen für CuCr1Zr ug an 1,0 mm DX53D + sg an 1,5 mm DX54D, t_w je 300 ms | 110 |
| 6.5. Standmengen für CuCr1Zr sg an 1,5 mm 22MnB5+AS bei t_w 600 ms . . . | 111 |
| 6.6. Standmengen für CuCr1Zr sg an 1,5 mm 22MnB5+AS bei t_w 800 ms . . . | 112 |
| 6.7. Konfokal chromatische Ergebnisse von CuCr1Zr-std, feuerverzinter Stahl . | 114 |
| 6.8. Konfokal chromatische Ergebnisse von CuCr1Zr-std, 22MnB5+AS | 116 |
| 6.9. Erweiterte geometrische Kennzeichen für CuCr1Zr an 22MnB5+AS | 117 |
| 6.10. Härteverläufe in den Elektrodenkappen CuCr1Zr-2-1000_stm1, Teil 1 . . . | 118 |
| 6.11. Legierungsschichtausprägung + Kennzeichen CuCr1Zr, feuerverz. Stähle . . | 120 |
| 6.12. Legierungsschichtausprägung + Kennzeichen CuCr1Zr + Stählen mit AlSi | 121 |
| 6.13. Legierungsschichtzusammensetzung an CuCr1Zr, feuerverzinkte Stahlbleche | 122 |
| 6.14. Legierungsschichtzusammensetzung an CuCr1Zr, AlSi beschichteter Stahl . | 123 |
| | |
| 7.1. Überblick der gefertigten CuCr1Zr-Modifikationen (relative Messwerte) . . | 127 |
| 7.2. Wachstumskurven für den Elektrodenwerkstoff Mod-3 | 129 |
| 7.3. Standmengenkurven für die Elektrodenwerkstoffe Mod-1 und Mod-5 | 131 |
| 7.4. Standmengenkurven für den Elektrodenwerkstoff Mod-20 | 131 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.5. | Standmengenkurven für die Elektrodenwerkstoffe Mod-6 und Mod-3 | 132 |
| 7.6. | Standmengenkurven für den Elektrodenwerkstoff Mod-8 | 133 |
| 7.7. | Konfokal chromatischen Messergebnisse von Mod-5, Mod-6 und Mod-3 . . | 134 |
| 7.8. | Härteverläufe in den Elektrodenkappen Mod-5, Mod-6 und Mod-3 | 136 |
| 7.9. | Legierungsschichtausprägung und Kennzeichen an Mod-3_stm1 | 137 |
| 7.10. | Legierungsschichtzusammensetzung der Elektroden aus mod. CuCr1Zr . . . | 139 |
| 7.11. | Elementmapping der Elektroden aus mod. CuCr1Zr | 139 |
| | | |
| 8.1. | Wachstumskurven Cu ug dispersionsgehärtet, 1,0 mm DX53D, $t_w = 300 ms$ | 142 |
| 8.2. | Standmengenkurven startgefräste Nitrode und C3/60 an 1,0 mm DX53D . | 144 |
| 8.3. | Standmengenkurven für C3/30 und C3/80 an 2,0 mm HX300LAD | 144 |
| 8.4. | Standmengenkurven für C3/60 startgefräst an 2,0 mm HX300LAD | 145 |
| 8.5. | Konfokal chromatische Ergebnisse, Nitrode & Discup C3/60, 1,0 mm DX53D | 146 |
| 8.6. | Härteverläufe in dispersionsgehärteten Kupfer-Elektrodenkappen, Teil 1 . . | 148 |
| 8.7. | Legierungsschichtausprägung und Kennzeichen am Beispiel der Nitrode . . | 149 |
| 8.8. | Legierungsschichtzus. dispersionsgehärteter Elektroden, Teil 1-1 | 150 |
| 8.9. | Legierungsschichtzus. dispersionsgehärteter Elektroden, Teil 1-2 | 151 |
| 8.10. | Legierungsschichtzus. dispersionsgehärteter Elektroden, Teil 1-2 | 151 |
| | | |
| 9.1. | Konzept zur Optimierung / optimalen Auswahl von Elektrodenwerkstoffen | 154 |
| 9.2. | Einfluss von Vorwärm- und Nachwärmepuls auf die Scherzugfestigkeit bei den Stählen HCT600X+Z + 22MnB5+AS150 | 156 |
| | | |
| 10.1. | Standmenge für Versuch Mod-3_stm3, vollständig klassifiziert | 163 |
| 10.2. | Überblick Spannungssignale, klassifizierte Schweißungen von Mod-3_stm3 . | 164 |
| 10.3. | Segmentierung der Kraft- und Wegsignale | 165 |
| 10.4. | Segmentierung der elektrischen Signale und Kühlwassergrößen | 166 |
| 10.5. | Systematik zur Setups-Evaluation & zum Aufbau Vorhersagemodelle . . . | 167 |
| 10.6. | $RMSE_{training}$ als Kreuzvalidierungsmittelwert vs. $RMSE_{test}$ | 169 |
| 10.7. | Vorhersage M5p Modell, 249 Merkmale via SRKK | 171 |
| | | |
| 11.1. | Standmengenergebnisse dieser Arbeit | 174 |
| | | |
| A.1. | Schematisches Strom- und Elektrodenkraft-Diagramm | 207 |
| A.2. | Einflüsse auf die Aussagesicherheit von Prüfergebnissen | 208 |
| A.3. | Standardisierte zerstörende Verbindungsprüfungen (schematisch) | 209 |
| | | |
| B.1. | Magnetfeld-Visualisierung am Bsp. Mod-3_stm3 | 216 |
| B.2. | Spektren zweier A-Bilder unterschiedlicher Verbindungsqualitäten | 218 |
| B.3. | Metallographischer Schliff aus Versuchsnr. us-sam_iii-min | 219 |
| B.4. | Kreuzkorrelationsmatrix für C-Bild, RSW-Q-Bild und ausgeknöpftes Bild . | 220 |
| B.5. | Eigenentwicklung Sender-, Empfänger- & Anschlussplatine, schematisch . . | 221 |

| | | |
|------|---|-----|
| B.6. | Gesamtansicht Messaufbaus mit Vergleich zur Bosch-Senderplatine | 221 |
| B.7. | Einfluss von Stromstärke auf die Ultraschalltransmission | 222 |
| B.8. | Einfluss von Stromzeit auf die Ultraschalltransmission | 222 |
| C.1. | Schaltplan mit Messtechnik für Standmengen- und Stufenversuche | 224 |
| C.2. | Nutzeroberfläche des entwickelten Messprogramms zur Datenerfassung . . . | 225 |
| C.3. | Werkzeuge zur Elektrodenbearbeitung: AEG Fräskopf + Zapfenmesser . . . | 225 |
| C.4. | Klassifizierung von Verfahren zur Geometrie und Oberflächenvermessung . . | 226 |
| D.1. | Wachstumskurven CuCr1Zr ug an 1,0 mm DX53D und sg an 1,5 mm DX54D, t_w je 300 ms | 227 |
| D.2. | Wachstumskurven CuCr1Zr sg an 1,5 mm 22MnB5+AS bei t_w 400 ms . . . | 228 |
| D.3. | Standmengenkurven für CuCr1Zr sg an 2,0 mm HX300LAD bei t_w 1000 ms | 228 |
| D.4. | Standmengenkurven CuCr1Zr sg an 1,5 mm 22MnB5+AS bei t_w 400 ms . . | 229 |
| D.5. | Härteverläufe in den Elektrodenkappen CuCr1Zr-2-1000_stm1, Teil 2 . . . | 229 |
| D.6. | Mikrohärteverteilung über Querschnitt, analog zu CuCr1Zr-22Mn-800 . . . | 229 |
| D.7. | Systematik bei Bewertung äußerer & innerer Legierungsschichtverteilungen | 230 |
| F.1. | Standmengenkurven für C3/60 ungefräst an 2,0 mm HX300LAD | 233 |
| F.2. | Härteverläufe in dispersionsgehärteten Kupfer-Elektrodenkappen, Teil 2 . . | 234 |
| F.3. | Legierungsschicht an dispersionsgehärteten Elektroden, Teil 2 | 234 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| 2.1. Zusammensetzung & Eigenschaften ausgewählter Elektrodenwerkstoffe [81] | 11 |
| 2.2. Bewerten der Verbindungsqualität mittels zerstörender Prüfung, Teil 1 . . . | 16 |
| 2.3. Bewerten der Verbindungsqualität mittels zerstörender Prüfung , Teil 2 . . . | 17 |
| 2.4. Verfahren & deren Einteilung zur zerstörungsfreien Verbindungsbewertung | 19 |
| 3.1. Einfluss auf die Standmenge durch Elektroden | 43 |
| 3.2. Einfluss auf die Standmenge durch Elektrodenkühlung | 45 |
| 3.3. Einfluss auf die Standmenge durch Bleche | 46 |
| 3.4. Einfluss auf die Standmenge durch Elektrodenkraft und Haltezeiten | 48 |
| 3.5. Einfluss auf die Standmenge durch Stromstärke, Stromzeit und Strompulse | 50 |
| 3.6. Einfluss auf die Standmenge durch die Taktzeit | 51 |
| 3.7. Überblick zum Umgang mit Elektrodenkappenverschleiß | 53 |
| 4.1. Überblick zum Dokumentationsumfang nach ISO 8166 [83] | 60 |
| 4.2. Werkstoffpaarungen für Vergleich zwischen Torsions- und Meißelprüfung . | 62 |
| 4.3. Vergleich der Durchschnittsdurchmesser bei Torsions- und Meißelprüfung . | 63 |
| 4.4. Entscheidungshilfe zur Verbindungsbewertung bei Standmengenversuchen . | 81 |
| 5.1. Messgrößen aller Standmengen- und Stufenversuche | 86 |
| 5.2. Mechanische Kennwerte und Blechdicke der verwendeten Stahlbleche | 88 |
| 5.3. Gemessene Beschichtungsdicken bei den verwendeten Stählen | 88 |
| 5.4. Hauptlegierungselemente der verwendeten Stahlbleche | 88 |
| 5.5. Bezeichnung, Legierungselemente, Eigenschaften der Elektrodenwerkstoffe . | 89 |
| 5.6. Versuchsmatrix 2x DX53D+Z100 1,0 mm | 90 |
| 5.7. Versuchsmatrix 2x DX54D+Z100 1,5 mm & 2x HX300LAD+Z100 2,0 mm . | 91 |
| 5.8. Versuchsmatrix 2x 22MnB5+AS150 1,5 mm | 91 |
| 5.9. Beispiele für jede Untergruppe der optisch aktiven Verfahren | 96 |
| 6.1. Versuchsmatrix CuCr1Zr-Elektroden mit Vergleichs-Prozessbedingungen . | 105 |
| 6.2. Zu Tabelle 6.1 ergänzte Versuchsbedingungen | 106 |
| 6.3. Wachstumskurven und Stromstärken für Standmengenversuche | 108 |
| 6.4. Standmengenergebnis für CuCr1Zr an verzinkten + AlSi Stahlblechen . . . | 113 |
| 6.5. Kontaktflächen-Geometrie Standard-CuCr1Zr an feuerverzinkten Stählen . | 115 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.6. | Kontaktflächen-Geometrie von Standard-CuCr1Zr an 22MnB5+AS | 117 |
| 6.7. | Legierungsausprägung Standard-CuCr1Zr an feuerverzinkten Stählen | 120 |
| 6.8. | Legierungsschichtausprägung bei Standard-CuCr1Zr an AlSi Stählen | 122 |
| 7.1. | Versuchsmatrix modifizierte CuCr1Zr-Elektroden, Werkstoffauswahl | 128 |
| 7.2. | Versuchsmatrix CuCr1Zr modifiziert, primäre Prozessparameter | 128 |
| 7.3. | Wachstumskurven-Ergebnisse und Stromstärken für Standmengenversuche | 130 |
| 7.4. | Standmengenenergebnis-Überblick für Elektroden aus modifiziertem CuCr1Zr | 133 |
| 7.5. | Kontaktfläche zum Standmengenende aller CuCr1Zr-mod-Elektroden | 135 |
| 7.6. | Ausschnitt aus Härteverläufe aller modifizierten CuCr1Zr-Elektroden | 136 |
| 7.7. | Legierungsschichtausprägung der modifizierten CuCr1Zr-Elektroden | 138 |
| 8.1. | Versuchsmatrix für Elektroden aus Al ₂ O ₃ dispersionsgehärtetem Kupfer | 141 |
| 8.2. | Ergänzende Versuchsbedingungen zu Tabelle 8.1 | 142 |
| 8.3. | Ergebnisse der Wachstumskurven & Stromstärken für Standmengenversuche | 143 |
| 8.4. | Standmengen dispersionsgehärteter Elektroden an verzinkten Stählen | 145 |
| 8.5. | Kontaktflächen-Geometrie Nitrode & Discup C3/60 an 1,0 mm DX53D | 147 |
| 8.6. | Legierungsschichtausprägung bei dispersionsgehärteten Kupfer-Elektroden | 149 |
| 9.1. | Prozessparameter zu den Ergebnissen in Abbildung 9.2 | 156 |
| 10.1. | Setup Prognosegüte aus Merkmalsauswahl und Modellbildner | 170 |
| 11.1. | Einsparpotentiale durch Standmengenausnutzung, Beispiel: Pkw-Fertigung | 177 |
| A.1. | Einflussgrößen der verwendeten Messtechnik auf die Messkette | 210 |
| A.2. | Messunsicherheitsberechnung zur Spannungsmessung | 211 |
| A.3. | Messunsicherheitsberechnung zur Strommessung | 211 |
| A.4. | Messunsicherheitsberechnung zur Kraftmessung | 212 |
| A.5. | Messunsicherheitsberechnung zur Elektrodenwegmessung | 212 |
| A.6. | Messunsicherheitsberechnung zur Kühlwasserdurchflussmessung | 213 |
| A.7. | Messunsicherheitsberechnung zu den Kühlwassertemperaturmessungen | 213 |
| B.1. | Vergleich von Arbeit + Maximalwerten bei Torsions- und Scherzugprüfung | 215 |
| B.2. | Kenndaten der IR-Kamera des ILK der TU Dresden | 215 |
| B.3. | Emissionskoeffizienten beim RSW von Stahl | 217 |
| B.4. | Kenndaten des Computertomographen v tome x l 450 vom ILK | 217 |
| B.5. | Technische Daten des SAM vom IKTS Dresden | 218 |
| B.6. | Am SAM eingesetzte Ultraschallwandler | 218 |
| B.7. | Werkstoffe und Prozessparameter zur US-Verbindungsbewertung | 219 |
| B.8. | Ergebnisse der Meißelprüfung zur US-Verbindungsbewertung | 219 |
| B.9. | Technische Daten des Ultraschallsenders Y40S-3B für Transversalwellen | 220 |

| | |
|---|-----|
| B.10. Technische Daten des Ultraschallempfängers Y30E-5C für Inline-Prüfung | 221 |
| C.1. Kenndaten der Mittelfrequenzschweißsteuerung | 223 |
| C.2. Kenndaten der Widerstandspunktschweißzange | 223 |
| C.3. Elementanalyse an Discup C3/30 und C3/60, 20 keV, 100 Rasterläufen | 224 |
| E.1. Ergebnisse der Wachstumskurven & Stromstärken für Standmengenversuche | 231 |

Abstract

Resistance spot welding takes the most important role in the fields of instrument engineering of fusion welding and metal cutting in Europe, Japan, China and the USA. Prominent reasons for its world-wide application are very good automation capabilities and its process robustness while being highly cost-effective. The robustness properties are mainly a result of comparatively large process windows and very good tolerance gap-bridging abilities. Cost-effectiveness is achieved by short production times, focussed heat generation in the area of application as well as the low-cost manufacturing equipment.

The most important tools for resistance spot welding are the electrode caps due to their exposure to severe stress. Their reliability is defined by the wear behavior. The service life is determined by the number of available tool lives, whereby a tool life is defined as the operating time until the electrode caps have to be reworked. If a significant increase of the tool life or an improvement of wear behavior can be achieved, extensive savings of electrode caps are possible. The resulting reduction in copper consumption will conserve resources and strengthen the process economically.

In the work at hand, four paths are demonstrated to improve the tool life or wear behavior. The first path is to utilize the actually available tool life as far as static milling cycles will allow. Compared to the current orientation value of 120 welding spots for a tool life, this strategy can save over 70 % of electrode caps while welding hot-dip galvanized steel sheets. The second path demonstrates that the standard CuCr1Zr alloy can be improved. A better wear behavior, a longer tool life and a more characteristic ending of the tool life can be achieved even by another heat treatment. The third path illustrates the potential of dispersion-hardened electrode caps. Such caps are known since the 1970s and have been developed further in the 2000s. Compared to the static milling rule, the current development state of dispersion-hardened electrode caps allows a reduction in electrode caps of up to 95 %. This capacity is demonstrated in a lab test with thin and thick hot-dip galvanized sheets. The last path shows a future-oriented opportunity of defining dynamic milling cycles which adapt to the real available tool life. This approach allows an optimal balance between liability risk and full material utilization by means of mathematical procedures. Since dynamic tool lives exhibit a scatter range of up to 40 %, a corresponding saving in copper is possible. The approach is to determine the weld diameter d_w from typical process variables using data mining. This thesis shows that the production-relevant quality band of $\pm 10\%$ around d_w can be calculated correctly with over 93 % accuracy based on a

mathematically transparent model. It is also shown that a higher prognosis quality can be achieved with further adjustments.

Apart from the experimental aspects on wear behavior covered in this thesis, an exclusive and compact compilation of expertise on electrodes as contact element, evaluation methods for joining quality as well as approaches for measuring in resistance spot welding are presented. For this purpose it is proven via a lab test that the chisel testing technique is currently the most reliable and robust test method for the evaluation of joining quality in resistance spot welding. Based on more than 100 000 welds produced for the analysis of tool life and alloy behavior, the final result of this work also exhibits an enhanced method for tool life studies rested on ISO 8166.

1. Einleitung und Zielsetzung

Bedeutung des Widerstandsschweißens

Beim Widerstandsschweißen wird über das Joulesche Gesetz eine stoffschlüssige Fügeverbindung zwischen elektrisch leitfähigen Werkstoffen erzeugt. Das Verfahren gehört trotz seiner Einfachheit, oder gerade deswegen, zu den wichtigsten in der Schweißtechnik. So wurden im Jahre 2011 Maschinen, Apparaten und Geräten zum Widerstandsschweißen in Deutschland ein Produktionswert von 425 Mio. € zugerechnet. Dies entspricht etwa einem Fünftel am Gesamtproduktionswert der Trenn-, Löt- und Schweißgeräte [218]. Auch innerhalb der EU nahmen Maschinen zum Widerstandsschweißen im Jahr 2011 mit einem Produktionsvolumen von 911 Mio. € den ersten Platz bei der Metallverarbeitung ein [218]. Gründe für die große Verbreitung liegen in der sehr guten Automatisierbarkeit und der repräsentativen Robustheit des Verfahrens, bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit. Die Robustheit ergibt sich aus den vergleichsweise großen Prozessfenstern und der sehr guten Toleranzüberbrückbarkeit. Die hohe Wirtschaftlichkeit resultiert aus kurzen Herstellungszeiten, der Wärmeentstehung dort, wo sie benötigt wird, sowie der günstigen Anlagentechnik. All diese charakteristischen Merkmale kommen insbesondere bei der Verarbeitung dünner Bleche zum Tragen. Die Fertigungsfelder erstrecken sich von der Mikrotechnik über die Haushaltsgeräteindustrie bis hin zur Bauindustrie und dem Karosseriebau [280]. Auszugsweise sei im Folgenden der Fokus auf die Fahrzeugindustrie gelegt, weil diese besonders umfangreich dokumentiert ist. Im Jahr 2014 wurden in besagtem Industriezweig durch den stetig wachsenden Markt weltweit erstmals 89 747 430 Fahrzeuge ausgeliefert [221] [220] [219]. Dabei sind üblicherweise in jedem Personenkraftwagen (Pkw) zwischen 2800 und 6200 Widerstandsschweißverbindungen in Form von Punktschweißverbindungen für die Steifigkeit der Gesamtkarosserie verantwortlich [252] [169]. Verteilt auf die gesamte thermisch gefügte Flanschlänge einer Pkw-Karosseriestruktur sind dadurch 54 % bis 85 % widerstandspunktgeschweißt [169]. Die gewaltige Anzahl von etwa 303,8 Mrd. Widerstandspunktschweißverbindungen allein im Pkw-Bereich, welcher wie eben ausgeführt nur einen Bruchteil des Widerstandsschweißens repräsentiert, verdeutlicht den Einfluss von Prozessentwicklungen. Es ist daher herauszustellen, dass entsprechende Geräte- und Verfahrensverbesserungen die Wirtschaftlichkeit steigern.

Bedeutung der Elektrodenkappen

In der Fertigungstechnik ist bekannt, dass die Zuverlässigkeit eingesetzter Werkzeuge die Produktfolgekosten wesentlich definieren. Beim Widerstandspunktschweißen sind die ersten unmittelbar in Kontakt stehenden Werkzeuge die Elektrodenkappen. Deren Zuverlässigkeit ist durch ihren Werkstoff selbst, durch dessen Verschleißverhalten und durch die Lebensdauer, also die Anzahl der verfügbaren Standmengen, definiert. Eine Standmenge entspricht dabei der Zahl qualitätsgerechter Schweißungen, die ohne Nacharbeit der Elektrodenkappen durchgeführt werden können (im Sinne von [83]). In der Fertigung wird diese Zahl jedoch nicht abgewartet, sondern bereits nach einer empirischen Vorgabe von typischerweise 120 Punktschweißverbindungen durch Fräsen nachgearbeitet [288]. Aus Sicht der Industrie ist die Standmenge der Elektrodenkappen die entscheidende Größe für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens [176].

Zielstellungen

In der vorliegende Arbeit werden vier Zielstellungen zur Erhöhung der Elektrodenstandmenge verfolgt.

- I Der erste Ansatzpunkt besteht darin, die zurzeit üblichen Fräszyklen zu verlängern. Das geschieht dadurch, dass aus einer Analyse produktionsnaher Schweißprozesse die Grenzen der Standmengen genau betrachtet werden. Unter den harten Bedingungen der Produktion lässt sich diese Vorgehensweise nicht verwirklichen, weil dadurch unmittelbar Produktausschuss aufkommt. Gelingt es, die Standmenge kontrolliert zu erhöhen, entsteht ein beträchtlicher ökonomischer Nutzen, weil Werkstoff ausgenutzt wird und Stillstandszeiten gesenkt werden.
- II Die Standard-Legierung CuCr1Zr für Elektrodenwerkstoffe hat eine chemische Zusammensetzung, die für den Schweißprozess bereits durch jahrzehntelange Nutzung optimiert zu sein scheint. Aber hinsichtlich des Werkstoffzustandes, also des Gefüges (Versetzungsdichte, Eigenspannung, Härte), besteht beträchtlicher Nachholbedarf. Innerhalb dieser Arbeit ergab sich die Möglichkeit, verschiedene Werkstoffzustände in Kleinstserie herzustellen und sie erstmals als Elektrodenkappen in diesem Umfang mit Standmengenexperimenten zu untersuchen (Kapitel 7).
- III Im Wirkfeld von Druck und Wärme sind dispersionsgehärtete Elektrodenwerkstoffe besonders verschleißbeständig, denn das durch Dispersoide verspannte Kristallgitter resultiert in einer gesteigerten Warmhärte. Ihre Verwendung beim Widerstandspunktschweißen hielt sich jedoch in Grenzen. Kurz nach dem Jahr 2000 entwickelten die Werkstoffhersteller jene Werkstoffe weiter. Derartige Kappen standen im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung und sollten hinsichtlich ihrer eventuell verbesserten

Leistungsfähigkeit getestet werden. Im Mittelpunkt steht dabei die Wirkung des Dispersionsanteils (Kapitel 8).

IV Bekanntlich werden zur Prozessanalyse typischerweise Strom, Spannung und Elektrodenkraft verwendet. Einen Ansatz, daraus die Verbindungsqualität quantitativ vorherzusagen, gibt es bislang nicht. Bis dato veröffentlichte Arbeiten sind in der Vorgehensweise intransparent, nutzen nur sehr wenige Schweißpunkte oder teilen das Ergebnis lediglich pauschal ein. Daraus lassen sich keine weiterführenden Schlussfolgerungen ziehen. Mit der vorliegenden Dissertation werden erstmals weitere relevante Prozessbedingungen (Elektrodenwege und Überwachungsgrößen) mit einbezogen und der Algorithmus zur Erkennung des Qualitätsmerkmals transparent gemacht. Damit wird ein neuer Bewertungsalgorithmus geschaffen, der unmittelbar in eine Fertigung eingebunden und weiterentwickelt werden kann. Das schafft die Voraussetzung, die Fräszyklen autonom, zerstörungsfrei und bedarfsgerecht so zu steuern, dass die Standmenge vollständig ausgeschöpft werden kann. Daraus resultiert ein wirtschaftlicher Gewinn.

Die in I bis IV aufgeführten Ziele sind gesellschaftlich notwendige Schritte, um dem Verfahren Widerstandspunktschweißen und auch allgemein dem Widerstandsschweißen weiteres Entwicklungspotential zu geben. Im globalen Wachstumsfeld lässt sich dies am besten durch eine Kombination aus verringertem Werkzeugverschleiß, hoher Ressourcenausnutzung und hoher Prozessstabilität erreichen. All jene Verfahrensoptimierungen sind Bestandteil der vier Zielstellungen dieser Arbeit.

2. Grundlagen zur Prozessweiterentwicklung

Das Widerstandspunktschweißen ist ein stoffschlüssiges Fügeverfahren für elektrisch leitfähige Werkstoffe. Nach dem Ordnungssystem der industriellen Produktionstechnik gehört es zur Hauptgruppe Fügen, innerhalb welcher ein Zusammenhalt vermehrt und die Ausgangsform verändert wird [56] [57]. Darauf folgend wird es gemäß der Art der Erzeugung dem Fügen durch Schweißen zugeordnet. Innerhalb der Gruppe des Schweißens gehört es zum Pressschweißen und wird dort durch den zum Einsatz kommenden Energieträger des elektrischen Stromes zum Widerstandsschweißprozess gezählt [55] [57]. International wird das punktförmige Widerstandsschweißen in der ISO 4063 mit der Ordnungsnummer 21 oder dem Kürzel RSW geführt [80].

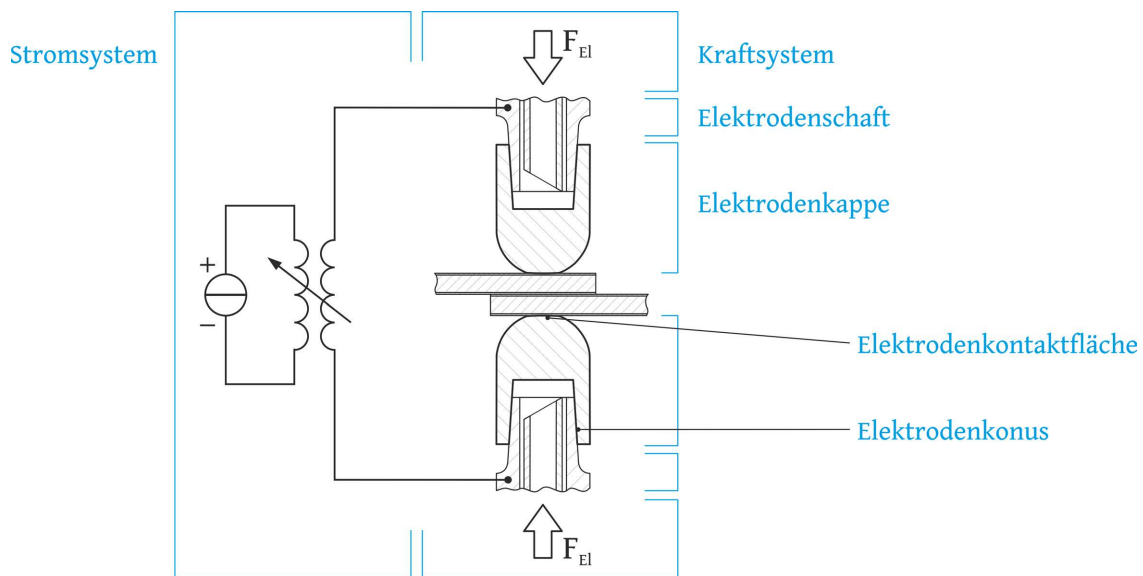


Abbildung 2.1.: Hauptmerkmale des Fertigungsverfahrens Widerstandspunktschweißen. Kraftsystem, Stromsystem, Kontaktelemente (Elektrodenkappe)

Das Verfahren wird durch nur drei Komponenten charakterisiert: das Stromsystem, das Kraftsystem und die Kontaktelemente (Abbildung 2.1). Das Stromsystem stellt die zum Schmelzen notwendige elektrische Energie bereit und regelt den Prozessablauf. Das Kraftsystem liefert die Druckkraft. Und die Kontaktelemente übertragen die beiden genannten Prozessgrößen auf die zu fügenden und sich überlappenden Werkstoffe. Folglich erfahren

die Kontaktelemente die stärksten Wechselwirkungen. Infolge des Stromflusses $I(t)$ über die zu fügenden Werkstoffe erwärmen sich diese aufgrund ihres elektrischen Widerstandes R , schmelzen auf und verbinden sich stoffschlüssig. Die im Prozess entstehende Wärmemenge Q verhält sich nach dem Jouleschen Gesetz $Q = \int_{t_0}^{t_w} I^2 R_{ges} dt$ und konzentriert sich auf den Bereich zwischen den Elektrodenkappen. Unter Kraftereinwirkung müssen die Elektrodenkappen dabei bis zu 70 % der nicht für die Verbindungsbildung genutzten Wärme aufnehmen und abtransportieren [280]. Das umfangreiche Zusammenspiel aller auf die Elektrodenkappen einwirkenden Größen wird in Abschnitt 2.1 zusammengestellt und analysiert. Dabei ist jedoch immer zu berücksichtigen, dass die einwirkenden Größen in Wechselwirkung miteinander stehen und folglich nicht getrennt voneinander verstanden werden können.

Um die am Prozessende vorliegende Verbindung zu qualifizieren und zu quantifizieren, werden verschiedene Wege gegangen. Abschnitt 2.3 stellt hierzu die zerstörenden und Abschnitt 2.4 die zerstörungsfreien Verbindungsbewertungen zusammen. Eine Bewertung erfolgt in Kapitel 4. Der letzte Abschnitt (Nr.2.5), ergänzt die Messwertgewinnung. Nur, wenn diese nachvollziehbar und gegenüber Umwelteinflüssen stabil ist, wird die angestrebte Prozessdatenanalyse belastbar und kann von nachfolgenden Arbeiten direkt aufgegriffen werden.

2.1. Das Kontaktelement Elektrodenkappe

Als aufgabenbündelndes Werkzeug dienen Elektrodenkappen der Stromeinleitung in die zu verschweißenden Werkstoffe und zur Kraftübertragung auf die Kontaktstelle. Demnach

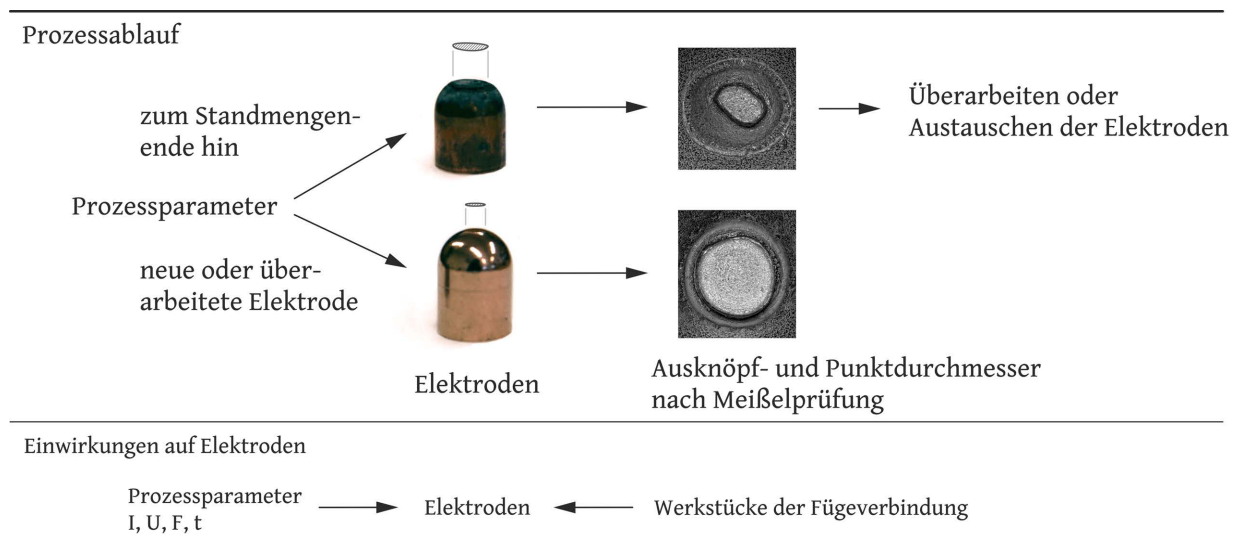


Abbildung 2.2.: Grundlegende Prozesswirkung auf Elektroden und Verbindungsqualität

sind Elektrodenkappen zum Widerstandspunktschweißen mechanischen und thermischen

Beanspruchungen sowie den dadurch entstehenden Wechselwirkungen ausgesetzt, welche an der Kontaktfläche zu den Werkstücken ihre größte Auswirkung haben.

Abbildung 2.2 zeigt schematisch den Verschleiß der Elektrodenkappe durch wiederholten Prozessablauf. Mit jedem Schweißvorgang wird die Kontaktfläche der Elektrodenkappe ein klein wenig verformt und durch Elemente aus dem Blech legiert. Wenn das Blech beschichtet ist oder in der Kontaktzone ein anderer Blechbelag vorhanden ist, erweitert sich der Austausch der Elemente. Beim Abheben der Elektrodenkappen kann es anschließend zum Ausbrechen der entstandenen Schichten kommen.

Aus Literatur und eigenen experimentellen Erkenntnissen lassen sich für die Gruppe der einwirkenden Prozessbedingungen - alle Einstellungen, Vorgaben und Gegebenheiten vor dem Elektrodenkonus - die folgenden zwanzig Größen bei Verwendung von Gleichstrom zusammentragen. Für Anlagen, die mit Gleichstromimpuls oder Wechselstrom arbeiten, existieren geringfügige Unterschiede:

Stromsystem [107] [98]

Stromsystemcharakteristik

- Stromart (hier Gleichstrom)
- Regelgeschwindigkeit

Einstellwerte pro Stromimpuls (gilt auch für Vor- und Nachwärmern)

- Stromanstieg
- Stromstärke (Effektivwert)
- Stromzeit
- Stromabfall
- Strompausen

Kraftsystem [98] [88]

Kraftsystemcharakteristik

- Aufsetzverhalten beim Schließen des Stromkreises [87]
- Regelgeschwindigkeit

Einstellwerte pro Elektrodenkraftplateau

- Elektrodenkraftanstieg
- Elektrodenkraft
- Elektrodenkraftabfall

Maschinencharakteristik

- Steifigkeit des Zangen- bzw. Maschinenfensters (Schieben der Elektroden)

- Größe des Zangen- bzw. Maschinenfensters
- Kühlmittel
- Kühlmittelanströmgestaltung zur Elektrode

Kühlbedingungen

- Kühlmedium
- Gestalt der Kühlmittelanströmung (alle geometrischen Kenngrößen)

Vorgaben vom Bediener

- Kühlmitteldurchfluss
- Taktzeit

Darüber hinaus sind Kontaktbedingungen, also alle Vorgaben und Gegebenheiten nach der Elektrodenkontaktfläche, zu berücksichtigen. Auch diese nehmen unmittelbar Einfluss auf den Elektrodenverschleiß [97] [119] [184] [228]). Zu ihnen gehören:

- Grundwerkstoffe der zu fügenden Metalle (chem. Zusammensetzung, chem. Potential, temperaturabhängiges Festigkeits- und Widerstandsverhalten)
- Beschichtungen der zu fügenden Metalle (chem. Zusammensetzung, chem. Potential, temperaturabhängiges Festigkeits- und Widerstandsverhalten)
- Belag auf der Beschichtung, z. B. Fremdschichten, Oxidschichten, Verunreinigungen (chem. Zusammensetzung, temperaturabhängiges Festigkeits- und Widerstandsverhalten)
- Spalte zwischen den zu fügenden Metallen
- Schiefstellungen der Werkstücke

Die Vielzahl von Prozessbedingungen und Kontaktbedingungen müssen von den Elektrodenkappen über möglichst viele Prozesswiederholungen ertragen werden. Dabei ist bekannt, dass hauptsächlich die nächsten elf Elektrodeneigenschaften den Verschleiß und den Zeitpunkt zur Überarbeitung der Elektroden definieren [280] [119] [81] [97]:

Konstruktion

- Elektrodengeometrie
- Elektrodenvolumen

Werkstoff

- Elektrische Leitfähigkeit

- Thermische Leitfähigkeit
- Grundhärte
- Warmhärte
- Erweichungstemperatur
- Anlassbeständigkeit
- Anlegierungsneigung zum Werkstück
- Rissfreiheit
- Bearbeitbarkeit

2.1.1. Elektrodenkontaktfläche

Wie bereits angeführt wird im Widerstandspunktschweißsystem die Elektrodenkontaktfläche (Abbildung 2.1) am stärksten beansprucht. Denn sie ist geometrisch die kleinste Fläche, was Abbildung 2.3 durch eine mikroskopische Betrachtung schematisch verdeutlichen soll. Die real wirkende, also wahre Elektrodenkontaktfläche wird dabei allein durch Kontaktstellen der Oberflächenrauigkeiten von Elektrode und Blechbeschichtung gebildet. Da seltenst von technisch sauberen Berührungsflächen ausgegangen werden kann, sind noch Wirkungen der Zwischenschichten, z. B. aus Beölung oder anderen Belägen auf der Blechbeschichtung, zu ergänzen. Dies geschieht durch den Fremdschichtwiderstand. [159] [178]

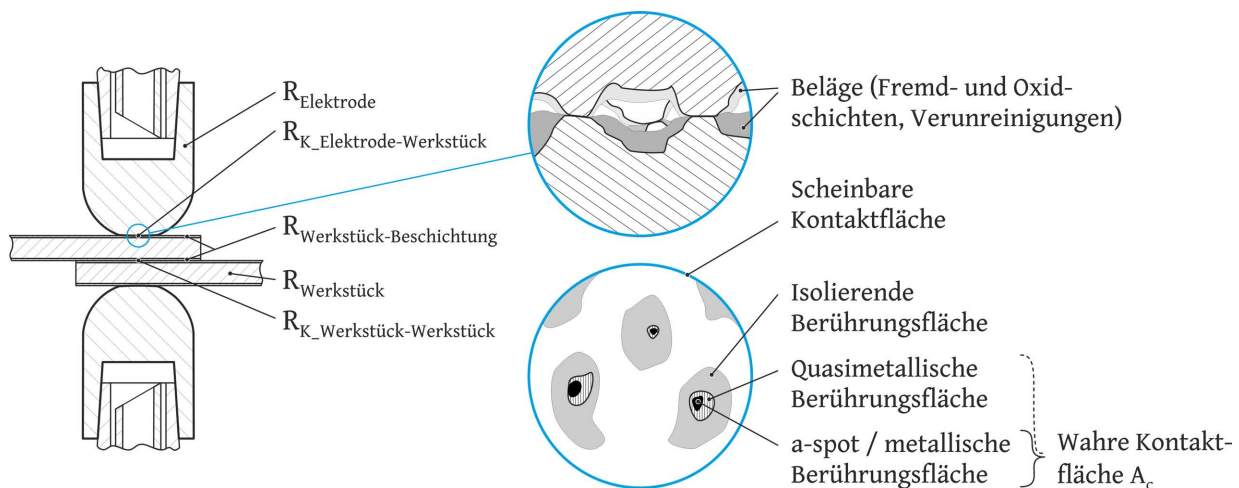


Abbildung 2.3.: Struktur der Kontaktfläche, angelehnt an [159]

Während des Prozesses unterliegt diese wahre Kontaktfläche zahlreichen Veränderungen. Innerhalb des Kraftaufbaus treffen unter einwirkender Elektrodenkraft die Mikrospitzen an den Kontaktflächen aufeinander. Stellenweise entsteht dabei eine hohe Flächenpressung. Dies führt zu abgleitenden Spitzen in benachbarte Täler und zu plastischen Verformungen,

bis sich ein Gleichgewicht aus einwirkender Kraft und Werkstoffbeanspruchbarkeit einstellt. Im Falle des vorliegenden Prozesses befinden sich über den Grundwerkstoffen bzw. Beschichtungen der Werkstücke verschiedene Schichten nichtmetallischer Atome und Moleküle, wie in Korrosionsschichten gebundene Sauerstoffatome oder Kohlenwasserstoffverbindungen aus Schmierstoffen. Stellen mit idealem metallischen Kontakt werden als a-spots bezeichnet und sind elektrisch gesehen ideale Leiter. Neben diesen Bereichen können Elektroden auch in monoatomaren Zwischenschichten tunneln. Stromlinien, die zuvor konstant über den Werkstoffquerschnitt verteilt waren, engen sich an der Kontaktfläche ein. Es wird vom Engewiderstand gesprochen (R_E). Der Fremdschichtwiderstand R_F wirkt zusätzlich zum idealen elektrischen Verhalten in einem gleichmäßigen, dünnen Film des betrachteten Belages zwischen Werkstück und Elektrode. Fremdschichtwiderstand und Engewiderstand bilden summiert den Kontaktwiderstand R_K ($R_E \leq R_F$). [159] [178]

Der Kontaktzustand ändert sich gravierend mit zugeschaltetem Schweißstrom. Durch die kleine wahre Kontaktfläche liegt an dieser ein hoher elektrischer Widerstand vor, welcher zu einer sehr großen Erwärmung führt. Fremd- und Oxidschichten sowie Verunreinigungen verändern zum überwiegenden Teil den Aggregatzustand und werden durch die schmelzenden und sich einebnenden Rauheitsspitzen aufgrund der Elektrodenkraft nach außen verdrängt. Schlussendlich entsteht eine sehr große wahre Kontaktfläche. Während dieses Vorgangs legiert die Elektrodenkontaktfläche mit den ebenfalls stark erwärmten Oberflächenschichten des anliegenden Werkstücks. Am Ende der Stromzeit werden die eingeformten Elektrodenkappen mechanisch vom Werkstück abgezogen. Es ergibt sich eine neue Oberflächenrauheit. Dabei können größere Bereiche legierter Schichten herausbrechen und makroskopisch neue Oberflächenstrukturen bilden. Außer der ständig unterschiedlichen Elektrodenkontaktflächen der Kappen variieren auch die Oberflächen der Werkstücke. Mikroskopisch betrachtet unterscheidet sich jedes Blech und jeder Blechbereich in Fertigungstoleranzen und Werkstückbelag voneinander. Bekanntlich sind Werkstücke unterschiedlich lang und auf unterschiedliche Weise gelagert, wodurch verschiedene Wechselwirkungen mit der Atmosphäre vorlagen und Oberflächenschichten in Dicke und chemischer Zusammensetzung variieren.

Über den zeitabhängigen Zustand während der Haltezeiten und der Stromzeit können derzeit allerdings keine genaueren werkstoffwissenschaftlichen Aussagen getroffen werden.

2.1.2. Elektrodenwerkstoffe

Aus den aufgezählten Beanspruchungen des vorangegangenen Abschnitts wird deutlich, dass Werkstoffe für Elektrodenkappen eine möglichst gute elektrische sowie thermische Leitfähigkeit kombiniert mit einer hohen Formbeständigkeit und geringer Legierungsneigung haben sollten. Diese Eigenschaften stehen allerdings bezogen auf die verfügbaren Werkstoffe konträr zueinander. Daher sind die Elektrodenwerkstoffeigenschaften ausgewogen auf die beabsichtigte Fügeaufgabe auszuwählen.

Die Normung führt drei Werkstoffgruppen für Elektrodenkappen auf [81]: Kupfer- und Kupferlegierungen (Gruppe A), gesinterte Werkstoffe (Gruppe B) und dispersionsgehärtete Kupferlegierungen (Gruppe C). Gruppe A und Gruppe B verbinden die Eigenschaften metallischer Grundwerkstoffe in entsprechendem Verhältnis durch Erzeugen eines gemeinsamen kristallinen Aufbaus. Die Eigenschaften der Grundwerkstoffe vermischen sich, wodurch eine Steigerung der Festigkeit immer zu Lasten der Leitfähigkeit geht. Die Werkstoffe in Gruppe C enthalten hingegen einen keramischen und chemisch inerten Bestandteil (z. B. Al_2O_3), der nicht im Kupfer gelöst werden kann. Er wird eingebracht, um das Kristallgitter des Kupfers zu verspannen und somit ein Kristallwachstum bei erhöhten Temperaturen einzugrenzen. Die Formbeständigkeit bei hohen Temperaturen steigt und die Leitfähigkeiten werden nur minimal verringert. Um den Einfluss von Legierungsbestandteilen und Dispersoiden auf die Formbeständigkeit darzustellen, wird in der ISO 5182 [81] die Erweichungstemperatur aufgeführt. Diese beschreibt die höchste Temperatur, bei welcher nach zwei Stunden immer noch eine Härte bei Raumtemperatur von mindestens 85,% des Lieferzustandes vorliegt.

In der Verarbeitung von Stahlblechen mit Einzeldicken von 0,5 mm bis 3,0 mm werden typischerweise CuCr1Zr-Elektroden und auch CuAl₂O₃-Elektroden verwendet. Diese sind in Tabelle 2.1 einander gegenübergestellt, wobei elektrolytisches Kupfer als Bezug (wie in der Elektrotechnik üblich) ergänzt ist.

Tabelle 2.1.: Zusammensetzung & Eigenschaften ausgewählter Elektrodenwerkstoffe [81]

| Bezeichnung Norm | Name | Legierungselemente % | Ausführung | Härte HV 30 min. | Elektrische Leitfähigkeit | | Erweichungstemperatur °C min. |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------|---------------------------|--------|----------------------------------|
| | | | | | MS/m min. | % IACS | |
| A 1/1 | Cu-ETP | Cu 99,9 | gezogen | 90 | 56 | 96 | 150 |
| | | | geschmiedet | 50 | 56 | 96 | |
| A 2/2 | CuCr1Zr | Cr 0,5 – 1,4 Zr 0,02 – 0,2 | gezogen | 140 | 43 | 74 | 500 |
| | | | geschmiedet | 100 | 43 | 74 | |
| A 2/4 | CuZr | Zr 0,11 – 0,25 | gezogen | 140 | 47 | 81 | 500 |
| C 20/3 | CuAl ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ 0,3 | fließgepresst | 120 | 54 | 92 | 950 |
| | | | kaltverfestigt | 140 | 54 | 92 | 980 |
| C 20/5 | CuAl ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ 1,0 | fließgepresst | 140 | 45 | 77 | 980 |
| C 20/6 | CuAl ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ 0,6 | fließgepresst | 130 | 50 | 86 | 950 |

2.1.3. Elektrodenherstellung

Ein großer Teil der Kosten, die für das Werkzeug Elektrodenkappe aufgewandt werden, fließt in deren Herstellung. Um später in dieser Arbeit die Elektrodenuntersuchungen ganzheitlich zu diskutieren, werden zunächst die Fertigungsschritte näher beleuchtet.

Die Werkstoffe der Gruppe A werden schmelzmetallurgisch auf Basis von raffiniertem Kupfer hergestellt. Das zum Vergleich aufgeführte elektrolytisch hergestellte Cu-ETP zeigt Grundeigenschaften von Kupfer. Die höchste elektrische und thermische Leitfähigkeit hat Kupfer im reinsten Zustand, aber zugleich auch die geringste Festigkeit und Härte. Letztere sind für eine möglichst hohe Verschleißbeständigkeit jedoch unumgänglich. Durch Legieren mit 0,1 Masse-% Zirkonium steigt die Entfestigungstemperatur um über 210 % auf bis zu 550 °C, wobei die elektrische Leitfähigkeit um weniger als 10 % fällt. Wird Chrom zu einem Drei-Stoff-System (CuCr1Zr) ergänzt, lassen sich Zeitstandfestigkeit, Grundhärte und Aushärtbarkeit weiter verbessern. Deren Entfestigungstemperatur wird vorrangig durch den Zr-Anteil bestimmt. [46] [47] [45] [254] [131] [292]

In Gruppe C der ISO 5182 kommen oxidkeramische Nanoteilchen als sogenannte Dispersoide zum Einsatz. Diese sind gegenüber dem Kupfergrundwerkstoff chemisch inert. Fein verteilt im Kupfergefüge erlauben diese korngrenzstabilisierenden Teilchen, die Härte und Festigkeit des Kupfers bis nahe der Schmelztemperatur konstant zu halten. [217] [258]

Auf dem europäischen Markt existiert ein dispersionsgehärteter Elektrodenwerkstoff der Firma Luvata unter der Bezeichnung NitrodeTM [40]. Dieser wird durch innere Oxidation hergestellt. In den USA bietet darüber hinaus die Firma CMW Inc. dispersionsgehärtete Elektrodenkappen unter dem Markennamen Elkaloy[®] 20 an [39]. Dessen Herstellungsweise wird von der Firma jedoch nicht preisgegeben. Neben der inneren Oxidation können dispersionsgehärtete Elektrodenwerkstoffe alternativ über mechanisches Legieren generiert werden. Mit dieser Methode fertigte die Firma eckagranules bis etwa 2011 Elektrodenwerkstoffe unter der Bezeichnung Discup[®] [156]. Die Entfestigung dieser dispersionsgefestigten Werkstoffe beginnt laut Herstellern für die Nitrode und die Discup-Elektrode bei 850 °C und für die Elkaloy 20-Elektrode bei 800 °C. Die elektrische Leitfähigkeit wird für die Nitrode mit 75 % IACS, für die Elkaloy 20 mit 85 % IACS und für Discup mit 76 % bis 91 % IACS angegeben. Hierdurch wird die Besonderheit der Discup-Elektroden ersichtlich. Denn durch das mechanische Legieren lassen sich die Anteile der Dispersoide präzise einstellen und so auch die Eigenschaften des resultierenden Produktes für den Anwendungsfall konkret anpassen.

Die innere Oxidation beginnt mit einer Schmelze aus reinem Kupfer und einer definierten Beigabe von Aluminium. Diese Legierung wird verdüst und anschließend in sauerstoffhaltiger Atmosphäre bis hin zur vollständigen Oxidation des ergänzten Aluminiums geglüht. So entstehen Kupfer und Aluminiumoxid im Gemisch. Das beim Prozess unvorteilhafterweise oxidierte Kupfer wird durch energieintensives Reaktionsglühen reduziert. [227]

Der zweite Herstellweg, das mechanische Legieren, ist ein Verfahren zum Homogenisieren nanoskaliger bis mikrometerskaliger Pulvermischungen durch intensives Kugelmahlen. Es lässt sich in fünf Stadien einteilen, welche in 2.4 dargestellt sind. In der ersten Phase (1a, 1b) werden die duktilen Bestandteile (Kupferpulver) stark umgeformt und umschließen die spröden Teilchen (Al_2O_3), die teilweise zerkleinert werden. Während der zweiten Phase (2)

schließen sich die plättchenförmig gewordenen Teilstrukturen zu größer werdenden lamellaren Partikeln zusammen. Diese brechen in der dritten Phase (3) auf und verschweißen sich wieder, wobei sie im Vergleich zu Phase (2) kleiner werden. Auch in Phase vier (4) setzt sich das Aufbrechen und Verschweißen fort, bevorzugt an Stellen maximaler Spannungen. Die lamellenartige Struktur geht dabei verloren und die Teilstrukturen werden härter. In der fünften Phase (5) stellt sich im Gemenge ein Gleichgewicht zwischen verschweißten und aufgebrochenen Teilstrukturen ein und über die Zeit auch eine relativ konstante Teilchengrößenverteilung. [258] [12]

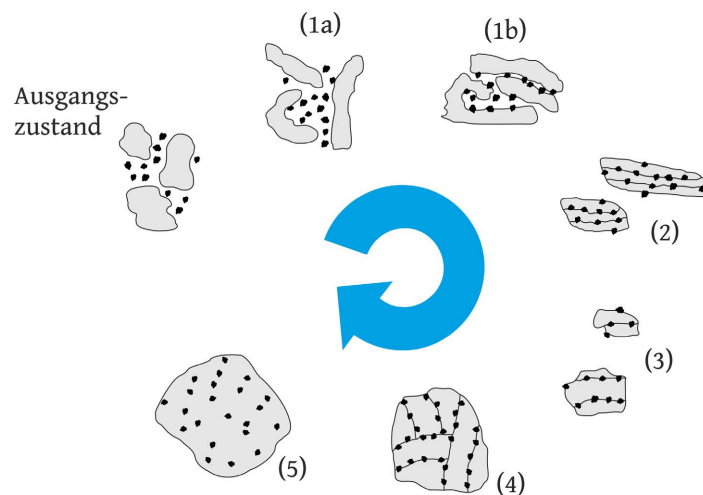


Abbildung 2.4.: Stadien des mechanischen Legierens, angelehnt an [258]

Mechanisches Legieren wird vorrangig durch Kugelmühlen durchgeführt, weil besonders reproduzierbare Halbzeuge erreicht werden. Im Jahre 1997 patentierte die Firma Siemens AG mittels Al_2O_3 mechanisch dispergiertes Kupfer [242]. Die Patentschrift schützt einen fünfständigen Pulver-Mahlvorgang mit Verwendung von keramisch behandelten Kupferkugeln. Der Prozess läuft unter Luftatmosphäre ab und erzeugt einen dispersionsgehärteten Kupferwerkstoff mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 56 MS/m und einer Zugfestigkeit von 300 MPa . Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren von der Firma eckagranules verwendet wurde. In [171] wird eine Methode beschrieben, bei welcher Cu und Al_2O_3 in Hochenergiemühlen dispergiert werden. Über den Einsatz dieser Methode ist nichts bekannt.

Nach der Herstellung zu partikelverstärktem Kupferpulver erfolgt eine Konsolidierung zu weitestgehend porenfreien Körpern [258]. Dazu wird der gekapselte Pulverrohling vorgepresst und entgast, erwärmt sowie abschließend durch Strangpressen in den gewünschten Durchmesser des Stangen-Halbzeugs [60] gebracht [273] [284]. Das Strangpressen kommt auch zur Halbzeugfertigung bei den schmelzmetallurgisch hergestellten Legierungen zum Einsatz. Im Gegensatz zu schmelzmetallurgisch hergestellten Kupferwerkstoffen ist bei dispersionsgehärteten keine Wärmebehandlung möglich.

Um aus dem Stangenmaterial Elektrodenkappen zu formen, gibt es drei Möglichkei-

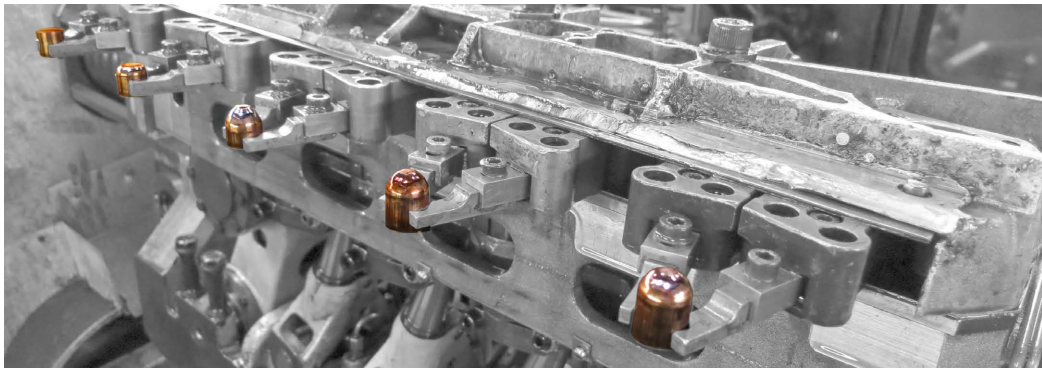


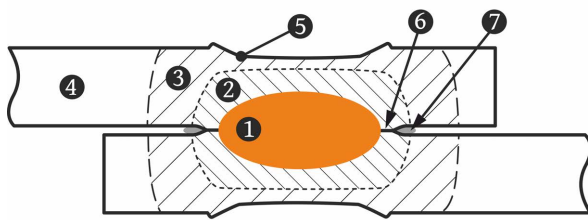
Abbildung 2.5.: Elektrodenherstellung aus Stangenmaterial mittels Kaltumformen

ten. Für die Großserie und alle Elektroden dieser Arbeit wird ein Kaltumformen mit vier bis sechs Umformstufen eingesetzt. Der dazu benötigte Rohling wird unmittelbar vor der Umformung von der Stange abgeschnitten. In Abbildung 2.5 ist der Prozessablauf mit Schneidstufe und vier Umformstufen (von links nach rechts) zu sehen. Mit den Umformungen werden die Außenkontur und Innenkontur der Elektrodenkappe eingeschlagen.

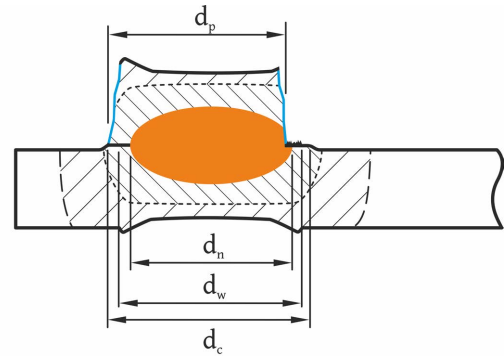
Die Alternativen zum Kaltumformen sind Pressen und mechanisches Bearbeiten. Das Pressen erfordert einen maßhaltig zugeschnittenen und gedrehten Rohling, kann nach dieser Vorbereitung aber in nur einer weiteren Stufe hergestellt werden und die Produktivität des Kaltumformens erreichen [188]. Die mechanische Bearbeitung ist aufgrund ihrer geringen Produktivität und dem großen Abfall nur für Kleinstserien oder Sonderelektroden von Bedeutung.

2.2. Bewerten der Verbindungsqualität

Zur Beschreibung der Qualität des Schweißergebnisses beim Widerstandspunktschweißen existiert kein einzelnes sondern viele unterschiedliche Kriterien. So ist es möglich, dass quasistatisch ermittelte Scherzugfestigkeiten [65] [100], Schälfestigkeiten [62] [100] oder Schwingfestigkeiten [67] [101] zur Bewertung der Verbindungsqualität herangezogen werden. Alternativ können auch Kopfzugfestigkeiten [64] [100] gefragt sein oder aber eine höhere Prüfgeschwindigkeit [66] [102] bei den Versuchen gefordert werden. Gemeinsam ist diesen instrumentierten Festigkeitskennwerten eine unmittelbare Aussage zur Beanspruchbarkeit der Verbindung. Nachteilig ist, dass die Beanspruchung immer nur aus einer Richtung wirkt. Daher werden häufig zwei oder drei Verbindungsfestigkeiten bestimmt. Der Aufwand dafür ist hoch und der Blechabfall groß. Alternativ zu diesen Kennwerten können gebrochene Proben und Schliffe für die Bewertung der Verbindungsqualität herangezogen werden [69] [103]. Der Aufwand ist geringer, die Aussage zur Beanspruchbarkeit der Verbindung ist jedoch nur mittelbar. Trotzdem werden überwiegend gebrochene Proben und Schliffe bewertet, deren Hauptmerkmale in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt sind.



- 1 Schweißlinse
- 2 Wärmeeinflusszone (HAZ)
- 3 Spannungsbeeinflusste Zone
- 4 Grundwerkstoff
- 5 Elektrodeneindruck
- 6 Haftzone
- 7 Hinausgedrängte Blechbeschichtung



- d_n Linsendurchmesser
- d_p Ausknöpfdurchmesser
- d_w Punktdurchmesser
- d_c Haftzonendurchmesser

(a) Charakteristische Merkmale einer Widerstandspunktschweißverbindung im Querschliff, angelehnt an [69] [103] [285]

(b) Die beiden am häufigsten genutzten Kennwerte an gebrochenen Proben (d_p sowie d_w) und Schliffbild (d_n)

Abbildung 2.6.: Charakteristische Merkmale im Querschliff und Kennwerte der beiden typischen zerstörenden Prüfungen

Um die Verbindungsqualität nahezu vollständig zu erfassen, wäre es somit notwendig, für jede Fügeaufgabe und jede Prozessparameterkombination an jeder Widerstandsschweißanlage alle genannten Verbindungsfestigkeits- und Verbindungsmerkmale zu bestimmen. Nur in den seltensten Fällen ist ein derart hoher Aufwand gerechtfertigt. Denn auch bei größeren Streubreiten der Ergebnisse und typischen Ergebnisunsicherheiten (Abbildung A.2), genügt zumeist ein einziges Prüfverfahren.

Kennwerte zur Bewertung von Erzeugnissen sind relevant, um die Qualität des jeweiligen Fertigungsschritts sicherzustellen und Haftpflichtrisiken zu minimieren [161]. Aus den stetig wachsenden Vorschriften zur Produkthaftung erwächst die Motivation, möglichst eine charakteristische Größe zu definieren bzw. zu finden, welche die Verbindungsqualität sicher beurteilt. Der rechtskräftige Idealfall wäre eine charakteristische Größe, welche zerstörungsfrei, präzise und reproduzierbar die Verbindungsqualität wiedergibt. Der wirtschaftliche Idealfall wäre eine charakteristische Größe, die sich mit wenig Aufwand und hohem Automatisierungsgrad ermitteln lässt. Der wissenschaftliche Idealfall wäre eine Größe mit hoher Reproduzierbarkeit, relativ unabhängig vom notwendigen Aufwand. Um in Kapitel 4 eine systematische Untersuchung nach einer charakteristischen Größe zu führen, welche den Anforderungen der vorliegenden Arbeit genügt, wird in den nachfolgenden Abschnitten der Stand von Technik und Wissenschaft zur Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen zusammengestellt.

2.3. Verbindungsbewertung durch zerstörende Prüfung

In den nachfolgenden Tabellen 2.2 und 2.3 sind in Deutschland geltende Regelwerke für zerstörende Prüfungen an Widerstandspunktschweißverbindungen aufgeführt. Die ersten vier dieser Prüfverfahren sind instrumentiert und erlauben somit eine gute Vergleichbarkeit zu Experimenten anderer Orte und Zeiten. Ergänzt durch die Torsionsprüfung existieren damit fünf Prüfverfahren, welche spezielle Prüfstücke benötigen und nicht auf reale Bauteile angewendet werden können. Weitere in den Tabellen enthaltene Kriterien dienen dazu, einen Überblick zu geben und werden in späteren Kapiteln aufgegriffen. Alle Kriterien beziehen sich auf Einpunktproben.

Tabelle 2.2.: Bewerten der Verbindungsqualität mittels zerstörender Prüfung, Teil 1

| | Scherzugprüfung | Schälprüfung | Kopfzugprüfung | Schwingfestigkeitsprüfung |
|------------------------------|--|--|---|---|
| Regelwerke | ISO 14273 [65] DVS 2916-1 [100] | ISO 14270 [64] DVS 2916-1 [100] | ISO 14272 [64] DVS 2916-1 [100] | ISO 14324 [67] |
| ergänzend | ISO 14323 [66] DVS 2916-3 [102] | DVS 2916-3 [102] | ISO 14323 [66] DVS 2916-3 [102] | DVS 2916-2 [101] ISO 18592 [79] |
| Voraussetzungen | Zugprüfmaschine nach ISO 7500-1 | Zugprüfmaschine nach ISO 7500-1 | Zugprüfmaschine nach ISO 7500-1 | Prüfmaschine nach ISO 7500-1 Scherzugprüfung o. Kopfzugprüfung |
| Anwendungsbereich | $t = 0,5 - 10,0 \text{ mm}$ $d_w \leq 7\sqrt{t}$ | $t = 0,5 - 3,0 \text{ mm}$ $d_w \leq 7\sqrt{t}$ | $t = 0,5 - 3,0 \text{ mm}$ $d_w \leq 7\sqrt{t}$ | $t = 0,5 - 6,0 \text{ mm}$ – |
| Prüfstücke / Proben | $b = (30)/45 - 150 \text{ mm}$ $l_t = 105 - 210 \text{ mm}$ eben | $b = 50 \text{ mm}$ $l_t = 127,5 \text{ mm}$ gekantet | $b = 50 \text{ mm}$ $l_t = 150 \text{ mm}$ eben | $b = 45 - 90 \text{ mm}$ $l_t = 143 - 240 \text{ mm}$ eben |
| Blechbedarf ^a | $0,0166 \text{ m}^2$ | $0,0128 \text{ m}^2$ | $0,0150 \text{ m}^2$ | $0,0150 - 0,0219 \text{ m}^2$ |
| Ermittelte Kennwerte | Scherzugkraft, Dehnung, Scherzugfestigkeit Bruchart & Punktdurchmesser ^b | Last, Verlängerung, Schälfestigkeit, Bruchart & Punktdurchmesser ^b | Kraft/Last, Dehnung, Kopfzugfestigkeit, Bruchart & Punktdurchmesser ^b | Wöhler-Kurve, Dauer- oder Zeitschwingfestigkeit, Kennwerte am Querschiff ^c |
| Automatisierungsgrad | typischerweise teil-/automatisiert | typischerweise teil-/automatisiert | typischerweise teil-/automatisiert | typischerweise teil-/automatisiert |
| Arbeitsschritte ^a | 5 + Anm. ^b | 6 + Anm. ^b | 5 + Anm. ^b | 5 + Anm. ^c |

^a Quantifiziert für Verbindung von zwei Blechen mit Einzelblechdicken von $2,0 \text{ mm}$.

^b Gemäß „Messungen an gebrochenen Proben“ aus Tabelle 2.3.

^c Gemäß „Messungen am Querschiff“ aus Tabelle 2.3.

Zwei der enthaltenen Kriterien lassen sich nicht aus den Regelwerken ableiten, sodass diese auf eigenen Erfahrungen und Festlegungen beruhen. Dazu gehören der Automatisierungsgrad und die Anzahl von notwendigen Arbeitsschritten, um die zu ermittelnden Kennwerte zu erhalten. Der Automatisierungsgrad wird in vier Stufen eingeteilt, wobei

die letzte zwei Unterstufen kennt. Sie alle orientieren sich an den Aufgaben: Verbindungsherstellung, Prüfverfahren und Kennwertermittlung. Werden alle drei Aufgaben von Hand ausgeführt, so liegt ein manueller Prozess vor. Erfolgt die Verbindungsherstellung automatisch, so handelt es sich um einen teilmechanisierten Gesamtvorgang. Liegt er in Summe vollmechanisiert vor, werden Verbindungsherstellung und Prüfverfahren automatisch ausgeführt. Ist schließlich auch die Kennwertermittlung automatisch möglich, liegt der Gesamtgrad automatisiert vor. Kann bei der Kennwertermittlung ein Teil der Werte nur manuell ermittelt werden, erfolgt die Zuordnung teilautomatisiert. Können schließlich alle drei Aufgaben und die Wege zwischen diesen autark ablaufen, so würde ein vollautomatisierter Vorgang existieren.

Tabelle 2.3.: Bewerten der Verbindungsqualität mittels zerstörender Prüfung , Teil 2

| | Torsionsprüfung | Abroll- & Meißelprüfung | Messungen an gebrochenen Proben | Messungen am Querschiff |
|------------------------------|---|--|--|--|
| Regelwerke | ISO 17653 [71] DVS 2916-1 [100] | ISO 10447 [61] DVS 2916-1 [100] | ISO 14329 [69] ISO 17677-1 [76] | ISO 14329 [69] DVS 2916-4 [103] ISO 14271 [63] |
| Voraussetzungen | Vorrichtung für (instrumentierten) Torsionsversuch | Abrolldorn bzw. Meißel | Abroll-, Meißel-, Torsions-, Schäl-, Kopfzugprüfung | Querschiff |
| Anwendungsbereich | $t = 0,5 - 6,0 \text{ mm}$ – | $t = 0,5 - 3,0 \text{ mm}$ – | siehe jeweiliges Prüfverfahren | n.n. |
| Prüfstücke / Proben | $b \geq 40 \text{ mm}$ $l_t \geq 60 \text{ mm}$ eben | reale Bauteile oder Prüfstücke beliebig | siehe jeweiliges Prüfverfahren beliebig | reale Bauteile oder Prüfstücke beliebig |
| Blechbedarf ^a | $0,0048 \text{ m}^2$ | mind. $0,0018 \text{ m}^2$ | – | – |
| Ermittelte Kennwerte | Torsionsmoment, Torsionswinkel, max. Torsionsm., Bruchart & Punktdurchmesser ^b | Bruchart & Punktdurchmesser ^b | Bruchart, Punktdurchmesser d_w , Ausknöpfungsdurchmesser d_p | Linsengeometrie, Elektrodeindrücke, Haftzone, Lötzone, Wärmeeinflusszone |
| Automatisierungsgrad | teilmechanisiert oder teil-/automatisiert | typischerweise teilmechanisiert | für sich betrachtet manuell | für sich betrachtet manuell |
| Arbeitsschritte ^a | 5 + Anm. ^b | 5 + Anm. ^b | 5 | Schliffherstellung, ätzen + 12 |

Das zweite angesprochene Kriterium ist die Zahl der notwendigen Arbeitsschritte bis zur Kennwertermittlung. Zu diesen Arbeitsschritten gehören die folgenden, bei welchen in Klammern bereits die jeweilige Anzahl notiert ist: Blechzuschnitt (1), Blechumformung (1), Blechpositionierung und Verbindungsherstellung (2), Positionierung und Prüfung (2) sowie manuelle Messungen (X). Im letzten Arbeitsschritt variiert die Anzahl, weil für manche Kennwerte nur ein Messwert zu bestimmen ist, für andere sind jedoch zwei Messwerte zu ermitteln. In der entsprechenden Zeile der Tabellen werden alle Arbeitsschritte summiert,

die für die Kennwertermittlung einer jeweiligen Spalte notwendig sind.

Ergänzend zu den beiden Tabellen zeigt Abbildung A.3 im Anhang all jene Prüfverfahren und Kennwerte schematisch. Arrondierend sprechen die folgenden Kennzeichen für eine zerstörende Verbindungsbewertung und damit für eine der zuvor genannten Prüfungen:

- Versagensbild bzw. Versagenskenngrößen entsprechen realer Beanspruchbarkeit und sind unmittelbar messbar.
- Reproduzierbare, zuverlässige und belastbare Ergebnisse werden geliefert.
- Vorwiegend kostengünstig. Insbesondere gilt dies für die Abroll- & Meißelprüfung.

Dem gegenüber sollten folgende Kennzeichen berücksichtigt werden, die deutlich gegen eine Verwendung von zerstörenden Prüfungen sprechen:

- Es ist nur eine stichprobenartige Prüfung der Bauteile möglich.
- Hohe Prüfkosten und viel Prüfschrott fallen an.
- Zerstörende Prüfungen sind ökonomisch und ökologisch nicht nachhaltig.
- Schlecht vollständig zu automatisieren.

2.4. Verbindungsbewertung durch zerstörungsfreie Prüfung

Für die zerstörungsfreie Verbindungsbewertung existieren bislang keine standardisierten Schriften, aber im deutschsprachigen Raum wurden bereits Merkblätter verfasst, welche typische Prüfverfahren darstellen und Hinweise zur Verwendung geben.

Die zerstörungsfreie Qualitätsprüfung kann durch drei Kriterien charakterisiert werden. In der folgenden Betrachtung wird als erstes Kriterium das Prüfverfahren zur Unterteilung verwendet. An zweiter Stelle wird der Zeitpunkt der Prüfung betrachtet und an dritter Stelle die Absicht der Prüfung. Ergänzt durch zwei grundlegende Informationen zeigt Tabelle 2.4 diese Unterteilung.

Ausgehend von den letzten beiden Spalten in Tabelle 2.4 zeigen sich verschiedene Ansätze der Verbindungsbewertung. Entweder das Verfahren wird dazu verwendet, nach abgeschlossenem Schweißprozess die Verbindung zu analysieren oder aber es wird dazu verwendet, den Schweißprozess während des laufenden Prozesses, also simultan, zu regeln, um gezielt einen Qualitätsstandard zu erreichen. In der Großserienfertigung nimmt derzeit der zuletzt genannte Ansatz markant zgu. Diesen Ansatz gewährleisten jedoch nur die Ultraschallprüfung oder aber die Prozessparameterprüfung. In beiden Fällen werden Strom, Elektrodenkraft und ggf. Stromflusszeit geregelt, um statisch oder dynamisch den

Tabelle 2.4.: Verfahren & deren Einteilung zur zerstörungsfreien Verbindungsbewertung

| Verfahren | Abkürzung nach [84] | Prinzip | Interaktionsraum | Zeitpunkt der Prüfung | Messwertverwendung |
|--------------------------------|---------------------|--|----------------------------|--------------------------|--------------------|
| Visuelle Prüfung | VT | optisch | Oberfläche | nachträglich | prüfen |
| Farb/Eindringprüfung | PT | Kapillarwirkung | Oberfläche | nachträglich | prüfen |
| Magnetpulverprüfung | MT | magnetisch | Oberfläche | nachträglich | prüfen |
| Wirbelstromprüfung | ET | elektrisch | Von Oberfläche bis Volumen | nachträglich | prüfen |
| Magnetfeldprüfung | | magnetisch | Von Oberfläche bis Volumen | nachträglich o. simultan | prüfen |
| Leitfähigkeitsprüfung | | elektrisch, thermisch | Volumen | nachträglich | prüfen |
| Thermographische Prüfung | TT | el.mag. Wellen ^d $\lambda \approx 0,8 - 1000\mu m$ | Von Oberfläche bis Volumen | nachträglich | prüfen |
| Röntgen-Durchstrahlungsprüfung | RT | ^d $\lambda \approx 0,01 - 10nm$ | Volumen | nachträglich | prüfen |
| Ultraschallprüfung | UT | mechanische Wellen ^e | Volumen | nachträglich o. simultan | prüfen o. regeln |
| Prozessparameterprüfung | | vorw. elektrisch | Volumen | simultan | prüfen o. regeln |

^d Elektromagnetische Wellen aus dem jeweiligen Wellenlängenbereich.

^e Eine als Welle fortschreitende mechanische Deformation.

Parametern einer Musterverbindung zu entsprechen. Für die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit ist es hinreichend, die Verbindung nachträglich prüfen zu können. Maßgebend hingegen ist der Interaktionsraum, der vom jeweiligen Prüfverfahren erfasst werden kann. Nur, wenn das gesamte Volumen mit den zur Prüfung verwendeten Signalen interagiert, ist es hinreichend konkret möglich, die Verbindungsebene und die Schweißlinse zu beurteilen. Daher beinhalten die detaillierten Betrachtungen der Merkblätter und der Fachliteratur nur die letzten sechs Prüfverfahren aus Tabelle 2.4.

Allen zerstörungsfrei arbeitenden Prüfverfahren gemeinsam sind die Verfahrensvorteile, welche sich invers aus den Nachteilen der zerstörenden Prüfung ergeben. Sie sind der Grund, warum diese Verfahrensgruppe ein stetiges Wachstum verzeichnet. Insbesondere die Möglichkeit der 100%-Prüfung prägt diese Entwicklung. Denn damit ist es möglich, eine unmittelbare Serienbewertung vorzunehmen, welche im Falle einer angezweiferten Verbindungsqualität einen rechtlichen Nachweis schafft.

Auch die zerstörungsfreien Prüfverfahren weisen Nachteile auf und ergeben sich ebenfalls invers aus den Vorteilen der zerstörenden Prüfung. Ergänzend sei angeführt, dass die derzeit gängigen zerstörungsfreien Prüfergebnisse etwa 15 % bis 20 % von den referenzierten und

zerstörend ermittelten Angaben abweichen [207].

2.4.1. Merkblätter

Von den sechs zuvor eingegrenzten Prüfverfahren sind für das Widerstandspunktschweißen die folgenden vier in deutschen Merkblättern aufgeführt. In standardisierten Schriften sind die Prüfverfahren ebenfalls zu finden, führen dort aber lediglich grundlegende Vorgaben für den Anwender der jeweiligen Prüfverfahren zusammen. Sie gehen dabei jedoch nicht auf Punktschweißverbindungen ein.

Die Leitfähigkeitsprüfung ist in der DVS 2916-5 [104] unter dem Namen „Potentialmessverfahren“ aufgeführt. Es handelt sich um eine Methode, bei welcher mit vier abgefederten Messspitzen quer über die Punktschweißverbindung der Widerstand bestimmt wird. Sie entspricht weitestgehend der Vierpunktmethode aus der Halbleiterindustrie. Das Merkblatt berichtet von einem sinkenden elektrischen Widerstand mit steigendem Linsendurchmesser, resümiert aber zugleich, dass die Ergebnisse weder besonders reproduzierbar sind, noch, dass sie belastbar sind.

Bei der Thermographischen Prüfung gibt es zwei Verfahrensvarianten. Die einseitige Variante betrachtet dieselbe Seite der Verbindung, von der auch Wärme eingebracht wird. In der zweiseitigen Prüfung erfolgt der Wärmeeintrag auf der gegenüberliegenden Seite. Das Merkblatt DVS 2916-5 [104] kennt nur die einseitige Ausführung, mit Wärmeeintrag durch Lichtblitze, Ultraschall oder Laserstrahl. Auf die Ergebnisqualität der Prüfung geht das Merkblatt nicht ein. Als problematisch werden allerdings Oberflächenreflexionen und sogenannte Zinkkleber bzw. Haftschweißungen (Stoffschluss nur zwischen den Blechbeschichtungen, nicht aber zwischen den Grundwerkstoffen) aufgeführt.

Die Radiologische Prüfung basiert auf der ordnungszahlabhängigen Schwächung von Röntgenstrahlung, welche das Prüfstück durchdringt. Für diese Prüfung werden in der DVS 2916-5 [104] eine konventionelle Ausführung und eine Mikrofocus-Ausführung genannt. Erstere erzeugt mittels Durchstrahlung eine zweidimensionale Information, aufgezeichnet durch einen analogen oder digitalen Detektor. In der konventionellen Form erlaubt diese, Unregelmäßigkeiten parallel zur Strahlenrichtung abzubilden. Bindefehler senkrecht zur Strahlenrichtung und auch die Schweißlinse lassen sich jedoch nicht erfassen. Mit Röntgen-Computertomographen (CT) auf Basis der Mikrofocus-Technologie sind nach Angaben des Merkblattes Gefügeteile und Erstarrungsbereiche nachweisbar, aus denen der Linsendurchmesser und innere Fehler abgeleitet werden können. Ergänzt werden diese Angaben durch eine starke Abhängigkeit der Prüfaussage von der Legierungszusammensetzung sowie durch den Hinweis, dass die beschriebenen Erkenntnisse an Aluminiumwerkstoffen erzielt wurden. Der apparative und zeitliche Aufwand zur Prüfung von Baugruppen mit Punktschweißverbindungen ist sehr hoch, weswegen das Prüfverfahren produktionsbegleitend keine Bedeutung hat. Von besonderem Nachteil sind bei größeren

Strukturen und zunehmendem Werkstoffvolumen die sinkende Auflösung mit steigendem Abstand zwischen Strahlenquelle, Verbindung und Detektor.

In der Ultraschallprüfung werden Schallwellen vorzugsweise von außen in die Probe eingeleitet. Nur selten findet die Ultraschallentstehung direkt in der Probe statt. Im Untersuchungsobjekt werden diese anschließend durch innere Inhomogenitäten reflektiert und durch Gefügeunterschiede veränderlich absorbiert [109] [93]. Nachdem die Schallwellen wieder austreten, wandelt ein Empfänger diese in elektrische Signale zurück und ermöglicht damit die Laufzeit der Schallwellen und deren Amplituden auszuwerten. In der Ultraschallprüfung existieren vier verschiedene Prüf-Varianten. Sie werden bestimmt aus der Art der verwendeten Schallwellen und dem betrachteten Schallweg. Die zwei Arten sind longitudinal polarisierte und transversal polarisierte Ultraschallwellen. Und die beiden möglichen Schallwege sind Impuls-Echo (Reflexionsschallverfahren) und Transmission (Durchschallungsverfahren). DVS 2916-5 [104] und DVS 2951 [109] sprechen nur die Impuls-Echo-Technik mit Longitudinalwellen an und unterscheiden dabei in die Prüfung mit einem Schallbündel, angepasst an den zu erwartenden Punktdurchmesser (A-Bild), sowie in die bildgebende Prüfung mit einem zweidimensional geführten und stark fokussierten Schallbündel (C-Bild). Die bildgebende Prüfung, welche im Tauchbad beschrieben ist, wird für Stichproben in der Kleinteilefertigung als zuverlässig und aussagefähig bewertet [109]. Das A-Bild-Verfahren erlaubt mit geringem und kompaktem messtechnischen sowie überschaubarem zeitlichen Aufwand eine produktionsbegleitende Verwendung im Fahrzeugbau [104]. Aufbau und Funktionsweise sind in [255] und [108] detailliert beschrieben.

Aus den Darstellungen der Merkblätter ist für Serienprüfungen die Ultraschallprüfung mittels Impuls-Echo-Prüfkopf, dessen Schallbündel auf den zu prüfenden Linsendurchmesser angepasst ist, die typische und auch empfehlenswerte zerstörungsfreie Möglichkeit zur Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen. Gesichertes Grundwissen und große praktische Erfahrung des Prüfpersonals sowie ausreichende Verifikation am betrachteten Anwendungsfall ist sicherzustellen [104].

2.4.2. Fachliteratur

Im Themenfeld der Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen konzentrieren sich die wissenschaftlichen Artikel und die angebotenen Prüfsysteme auf vier Felder. Die Magnetfeldprüfung und die Thermographische Prüfung sind dabei bislang in der Forschung anzutreffen, wohingegen die Ultraschallprüfung und die Prozessparameterprüfung in der industriellen Anwendung bereits weit verbreitet sind.

Bei der Magnetfeldprüfung wird das magnetische Feld entweder nach dem Schweißen und in Blechebenenrichtung, wie bei [285] und [281], oder aber unmittelbar nach Abschalten des Schweißstromes, also während der Nachhaltezeit und dann senkrecht zur Blechebene [187], eingebracht. Gemessen wird das Magnetfeld mittels Magnetfeldsensoren. Aufgezeichnet

und ausgewertet werden die Umpolungen und Streufelder des eingebrachten Magnetfeldes immer nach dem Schweißen. Im Falle von [285] und [281] wirkt während der Messung das Magnetfeld. In [285] konnten unter Einwirkung eines konstanten Magnetfeldes zwei Polpaare bei einer Ortsauflösung von $0,1\text{ mm}$ identifiziert werden, welche mittels Simulationsmodell zur Wärmeeinflusszone und zur spannungsbeeinflussten Zone zugeordnet werden können. Ein wechselndes Magnetfeld nutzte hingegen [281] und kann aufzeigen, dass zwischen der größten magnetischen Feldstärke und der Scherzugkraft sowie zwischen dem Flächenintegral der magnetischen Feldstärke und der Scherzugkraft jeweils nahezu lineare Zusammenhänge bestehen. Im Artikel mit der Magnetfeldeinwirkung innerhalb der Nachhaltezeit, [187], wird ein fast perfekter linearer Zusammenhang zwischen dem messbaren Restmagnetfeld (Remanenz) im Mittelpunkt der Schweißlinse und dem Linsendurchmesser präsentiert. Anwendung findet bislang jedoch keines der Verfahren.

Wie bereits im Abschnitt der Merkblätter genannt, gibt es zwei Verfahrensaufbauten in der Thermographischen Prüfung. Die einseitige Prüfung (Reflexionsanordnung) hat den Vorteil einer hohen Zugänglichkeit, welche jedoch durch die starke Oberflächenreflexion bei verzinkten Blechen aufgezehrt wird [32]. Die beidseitige Prüfung (Transmissionsanordnung) hat den Vorteil, dass Anregungsquelle und Infrarot-Kamera (IR-Kamera) näher an der Verbindung positioniert werden können. Damit steigt die örtliche Auflösung und die Effizienz der Anregung. In [301] wird das Potential einer beidseitigen Prüfung dargestellt, bei welcher der Wärmeeintrag mit einem scannenden Diodenlaser ($\lambda = 940\text{ nm}$, $P \leq 500\text{ W}$) erfolgt und die IR-Kamera eine Empfindlichkeit von 20 mK besitzt (InSb-basiert, $f = 300\text{ Hz}$). Anhand des zeitlichen Verlaufes innerhalb der ersten 250 ms nach dem Wärmeeintrag lässt sich die Größe der Punktschweißverbindung klassifizieren. Große Stromstärken sind dabei besser zu unterscheiden als kleine. Eine Abwandlung auf Blitzlampen ist laut Autor denkbar und erlaubt mit einer räumlich integralen Datenauswertung zuverlässige Prüfaussagen [301]. Aus den sechs umfangreichsten experimentellen Untersuchungen zur thermographischen Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen zwischen den Jahren 2000 bis 2012 lässt sich ein wirtschaftliches Interesse ableiten [260]. Allerdings konnte bislang keine der Veröffentlichungen die Wirtschaftlichkeit bekräftigen. Nur wenige formulieren diese Aussage konkret. Sie wird jedoch indirekt durch Probenbeschichtungen mit hoher Emissivität (Schwärzen) transportiert. Um dies zu vermeiden besteht die Möglichkeit, durch Ultraschall eine Erwärmung am Blech hervorzurufen [32]. Erfasst werden können dann in Transmissionsanordnung Reibungsverluste an der Verbindungsstelle. In kleinen Schweißlinsen und besonders bei sogenannten „Haftschweißungen“ wird viel Wärme frei, bei großen Schweißlinsen sehr wenig. Eine zufriedenstellende Skalierung zwischen Infrarotbild und Linsendurchmesser konnte jedoch noch nicht erreicht werden [32].

Auf das Feld der Ultraschallprüfung entfallen mit Abstand die meisten Quellen und in der Fertigung ist es das am weitesten verbreitete Verfahren zur zerstörungsfreien Verbindungsprüfung. Hauptsächlich werden Longitudinalwellen eingesetzt und im Impuls-Echo-

Aufbau angewendet. Technisch einfach und robust aufgebaute Einschwinger-Systeme mit A-Bild-Analyse von den Firmen GE [127] [126], Olympus [232] und Vogt Ultrasonics GmbH [287] werden in der KfZ-Karosseriefertigung eingesetzt [261] [31] [294] [289]. Im Serieneinsatz zeigt sich, dass gut qualifiziertes Prüfpersonal wichtig ist, die Grenze des Mindestpunktdurchmessers mit einer gewissen Unsicherheit einzukalkulieren ist und pressgehärtete Stähle ein abweichendes Schallbild erzeugen [294] [289]. Die Firmen Tecnitest Ingenieros und Eines S.C.V. bieten eine vollautomatisierte A-Bild-Analyse an, wobei offen bleibt, wie zuverlässig und belastbar die Ergebnisse sind und ob tatsächlich kein Prüfpersonal mehr benötigt wird [252]. Die Firma Vogt Werkstoffprüfsysteme verfolgt nicht nur, den bereits beschriebenen Ansatz an der fertigen Verbindung zu prüfen, sondern auch einen Ansatz während des Schweißens (Inline) zu messen [286] [287]. Dazu werden Einschwinger in der oberen und unteren Kühlbohrung eingebracht, die an die Elektrodenrundfläche aufdrücken. Somit kann sowohl im typischen Impuls-Echo Betrieb gemessen werden wie auch in der Transmission. Unmittelbar nach dem Schweißvorgang bewertet das System aus den aller 2 ms aufgezeichneten Echofolgen die Qualität der Verbindung und teilt diese einer von drei Klassen zu. Ein ähnliches Inline-System bietet auch die Firma Tessonics unter der Bezeichnung RIWA an [277]. Dieses besteht aus einem einzelnen Einschwinger, welcher im Kühlrohr eines Elektrodenschafes eingebracht wird. Aus der Analyse der Impuls-Echo-Laufwege über die Kraftzeit hinweg bilden sich die Einzelblechdicken, die Schweißlinse und die geschweißte Verbindung charakteristisch ab, wie [241] zeigt. Ein industrieller Einsatz ist nicht bekannt. In einer inhaltlich fortführenden Veröffentlichung [189] wird erklärt, dass die Impuls-Echo-Methodik für den Einsatz in der Fertigung besser geeignet ist, weil die Elektroden nicht fluchten müssen und auch ein Verkippen der Elektroden zueinander kein Problem darstellt. Zugleich wird eingestanden, dass mit nur einem Schwinger lediglich grundlegende Aussagen zum Linsendurchmesser möglich sind. Daher wird der Aufbau auf acht Schwinger (je $1 \times 1\text{ mm}$) erweitert, welcher nachweislich das Linsenwachstum und die Linsengeometrie detaillierter erfasst. Dieser Ansatz, die Messgenauigkeit und Aussagesicherheit durch eine höhere Ortsauflösung zu steigern, ist als allgemeiner Trend in der Ultraschalltechnik auszumachen. Dazu werden die Schwinger kleiner gestaltet und über die Punktschweißverbindung bewegt oder eine Vielzahl von Schwingern in eine Art Matrix (US-Array) eingebunden. Die einfachste Form ist einen Schwinger in einer Linie über die Punktschweißverbindung zu führen. Das für jeden Messpunkt entstehende A-Bild lässt sich anschließend als B-Bild (Querschnittsecho) zusammensetzen. In dieser Weise zeigt [122] mit einem linear fokussierten Einschwinger, dass es in einem Wasserbad mit zwei unterschiedlichen Abständen zur Probe möglich erscheint, den Durchmesser der Haftzone und den Linsendurchmesser voneinander zu unterscheiden und präzise zu erfassen. Die Versuche wurden ausschließlich an kalt umformbaren einfachen Stahlgüten ohne Beschichtung durchgeführt. Eine praxisnähere Methode hat die Amsterdam Technology entwickelt, indem sie einen fokussierten Einschwinger spiralförmig über eine festgelegte Messstrecke laufen lässt.

Der Aufbau ermöglicht eine Auflösung von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}$ und die Zusammensetzung der Einzelmessungen zu einem C-Bild (Höhenechobild). Die Prüfergebnisqualität ist sehr hoch, allerdings erfordert die Mechanik genügend Freiraum beim Prüfen und langlebige Komponenten. Mit der stetig wachsenden Anzahl an Rechenoperationen pro Zeiteinheit ist es auch möglich, in gleicher Prüfzeit mehrere Schwinger auszuwerten. Folglich nehmen die mechanisch stabileren Mehrschwingersysteme zu, deren zweidimensionale Schwingeranordnung ein sogenanntes Wandlerfeld (US-Array) ergeben und ebenfalls C-Bilder ermöglichen. Die so visualisierbare Verbindungszone erlaubt eine schnellere Einarbeitung des Prüfpersonals, eine einfache Handhabung und hoch belastbare Ergebnisse. Derzeit am Markt verfügbar sind bei der nachgelagerten Prüfung das Tessonics RSWA [278] und das Toshiba Matrixeye [172] [165]. Beide unterscheiden sich in der Verwendung des US-Arrays. Das RSWA-System steuert jeden Schwinger für sich in der Impuls-Echo-Technik an. Beim Matrixeye sendet auch immer nur ein Schwinger (Weitwinkelschwinger); allerdings empfangen alle Schwinger das Echo. So kann das Matrixeye durch die winkelbezogene Laufzeitinformation einerseits eine höhere Auflösung erreichen und andererseits ein 3D-Bild errechnen (Phased Array Inspektion mit SAFT Methode). Eine alternative Methode der Ultraschall-Erzeugung, welche kein Koppelmedium benötigt und A-Bilder liefert sowie Potential für B-Bilder und C-Bilder besitzt, ist der Elektromagnetisch Akustische Wandler (EMAT) basierend auf der Lorentz-Kraft [164]. Allerdings existieren bislang nur ein Prototyp [248] und ein Patent [199] für die Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen. Neben den vielfach verwendeten Longitudinalwellen existieren auch Transversalwellen. Sie haben die Besonderheit, nur von Festkörpern transportiert zu werden. Inline angewendet dämpft die flüssige Schweißlinse somit die Schallwellen und die Schweißlinse wird unmittelbar messbar. Das einzige Inline-System für das Widerstandspunktschweißen hatten die Firma Bosch und das Fraunhofer IZFP aus Saarbrücken bis zur Serienreife entwickelt [276], [225] und [5]. Es basiert auf dem Transmissionsverfahren, wodurch in einem Elektrodenschaft der Schwinger untergebracht werden muss und in dem gegenüberliegenden Elektrodenschaft der Sensor. In Zeitabständen von wenigen ms wird die Verbindungszone während der gesamten Krafthaltezeit $t_{El,maintain}$ analysiert [24]. Entsprechend der Schalleigenschaft sinkt während der Schweißlinsebildung charakteristisch die Intensität der Transmission [24]. Aufgetragen über dem Punktschweißprozess ergibt sich ein Schallverlauf, welcher Aufschluss über die Qualität der Verbindung gibt. Im industriellen Einsatz der Pkw-Fertigung konnte sich das Prüfsystem jedoch nicht durchsetzen. Als maßgebender Grund werden die vergrößerten Schaftdurchmesser für die Sensorik genannt. Ein zweiter, weniger bekannter Grund sind hochfeste Beschichtungen, zu denen z. B. AlSi zählt. Diese verhindern über einen längeren Zeitbereich während des Prozesses eine hinreichend gute Einkopplung der Schallsignale.

Das letzte der vier großen Felder in der Fachliteratur zum Thema zerstörungsfreie Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen ist die Prozessparameteranalyse. Sie wird bislang in keinem standardisierten Werk als zerstörungsfreies Prüfverfahren aufge-

führt. Durch ihre große Verbreitung bei Herstellern von Widerstandsschweißsystemen [207] sowie in Bereichen der Forschung nimmt es zugleich eine bedeutende Stellung ein. Im Fokus liegen Änderungen der Prozessparameterverläufe, mit denen auf die Verbindungsqualität geschlossen wird.

Wissenschaftliche Arbeiten widmen sich der Verbindungsbewertung unter anderem durch Neuronale Netze [50] und [37] sowie durch Fuzzylogik [291] [244]. Neuronale Netze zur Auswertung der Prozessparameter haben den Vorteil, keine analytische Kenntnis zwischen Messgröße und Zielgröße zu benötigen, aber den Nachteil fester Vernetzungen, die nicht auf Prozessvariationen reagieren können. Erste Berechnungen zeigen gute Vorausklassifizierungen zur Scherzugkraft, eignen sich aber noch nicht zur vorausberechneten Realwertbestimmung [50]. Parallel erfolgten Untersuchungen mit der Fuzzy-Pattern-Klassifikation, welche über Zugehörigkeitsfunktionen der Prozessparameter auf vorgegebene Qualitäts- und Verschleißklassen angelernt wurde. Durch das Kriterium der Identifikationssicherheit ist es dem Algorithmus möglich, mitzuteilen, mit welcher Sicherheit die Einteilung zu den beiden Klassen vorgenommen werden kann [291]. Die beiden soeben genannten Arbeiten waren durch die Rechentechnik auf Strom und Spannung beschränkt, was die nachfolgenden Jahre ausgebaut werden konnte. In einer Veröffentlichung zur Dissertation zeigte auch Cho etwa sechs Jahre später, dass Neuronale Netze prozessbegleitend gut geeignet sind, um die Verbindungsqualität zu klassifizieren [37]. Dabei bediente er sich zusätzlich einer Mustererkennung, welche eine analytische Kenntnis in die Bewertung einbindet und sie robuster macht. Eine Arbeit weitere sechs Jahre später, die sich der Fuzzylogik widmete, thematisiert prozessparallele Datenauswertungen als Stand der Technik. Podrzaj zeigt beispielhaft für vier Messgrößen, dass Fuzzifizierung, Berechnung und Defuzzifizierung hinreichend schnell sind, um nicht nur den Zustand der Verbindungsbildung einzuordnen, sondern auch jede Halbwelle (z. B. Stromstärke) gegebenenfalls nachzuregeln [244].

Sowohl die Verbindungsbewertung wie auch zunehmend die automatische Anpassung der Prozessgrößen bieten, wie bereits genannt, viele Hersteller von Widerstandsschweißsystemen an. Die verwendeten Messgrößen, analytischen Festlegungen und Logiken sind jedoch unbekannt. Mit der Schweißsteuerung PSI 6000 hat die Firma Bosch etwa seit dem Jahr 2004 ein Steuerungssystem auf dem Markt, welches Stromstärke, Phasenwinkel, Spannung, Widerstand, Stromzeiten, Leistung und Energie überwachen kann und auf Wunsch Stromstärke bzw. Spannung während des Prozesses adaptiv nachregelt [23]. Der Hersteller gibt an, durch die Prozessadaption eine gleichbleibende Schweißqualität liefern und Schweißspritzer minimieren zu können. Mit dem Jahr 2015 wurde unter der Bezeichnung PRC7300 der Nachfolger vorgestellt, dessen adaptiver Regelalgorithmus nun sowohl Stahl wie auch Aluminium unter verschiedenartigsten Blechdickenkombinationen umfasst [22]. Erweiterte Schnittstellen zu Kraftsteuerungen, zusätzliche 16 Eingänge und offene Systemarchitekturen lassen vermuten, dass die Prozessanalyse stark erweiterbar ist. Die Firma Harms und Wende präsentierte ihr adaptives Regelsystem bereits im Jahr 2001 als intelligente Pro-

zessregelung (IQR) zum sicheren Verschweißen unter gleichbleibend hoher Qualität, auch bei hochfesten und organisch beschichteten Blechen [26]. In einer späteren Revision aus dem Jahr 2013 schrieb die Firma: „[Der] Regelalgorithmus, der sofort aktiviert wird und jede einzelne Schweißung nach den real gegebenen physikalischen Bedingungen ausregelt, [kann] Störgrößen [...] (schlechte Passungen, Materialschwankungen, noch nicht optimierte Werkzeuge und Auflagen etc.) kompensier[en]“ [146]. Bei der Firma Matuschek waren im Segment des Jahres 2015 alle Stromsteuerungen mit adaptiver Regelung versehen [212]. Bei der HIE GmbH waren zwei der leistungsstärkeren Stromsteuerungen mit „Qualitäts-Sicherungs-Prozessor für Überwachung, Störgrößenerkennung und Regelfunktionen“ versehen [150] [151]. Die genannten Beispiele der Hersteller von Widerstandsschweißsystemen zeigen, dass die Prozessparameteranalyse ein gängiges Werkzeug in der Fertigung ist. Allerdings ist kein System bekannt, welches eine konkrete Aussage zur Verbindungsqualität liefert. Vielmehr nutzen die Hersteller die Prozessparameteranalyse, um eine bekannte Qualität über alle Verbindungen zu halten (Musterkurven) bzw. zu gewährleisten (intelligente Regelungen).

Zusammenfassend zeigt die wissenschaftliche Praxis ein großes Interesse an der Thermischen Prüfung und bedeutende Entwicklungen in der Akustischen Prüfung (Ultraschall) auf. Bei der industriellen Fertigung dominiert klar die Ultraschallprüfung zur Verbindungsbewertung, obwohl vermutlich mehr intelligente und adaptive Regelsysteme (Prozessparameteranalyse) im Einsatz sind. Da die Prozessparameteranalyse jedoch nicht als Ziel hat, Kennzeichen der Verbindung zu bewerten, kann hier festgehalten werden, dass sich zur direkten Bewertung derzeit in der Praxis nur die Ultraschallprüfung etabliert hat.

2.5. Messwertgewinnung beim Widerstandspunktschweißen

Elementare Grundlage aller nachfolgenden Experimente und maßgebender Qualitätsfaktor für Datenanalysen ist die Messwertgewinnung. Diese bleibt unbegründeterweise viel zu häufig unberücksichtigt und wird deshalb ausgehend von eigenen Experimenten und Recherchen an mancher Stelle etwas detaillierter ausgeführt. Zu Beginn einer Messwertgewinnung ist die Messaufgabe zu definieren. Sie ist vollständig bestimmt, wenn bekannt ist, welche physikalischen Größen zu messen sind, in welcher Größenordnung sich die jeweiligen Größen bewegen, unter welchen Umgebungsbedingungen die Messung stattfindet und welche Messunsicherheiten erlaubt sind.

Die erste essentielle Messgröße ist die Elektrodenkraft. Sie bestimmt wesentlich die Widerstandsverhältnisse in den Kontaktbereichen zwischen Elektrode und Werkstück, sowie zwischen den Werkstücken. Nach Bild 5.15 in [280] besteht zwischen den Kontaktwiderständen und der Elektrodenkraft ein exponentieller Zusammenhang, der im Jouleschen Gesetz

als ebensolcher aufgeht. Die zweite essentielle Messgröße ist der elektrische Strom, welcher nach dem Jouleschen Gesetz exponentiellen Einfluss ausübt. Unter dem maßgebenden Ohmschen Gesetz ergibt sich als dritte essentielle Messgröße die elektrische Spannung.

Weitere Messgrößen erschließen sich je nach Informationstiefe aus den Einwirkungen der Elektrodenkraft (z. B. Elektrodenweg), aus der notwendigen Kühlung der Elektrodenkappen, aus Temperaturmessungen an den Elektrodenkappen und im Bedarfsfall aus arbeitsmedizinisch relevanten Größen.

Sowohl im industriellen Einsatz wie auch im Labor sind beim Widerstandspunktschweißen ein grundlegend hoher Verschmutzungsgrad, die Einwirkung mechanischer Störgrößen und insbesondere bei energieintensiven Fertigungsaufgaben starke elektromagnetische Felder zu berücksichtigen. Verfahrensbedingt führen die hohen Ströme durch den Zangenkörper, der als elektrische Leiterschleife mit einer großen Windung angesehen werden kann, gemäß Induktionsgesetz zu einem starken Magnetfeld um den Zangenkörper. Befinden sich elektrisch leitfähige Sensoren und Signalüberträger in jenem Magnetfeld, wird in ihnen eine Spannung induziert. Als Folge dessen besteht die Gefahr von Funktionsstörungen oder der Veränderung von Nutzsignalen [145]. Da einige Messwertbeeinflussungen nicht immer offensichtlich erkennbar sind, sollten Messaufgaben beim Widerstandspunktschweißen einer Planung unterliegen, ähnlich jener der nachfolgenden vier Unterabschnitte.

2.5.1. Messen nichtelektrischer Größen

Elektrodenkraft Im industriellen Einsatz sind zur Krafterzeugung vorrangig schaltpnematische, servopneumatische und servomotorische Systeme anzutreffen. Selten nur besteht die Möglichkeit, auf Signale zur Regelung der Kraftsysteme zuzugreifen, weshalb externe Sensoren notwendig werden. Die typischen Sensoren basieren auf dem piezoelektrischen Effekt bzw. auf dem piezoresistiven Effekt. Für spezielle Anwendungen existieren weitere Sensorprinzipien, die bislang aber nicht die Bandbreite der Widerstandsschweißtechnik abdecken.

Der piezoelektrische Effekt, also die Ladungsverschiebung in Kristallen (z. B. Quarzkristall, Piezokeramik) bei einwirkender Kraft, wird in piezoelektrischen Kraftsensoren genutzt. Seine Vorteile liegen in der hohen Eigensteifigkeit, der kleinen Bauform, der großen Bandbreite, der direkten Wirkungslinie mit der Elektrodenkraft und der geringen Messunsicherheit bei dynamischer (bis 10 kHz) und stoßartiger Krafteinwirkung. Als Nachteile sind die aufwändige Auswertelektronik sowie die Nichtlinearität und der Temperaturdrift zu nennen. [155] [130] [98]

Die Änderung der spezifischen Leitfähigkeit bei einwirkender Kraft, der sogenannte piezoresistive Effekt, wird typischerweise von Dehnmessstreifen (kurz DMS) genutzt. Diese bestehen zumeist aus einer Metallfolie, die im elastischen Zustand auf einen Federkörper des Punktschweißsystems (z. B. Zangenrundkörper) aufgebracht werden. Anwendung

finden sie vorrangig bei statischer oder gering dynamischer (bis 1 kHz) Krafteinwirkung. Brückenschaltungen kompensieren Temperatureffekte und ermöglichen Verschaltungen mit hoher Messgenauigkeit. [155] [130]

Weg und Abstand Für die Messung von Längen existiert eine Vielzahl von Messverfahren. Aufgrund des relativ starken Magnetfeldes am Einsatzort und den rauen Umgebungsbedingungen in der Praxis sind induktive Sensoren und die Mehrzahl der optischen Sensoren eher unzuverlässig. Somit ist Messverfahren basierend auf Triangulation (optoelektronisch) und auf Ultraschallwellen (piezoelektrisch) der Vorrang zu geben. Handelt es sich beim Kraftsystem um ein servomotorisches, kann, soweit der Zugriff gewährleistet ist, auch der Drehwinkel des Motors zur Wegmessung genutzt werden. Mit externen Sensoren ist eine sehr gute Messgenauigkeit mittels Triangulation eines Laserstrahls ($\approx 40\ \mu\text{m}$) zu erreichen. Bei Ultraschallsensoren liegt diese typischerweise bei $500\ \mu\text{m}$. [149]

Temperatur Das am weitesten verbreitete Messverfahren basiert auf dem Seebeck-Effekt. Er beschreibt das Auftreten einer Spannung zwischen zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern bei einer Temperaturdrift an deren Verbindungsstelle. Beim Einsatz von Thermoelementen ist zu berücksichtigen, dass mechanische Spannungen (z. B. Knicken) und hohe Einsatztemperaturen aufgrund von Fremdatomdissoziation und selten auch Gitterstrukturänderungen (z. B. Typ K) eine deutliche Drift hervorrufen [167] [180]. Auch induktive Effekte durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen den Messwert am Thermoelement [213] [149]. Daher sind für das Widerstandspunktschweißen Thermoelemente vom Typ T mit kleinem Durchmesser, verdrehten Messleitungen, einem Transmitter mit Störsignalunterdrückung und einem Tiefpassfilter (ca. $20\ \text{Hz}$) sinnvoll.

Eine zweite Möglichkeit der Temperaturmessung ist das Widerstandsthermometer. Dieses nutzt den mit der Temperatur steigenden Ohmschen Widerstand von Metallen. Empfehlenswerte Aufbauten enthalten 3- oder besser 4-Leiter, sind zum chemischen und mechanischen Schutz ummantelt, haben kleine Durchmesser und Transmitter mit guter Störsignalunterdrückung. [155] [18]

Als eine dritte Möglichkeit sind faseroptische Temperatursensoren zu nennen. Sie zeichnen sich in erster Linie durch ihre maximale Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Beeinflussung aus. Unterschieden wird in extrinsische und intrinsische Temperatursensoren. Extrinsische haben am Glasfaserende einen speziell dotierten Kristall (z. B. GaAs), welcher bei Temperaturveränderung die Wellenlänge des zu reflektierenden Lichtes verändert oder aber dessen Intensität. Intrinsische nutzen zur Temperaturmessung entlang der gesamten Glasfaser entweder quantenmechanische Effekte (Wellenlängenkorrelation bei Verschiebung eingebrachter, glasfaseroberflächennaher Gitterstrukturen) oder aber die Raman-Streuung. Neben der elektromagnetischen Unempfindlichkeit sind diese Sensoren durch kleine Zeitkonstanten und absolute Langzeitstabilität gekennzeichnet. Ein

Einsatz ist aus wissenschaftlicher Sicht zu empfehlen. Zu berücksichtigen ist der geringe Messbereich (bis ca. 300 °C). [149] [249]

Mit Pyrometern und Wärmebildkameras existieren zwei Möglichkeiten zur kontaktfreien Temperaturmessung. Beide ermitteln die vom Messobjekt ausgehende Infrarotstrahlung und stützen sich bei der Strahlungsbeschreibung auf die Gesetze von Planck, Stefan, Boltzmann, Wien und Kirchhoff. Die zum Einsatz kommenden Detektoren werden nach Wirkungsweise (thermisch oder photoelektrisch) sowie Wellenlängenbereich unterschieden und anhand der zu betrachtenden Stoffgruppe sowie des Temperaturbereichs ausgewählt. Ein geeignetes Messsystem für den infraroten Bereich ist weiterhin gekennzeichnet durch eine Kompensation der Umgebungstemperatur und eine geschützte Optik. Die sich anschließende Messung hängt im Wesentlichen vom kalibrierten Emissionsgrad ε ab. Dieser ist bei Metallen stark oberflächen-, wellenlängen- und temperaturabhängig und nimmt beispielsweise für Kupfer Werte von 0,012 bis 0,92 an. Somit erfordern quantitative Messungen an Elektrodenkappen und angrenzenden Bereichen lackierte Flächen mit bekanntem Emissionskoeffizienten. [8] [215] [235]

Durchfluss Um den Kühlmediendurchfluss einzustellen und zu überwachen, eignen sich grundlegend alle Durchfluss- und Mengemessverfahren. Verbreitete Durchflussmengen (0 bis 12 l/min) und Leitungsdurchmesser (4 bis 10 mm) schließen jedoch Ultraschall-Durchflussmesser und Wirkdruck-Messverfahren aus. Wird der zu überwachende Charakter des Mediendurchflusses hervorgehoben, bieten Messgeräte aus der Gruppe der mittelbaren Volumenzähler (z. B. Turbinenrad-Durchflussmesser) sowie aus der Gruppe der Wirbel- und Dralldurchflussmesser (z. B. Vortex-Durchflussmesser) gute Messgenauigkeiten bei hoher Wirtschaftlichkeit. [17]

2.5.2. Messen elektrischer Größen

Elektrische Stromstärke Für die Hochstrommessung beim Widerstandspunktschweißen sind Shunts, Rogowskispulen (Rogowski-Stromwandler) und faseroptische Stromsensoren geeignet. Je nach Stromform unterscheidet sich der technische Aufwand und der geeignete Stromsensor. Im Folgenden liegt der Fokus auf dem Gleichstrom. Die Anforderungen bei Kondensatorentladung unterscheiden sich aber nur gering. Unter der genannten Einschränkung ist mit Shunts die höchste Messgenauigkeit zu erreichen. Allerdings können diese, um nicht selbst einen erheblichen Anteil des Schweißstromes in Wärme umzusetzen (ca. 6%), nur parallel zum Schweißstromkreis eingebunden werden und bedürfen dadurch für jede neue Schweißaufgabe einer Kalibrierung. [48]

Am weitesten verbreitet sind Rogowskispulen. Sie beruhen auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion und nutzen die transformatorische Grundregel. Der nichtmagnetische Kern der Spule ermöglicht es, hohe Ströme und hohe Frequenzen zu messen. Dem Induktionsgesetz zufolge sind Zeitintegrale zu bilden und Gleichanteile zu rekonstruieren.

Eine digitale Schaltung sollte bei dieser Aufgabe immer einer analogen (Operationsverstärker) vorgezogen werden, um die Signaldrift zu minimieren. Beim Einsatz an Punktschweißsystemen ist weiterhin auf eine Gebrauchslage und Polung zu achten, wie sie in der Spulen-Kalibrierung vorlag. [133] [197] [240] [48] [262] [98] [106] [107] [73] [74]

Abschließend sei auf ein vielversprechendes optisches Sensorkonzept zur Hochstrommessung hingewiesen: die sogenannte faseroptische Strommessung. Da Messsignal und Signaltransport rein optisch erfolgen, wäre diese Technologie in der Lage nahezu alle Nachteile von Shunts, Stromwandlern, Hallsensoren und Mischformen zu eliminieren. [1]

Elektrische Spannung Die Spannungsmessung erfolgt immer hochohmig, durch den Abgriff einer Potentialdifferenz an zwei Punkten, die so nahe wie möglich an den Elektrodenkappen liegen sollten. Um induktiv eingekoppelte Störspannungen zu vermeiden, sind die Messleitungen zu verdrillen, was durch die Lage der Abgriffspunkte und der Zugänglichkeit des Zangenfensters nicht vollständig möglich ist. Es verbleibt immer eine Störsecke für induktiv eingekoppelte magnetische Wechselfelder. Diese Signalbeeinflussung ist zu berücksichtigen. Alternativ kann die Spannungsauswertung auf Zeitpunkte, an denen kein Strom fließt ($di/dt = 0$), begrenzt werden oder aber eine Kompensation der Störung durch adaptive Filterung vorgenommen werden. Ersteres hat den Nachteil, keinen kontinuierlichen Signalverlauf zur Verfügung stellen zu können und letzteres hat den Nachteil einer komplexen Anwendung und Parametrierung. [98] [300]

Elektrischer Widerstand Der elektrische Widerstand errechnet sich aus Division von momentaner elektrischer Spannung durch momentanen elektrischen Strom. Auch hierbei ist bezogen auf die Spannungsmessung zu berücksichtigen, dass der Widerstandswert nur zum Zeitpunkt des Stromspitzenwertes ($di/dt = 0$) frei von induktiven Einflüssen ist.

Elektromagnetische Felder Für ausgewählte Anwendungen kann es sinnvoll sein, elektrische und magnetische Felder zu erfassen, um z. B. Expositionswerte für Menschen zu quantifizieren. Die aus der elektrischen Spannung beim Widerstandspunktschweißen (ca. 1-50 V) resultierenden elektrischen Felder sind allerdings um ein Vielfaches (≈ 100 -fach) geringer, als es nationale und internationale Grenzwertvorgaben erlauben, weshalb sie unberücksichtigt bleiben können [250] [166] [203] [201]. Dem gegenüber sind in unmittelbarer Schweißsystemnähe (20 cm) die aus dem elektrischen Strom hervorgehenden magnetischen Felder ($B = 1 \text{ mT}$ je kA) unterhalb oder oberhalb vorgegebener frequenzabhängiger Grenzwerte ($3,0 \cdot 10^5/f$) [85] [250]. Diese frequenzabhängigen Einzel-Messwerte sind zur Expositionsbewertung der Schweißaufgabe anschließend gewichtet zu summieren, wofür bislang allerdings kein einheitliches Vorgehen existiert. Eine Messung der magnetischen Felder an definierten Punkten im Raum ist folglich empfehlenswert. Dazu sind grundsätzlich Systeme basierend auf Spulen und Hall-Sensoren einsetzbar. Spulen haben einen sehr

großen Messbereich ($0,1 \mu T \dots 100 T$) bei großer Bandbreite (bis $500 MHz$), können aber keine Gleichfelder erfassen. Mit Hall-Sensoren ist es hingegen möglich, Gleichfelder zu messen. Zugleich müssen aber Einschränkungen in der Bandbreite (bis $25 kHz$) und im Messbereich ($0,1 mT \dots 50 T$) hingenommen werden [282]. Für Analysen beim Widerstandspunktschweißen sollten Messgeräte eine Abtastrate von mindestens dem 20-fachen der Inverterfrequenz und eine magnetische Flussdichte B von mindestens $5 mT/kA$ besitzen [147] [85].

2.5.3. Umgang mit elektromagnetischen Einflüssen

Informationen zu elektromagnetischen Feldern zeigen, welche Belastungen auf Objekte in der Umgebung wirken. Darin unberücksichtigt sind die zu verschweißenden Eisenwerkstoffe, deren Induktivität weiteren Einfluss auf das Umfeld ausübt. Somit stehen Messsysteme beim Widerstandspunktschweißen im Konflikt zwischen immer empfindlicherer Sensorik und zunehmenden elektromagnetischen Störaussendungen, die sich durch verstärkte Verwendung kurzer Stromzeiten mit hohen Stromstärken ergeben.

Ein weiteres Ziel der Messwertgewinnung sollte es somit sein, Überlegungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit (kurz: EMV) zu berücksichtigen und einzubeziehen. Den grundlegenden Mechanismus der elektromagnetischen Beeinflussung zeigt Abbildung 2.7. Die darin aufgezeigte Störquelle ist das elektromagnetische Feld, welches durch den Schweißprozess untrennbar mit der Umgebung verbunden ist. Bei der Störsenke handelt es sich in der betrachteten Messaufgabe um das Messsystem. Zwischen beiden befindet sich der Koppelpfad, welcher erst nach der Signalaufbereitung im Messsystem endet. Da sich die Störquelle prinzipbedingt nicht vermeiden lässt [72], kann die Wirkung auf die Störsenke nur verhindert werden, indem die Koppelmechanismen unterbrochen werden.



Abbildung 2.7.: Beeinflussungsmodell der EMV in Anlehnung an [145] [264] [118]

Zu den Koppelmechanismen zählen Galvanische Kopplungen (Beeinflussungen durch galvanische Verbindung von Signalleitungen und Stromkreisen, Erdschleifen) [145] [264] [118], Kapazitive Kopplungen (Beeinflussungen durch elektrisches Feld) [264] [118] [253], Induktive Kopplungen (Beeinflussungen durch magnetisches Feld) [264] [118] [253] und Strahlungskopplungen (Beeinflussungen durch elektromagnetische Wechselfelder aus dem Fernfeld) [264]. Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verringerung dieser Kopplungen lassen sich auf die Bereiche Signalübertragung, Signaleinbindung und Schirmung aufteilen. Auf die Signalübertragung fallen die zu übertragende physikalische Größe (Spannung, Strom, elektromagnetische Strahlung, Frequenz, Pulsweite) und die Art der Übertragung (symmetrisch oder unsymmetrisch und verdrehte Leitungen) [20] [118] [253] [149] [75]. Bei der Signaleinbindung ist auf galvanische Trennung der Messsignale untereinander sowie zwi-

schen den Stromkreise zu achten [149]. Auch die Analyse und Vermeidung von Erdschleifen kann dem Bereich der Signalübertragung zugeordnet werden. Bei der Schirmung von Signalleitern ist auf durchgängige Schirme gegen elektrische Felder (geschlossener elektrisch leitfähiger Mantel mit einseitiger Bezugsmasse) und gegen magnetische Felder (an dieser Stelle sind Kabelschirme mit hoher Permeabilität eine denkbare Lösung) zu achten [253].

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im kleinen elektrischen und großen magnetischen Feld des Widerstandsschweißens ideale Sensoren die jeweilige Messgröße optisch erfassen und optisch bis zu einem Datenerfassungssystem mit Messumformer transportieren sollten. Da ein solches Messsystem bislang nicht möglich ist, sollte auf eine strombasierte Signalübertragung mit geschirmten und verdrillten Leitern Wert gelegt werden, um einen guten Schutz gegen den Einfluss beider Feldarten zu gewährleisten. Muss auf spannungsbasierte Signalübertragung zurückgegriffen werden, weil die Sensorik nur mit einem solchen Ausgang verfügbar ist, sollte auf eine symmetrische Signalübertragung geachtet werden.

2.5.4. Abschätzung von Messunsicherheiten

Neben der Messwertgewinnung stellt auch die Abschätzung von Messabweichungen und deren Zusammenwirken in einer Messkette ein häufig vernachlässigtes Themenfeld dar. Zumeist wird ein abgelesener oder erhaltener Messwert als absolut angenommen und genutzt, um kleinste Einflüsse zu erkennen. Unberücksichtigt bleiben dabei Messunsicherheiten, welche Grenzen der Interpretationstiefe aufzeigen und fortführende sowie anknüpfende Arbeiten überhaupt erst ermöglichen [98]. Nahezu jeder Hersteller gibt zwar eine gerätebezogene Messunsicherheit an, oft bleibt jedoch unklar, innerhalb welcher Grenzen diese gilt. Darüber hinaus werden Messergebnisse stets durch Umwelteinflüsse wie die Umgebungstemperatur (systematische Abweichung) und technische Einflüsse wie starke magnetische Felder (zufällige Abweichung) überlagert.

Wird regelmäßiges Kalibrieren vorausgesetzt, ist es nach international erarbeiteten Standards zulässig, Messunsicherheiten auf zwei unterschiedliche Weisen zu ermitteln [4]. Die erste Weise (Typ-A) ist eine statistische Analyse durch identische Messwiederholungen, die zweite (Typ-B) ist eine rein berechnende Analyse aus Kennwerten des Messgerätes, Unsicherheitsbeiträgen, Sensitivitätskoeffizienten und angenommener oder bekannter Verteilung dieser drei Größen. Typ-A hat bei belastbarer und störungsfreier Kalibrierung innerhalb des Schweißsystems den Vorteil, auch zufällige Abweichungen zu erfassen. Da diese Art der Kalibrierung für die vorliegende Arbeit jedoch nicht sicher gewährleistet werden kann, wird in den nachfolgenden Betrachtungen Typ-B verwendet. [4] [116] [279] [53] [54]

$$Y = y \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i \cdot u_i(y)}{\sqrt{3}} \right)^2} = y \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \chi_i^2(y)} \quad (2.1)$$

Unter Berücksichtigung der typischen Messaufgaben beim Widerstandspunktschweißen

lässt sich für das Messergebnis einer jeden Messgröße (Y) eine Gleichung aus dem Schätzwert des Messergebnisses selbst (y) und der Messkette, bestehend aus Messunsicherheitsbeiträgen (u_i) und Sensitivitätskoeffizienten (c_i), eingebettet in eine Normalverteilung ($\sqrt{3}$), aufstellen (Gleichung 2.1). Anhand dieser wird beispielhaft die Messunsicherheit der Spannungsmessung des ab Kapitel 5 genutzten messtechnischen Aufbaus abgeschätzt. Die Messkette besteht immer aus der zu messenden Größe selbst, was hier die Spannung (U_{mess}) ist, und den Einflussgrößen (χ_i). Die Systemgleichung für die Spannungsmessung zeigt Gleichung 2.2.

$$Y = U_{mess} + \chi_{G0S} + \chi_{G0Snl} + \chi_{G0Ssf} + \chi_{G0Sqf} + \chi_{G0Snpd} + \chi_{G0Smo} + \chi_{HKS-U} \quad (2.2)$$

Zur gemessenen Spannung addieren sich die entsprechenden Einflussgrößen des Messsystems, welche in der vorliegenden Arbeit den Prozesssensor P100K der HKS Prozesstechnik GmbH und die Goldammer Messkarte G0S-1034-4 einschließen. Die einzelnen Rechenschritte zeigt Tabelle A.2. Die partiellen Ableitungen nach den Einflussgrößen führen darin alle zu einem Sensitivitätskoeffizienten von Eins. Wird anschließend betrachtet, wovon die Messunsicherheit der Spannungsmessung abhängig ist, zeigt sich nur noch die Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Bezugstemperatur. Da die Messsysteme alle etwa 15 *min* vor Beginn von Experimenten mit deren Betriebsspannung versorgt werden, sind die meisten Bauelemente im relevanten Zeitfenster bereits auf Betriebstemperatur, und die Temperaturdrift darf vernachlässigt werden. Nach Typ-B ergibt sich folgender Wertebereich für die Messgröße Spannung:

$$U_{95\%} = U_{mess} \pm 0,27 V \quad (2.3)$$

Abbildung 2.8 zeigt eine reale Messung aus Experimenten des Kapitels 7. Wird dieser die berechnete Messunsicherheit gegenübergestellt, lässt sich festhalten, dass auf messtechnische Erkenntnisse fremder Arbeiten nur mit Bedacht Bezug genommen werden sollte. Messungen an ein und demselben Versuchsstand sind bei konstanten Umgebungsbedingungen jedoch suffizient vergleichbar.

Die Messunsicherheit der weiteren in dieser Arbeit genutzten Sensoren mit deren Messketten geben Gleichung 2.4 für die Strommessung, Gleichung 2.5 für die Elektrodenkraftmessung, Gleichung 2.6 für die Elektrodenwegmessung, Gleichung 2.7 für die Kühlwasserdurchflussmessung und Gleichung 2.8 für die Kühlwassertemperaturmessungen wieder. Alle Rechenwege sind in Abschnitt A aufgeführt. Auch hier wird deutlich, mit welchem Streumaß ein Vergleich zu Arbeiten eines abweichenden Versuchsstandes zu führen ist. Dabei weiterhin unberücksichtigt bleiben Einflüsse durch das Magnetfeld beim Schweißen.

$$I_{w95\%} = I_{w_{mess}} \pm 0,63 kA \quad (2.4)$$

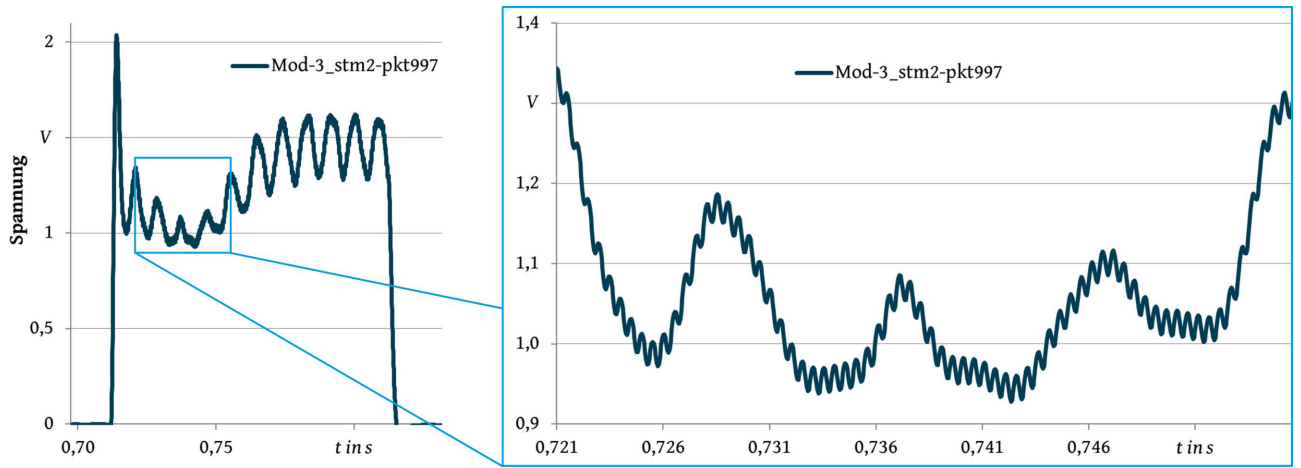


Abbildung 2.8.: Spannungsmessung für Punktschweißverbindung Nummer 997 bei Versuch Mod-3_stm2

$$F_{El_{95\%}} = F_{El_{mess}} \pm 0,19 \text{ kN} \quad (2.5)$$

$$s_{El_{95\%}} = s_{El_{mess}} \pm 0,11 \text{ mm} \quad (2.6)$$

$$Q_{Kuehlwasser_{95\%}} = Q_{Kuehlwasser_{mess}} \pm 0,96 \text{ l/min} \quad (2.7)$$

$$\vartheta_{Kuehlwasser_{95\%}} = \vartheta_{Kuehlwasser_{mess}} \pm 3,13 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.8)$$

3. Stand der Wissenschaft zu Elektrodenverschleiß und Verschleißverständnis

Als messbare Größe zur Beurteilung des Elektrodenverschleißes dient die Elektrodenstandmenge. Sie ist seit dem Jahr 2000 international definiert als die Anzahl an Punktschweißverbindungen, welche bis zum Unterschreiten einer zuvor festgelegten Qualitätsgrenze möglich ist, ohne die Elektrodenkontaktfläche nachzuarbeiten [83]. Die im Zuge der Standardisierung vorgegebene Qualitätsgrenze liegt bei einem Punktdurchmesser d_w von $3,5\sqrt{t_i}$ [83], welche in einem Schälversuch zu ermitteln ist. Andere Qualitätsgrenzen sind möglich, wenn diese detailliert festgelegt werden. Zu diesen gehören unter anderem Kennwerte aus instrumentierten zerstörenden Prüfverfahren (Scherzug- und Torsionsprüfung) sowie aus Messungen am Querschleiff oder aber Kennzeichen zwischen Elektrode und Blechaußenseiten. Diese verschiedenartige Definition des Standmengenendes erschweren eine Vergleichbarkeit, welche bereits durch die großen Unterschiede in der Anlagentechnik komplex ist. Unabhängig vom Kennzeichen des Standmengenende werden als Ursachen des Elektrodenverschleißes einstimmig und überwiegend Vorgänge aus Diffusion, Druckkraft und Temperaturwirkung beschrieben. Diese drei verändern in untrennbarer Wechselwirkung zueinander während der Nutzungszeit die Elektrodenkontaktfläche, sodass die Stromdichte sinkt und die Punktschweißverbindung stets qualitativ schlechter wird (vorrangig sinkt d_w).

Die nachfolgenden Abschnitte widmen sich inhaltlich vier Bereichen des Elektrodenverschleißes. Im ersten Abschnitt werden Beobachtungen von Elektrodenkappe und Verbindungsqualität unterteilt in Elektrodenwerkstoffe zusammengestellt. Dieser Inhalt wird unter dem Begriff Verschleißerscheinungen geführt. Inwieweit diese Darstellungen auf physikalische Grundprinzipien zurückzuführen sind, wird im zweiten Abschnitt unter der Bezeichnung Verschleißmechanismen beleuchtet. Der dritte Abschnitt führt Verschleißgrößen auf. Darunter sind alle im Fügeprozess messtechnisch erfassbaren Veränderungen von Elektrodenkappe und Verbindungsqualität zu verstehen. Welche Erkenntnisse in der Praxis umgesetzt werden und wie dem Verschleiß dort begegnet wird, erfasst der vierte Abschnitt.

3.1. Verschleißerscheinungen

Für jede Konstellation von Elektrodenwerkstoff und kontaktierendem Blechwerkstoff mit dessen speziellen Beschichtungen stellen sich singuläre Verschleißerscheinungen ein. Daher wird folgend zusammengestellt, für welche Kontaktzustände bereits Verschleißerscheinungen erfasst wurden, und dargestellt, wie detailliert diese Kenntnisse sind.

3.1.1. Verschleißerscheinungen zwischen Cu(Cr)Zr-Elektroden und verzinkten Stählen

Charakteristisch beim Widerstandspunktschweißen mit Cu(Cr)Zr-Elektroden von verzinkten Stahlblechen ist die hohe Affinität zwischen Kupfer und Zink. Im Zusammenspiel mit der prozessbedingten Druckkraft und der hohen Stromlast (Erwärmung) ergeben sich singuläre Effekte, die in metallurgische und mechanische unterteilen lassen.

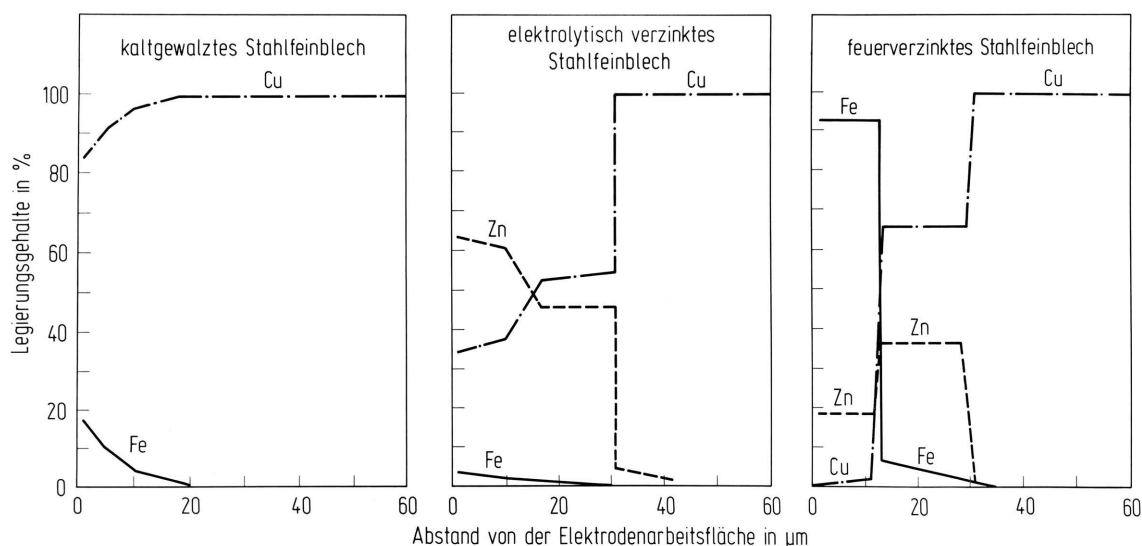


Abbildung 3.1.: Chemische Zusammensetzung der Elektrodenkontaktfläche nach 5 000 Punktschweißverbindungen [193]

Als metallurgische Wirkung ist die sich an der Elektrodenkontaktfläche ausbildende Legierung mit Zink aufzuführen. Diese zeigt sich etwa ab der fünften Punktschweißverbindung und kann bereits nach 25 weiteren vollständig ausgebildet sein [202]. Ab etwa 90 bis 100 Schweißungen nimmt die Schichttiefe nicht weiter zu und besteht beim Schweißen feuerverzinkter Bleche aus drei Bereichen [202] [51]. Im oberflächennahen Bereich ($1-3 \mu m$) lässt sich eine Mischung aus η -Mischkristallen¹, kurz MK, und ε -MK ($CuZn_3$) finden, die in den ersten Schweißungen an der Elektrodenkappe haften und mit steigender Elektrodentemperatur beim Abheben dieser am Blech verbleiben oder in den Randbereich der Elektrodenkappe verdrängt werden. Der zweite Bereich, der daraufhin in Richtung Elektrodeninneres

¹ Cu_xZn_{1-x} $x = 0$ bis $0,02$ [226].

folgt, ist durch den sehr spröden γ -MK (Cu_5Zn_8) [30] gekennzeichnet, wodurch häufig Risse vorzufinden sind. Als drittes schließt sich ein Bereich aus dem β -MK (CuZn) an, welcher trotz hoher mechanischer Festigkeit verhältnismäßig duktil ist und eine starke Bindung zum Grundwerkstoff besitzt. Alle Bereiche variieren stark und nehmen zusammen eine Tiefe von typischerweise bis zu $50\ \mu\text{m}$ ein. Gegenübergestellt zeigen CuCr1Zr/CuCrZr und CuZr ein gleichartiges Verschleißbild, welches bei den CuZr -Elektroden allerdings gleichmäßiger ausgeprägt ist [202]. In einer früheren Arbeit wird die beschriebene Messingschichtbildung zwischen feuerverzinkten und elektrolytisch verzinkten verglichen (nur β -MK) und der Verschleißschicht bei unbeschichtetem Stahlblech gegenübergestellt [193]. Abbildung 3.1 zeigt die nach 5000 Punktschweißverbindungen erfassten Elemente, deren Übergänge schematisch zu betrachten sind. In [202] wird darüber hinaus nachgewiesen, dass mit steigender Stromzeit und Stromstärke die Diffusion markant zunimmt, wodurch die Legierungsbildung bereits nach der ersten Punktschweißverbindung alle drei Bereiche beinhaltet. Eine größere Gesamtlegierungstiefe wird allerdings nicht berichtet und auch der Aufbau der Bereiche bleibt gleich. Neben dieser Temperaturwirkung schreibt [296] von begünstigter Diffusion bei steigender Elektrodenkraft.

Die Bildung der Legierungsschicht ist gekennzeichnet durch eine mit der Schichtdicke rasch sinkende elektrische und thermische Leitfähigkeit [105] [13]. Zugleich verändern sich auch die mechanischen Eigenschaften mit dem Mischungsverhältnis von Kupfer und Zink. Die von der Kontaktfläche nach innen vorliegenden η -MK, ε -MK und γ -MK zählen zu den Humme-Rothery-Phasen und sind aufgrund ihres intermetallischen Charakters extrem spröde [13] [135]. Hierdurch sind die Ausgangskennzeichen beschrieben, warum die Legierungsschicht über eine gewisse Tiefe hinaus nicht weiter wächst. Denn zum Ersten bewirkt der erhöhte elektrische Widerstand im Kontaktbereich eine höhere Temperatur, die dazu führen kann, dass Zink beim Abheben der Elektroden noch flüssig ist und am Blech verbleibt. Und zum Zweiten tritt die mechanische Wirkung der Elektrodenkraft hinzu, welche die spröden Mischkristalle herausbrechen lässt. Dabei halten die β -MK allerdings die γ -MK bis zu einer gewissen Ausprägung noch fest [202]. Sobald dies nicht mehr möglich ist, gleiten auch die γ -MK ab oder brechen aus der Kontaktfläche. Der nun offen liegende Bereich aus β -MK kann durch Zink-Anreicherungen zu neuem γ -MK werden. Diese Vorgänge resultieren in einem stationären Zustand aus relativ geringer und konstanter Legierungstiefe sowie aus zerrütteten Kontaktflächen mit Rissen und lokalen Vertiefungen [157] [202] [105]. Die mit der Erwärmung sinkende Härte der Elektrodenspitze führt zu einer sich verbreiternden Kontaktfläche aufgrund Abgleiten erweichter Bereiche bzw. Schichten [158]. Dieses Abgleiten endet am Randbereich der Elektrodenkontaktfläche und hat durch dessen Erscheinungsbild die Bezeichnung „Pilzbildung“ erhalten [158]. Während dieser beiden kontinuierlichen mechanischen Prozesse, verkürzt sich die Elektrodenkappe und die kontaktierende Fläche wächst stetig an. In [157] wird beschrieben, dass sich die Kontaktflächenvergrößerung in zwei Stufen vollzieht, was jedoch eine einzigartige

Einschätzung bleibt.

In fast jeder Beschreibung zum Elektrodenverschleiß wird aufgeführt, dass sich zumeist starke Unterschiede im Verschleißverhalten unter konstanten Fertigungsbedingungen zeigen [202] [123]. So werden Elektroden aufgeführt, deren Verschleiß nach 20 Punktschweißverbindungen vergleichbar mit jenem nach 200 Verbindungen ist [202] und in einer anderen Untersuchung der Verschleiß zum Standmengenende hin nach 1200 Verbindungen analog dem nach 1900 Verbindungen ist [123].

3.1.2. Verschleißerscheinungen zwischen dispersionsgehärteten Elektroden und verzinkten Stählen

Bei dispersionsgehärteten Elektroden beschreibt Nadkarni [41] erstmals das Verschleißverhalten mit verzinkten Stählen, wobei sich dieses gegenüber Elektroden aus CuCr(1)Zr bzw. CuZr als gleichartig herausstellt. Zugleich wird angeführt, dass die Kontaktfläche weniger zerrüttet ist, woraus eine kleinere Stromdichte bei hoher Punktschweißanzahl abgeleitet wird. Dieser Zusammenhang wird aus der gegenüber den beiden schmelzmetallurgisch hergestellten Elektrodenwerkstoffen geringeren erreichten Standmenge geschlossen. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei Kimchi [174] eine konkave Verschleißschichtverteilung mit geringerer Diffusionstiefe und eine höhere erreichbare Standmenge als bei CuCrZr-Elektroden.

3.1.3. Verschleißerscheinungen zwischen CuCr1Zr und 22MnB5+AS sowie zwischen W- bzw. Mo-Elektroden und verzinkten Stählen

Weitere Verschleißerscheinungen werden für die Konstellation von CuCr1Zr-Elektroden mit zwei 22MnB5+AS150 Blechen in [176] geschildert. Die Einzelblechdicke beträgt dabei 1,5 mm, die Elektrodenkraft 3,5 kN und die Stromzeit 800 ms. Standmengenversuche zeigen nach 2000 Punktschweißverbindungen, dass die 40 µm dicke AlSi-Beschichtung mit dem Blechwerkstoff vorzugsweise in der Mitte der balligen Elektrode anlegt. Von der Kontaktflächenmitte nach innen gehend dominiert Fe₃Al die ersten ca. 20 µm, welches sich in den darauffolgenden 50 .. 200 µm zunehmend mit dem Elektrodengrundwerkstoff (bis 40 %) mischt. In den darauffolgenden maximal 800 µm erstreckt sich ausgehend von der Symmetrieachse schlierenartig eine Legierung aus Kupfer und Aluminium (8 .. 14 %), welche vom Elektrodengrundwerkstoff umgeben wird. Diese auffällige Legierungstiefe und Zusammensetzung beschränkt sich auf einen Durchmesser von 3,2 .. 4,2 mm in der Mitte der Elektrodenkontaktfläche und baut sich um etwa 0,5 .. 0,7 mm gegenüber dem restlichen Kontaktbereich auf. Der Gesamtdurchmesser des Kontaktbereiches liegt zwischen 8,0 .. 9,0 mm. Auch, wenn bislang der Verschleißprozess nicht abschließend nachvollzogen wer-

den konnte, so heben Härtemessungen den Bereich mit Fe_3Al als sehr hart ($\geq 350 \text{ HV } 0,5$) hervor und stellen diesen eingerahmt vom deutlich entfestigten Elektrodengrundwerkstoff dar. Diese Entfestigung beginnt in etwa an den äußeren Grenzen des Gesamtkontaktbereiches und erstreckt sich mit einer deutlichen Wölbung nach innen. Zusammenfassend wird vermutet, dass die offenbar ausbleibenden abtragenden Prozesse und die allem Anschein nach höhere Affinität der AlSi-Beschichtung zur Elektrodenkappe als zum Stahlblech zu einem aufbauenden Legieren führt und die thermische sowie mechanische Einwirkung eine Vermischung im entfestigten Bereich entlang der Gefügeorientierung zur Folge hat. [176]

Auch für Wolfram- und für Molybdänbasis-Elektroden sind in der Literatur Verschleißbeschreibungen beim Widerstandspunktschweißen von verzinkten Stählen zu finden. Beide Werkstoffe weisen keine bzw. eine sehr geringe Legierungsneigung zu Zink auf, wodurch das Standmengenende auf eine Kombination aus Zerrüttungen und Rissen an der Elektrodenkontaktfläche, welche die Kontaktflächen verkleinern, [211] [112] sowie auf vereinzelte Legierungen zum Eisen [186] zurückgeführt wird. Vermutungen stützen sich darauf, die Kontaktflächenbeschaffenheit in besonderem Maße einer Oxidation und Sublimation der Elektrodengrundwerkstoffe zuzuschreiben. Denn Wolfram oxidiert in freier Atmosphäre ab ca. 500°C , Molybdän bereits ab etwa 400°C , was beim Abheben der Elektroden an der Kontaktfläche gegeben ist. Mit dem darauffolgenden Punktschweißvorgang können diese dann sublimieren. WO_3 erreicht jenen Punkt bei 850°C und MoO_3 schon bei 600°C . Diese thermisch induzierten Spannungen führen unter kombinierter Druckkraft aufgrund der großen Werkstoffsprödigkeit zu Rissen [112]. Beide Effekte verringern die wahre Kontaktfläche. Und die somit ebenfalls verkleinerten Strombahnen sind letztendlich nicht mehr in der Lage, eine äquivalente Schweißlinse auszubilden [211]. Ein zweiter Grund für den Verschleiß der Werkstoffe ergibt sich durch Auflegieren von Eisen, was beim Schweißen von elektrolytisch verzinkten Stählen mit Wolfram-Elektroden in außergewöhnlichem Maße auftritt und die Standmenge herabsetzt [186]. Insgesamt liegen die erreichbaren Standmengen für beide Elektrodenwerkstoffe viel höher als bei CuCrZr und CuZr, aber aufgrund der geringeren Härte von Molybdän sind jene von Wolfram in jedem Fall größer [186].

3.2. Verschleißmechanismen

In den dargestellten Verschleißerscheinungen (Abschnitt 3.1) sind mehrere Effekte der Werkstoffwissenschaft enthalten, welche beim Widerstandspunktschweißen immer aus einer Systemwirkung [202] von Druckkraft, Temperatur, Stoffkonzentrationen und Zeit resultieren. Um die Vorgänge beim Verschleiß zu ergründen zu können ist es dennoch sinnvoll, die wirkenden physikalischen Grundlagen herauszuarbeiten. Mit diesen ist es – unter Berücksichtigung der Systemwirkung – möglich, quantifizierte Veränderungen am Werkstoff bzw. am Prozess vorzunehmen.

Ausgehend von den nacheinander hinzukommenden Prozessgrößen wirkt bis zum Ende

der Vorhaltezeit nur die Elektrodenkraft. Sie führt zu Druckspannungen innerhalb der vorliegenden Ebenen und bewirkt je nach Sprödigkeit im Bereich der Rauheitsspitzen oder tiefer gehend durch kritische Schubspannungen ein Abgleiten (plastische Verformung) oder ein Aufbrechen kristallographischer Ebenen (Rissbildung). Sobald der Schweißstrom zugeschaltet wird, ergänzen sich zur vorhandenen Druckspannung Wirkungen durch die Temperaturerhöhung. Zu diesen zählen Warmverformung, Entfestigung (Erholung, Rekristallisation und Kornwachstum) sowie Diffusion.

3.2.1. (Warm-)Verformung

Wenn an den Elektrodenkontaktflächen Temperaturen von mehr als 40 % der Schmelztemperatur des Elektrodengrundwerkstoffes herrschen, kann von einer Warmverformung gesprochen werden. Mit Überschreiten besagter Temperatur wird der Werkstoff nicht mehr verfestigt, sondern kriecht unter der Temperaturlast und rekristallisiert während oder kurz nach Einwirken der Druckkraft [9]. In Bereichen oder Zuständen unterhalb dieser Rekristallisationsschwelle können die Schubkräfte eine kristallographische Gleitung und Versetzungsbildung hervorrufen (Verformung) [135], was den Elektrodenwerkstoff verfestigt.

3.2.2. Entfestigung

Da die überwiegende Mehrheit der Elektrodenkappen, aufgrund der höchsten Wirtschaftlichkeit bei großen Stückzahlen, durch ein Kaltfließpressen (plastische Verformung) hergestellt wird, besitzen diese zahlreiche Versetzungen. Am Rand ist die Versetzungsdichte besonders groß. Sie definiert wesentlich die Werkstoffhärte. Bei einwirkender Temperatur treten daher Erholung, Rekristallisation und Kornwachstum auf [9] [135]. Die Erholung tritt bei niedriger Temperatur ein, ist durch eine abnehmende Versetzungsdichte gekennzeichnet und führt zu speziellen energetisch günstigen Versetzungsmustern. Bei mittlerer Temperatur kommt es zur Rekristallisation, also der Gefügebildung durch Entstehung und Bewegung von Großwinkelkorngrenzen. Unter hoher Temperatur schließt sich eine stetige oder unstetige Kornvergrößerung an. In der technischen Literatur repräsentieren diese beschriebenen Effekte sogenannte Eigenschaftsveränderungsdiagramme, von denen das Zugfestigkeits-Glüh-Temperatur-Diagramm und das Härte-Glüh-Temperatur-Diagramm (Anlassbeständigkeit) die typischsten sind. [263] [135]

3.2.3. Diffusion

In der Natur sind alle Atome und Moleküle bestrebt Konzentrationsunterschiede auszugleichen. Der dafür notwendige Teilchenstrom entsteht immer durch thermische Anregung T bei Überschreiten einer Aktivierungsenergie Q , verläuft regellos, ist unabhängig von Krafteinwirkungen und wird durch die Diffusionsstromdichte \mathbf{j}_D beschrieben. Zu berück-

sichtigen ist, dass sowohl der Diffusionskoeffizient D , wie auch die Aktivierungsenergie Q konzentrationsabhängig sind. Die Sprungbewegung der Atome erfolgt schließlich durch Wechsel auf benachbarte Zwischengitterplätze, durch Platztausch, Ringtausch oder Leerstellenmechanismus. Sie konzentriert sich bei geringen Temperaturen vorrangig auf Korngrenzen und findet bei hohen Temperaturen zu gleichem Teil auch im Volumen statt. Mit dem sich verändernden chemischen Aufbau ändern sich auch die elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften an der Elektrodenkontaktfläche. In den überwiegenden Fällen sinken die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitfähigkeit in den legierten Bereichen, wodurch die thermische Beanspruchung sowie die daran gekoppelte Diffusionsgeschwindigkeit steigen. [263] [49] [135]

3.2.4. Abreißen der Grenzflächen zwischen Elektrode und Blech

In Arbeiten mit CuCr1Zr- und mit CuZr-Elektroden beim Schweißen verzinkter Stähle zeigt sich eine Diffusionsschicht, welche nach etwa 100 Punktschweißverbindungen nicht weiter in den Elektrodengrundwerkstoff hinein wächst [293] [202]. Obwohl die Diffusionsbedingungen nach einer Anfangsphase weitestgehend konstant bleiben, sind beim Verschleiß von Punktschweißelektroden nicht nur aufbauende (legierende) Effekte, sondern auch abbauende Effekte vorzufinden. Letztere werden beschrieben als ein Aufbrechen von Diffusionsschichten zwischen Elektrodenkontaktfläche und Blechkontaktfläche [293] [51].

3.2.5. Thermisch induzierte mechanische Spannungen

Wirken große Temperaturänderungen – vorrangig Abkühlungen – auf einen Werkstoff ein, können aufgrund seines begrenzten thermischen Ausdehnungskoeffizienten Spannungen entstehen. Dieselbe Spannungsart tritt auch in einem Werkstoffverbund auf, welcher durch stark unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten charakterisiert ist. Dann genügen häufig bereits kleine Temperaturänderungen. Übersteigen die dabei entstehenden Zugspannungen die Beanspruchbarkeit der Kristallgitter, erfolgt eine Entlastung durch Aufbrechen der Verbindungen. Es entstehen mikroskopische oder makroskopische Risse [11] [271].

3.3. Verschleißgrößen

Als Verschleißgrößen werden alle Prozessgrößen aufgeführt, welche in Veröffentlichungen im Zusammenhang mit dem Verschleiß von Elektroden untersucht wurden. Eingeteilt sind diese durch ihre zeitliche Abfolge im Punktschweißprozess. Darauf folgt eine Abschätzung, wie deutlich sich der Elektrodenverschleiß in den einzelnen Prozessgrößen einschließlich der Prozessparameter abzeichnet, um eine Vorauswahl für den messtechnischen Umfang der Standmengenexperimente dieser Arbeit abzuleiten.

3.3.1. Elektrodenkappen

Bei Untersuchungen zum Einfluss der Elektrode auf die Standmenge finden sich zwei Hauptthemen: zum einen der Elektrodenwerkstoff bzw. der Werkstoff an der Elektrodenkontaktfläche und zum anderen die geometrische Form der Elektrodenkontaktseite. Von Marek [202] werden CuZr- und CuCrZr-Elektroden mit jeweils planer und balliger Form der Art G 16 (nach ISO 5821 aus dem Jahr 1984) untersucht. Das dabei gewählte Standmengenkriterium ist ein Unterschreiten der Scherzugkraft von 70 % Sollkraft. Im Fall planer Elektroden wird die Standmenge bei CuZr nach etwa 688 Punktschweißverbindungen erreicht, bei CuCrZr gelingt dies auch nach 1500 Punkten nicht. Die einzelnen Scherzugergebnisse streuen allerdings bei CuCrZr deutlich stärker als bei CuZr. Mit dem Wechsel auf ballige Elektroden liegen die Standmengen in etwa gleich auf, wobei sich diesmal die Scherzugergebnisse bei den CuCrZr-Elektroden kontrollierter zeigen. Punktschweißaufgaben mit kongruenten Stahlblechen zeigen bei einer verschleißfesten Beschichtung der CuCr-Elektrode mit Titan eine Verdoppelung der Standmenge auf 1320 Punktschweißverbindungen [6]. Da oben und unten unterschiedliche Elektrodengeometrien gewählt wurden, entfällt jedoch eine Eintragung in der nachfolgenden Tabelle. In einer späteren Untersuchung mit TiC-beschichteten CuCrZr-Elektroden aus einer Serienfertigung zeigt sich bei einem Abbruchkriterium von $d_w = 3,5\sqrt{t}$ eine Standmengenerhöhung von 40 % gegenüber massiven CuCrZr-Elektroden [34]. Einen anderen Weg, werkstoffseitig die Elektrodenstandmenge positiv zu beeinflussen, erfolgte mit einem zylindrischen Einsatz aus Wolfram in der Symmetrieachse von CuCrZr-Elektroden in [36]. Von den Durchmessern der Einsätze, welche zwischen 1,0 bis 4,0 mm liegen, zeigt der kleinste Durchmesser die besten Ergebnisse mit einer Steigerung der Standmenge von 185 % gegenüber der massiven CuCrZr-Elektrode. Einen Wolfram-Einsatz mit 7 mm Durchmesser und damit keinem Cu-Kontakt am Blech untersuchte Krüger [186] und gelangte unter Bezug auf die Scherzugfestigkeit zu einer Standmengensteigerung von 3614 % gegenüber CuCr-Elektroden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 enthalten und werden durch experimentelle Ergebnisse zum Einfluss des Balligkeitsradius der Kontaktfläche ergänzt.

Wird der zylindrische Wolfram-Einsatz gegen einen W-Basiswerkstoff getauscht, sinkt bei verzinkten Stählen grundlegend die erreichbare Standmenge [111]. Während mit 4 % ThO noch eine Standmenge von 72 % erreicht werden kann, sinkt diese mit 3,5 % Ni und 1,5 % Fe auf 2 %. Dem gegenüber schneidet beispielsweise der Mo-Basiswerkstoff ZHM (1,2 % Hf, 0,4 % Zr, 0,15 % C) mit 45 % der Standmenge gegenüber reinem Wolfram vergleichsweise gut ab. Verändert sich die Blechbeschichtung, kann der Mo-Basiswerkstoff sogar besser abschneiden als reines Wolfram [111]. Von derzeit zunehmendem Interesse sind dispersionsgehärtete Elektrodenwerkstoffe, welche De Boni [19] betrachtete. Bei dickeren feuerverzinkten Stahlblechen können mit einem Abbruchkriterium von $d_w = 1,15 \cdot 3,5\sqrt{t}$ etwas mehr als 400 Punktschweißverbindungen erzielt werden. Unter gleichen Bedingungen war es mit den Al₂O₃-Elektroden möglich, die Standmenge zu verdreifachen. Weiter

zurückliegende Ergebnisse an dünnen Blechen zeigen hingegen keine Standmengenverbesserung durch den Einsatz von Al_2O_3 [174].

Tabelle 3.1.: Einfluss auf die Standmenge durch Elektroden

| Prozessgröße | Experimentelle Bedingungen | | | Standmenge ^a |
|-----------------------|--|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| | Elektroden | Bleche | Parameter ^b | |
| Werkstoff & Geometrie | CuZr plan | 2x | 2,5 kN; 13 kA; | 634 .. 742 Punkte [202] |
| | CuCrZr plan | St05 Z150 SC | 280 ms | > 1500 Punkte [202] |
| Geometrie | CuZr ballig | je 0,8 mm | 2,5 kN; 10 kA; | 681 .. 682 Punkte [202] |
| | CuCrZr ballig | | 280 ms | 593 .. 679 Punkte [202] |
| Werkstoff | CuCrZr FB25 ^c | 2x 0,7 mm | 9,2 kA 2,0 kN; 183 ms | 315 Punkte [34] |
| | TiC-CuCrZr FB25 | HSLA 350 60G ^d | 8,5 kA | 445 Punkte [34] |
| Werkstoff | CuCrZr R ₂ =75 [82] | | | 700 [36] |
| | CuCrZr + 1 mm W | 2x 0,88 mm | 2,5 kN; | 2000 Punkte [36] |
| | CuCrZr + 2,4 mm W | DC01 | 10 kA; | 700 Punkte [36] |
| | CuCrZr + 3,2 mm W | +ZE75/75 ^e | 240 ms | 500 Punkte [36] |
| | CuCrZr + 4,0 mm W | | | 450 Punkte [36] |
| Werkstoff | CuCr R=17,5 mm | 2x 0,88 mm | – | 700 Punkte [186] |
| | Cu + 7 mm W, R=17,5 | 380 g/m ² band- | 3,4 kN, 9,0 kA, 200 ms | 26000 Punkte [186] |
| Geometrie | CuCr + 9,3 mm W, R=12,5 | verzinktes | – | 17000 Punkte [186] |
| | CuCr + 9,3 mm W, R=40 | Stahlblech | – | 3000 Punkte [186] |
| Werkstoff | CuCrZr F1-16 [81] [82] | 2x 1,5 mm | 2,9 kN; 400 ms; | 406 Punkte [19] |
| | CuAl ₂ O ₃ F1-16 | H260D+Z100 | 7,5 kA | 1218 Punkte [19] |
| Werkstoff | CuZr G16 ^f d=6,35 mm | 2x 0,8 mm Fein- | 2,3 kN | 2600..3400 Punkte [174] |
| | CuCrZr G16 | blech, 65..90 g/m ² | | 1600..1750 Punkte [174] |
| | CuAl ₂ O ₃ G16 | feuerverzinkt | 200 ms | 1100..1700 Punkte [174] |

^a Punkte \equiv Punktschweißverbindungen.

^b Elektrodenkraft; Stromstärke; Stromzeit.

^c Gemäß RWMA Handbook, Fourth Edition, 1989.

^d Nach ANSI/AWS/SAE/D8.9.97.

^e DIN EN 10152 Stand Dezember 1993.

^f Nach ISO 5821:1984-04.

3.3.2. Kühlung

Da sowohl mechanische (z. B. Verformung) wie auch metallurgische (z. B. Diffusion) Beeinflussungen mit der Temperatur steigen, ist es wichtig die Elektroden zu kühlen. Dass dies aktiv geschehen muss, zeigen kalorimetrische Messungen. Aus diesen geht hervor, dass bis zu 70 % der gesamten beim Fügeprozess entstehenden Wärmeenergie von den Elektroden aufgenommen wird [280]. Folglich werden bereits seit vielen Jahrzehnten Kühlmedien ein-

gesetzt. In der Praxis handelt es sich dabei zumeist um gewöhnliches Wasser. Auch, wenn bei der typischen Bauform gewährleistet sein muss, dass das in der Elektrodenkappe vorbeiströmende Kühlmedium nicht in den gasförmigen Zustand wechselt, lässt sich durch eine große Durchflussmenge allein nicht automatisch eine gute Kühlung erreichen [267] [176]. Als bedeutsamsten geometrischen Einfluss nennt Sitte [269] den Abstand des Kühlrohres vom Grund der Elektroden-Innengeometrie. Es wird ein Abstand von 5 mm empfohlen. Unter dem Fokus der Temperaturbelastung veröffentlicht Eichhorn [114] Simulationsergebnisse zu Verbesserungen der Kühlbedingungen beim Widerstandspunktschweißen. Als Bezugsgröße zwischen Realität und Simulation dient ein Thermoelement in der Elektrode. Als stationäre Belastung kommt ein Wolfram-Inertgas-Lichtbogen zum Einsatz. Im Ergebnis zeigt sich der Effekt des Wärmeabtransports konzentriert auf die unmittelbar an der Grundfläche der Elektroden-Innengeometrie vorbeiströmenden Wasserschichten. Bis zu einem Abstand von 2 mm weist ein gerades Kühlrohr die beste Kühlwirkung auf. Bei einem Abstand zwischen 2 mm und 8 mm besitzt ein abgeschrägtes Kühlrohr die bessere Kühlwirkung und ab 8 mm besitzen beide Varianten die gleiche Kühlwirkung. Neben der Austrittsform und dem Abstand des Kühlrohres sind Einflüsse einer modifizierten Innenoberfläche der Elektrode veröffentlicht. So ist es mit einer verrippten Innenoberfläche möglich, die Elektrodentemperatur weiter zu reduzieren [114]. Wie Rao [247] in einer numerischen Betrachtung zeigt, kann es bei konventionellen Elektrodenkappen zu einer lokalen Stagnation des Kühlflusses am Grund der Elektrodenkappe kommen. Eine solche Stagnation tritt durch Bildung eines Wasserdampffilms ein, dessen Wärmeleitfähigkeit um einen Faktor von bis zu 22 geringer ist als jener flüssigen Wassers [148]. Um diesen Stillstand zu vermeiden wurde im Modell ein Kegel auf der Mitte des Elektrodengrundes herausgearbeitet. Die Berechnungen zeigen eine verbesserte Strömung entlang des Grundes und einen positiven Einfluss der leicht vergrößerten wärmeabgebenden Fläche. In einem Prototypentest zeigt die Veröffentlichung darüber hinaus fast eine Verdoppelung des von ihnen festgelegten Standmengenkriteriums gegenüber der konventionellen Elektrode. Den Ergebnissen sei ergänzt, dass der Kühlwasserdurchfluss bei $2,5\text{ l/min}$ lag.

Auch Sitte [268] weist eine positive Kühlwirkung durch ein kugelkalottenförmiges Kanalende nach. Zusätzlich wird eine Standmengenbeeinflussung mit dem Durchmesser des Elektrodeninnenkegels aufgezeigt. In Kombination erlauben ein von 9 mm auf 11 mm vergrößerter Kühlkanaldurchmesser und ein kugelkalottenförmiges Kanalende eine Standmengensteigerung von bis zu 50% an unbeschichteten Stahlblechen. Die Durchflussmenge muss dabei dem größeren Kühlkanal angepasst werden [114]. Zusammenfassend lässt sich benennen, dass mit gezielten Strömungsbedingungen und großer Anströmfläche eine positive Standmengenbeeinflussung möglich ist. Abbildung 3.2 zeigt typische Temperaturen am Elektrodengrund und die geometrischen Verhältnisse bei der Elektrodenkühlung klassischer Widerstandspunktschweißzangen. Auf die thermische Beanspruchung in der Elektrodenkontaktfläche selbst üben die Kühlbedingungen jedoch nach [267] [114] [247] nur einen

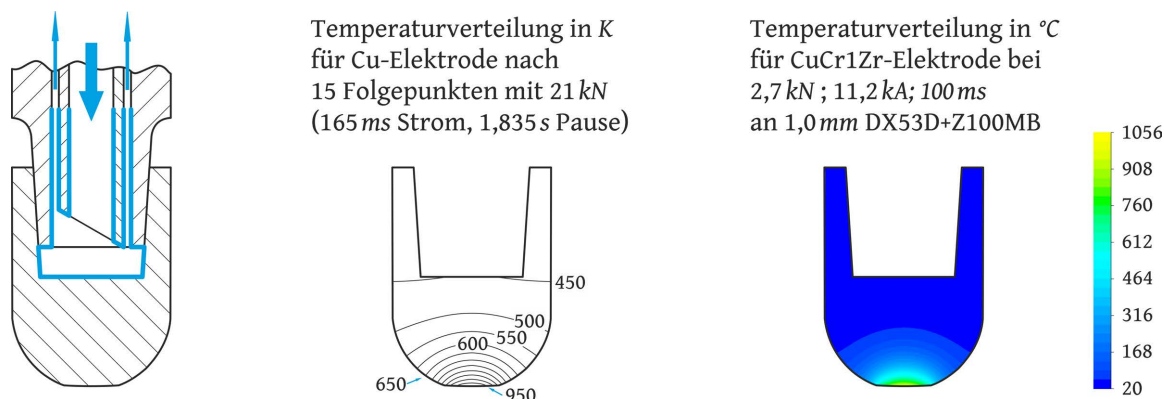


Abbildung 3.2.: Einflussmöglichkeiten auf Wärmeabtransport beim Widerstandspunktschweißen in blau (links), Temperaturfelder nach [247] (mittig) und Temperaturfelder gemäß SORPAS[®] Version 11 (rechts)

eher nachgeschalteten Einfluss aus. Denn die Wirkung des Wärmeabtransports nimmt erst mit steigender Entfernung von der Kontaktfläche zu.

Tabelle 3.2.: Einfluss auf die Standmenge durch Elektrodenkühlung

| Prozessgröße | Experimentelle Bedingungen | | | Standmenge |
|-------------------------------|---|-------------------|--------------------|--|
| | Elektroden | Bleche | Parameter | |
| Kühlrohrabstand | CuCr1 B 20x63 | 2x | 160 ms; x=15 mm | ≈ 9000 Punkte [269] |
| | | 1,0 mm | x=10 mm | ≈ 11000 Punkte [269] |
| | | StZu-A2 | x=10 mm | ≈ 11700 Punkte [269] |
| Elektrodengrund | CuCr d ₂ =4 [82] normal Grund mit Kegel | – | 9 kA | 2150 .. 2500 Punkte [247] 4785 .. 5000 Punkte [247] |
| Elektrodengrund & Durchmesser | CuCr1 16 mm Schaft | 2x | – | 2000 Punkte [268] |
| | Kanal Ø9 mm, α = 120° Kanal Ø12 mm, Kugelkalotte | 1,0 mm StZu-A2 | | 8000 Punkte [268] |

3.3.3. Bleche

Zur Definition einer Fertigungsaufgabe gehören in allererster Linie die zu verschweißenden Bleche. Beim anschließenden Widerstandspunktschweißen nehmen Grundwerkstoff der Bleche, die Beschichtungsart, die Beschichtungsdicke und die Beölung als Transport-, Lagerungs- sowie Handhabungsüberzug einen Einfluss auf die Elektroden. Da diese Eigenschaften seltenst einzeln betrachtet werden können, sind Fertigungserkenntnisse vorrangig für die jeweilige Konstellation gültig. In einigen Fällen kann bereits ein Wechsel des Blechherstellers zu veränderlichen Fertigungsergebnissen führen. Eine typische Konstellation feuerverzinkter Stahlbleche mittlerer Dicke untersuchte De Boni [19] mit dem Ziel der Standmengenanalyse. Die Experimente zeigen bei CuCrZr-Elektroden ein Standmengen-

de bei 406 Punktschweißverbindungen. Wird der feuerverzinkte Stahl zum Kaltumformen gegen einen hochfesten, warmumgeformten, borlegierten Stahl mit hochfester Aluminium-Silizium-Beschichtung getauscht, zeigt sich keine Änderung in der Standmenge. Werden jedoch andere Elektroden eingesetzt, welche bei De Boni aus Al_2O_3 dispersionsgehärtetem Kupfer bestehen, sinkt die Standmenge ausgehend vom verzinkten Stahlblech auf ein Drittel [19]. Eine andere Quelle zeigt Elektrodenstandmengen von weit über 2000 Schweiß-

Tabelle 3.3.: Einfluss auf die Standmenge durch Blechwerkstoffe und Blechbeschichtungen

| Prozessgröße | Elektroden | Experimentelle Bedingungen | | Standmenge | |
|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|--|-------------------|
| | | Bleche ^g | Parameter | | |
| Blech & Beschichtung | CuCrZr | H260D+Z100 1,5 mm | 2,9 kN; 7,5 kA; 400 ms | 406 Punkte [19] | |
| | F1-16 [81] [82] | 22MnB5+AS150 1,5 mm | 3,2 kN; 6,0 kA; 600 ms | 406 Punkte [19] | |
| | Al_2O_3 | H260D+Z100 1,5 mm | 2,9 kN; 7,5 kA; 400 ms | 1218 Punkte [19] | |
| | F1-16 [81] [82] | 22MnB5+AS150 1,5 mm | 3,2 kN; 6,0 kA; 600 ms | 406 Punkte [19] | |
| | CuCrZr F1-16 | 22MnB5+AS150 1,5 mm HX300BD+Z140 1,2 mm | 3,8 kN; 7,0 kA 60 ms + 360 ms | > 2000 Pkte [237] | |
| Beschichtung | A/SP No. 2 d ₂ =5,0 | 2x TiCb 0,75 mm | 2,0 kN; 220 ms | ≈ 1600 Pkte [163] | |
| | | HDG 0,48 % Al | 8,4 .. 9,1 kA | ≈ 2300 Pkte [163] | |
| | | HDG 0,26 % Al | 9,1 .. 9,6 kA | ≈ 11100 [163] | |
| | | GA Fe/Al=42,9 % GA Fe/Al=20,8 % | 7,8 .. 8,4 kA 8,5 .. 9,0 kA | ≈ 3000 Pkte [163] | |
| Beschichtung | CuCrZr F1-16 | DC04+ZE50/50 0,8 mm | 2,2 kN; 8,9 kA; 160 ms | 1650 Punkte [134] | |
| | d ₂ =5,5 [81] [82] | + Bonazinc 3000 | 2,2 kN; 8,7 kA; 160 ms | 550 Punkte [134] | |
| Beschichtung | CuCrZr oder CuZr | 2x 0,7 .. 0,8 mm unverzinkt | 2,0 kN; 200 ms ca. 8,5 kA | ≈ 6300 Pkte [105] | |
| | | 7,5-10 μm feuerverzinkt 7,5 μm el. verzinkt | ca. 8,8 kA ca. 9,0 kA | 1000 .. 2200 [105] 2000 .. 3500 [105] | |
| | B0 [82] d ₂ =4,6 mm | 7,5-10 μm galvannealed + phosphatiert | ca. 8,3 kA ca. 7,6 kA | 3000 .. 5000 [105] 1000 .. 2000 [105] | |
| | | 7,5 μm Bonazinc 7,5 μm Durazinc | ca. 7,0 kA ca. 7,0 kA | 700 .. 1400 [105] 700 Punkte [105] | |
| | Beölung | CuCrZr | 2x RSt1403 0,8 mm Öl 1 [182] | 3,63 kN; 80 ms; | 5600 Punkte [182] |
| | | A0-20-75 [82] | Öl 2, Charge 2 [182] | 10,0..12,4 kA | 1600 Punkte [182] |

^g Es handelt sich immer um eine einschnittige Verbindung.

punkten bei der Kombination von feuerverzinkter Tiefziehgüte und 22MnB5 [237]. Der Prozessablauf unterscheidet sich zur vorangestellten Arbeit nur moderat durch einen Vorimpuls und durch eine höhere Elektrodenkraft. Dennoch weichen die erreichbaren Standmengen gravierend voneinander ab. Im Fokus der weit verbreiteten verzinkten Stahlbleche verschiedenster Stahlsorten stellen Howe [163] und Kimchi [173] den Einfluss des Aluminiumanteils in der Zinkbeschichtung zusammen. Als Grundwerkstoffe werden bei Howe ein

phosphatierter ULC Ti-Cb und ein stabilisierter Ti-Cb in IF Qualität verwendet, welche jeweils in veränderlichen Zusammensetzungen feuerverzinkt (HDG) bzw. galvannealed (GA, Verzinken + Wärmebehandeln) werden. In den statistisch abgesicherten Versuchen (je ca. 60 Standmengenexperimente) zeigt der absolute Aluminiumanteil in der Zinkbeschichtung einen deutlichen Standmengeneinfluss. Während eine Verringerung des Aluminiums um 46 % bei feuerverzinktem Stahl die Standmenge um 44 % erhöht, steigt selbige bei galvannealed Stahlblechen um 270 % bei 51 % verkleinertem Fe/Al-Anteil in der Beschichtung [163].

Die Auswirkungen eines dünnen Lackfilms mit Zinkstaubpigmentierung auf einer galvanisch verzinkten Beschichtung präsentiert Göklü [134]. Dabei kann festgehalten werden, dass sich die Standmenge bei gleichen Prozessparametern durch die 4 μm dünne Filmschicht auf ein Drittel verringert und zugleich die Streuung der Einzelqualitäten markant steigt. Einen bedeutsamen Überblick über die Abhängigkeit von Elektrodenstandmenge und Stahlblech-Beschichtung stellt eine DVS Richtlinie [105] zusammen, deren Aussagen auszugsweise in Tabelle 3.3 aufgeführt sind.

Unberücksichtigt bleiben in vielen Arbeiten Angaben zur Beölung der Bleche. Aufgrund der verbesserten Handhabungs-, Transport-, Lagerungs- und Blechumformungseigenschaften ist eine solche aber prinzipiell immer vorhanden. Und es zeigt sich, dass diese Beölung auch beim Schweißen mit CuCrZr-Elektroden einen positiven Einfluss ausüben kann, indem die Diffusion von Zink in den Elektrodengrundwerkstoff abgemindert wird, wodurch schließlich größere Standmengen erzielbar sind [296]. Dieser positive Einfluss zeigt sich bereits nach 50 Punktschweißverbindungen im Übergangswiderstandsverlauf, im Wachstum des Kontaktflächendurchmessers und in der eingebrachten Energie [272]. Dass Öle allerdings nicht zwangsläufig eine positive Diffusionsbarriere darstellen, zeigt Krause an unverzinkten [182] und an verzinkten Stählen [183].

3.3.4. Kraft

Kraftwirkungen auf das Standmengenverhalten von Elektroden lassen sich ausgehend von den sehr vielfältigen Kraftsystemen in die Elektrodenkraft vor dem Schweißen (Vorhaltezeit), während dem Schweißens (Stromzeiten) und nach dem Schweißen (Nachhaltezeit) aufteilen. Diese Bereiche wiederum erlauben betragsmäßige (Aufsetzverhalten geometrisch und mechanisch, Nachsetzverhalten, Aufbiegungen, u.a.) und zeitliche Unterscheidungen. Vermutlich infolge der Verschleißkonzentration auf thermisch beanspruchte Phasen während des Widerstandspunktschweißens finden sich vorrangig Arbeiten zum Einfluss der Kraftwirkung während der Stromzeit und in der Nachhaltezeit, obgleich sich eine reproduzierbare Kontaktsituation beim Zuschalten der Stromstärke (Vorhaltezeit) ebenfalls auf die Kontaktflächenbeanspruchung auswirkt. Mit dem Elektrodenverschleiß durch unterschiedliche Kraftniveaus beschäftigte sich [270] und zeigt, dass mit einer Elektrodenkraft

von 5 kN die Standmenge gegenüber einer Elektrodenkraft von 2 kN verdreifacht werden kann. Details der Fertigungsaufgabe zeigt Tabelle 3.4. Eine auf andere Einflussgrößen normierte Darstellung trägt Abbildung 3.3 vor. Bei $3,0\text{ kN}$ Elektrodenkraft wird eine Stromstärke von $8,5\text{ kA}$ gewählt, an deren Punktdurchmesser sich die Stromstärken der restlichen Kraftniveaus orientieren.

Tabelle 3.4.: Einfluss auf die Standmenge durch Elektrodenkraft und Haltezeiten

| Prozessgröße | Experimentelle Bedingungen | | | Standmenge |
|-----------------|----------------------------|---|-------------------|-------------------|
| | Elektroden | Bleche | Parameter | |
| Elektrodenkraft | CuCrZr ^h | 2x St 14 je $1,0\text{ mm}$ | 160 ms ; | 490 Punkt [270] |
| | | | $2,0\text{ kN}$ | |
| | F16 ⁱ | beidseitig $5..6\text{ }\mu\text{m}$ bleibeschichtet | $3,0\text{ kN}$ | 700 Punkte [270] |
| | | | $4,0\text{ kN}$ | 1170 Punkte [270] |
| | | $5,0\text{ kN}$ | 1520 Punkte [270] | |

^h A 2/2 nach DIN 44 759:1973-11.

ⁱ nach DIN 44 750:1971-04.

Ausgehend von der gemessenen Temperaturlast auf die Elektrode leitet Eichhorn [113] ab, dass Haltezeiten nach dem Schweißen möglichst nicht größer als 100 ms sein sollten, um den Elektrodenverschleiß gering zu halten. Auch Krause [181] veröffentlichte eine positive Wirkung kurzer Nachhaltezeiten auf die Standmenge und verweist auf Experimente mit 80 ms und 120 ms . Allerdings variieren dabei zugleich auch Stromstärke und Vorhaltezeit, wodurch ebenfalls der deutlich verlängerten Vorhaltezeit ein positiver Effekt zugesprochen werden kann.

3.3.5. Elektrischer Strom

Unter dem elektrischen Strom sind im weiteren Verlauf der Arbeit alle Eigenschaften und Einstellgrößen des Stromsystems zusammengefasst. In erster Linie gehören dazu Stromart, Regelungsgeschwindigkeit, Effektivwert der Stromstärke und Stromzeit. Da die letzten beiden zu den Prozessparametern zählen, lassen sich deren Auswirkungen auf die Standmenge vergleichsweise einfach erarbeiten. Wird die These aufgegriffen, dass eine hohe thermische Beanspruchung unmittelbar mit der Standmenge gekoppelt ist, lässt sich diese durch Stromstärke (Effektivwert) und Stromzeit steuern [113].

Im Einzelnen wird nachgewiesen, dass es möglich ist bei gleichbleibender Scherzugqualität die Prozessgrößen auf eine hohe thermische Beanspruchung bzw. auf eine geringe thermische Beanspruchung der Elektrodenkappen hin zu variieren. Dadurch wird abgeleitet, dass kurze Stromzeiten eine geringe Elektrodenbeanspruchung hervorrufen, während lange Stromzeiten eine hohe Beanspruchung zur Folge haben. Zugleich tritt ein ausgeprägtes Mittelfeld konstanter thermischer Beanspruchung auf. Die Elektrodentemperatur wird in diesen Experimenten mit zwei Thermoelementen ermittelt, welche im Abstand von ca.

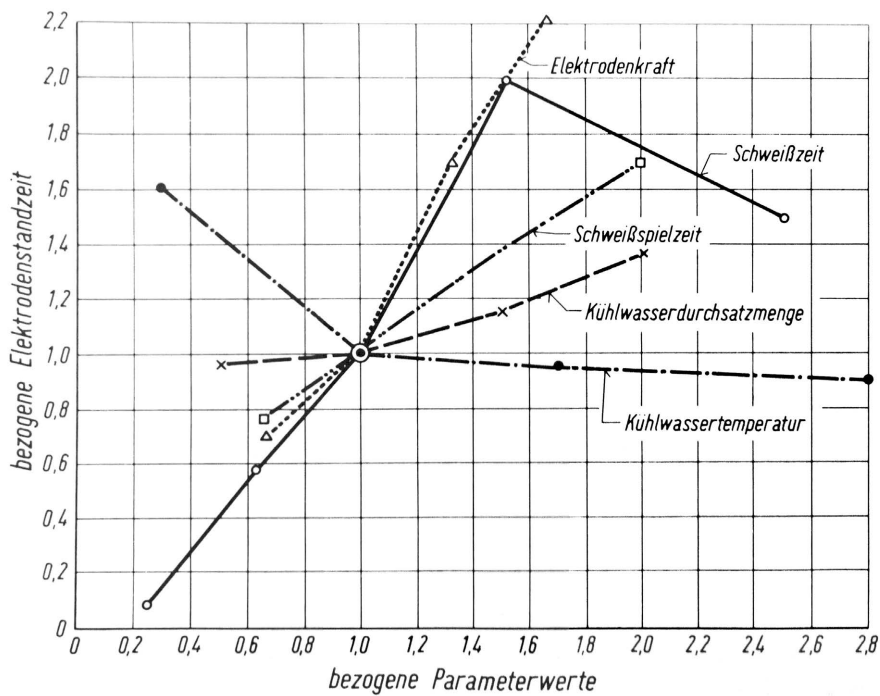


Abbildung 3.3.: Einfluss von Kraft, Strom und Kühlung auf die Standmenge, normiert auf $F_{El} = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 160 \text{ ms}$, $t_{squeeze} = t_{F_{El},hold} = 200 \text{ ms}$, $Q_{Kuehlwasser} = 2 \text{ l/min}$, $T_{Kuehlwasser} = 18 \text{ °C}$, Schweißzykluszeit=2500 ms [270]

3 mm und ca. 5 mm zur Elektrodenkontaktfläche radial zentriert im Elektrodengrundkörper eingelötet sind. Den Nachweis zur These der hohen Standmenge bei langer Stromzeit und geringer Stromstärke wird durch Standmengenversuche von Krause [181] erbracht. In den Untersuchungen von Sopp [270] zeigt sich jedoch kein linearer Zusammenhang zur Stromzeit. Auch er weist eine höhere Standmenge bei längerer Stromzeit und geringerer Stromstärke nach, allerdings nur bis 240 ms. Danach sinkt die Standmenge bei steigender Stromzeit wieder ab, wie Abbildung 3.3 und Tabelle 3.5 es darstellen. Einen weiteren Einfluss auf die Standmenge kann eine langsam ansteigende und eine langsam abfallende Stromstärke nehmen. Dass dieser sogar sehr deutlich ausfallen kann, zeigt [134] für Bleche mit Bonazinc Beschichtung (Tabelle 3.5)

In fast allen bislang genannten Arbeiten werden einpulsige Schweißprogramme verwendet. Mehrere Strompulse einzusetzen ist gemäß Literatur insbesondere für dicke Bleche ($t \geq 3 \text{ mm}$) und für thermisch sowie metallurgisch empfindliche Werkstoffe (z. B. aufhärtungsempfindliche Stähle) vorteilhaft [280]. Bei dickeren Blechen ermöglichen sie eine gezieltere Temperaturerhöhung in der Fugestelle und bei den empfindlichen Werkstoffen vermindern sie kritische Abkühlgeschwindigkeiten (durch Vorwärmen) sowie kritische Spannungsspitzen im Gefüge (durch Nachwärmen). Diese Beeinflussung nutzt z. B. Overath [237] beim Schweißen des hochfesten 22MnB5.

Tabelle 3.5.: Einfluss auf die Standmenge durch Stromstärke, Stromzeit und Strompulse

| Prozessgröße | Elektroden | Experimentelle Bedingungen | | Standmenge |
|--------------|---|--|---------------------------------|---------------------|
| | | Bleche | Parameter | |
| Stromzeit | CuCrZr F16 | 2x St 14 je 1,0 mm | 3,0 kN | 125 Punkte [270] |
| | | | 40 ms | |
| | | beidseitig 5..6 μ m bleibeschichtet | 100 ms | 625 Punkte [270] |
| | | | 160 ms | 1120 Punkte [270] |
| | | | 240 ms | 2010 Punkte [270] |
| 400 ms | 1675 Punkte [270] | | | |
| Stromanstieg | CuCrZr F1-16 d ₂ =5,5 [81] [82] | 2x DC04+ZE50/50 | 8,7 kA; 160 ms; 2,2 kN | 550 Punkte [134] |
| | | 0,8 mm + Bonazinc 3000 | 9,3 kA; 80 ^j + 80 ms | > 2000 Punkte [134] |

^j Bei den ersten 80 ms handelt es sich um einen Stromanstieg.

3.3.6. Taktzeit

Im Wärmemodell variiert nach [267] die Kontaktflächentemperatur stark durch die Anzahl der pro Minute geschweißten Verbindungen (Taktzeit). Bei 1 mm dicken unbeschichteten Stahlblechen und CuCr1-Elektroden liegt die kritische Taktzeit für Elektroden mit 16 mm Durchmesser bei etwa 35 Punktschweißverbindungen pro Minute. Bei Elektrodendurchmessern von 20 mm vergrößert sich die kritische Taktzeit auf 45 Punkte pro Minute. Oberhalb dieser Werte sinkt die verfügbare Standmenge drastisch ab, wie Tabelle 3.6 verdeutlicht. Den Bereich des weitestgehend vernachlässigbaren Einflusses der Taktzeiterhöhung bestätigt auch Madsen [200] zwischen 22..34 *Punkten/min* beim Fügen von verzinkten Stählen verschiedener Sorten (DX54 bis DP800) mit 1,0 mm Einzelblechdicke. Untersuchungen zu Taktzeiten zwischen 10..40 *Punkten/min* ergänzt Eichhorn [113] mit Versuchen an 1,0 mm dicken, unbeschichteten Stahlblechen bei einer Stromstärke von 7,0 kA, einer Elektrodenkraft von 2,5 kN und einer Stromzeit von 200 ms. Die Ergebnisse greifen wieder zur These des unmittelbaren Zusammenhangs zwischen thermischer Beanspruchung und Standmenge und sind in Abbildung 3.4 aufgeführt. Sie enden mit Erreichen eines stationären Zustandes in einer Tiefe von etwa 2 mm.

Als wichtigste Erkenntnis wird daraus der Zusammenhang zwischen steigender maximaler Elektrodentemperatur bei geringer werdender Abkühlzeit bzw. Pausenzeit herausgelesen. Da bei genauer Betrachtung die Maximaltemperatur im stationären Zustand stetig auf bis zu 30 K mehr steigt und die Minimaltemperatur ebenso stetig um bis zu 75 K zunimmt, kann die Vermutung einer markanten, kritischen Taktzeitgrenze [267] nicht uneingeschränkt bekräftigt werden. Diesen eher gleichförmigen Zusammenhang zwischen verkürzten Stromruhezeiten und steigendem T_{min} in den Elektrodenkappen ermittelt auch Sopp [270]. Seine Ausführungen zeigen auch die daraus ableitbare negative Wirkung für die Standmenge. Allerdings wird nicht ganz klar, welche Einstellungen sich innerhalb der

Tabelle 3.6.: Einfluss auf die Standmenge durch die Taktzeit

| Prozessgröße | Elektroden | Experimentelle Bedingungen | | Standmenge |
|-------------------|---------------------|--|---|-------------------|
| | | Bleche | Parameter | |
| Taktzeit | CuCr1 16 mm | 2x StZu-A 2 je 1,0 mm | 2,5 kN; 9,0 kA; 160 ms 20 Punkte/min | 7200 Punkte [267] |
| | | | 37 Punkte/min ^k | 7200 Punkte [267] |
| | | | 50 Punkte/min | 2600 Punkte [267] |
| Schweißzykluszeit | CuCrZr F16 [270] | 2x St 14 je 1,0 mm, beidseitig 5..6 µm bleibeschichtet | 3,0 kN; 240 ms Schweißzyklus=1,7 s | 550 Punkte [270] |
| | | | Schweißzyklus=2,5 s | 750 Punkte [270] |
| | | | Schweißzyklus=5,0 s | 1385 Punkte [270] |

^k Konstruiert aus dem Zusammenhang für Elektroden mit 20 mm Durchmesser.

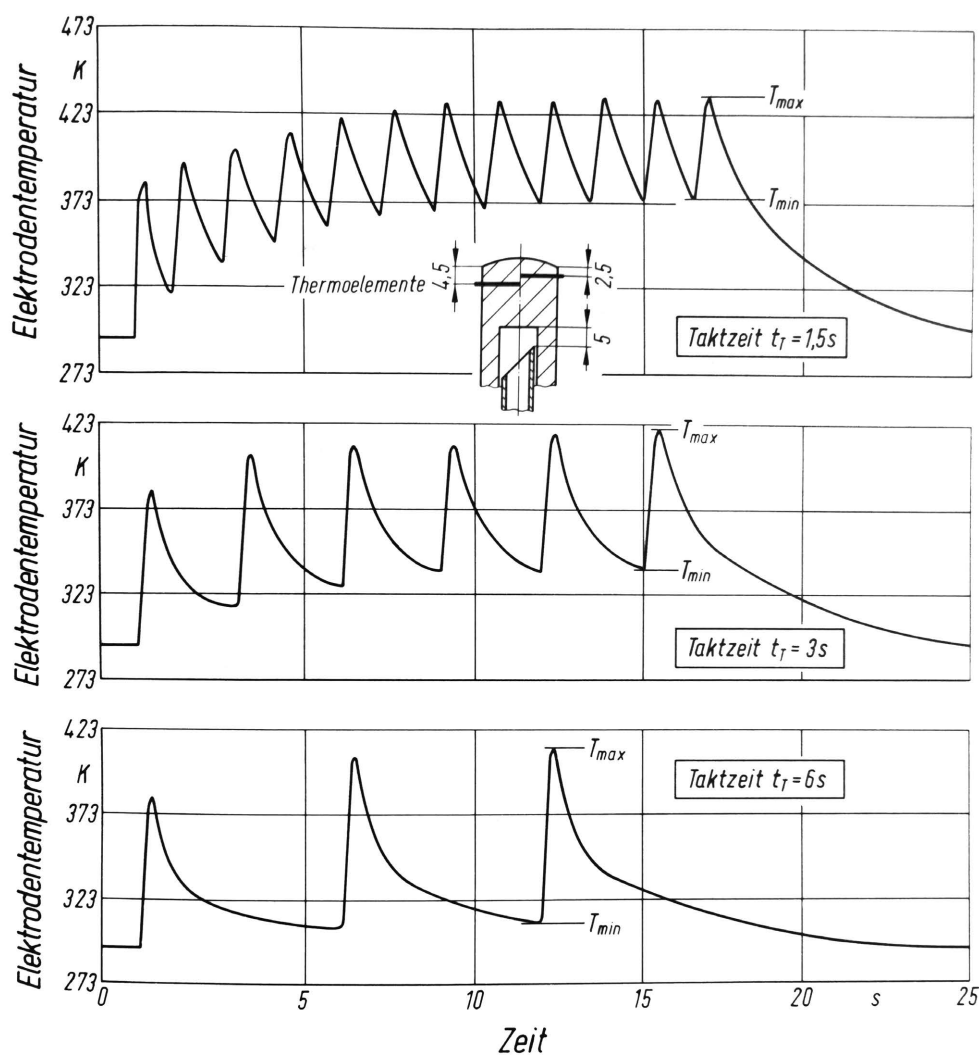


Abbildung 3.4.: Einfluss der Taktzeit auf die Elektrodentemperatur [113]

„Schweißspielzeit“² noch verändern, weshalb diese Erkenntnisse in Tabelle 3.6 nicht unter

²Gemäß Brunst, W. und Fahrenbach, W. [29] $\hat{=}$ Schweißzykluszeit in ISO 17677 [76].

Taktzeit aufgenommen werden können.

3.3.7. Auswahl von Prozessgrößen und Prozessparametern

Im überwiegenden Anteil der aufgeführten Arbeiten resümieren die Autoren, dass selbst unter Laborbedingungen große Streuungen der Elektrodenstandmengen bei konstanten Prozessgrößen und -parametern unvermeidbar sind. So schreibt Sopp [270], dass es sogar mit sorgfältigstem Vorgehen nicht möglich war, einen Variationskoeffizienten kleiner als 20 % zu erhalten und im Serienbetrieb wohl eher höhere Streuungen einzukalkulieren sind. Ergänzend stellte Ganowski [124] in Untersuchungen fest, dass Standmengenergebnisse für eine kongruente Fügeaufgabe und bei identischer Arbeitsweise an sechs unterschiedlichen Widerstandspunktschweiß-Anlagen zu jeweils anderen Ergebnissen führten (600..1900 Punkte).

Um grundlegende Kenntnisse zu erarbeiten und daraus allgemeingültige Aussagen ableiten zu können, bedarf es folglich einer Dokumentation aller bereits ausgeführten Einflüsse aus Prozessgrößen (System- und Fertigungsbedingungen) und Prozessparametern (Maschineneinstellungen und zu fügende Werkstoffe). Allerdings können diese trotz großer Zahl nicht den Anspruch der Vollständigkeit einnehmen, weil Einflüsse durch Nebenschluss [114], Elektrodenschragstellung, Spalte zwischen den Blechen und andere [183] [296] (Abbildung A.2) bislang unberücksichtigt blieben. Aufgrund dessen bildet die ISO 8166 die sinnvollste Basis, um allgemeingültige Aussagen erarbeiten zu können. Denn diese Norm benennt zur Dokumentation einen Großteil der bekannten Standmengeneinflüsse. Auf dieser Basis werden daher die folgenden eigenen Arbeiten durchgeführt. Nicht festgelegt sind allerdings die zu nutzenden messtechnischen Umfänge, welche somit nach dem Stand der Technik in den Abschnitten 5.1 und 5.3.3 ausgewählt werden.

3.4. Schlussfolgerungen aus dem Elektrodenkappenverschleiß

Als primäres Ziel beabsichtigen alle Folgerungen aus verschleißenden bzw. verschlissenen Elektroden die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu gewährleisten bzw. zu erhöhen.

Um diesem Ziel näher zu kommen, sind Experimente obligatorisch, die zumeist sehr umfangreich [52] sind. Die bislang anzutreffenden Ansätze lassen sich durch zwei Gliederungsebenen systematisch ordnen. Abbildung 3.5 gibt die Kategorie, also die erste Gliederungsebene im Bezug zur Punktschweißaufgabe, wieder. Diese wird in Tabelle 3.7 mit der zweiten Gliederungsebene ergänzt und durch grundlegenden Attribute der Ansätze vervollständigt.

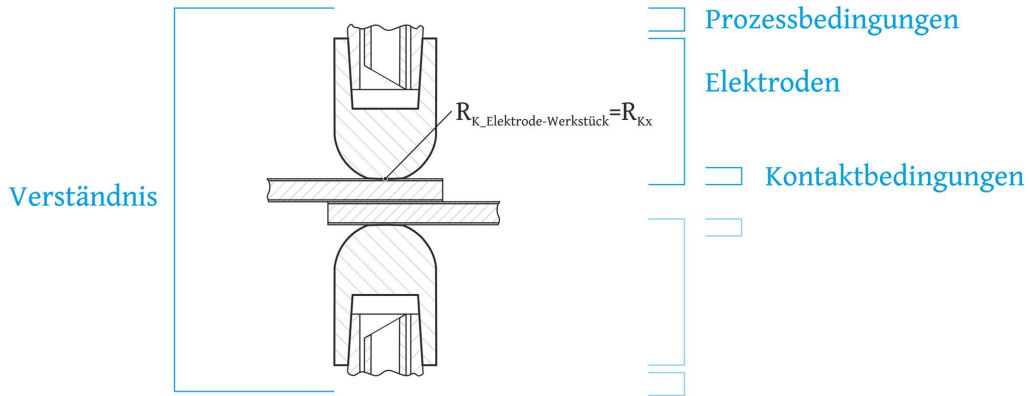


Abbildung 3.5.: Ansätze zum Umgang mit Elektrodenkappenverschleiß in Kategorien systematisiert

Tabelle 3.7.: Systematisierter Überblick zum Umgang mit Elektrodenkappenverschleiß

| Kategorie | Bereich | Veränderndes Merkmal | Konzept |
|--------------------|-------------------------|----------------------------------|---|
| Prozessbedingungen | Prozessgrößen | Kühlbedingung | Verbessern [268] [114] [247] |
| | Prozessparameter | Parameterauswahl | Parameter mit langsamer Verschleißwirkung [270] [113] |
| | | Parameterregelung | Adaptive Regelsysteme [23] [22] [25] [212] |
| Elektroden | Werkstoff | Verschleißverhalten | Monolitische Alternativen [228] [40] [39], Verbundelektroden [186] [36] [35] [21] [216] |
| | Geometrie | $R_{Kx} = \text{beständig}$ | Kontaktflächenradius [186], Kontaktflächenform [202] |
| | Beschichtung | Diffusionsneigung | Schutzschicht (aufgebracht) [214] [34] |
| Kontaktbedingungen | Verschleißschutz | $R_{Kx} = \text{reproduzierbar}$ | Schutzschicht (Band) [129] [224] [194] |
| | Verbessern von R_{Kx} | $R_{Kx} = \text{klein}$ | Reibung [251] |
| | Regeneration | $R_{Kx} = \text{neu}$ | Kontaktflächenüberarbeitung [274] [105] [19] |
| Verstehen | Eingrenzen | | Standardisieren [88] [87] [89] |
| | Nachvollziehen | | Datenauswertung [259] [245] [50] [37] [283] Simulation [86] [7] [34] |

3.4.1. Prozessbedingungen

Zu Prozessbedingungen lassen sich alle Voraussetzungen und Variationen „vor“ der Komponente Elektrode zählen, wobei die hier geführte Betrachtung auch den Elektroden-Innenkonus-Grund hinzunimmt, um den Kühlkreislauf als geschlossenes System nicht auf-trennen zu müssen. Unterschieden wird in Einflussnahme durch Prozessgrößen und in solche durch Prozessparameter.

Von den Prozessgrößen nehmen unter anderem die Stromquelle durch Stromart und Welligkeit, die Kraftquelle durch Bauart [88], die Konstruktion des Zangenfensters durch Steifigkeit und der Kühlkreislauf durch Kühlmedium und Konvektionsbedingungen Einfluss

auf die thermische und mechanische Beanspruchung der Elektrodenkappe. Gerade letzter Sachverhalt wird von zahlreichen Artikeln zum Thema Kühlbedingungen aufgegriffen und fließt in Empfehlungen zum Kühlrohrabstand [269] [114] und zu verbesserten Konvektionsbedingungen im Elektrodenschaft [162] sowie Elektrodengrund [268] [114] [247].

Einflüsse auf den Elektrodenverschleiß durch Änderungen in den Prozessparametern sind im vorangegangenen Abschnitt umfangreich dargestellt und von Sopp [270] beispielhaft in Bezug zueinander gesetzt (Abbildung 3.3). Aus diesen Erkenntnissen heraus lassen sich Parameter benennen, die zu hohen Verbindungsfestigkeiten bei langsamem Elektrodenverschleiß führen [113]. Gerade im Großserieneinsatz erlauben weitreichende Voruntersuchungen somit eine einfache und sichere Verschleißminderung für konkrete Widerstandspunktschweißaufgaben.

Aber nicht immer sind weitreichende Voruntersuchungen für Produktionsprozesse möglich. Da die Datenverarbeitung an Möglichkeiten stetig zugewinnt, nehmen für kleinere Serien oder Einzelfertigung mit eher standardisierten Werkstoffen sogenannte Prozess-Parameterregelungen zu. Derartige Systeme mit statisch bzw. dynamisch stufenweise sich erhöhenden (nachregelnden) Prozessparametern (vorrangig Strom) oder weitergehend auch mit adaptiv auf eine beliebige Fertigungsaufgabe anpassenden Prozessparametern bietet bereits die Mehrzahl der Schweißsteuerungshersteller an [23] [22] [25] [212]. Auf welchen Konzepten die Regelungen basieren, ist im Detail nicht bekannt. Aber verschiedene Veröffentlichungen lassen Richtungen diesbezüglich erkennen. Trotz anfänglicher Schwierigkeiten [89] zeigt sich 27 Jahre später [192], dass es mit verschiedensten Datenwerkzeugen nachweislich möglich ist, für beliebige Fertigungsaufgaben beim Widerstandspunktschweißen (tasks) eine geeignete bzw. optimale Prozessparameterauswahl (method) autonom zu finden (T2M). In die Betrachtung sind neun Datenwerkzeuge eingeflossen [192]. Der dazwischenliegende Zeitraum enthält Konzepte zur Anpassung von Prozessparameterverläufen an solche bekannterweise guter Qualität, beginnend mit Stromregelung [231] bis hin zu mehrdimensionaler Parameteranpassung [90] [283] [168]. Mit steigender Zahl der betrachteten Prozessparameter nimmt auch die Komplexität der Bedarfsanalyse nach Anpassung zu. Dabei werden besonders häufig die Fuzzy-Logik [168] und Neuronale Netze [283] eingesetzt.

3.4.2. Elektroden

Im Fokus der Elektrodenkappen wird versucht, den Elektrodenverschleiß durch beanspruchbarere Grundwerkstoffe, durch die Kontaktflächengeometrie (Radius) oder durch eine aufgebrachte Verschleißschutzschicht zu verringern (siehe auch Abschnitt 3.3).

Als alternative Grundwerkstoffe wurden in den letzten vier Jahrzehnten insbesondere dispersionsgehärtete Kupferlegierungen stetig fortentwickelt. Immer wieder werden sie unter realitätsnahen Bedingungen getestet [228] [19]. Trotz bis zu dreifacher Standmenge auf ver-

zinkten Blechen gegenüber typischen schmelzmetallurgisch hergestellten Legierungen [228] [19] werden sie aber vor allem aufgrund der höheren Anschaffungskosten nur zögerlich in Fertigungen eingesetzt. Zu den größten Anbietern Al_2O_3 -gehärteter Elektroden gehören Luvata Inc. [40] und CMW Inc. [39].

Als Verbundwerkstoffe werden überwiegend Elektroden aus einem elektrisch und thermisch hochleitfähigen Kupferwerkstoff, ergänzt durch einen rotationssymmetrisch eingebrachten verschleißfesten Einsatz, beschrieben. So wird in [186] ein breiter Wolfram-Einsatz in eine CuCr-Elektrode eingebracht. Bei 9,3 mm Durchmesser für den Einsatz konnten um bis zu 23fach größere Standmengen gegenüber CuCr-Elektroden erreicht werden und bei einem Einsatz von 7 mm und E-Cu als Elektrodengrundwerkstoff war eine Steigerung auf das 37fache möglich. Chang [36] beschreibt, dass die Temperaturwechselbeanspruchung derart große Wolframeinsätze schädigen kann und widmete sich daher dem Potential kleiner Wolfram-Einsätze (1 .. 4 mm Durchmesser). Hervorzuheben ist daraus der Einsatz mit 1,0 mm Durchmesser, welcher mit einer 2,5fachen Standmenge gegenüber monolithischem Elektrodenwerkstoff am besten abschneidet [91]. Die Ergebnisse mündeten in einer Patentschrift [35]. Köhler patentierte eine ähnliche Elektrode, deren Unterschied vorrangig in dem geometrisch bestimmten und herausstehenden Einsatz bzw. Aufsatz besteht. Alternativ dazu patentierte Bersch ein Blättchen mit 3 mm Dicke, welches unlösbar in die Kontaktfläche einzubringen ist und aus Mo oder W in reiner Form oder aber mit Zusätzen besteht [15]. Abweichend zu diesen gesinterten Werkstoffen sind in [21] und [216] Elektroden mit dispersionsgehärteten Kernmaterialien geschützt. Ersteres zählt auch höherfeste schmelzmetallurgische Kupferlegierungen auf und zweiteres nennt allgemein Kupferverbunde als geeignete Kernmaterialien.

Durch die Kontaktflächengeometrie werden langsame Verschleißvorgänge mit gering streuenden Schweißergebnissen angestrebt [186]. Ballige CuCrZr Elektroden zeigen gegenüber planen Ausführungen z. B. geringere Streubreiten, erlauben aber nur noch 40 % der Standmenge [202]. Hierdurch kommt die Vermutung auf, dass mit steigender Balligkeit die erreichbare Standmenge sinkt. Allerdings zeigt sich in [186] eine mehr als verfünffachte Standmenge bei auf ein Drittel reduzierter Balligkeit. Zu berücksichtigen sind die verwendeten Wolfram-Einsätze.

Einen Ansatz, typische Elektrodenwerkstoffe durch aufzubringende Schutzschichten auf der Kontaktfläche verschleißfester zu gestalten, verfolgen unter anderem [214] und [34]. Mit einer pyrolytischen Beschichtung (Labor) aus Chromcarbid, aufgebracht auf Elektroden, die auf dem russischen Markt gängig sind, gelangen mehr als 10 000 Punktschweißverbindungen an verzinkten Stählen, ohne eine Qualitätsuntergrenze zu erreichen [214]. Mit TiC beschichteten CuCrZr-Elektroden wird in den USA und in Kanada ein ähnliches Ziel verfolgt. Es sollen Punktschweißverbindungen gleichbleibend hoher Qualität an herausfordernden Werkstoffen möglich sein. An verzinkten Stählen gelingt eine Standmengensteigerung von 40 %.

3.4.3. Kontaktbedingungen

Alle Ansätze, durch Kontaktbedingungen auf den Elektrodenverschleiß einzuwirken, konzentrieren sich auf die Beeinflussung des Übergangswiderstandes zwischen Elektrode und Blech. In einem ersten Ansatz wird angestrebt, den Kontaktzustand für jede Punktschweißverbindung gleich zu halten. Geeignet ist dafür eine Verschleißschuttschicht, die nach jedem Schweißpunkt zwischen Elektrode und Blech weiterbewegt wird, um ursprüngliche Kontaktbedingungen zu gewährleisten. Ein derartiges elektrisch und thermisch gut leitfähiges sowie anlegierungsfreies bzw. -armes Folien-Band erwähnt erstmalig Gschossmann 1995 in seiner Patentschrift [129]. Eine Weiterentwicklung des Folienband-Transports durch ein auf Elektrodenschäfte aufsteckbares Modul wird 1999 als Patentschrift ergänzt [224]. Eine grundlegend ähnliche Bandführung über Elektroden wurde im Jahr 2008 von der Firma Fronius unter Verweis auf länglich ausgebildete und exzentrisch angeordnete Elektroden patentiert [120]. Das dazugehörige Band mit einer elektrisch leitfähigen Beschichtung (Cu) auf Blechseite und einer anlegierungsarmen Beschichtung (Ni, Ni-Legierung) auf Elektrodenseite wurden ebenfalls geschützt [194]. Neben Fronius aus Österreich sind auch Prozessbänder ausgehend von Erfindern in den USA, in Japan und in China patentiert. Aber nur von der Firma Fronius ist eine Umsetzung bekannt, welche unter der Bezeichnung Delta-Spot insbesondere für das Aluminiumschweißen beworben wird und dort bis zu 30 000 Punktschweißverbindungen ermöglicht [28] [238].

Ein anderer Ansatz strebt an, den Kontaktwiderstand zwischen Elektrode und Blech so gering als möglich zu halten. Dieses vielfach sehr unterschiedlich ausgestaltete und patentierte Vorgehen setzt die Firma KUKA Systems sowohl einfach, wie auch praktikabel um, indem sie eine Punktschweißzange im geschlossenen Zustand in der Blechebene um einen bestimmten Winkel dreht [251]. Die Berührungsfläche von Blech und Elektrode vergrößert sich durch die mechanische Einebnung, was zu geringen Übergangswiderständen führt. Die Standmenge steigt an. Auch, wenn kein genauer Wert angegeben wird, so zeigen die Ergebnisse Elektroden mit doppelter Anzahl geschweißter Punkte [251].

Der am weitesten verbreitete Ansatz im Umgang mit Elektrodenverschleiß ist das Überarbeiten der Elektrodenkontaktfläche nach empirisch festgelegten Zeitpunkten [176] [274] [105]. Er zeichnet sich durch seine unkomplizierte, effektive und besonders wirtschaftliche Umsetzung aus. Ein mittlerer Fräszyklus in der Pkw-Serienfertigung liegt exemplarisch bei 120 Punktschweißverbindungen [288]. Eine bedarfsgerechte Fräszyklensteuerung schlagen De Boni [19] und Quanz [245] anhand ausgewählter Prozessparameter vor. Umsetzungen diesbezüglich gibt es bislang nicht.

3.4.4. Verständnis des Elektrodenverschleißes

Mit den vielfältigen Ansätzen, den Elektrodenverschleiß zu verstehen und zu beschreiben, wird auf zwei Wegen umgegangen. Der pragmatische der beiden ist eine Vereinheitlichung

von Widerstandspunktschweißanlagen, wie Dorn [88] [87] [89] es mehrfach formulierte. Allerdings ist diese Lösung vorrangig auf große Serienprozesse eines Unternehmens oder Unternehmensverbundes beschränkt. Da die Vielfalt der Widerstandspunktschweißsysteme tatsächlich jedoch unüberschaubar groß ist, erscheint der zweite Weg, nämlich den Elektrodenverschleiß nachzuvollziehen, insbesondere aus wissenschaftlicher Sicht interessant. Grundlage dafür sind reproduzierbare und minimal fremdbeeinflusste Messsignale [115]. In der ersten von zwei Weggabelungen werden entweder Messsignale von Prozessgrößen und -parameteren (vorrangig elektrisch und mechanisch) [259] [245] [44] [291] [50] [195] [37] [283] oder Messsignale aus prozessbegleitenden zerstörungsfreien Prüfungen [225] [261] [189] [277] (siehe auch Abschnitt 4.3) auf den Verschleißzustand der Elektroden bezogen. Mit fast allen Auswertungen sehr unterschiedlicher Art (Statistische Analysen, Neuronale Netze, Fuzzy Klassifikation) gelingt es, den Verschleiß für bekannte Prozesse gut bis sehr gut einzuordnen bzw. vorherzusagen. Dabei fehlen allerdings fast immer quantifizierte Angaben und häufig auch Ergebnisse außerhalb des Labormaßstabs. Für unbekannte Prozesse, also z. B. Änderungen an Beschichtung, Blechdicke oder Anlagentechnik, bricht die Verschleißbewertung dramatisch ein. Ähnliche Ergebnissen sind in der zweiten Weggabelung, der Prozesssimulation, zu verzeichnen. Die bisherigen Modelle scheitern an den großen Ergebnisstrebereiten der realen Elektrodenzustände und der großen Zahl an schwer erfassbaren Einflüssen, um die Eingangsinformation der Elektrodenkontaktflächen-Beschaffenheit für den jeweils nächsten Schweißpunkt zu konstruieren [86] [7] [34].

4. Experimente zum Bewerten der Verbindungsqualität bei Standmengenversuchen

In Abschnitt 2.2 wurden unterschiedliche Motivationen aufgeführt, aus der großen Anzahl möglicher Kenngrößen einer Punktschweißverbindung eine einzelne charakteristische auszuwählen. Ausgehend vom dort zusammengestellten Stand der Technik und Wissenschaft lautet die Zielstellung dieses Kapitels, die am besten geeignete charakteristische Kenngröße für Standmengenexperimente zu ermitteln. Im Vordergrund stehen dabei experimentelle und datenanalytische Randbedingungen. Die experimentellen Randbedingungen teilen sich auf die ISO 8166 (Abschnitt 4.1) sowie auf experimentelle Analysen von Verfahrensbesonderheiten mit Diskussion der physikalischen Möglichkeiten und Grenzen (Abschnitte 4.2 und 4.3) auf. Manche Verfahren oder Verfahrensansätze zeigen bereits durch wissenschaftliche Diskussionen klare Begrenzungen. Die datenanalytischen Randbedingungen gehen indes in den letzten beiden Abschnitten unter der Zielstellung auf, eine möglichst genaue Beurteilung zur Verbindungsqualität und damit belastbare Aussagen für die spätere Datenanalyse (Kapitel 10) zu ermöglichen.

4.1. Randbedingungen bei Standmengenversuchen

Mit der ISO 8166 [83] werden erstmals Standmengenexperimente standardisiert und sind nach deren Vorschrift zu gestalten. Seit dem Jahr 2000 schafft diese Norm international die Voraussetzung für allgemeingültige und übertragbare Aussagen. Aufgrund dessen werden die Standmengenbestimmungen dieser Arbeit daran ausgerichtet. Alle unverzichtbaren Informationen der Norm greift Tabelle 4.1 auf. Die Vorgaben zu Probeblechen führen zu den zwei Typen aus Abbildung 4.1, von denen mindestens fünf Punktschweißverbindungen aus dem Streifen der Prüfschweißungen zerstörend zu prüfen sind. Empfohlen werden Schälversuche (Abroll- & Meißelprüfung) oder Messungen am Querschliff.

Tabelle 4.1.: Überblick zum Dokumentationsumfang nach ISO 8166 [83]

| Kategorie | Angaben für den Versuch / die Versuche |
|--------------------------|--|
| Schweiß-einrichtung | Hersteller, Art der Steuerung, mechanische Maschineneigenschaften (Aufsetz-, Nachsetzverhalten), elektrische Maschineneigenschaften |
| Elektroden | Werkstoff inklusive Herstellmethode, Geometrie inklusive Arbeitsflächendurchmesser, Elektrodenkontaktflächen nach Einbau parallel zueinander, Einfahrzustand (Vorkonditionierung nach ISO 8166 Seite 7 [83]) |
| Elektroden-kühlung | Kühlwasserdurchfluss, Eintrittstemperatur (max. 20°C) und Austrittstemperatur (max. 30°C) |
| Zu verschweißende Bleche | Grundwerkstoffe, Beschichtungen, Dicken |
| Abmessungen | Prüfstücke: Punktabstände (mind. 30 mm) und Randabstände (mind. 10 mm) sowie wechselnde Prüfstücke mit 192 und 8 Punkt-schweißverbindungen (Prüf-schweißungen) |
| Schweißbedingungen | Schweißbereichsermittlung nach ISO 14327 [68], Prozessparameter für $5,0 - 5,5\sqrt{t}$ oder aber für 10 % oder 200 A unterhalb der Spritzergrenze oder aber 10 % oberhalb der Spritzergrenze, Angaben gemäß Abbildung A.1 sowie Taktzeit, konstante Prozessparameter innerhalb der Standmengenexperimente |
| Standmengenbedingungen | $d_w \leq 3,5\sqrt{t}$ bei drei von fünf aufeinander folgenden Schweißungen innerhalb des kleinen Prüfstückes (Schälversuch o. Schliffbild) |

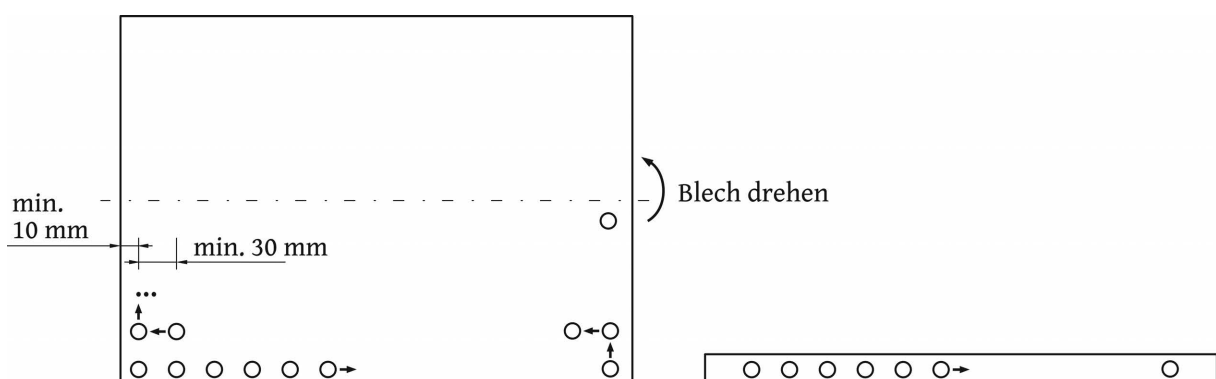


Abbildung 4.1.: Prüfstücke für Standmengenversuche nach ISO 8166 [83], links Verschleißblech mit 192 Verbindungen, rechts Prüfstück mit 8 Verbindungen

4.2. Einsatz von Kenngrößen aus zerstörenden Prüfungen

Prüfungen

Wie aus Tabelle 4.1 hervorgeht, sind nur kleine Einzelpunktproben (ca. $30 \times 30 \text{ mm}^2$) bzw. Streifen in Form von Mehrpunktproben für eine Prüfung verfügbar. Dies führt zu einem Ausschluss der vier typischen instrumentierten, zerstörenden Prüfverfahren aus Tabelle 2.2. Denn all diese verlangen spezielle Probengrößen, die sich mit den Randbedingungen der standardisierten Standmengenversuche nicht unmittelbar vereinbaren lassen. Somit verbleiben für die weitere Betrachtung die Torsionsprüfung, die Abroll- & Meißelprüfung – jeweils mit Messungen am Bruch – sowie die Messungen am Querschliff. Diese drei sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Die Torsionsprüfung und auch die Abroll- und Meißelprüfung sind üblicherweise Werkstattversuche. Um der Forderung nach einer hohen Reproduzierbarkeit nachzukommen, sei empfohlen diese zu instrumentieren. Der Anspruch der Zuverlässigkeit bedeutet ergänzend dazu, sowohl sehr dünne und weiche Stahlbleche (typischerweise $t = 0,5 \text{ mm}$) wie auch höchstfeste, dicke Stahlbleche prüfen zu können. Wie die eigenen Experimente zeigen, kann die Abrollprüfung diesem Anspruch nicht gerecht werden, weil die Flächen zum Spannen zu gering sind. Darüber hinaus ziehen weiche Stähle, wenn sie abgerollt werden, sogenannte „Fähnchen“, wodurch sich der Punktdurchmesser meist nur durch erhöhten Aufwand („Fähnchen“ wegbiegen) oder auch gar nicht mehr bestimmen lässt. Somit verbleiben noch die Torsions- und die Meißelprüfung. Um der letzten Forderung, der Kennwert-Belastbarkeit, nachzugehen, werden weitere Experimente durchgeführt. Für die

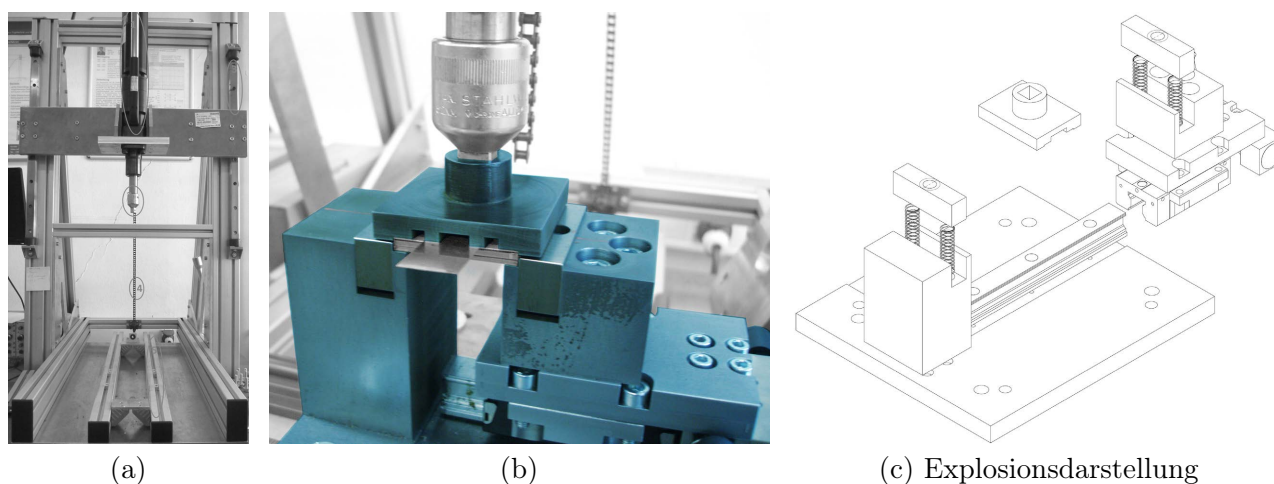


Abbildung 4.2.: Drehmomentenwerkzeug (a), entwickelte Vorrichtung (b) & (c)

Torsionsprüfung wurde ein Prüfstand basierend auf einem höhenverstellbaren servomotorischen Drehmomentgeber der Firma Atlas Copco aufgebaut und um eine speziell dafür entwickelte Vorrichtung ergänzt (Abbildung 4.2). Das Drehmomentwerkzeug vom Typ BSM

43180D wird mit der Software ToolsTalk Power MACS Version 10 gesteuert. Es lassen sich Drehwinkel und Drehmoment aufzeichnen.

Die Meißelprüfung wurde für eine Instrumentierung vorbereitet, indem der Meißel von einem Gabelmeißel auf einen doppelt symmetrischen Meißel abgeändert wurde, welcher in eine Handpresse in Form eines Balancier einspannbar ist. Bei Verwendung des genormten Gabelmeißels verformten sich in den ersten Untersuchungen die auszuknöpfenden Blechstreifen viel zu stark, weshalb der doppelsymmetrische Meißel den Gabelmeißel ersetzt. Das Handpressen-Balancier eröffnet die Möglichkeit, den Versuch mit einem Drehmomentgeber zu instrumentieren.

Für den Vergleich zwischen Meißel- und Torsionsprüfung wurden fünf Blechkombinationen aus der Automobilindustrie herausgegriffen, die entweder ein Extremum darstellen oder aber in der Blechdickenkombination nur schwer den geforderten Qualitätsansprüchen genügen. Aus dieser Auswahl wurden folgend drei Werkstoffpaarungen entnommen und in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Jeder der geführten Versuche wurde vier Mal wiederholt, wobei jeder Kennwert nach ISO 14329 [69] Bild 2 und Bild 3 ermittelt wurde.

Tabelle 4.2.: Symmetrische Werkstoffpaarungen für den Vergleich zwischen Torsions- und Meißelprüfung

| Typ | Werkstoff oben | Werkstoff unten | Blechdicke | Kennung | t_w | F_{El} |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|---------|-----------|----------|
| | | | | | <i>ms</i> | <i>N</i> |
| dünn | DC04+ZE75/75 | DC04+ZE75/75 | jeweils $t = 0,65 \text{ mm}$ | TT-1 | 150 | 3000 |
| mittel | HCT690T+Z100 | HCT690T+Z100 | jeweils $t = 1,5 \text{ mm}$ | TT-2 | 150 | 3500 |
| dick | HX340LAD+Z100 | 22MnB5+AS150 | jeweils $t = 2,0 \text{ mm}$ | TT-3 | 250 | 3500 |

Tabelle 4.3 zeigt die Ergebnisse von Meißel- und Torsionsprüfung. Dargestellt ist der sich ergebende Mittelwert, ergänzt durch den Variationskoeffizienten. Bei der Meißelprüfung fällt auf, dass bei kleinen Punktdurchmessern die einfache Standardabweichung bei maximal 9,4% liegt. Bei mitteldicken Blechen sinkt sie auf 3,5% und bei dickeren Blechen steigt sie wieder. Dicke Bleche und große Punktdurchmesser sind in der Meißelprüfung diffizil und bedürfen ingenieurtechnischer Erfahrung. Bei der Torsionsprüfung sinkt die Standardabweichung mit steigender Blechdicke und liegt für $t = 0,65 \text{ mm}$ bei maximal 4,5%. Im Verhältnis der Punktdurchmesser sind die Messwerte der Meißelprüfung bei dünnen Blechen größer als die der Torsionsprüfung. Zu dicken Blechen und hohen Strömen hin wechselt das Verhältnis. Zwischen den Meißelproben und den Torsionsproben liegen 75 weitere Punktschweißverbindungen, wodurch gerade bei der Serie TT-1 mit den bis dahin uneingefahrenen Elektroden erwartungsgemäß die größeren Punktdurchmesser entstehen.

Vergleiche zwischen Scherzugprüfung und Torsionsprüfung zeigt Tabelle B.1 im Anhang. Auffällig sind geringe Variationskoeffizienten und ein für jede Blechdickenkombination individuelles mit dem Punktdurchmesser steigendes Verhältnis zwischen maximalem Dreh-

moment bei der Torsionsprüfung und maximaler Zugkraft bei der Scherzugprüfung. In den hier geführten Voruntersuchungen gelang zwar keine Modellbildung zwischen den Messgrößen der beiden instrumentierten Verfahren, aber dieser Ansatz könnte weiter verfolgt werden.

Tabelle 4.3.: Vergleich der Durchschnittsdurchmesser bei Torsions- und Meißelprüfung

| Kennung | Strom in kA | Meißelprüfung | | Torsionsprüfung | | Verhältnis $d_{w_{chisel}}/d_{w_{torsion}}$ |
|---------|------------------|-----------------------------|--|------------------------------|--|--|
| | | $d_{w_{chisel}}$ in mm | | $d_{w_{torsion}}$ in mm | | |
| TT-1 | 7,3 | $4,9 \pm 4,5\%$ | | $3,3 \pm 3,9\%$ | | 1,51 |
| | 7,8 | $5,0 \pm 9,4\%$ | | $4,5 \pm 2,0\%$ | | 1,10 |
| | 8,3 | $5,6 \pm 2,1\%$ | | $5,6 \pm 4,5\%$ | | 1,00 |
| TT-2 | 7,2 | $5,3 \pm 3,5\%$ | | $6,6 \pm 4,2\%$ | | 0,81 |
| | 8,7 | $6,6 \pm 0,8\%$ | | $7,7 \pm 1,0\%$ | | 0,85 |
| | 11,2 | $6,9 \pm 2,9\%$ | | $8,1 \pm 3,3\%$ | | 0,85 |
| TT-3 | 7,6 | $6,0 \pm 5,5\%$ | | $7,0 \pm 1,8\%$ | | 0,86 |
| | 9,0 | 6,7 ^a | | $8,0 \pm 3,4\%$ | | 0,84 |
| | 10,4 | – ^a | | $8,7 \pm 3,2\%$ | | – |

^a Orientierend an DVS 2902-3 [94] und DVS 2916-1 [99] keine Bewertung möglich; Diskussion zur Neufassung von 2014 mit eindeutiger Beurteilbarkeit folgt in Abschnitt 6.1.

Aus der mechanischen Beanspruchung bis zum Bruch sollte vermutet werden, dass Torsions- und Meißelprüfung zu den gleichen Durchmessern führen. Ein Grund, warum das nicht der Fall ist, zeigen Abbildungen 4.3a und 4.3b. In allen vier Einzelbildern ist der Maßstab identisch, wodurch unverkennbar ein markanter Größenunterschied zwischen den ehemals verbundenen Flächen deutlich wird. Aus der Richtlinie DVS 2916-1 (dritte Seite) geht hervor, dass bei Torsionsbeanspruchungen die Bruchflächen verschmieren können und der Bereich der Haftscheißung (d_c) nicht mehr vom tatsächlich aufgeschmolzenen Bereich (d_w) zu unterscheiden ist. Genau dieser Effekt tritt hier zum Vorschein und zeigt, dass die Torsionsprüfung keine belastbaren Aussagen zur Verbindungsqualität leistet.

Eine weitere Einschränkung für die Torsionsprüfung ergibt sich bei dünnen Blechen. Wie Abbildung 4.3c unten zeigt, ist es schwierig, die Flanken dünner und weicher Stahlbleche mit der Blechaufnahme hinreichend sicher zu treffen bzw. zu halten, ohne das nächste Blech zu berühren. Bei der Meißelprüfung sind vorrangig höchstfeste und dicke (ab ca. $t = 3,0\text{ mm}$) Stahlbleche mit großen Punktdurchmessern schwierig auszumessen. Abbildung 4.3c zeigt in der oberen Darstellung die Verformungen an einer weichen Stahlgüte mit $t = 2,0\text{ mm}$. Von großem Vorteil für die Bewertung des Punktdurchmessers ist es, wenn die Fügezone so freigelegt werden kann, dass sie rund herum zu vermessen ist. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Meißelprüfung die einzig geeignete Prüfung ist.

Eine besondere Bedeutung bei Standmengenschweißungen hat die Messung am Querschleif. Sie wird grundlegend dort angewendet, wo metallurgische Kennwerte wie Elektro-

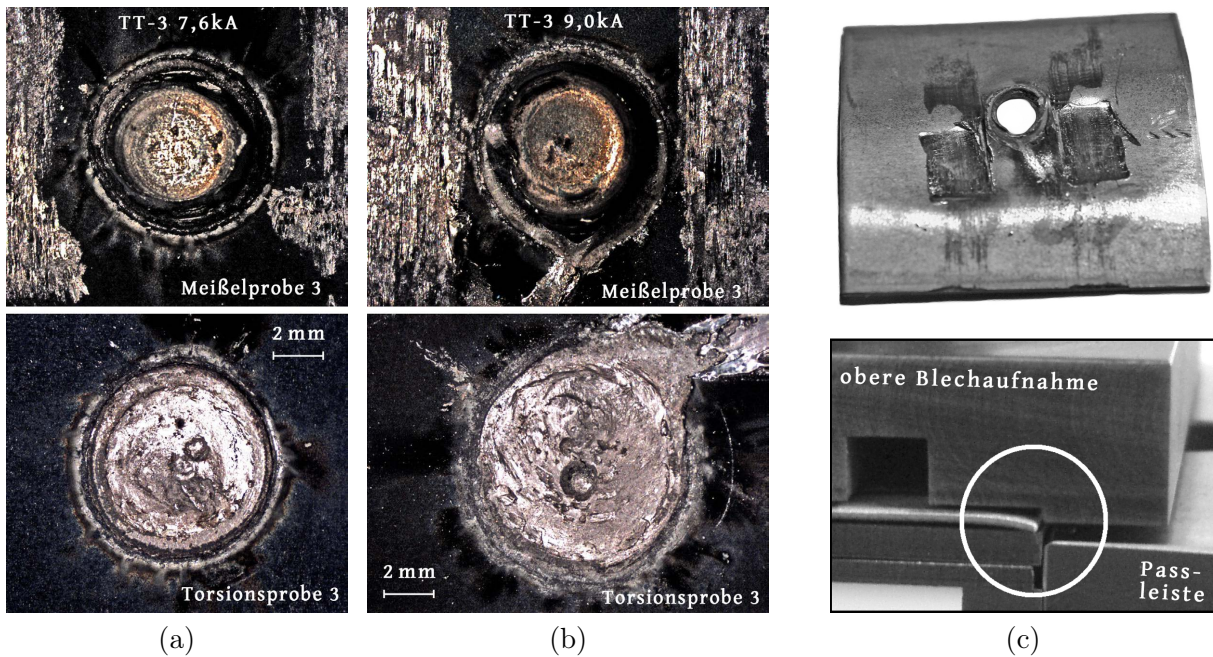


Abbildung 4.3.: Ausgewählte Bruchbilder nach Meißel- (immer oben) und nach Torsionsprüfung (immer unten) in (a) & (b) sowie Grenzen bei Meißel- und Torsionsprüfung (c)

deneindrucktiefe und Linseneindrucktiefe zu bewerten sind. Aus einer großen Anzahl von Voruntersuchungen zeigte sich, dass es nicht trivial ist, einen Schliff so zu präparieren, dass die Mitte der Punktschweißverbindung getroffen wird. Denn es ist ein bedeutsamer Aufwand für eine durchschnittliche Standmengenkurve (1500 Punktschweißverbindungen), jede Verbindung mittels Querschliff zu prüfen. Gemäß ISO 8166 [83] ist nach Möglichkeit jede Standmengenkurve drei Mal zu ermitteln. Der folglich außerordentliche Aufwand führt bei manueller Bearbeitung schnell zu einer stark variierenden Treffsicherheit bei der Schnittebene, wie sie Abbildung 4.4 verdeutlicht.

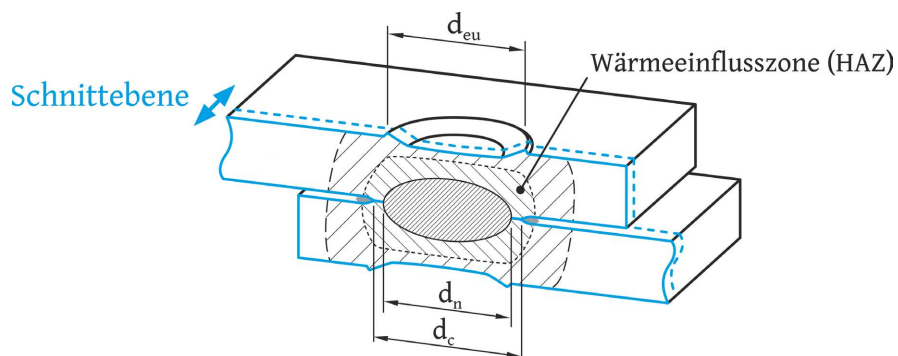


Abbildung 4.4.: Messungen am Querschliff in Abhängigkeit zur Lage der Schnittebene

Letztendlich ist die Messung am Querschliff jedoch für Standmengenuntersuchungen vor allem deswegen ungeeignet, weil die Verbindung nur in den ersten Schweißungen ei-

ne tendenziell kreisrunde Fügefläche aufweist. Mit fortschreitendem Elektrodenverschleiß verändert sich die Fügefläche elliptisch und später oval ohne Symmetrieachsen oder auch andere geometrische Formen. Einen beispielhaften Verlauf, wie sich Fügeflächen- bzw. Butzengeometrie über eine Elektrodenstandmenge hinweg verändern können, veranschaulicht Abbildung 4.5 für eine Versuchsreihe.

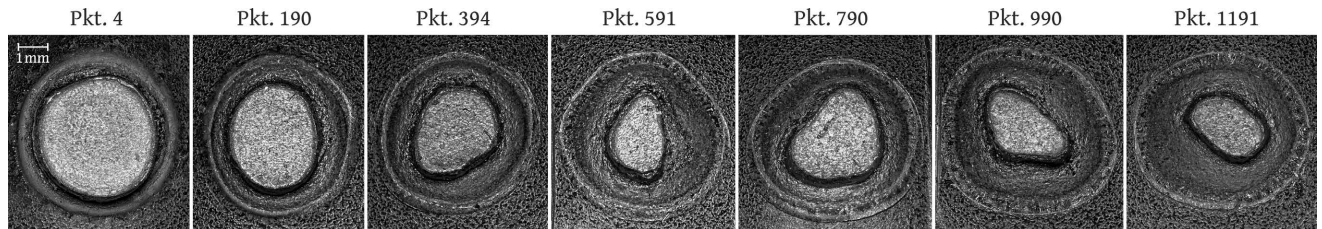


Abbildung 4.5.: Sich verändernder Punktdurchmesser über einer Standmenge von CuCr1Zr-Elektroden an 1,0 mm dickem und verzinktem Stahlblech

Als reproduzierbares, zuverlässiges und belastbares Prüfverfahren ergibt sich aus dem Bereich der zerstörenden Prüfverfahren unter den vorliegenden Randbedingungen für Standmengenversuche nur die Meißelprüfung. Mit dieser lässt sich hinreichend flexibel für die Bandbreite typischer Stahlwerkstoffe der Punktdurchmesser als Kenngröße ermitteln. Er ist ein wesentliches Merkmal einer Punktschweißverbindung, da er schmelzmetallurgische Kennzeichen (d_c , d_p , d_w) direkt messbar macht. Darüber hinaus ist der Aufwand einer Meißelprüfung relativ gering, wodurch nur kleine Messfehler aufgrund monotoner Arbeit zu erwarten sind.

4.3. Einsatz von Kenngrößen aus zerstörungsfreien Prüfungen

Wie Abschnitt 2.4 zeigt, existiert, anders als in der zerstörenden Verbindungsbewertung, in der zerstörungsfreien Verbindungsbewertung bislang kein unmittelbarer Bezug von Verfahrenssignalen und Verbindungsqualität. Nachfolgend wird daher der Ansatz verfolgt, durch mittelbaren Bezug möglichst zuverlässig reale Kennzeichen der Verbindungsqualität zu bestimmen und weiter nach Wegen für die unmittelbare Detektion zu suchen. Teilziel dabei ist es, die Schweißlinse, die Wärmeeinflusszone oder die Haftzone (Abbildung 4.4) zu erfassen. Der Punktdurchmesser als Kennzeichen am Bruch (Abbildung 2.6b) wird sich zerstörungsfrei nicht erfassen lassen, da sich dieser je nach Krafteinwirkung zwischen Schweißlinse und Wärmeeinflusszone ergibt.

Ausgangspunkt der Betrachtungen sei der Charakter zerstörungsfreier Prüfverfahren. Alle basieren darauf, dass die Verbindungsstelle mit eingebrachten Signalen interagiert und diese Signale auswertbar sind. Abbildung 4.6 zeigt links die grundlegend möglichen

Wechselwirkungen von Signalen mit einem Prüfling. Etwas komplexer wird es bei der realen Punktschweißverbindung, die rechts im Bild dargestellt ist. Denn die kontaktierten und während der Erwärmung eingesunkenen Elektroden hinterlassen an den Blechoberflächen einen Eindruck, welcher häufig zusätzlich mikroskopisch zerklüftet ist und in der chemischen Zusammensetzung variiert. Dieser führt immer zur Ablenkung eines von außen eingebrachten Signals, wenn die Oberfläche passiert wird.

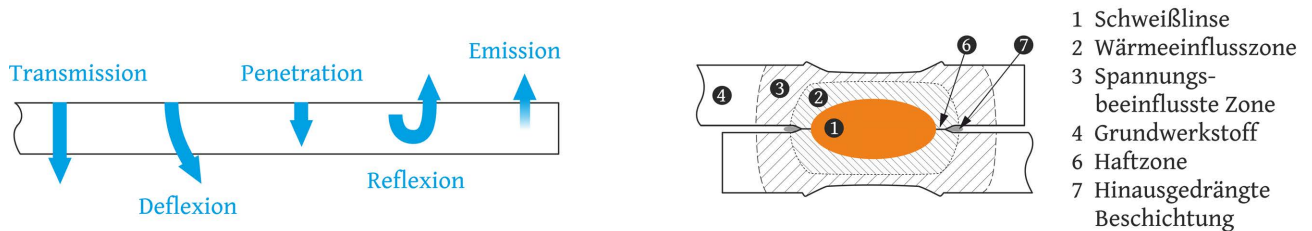


Abbildung 4.6.: Die möglichen Signalwechselwirkungen, die bei zerstörungsfreien Prüfungen auftreten können

Unter Berücksichtigung der Oberflächenbeeinflussung müssen Signale im Bereich der verbundenen Bleche möglichst die zwei folgenden Aufgaben erfüllen können:

- i Um herausgedrängte Blechbeschichtungen detektieren zu können, muss das eingebrachte Signal auf eine veränderte chemische Zusammensetzung reagieren.
- ii Um die Schweißlinse von Wärmeeinflusszone und Haftzone unterscheiden zu können, ist es notwendig, Gefügeunterschiede oder Gefügegrenzen mit den Signalen sichtbar zu machen, da diese Bereiche zumeist die gleiche Kristallstruktur aufweisen und nur geringste chemische Unterschiede besitzen.

Aus diesen Anforderungen für die Signalwechselwirkungen werden nachfolgend sechs Verfahren theoretisch und praktisch auf Anwendbarkeit zur Verbindungsbewertung bei Standmengenversuchen hin untersucht. Es handelt sich dabei um jene Verfahren aus Tabelle 2.4 (Abschnitt 2.4), welche mit dem Volumen der Verbindung und folglich mit der Fügeebene interagieren. Die zugrundeliegenden Entwicklungsschritte sind in [143], [210], [152], [137], [175] aufgeführt.

4.3.1. Magnetfeldprüfung

Die Magnetfeldprüfung basiert darauf, Umpolungen und Streufelder zu detektieren, wie bereits aus Abschnitt 2.4 hervorgeht. Entscheidend, um innere Kennzeichen der Verbindung zu erfassen, ist es, innere Wechselwirkungen mit dem Magnetfeld bis an die Blechoberflächen dringen zu lassen und dort aufzuzeichnen. Werden beispielsweise Feldlinien in Blechebenenrichtung eingebracht und ein Detektor auf dem Blech positioniert, können innere Effekte nur erfasst werden, wenn die Umlenkung der Feldlinien (Streufeld) bis zur

Oberfläche wirkt. Gleiches gilt für Umpolungen. Folglich ist das Magnetfeld senkrecht zur Blechebenenrichtung einzubringen.

Um Möglichkeiten und Grenzen solcher Magnetfelder näher zu untersuchen, konnte innerhalb der Arbeitsgruppe ein Forschungsprojekt im Rahmen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) durchgeführt werden [207] [205] [208]. Es wurden konstante und wechselnde Felder untersucht. Da bei wechselnden die Messinformationen zu gering ausfielen, schwenkte der Fokus der Betrachtung auf konstante Felder. Einen ersten prozessbegleitenden Aufbau lieferten Kulikov und Bolotov [187] (Abschnitt 2.4.2) mit einer einseitigen Magnetisierung (obere Elektrode), angelehnt an Abbildung 4.7 oben. Ein

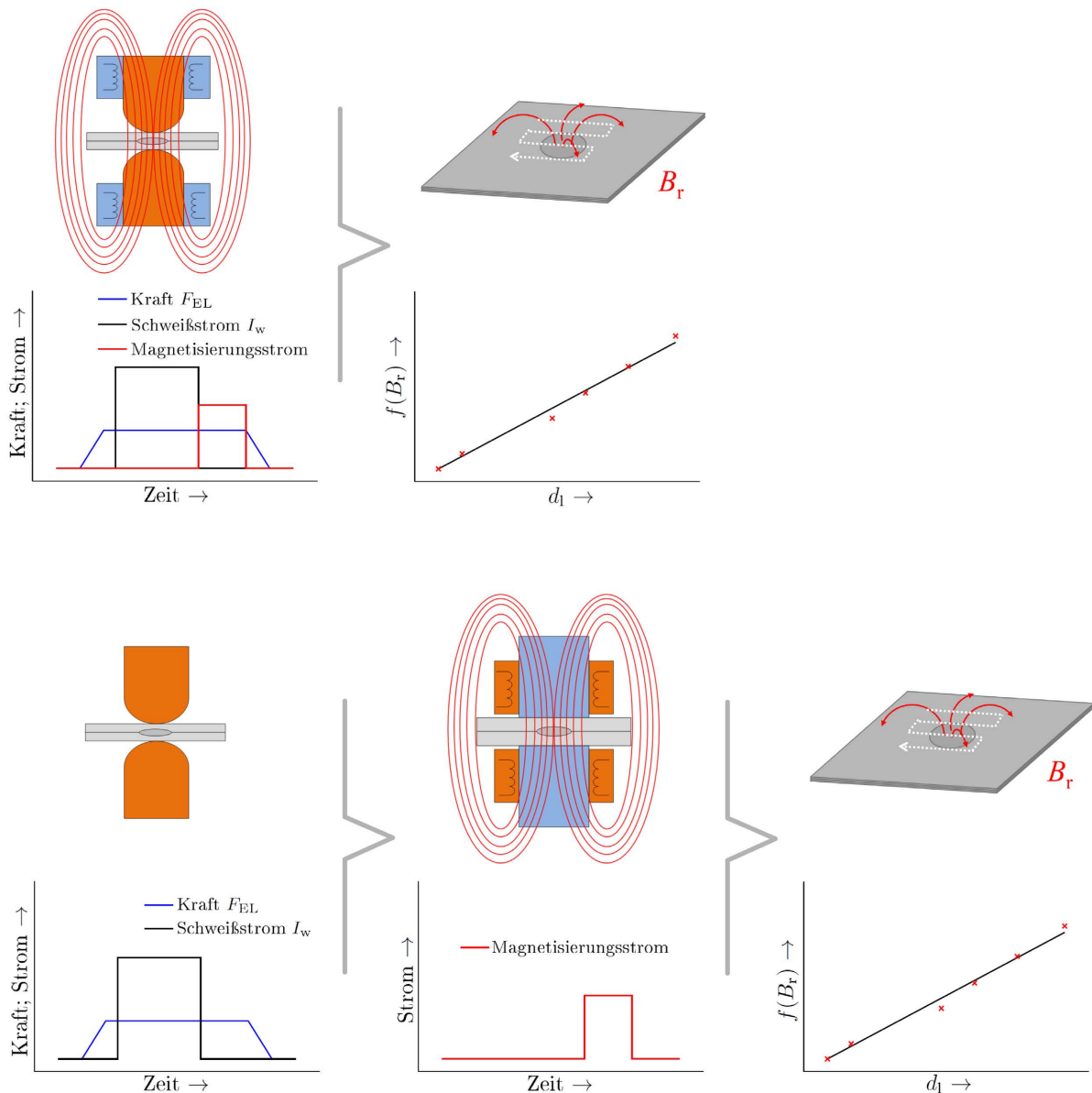


Abbildung 4.7.: Prozessabläufe beim Magnetisieren senkrecht zur Blechebene, während des Schweißens (oben) und nach dem Schweißen (unten) [207]

zweiter Aufbau ist die beidseitige Ausführung im Schweißprozess, wie es Abbildung 4.7

oben zeigt, und ein dritter Aufbau, nun prozessnachgeschaltet, ist die beidseitige Magnetisierung nach dem Schweißen (Abbildung 4.7 unten). Mit einem symmetrischen Verfahren wird die magnetische Sättigung schneller erreicht und die Nachweisführung für grundlegende Betrachtungen vereinfacht, weshalb die letzten beiden Aufbauten im Forschungsprojekt verwirklicht wurden.

Die Ergebnisse zur Magnetisierung während des Schweißens (zweiter Aufbau) zeigen sowohl zwischen der Fläche des aufgeschmolzenen Bereiches A_w und der Fläche der Innenkontur der Magnetfeldmessung A_{mag} als auch zwischen dem Linsendurchmesser d_n und dem Durchmesser der Innenkontur der Magnetfeldmessung d_{mag} mit $R^2 = 0,92$ bis $0,94$ ein ausgeprägtes lineares Verhalten ([207], Seiten 35-43). Allerdings benötigt es sinnvollerweise etwa 400 ms Zeit, das Magnetfeld einzuprägen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass der Nebenschlussstrom einer nachfolgenden Punktschweißverbindung das zuvor eingeprägte Magnetfeld vollständig verändert. Trotz der guten Korrelation wird dieser Aufbau nach bisherigem Entwicklungsstand daher als ungeeignet für die Verbindungsbewertung bei Standmengenversuchen eingestuft.

Abbildung 4.7 unten zeigt den Ablauf für den dritten Aufbau. Diese Möglichkeit der zerstörungsfreien Verbindungsprüfung zeigte bei symmetrischen und unsymmetrischen Blechkombinationen, bereits nach nur einem Jahr Entwicklungszeit ein Ergebnisniveau ähnlich der marktüblichen Ultraschallprüfgeräte [207]. Jede Blechdickenkombination bestand soweit möglich aus 20 einzelnen Proben. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fläche A_w außerordentlich ähnlich zur Fläche A_{mag} ist. Darüber hinaus lassen sich im Remanenzbild eindeutig sogenannte Haftschweißungen erkennen, weil bei diesen das Magnetfeld über die Verbindung hinweg nahezu konstant bleibt. [207]

Die vielversprechenden Ergebnissen der nachträglichen Prüfung mit senkrechtem Magnetfeld wurden durch eine kleine Versuchsreihe ergänzt, um belastbare Aussagen zur Eignung als Verbindungsbewertung für Standmengenversuche formulieren zu können. Diese Versuchsreihe bestand aus zehn Punktschweißverbindungen unterschiedlicher Qualitäten. Jede Verbindung wird unter zwei Spulen gleicher Orientierungsrichtung mit jeweils 133 Windungen und einem Strom von 30 A über eine Zeit von 200 ms magnetisiert. Mit einer Hallsonde lässt sich anschließend eine magnetische Flussdichteverteilung ermitteln, wie sie Abbildung 4.8 links zeigt. Die blaue Farbe repräsentiert ein Intensitätstal mit $-0,1\text{ mT}$ und die rote, symmetrisch dazu, den Intensitätsberg. Für den Durchmesser d wird ähnlich wie beim Punktdurchmesser d_w [61] zwischen größter und kleinster Achse der durch den Nulldurchgang (weiß) entstehenden ovalen Kontur gemittelt. In der Zeile für Punktschweißverbindung 200 sind der zerstörungsfrei gemessene Durchmesser und der zerstörend ermittelte Punktdurchmesser nahezu gleich. Bei Verbindung 800 unterscheiden sich Durchmesser und auch Flächenform deutlich voneinander.

In Abbildung B.1 im Anhang sind ausgewählte Ergebnisse der Standmengenkurven zwei und drei aus Versuchskennung Mod-3 (Kapitel 7) wiedergegeben. Es zeigt sich, dass die

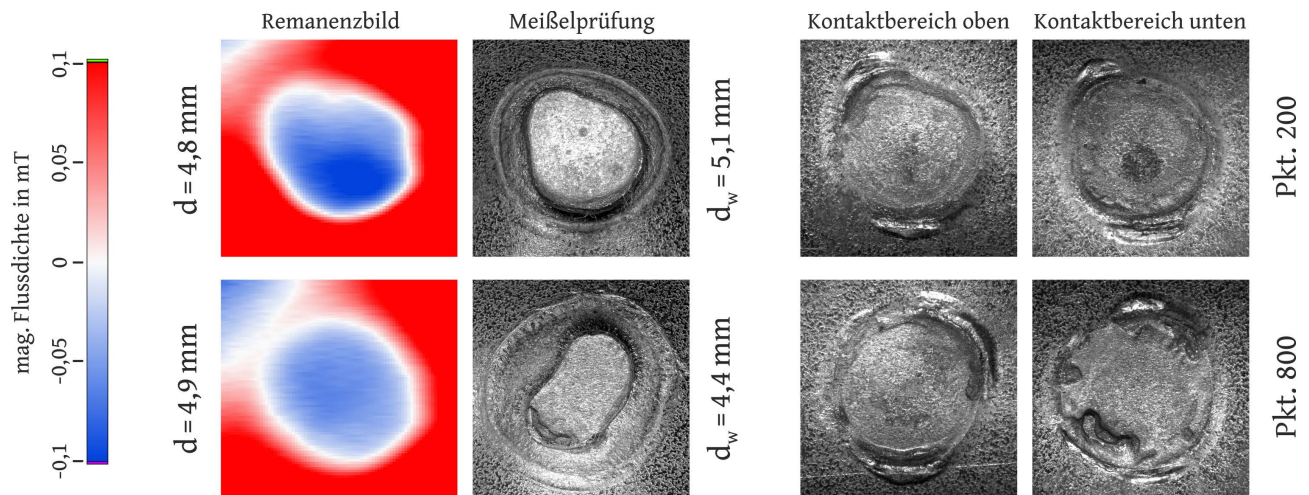


Abbildung 4.8.: Magnetfeld-Visualisierung an zwei ausgewählten Verbindungen der Versuchsreihe Mod-3_stm3 (Kapitel 7), Aufsichtbilder zu je $8,7 \times 8,7 \text{ mm}^2$

magnetischen Prüfungen bislang nicht direkt mit dem Punktdurchmesser, bzw. der sich darunter befindenden Schweißlinse, übereinstimmen. Daher kann dieses magnetische Prüfverfahren bislang nicht für die Verbindungscharakterisierung bei Standmengenversuchen eingesetzt werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Schweißlinse entweder auf umfangreichem empirischen Wege oder aber idealerweise durch numerischen Nachweis aus den magnetischen Flächeninformationen sicher zu bestimmen.

4.3.2. Elektrische Leitfähigkeitsprüfung

Eine Verbindungsbewertung basierend auf dem elektrischen Widerstand muss entweder einen auf die Punktschweißverbindung eingeschränkten Wirkungsbereich besitzen oder aber diesen zweidimensional auflösen können. Diese Voraussetzungen erfüllen die Wirbelstrommessung, die Vier-Punkt-Methode und die Vierleitermessung.

Bei der Vier-Punkt-Methode werden vier Spitzen gleichen Abstands auf die Probe aufgesetzt [14]. Über die zwei äußeren Spitzen wird ein bekannter konstanter Strom eingestellt und über die zwei inneren wird der Spannungsabfall gemessen. Liegt ein homogenes elektrisches Feld im Prüfkörper vor, ist es möglich, über den Querschnitt des Prüfkörpers, der sich zwischen den inneren Spitzen befindet, den spezifischen elektrischen Widerstand zu bestimmen. Für zuverlässige und belastbare Ergebnisse ist es notwendig, Beschichtungen zu entfernen und oxidierte Oberflächen durch hinreichende Druckkraft zu durchbrechen. Bei Punktschweißverbindungen ist das Messfeld aufgrund des Elektrodeneindrucks und der Schweißung selbst jedoch stark inhomogen. Unter diesen geometrisch und stofflich heterogenen Bedingungen lassen sich Experimente weder reproduzierbar durchführen noch Feldlinienverläufe berechnen. Die typische Vier-Punkt-Methode ist somit ungeeignet zur Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen.

Werden die äußeren Spitzen als großflächige Kontakte ausgeführt und die Messung des

ohmschen Widerstandes über die zwei inneren Spitzen vorgenommen, so wird von Vierleitermessung gesprochen. An einer Punktschweißverbindung lässt sich auf diesem Wege mit geringem Aufwand ein ohmscher Verbindungswiderstand ermitteln. Wird das Widerstandsverhältnis zwischen ungeschweißtem und geschweißtem Blech gebildet, so lässt sich ein Qualitätsfaktor der Verbindung ableiten. Dieser einfache Ansatz scheint für schnelle Tests sinnvoll. Bei eingehender Betrachtung stellt sich heraus, dass eine Aufteilung in Schweißlinse, Haftzone, hinausgedrängte Blechbeschichtung und Schweißunregelmäßigkeiten auszuschließen ist. Neben der fehlenden Ortsauflösung sind veränderlicher Elektrodeneindruck und variable Legierungsschichten Ursache dafür. Forschungsrelevanz wird in dieser Variante dennoch gesehen, weil eine prozessbegleitende Messung belastbarere Ergebnisse versprechen könnte.

Bei der Wirbelstromprüfung wird durch einen Wechselstrom in einer Sendespule ein wechselndes Magnetfeld erzeugt, welches im Prüfobjekt Wirbelströme induziert. Eine zweite Spule (Empfängerspule) ermöglicht phasen- und amplitudensensitive Auswertungen der empfangenen Wirbelstromdichte. Die in der Empfängerspule induzierte Spannung hängt unter anderem von der Messfrequenz, der Probendicke, der Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit ab. Sie variiert auch mit dem Abstand zwischen Spule und Probe, der Probenausdehnung, dem Gefügestand und der Oberflächengeometrie der Probe [229]. Aufgrund dieser zahlreichen Einflussfaktoren lassen sich Werkstoffkennwerte wie die spezifische elektrische Leitfähigkeit nur über Vergleichsproben bestimmen. Punktschweißverbindungen können durch die große Permeabilität von Stahlblechen und dem veränderlichen Elektrodeneindruck nicht mittels Wirbelstromprüfung bewertet werden.

4.3.3. Thermographische Prüfung

Ein effektiver Ansatz wäre es, die Wärmestrahlung einer gerade eben entstandenen Punktschweißverbindungen zu nutzen. Nachteilig sind bei diesem Ansatz die vergleichsweise geringe Restwärme, welche bei langer Nachhaltezeit sogar verschwindend gering sein kann, und der notwendige hohe Schutzaufwand, um die Optik vor Schweißspritzern zu schützen.

Der vielversprechendere, prozessnachgelagerte Ansatz besteht in der Transmissionsanordnung, wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erläutert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Versuchsaufbau in Zusammenarbeit mit dem ILK (Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik) der TU Dresden gemäß Abbildung 4.9 erprobt.

Dieser bestand aus einer serientauglichen Blitzlampe auf der Rückseite des Prüflings und einer IR-Kamera auf der Vorderseite. Die technischen Daten der verwendeten Kamera sind im Anhang in Tabelle B.2 zusammengestellt. Während der Versuche arbeitete die Blitzlampe im Puls-Betrieb und sendete drei Pulse aus. Die Software stellte anschließend jedem Bildpunkt eine zum jeweiligen Messzeitpunkt detektierte thermische Kennzahl zur Verfügung. Sie ist in Abbildung 4.10 als Ordinate aufgeführt und wird durch den Zeitmaßstab

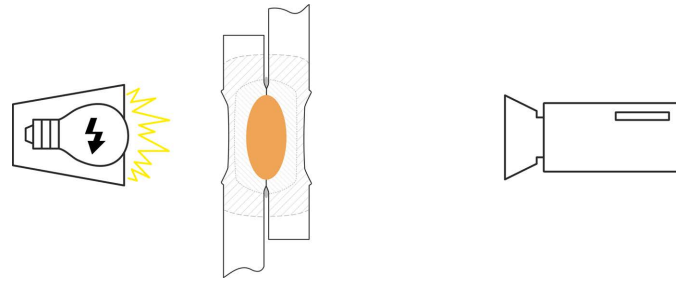


Abbildung 4.9.: Schematischer Aufbau der durchgeführten Thermografischen Prüfung

auf der Abszisse ergänzt. Aus vier zeitlich äquidistanten Messdaten S_i ließen sich anschließend Amplitude $A(x_i)$ und Phase $\varphi(x_i)$ an jeder Stelle des Temperaturverlaufs errechnen [299].

$$A(x_i) = \sqrt{(S_1(x_i) - S_3(x_i))^2 + (S_2(x_i) - S_4(x_i))^2} \quad (4.1)$$

Abbildung 4.10 zeigt ein beispielhaftes Versuchsergebnis mit drei 80 s langen Blitzlicht-Pulsen und isochronen Pausenzeiten. Im Diagramm (a) ist der zeitliche Temperaturverlauf für den roten Punkt der Visualisierung (b) aufgetragen. Aufgrund des im ungünstigsten Fall zwischen 0,04 und 0,94 variierenden Emissionskoeffizienten der Oberfläche (Tabelle B.3) kann der Temperaturwert nur relativ verwendet werden. Somit lässt sich in der Mitte des ausgewählten Elektrodeneindrucks vorerst lediglich eine gleichmäßige Wärmeleitung und -strahlung ablesen. Die Visualisierung in 4.10b) zeigt ein Amplitudenbild, errechnet nach Gleichung 4.1, welches aus dem Vergleich zeitlich benachbarter Messwerte gebildet wird.

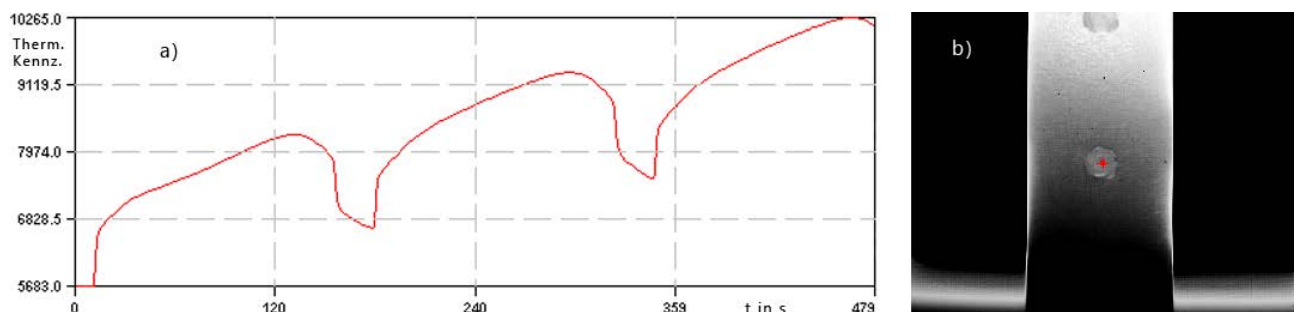


Abbildung 4.10.: Wärmestrahlungsdiagramm (a) und Amplitudenfeld (b) an Widerstandspunktschweißverbindung, Probe Mod-3_Stm3 Schweißpunkt 1400

In Abbildung 4.11 ist das Amplitudenbild aus Abbildung 4.10b) dem dazugehörigen Verbindungsbruchbild und den Blech-Oberflächenbildern gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass sich Merkmale der Meißelprüfung nicht im Amplitudenbild ausbilden.

Am gewählten Prüfstand besteht für spätere Versuche die Möglichkeit, durch ein anderes Objektiv die Ortsauflösung mindestens zu verdoppeln. Die Ergebnisse aus Abbildungen 4.10 und 4.11 zeigen bei näherer Betrachtung zwei Verfahrensgrenzen. Erstens: Es werden

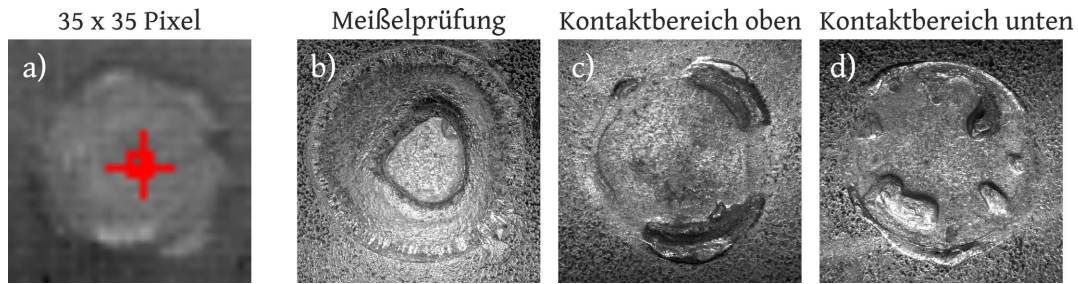


Abbildung 4.11.: Amplitudenbild (a), Auflichtmikroskopische Betrachtungen (b-d), zu je $8,7 \times 8,7 \text{ mm}^2$

keine absoluten Temperaturen bestimmt, weshalb eine belastbare Interpretation der empfangenen Wärmestrahlung nur gegenüber Referenzproben unter identischen Bedingungen, nicht aber absolut möglich ist. Ungeschwärzte Proben sind aufgrund der extremen Emissionsbreite grundlegend auszuschließen. Zweitens: Es zeichnen sich im Wärmebild keine konkreten Verbindungscharakteristika ab. Ausgehend von dieser sehr komprimierten Auswertung erscheint es derzeit nicht möglich, mit der Thermographischen Prüfung wissenschaftlich zuverlässige und belastbare Aussagen zur Verbindungsbewertung für Standmengenversuche erarbeiten zu können.

4.3.4. Durchstrahlungsprüfung

Ausgehend von Abschnitt 2.4 verspricht die Röntgendurchstrahlungsprüfung einen großen Informationsgehalt für die Verbindungsbewertung von widerstandspunktgeschweißten Proben, da sie zerstörungsfrei innere Strukturen, Unregelmäßigkeiten (DVS 2960 [110]) und Verbindungen zu visualisieren vermag.

Im Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden standen Computertomographen mit einer besonders feinen Volumenauflösung (Voxel) zur Verfügung. Die technischen Daten des für die Versuche verwendeten Prüfsystems v|tome|x l 450 sind im Anhang in Tabelle B.4 aufgeführt und den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 4.12. Zur Datenaufbereitung kam die Software VGStudio MAX zum Einsatz. Ausgangspunkt der Untersuchungen war ein Ausschnitt eines typischen Prüfblechstreifens mit 30 mm Breite und etwa $2,0 \text{ mm}$ Gesamtdicke. Um an Stahl dieser Dimension eine dreidimensionale Tomographie durchzuführen, muss die Beschleunigungsspannung hinreichend groß sein, damit der Prüfblechstreifen auch quer durchstrahlt werden kann. Die feinste Auflösung konnten unter Verwendung eines Cu-Filters mit $0,5 \text{ mm}$ Dicke bei $U=280 \text{ kV}$ und $I=100 \mu\text{A}$ erzielt werden. Mit diesen Einstellungen gelang eine minimale Voxelgröße von $12,5 \mu\text{m}$.

Die verarbeiteten Signale, welche am Detektor aufgefangen wurden, zeigt Abbildung 4.13. Links ist ein Summenbild aller berechneten Schichtinformationen von der Außenseite des oberen Bleches bis zur Außenseite des unteren Bleches dargestellt. In diesem sind alle geometrischen und werkstofflichen Erscheinungen der Elektrodeneindrücke ersichtlich

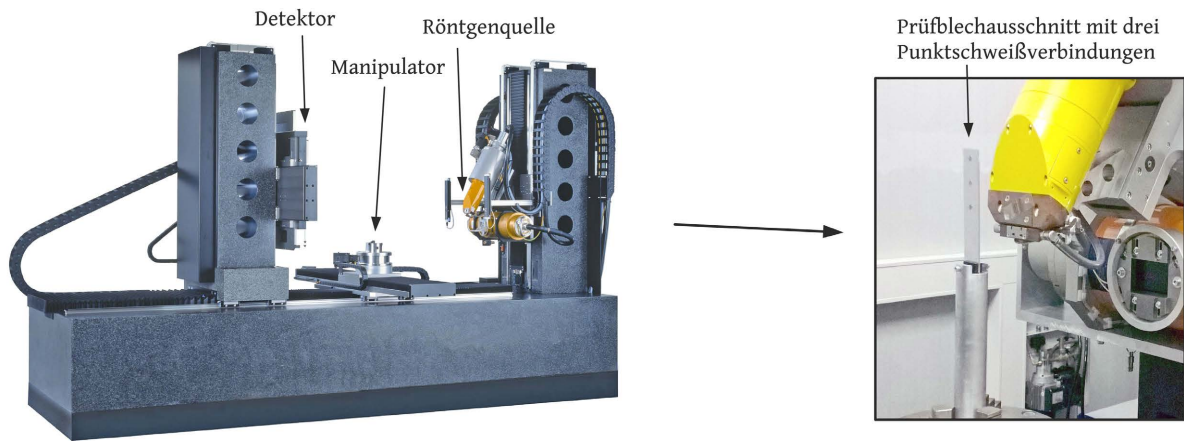


Abbildung 4.12.: Versuchsaufbau bei der Computertomographie am System v|tome|x L 450 am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden

sowie die inneren Unregelmäßigkeiten und Erscheinungen der Schweißebene. Eine ausgewählte Schnittebene im Elektrodeneindruck zeigt Bild b) mit großen Unterschieden in der ordnungszahlabhängigen Graustufenskalierung. Helle Bereiche deuten auf schwere Elemente im Vergleich zur Matrix wie Cu und Zn hin, während dunkle Bereiche in dieser Wichtung auf Materialabwesenheit durch die eingedrückten balligen Elektroden hindeuten.

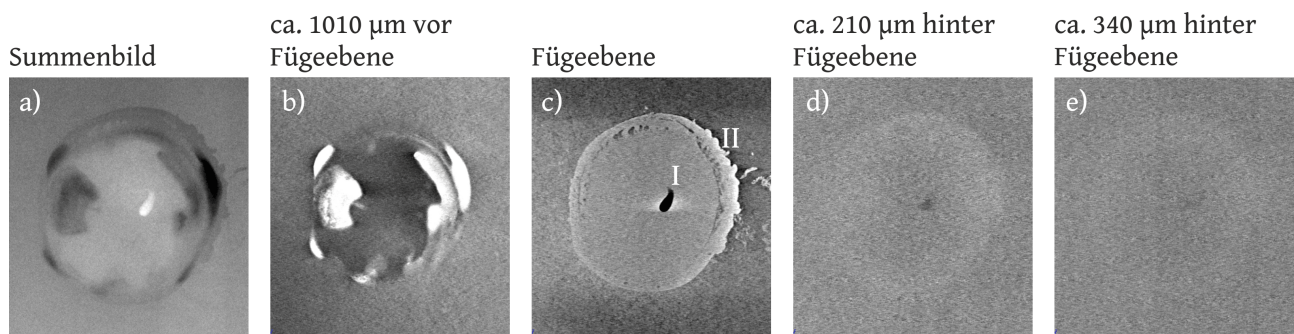


Abbildung 4.13.: Ergebnis einer 3D-Computertomographie mit maximaler Auflösung für Prüfblechstreifen bei Standmengenversuchen, I = Pore, II = Zinkkranz / hinausgedrängtes Zink, Probe: Mod-3_Stm2, Pkt 1000

Im Bild c) zeigt sich in der Schweißebene ein heller Saum (II), welcher hinausgedrängtes Zink repräsentiert. Nach innen zur Schweißung gehend wird eine leicht elliptische Trennung zur Haftzone erkennbar. Eine Schweißlinse innerhalb der Haftzone ist jedoch nicht auszumachen. Im Zentrum der anzunehmenden Schweißlinse zeigt sich eine Pore (I). Bilder d) und e) ergänzen parallel zur Schweißebene einen Blick innerhalb der beiden Bleche. Darin zeichnet sich vermutlich jeweils ein Unterschied zwischen Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone ab. Eine Gegenüberstellung von Schweißebene aus der 3D-Computertomographie und zugehöriger Meißelprüfung, siehe Abbildung 4.14, belegt, dass Haftzone und Schweißlinse in dieser zerstörungsfreien Prüfung zusammenfallen und folglich nicht zu unterscheiden sind.

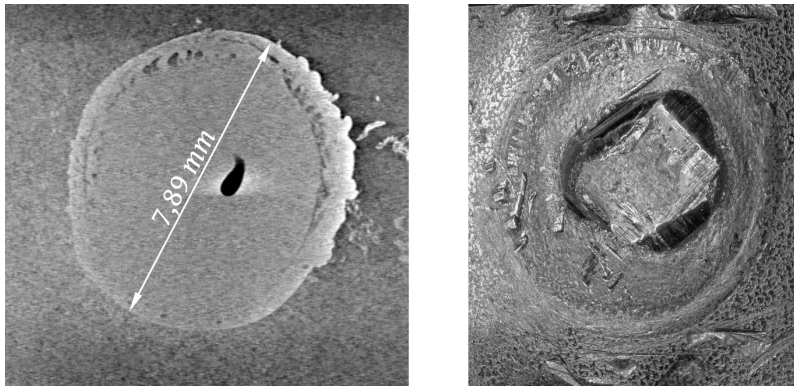


Abbildung 4.14.: Fügeebene aus der 3D-Computertomographie (links) und Ergebnis der Meißelprüfung (rechts), Bildhöhe jeweils $10,0\text{mm}$

Es ergibt sich unter anderem die Frage, ob sich die Schweißlinse eventuell bei höherer Volumenaufösung zeigt. Dies lässt sich beantworten, indem die Blechbreite einer Punktschweißverbindung so weit wie möglich eingekürzt wird. So verringert sich der Absorptionsweg und folglich auch die benötigte Beschleunigungsspannung zur Durchstrahlung des Prüflings. So gelang es an einem entsprechenden Blechstreifen mit 15mm Breite, die Beschleunigungsspannung auf 110kV herabzusetzen. Die Voxelgröße verkleinerte sich auf $10,4\mu\text{m}$. Allerdings blieb die Informationsdichte gleich. Es verschlechterten sich sogar leicht die Kontraste.

Abschließend kann festgehalten werden, dass an Prüfblechstreifen von Standmengenversuchen mit einer Mikrofokus 3D-Computertomographie sehr zuverlässig und belastbar Haftzone und Zinkkranz visualisiert werden können und daraus beides flächig quantifizierbar ist. Um Haftzone und Schweißlinse trennen zu können, bedarf es weiterer Forschung. Werden Bleche mit stark unterschiedlichen Legierungen verwendet, könnte sich eventuell durch den ordnungszahlabhängigen Kontrast eine Grenze abzeichnen oder aber es gelingt methodisch oder technologisch, Gefügeunterschiede zu erfassen.

4.3.5. Ultraschallprüfung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde als erster Ansatz ein Versuchsaufbau nach Abbildung 4.15 zur Prüfung mit longitudinal polarisierten US-Wellen im Impuls-Echo-Verfahren verwendet. Der Aufbau bestand aus einem mechanisch bewegten und fokussierten Einschwinger, welcher in einem Tauchbecken mit destilliertem Wasser geführt wurde. Das Wasserbad gewährleistete durch immer gleiche Koppelbedingungen eine größtmögliche Reproduzierbarkeit und der gewählte mechanisch scannende Aufbau ermöglichte durch verschiedene Typen von Schwingern eine variable Ortsauflösung (geometrische Fokussierung) sowie Frequenz.

Die Freiheitsgrade und technischen Daten der Anlage sind im Anhang in Tabelle B.5 zusammengestellt. Für die Untersuchungen kamen Schwinger mit einer Schallfrequenz von

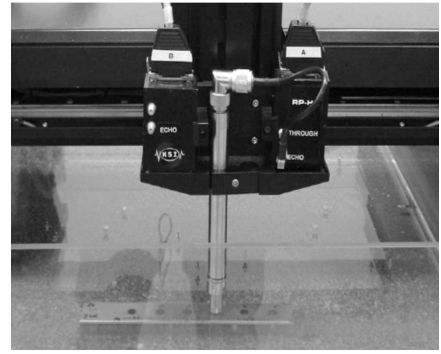


Abbildung 4.15.: Versuchsaufbau bei der Ultraschallprüfung am Fraunhofer IKTS in Dresden Klotzsche

20 MHz und 50 MHz zum Einsatz, deren Auflösungsgrenzen im Idealfall bei 25 μm bzw. 10 μm liegen (Tabelle B.6). Mit steigender Frequenz verbessert sich also die Auflösung, wodurch grobkörniges von feinkörnigem Gefüge unterscheidbar wird, wie in [153] nachgewiesen. Zugleich sinkt aber auch die Teilchenauslenkung ξ (Atomauslenkung), welche einen geringeren Schalldruck p zur Folge hat [185]. Die prüfbare Gesamtblechdicke sinkt. Sind die Ankoppelbedingungen der Schallwellen nicht optimal, gehen wichtige Informationen bei steigender Frequenz im Rauschen unter.

Für die nachfolgenden Ergebnisse wurde ein 20 MHz-Prüfkopf genutzt. Dieser war so ausgerichtet, dass das Ultraschallsignal in der Fügeebene fokussiert ist. Während der Messwertgewinnung bewegt sich der Prüfkopf meanderförmig über die vorgegebene Fläche und zeichnet in definierter Schrittweite A-Bilder auf. Aus dem so entstehenden Z-Scan können nachträglich beliebige B- und C-Bilder konstruiert werden. Ein ausgewähltes C-Bild aus der Fügeebene zeigt Abbildung 4.16. Die darin vorliegende Graustufencodierung er-

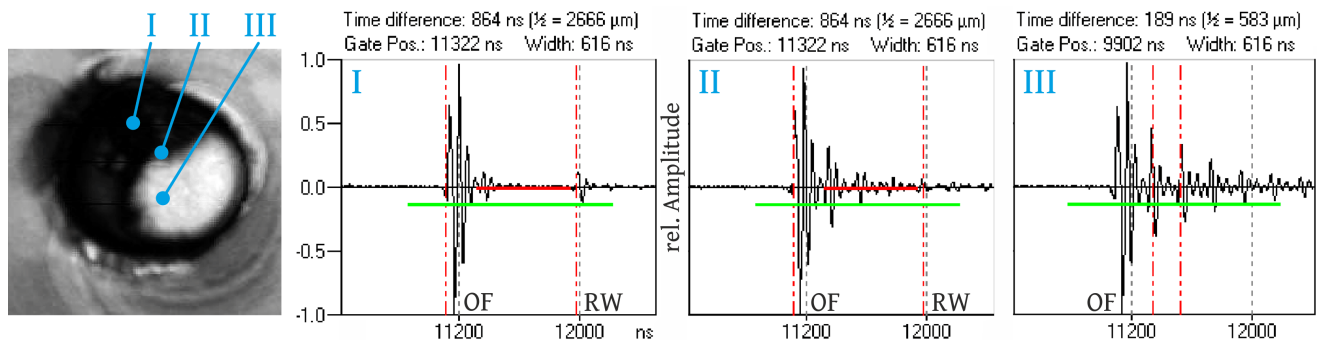


Abbildung 4.16.: C-Bild aus Fügeebene mit drei repräsentativen A-Bildern, Probe us-sam_iii-min

folgt anhand des Schalldrucks. Helle Pixel zeigen einen hohen Schalldruck an (kurzer Weg, geringe Absorption, starke Reflexion) und dunkle einen niedrigen (langer Weg, hohe Absorption, geringe Reflexion). Aus dem C-Bild wurden drei Datenpunkte ausgewählt, zu denen die A-Bilder I, II und III ergänzt sind. Bild I zeigt ein Oberflächenecho (OF) und

ein Rückwandecho (RW). An dieser Stelle ist keine Trennebene vorhanden, wodurch eine Schweißung angenommen werden darf. Im Bild II ist das Rückwandecho nach gleichem Schalllaufweg wiederzuerkennen. Allerdings ist es an dieser Stelle ausgesprochen schwach. Dafür zeigt sich eine Echofolge, die der oberen Blechdicke entspricht. Es handelt sich um eine sogenannte „Kleb- bzw. Haftschweißung“. In Bild III ist im Schallbild als erstes wieder das Oberflächenecho zu erkennen und nachfolgend eine große Echofolge mit gleichem Abstand, welche durch Mehrfachreflexion nach Durchlaufen der ersten Blechdicke entsteht. An dieser Stelle liegt keine Verbindung vor. Alle drei A-Bilder zeigen einen Verlauf durch die Tiefe der Verbindung, das C-Bild entsteht anschließend anhand eines ausgewählten Zeitpunktes über alle A-Bilder. Ist die Fügeebene leicht geneigt gegenüber der Messebene, können sich Informationen aus oberem Blech, Fügeebene und unterem Blech überschneiden. Damit diese Unsicherheit ausgeräumt ist, wurde für die eigenen Experimente ein Weg gewählt, das gesamte Schweißstellenvolumen zu visualisieren. Belastbare Bewertungen sind so einfacher möglich.

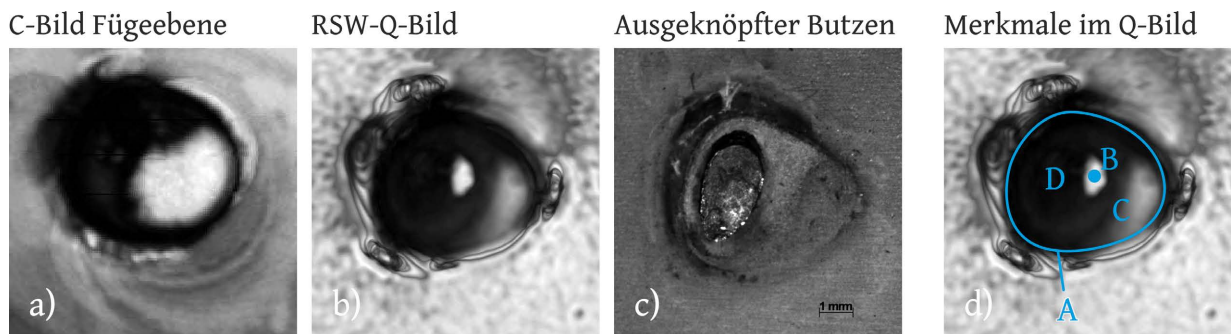


Abbildung 4.17.: C-Bild aus Fügeebene (links), RSW-Q-Bild (mittig-links), ausgeknöpfter Butzen im lichtmikroskopischen Bild (mittig-rechts) und Merkmale der US-Bilder, Probe us-sam_iii-min

Abbildung 4.17b visualisiert im RSW-Qualitätsbild die Unterschiede des C-Bildes für die gesamte Prüflingsdicke. Um dies zu erreichen wird das A-Bild jedes einzelnen Bildpunktes von Abbildung 4.16 einer schnellen Fourier-Transformation unterzogen. Dabei ergeben sich für schlechte Schweißungen steile und ausgeprägte Flanken im Frequenzspektrum, während eine gute Schweißverbindung einen ruhigen Verlauf im Frequenzspektrum zur Folge hat (Abbildung B.2 im Anhang). In der Ableitung des Spektrums zeigt sich jenes Merkmal noch deutlicher. Dessen Maximalwert wird jedem Bildpunkt zugewiesen, durch einen Vergleich zwischen optimaler und fehlender Verbindung als Grauwert codiert und in einem neuen Bild, dem RSW-Q-Bild, gespeichert. Gegenüber dem C-Bild aus der Fügeebene (Abbildung 4.17a) erlaubt das RSW-Q-Bild (Abbildung 4.17b) einen Blick durch die Tiefe der Verbindung. Dies zeigt sich deutlich am hellen Punkt (Markierung B) in Abbildung 4.17d. Denn an dieser Stelle existiert mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Pore, wie es das Schliffbild einer äquivalenten Schweißung in Abbildung B.3 im Anhang zeigt. Gemeinsam mit dem

Bild der Meißelprüfung (Abbildung 4.17c) ergeben sich drei weitere Auffälligkeiten. Markierung A grenzt für das US-Signal nach außen hin einen Bereich ab, welcher an vier Stellen Interferenzen aufweist. Deren geometrischer Ursprung ist der aufgeschobene Wulst beim Eindringen der Elektroden während des Schweißens. Wie weit diese Signalwechselwirkung von der Markierung A auch nach innen reicht, lässt sich bislang noch nicht sicher berechnen. Besonders beim Vergleich von C-Bild und ausgeknöpftem Butzen ist der Randeffekt gut zu erkennen. Der hellgraue Bereich C aus Abbildung 4.17d zeigt eine Grenzfläche an, die noch viel deutlicher im C-Bild hervortritt. An dieser Stelle sind die beiden Bleche nicht verbunden. Im vorliegenden Fall könnte sich noch etwas Zink dazwischen befunden haben. Werden die markierten Stellen B und C sowie der Bereich außerhalb A ausgeblendet, bleibt immer noch ein vergleichsweise großes sichelförmiges Gebiet übrig, welches aufgrund der dunklen Grauwerte eine Schweißverbindung andeutet. Im ausgeknöpften Zustand kann dieser Bereich in den Punktdurchmesser und in die Haftzone unterteilt werden. Daraus lässt sich ableiten, dass mit diesem US-Verfahren weder Punktdurchmesser noch Schweißlinie zu ermitteln sind.

Zur Quantifizierung dieser Aussage wird eine Bildanalyse für das Impuls-Echo-Verfahren durchgeführt. Der Versuchsumfang erstreckte sich über 45 Verbindungen aus vier unterschiedlichen Blechdickenkombinationen, von denen eine aus unverzinkten Stählen bestand. Im Anhang sind in Tabelle B.7 die verwendeten Werkstoffe und Prozessparameter zusammengestellt und in Tabelle B.8 die gemessenen Punktdurchmesser. In der Bildanalyse werden das C-Bild der Fügeebene sowie das RSW-Q-Bild auf Ähnlichkeitsmetriken mit dem ausgeknöpften Butzen hin untersucht. Für einen derartigen Vergleich eignet sich der dimensionslose Kreuzkorrelationskoeffizient r_{XY} , welcher mit Gleichung B.1 berechnet wird. Durch die integrierte Mittelwertkorrektur ist der Vergleich unempfindlich gegenüber Helligkeitsunterschieden und konzentriert sich somit auf Mustererkennung [204]. Der berechnete Koeffizient kann schließlich Ergebnisse zwischen -1 und 1 annehmen. Bei $r_{XY} = 0$ sind die zwei betrachteten Bilder unabhängig voneinander, bei $r_{XY} = 1$ sind sie identisch und bei $r_{XY} = -1$ sind die Bilder invers zueinander. Für die bereits betrachtete Versuchsnummer us-sam_iii-min zeigt die Kreuzkorrelation in Abbildung 4.18 mit Bezug zum ausgeknöpften Butzen eine geringe Ähnlichkeit zum C-Bild und eine mittelmäßige bis gute Ähnlichkeit zum RSW-Q-Bild. Zu berücksichtigen ist, dass die Bilderinformationen aus sehr verschiedenartigen Quellen stammen.

Aus der Kreuzkorrelationsmatrix lassen sich zwei weitere Merkmale für die Verbindungsprüfung im Impuls-Echo-Verfahren festhalten (Abbildung B.4 im Anhang). Zum einen besteht ein grundlegend größerer Zusammenhang zwischen ausgeknöpftem Butzen qualitätsgerechter Verbindungen und jeweiligem Ultraschallbild als zwischen nicht qualitätsgerechter Verbindung und jeweiligem Ultraschallbild. Nur bei den unverzinkten Stahlblechen stimmen die Merkmale von Ultraschall- und ausgeknöpftem Butzen immer gleich gut überein. Zum anderen besitzen die RSW-Q-Bilder im Mittel mehr Ähnlichkeitsmetriken als die

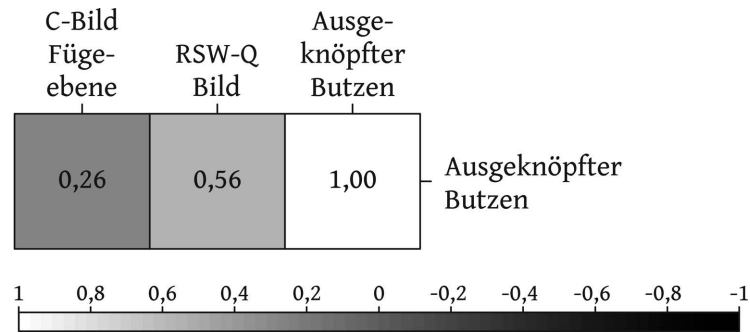


Abbildung 4.18.: Kreuzkorrelation zwischen den drei Bildern aus Abbildung 4.17

C-Bilder der Fügeebene. Mit den erarbeiteten Ergebnissen kann erneut geschlussfolgert werden, dass nur ein mittelbarer Bezug auf den Punktdurchmesser d_w der zerstörenden Prüfung möglich ist. Ein weiterführender Forschungsansatz ist im Einbeziehen der Signallaufzeit zu finden. Aus dieser könnten Gefügeunterschiede abgeleitet werden (Gefügedämpfung), was im Idealfall zur Schweißlinse führt.

Ein zweiter Ansatz mittels Ultraschallwellen, eine zuverlässige und belastbare Verbindungsbewertung zu erreichen, erfolgte durch Inline-Prüfung mit transversal polarisierten Wellen, wie bereits Abschnitt 2.4.2 vorstellte. Hierzu wurde ein Ultraschalldatenverarbeitungsmodul bestehend aus Sender-, Empfänger- und Anschlussplatine entwickelt und aufgebaut (Abbildung B.5 im Anhang). Dieser Schritt war notwendig, da kein geeignetes Modul existierte, um eine vollständige Analyse des transmittierten Signals zu gewährleisten.

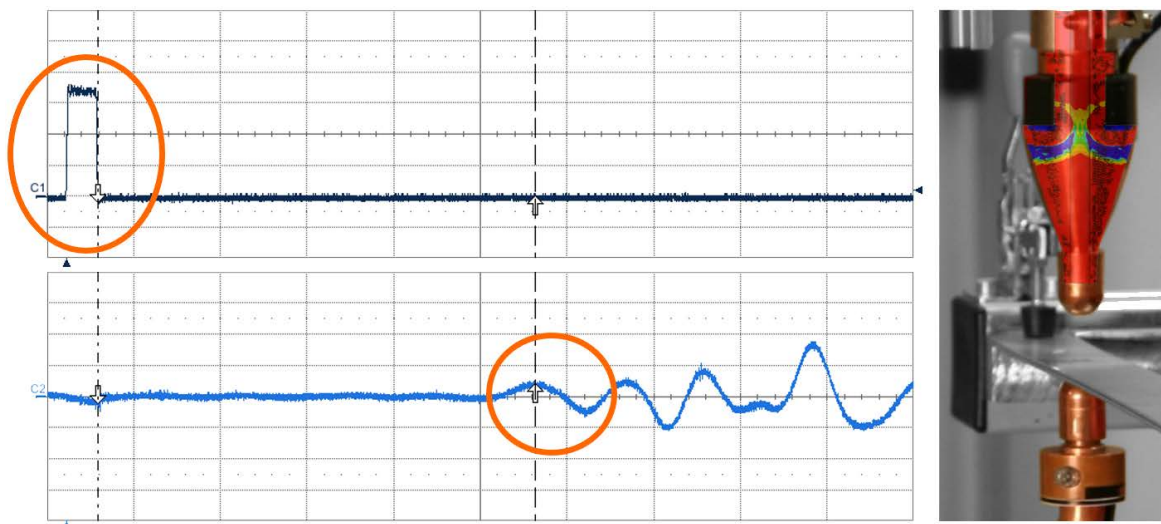


Abbildung 4.19.: Schallsignal bei der Inline-Ultraschallprüfung mittels Transversalwellen

Abbildung 4.19 zeigt rechts den US-Sender und den US-Empfänger im eingebauten Zustand, wobei der Sender (oben) mit einer simulierten Schallwelle überlagert ist. Diese Schallwelle entsteht am Schallgeber durch einen Hochspannungsimpuls kurzer Dauer und

großer Flankensteilheit. Im Eigenbau ist dieser Puls $3,0 \mu s$ lang und $996 V$ hoch, wodurch er nur gering vom Ideengeber der Firma Bosch mit $4,0 \mu s$ und $1125 V$ abweicht. Die Flankensteilheiten unterscheiden sich zwischen Eigenbau und Ideengeber nur unbedeutend. Im Schallverlaufsbild, welches Abbildung 4.19 links oben zeigt, ist dieser Puls von einer orangenen Ellipse markiert. Auf dem darunter abgebildeten und mit $20 MS/s$ abgetasteten Empfängersignal ist zum Ende des Hochspannungspulses eine kleine Rückkopplung zu erkennen. Etwa $50 \mu s$ später trifft die erste vollständige Schallwelle am Empfänger ein, was erneut durch eine orangenen Ellipse gekennzeichnet ist. Die Verstärkung der Schallwelle wird bei einwirkender Elektrodenkraft aber ohne zugeschalteten Schweißstrom auf eine Amplitude von etwa $1 V$ justiert. Der Effektivwert dieser Schallwelle ergibt schließlich einen Punkt auf der Durchschallungskurve. Mit wiederholenden Durchschallungen aller $3 - 13 ms$ lässt sich beim Schweißen ein Wert für die Transmission (oder Durchlassung) aufzeichnen, wie sie die orangene Kurve aus Abbildung 4.20 zeigt. An dieser lassen sich fünf charakteristische

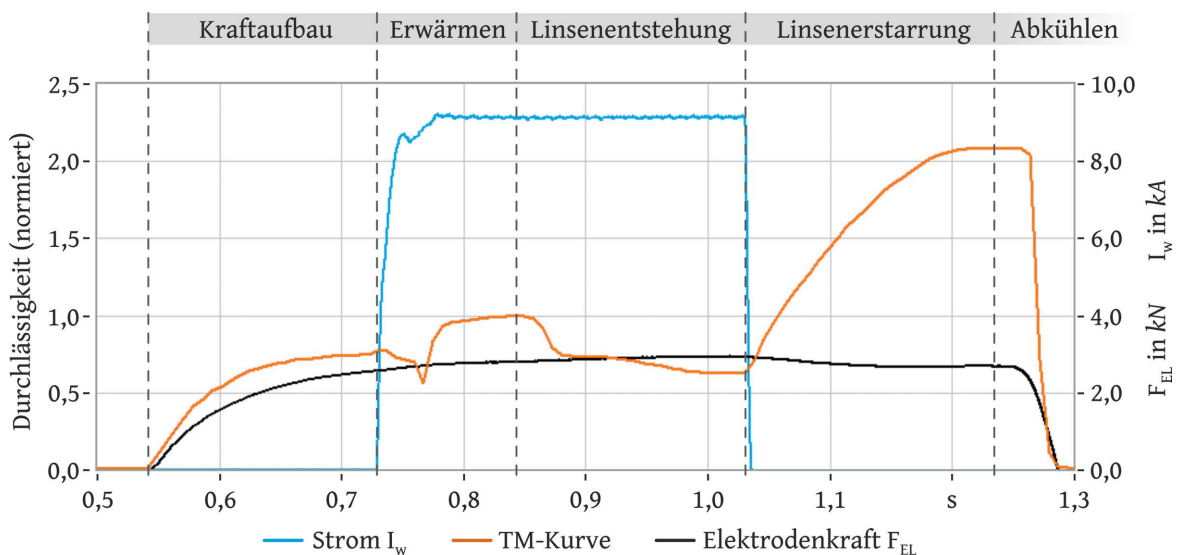


Abbildung 4.20.: Verlauf der Durchschallung mittels Transversalwellen, $2 \times 1,0 mm$ DX53D+Z100MB und ISO 5821-F1-16-20-50-5,5

Prozessphasen erkennen. In der Phase des Kraftaufbaus verbessern sich die Durchschallbedingungen aufgrund der mit der Elektrodenkraft ansteigenden wahren Kontaktfläche. Sobald der Schweißstrom zugeschaltet wird, beginnen sich die Werkstoffe zwischen den Elektroden zu erwärmen und die Phase der Erwärmung setzt ein. Der sogleich folgende kurze Einbruch in der Durchschallintensität zeigt an, dass die Zinkbeschichtung schmilzt. Aufgrund der anschließend verbesserten Durchschallung kann im Schallverlauf wieder eine feste Phase angenommen werden, wodurch das überschüssige Zink bereits aus der Fügezone herausgedrängt sein muss. Die Intensität der Durchschallung steigt anschließend auf ein lokales Maximum, auf welches die Kurve normiert wird. Hier sind die akustischen Impedanzen von Kupfer und Stahl gleich. Ab diesem Punkt wird die Transmission nicht mehr von der Stahltemperatur bestimmt sondern vom Schweißlinsenwachstum (Verringerung des E-

Moduls der Stahlbleche [230]). Es beginnt die Phase der Linsentstehung. In dieser sinkt die Transmissivität mit zunehmendem schmelzflüssigen Volumen bis zu einem lokalen Minimum. Dieser Punkt kann bereits vor dem Ende des Stromflusses (Stromzeitende) liegen. Ab diesem beginnt die vierte Phase, die Erstarrung des Linsengebietes. Hierbei steigt die Transmissivität kontinuierlich an und erreicht bei hinreichender Nachhaltezeit ein globales Maximum. Mit Beginn der Abkühlphase wächst der Einfluss der steigenden Impedanz von Stahl gegenüber den Prozesseinflüssen und das letzte Charakteristikum (lokales Maximum) ist erreicht.

Die dargestellten Prozesscharakteristika sind bei jeder veränderten Prozessparametereinstellung deutlich zu erkennen und für einen Ausschnitt eines Schweißbereiches im Anhang in Abbildung B.7 zum Einfluss der Stromstärke und in Abbildung B.8 zum Einfluss der Stromzeit zusammengestellt. Unterschiedliche Schweißlinsendurchmesser lassen sich visuell eindeutig erkennen und an den genannten Zeitfolgen auch quantifizieren. Allerdings fehlt bislang die Möglichkeit, aus dem Schallbild den Einfluss der einzelnen Effekte zu berechnen. In einem ersten Schritt gelang mit Hilfe eines Laservibrometers das Schallfeld am Elektrodenkonus des US-Senders auszumessen und in einer Simulation nachzustellen [206] [209]. Trotz ergänzender mathematischer Beschreibungen zur Durchschallung während des Stromflusses ist die Bewertung des Schweißlinsendurchmessers bislang auf iterativ ermittelbare Zusammenhänge begrenzt. Dabei können für verzinkte Stähle Abweichungen im Bereich von 10 % gegenüber dem wahren Linsendurchmesser (Messung am Querschiff) erreicht werden.

Für Blechbeschichtungen wie AlSi liegen schlechtere Koppelbedingungen vor. Damit ergeben sich weitaus größere Abweichungen zwischen der Schallsignalauswertung und der Meißelprüfung. Eine zuverlässige und belastbare Bewertung des Schweißlinsendurchmessers ist daher bislang nicht möglich.

4.4. Festlegung auf eine charakteristische Größe aus Standmengenversuchen für Data-Mining-Analysen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren analytisch und experimentell zur Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen untersucht. Ziel dabei war es, Grenzen und Möglichkeiten der einzelnen Vorgehensweisen zu analysieren.

Tabelle 4.4 trägt alle erzielten Erkenntnisse zusammen und konzentriert die Informationen dergestalt, dass eine Auswahl für Standmengenversuche mit anschließender Datenanalyse möglich wird. In den Spalten zwei und drei wird aufgeführt, ob es möglich ist, die Probengeometrie der Prüfbleche gemäß ISO 8166 zu verwenden oder ob es notwendig wird, aus diesen Prüfblechen nachträglich Einzelpunktproben herauszutrennen.

Daran schließt sich die Frage nach detektierbaren Kenngrößen innerhalb der Fügeebene an, welcher in den Spalten vier, fünf und sechs nachgegangen wird. Hierzu wurden von außen nach innen orientiert die Haftzone d_c , der Punktdurchmesser d_w und die Schweißlinse d_n gewählt. Diese drei charakterisieren eine Widerstandspunktschweißverbindung innerhalb der Fügeebene eindeutig und grenzen direkt aneinander (Abbildungen 2.6 und 4.4). Charakterisieren lassen sie sich untereinander wie folgt: Die Haftzone ist nach außen

Tabelle 4.4.: Entscheidungshilfe zur Verbindungsbewertung bei Standmengenversuchen

| Verfahren | ISO 8166 Proben | | Kenngrößen in der Fügeebene | | | Prüfzeit pro Pkt. | Ergebnis-stabilität | laterale Auf-lösung |
|--|-----------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | Prüf-blech | Einzel-punkt | d_c | d_w | d_n | | | |
| Torsionsprüfung | nein | ja | un-mittelbar | mittelbar | mittelbar | 5 min | gegeben | 10 μm |
| Abrollprüfung | ja | nein | un-mittelbar | un-mittelbar | mittelbar | 1 min | gegeben | 10 μm |
| Meißelprüfung | ja | ja | un-mittelbar | un-mittelbar | mittelbar | 2 min | gegeben | 10 μm |
| Messungen am Querschliiff | nein | ja | un-mittelbar | mittelbar | un-mittelbar | 20 min | gegeben | 10 μm |
| Magnetfeldprüfung ^b | ja | ja | mittelbar | mittelbar | mittelbar | 5 min | gegeben | hoch |
| Leitfähigkeitsprüfung | nein | ja | mittelbar | mittelbar | mittelbar | 1 min | unsicher | gering |
| Thermographische Prüf. ^c | ja | ja | mittelbar | mittelbar | mittelbar | 5 min | unsicher | mittel |
| Durchstrahlungsprüfung ^d | ja | ja | un-mittelbar | mittelbar | mittelbar | 5 min | gegeben | 13 μm |
| Ultraschallprüfung long. ^e | nein | ja | mittelbar | mittelbar | mittelbar | 15 min | gegeben | hoch |
| Ultraschallprüfung trans. ^f | ja | ja | mittelbar | mittelbar | mittelbar | 0 min | gegeben | mittel |

^b Nachträgliche Prüfung mit senkrecht zur Blechebene wirkendem Magnetfeld.

^c Thermographie in Transmissionsanordnung mit Blitzlampe im Puls-Betrieb.

^d So in der Fachliteratur benannt. Inhaltlich ist allein die Röntgendurchstrahlung gemeint.

^e Scannendes Akustisches Mikroskop im Wasserbad mit Longitudinalwellen.

^f Prozessbegleitende Ultraschallmessung mit transversal polarisierten Wellen.

durch das Ende der metallischen Verbindung und gegebenenfalls noch durch Werkstoffunterschiede (z. B. Zinkkranz) gekennzeichnet. Beide sind dem mikroskopischen Bereich zuzuordnen. Der Punktdurchmesser als Merkmal der zerstörenden Prüfung liegt innerhalb der Wärmeeinflusszone, ist durch Grundwerkstoffeigenschaften gekennzeichnet und grenzt sich zur Schweißlinse durch Gefügeunterschiede, also lediglich sub-mikroskopisch, ab. Jene Gefügeunterschiede entstehen wegen der schmelzflüssigen Blechwerkstoffanteile und deren

Erstarrungsbedingungen. Von den derzeit gültigen Normen und Regelwerken nutzen zur Beurteilung der Verbindungsqualität 83 % den Punktdurchmesser und die restlichen 17 % den Linsendurchmesser [68] [70] [77] [78] [95] [96].

In der siebten Spalte wird die Prüfzeit für eine einzelne Punktschweißverbindung notiert. Sie entspricht der für die Experimente in diesem Kapitel benötigten Zeit, abzüglich eines prozentualen Anteils, der die beschleunigte Bearbeitung bei wiederholten Analysen berücksichtigt. Hilfreich ist dieser Wert hinsichtlich der Planung von Prüfzeiten bei Standmengenuntersuchungen. Zugleich zeigt er auch an, wie groß der Analyseaufwand für eine vollständige Standmengenkurve ist. Im Mittel bestand eine solche innerhalb dieser Arbeit aus 2400 Punktschweißverbindungen. Es ist zu bemerken, dass sich die vollständig automatisierte Ultraschallprüfung mit transversal polarisierten Schallwellen bei dieser Betrachtung gegenüber allen anderen Verfahren abhebt. Mit ihr wäre es möglich, ohne zusätzlichen Mehraufwand an Zeit eine durchgehende Verbindungsbewertung zu gewährleisten.

Die sich anschließende vorletzte Spalte nimmt Stellung zur Stabilität des Prüfergebnisses während einer Standmenge und berücksichtigt damit die sich innerhalb einer Standmenge verändernden Prüfbedingungen durch die verschleißenden Elektroden-Kontaktflächen.

In der letzten Spalte wird eine Aussage zur lateralen Auflösung getroffen. Von besonderer Bedeutung ist diese bei zerstörungsfreien Prüfverfahren, damit abgeschätzt werden kann, ob Ergebnisbeeinflussungen durch Elektrodeneindrücke quantifiziert werden können.

Aus den Spalten vier bis sechs von Tabelle 4.4 geht hervor, dass die Haftzone neben den zerstörenden Prüfverfahren bislang nur durch die Röntgendurchstrahlung unmittelbar erfasst wird. Beim Punktdurchmesser ist die Einschränkung aufgrund des notwendigen Bruchs innerhalb der Wärmeeinflusszone noch stärker. Er ist folglich nur mit den drei aufbrechenden Verfahren zu erfassen. Die Schweißlinse als innere Verbindungs-Kenngröße ist derzeit allein im Querschliff direkt erfassbar. Gute Ansätze, die Schweißlinse zerstörungsfrei direkt zu erfassen, zeigen sich innerhalb der magnetischen Remanenz-Prüfung (Magnetfeldprüfung) und der prozessbegleitenden Ultraschallprüfung. Beide konzentrieren sich auf die Schweißlinse im schmelzflüssigen Zustand, stehen aber noch vor den Herausforderungen geringer Signalstabilitäten bei hochfesten Blechbeschichtungen (Ultraschall) und fehlender Berechnungsmöglichkeiten, um Beugung, Reflexion und Streuung am Elektrodeneindruck extrahieren zu können.

Für die angestrebte Verbindungsbewertung mittels Datenanalysen ist eine mittelbare Bewertung stets weniger präzise als eine unmittelbare. Unmittelbare Bezüge sind durch Funktionen abstrahierte Zusammenhänge zwischen einem verfügbaren Messwert und einer gesuchten Eigenschaft. Abstraktionen sind immer nur Näherungsversuche, bei welchen zumeist starke Schwankungen gegenüber der gesuchten Eigenschaft akzeptiert werden müssen. Da die spätere Datenanalyse selbst bereits eine Abstraktion darstellt, ist es empfehlenswert, eine unmittelbare Bewertung zu verwenden. Die Schweißlinse entfällt aus drei Gründen. Sie wird seltener verwendet, die Prüfung am Querschliff ist überdurchschnittlich

aufwendig und von der veränderlichen Schweißlinsenform (Abbildung 4.20) wird lediglich ein Linienwert (Abbildung 4.4) erfasst. Für die Verbindungsbewertung dieser Arbeit ergibt sich somit der Punktdurchmesser als geeignetste und repräsentativste Kenngröße. Wegen des größeren Stahlblech-Dickenspektrums (Abschnitt 4.2) ist schließlich die Meißelprüfung das am besten geeignete unmittelbare Prüfverfahren für die Verbindungsbewertung.

5. Versuchsaufbau, -planung und -durchführung der Standmengen-Experimente

Auf den folgenden Seiten wird das verwendete Widerstandsschweißsystem dargestellt und in den Versuchsaufbau (Abschnitt 5.1) eingebunden. Die zur späteren Datenanalyse notwendige Messtechnik musste ergänzt und ein Messprogramm entwickelt werden. Mit der Versuchsplanung (Abschnitt 5.2) folgen die Werkstoffauswahl und die Versuchsmatrix. In der Versuchsdurchführung (Abschnitt 5.3) werden alle Arbeitsschritte eines jeden Standmengenexperimentes bzw. unterbrochenen Standmengenexperimentes, eines sogenannten Stufenversuchs, erläutert sowie die zum Einsatz kommenden Analyseverfahren beschrieben. Diese Durchführung findet in den Kapiteln 6, 7, 8, 10 und teilweise in 9 Anwendung.

5.1. Versuchsaufbau

Für alle durchgeführten Experimente stand als Anlagentechnik ein FANUC S-430F Roboter für die Handhabung einer Düring C 50 Servo Schweißzange zur Verfügung. Die Schweißzange bildete mit einer Genius Schweißsteuerung der Firma Harms & Wende das Schweißsystem. Für die Servo-Widerstandspunktschweißzange sowie für die Schweißsteuerung sind die technischen Daten im Anhang C hinterlegt.

Da das Schweißsystem über keinerlei Schnittstellen verfügte, um Prozessdaten auszugeben bzw. abzugreifen, wurde ein Messsystem aufgebaut, womit der Prozess dokumentiert werden konnte. Dieses war unter der Maßgabe der Umsetzbarkeit technisch vollständig autonom vom Schweißsystem und ist sowohl hardware- als auch softwareseitig erweiterbar.

Aus eigenen Voruntersuchungen [139] [138] und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Kapitel 3 haben sich für den Verschleißvorgang acht repräsentative Größen herausgestellt. Diese sind in der ersten Spalte in Tabelle 5.1 aufgeführt. Weitere Messgrößen, die nur partiell aufgezeichnet werden, sind der Schweißstrom, ermittelt über Hall-Sensoren, sowie die Ultraschalltransmission. In Abbildung C.1 im Anhang ist der in dieser Arbeit erarbeitete zugehörige Schaltplan für die acht maßgebenden Kanäle zusammengestellt. An der Goldammer-Messkarte treffen die analogen Signale der Sensoren, Signalverstärker und

Signalwandler ein, werden galvanisch voneinander getrennt und mit 20 kHz aufgezeichnet. Das speziell für den Versuchsstand im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messprogramm, dargestellt in Abbildung C.2 im Anhang, basiert auf der Software LabView (Version 2010 und später), bündelt alle Messwerte und versieht diese mit Meta-Daten, zu welchen u. a. Nutzereingaben gehören. Alle Messwerte werden unverändert abgespeichert. Für Analysen können diese nachträglich durch kalibrierte Skalierungsfunktionen (zweite Spalte in Tabelle 5.1) und durch Signalfilter (dritte Spalte) zur Darstellung in Diagrammen und zur visuellen Analyse aufbereitet werden. Der Signalfilter eliminiert weitestgehend störende Einkopplungen durch den Mittelfrequenzinverter ($f = 2\text{ kHz}$), den Servomotor des Roboters ($f = 4\text{ kHz}$) und den Servomotor der Punktschweißzange ($f = 16\text{ kHz}$).

Tabelle 5.1.: Messgrößen für alle Standmengen- und Stufenversuche, inklusive zugehöriger Skalierungsfunktionen und Signalfilter

| Messgröße | Sensor | Skalierungsfunktion ^a | Signalfilter |
|---------------------------|---|--|--|
| Kühlwasser-durchfluss | Durchflussmessturbine Vision 2000, Firma BioTech | $3,59 \frac{l}{min \cdot V} \cdot SW - 0,22 \frac{l}{min}$ | |
| Kühlwasser-temp. Vorlauf | Thermoelement Typ K | $12,1 \frac{^{\circ}C}{V} \cdot SW - 5,8^{\circ}C$ | |
| Kühlwasser-temp. Rücklauf | Thermoelement Typ K | $12,0 \frac{^{\circ}C}{V} \cdot SW - 9,9^{\circ}C$ | Tiefpass 2. Ordnung mit unterer Grenzfrequenz von 200 Hz |
| Schweißspannung | HKS Sensor P100K/R galvanische Trennung | $0,994 \cdot SW - 0,002\text{ V}$ | |
| Elektrodenkraft | Piezoelektrisch via Kistler Typ 9031A | $1,08 \frac{kN}{V} \cdot SW - 0,18\text{ kN}$ | |
| Schweißstrom | HKS Sensor P100K/R kalibriert gemäß * | * $3,30 \frac{kA}{V} \cdot SW - 0,03\text{ kA}$ | |
| Elektrodenweg oben | Lasertriangulation Allsens AM300-25 Std | $2,41 \frac{mm}{V} \cdot SW - 0,05\text{ mm}$ | |
| Elektrodenweg unten | Lasertriangulation Allsens AM300-25 spez | $2,41 \frac{mm}{V} \cdot SW - 0,14\text{ mm}$ | |

^a $SW = \text{Signalwert}$.

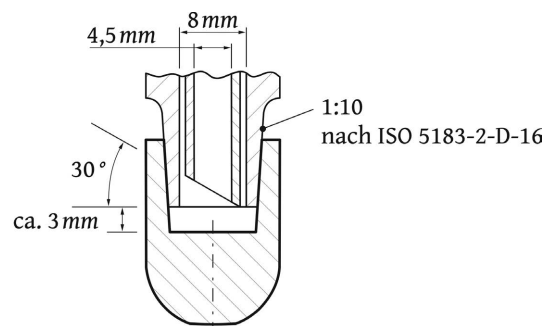
Während der Experimente zur Elektrodenstandmenge sind, wie aus Kapitel 3 bekannt, die Kühlbedingungen von großer Bedeutung. Diese werden durch die Eigenschaften von Durchflussmenge, Temperaturen und geometrischen Bedingungen in Abbildung 5.1 zusammengestellt. Als Kühlmedium wurde destilliertes Wasser mit Zusätzen gegen Algenbildung und Metallkorrosion verwendet, welches in einem rückgekühlten Kreislauf zirkuliert.

Zur Bearbeitung der Kontaktflächen wurden Elektrodenkappenfräser, bestehend aus einem AEG Fräskopf ZMK6FFKT3SD2 und einem AEG Zapfenmesser ZM59M3D, gemäß Abbildung C.3 verwendet. Nach der Bearbeitung lag stets eine Kontaktflächengeometrie

mit $d_2 = 5,5 \text{ mm}$, $R_1 = 50 \text{ mm}$ und $R_2 = 8 \text{ mm}$ gemäß ISO 5821 - F1 vor [82].

| Kühlbedingung | Einheit | Bereich |
|--------------------|-------------|---------|
| Durchflussmenge | l/min | 2 - 8 |
| Vorlauftemperatur | $^{\circ}C$ | 12 - 25 |
| Rücklauftemperatur | $^{\circ}C$ | 12 - 30 |

(a) Kühlwasserbedingungen



(b) Kühlbedingung an der Elektrode

Abbildung 5.1.: Kühlbedingungen während der Experimente

5.2. Versuchsplanung

Ausgangspunkt der Versuchsplanung sind die vier Zielstellungen aus Kapitel 1, deren Lösungen experimentell zu erarbeiten sind. Die dazu notwendigen Untersuchungen werden nachfolgend systematisch durch eine Werkstoff- und Prozessparameterauswahl eingegrenzt.

5.2.1. Werkstoffauswahl - Bleche und Elektroden

Als Stahlwerkstoffe kamen vier unterschiedliche Erzeugnisse zum Einsatz. Die ersten drei aus Tabelle 5.2 werden der Gruppe kontinuierlich schmelztauchveredelter Stahlbleche zugeteilt und finden breite Verwendung beim Kaltumformen. Es handelt sich also vorrangig um form- und konturgebende Außenbleche. Die Gründe ihrer Verwendung für diese Arbeit lagen neben der hohen Verbreitung auch besonders in der großen Verfügbarkeit und im sehr gut auswertbaren Bruchbild nach Meißelprüfungen. Zur Korrosionsverringerung waren die kaltumformbaren Stähle jeweils mit einer Auflagenmasse von $100 \text{ g}/\text{m}^2$ feuerverzinkt. Weitere Versuche erfolgten mit einem borlegierten Vergütungsstahl. Dieser zeichnet sich durch eine gute Umformbarkeit im warmgewalzten Zustand und eine ausgeprägt hohe Festigkeit nach einer Wärmebehandlung aus, zwei Gründe für einen Einsatz in Sicherheitszellen von Fahrzeugstrukturen. Um Zunderbildung bei der Warmumformung zu vermeiden und keine Schutzgasatmosphäre erforderlich werden zu lassen, hat der Stahl eine Schmelztauchbeschichtung aus einer Aluminium-Silizium-Legierung mit einer Auflagenmasse von $150 \text{ g}/\text{m}^2$.

Tabelle 5.2 ordnet den normierten Stahlbezeichnungen die jeweilige Werkstoffnummer zu und ergänzt in dritter Spalte die Blechdicke nach Herstellerangabe. Die Schwankungsbreiten bei der Blechdicke wurden im Rahmen dieser Arbeit aus stichprobenartigen Messungen vor Versuchsbeginn ermittelt. Aus den mechanischen Kennwerten der letzten drei Spalten

lassen sich die oben beschriebenen Verwendungszwecke der Werkstoffe ableiten. Tabelle 5.3 ergänzt die Beschichtungsdicken, welche mit einem magnetinduktiven Verfahren ermittelt wurden.

Tabelle 5.2.: Mechanische Kennwerte und Blechdicke der verwendeten Stahlbleche

| Kurzname | Werkstoffnummer | Blechdicke | Dehngrenze $R_{p0,2}$ | Zugfestigkeit R_m | Bruchdehnung A_{80} |
|------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| | | <i>mm</i> | <i>MPa</i> | <i>MPa</i> | % |
| DX53D+Z100 [59] | 1.0355 | 1,0 ^{+0,02} _{-0,01} | 140 – 260 | 270 – 380 | ≥30 |
| DX54D+Z100 [59] | 1.0306 | 1,5 ^{+0,04} _{-0,02} | 120 – 220 | 260 – 350 | ≥36 |
| HX300LAD+Z100 [58] | 1.0932 | 2,0 ^{+0,07} _{-0,07} | 300 – 380 | 380 – 480 | ≥23 |
| 22MnB5+AS150 presshart | 1.5528 | 1,5 ^{+0,06} _{-0,05} | 950 – 1250 | 1300 – 1650 | ≥4,5 |

Tabelle 5.3.: Gemessene Beschichtungsdicken bei den verwendeten Stählen

| | DX53D+Z100 | DX54D+Z100 | HX300LAD+Z100 | 22MnB5+AS150 presshart |
|-----------|------------|------------|---------------|-------------------------|
| Messwerte | 8,2 ± 1,6 | 8,0 ± 1,0 | 8,4 ± 2,8 | 25 ± 0,8 bis 32,2 ± 0,9 |

Die bei den schmelzflüssigen Verbindungen relevante chemische Zusammensetzung und Schmelztemperatur (Solidus-Temperatur) zeigt Tabelle 5.4 für alle eingesetzten Stahlbleche.

Tabelle 5.4.: Hauptlegierungselemente der verwendeten Stahlbleche; die jeweils zweite Zeile wurde mit standardfreiem Röntec Detektor an einem JEOL-T330 ermittelt

| Kurzname | C | Si | Mn | Cr | Mo | P | S | Al | B | Fe | Solidus ^b |
|----------|-------------------------|------|------------|------|------|------|------|------|-------|---------|----------------------|
| | max. Massenanteile in % | | | | | | | | | | °C |
| DX53D | 0,12 | 0,50 | | | | 0,10 | 0,04 | | | ≥98,3 | 1403 |
| | | | 0,3 ± 0,15 | | | 0,0 | 0,0 | | | 96 ± 8 | |
| DX54D | 0,12 | 0,50 | | | | 0,10 | 0,04 | | | ≥98,3 | – |
| HX300LAD | 0,11 | 0,50 | 1,00 | | | | 0,02 | 0,02 | 0,01 | ≥98,0 | 1496 |
| 22MnB5 | 0,25 | 0,40 | 1,40 | 0,35 | 0,35 | 0,02 | 0,00 | 0,06 | 0,005 | ≥97,1 | 1533 |
| | | 0,0 | 1,5 ± 0,4 | | | | | 0,0 | | 97 ± 10 | |

^b Berechnet mit Thermo-Calc unter Einsatz von Datenbankversion TCFE6.

An den vier Stahlwerkstoffen wurden Standmengen von insgesamt elf Elektrodenwerkstoffen, zusammengestellt in Tabelle 5.5, ermittelt. Sieben von diesen waren in der che-

mischen Zusammensetzung identisch. Ihr Unterschied lag in der Kornstruktur. Die Normangaben für die Elektrodenherstellung aus Abschnitt 2.1.3 werden zur besseren Übersichtlichkeit in Spalte Zwei aufgeführt. In der ersten Zeile ist der im Karosseriebau als Standardlegierung anzutreffende CuCr1Zr-Elektrodenwerkstoff aufgeführt. Die erst in jüngerer Zeit entwickelten Dispersionslegierungen folgen mit vier Varianten. Sie dienen dazu, der Zielstellung III dieser Arbeit nachzugehen. Im unteren Teil der Tabelle schließt die Zusammenstellung mit sechs modifizierten CuCr1Zr-Legierungen. Diese wurden im Rahmen der Arbeit hergestellt, um Zielstellung II zu untersuchen. Es wird vermutet, dass die Vorgaben zum CuCr1Zr-Gefüge in der ISO 5182 [81] nicht für das Schweißen verzinkter Bleche optimiert ist. Die Härtewerte in Tabelle 5.5 sind sowohl nach Vickers wie auch nach Brinell bestimmt worden. Die Brinell-Härtewerte stammen vom Elektroden-Hersteller, die Vickers-Härtewerte wurden selbst ermittelt.

Tabelle 5.5.: Bezeichnungen, Hauptlegierungselemente und Eigenschaften der verwendeten Elektrodenwerkstoffe

| Bezeichnung | ISO 5182 Nr. [81] | Nominale chem. Zusammensetzung | Härte | | El. Leitfähigkeit | | Erweichungs- temperatur |
|-----------------------|----------------------|--|------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | | Norm | gemessen | Norm | gemessen | |
| | | % | <i>HV</i> 30 | <i>HV</i> 0,1 | <i>MS/m</i> | <i>MS/m</i> | °C |
| CuCr1Zr ^c | A 2/2 | Cr 0,5 – 1,4; Zr 0,02 – 0,2; Cu | ≥140 | 196 ±15 | ≥43 | 45,2 | 500 |
| Nitrode ^d | C 20/1 | Al ₂ O ₃ 1,1; Cu ^e | 140 ^e | – | 45,2 ^e | 46,5 | >500 ^e |
| Discup C3/30 | – | Al ₂ O ₃ , B, C, Cu ^f | 120 ^f | – | 51,5 ^f | 48,3 | >800 ^f |
| Discup C3/60 | – | Al ₂ O ₃ , B, C, Cu ^f | 147 ^f | – | 47 ^f | 47,3 | >800 ^f |
| Discup C3/80 | – | Al ₂ O ₃ , B, C, Cu ^f | 157 ^f | – | 44 ^f | 45,1 | >800 ^f |
| CuCr1Zr-.. | | | | <i>HBW</i> ^g | | <i>MS/m</i> ^g | |
| ..mod-1 ^h | – | entspr. CuCr1Zr | – | 0 | – | – | – |
| ..mod-3 ^h | – | entspr. CuCr1Zr | – | – | – | ++ | – |
| ..mod-5 ^h | – | entspr. CuCr1Zr | – | ++ | – | + | – |
| ..mod-6 ^h | – | entspr. CuCr1Zr | – | – | – | – | – |
| ..mod-8 ^h | – | entspr. CuCr1Zr | – | ++ | – | 0 | – |
| ..mod-20 ^h | – | entspr. CuCr1Zr | – | 0 | – | ++ | – |

^c Elmedur X der Firma Duro Metall GmbH.

^d Die vollständige Bezeichnung lautet für alle Erwähnungen: LUVATA Nitrode.

^e Aus [40] entnommen.

^f Aus [156] entnommen. Chemische Zusammensetzung für C3/30 und C3/60 siehe Tabelle C.3.

^g Relative Angabe zwischen den sechs Werkstoffen in fünf Stufen eingeteilt, – – – =sehr niedrig, – – =niedrig, 0 =mittel, + =hoch, ++ =sehr hoch, $HB = 0,95 \cdot HV$.

^h Elbrodur[®] der Firma KME Germany GmbH & Co. KG [177].

Alle in der siebten Spalte von Tabelle 5.5 aufgeführten elektrischen Leitfähigkeiten wurden durch eine Wirbelstromprüfung bestimmt. Zur Vorbereitung gehörte es, die Elektroden-

Kontaktfläche planzudrehen, bis kein geometrischer Einfluss das Messergebnis mehr verfälschen konnte. Einen schematischen Aufbau sowie eine exemplarische Elektrode zeigt Abbildung 5.2.

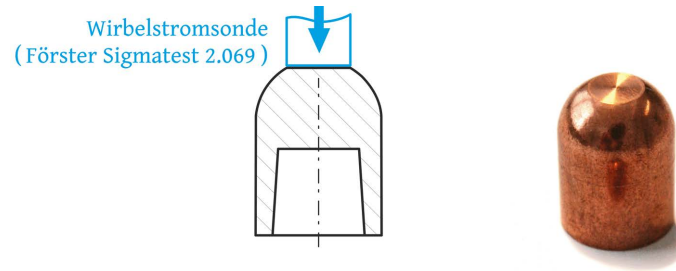


Abbildung 5.2.: Wirbelstromprüfung an Elektrodenkappen zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit, schematisch (links), abgedrehte Elektrode (rechts)

Geometrisch stimmen die verwendeten Elektroden mit den Maßen der standardisierten Form ISO 5821-F1-16-20-50-5,5-10,5-8 überein [82].

5.2.2. Prozessparameterauswahl und Versuchsmatrix

Um die Zielstellungen der Arbeit methodisch zu verfolgen, wurde eine Versuchsmatrix aufgestellt, welche sich entlang der verwendeten Stahlbleche auf die Tabellen 5.6, 5.7 und 5.8 aufteilt.

Tabelle 5.6.: Versuchsmatrix und Prozessparameterauswahl für Blechdickenkombination 2x DX53D+Z100 1,0 mm

| Blechdickenkombination | Elektroden | $\frac{F_{El}}{kN}$ | $\frac{t_w}{ms}$ | Besonderheiten | Zielstellung/en | Kapitel |
|--------------------------------|---------------|---------------------|------------------|----------------|-----------------|---------|
| 2x DX53D +Z100 1,0 mm | CuCr1Zr | 2,7 | 100 | startgefräst | | 6 |
| | CuCr1Zr | 2,7 | 300 | startgefräst | I, II | 6, 8 |
| | CuCr1Zr | 2,7 | 300 | ungefräst | | 6 |
| | Nitrode | 2,7 | 300 | ungefräst | I, | 8 |
| | Discup C3/60 | 2,7 | 300 | ungefräst | II | |
| | CuCr1Zr-mod-1 | 2,7 | 100 | startgefräst | | 7, 10 |
| | CuCr1Zr-mod-3 | 2,7 | 100 | startgefräst | | |
| | CuCr1Zr-mod-5 | 2,7 | 100 | startgefräst | III, | |
| | CuCr1Zr-mod-6 | 2,7 | 100 | startgefräst | IV | |
| | CuCr1Zr-mod-8 | 2,7 | 100 | startgefräst | | |
| CuCr1Zr-mod-20 | 2,7 | 100 | startgefräst | | | |

Der Werkstoff DX53D+Z100 aus Tabelle 5.6 stand in großer Menge zur Verfügung, wodurch auf diesen die meisten Experimente fallen. Diese weite Werkstoffkonstanz ermöglicht

zahlreiche Vergleiche. Zielstellungen III und IV konzentrieren sich ausschließlich auf diese Bleche.

Tabelle 5.7.: Versuchsmatrix und Prozessparameterauswahl für Blechdickenkombinationen 2x DX54D+Z100 1,5 mm und 2x HX300LAD+Z100 2,0 mm

| Blechdickenkombination | Elektroden | $\frac{F_{El}}{kN}$ | $\frac{t_w}{ms}$ | Besonderheiten | Zielstellung/en | Kapitel |
|-----------------------------------|---|---------------------|------------------|--|-----------------|---------|
| 2x DX54D +Z100 1,5 mm | CuCr1Zr | 2,7 | 300 | startgefräst | I | 6 |
| 2x HX300LAD +Z100 2,0 mm | CuCr1Zr Discup C3/30 Discup C3/30 Discup C3/60 Discup C3/60 Discup C3/80 | 3,0 | 1000 | startgefräst ungefräst startgefräst ungefräst startgefräst startgefräst | I I, II | 6 8 |

Tabelle 5.8.: Versuchsmatrix und Prozessparameterauswahl für Blechdickenkombination 2x 22MnB5+AS150 1,5 mm

| Blechdickenkombination | Elektroden | $\frac{F_{El}}{kN}$ | $\frac{t_w}{ms}$ | Besonderheiten | Zielstellung/en | Kapitel |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------|---|-----------------|---------|
| 2x 22MnB5 +AS150 1,5 mm | CuCr1Zr CuCr1Zr CuCr1Zr | 3,5 3,5 3,5 | 400 600 800 | $Q_{Kuehlwasser} = 6 l/min$ $Q_{Kuehlwasser} = 6 l/min$ $Q_{Kuehlwasser} = 6 l/min$ | I, (II) | 6, 9 |

5.3. Versuchsdurchführung

Die folgenden drei Abschnitte widmen sich den wiederkehrenden Erarbeitungen von Standmengenkurven und Verschleißbewertungen der Elektroden. Ausgehend von Wachstumskurven wird erläutert, welcher Schweißstrom ausgewählt wurde und wie es zu den Festlegungen der Stromzeiten und Elektrodenkräften kam. Die sich daran anschließenden Standmengenversuche folgen Vorgaben der ISO 8166 [83] und sind für eine Versuchsreihe in Stufen eingeteilt worden. Zum Versuchsende werden alle Elektroden vier Analysen unterzogen.

Die überwiegende Mehrheit der Versuche beginnt mit einem Startfräsvorgang, an welchen sich die Schweißungen mit einer Taktzeit von 20 *Punktschweißverbindungen/min* anschließen.

5.3.1. Wachstumskurven

Alle Wachstumskurven zeigen die kontinuierliche Veränderung des Punktdurchmessers (Ordinate) bei steigender Stromstärke (Abszisse) auf. Sie wurden gemäß der Vorgaben aus ISO 14327 [68] erarbeitet. Nachdem der zuvor gewählte Kontaktflächenzustand vorlag, begannen die Versuche unter definierter Elektrodenkraft und festgelegter Stromzeit mit einer Stromstärke, welche erfahrungsgemäß zu sogenannten Haftschweißungen führt. Ohne Berücksichtigung des Nebenschlusses wurden fünf bis acht Punktschweißverbindungen gleicher Einstellung geschweißt, bevor der Stromwert um $0,4\text{ kA}$ erhöht wurde. Sobald bei fünf aufeinander folgenden Schweißungen ein Spritzer auftrat, galt die Spritzergrenze als erreicht und die Stromstärke wurde bis zu einer spritzerfreien Punktfolge schrittweise um $0,2\text{ kA}$ gesenkt. Die erste Wachstumskurve war ermittelt. Für die Versuche kamen Prüfblechstreifen zum Einsatz, wie sie Abbildung 4.1 schematisch zeigt.

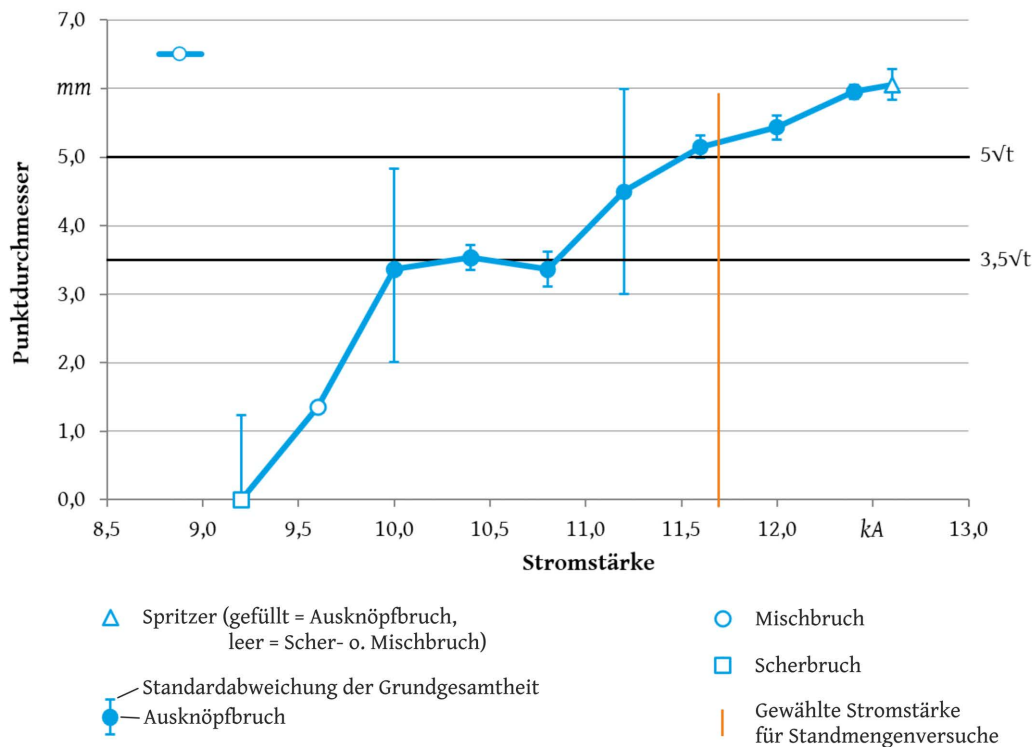


Abbildung 5.3.: Beispielhafte Wachstumskurve mit Legende

Um schließlich den Punktdurchmesser für die Wachstumskurven zu erhalten, wurden die Punktschweißverbindungen durch Meißelprüfungen gemäß ISO 10447 [61], ISO 14329 [69] und DVS 2916-1 [100] bewertet. Primärer Bezug der Normen und der Richtlinie ist die Vermessung des Punktdurchmessers d_w an der größten Stelle und der dazu 90° versetzten Position. Mit Beobachtung des Bruchbildes ergibt sich schließlich eine Wachstumskurve, wie sie Abbildung 5.3 darstellt. Zumeist wurden darauf folgend Wachstumskurven für eine zweite Stromzeit und für eine weitere Elektrodenkraft ermittelt, sodass sich ein Schweißbereich bestimmen ließ. Im Mittel wurden für einen Elektrodenwerkstoff an einer

Stahlblechkombination somit etwa 175 Punktschweißverbindungen geschweißt und geprüft.

5.3.2. Standmengen- und Stufenversuche

Alle Standmengenversuche entsprechen im Wesentlichen den Vorgaben der ISO 8166 [83] und greifen auf die ausgewählten Prozessparameter aus den Wachstumskurven zurück. Sowohl startgefräste wie auch unbearbeitete Elektroden wurden vor Versuchsbeginn durch 50 Schweißungen mit einer Stromstärke, welche das Kriterium $d_w = 3\sqrt{t}$ erfüllt, vorkonditioniert bzw. eingefahren. Anschließend begannen die Versuche zur Elektrodenstandmenge mit einer Stromstärke für $d_w = 5,2\sqrt{t}$. Abwechselnd werden dazu Verschleißbleche und Prüfblechstreifen nach Abbildung 4.1 geschweißt. Die Verschleißbleche haben typischerweise Abmessungen von $500 \times 360 \text{ mm}^2$ und die Prüfblechstreifen von $500 \times 30 \text{ mm}^2$. Nach jeweils genau 200 Schweißungen lag ein Prüfblechstreifen mit 13 Verbindungen vor. Von diesem wurden drei Schweißpunkte für spätere Untersuchungen abgetrennt und die restlichen neun Schweißpunkte mit reproduzierbaren Bedingungen wurden mittels Meißelprüfung zerstörend geprüft (siehe Abbildung 5.4).

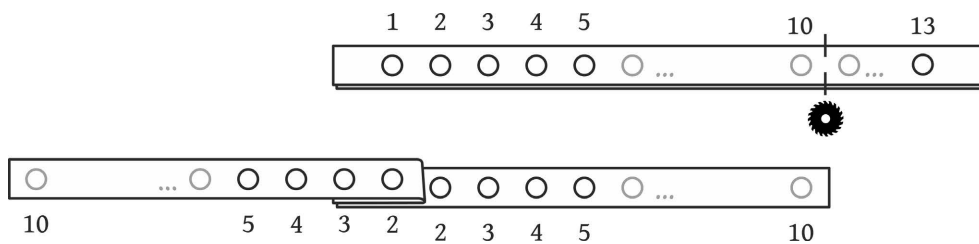


Abbildung 5.4.: Zerstörtes Prüfblech für Standmengen- und Stufenversuche, schematisch

Lagen die Punktdurchmesser des Prüfblechs über einem Wert von $d_w = 3,5\sqrt{t}$, so wurden die nächsten 200 Punktschweißverbindungen an Verschleiß- und Prüfblech geschweißt. Lagen drei von fünf aufeinander folgende Punktdurchmesser auf dem Prüfblech unterhalb von $d_w = 3,5\sqrt{t}$, galt die Elektroden-Standmenge als erreicht. Bei Stufenversuchen endete der beschriebene Verschleißversuch nach einer fest definierten Zahl von Punktschweißverbindungen und der bis dahin eingetretene Verschleißzustand der Elektrode wurde dokumentiert.

Nach dem Standmengenende wurden die gemessenen Punktdurchmesser in Form einer Standmengenkurve dargestellt, wie sie Abbildung 5.5 zeigt. Die Norm empfiehlt Mittelwerte für die Darstellung der Punktdurchmessergröße. In der vorliegenden Arbeit sind Mittelwerte jedoch nur zwischen den ungeprüften Punktschweißverbindungen miteinander verbunden, während von den Prüfblechstreifen alle Einzelmessungen aufgetragen sind. Diese Darstellung ermöglicht es, gleichzeitig den grundlegenden Verschleißverlauf und die reale Einzelwertstreuung zu erfassen. Um ein Maß für die Streuung des Standmengenendes selbst, später als Streubreite bezeichnet, zu erhalten, wurden soweit möglich für jede Versuchsnummer drei Standmengenkurven experimentell ermittelt.

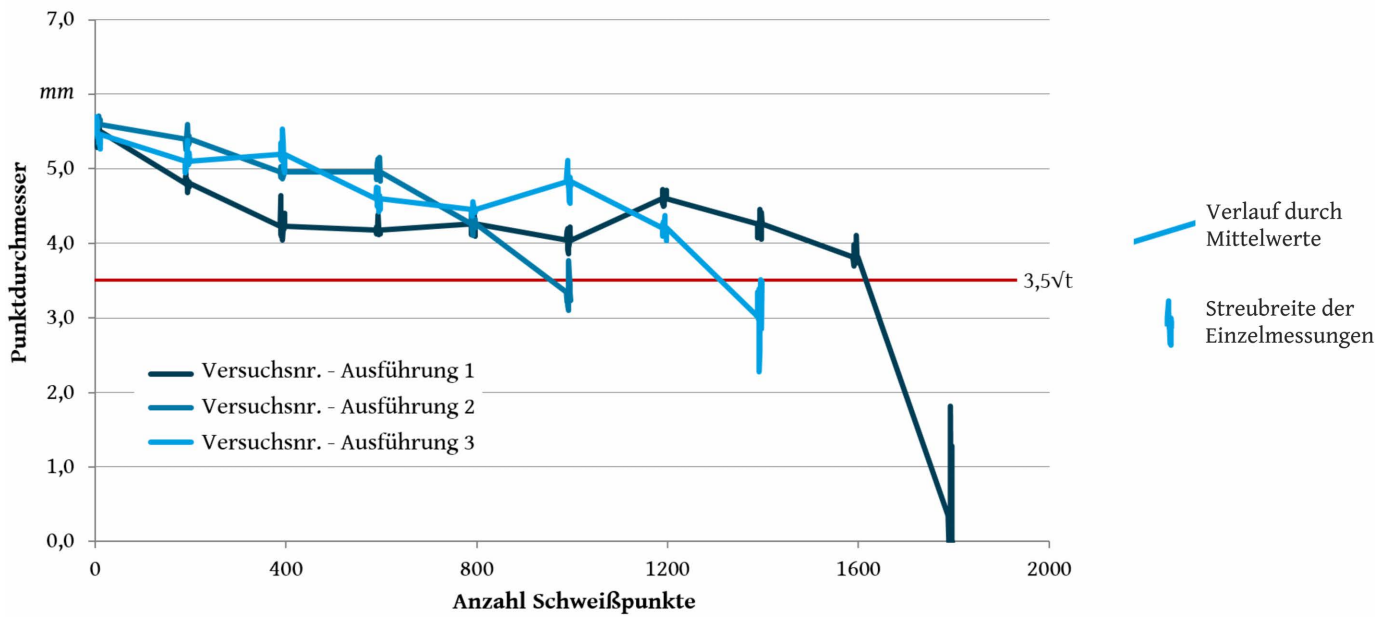


Abbildung 5.5.: Beispielhafte Standmengenkurve mit Legende

5.3.3. Verschleißdokumentation

Im Anschluss an die Standmengen- und Stufenversuche erfolgte eine auf die Elektrodenkappen konzentrierte Verschleißdokumentation. Noch im eingebauten Zustand wurden dazu die Elektrodenkappen mit einer innerhalb dieser Arbeit entwickelten Oberflächenvermessung dokumentiert (Abschnitt 5.3.3.1). Sobald die Elektroden ausgebaut waren, wurden sie unter einem weiteren Mikroskop in Echtfarben dokumentiert (Abschnitt 5.3.3.2) und anschließend einer metallographischen Analyse bestehend aus Härtemessung, Legierungsschichtausprägung und chemischer Zusammensetzung unterzogen (Abschnitt 5.3.4).

5.3.3.1. Kontaktflächenanalyse

Wie Abschnitt 3.1 darstellt, zeichnet sich der Elektrodenverschleiß am deutlichsten in den sich verändernden Kontaktflächen ab. Hierdurch wird der Elektrodenweg länger und der Elektrodeneindruckdurchmesser wächst. Beides führt zu einer verringerten Eindringtiefe. Eine Möglichkeit, die makroskopischen Veränderungen der Elektrodenkontaktfläche unmittelbar zu erfassen, existiert bislang nur auf Basis von Abdrücken mit Kohlepapier. Kleine Zerklüftungen und Tiefeninformationen sind damit jedoch nicht abbildbar. Neben den genannten makroskopischen Veränderungen sollte eine umfassende Kontaktflächenerfassung allerdings auch mikroskopische Veränderungen (min. $20 \mu m$) detektieren können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein dafür geeignetes Messverfahren herausgearbeitet und anschließend aufgebaut.

Die Recherche setzte bei den physikalischen Prinzipien zur Entfernungsbestimmung an. Abbildung C.4 (im Anhang) zeigt eine mögliche Klassifizierung von Verfahren zur

Geometrie- und Oberflächenvermessung, angelehnt an Gockel [132]. Aus den vier Hauptgruppen von Abbildung C.4 war nur die der optischen Verfahren geeignet. Die Hauptgruppe der mechanischen Verfahren schied aus, weil sich diese an den verdrängten Legierungsschichten verhaken. Ultraschallbasierte Verfahren entfielen, da Koppelmedien aufgrund der sehr geringen Schallkennimpedanz von Luft (ca. 3500 mal kleiner als Wasser) keine hinreichende Messgenauigkeit ermöglichen [243]. Radiologische Verfahren benötigen für eine räumliche Analyse die Möglichkeit, das betreffende Objekt allseitig zu durchstrahlen. Für die Nutzung an eingebauten Elektrodenkappen wäre eine Sonderkonstruktion nötig, wodurch dieses Verfahren unter der angedachten Aufgabenstellung als unpraktikabel und unökonomisch ausschied.

Aus der Hauptgruppe der optischen Verfahren (Abbildung C.4) ist schließlich die Untergruppe mit Nutzung bestimmter Lichtverhältnisse (siehe Abbildung 5.6) jener mit Nutzung unbestimmter Lichtverhältnisse vorzuziehen.

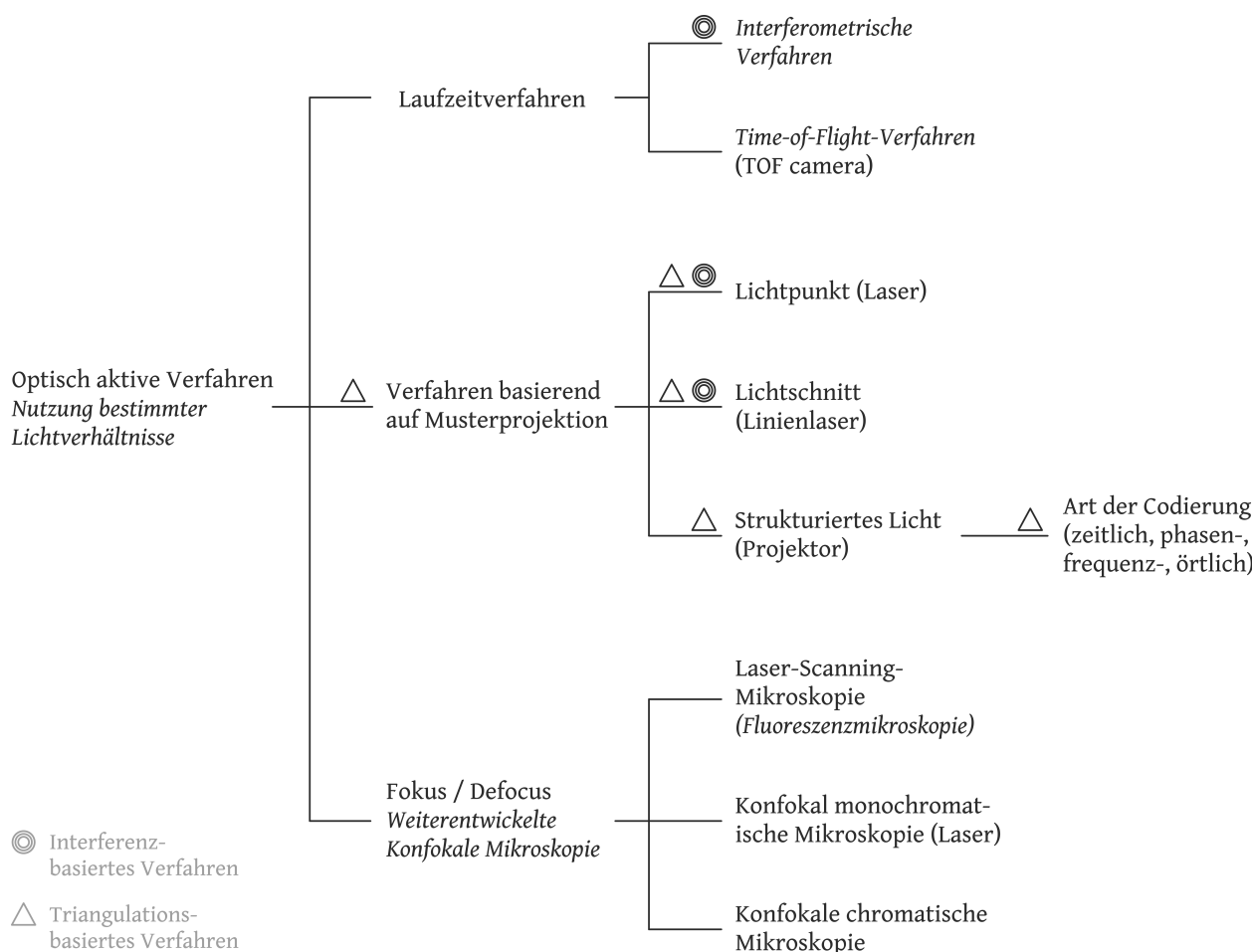


Abbildung 5.6.: Klassifizierung von Verfahren zur Geometrie- und Oberflächenvermessung beginnend mit der Untergruppe der optisch aktiven Verfahren, angelehnt an [132]

Ein Vergleich der eingegrenzten Verfahren wird mit Tabelle 5.9 vorgenommen. Zielgrö-

ßen darin sind gemäß Aufgabenstellung für eingebaute Elektrodenkappen das Messvolumen (typ. $16 \times 16 \times 8 \text{ mm}^3$) und die erreichbare Ortsauflösung (mind. $20 \mu\text{m}$). Recherchierte Kennwerte und eigene Experimente schränkten die Auswahl einsetzbarer Verfahren weiter ein. Interferometrische Verfahren konnten den Zielvorgaben nicht gerecht werden, da sie nur begrenzt bei rauen und diffus reflektierenden Oberflächen einsetzbar sind [92]. Darüber hinaus basieren alle bislang verfügbaren Methoden auf der Rekonstruktion der optischen Phase durch die Streifenverfolgungstechnik, wobei teilweise ein erheblicher Informationsverlust zu berücksichtigen wäre [236]. Das Time-of-flight-Verfahren in Tabelle 5.9 hat sich aufgrund des geringen Auflösungsvermögens als ungeeignet erwiesen, was auch Schaller u. a. bestätigen [257]. Die Laser-Scanning-Mikroskopie erlaubt sehr hohe Ortsauflösungen, ist aber vom Konzept her auf mehrschichtige, durchleuchtbare Strukturen ausgelegt, weshalb eine Oberflächendokumentation eingebauter Elektroden eine neu zu entwickelnde Optik erfordern würde. Somit ließ sich dieses Verfahren aus Kosten- und Entwicklungszeit-Gründen nicht einsetzen.

Tabelle 5.9.: Beispiele für jede Untergruppe der optisch aktiven Verfahren

| Verfahren | Produktbeispiel | Messvolumen bzw. Messbereich | Auflösungsvermögen |
|---------------------------------------|---|---|--|
| Interferometrische Verfahren | Konoskopie allg. [3] CSL 50 mm [121] | in z: mm-Bereich in z: 8 mm | nm- bis μm -Bereich x,y: $15 \mu\text{m}$ x: $1 \mu\text{m}$ |
| | Laser-Speckle [132] | in z: mm-Bereich | μm -Bereich |
| Time-of-flight-Verfahren | LMS-200 2D-Laserscanner [132] | in z: 0,1-10 m | $\pm 2,0 \text{ cm}$ in x,y,z |
| Laser-Scanning-Mikroskopie | LSM 520 Mikroskop [295] | $130 \times 130 \times 200 \mu\text{m}$ (100fach-Objektiv) | $\pm 100 \text{ nm}$ in x,y,z |
| Lichtpunkt (Laser) | LK-G32 [128] | punktuell in z: 20 mm | in x,y: $30 \mu\text{m}$ in z: $0,05 \mu\text{m}$ |
| Lichtschnitt (Laser) | scanCONTROL 2700-25 [256] | in x: 18 mm in z: 25 mm | in x: $39 \mu\text{m}$ in z: $4 \mu\text{m}$ |
| Musterprojektion (zeitlich codiert) | CAM3D [132] | $0,1 \times 0,1 \times 0,06 \text{ m}^3$ | $\pm 15 \mu\text{m}$ in x,y,z |
| Konfokal monochromatische Mikroskopie | Sensor RB 200 074 [234] | punktuell in z: 5 mm | in x,y: $8 \mu\text{m}$ in z: 200 nm |
| Konfokal chromatische Mikroskopie | Sensor LT-9030 [179] | punktuell in z: 2 mm | in x,y: $7 \mu\text{m}$ in z: $0,1 \mu\text{m}$ |

Bezüglich der Anschaffung vergleichsweise kostengünstig sind Lichtpunkt- und Lichtschnitt-Verfahren. Die beiden unterscheiden sich voneinander durch den einzusetzenden Detektor. Ihr Grundprinzip ist typischerweise jeweils die Triangulation eines Laserstrahls. Das kohärente Licht führt an stark reflektierenden Flächen zu Specklemustern und allgemein zu einer stark von der Oberflächenbeschaffenheit schwankenden Messunsicherheit, welche etwa drei Mal größer als die Auflösungsgrenze ist [243]. Makroskopische Kratzer auf den

Elektroden führen laut Erfahrungswerten einiger Sensorhersteller zu Messunsicherheiten von $30\ \mu\text{m}$ bis $40\ \mu\text{m}$ in der Tiefenaufösung. Die Musterprojektion mit zeitlich codierten Systemen ist robust und anwendungsbezogen exakt genug für die Elektrodenkontaktflächendokumentation. Allerdings übersteigt der Aufbau mit abgewinkelter Projektion für die Analyse von Elektroden im eingebauten Zustand kombiniert mit den Systemstandardkosten die möglichen Anschaffungskosten. Im Vergleich waren Lichtpunkt und Lichtschnitt etwa um Faktor sechs günstiger. Konfokale Verfahren heben sich von den anderen dahingehend ab, dass sie gerade bei sprunghaften Höhenunterschieden große Vorteile besitzen. Denn die Höheninformation wird unabhängig vom benachbarten Messpunkt und von der verwendeten Wellenlänge bestimmt [198]. Durch das Messprinzip hat die numerische Apertur einen quadratischen Einfluss auf die empfangene Signalintensität und die Wellenlänge einen linearen, wodurch die Topographie der Oberfläche nur einen sehr geringen Einfluss auf die Messunsicherheit nimmt. Dies ist bei Kontaktflächenzuständen von glänzend bzw. gefräst bis hin zu verzundert außerordentlich bedeutsam.

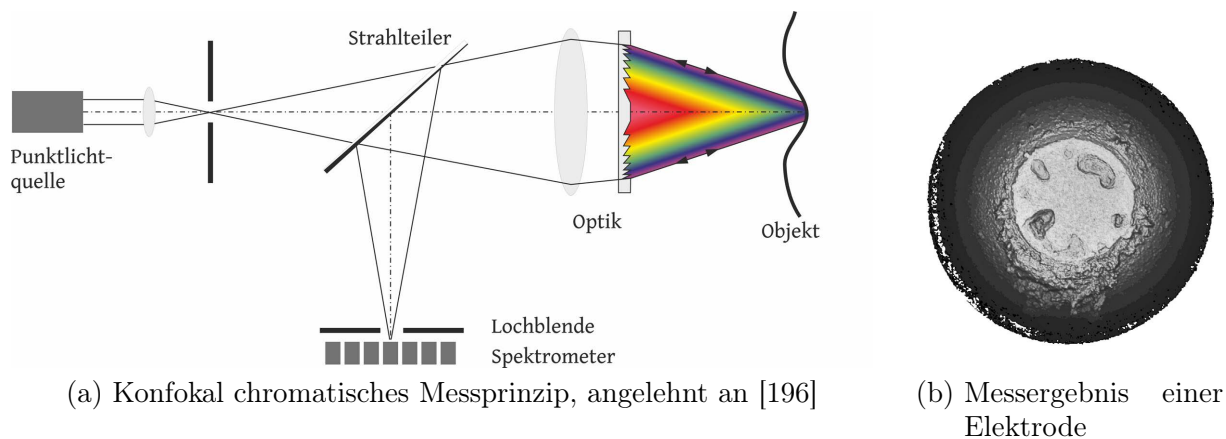


Abbildung 5.7.: Konfokal chromatisches Messprinzip und Beispielmessergebnis

Mit der chromatischen Variante der konfokalen Verfahren ist die Aufgabenstellung der Elektrodenkontaktflächenvermessung messtechnisch und ökonomisch effektiv lösbar. Einen Messaufbau dazu zeigt Abbildung 5.7a, in welchem das weiße Licht einer Punktlichtquelle durch eine Optik gleichmäßig auf einen festen Höhenbereich (z -Achse) aufgeteilt wird. Das vom Objekt zurückreflektierte Licht wird von einem Strahlteiler abgelenkt und trifft hinter einer Lochblende auf den Detektor, welcher die wellenlängenabhängige Intensität erfasst. Aus dieser kann anhand der Amplituden zurückgerechnet werden, wo der Messpunkt im Messraum lag. Mit einer motorisierten Bewegung in der xy -Ebene lassen sich Objekte dreidimensional erfassen. Ein Spiegel vor dem Sensor ermöglicht auch eingebaute Elektrodenkappen zu vermessen. Abbildung 5.7b zeigt ein Kontaktflächen-Messergebnis mit grauwertcodierter Höhe (Gouraud-Algorithmus), wie es in den späteren Experimenten (Kapitel 6 bis 8) verwendet wird. Aufgrund des ASCII-Datenformats sind die Messungen uneingeschränkt analysierbar.

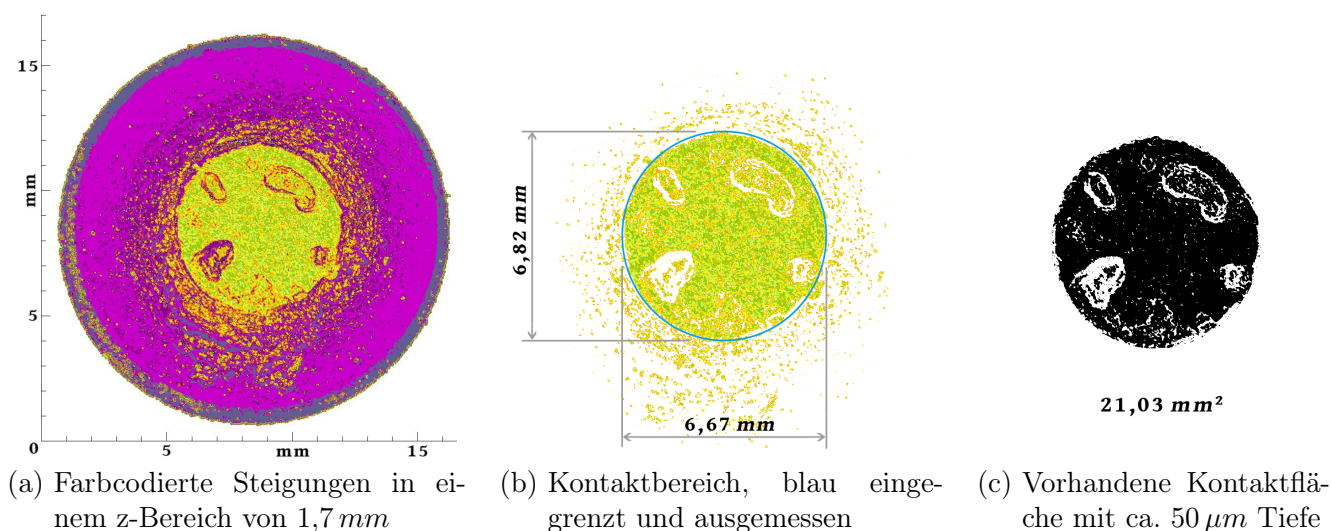


Abbildung 5.8.: Freistellung der Kontaktflächenmerkmale am Beispielmessergebnis

Genutzt werden die Datensätze der konfokal chromatischen Messung in den nachfolgenden Kapiteln, um folgende Merkmale der Kontaktfläche herauszuarbeiten. Zum Ersten wird, angelehnt an die Messung des Punktdurchmessers nach ISO 17677 [76], der Kontaktflächendurchmesser ermittelt. Dazu dient die aus dem Überlagern von Echtfarbbild (zinkfarben) und konfokal chromatischer Messung als Oval abstrahierte Begrenzung des vorwiegend ebenen Kontaktbereiches. In diesem wird aus der größten Länge sowie der 90° versetzten Länge der Kontaktflächendurchmesser ermittelt (Abbildung 5.8b). Zum Zweiten wird an der durch die blaue Markierung in Abbildung 5.8b herausstellbaren Fläche die vorhandene Kontaktfläche für eine Tiefenausprägung von etwa $50 \mu\text{m}$ bestimmt. Zur Visualisierung des Sachverhaltes wurde sich einer Interpolation benachbarter Höhenpunkte nach Gouraud [136] bedient. Ein achtzehnstufiger Farbraum wurde auf einen z-Bereich von $1,7 \text{ mm}$ derart skaliert, dass sich aller $10 \mu\text{m}$ die Farbe ändert. Diese Ausgangslage stellt Abbildung 5.8a dar. Werden jene fünf Farbwerte zusammengefasst, welche einer Kontakttiefe von $50 \mu\text{m}$ entsprechen, ergibt sich ein Kontaktflächenmesswert gemäß Abbildung 5.8c. Sollten weitere Kennzeichen an der Kontaktfläche auftreten, finden diese in einem dritten oder vierten Messwert Beachtung. Bei der Interpretation der Kontaktflächeninformationen in den nachfolgenden Kapiteln wird jeweils berücksichtigt, dass Blechverformung, Elektrodenschiefstellung und prozessbegleitendes Verkippen zu real deutlich kleineren kontaktierenden Flächen führen.

5.3.3.2. Bildgebende Dokumentation in Echtfarbe

Zur Dokumentation der Zustände, wie sie das menschliche Auge wahrnimmt, dienten eine Spiegelreflexkamera, ein Stereolichtmikroskop, ein Auflichtmikroskop und ein digitales Mikroskop. Bei der Spiegelreflexkamera handelte es sich um eine Nikon D5100 mit einem Tamron SP AF 17-50mm 2,8 Di II Objektiv. Das Stereolichtmikroskop stammte aus der

Serie Stemi der Firma Carl Zeiss mit Vergrößerungen von 0,4- bis 5,0fach. Zur Ausmessung diente das Auflichtmikroskop der Firma Carl Zeiss mit der Produktbezeichnung Neophot 2. Es verfügt über Hell- und Dunkelfeldbeleuchtung bei Vergrößerungen von 50- bis 1000fach. Weiterhin wurde das digitale Mikroskop der Firma Keyence (VHX-1000) genutzt, welches sehr gleichmäßig beleuchtete Abbildungen mit 1- bis 50facher Vergrößerung erlaubte.

Abbildung 5.9 stellt in den ersten Teilbildern a) und b) die Unterschiede von konfokal chromatischen Höheninformationen und Echtfarbinformationen gegenüber. In zahlreichen Fällen reflektierten die Kontaktflächen der Elektroden nur gering, sodass eine quantitative Auswertung der Kontaktflächengeometrie grundlegend erst durch eine Vermessung möglich wurde.

Die Echtfarbendokumentation wurde eingesetzt, um den Elektrodenzustand vor der metallographischen Analyse zu dokumentieren und damit die Durchmesserbestimmung gemäß Abbildung 5.8b) durchzuführen. Weiterhin diente diese Dokumentationsmethode zur qualitativen und teilweise quantitativen Analyse der Bruchbilder (Abbildung 5.9c) und zur Untersuchung von Querschliffen (z. B. Legierungsschichtausprägung).



Abbildung 5.9.: Echtfarbdokumentation für Elektrodenkontaktfläche und Bruchbild

5.3.4. Metallographische Analyse

Aus den in Abschnitt 3.1 erarbeiteten relevanten Untersuchungsmethoden wurden die Mikrohärteprüfung, die Analyse der Legierungsschichtausprägung und die Untersuchung zur Legierungsschichtzusammensetzung für die eigenen Experimente gewählt. Die Mikrohärteprüfung dient dazu, die Entfestigung der Elektrode zu bestimmen, wodurch sich unter anderem Aussagen zu Randschichthärtungen formulieren lassen. Über die Legierungsschichtausmessung werden innerhalb der Querschnittebene Legierungstiefen- und Verformungszustände an der Kontaktfläche erfasst, welche durch die anschließende Legierungsschichtzusammensetzung quantifiziert werden. Aus der Verbindung aller metallographi-

schen Ergebnisse werden Verschleißmechanismen formuliert.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, vor metallographischen Analysen die Elektroden noch im eingebauten Zustand mit einer vertikalen Kerbe wegweisend vom Zangenfenster zu kennzeichnen (Abbildung 5.10). 90° versetzt zur Kerbe und damit auch 90° versetzt zum sogenannten „Schieben“ der Zange befindet sich kurz vor der Kontaktflächenmitte die Schnittebene (Abbildung 5.10). In Epoxidharz mit niedriger Viskosität eingebettet und dann entlang besagter Schnittebene getrennt ergaben sich gute Randschärfen. Nachdem der Querschnitt durch Schleifen bis zur Kontaktflächenmitte abgetragen wurde, schloss die Präparation mit einem Feinpolieren.

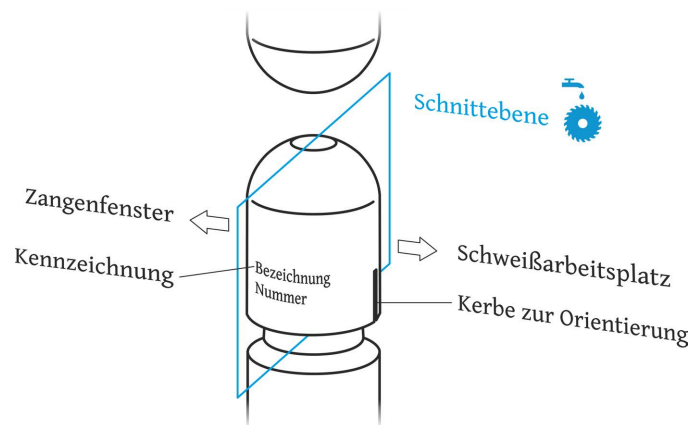


Abbildung 5.10.: Markierung und Kennzeichnungen an den Elektrodenkappen mit eingezeichneter Schnittebene, schematisch

5.3.4.1. Mikrohärtemessung

Die Mikrohärtemessung erfolgte stets an einem Härteprüfsystem M 400 H1 der LECO Instrumente GmbH.

Vor jeder Versuchsreihe wurde mit einem Prüfnormtal der Firma Hegewald & Peschke (172 HV 0,1) die Mikrohärte kalibriert. Eine Versuchsreihe entspricht jeweils einem der nachfolgenden Kapitel 6, 7, 8 und 10. Im Anschluss daran wurde am Elektrodenquerschliff die Vickers-Mikrohärte bei einer Prüfkraft von $0,1 \text{ kp}$ ($0,980665 \text{ N}$) entsprechend Abbildung 5.11 ermittelt. Die halbautomatische Messung beginnt mit einem Abstand zur Kontaktfläche vom zweifachen Kristall-Eindruckdurchmesser und schreitet um $0,5 \text{ mm}$ weiter bis zu einer Tiefe von $6,0 \text{ mm}$. Aus der Legende, rechts in Abbildung 5.11, geht dieser Sachverhalt schematisch hervor.

Mit der Mikrohärtemessung können Aussagen zur maximalen Entfestigungstiefe getroffen werden. Durch Stufenversuche lassen diese sich zusätzlich mit einer Entfestigungsgeschwindigkeit unterlegen und ermöglichen es schließlich, auf die notwendige Härte der Elektroden verweisen.

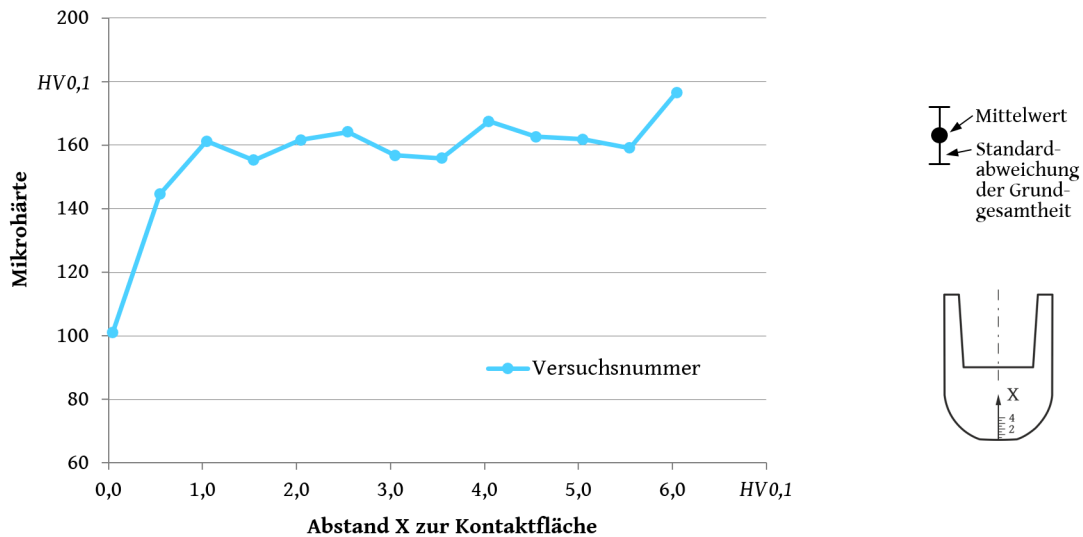


Abbildung 5.11.: Mikrohärtemessung, beispielhaftes Messergebnis mit Legende

5.3.4.2. Legierungsschichtausprägung

Die Verteilung der legierten Bereiche innerhalb der Kontaktzone lässt sich am metallographischen Schliff mittels des analytischen Rasterelektronenmikroskop abbilden. Hierzu wurde über ein automatisiertes Anheften von Einzelbildern (Stitching) der gesamte Querschnitt für die Analyse verfügbar gemacht, wie es Abbildung 5.12 an einem Beispiel verdeutlicht. Um die legierten Bereiche hervorzuheben wurden Farbverschiebungen und Tonwertkorrekturen verwendet. Alternativ wäre es möglich gewesen, eine Mikroätzung vorzunehmen. Auf diese wurde verzichtet, um die Beschreibung des Elektrodenzustandes durch lokal abgetragene Bereiche nicht zu verfälschen.

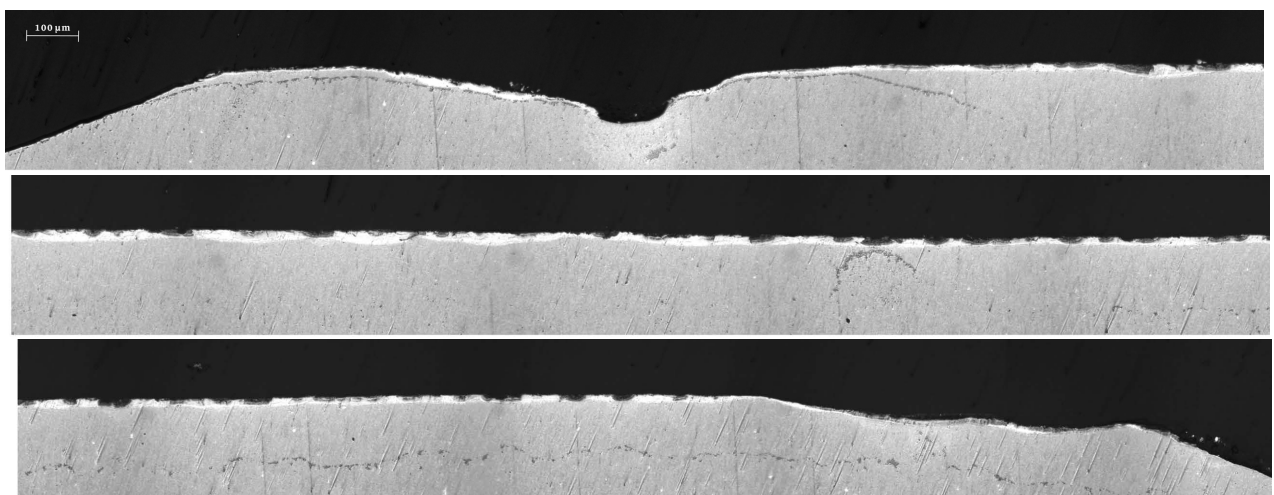


Abbildung 5.12.: Legierungsschichtausprägung, beispielhaftes Messergebnis (zur besseren Erkennbarkeit in drei Teile aufgetrennt)

Anhand der Legierungsschichtausprägung lassen sich äußere Merkmale (Beschaffenheit

der Kontaktfläche) und innere Merkmale (Legierungsschichttiefe und Elementverteilung) auswerten. Durch diese kann auf Diffusionsvorgänge geschlossen werden. Mit Kenntnis der Diffusionsvorgänge lassen sich wiederum Maßnahmen ableiten, diese gezielt zu optimieren.

5.3.4.3. Legierungsschichtzusammensetzung

Die Legierungsschichtzusammensetzung wurde über eine standardlose, geeichte Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) an Geräten im Institut ermittelt. Die eingesetzten Detektoren stammten von der Firma Röntec bzw. der Firma Bruker (Typ XFlash 6|10), welche an einem Rasterelektronenmikroskop JEOL-T330 bzw. an einem JEOL-JSM6300 angeflanscht waren.

Zur Visualisierung wurden Abbildungen mit Sekundärkontrast (kurz SE-Bild) und mit Rückstreuelektronenkontrast verwendet (kurz BSE-Bild). Zur Quantifizierung wurden Linienscans (rote Linie im SE oder BSE-Bild) angefertigt. Die Intensität der $K\alpha$ -Linie eines Elements $I(K\alpha)$ ist in guter Näherung (CASTAING'sche Näherung) zum Masse%-Anteil proportional. Die späteren Analysen bauen darauf auf. Quantifizierungen erfolgten anhand Peakidentifizierungen unter Einsatz vordefinierter Berechnungsverfahren. Ein Beispiel zur Bestimmung der Legierungsschichtzusammensetzung zeigt Abbildung 5.13. Die Deutung der metallischen Mehrstoffsysteme erfolgt mit Zustandsdiagrammen (von Zweistoffsystemen) für die jeweiligen Proben in den Kapiteln 6, 7 und 8.

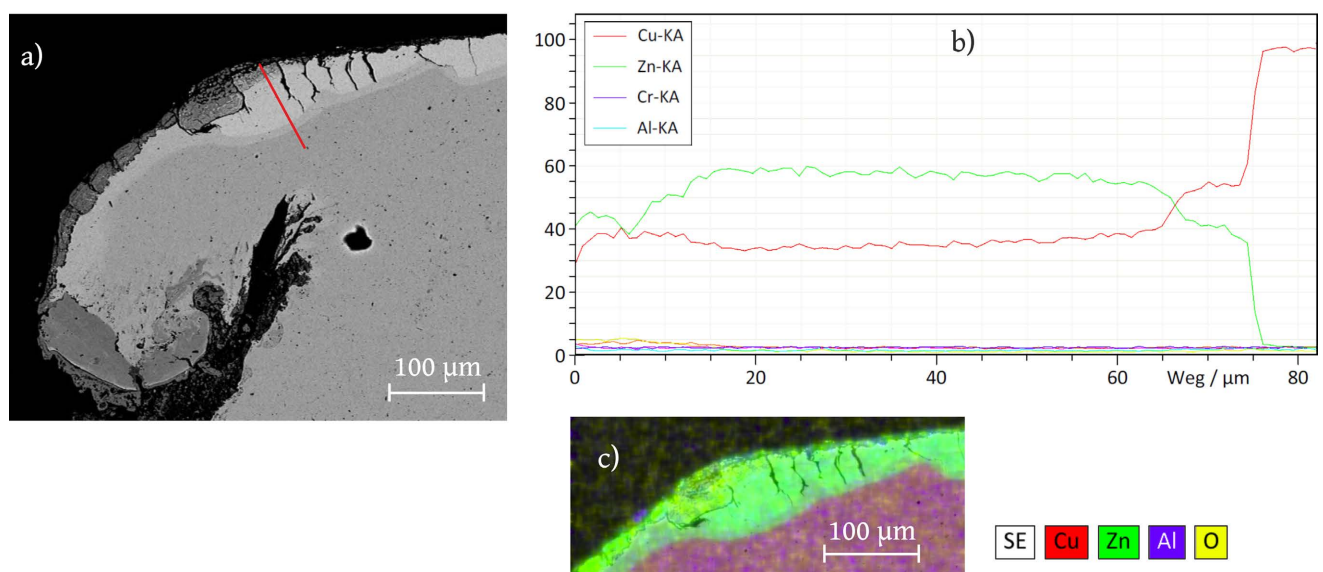


Abbildung 5.13.: Legierungsschichtzusammensetzung, a) SE-Bild, b) beispielhaftes EDX-Messergebnis mit Angaben des Massenanteil $w(A)$ in %, c) FalschfarbenedX-Bild

Aus den Informationen der sich gebildeten Mischkristalle, deren Häufigkeit und Verteilung lassen sich Diffusionsvorgänge in den Randschichten erkennen und Rückschlüsse auf Einflüsse durch Wärme (Stromstärke), Zeit und Druckkraft ziehen. Mit Hilfe der

Rückschlüsse vom Schweißvorgang lassen sich anschließend Prozessverbesserungen ableiten. Moderne analytische Rasterelektronenmikroskope erlauben lokal stärker eingegrenzte quantitative Elementkonzentration, um damit den Sachverhalte der Diffusion detaillierter zu erforschen.

6. Verschleiß und Standmenge von Standard-CuCr1Zr-Elektroden

Das Legierungsverhalten von CuCr1Zr-Elektroden an verschiedenartig verzinkten Stählen ist bereits umfangreich untersucht worden, wie Abschnitt 3.1 belegt. Zugleich wird durch den Abschnitt 3.3 ersichtlich, welche große Ergebnisstreuungen zwischen grundlegend gleichartigen Experimenten auftreten. So werden für ballige CuCr1Zr-Elektroden an feuerverzinkten Stählen Standmengen von 315 [34], über 640 [202] und 700 [36] bis hin zu 1675 [174] Punktschweißverbindungen ermittelt. Die Einzelblechdicke lag dabei stets bei etwa $0,8\text{ mm}$. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit eigene Erkenntnisse für die Bezugskonstellation von CuCr1Zr-Elektroden an verzinkten Stählen angefertigt, welche den ersten inhaltlichen Schwerpunkt dieses Kapitels bilden. Deutlich weniger Erkenntnisse liegen für die Konstellation von CuCr1Zr-Elektroden beim Punktschweißen von AlSi-beschichteten Stählen vor, wie aus Abschnitt 3.1 hervorgeht. Aufgrund dessen sollen durch den zweiten Schwerpunkt des Kapitels weitere Aspekte ergänzt werden. In Tabelle 6.1 sind alle Standmengenversuche der zwei Schwerpunkte wiedergegeben. Aus diesen geht ein nahtloser Vergleich für die Einflüsse von Elektrodenzustand, Stromzeit, Blechdicke und Blechbeschichtung hervor.

Tabelle 6.1.: Versuchsmatrix für Elektroden aus CuCr1Zr mit Prozessbedingungen (Teil 1)

| Elektroden- werkstoff | zustand | oberes & unteres Stahlblech | F_{El} | t_w | Versuchskennung |
|--------------------------|--------------|-----------------------------|----------|-------|------------------|
| | | | kN | ms | |
| CuCr1Zr | startgefräst | DX53D+Z100 1,0 mm | 2,7 | 100 | CuCr1Zr-1-100 |
| | startgefräst | | 2,7 | 300 | CuCr1Zr-1-300 |
| | ungefräst | | 2,7 | 300 | CuCr1Zr-ug-1-300 |
| | startgefräst | DX54D+Z100 1,5 mm | 2,7 | 300 | CuCr1Zr-1,5-300 |
| | startgefräst | HX300LAD+Z100 2,0 mm | 3,0 | 1000 | CuCr1Zr-2-1000 |
| | startgefräst | 22MnB5+AS150 1,5 mm | 3,5 | 400 | CuCr1Zr-22Mn-400 |
| | startgefräst | | 3,5 | 600 | CuCr1Zr-22Mn-600 |
| | startgefräst | | 3,5 | 800 | CuCr1Zr-22Mn-800 |

6.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix

Die nachfolgenden Wachstumskurven sind definiert durch die Prozessbedingungen und Prozessparameter aus Tabellen 6.1 und 6.2.

Tabelle 6.2.: Ergänzende Versuchsbedingungen für CuCr1Zr-Elektroden als Versuche der Wachstumskurve, Teil 2 zu Tabelle 6.1

| Versuchskennung Wachstumskurve | | CuCr1Zr- $i^a_{_wk}$ | CuCr1Zr- 2-1000_ $_wk$ | CuCr1Zr- 22Mn- $j^b_{_wk}$ |
|---|-------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Kühlwasserdurchfluss- -Menge $Q_{Kuehlwasser}$ | l/min | | 4 | 6 |
| -Temperatur $\vartheta_{Kuehlwasser}$ | $^{\circ}C$ | | für alle Versuche gilt 18 – 20 | |
| Vorhaltezeit $T_{squeeze}$ | ms | 150 | 500 | 20 |
| Nachhaltezeit $t_{F_{El,hold}}$ | ms | 150 | 500 | 200 |
| Taktzeit | $Verb./min$ | 20 | 5,4 | 20 |

^a $i = 1-100, 1-300, ug-1-300, 1,5-300.$

^b $j = 400, 600, 800.$

In Abbildung 6.1 zeigt sich für die ersten Wachstumskurven, welche zu 1,0 mm dicken DX53D+Z100-Blechen gehören, bei 100 ms Stromzeit ein flacher Anstieg zwischen Punktdurchmesser und Stromstärke. Dieser endet mit 11,4 kA leicht über dem Punktdurchmesser von $5,0 \sqrt{t}$. Für die Standmengenversuche wird gemäß einer Vorgabe aus der Industrie ein um 0,2 kA unter der Spritzergerne liegender Stromwert verwendet. Bei 300 ms Strom-

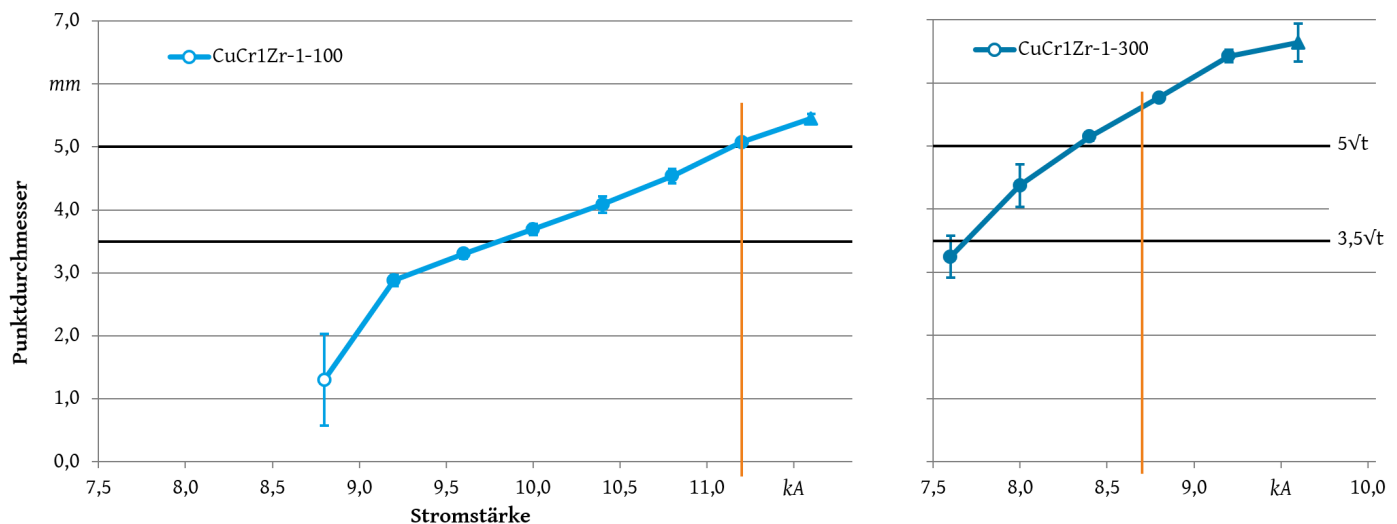


Abbildung 6.1.: Wachstumskurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an 1,0 mm DX53D bei 100 ms und bei 300 ms Stromzeit

zeit wird der Anstieg des Punktdurchmessers deutlich größer, wie das rechts angeordnete Diagramm in Abbildung 6.1 aufzeigt. Zugleich steigen Schweißbereich und maximal er-

reichbarer Punktdurchmesser. Somit kann als Startbedingung für Standmengenversuche der obere Grenzwert von $5,5\sqrt{t}$ gemäß ISO 8166 [83] gewählt werden.

Auch für ungefräste Elektroden ist ein solcher Startwert möglich, wie Abbildung D.1 (im Anhang) belegt. Interessanterweise sinkt der Anstieg des Punktdurchmessers im Diagramm der Wachstumskurve fast auf das Niveau der startgefrästen Elektroden bei 100 ms Stromzeit. Ebenfalls sinken der Beginn der Spritzergrenze und der maximal erreichbare Punktdurchmesser. Dafür steigt allerdings der nutzbare Schweißstrombereich.

Die Wachstumskurve für $1,5\text{ mm}$ dicke DX54D-Bleche ist in Abbildung D.1 des Anhangs hinterlegt und zeigt eine ähnliche Steilheit, wie sie bei $1,0\text{ mm}$ DX53D bei 300 ms Stromzeit anzutreffen ist. Jedoch sinken Spritzergrenze und maximal erreichbarer Punktdurchmesser drastisch ab. Da hierdurch der Punktdurchmesser $5,5\sqrt{t}$ nicht erreicht war, erfolgten die Standmengenversuche mit der Stromstärke, welche an den $1,0\text{ mm}$ dicke Blechen bestimmt wurde. Für die Versuchskennung CuCr1Zr-2-1000 wurde keine Wachstumskurve ermittelt, da Startparameter einer vorangegangenen Arbeit Anwendung finden [43]. In dieser entsprach der gewählte Strom einem Punktdurchmesser von $5\sqrt{t}$ für ungefräste Elektroden.

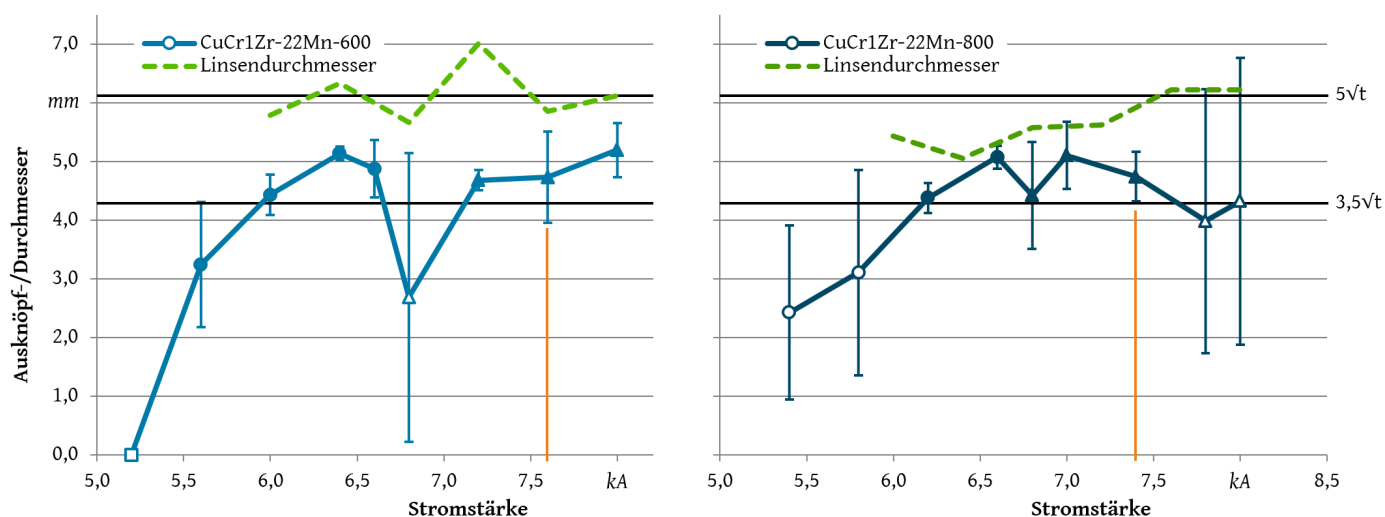


Abbildung 6.2.: Wachstumskurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an $1,5\text{ mm}$ 22MnB5+AS bei 600 ms und bei 800 ms Stromzeit, blau= d_w , grün= d_n

Der warmverfestigte Werkstoff 22MnB5 zeigt bei einer Einzelblechstärke von $1,5\text{ mm}$ und mit einpulsigen, rechteckigen Schweißstromverläufen stark diskontinuierliche Wachstumskurven. So wird beispielsweise bei 400 ms Stromzeit nur bei einem Stromwert der Mindestpunktdurchmesser spritzerfrei überschritten, was Abbildung D.2 entnommen werden kann. Dieses Verhalten des Durchmesserwertes ist auf eine Definition zurückzuführen, die in der Industrie noch weit verbreitet ist. So wird der Punktdurchmesser gemäß der Aussage „Beim Ausknöpfbruch und Mischbruch ist der Punktdurchmesser der mittlere Durchmesser der Grundfläche des ausgeknöpften Butzens“ [94] ermittelt. Bis zum Jahr 2009 floss ebendiese Aussage auch in andere Regelwerke ein (z. B. [99]). Je höher jedoch die

Festigkeit der verschweißten Stahlbleche ist, desto mehr Mischbrüche entstehen und desto klarer wird, dass es sich bei der eben aufgeführten Messung um den Ausknöpfdurchmesser d_p handelt. Dass Mischbrüche nicht zwangsläufig mit einer niedrigen Verbindungsfestigkeit zusammenhängen, wurde von Stahlherstellern und Anwendern nachgewiesen. Folglich sehen die seit 2014 erneuerten Regelwerke vor, in den Punktdurchmesser d_w durchgehend kristalline Bruchflächen aufzunehmen [95] [100]. Die hier dargestellten Ergebnisse orientieren sich an Vorgaben der Industrie für den Punktdurchmesser, betreffen de facto aber den Ausknöpfdurchmesser d_p .

Neben der nun verständlichen Streubreite der Ausknöpfdurchmesser bei 400 ms sind die kontinuierlich auftretenden Schweißspritzer ab 6,8 kA auffällig. Zur Ergänzung und besseren Greifbarkeit der Verbindungsqualität wurde zusätzlich der Linsendurchmesser d_n ermittelt und im Diagramm gestrichelt-grün dargestellt. Interpretieren lässt sich der Linsendurchmesser durch die Beschreibungen aus der DVS 2902-3 [95]. Darin heißt es, dass der Punktdurchmesser typischerweise 15 % größer als der Linsendurchmesser ist. Bei hochfesten Werkstoffen nähern sich die beiden Durchmesser, gemäß Regelwerk, einander an. In den Wachstumskurven für 600 ms und für 800 ms zeigt sich jedoch ein von diesen Beschreibungen abweichendes Verhalten von Ausknöpf- und Linsendurchmesser (Abbildung 6.2). Unabhängig von dieser Diskrepanz fällt die bei 6,7 kA über alle Stromzeiten hinweg sehr niedrig liegende Spritzergrenze auf. Ebenfalls auffällig verhalten sich die Linsendurchmesser, deren globales Maximum bei 600 ms Stromzeit erreicht zu sein scheint. In der Praxis werden Schweißspritzer akzeptiert, um durchweg Stromstärken für die Standmengenversuche in der Nähe eines Linsendurchmessers von $5\sqrt{t}$ auswählen zu können.

Tabelle 6.3.: Ergebnisse der Wachstumskurven und Stromstärken für Standmengenversuche (Ergänzung zu den Versuchsbedingungen)

| Versuchskennung | Stromstärke I_w für | | | Schweißstrombereich | $d_w = max$ |
|------------------|-----------------------|-------------|----------------|---------------------|-------------|
| | $d_w = 3,5\sqrt{t}^c$ | Standmenge | Spritzergrenze | | |
| | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>mm</i> |
| CuCr1Zr-1-100 | 9,8 | 11,2 | 11,4 | 1,6 | 5,1 |
| CuCr1Zr-1-300 | 7,9 | 8,7 | 9,6 | 1,7 | 6,5 |
| CuCr1Zr-ug-1-300 | 6,0 | 7,8 | 8,0 | 2,0 | 5,6 |
| CuCr1Zr-1,5-300 | 7,6 | 8,7 | 9,0 | 1,4 | 6,0 |
| CuCr1Zr-2-1000 | – | 7,5 | – | – | – |
| CuCr1Zr-22Mn-400 | 6,6 | 8,0 | 6,7 | – | – |
| CuCr1Zr-22Mn-600 | 6,0 | 7,6 | 6,6 | 0,6 | 5,1 |
| CuCr1Zr-22Mn-800 | 6,2 | 7,4 | 6,8 | 0,6 | 5,1 |

^c Bei 22Mn entsprechend $d_p = 3,5\sqrt{t}$.

Neben dem weitläufig bekannten Sachverhalt der steigenden Stromstärke für qualitätsgerechte Punktschweißverbindungen bei sinkender Stromzeit, geht aus Tabelle 6.3 insbe-

sondere der große schweißtechnische Unterschied zwischen verzinkten Stählen weicher Güte und hochfestem, warmausgehärteten Stahl mit AlSi-Beschichtung hervor. Die ausgeknöpften Anteile des Bruchbildes nehmen in dieser Betrachtung ab. Zugleich steigt die Schweißspritzerneigung erheblich. Gemäß ISO 14327 und ISO 8166 sind Schweißspritzer nicht erlaubt. Ohne Akzeptanz dieser ist es für das Schweißen von 22MnB5+AS jedoch nur schwer möglich, Prozessparameter für Serienprozesse festzulegen.

6.2. Standmengen

Die mit Tabelle 6.3 vollständig definierten Standmengen-Prozessparameter und Randbedingungen ergaben dreizehn Versuche. Neun davon fielen auf die oberen vier Versuchskennungen, bei welchen jeweils mindestens eine Wiederholung erfolgte. Die verbleibenden vier fielen auf die unteren vier Versuchskennungen. Die zur Verfügung gestellte Anzahl von Blechen ermöglichte jeweils einen Standmengenversuch.

Bei den dünnen Tiefziehblechen zeigt sich unter 100 ms Stromzeit ein unmittelbar beginnender und beinahe linear verlaufender steiler Abfall des Punktdurchmessers mit einer Standmenge von mindestens 552 Punktschweißverbindungen (Abbildung 6.3a). Die Streu-

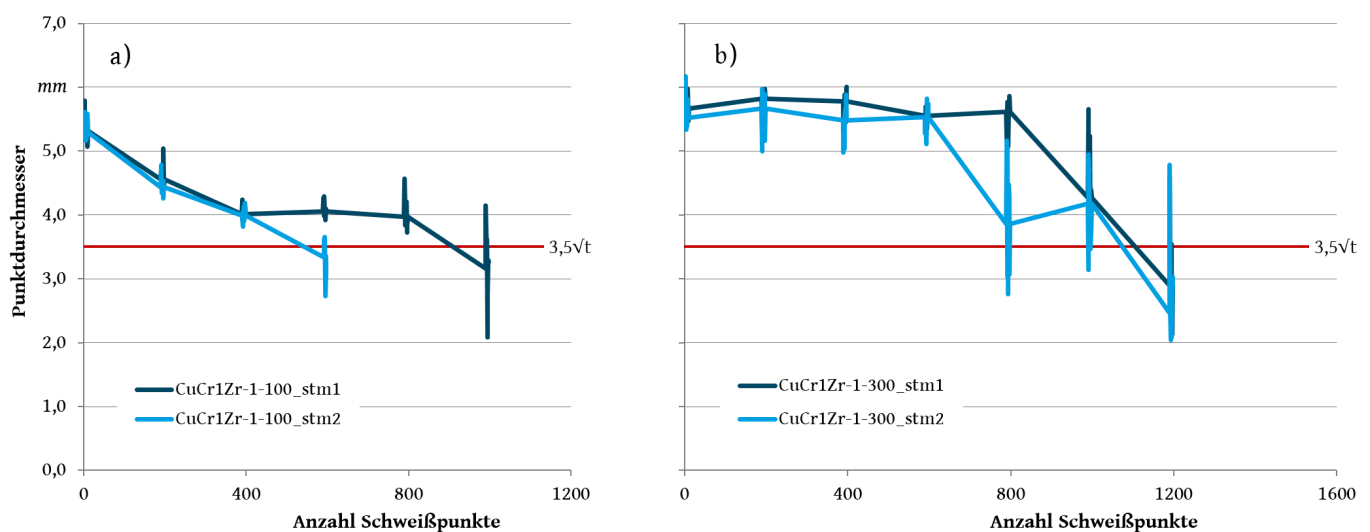


Abbildung 6.3.: a) Standmengenkurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an $1,0\text{ mm}$ DX53D+Z bei 100 ms und b) bei 300 ms Stromzeit

breite fällt mit 365 Schweißungen verhältnismäßig groß aus, wobei die Ergebnisse dennoch grundlegend als reproduzierbar einzustufen sind. Ein konstantes Niveau zeigt sich nur bei der ersten Standmengenkurve leicht oberhalb der Qualitätsgrenze. Mit verdreifachter Stromzeit ergeben sich Standmengenverläufe nach Abbildung 6.3b. Der Abfall des Punktdurchmessers wird deutlich herausgezögert, wodurch sich für die überwiegende Zeit ein hohes Niveau zeigt, welches frühestens nach 600 Schweißungen abfällt und frühestens bei 1079 Punktschweißverbindungen die Qualitätsuntergrenze schneidet. Die Reproduzierbar-

keit ist höher als bei 100 *ms* Stromzeit, was sich auch in der geringen Streubreite von 33 Schweißungen zeigt.

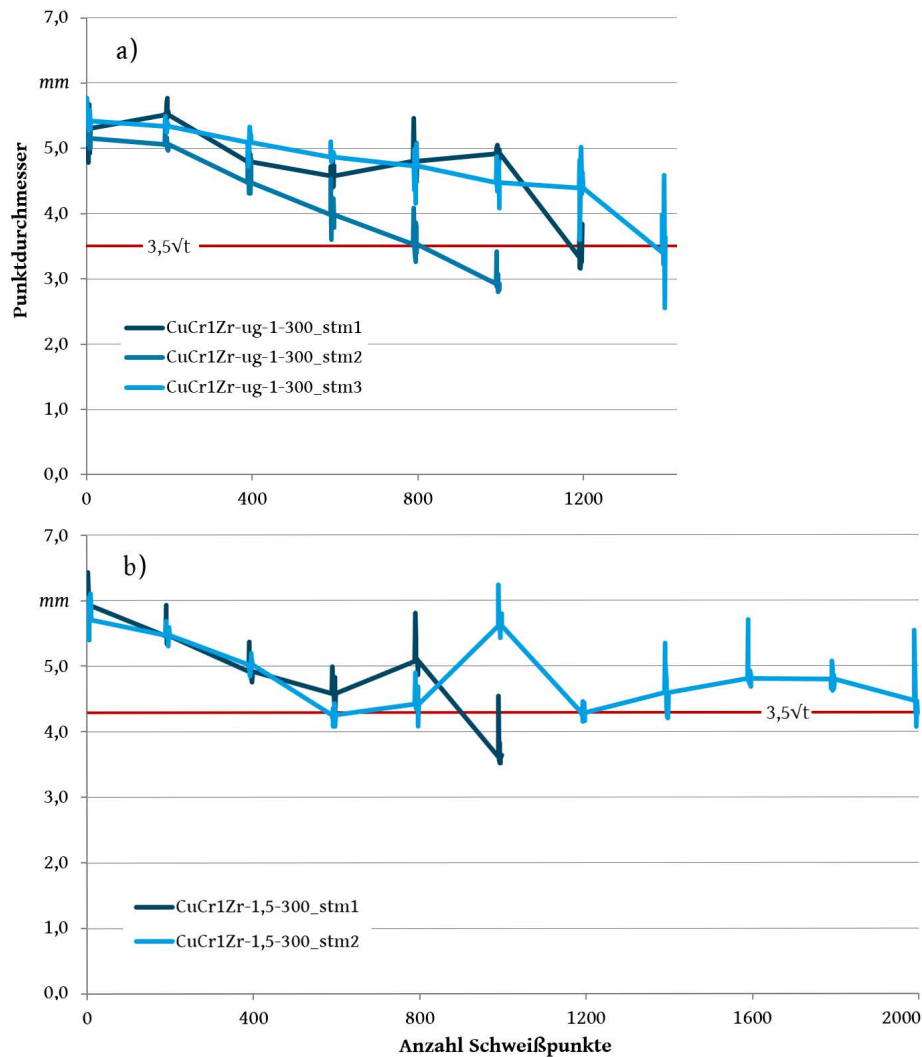


Abbildung 6.4.: a) Standmengenkurven für ungefräste CuCr1Zr-Elektroden an 1,0 *mm* DX53D+Z bei 300 *ms* Stromzeit und b) für startgefräste Elektroden an 1,5 *mm* DX54D+Z bei gleicher Stromzeit

Werden die Elektroden vor Versuchsbeginn nicht startgefräst, sondern mit kaltverfestigter Kontaktfläche verwendet, zeigen sich die stetig fallenden, zugleich aber auch breit gefächerten Standmengenverläufe in Abbildung 6.4a. Die minimale Standmenge liegt bei 1009 Punktschweißverbindungen, also nur unwesentlich abweichend von startgefrästen Elektroden. Allerdings zeigen die fehlende Niveaubildung, die verschiedenartigen Steilheiten und die Streubreite von 371 Schweißungen eine sehr geringe Reproduzierbarkeit auf, wodurch das Verschleißverhalten als sehr schlecht zu bewerten ist.

Abbildung 6.4b zeigt die Standmengen für eine Blechdicke von 1,5 *mm* bei startgefrästen Elektroden. Der Abfall des Punktdurchmessers beginnt unverzüglich und verläuft ähnlich wie bei CuCr1Zr-1-100_stm1 beinahe linear. Auch die minimale Standmenge mit

590 Punktschweißverbindungen und die Streubreite von 317 Schweißungen sind vergleichbar. Aus zwei Gründen wird das Verschleißverhalten in diesem Vergleich dennoch besser bewertet. Zum einen verlaufen die beiden ermittelten Standmengenkurven sehr dicht beieinander. Zum anderen kann für den Fall, dass die Stromstärke auf einen Startpunktdurchmesser von $5,0 \cdot 5 \sqrt{t}$ angehoben würde, eine höhere Standmenge angenommen werden.

Bei einer Blechstärke von $2,0 \text{ mm}$ ergibt sich mit einer Stromstärke für $d_w = 5,0 \sqrt{t}$ ein kontinuierlicher Punktdurchmesserabfall gemäß Abbildung D.3 im Anhang. Es zeigt sich eine starke Streuung der Einzelergebnisse. Dennoch bleiben diese eine sehr lange Zeit über oberhalb der Qualitätsuntergrenze. Erst bei über 2750 Punktschweißverbindungen kann die Standmengengrenze erreicht werden. Bei diesem von $1,0 \text{ mm}$ über $1,5 \text{ mm}$ bis $2,0 \text{ mm}$ erfassten Blechdickeneinfluss, stellt sich eine besonders hohe Elektrodenbeanspruchung bei dünnen Blechen, kurzen Stromzeiten und daraus folgend hohen Stromstärken heraus.

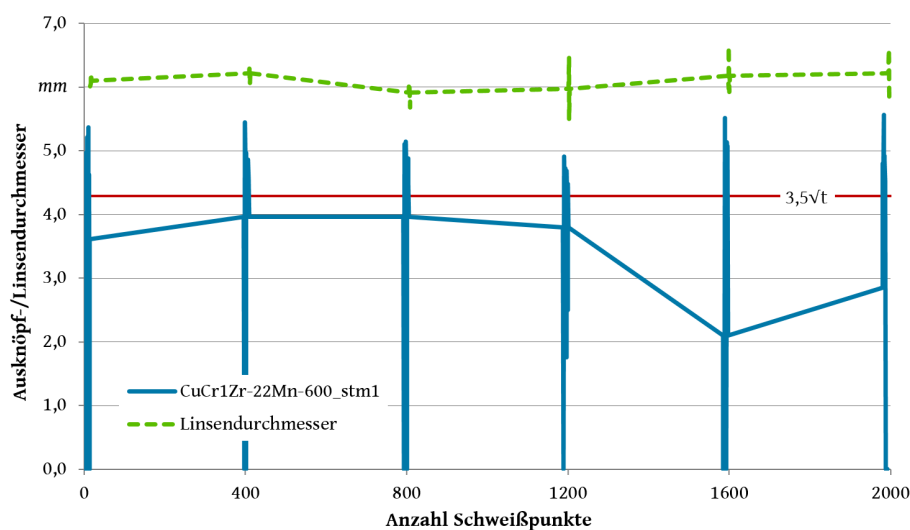


Abbildung 6.5.: Standmengenkurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an $1,5 \text{ mm}$ 22MnB5+AS bei 600 ms Stromzeit

In den Experimenten mit Blechen aus 22MnB5+AS zeigen sich besonders bei kurzen Stromzeiten starke Unterschiede zu den weichen Blechen verzinkter Güte. Der ausknöpfende Anteil, welcher in der Industrie für Qualitätsbewertungen noch häufig fokussiert wird, variiert stark und liegt auffallend unter dem Linsendurchmesser, wie Abbildungen D.4 und 6.5 zeigen. Wird der ausknöpfende Anteil als Maß für qualitätsgerechte Verbindungen herangezogen, sind die gewählten Prozessparameter somit unzulässig. Werden hingegen der Linsendurchmesser und dessen bekannter Zusammenhang zum Punktdurchmesser d_w nach DVS 2902-3 [95] sowie dessen Bestimmung nach DVS 2916-1 [100] zur Standmengenbewertung herangezogen, so liegen über die gesamte Zahl der gefertigten Punktschweißverbindungen qualitätsgerechte Verbindungen vor. Der Linsendurchmesser befindet sich während der 2000 Punkte durchweg auf hohem Niveau.

Eine Stromzeit von 800 ms verändert das Ausknöpfverhalten deutlich, wodurch sich

anhand des Ausknöpfanteils eine Standmenge von 1728 Schweißungen ergibt (Abbildung 6.6). Da die Einzelwerte intensiv streuen und immer wieder das Qualitätskriterium unterschreiten, ohne jedoch das Standmengenkriterium zu erfüllen, lässt sich daraus kein für den Serienprozess sinnvolles Verhalten ableiten. Im Vergleich zu den beiden geringeren Stromzeiten (400 *ms* und 600 *ms*) ist diesmal ein ungewöhnlicher Knick zwischen 400 und 600 Schweißungen anzutreffen, wodurch ausnahmsweise kein durchgehendes Niveau zu beobachten ist.

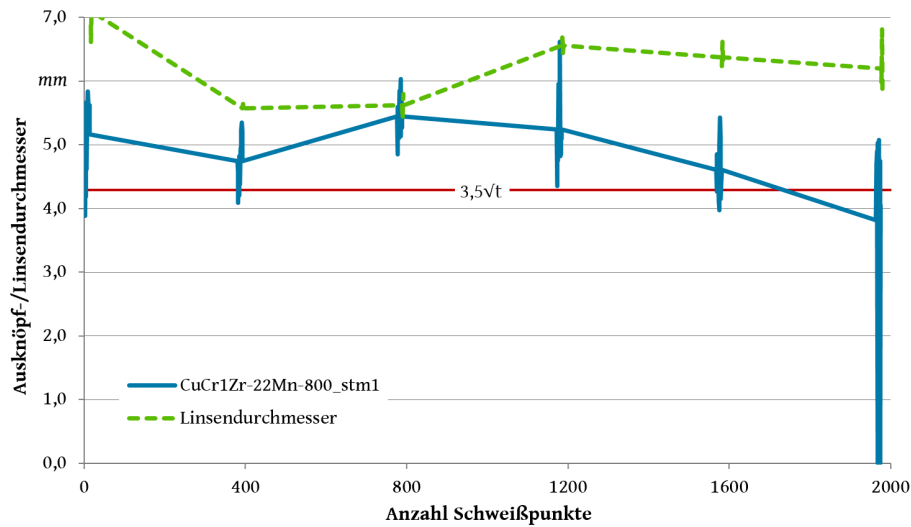


Abbildung 6.6.: Standmengenkurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an 1,5 mm 22MnB5+AS bei 800 *ms* Stromzeit

Mit den Schweißungen an 22MnB5+AS zeigt sich, dass der ausknöpfende Anteil nicht als repräsentatives Qualitätskriterium verwendet werden kann. Denn der parallel ermittelte Linsendurchmesser belegt als Verbindungskennzeichen eine hinreichend hohe Qualität der Schweißung. Folglich müssen kristalline Bereiche an den zerbrochenen Verbindungen mit in die Ermittlung des Punktdurchmessers d_w einfließen, wie es die Messmethodik nach [95] [100] empfiehlt. Zusammengefasst werden alle Standmengenerkenntnisse mit Standard-CuCr1Zr basierend auf der derzeit mancherorts noch üblichen Beurteilung der ausknöpfenden Anteile in Tabelle 6.4. In der letzten Spalte wird dazu eine Bewertung des Verschleißverhaltens angegeben. Eine positive Bewertung repräsentiert eine gute Eignung für den jeweils betrachteten Anwendungsfall und ist einer Empfehlung gleichzusetzen. Entscheidungsgrundlage für das Verschleißverhalten sind neben den drei Spalten zur Standmenge weiterhin Größe, Verlauf, Einteilmöglichkeit und Reproduzierbarkeit des Gefalles des Standmengenverlaufs.

Tabelle 6.4.: Überblick der Standmengenergebnisse für CuCr1Zr-Elektroden an verzinkten und mit AlSi-beschichteten Stahlblechen

| Versuchs- kennung | Stahlbleche | F_{El} | t_w | min. | Standmenge max. | Streubreite | Verschleiß- verhalten |
|-------------------------|-------------------------|----------|-------|---------------------------------|--------------------|-------------|--------------------------|
| CuCr1Zr-.. | | kN | ms | <i>Punktschweißverbindungen</i> | | | |
| 1-100_stmi ^d | DX53D+Z100 1,0 mm | 2,7 | 100 | 552 | 917 | 365 | – |
| 1-300_stmi | | 2,7 | 300 | 1079 | 1112 | 33 | + |
| ug-1-300_stmi | | 2,7 | 300 | 1009 | 1380 | 371 | -- |
| 1,5-300_stmi | DX54D+Z100 1,5 mm | 2,7 | 300 | 590 | 907 | 317 | 0 |
| 2-1000_stm1 | HX300LAD+Z100 2,0 mm | 3,0 | 1000 | 2764 | – | – | 0 |
| 22Mn-400_stm1 | 22MnB5+AS150 1,5 mm | 3,5 | 400 | – | – | – | ungewiss |
| 22Mn-600_stm1 | | 3,5 | 600 | – | – | – | ungewiss |
| 22Mn-800_stm1 | | 3,5 | 800 | 1728 | – | – | ungewiss |

^d $i = 1..2$ bzw. $1..3$.

6.3. Verschleißdokumentation

Zur Untersuchung des Verschleißzustandes von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen ist es zweckmäßig, die geometrischen und die metallurgischen Eigenschaften zu betrachten. Geometrische Betrachtungen geben mittelbar Auskunft über die erreichbare Stromdichte und damit auch die mögliche Schweißlinsengröße, welche letztendlich das Standmengenende definiert. Metallurgische Betrachtungen ergänzen die Interaktion zwischen Elektroden und den miteinander verschweißten Blechen, wobei Blechbeschichtungen eine besondere Rolle spielen. Auf diesen Sachverhalt wird im Folgenden eingegangen.

6.3.1. Kontaktflächen-Geometrie

Abbildung 6.7 enthält alle konfokal chromatisch ausgemessenen CuCr1Zr-Elektroden, mit denen feuerverzinkte Bleche verschweißt wurden. Innerhalb der Kontaktflächen finden sich stets ein flach anmutender Bereich, zumeist mehrere lokale Vertiefungen und ein Randbereich. Letzterer wird in der Literatur als „Bartbildung“ bezeichnet. Bei einer Einzelblechdicke von 1,0 mm lassen sich Unterschiede bei steigender Stromzeit und zugleich sinkender Stromstärke aus Abbildung 6.7 ableiten. So zeigen sich bei 100 ms auffällig mehr lokale Vertiefungen bei markant verringerter Bartbildung. Zwischen startgefrästen und ungefrästen Elektrodenkappen lassen sich hingegen keine kennzeichnenden Unterschiede erfassen. Mit erhöhter Blechdicke wurden vermehrt lokale Vertiefungen registriert. All diese Darstellungen und Kennzeichen sind jedoch als Ausschnitte während des Verschleißprozesses zu betrachten.

Zur quantitativen Bewertung sind in Tabelle 6.5 zwei Merkmale herausgegriffen, welche

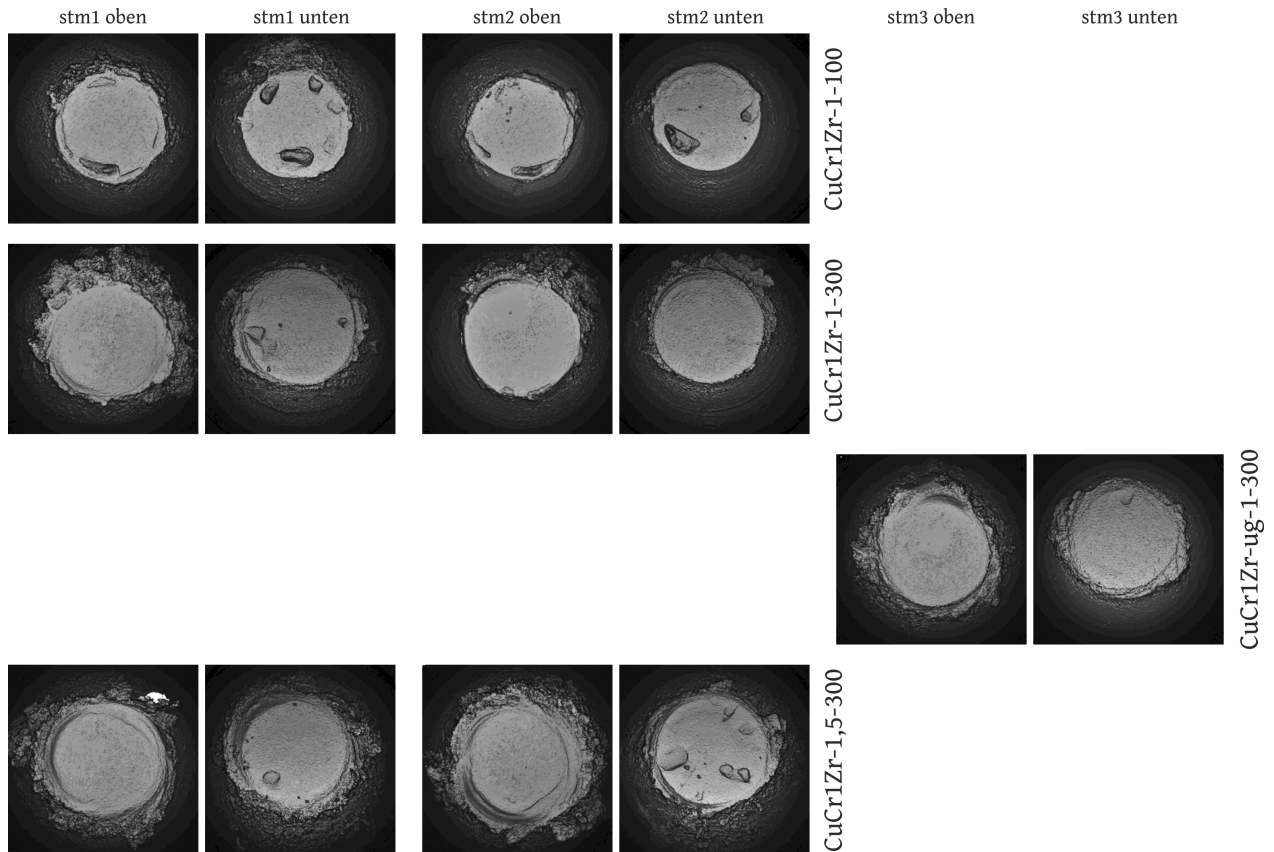


Abbildung 6.7.: Visualisierung konfokal chromatischer Kontaktflächenvermessungen von Standard-CuCr1Zr-Elektroden an feuerverzinkten Tiefziehstählen

Informationen zur im Prozess möglichen Stromdichte repräsentieren. Diese sind der Kontaktflächendurchmesser und die exemplarische Kontaktfläche bei etwa $50 \mu\text{m}$ eingesenkener Elektrode.

Im Vergleich der erfassten Kontaktflächendurchmesser zeigt sich zwischen oberer und unterer Elektrode kein erkennbarer Unterschied. Eine ansteigende Stromzeit, bezugnehmend auf die Experimente mit 100 ms , 300 ms und 1000 ms , ermöglicht größere nutzbare Kontaktflächendurchmesser. Diese Beobachtung gilt zwischen startgefrästen Elektroden. In der Gegenüberstellung von startgefräst und ungefräst lag zum Verschleißende bei ungefrästen Elektroden ein kleinerer Kontaktflächendurchmesser vor.

Auch im Merkmal der exemplarischen Kontaktfläche bei etwa $50 \mu\text{m}$ Einsinktiefe, zeigt sich kein eindeutiger Unterschied zwischen anodenseitiger Elektrode und kathodenseitiger Elektrode. Ebenfalls ähnlich verhalten sich Kontaktflächendurchmesser und Kontaktfläche bei zunehmender Stromzeit. Von 100 ms auf 300 ms steigt die Kontaktfläche von im Mittel $24,6 \text{ mm}^2$ auf $29,5 \text{ mm}^2$ an. Beim Wechsel von $1,0 \text{ mm}$ auf $1,5 \text{ mm}$ dicke Bleche, sinkt die zum Standmengenende hin vorhandene Kontaktfläche mit einem Mittelwert von $26,2 \text{ mm}^2$. Wird berücksichtigt, dass die gewählte Stromstärke bei $1,5 \text{ mm}$ -Blechen hätte höher sein sollen, ist von einer ähnlichen oder größeren Kontaktfläche auszugehen. Für ungefräste Elektroden ergibt sich im Mittel ein Wert von $26,7 \text{ mm}^2$. Dieser ist geringer als bei den

startgefrästen Elektroden bei gleicher Blechdicke.

Tabelle 6.5.: Kontaktflächen-Geometrie zum Standmengenende von Standard-CuCr1Zr-Elektroden an feuerverzinkten Tiefziehstählen

| Versuchs- kennung | Betreffende RSW-Verb. | d_w | Kontaktflächendurchmesser | | Kontaktfläche ca. 50 μm tief | |
|----------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | | | obere El. | untere El. | obere El. | untere El. |
| CuCr1Zr-.. | | <i>mm</i> | <i>mm</i> | <i>mm</i> | <i>mm²</i> | <i>mm²</i> |
| _sg | 0 | | 5,4 | 5,6 | 18,5 | 20,2 |
| 1-100_stm1 | 1000 | 3,3 | 6,4 | 6,3 | 26,4 | 25,7 |
| 1-100_stm2 | 600 | 3,4 | 6,1 | 6,2 | 22,8 | 23,7 |
| 1-300_stm1 | 1200 | 2,9 | 6,7 | 7,1 | 32,6 | 24,6 |
| 1-300_stm2 | 1200 | 3,0 | 6,7 | 6,4 | 33,9 | 26,8 |
| _ug | 0 | | | 4,8 | | 15,4 |
| ug-1-300_stm3 | 1400 | 3,6 | 6,3 | 6,2 | 29,3 | 24,1 |
| 1,5-300_stm1 | 1000 | 3,7 | 6,3 | 6,5 | 26,9 | 25,4 |
| 1,5-300_stm1 | 2000 | 4,3 | 6,9 | 6,5 | 24,1 | 28,4 |
| 2-1000_stm1 | 2800 | 4,8 | 7,0 | 7,1 | – | – |

Bei der Auswertung an den verzinkten Stählen konnte nur der Zustand am Standmengenende beurteilt werden. Einer Veränderung während der zahlreichen Schweißpunkte ist damit nicht möglich. Daher wurden die Elektroden der 22MnB5 Schweißungen im eingebauten Zustand aller 50 Punktschweißverbindungen konfokal chromatisch vermessen. Um aus den 120 Messergebnissen die relevanten Informationen zu extrahieren, werden folgend nur Messungen aller 500 Schweißungen dargestellt. Deren Visualisierung zeigt Abbildung 6.8. Besonders auffällig ist, dass sich nicht nur eine einzige Kontaktfläche sondern bereits nach weniger als 50 Punktschweißverbindungen zwei Kontaktflächen ausbilden: ein oberes Plateau und ein unteres Plateau. Lokale Vertiefungen sind gegenüber den Ergebnissen an verzinkten Stahlblechen weicher Güte (Abbildung 6.7) deutlich zahlreicher, dafür aber kleiner. Auch nach außen verdrängte Materialbestandteile sind zu beobachten. Diese besitzen einen vergleichsweise geringen Anteil, wodurch kaum von Bartbildung gesprochen werden kann. Im Weiteren wird der Randbereich daher nicht betrachtet.

In der quantitativen Betrachtung von Tabelle 6.6 teilt sich der Kontaktflächendurchmesser auf einen inneren und einen äußeren Wert auf. Verbunden sind beide Kenngrößen durch den Höhenunterschied der beiden Plateaus. Der Durchmesser wird in der Tabelle ergänzt durch die exemplarische Kontaktfläche bei einer etwa 50 μm tief eingesunkenen Elektrode, sowie durch den Punktdurchmesser und den skalierten Linsendurchmesser zur jeweils betrachteten Verbindung. Wie bereits in Abschnitt 5.3.4 angeführt ist eine Analyse der geometrischen Kenngrößen nicht allein mittels Höhenwertbetrachtung möglich. Dies zeigt eindrücklich die Querschnittsinformation in Abbildung 6.9. Neben einer Nachbarschaftsbetrachtung und der Bewertung von Wendepunkten im Kurvenverlauf der Elektrodenkon-

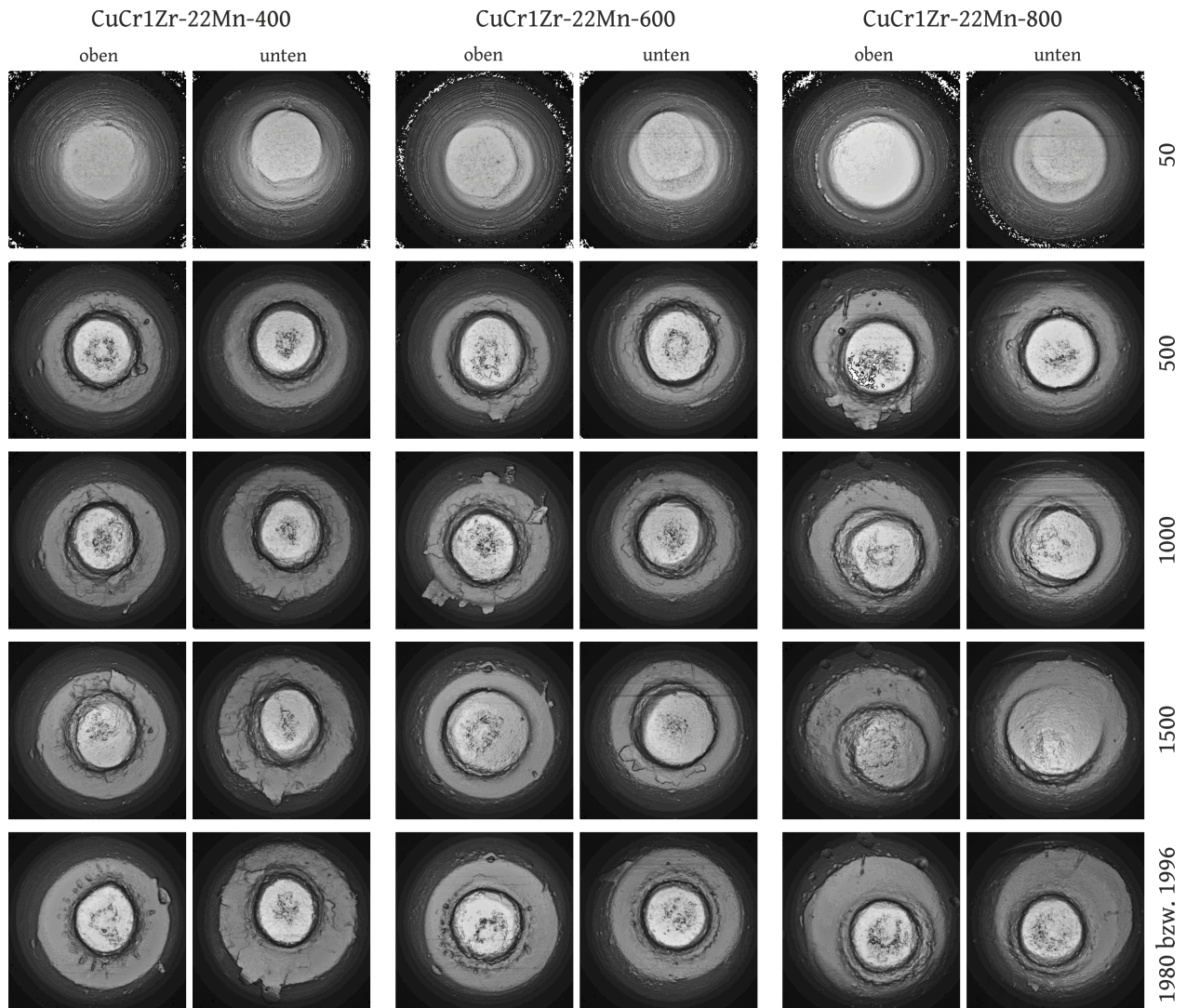


Abbildung 6.8.: Visualisierung konfokal chromatischer Kontaktflächenvermessungen von Standard-CuCr1Zr-Elektroden an AlSi-beschichtetem 22MnB5

tur, ist eine manuelle Justage zur Begrenzung der Kontaktflächenbereiche unerlässlich. Auch die untere Elektrode aus Versuchsreihe CuCr1Zr-22Mn-800 (Abbildung 6.8) zeigt am allmählichen Übergang zwischen den Plateaus an, dass eine manuelle Festlegung der geometrischen Kennzeichen notwendig ist.

Die soeben beschriebenen geometrischen Kennzeichen beginnen in Tabelle 6.6 mit der fünften und sechsten Spalte. Beim äußeren Kontaktflächendurchmesser zeigen sich in der Unterscheidung zwischen Anode und Kathode keine Unterschiede beim Verschleiß. Auch zwischen steigenden Stromzeiten ergibt sich keine tendenzielle Unterscheidung innerhalb des betrachteten Verschleißzyklusses. Auffällig ist allein bei 400 *ms* Stromzeit ein lokales Maximum bei 500 Punktschweißverbindungen. Bei den anderen Versuchen steigt der äußere Durchmesser stetig bis zum Versuchsende an.

Bei Betrachtung des inneren Kontaktflächendurchmessers (Spalten 7 und 8 in Tabelle 6.6), unterscheiden sich obere und untere Elektrode nicht voneinander. Zwischen den drei

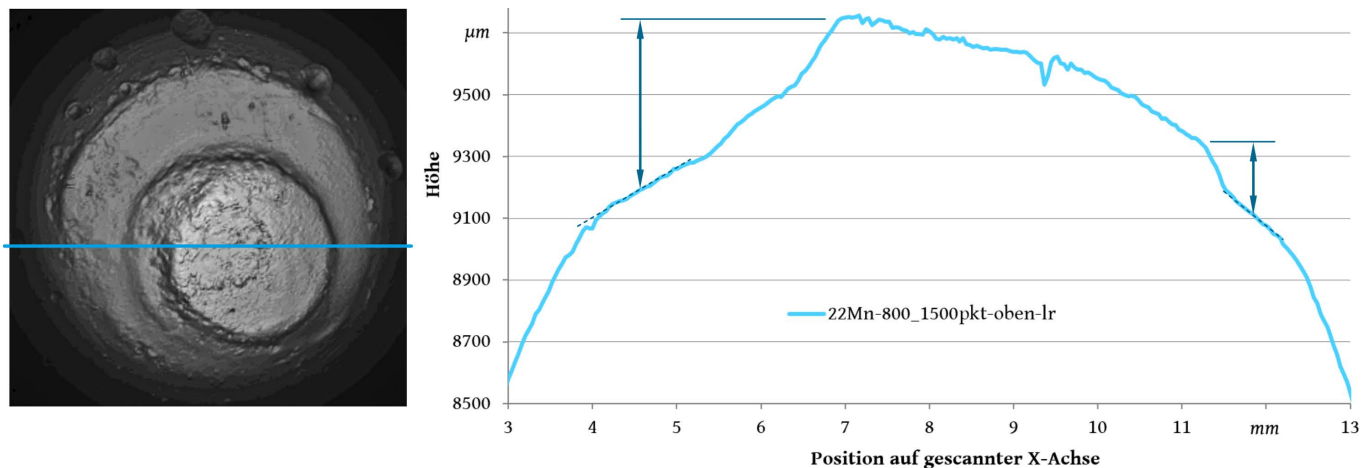


Abbildung 6.9.: Erweiterte geometrische Kennzeichen für CuCr1Zr-Elektroden an AlSi-beschichtetem 22MnB5; Beispiel CuCr1Zr-22Mn-800_stm1-1500pkt-oben

Stromzeiten ergeben sich hingegen eindeutig Unterschiede. Steigt die Stromzeit, so wurde im Mittel ein größerer Durchmesser gemessen. Mit 400 ms liegt dieser bei 3,7 mm, mit 600 ms bei 4,1 mm und mit 800 ms bei 4,5 mm. In der Versuchsreihe für 400 ms Stromzeit tritt die innere Kontaktfläche später auf als bei den anderen beiden Stromzeiten. Bei 600 ms und 800 ms Stromzeit verändert sich der innere Durchmesserwert schwellend. Die

Tabelle 6.6.: Kontaktflächen-Geometrie von Standard-CuCr1Zr-Elektroden an AlSi-beschichtetem 22MnB5

| Versuchskennung | RSW-Verb. | d_w | d_n | Kontaktflächendurchmesser ^e | | | | Kontaktfläche ^{e,f} | | Plateauhöhe |
|-----------------|-----------|-------|-------|--|-------|-------|-------|------------------------------|------|-------------|
| | | | | a. o. | a. u. | i. o. | i. u. | o. | u. | |
| CuCr1Zr-.. | | mm | mm | jeweils in mm | | | | jeweils in mm ² | | µm |
| _sg | 0 | | | | | | 5,9 | 5,9 | | |
| 22Mn-400_stm1 | 50 | 2,6 | 6,0 | 4,6 | 4,6 | | | 16,1 | 16,2 | – |
| | 500 | 2,4 | 6,0 | 7,8 | 10,3 | 3,8 | 3,7 | 7,5 | 9,7 | 507 |
| | 1000 | 3,4 | 6,1 | 7,7 | 8,2 | 3,5 | 3,5 | 7,9 | 8,8 | 546 |
| | 1500 | 2,3 | 6,1 | 8,0 | 8,6 | 3,7 | 3,6 | 9,4 | 9,1 | 489 |
| | 1996 | 0,0 | 6,4 | 8,2 | 8,7 | 3,9 | 3,7 | 10,2 | 9,6 | 462 |
| 22Mn-600_stm1 | 50 | 3,7 | 6,1 | 5,6 | 5,7 | 4,5 | 4,2 | 16,4 | 15,0 | 59 |
| | 500 | 4,0 | 6,1 | 7,5 | 7,4 | 4,0 | 4,1 | 10,8 | 12,3 | 427 |
| | 1000 | 3,9 | 6,0 | 7,7 | 7,7 | 4,0 | 3,8 | 9,5 | 9,7 | 441 |
| | 1500 | 2,5 | 6,1 | 8,1 | 8,1 | 4,9 | 4,5 | 17,0 | 14,3 | 313 |
| | 1996 | 0,0 | 5,8 | 8,3 | 8,3 | 3,7 | 3,7 | 9,3 | 9,5 | 415 |
| 22Mn-800_stm1 | 50 | 5,1 | 6,9 | 7,5 | 5,8 | 5,4 | 4,6 | 22,2 | 16,9 | 30 |
| | 500 | 5,0 | 5,6 | 7,5 | 7,4 | 4,2 | 4,3 | 11,3 | 13,0 | 381 |
| | 1000 | 5,3 | 6,2 | 8,2 | 7,9 | 4,2 | 4,3 | 11,8 | 12,7 | 421 |
| | 1500 | 4,7 | 6,4 | 8,4 | 8,4 | 4,4 | 6,3 | 11,8 | 26,9 | 296 |
| | 1980 | 4,1 | 5,8 | 8,5 | 8,5 | 3,9 | 3,7 | 9,6 | 9,0 | 493 |

^e Abkürzungen: i. = innen; a. = außen; o. = obere Elektrode; u. = untere Elektrode.

^f Ca. 50 µm tief.

Kontaktfläche (Spalten 9 und 10) bei etwa $50 \mu\text{m}$ Elektrodeneindruck schwankt gegenüber den anderen Merkmalen am deutlichsten. Allen Elektroden ist gleich, dass die Kontaktfläche innerhalb der ersten 500 Punkte kleiner wird. Anschließend verändert, sprich vergrößert bzw. verkleinert sich dieser in eher unstetiger Art. Wird über alle Messwerte innerhalb einer Versuchskennung ein Mittelwert gebildet, so ist die Kontaktfläche bei 400 ms mit $10,7 \text{ mm}$ am kleinsten, steigt bei 600 ms auf $12,4 \text{ mm}$ und bei 800 ms weiter auf $14,5 \text{ mm}$. Beim Platteuhöhenunterschied (Spalte 11) ergibt sich im Mittel ein Wert von $500 \mu\text{m}$ für die kleinste Stromstärke. Sowohl bei 600 ms Stromzeit wie auch bei 800 ms ließ sich dem gegenüber im globalen Mittel nur ein Wert von $400 \mu\text{m}$ messen.

6.3.2. Kontaktflächen-Härte

Repräsentative Mikrohärteuntersuchungen für die eingesetzten CuCr1Zr-Elektroden, mit denen feuerverzinkte Tiefziehstähle verschweißt wurden, sind in den Abbildungen 6.10 und D.5 zusammengestellt. Aus diesen geht hervor, wie sich die von der Kontaktfläche hinein ins Innere der Elektrode erstreckende Härte während des Verschleißprozesses veränderte. Dazu erfolgten acht Stufenversuche, mit denen unterschiedliche Zeiten innerhalb einer Standmenge abgebildet werden. Um eine optimale Übersicht zu gewährleisten, sind die Ergebnisdarstellungen eines Diagramms auf jeweils vier Härteverläufe begrenzt. Die zeitlich gesehen letzten vier sind im Anhang hinterlegt. Denn bereits aus den ersten vier Härteverläufen (Abbildung 6.10) lassen sich alle Kennzeichen des Verschleißes ablesen.

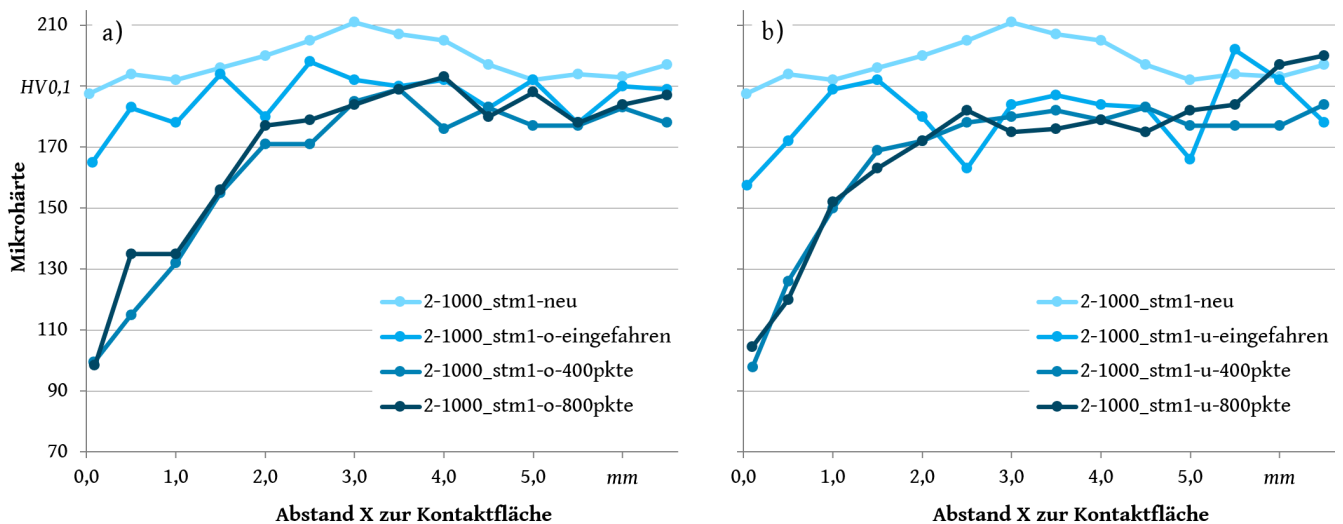


Abbildung 6.10.: Härteverläufe in den Elektrodenkappen der Versuchskennung CuCr1Zr-2-1000_stm1, Elektrode 'neu' bis 800 Punktschweißverbindungen, a) obere und b) untere Elektroden

Unter berücksichtigter Messunsicherheit von etwa $\pm 3 \text{ HV } 0,1$ und der inhomogenen chemischen Zusammensetzung (inhomogenes Kristallgebiet) zeigt Abbildung 6.10 eine Grund-

werkstofffestigkeit zwischen $180 HV_{0,1}$ und $190 HV_{0,1}$. Diese liegt spätestens ab etwa $2,5 mm$ Tiefe sowohl bei der oberen wie auch bei der unteren Elektrode vor. Auf die Zeitschritte konkretisiert, zeigt sich die erste Entfestigung bereits nach 50 Schweißungen mit einem Strom I_w für lediglich $d_w = 3\sqrt{t}$. Im darauf folgenden Zeitschritt (400 Schweißungen) liegt bereits der sich anschließend nicht mehr grundlegend verändernde Zustand vor. Die Kontaktfläche entfestigt während des Verschleißzyklus, sodass sich oberflächennah im Mittel $89 HV_{0,1}$ an der oberen Elektrode einstellen und $102 HV_{0,1}$ an der unteren Elektrode. Zwischen beiden besteht somit ein Härteunterschied von etwa 13% ($13 HV_{0,1}$), welcher durch die unterschiedliche Beanspruchung von Anode (oberen) und Kathode (unten) erklärt werden kann. Der geringste Wert an der oberen Elektrode wird bei 2000 Schweißungen erfasst und an der unteren bei 1600 Schweißungen.

Für die Mikrohärtigkeit der CuCr1Zr-Elektroden, mit welchen AlSi-beschichtetes 22MnB5 verschweißt wurde, kann auf eine repräsentative Messung einer Folgeuntersuchung aus Abbildung D.6 (im Anhang) Bezug genommen werden. Deren Versuchsbedingungen sind nahezu identisch zur Versuchskennung CuCr1Zr-22Mn-800. Im Vergleich zu den linearen Erkenntnissen aus Abbildungen 6.10 und D.5 zeigen sich zwischen $0,4 mm$ und $2,0 mm$ ein bekannter Entfestigungsverlauf und eine ähnliche Entfestigungstiefe. Der Bereich vor $0,4 mm$ weicht von bisherigen Beobachtungen ab. Die teilweise fehlende Farbgebung deutet auf Härtewerte oberhalb des Messbereiches von $324 HV_{0,5}$ hin. Darüber hinaus bescheinigt die flächige Mikrohärtemessung eine kontinuierlich abnehmende Entfestigung zu den Randbereichen der Kontaktzone hin.

6.3.3. Kontaktflächen-Legierung

Beim Schweißen feuerverzinkter Stähle traten im Elektroden-Querschleiff drei Merkmale der **Legierungsschichtausprägung** auf. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit als „verdrängte Legierungsschichten“, „Legierungstiefe“ und „(lokale) Vertiefung“ benannt und gehen aus Abbildung 6.11 hervor. Verdrängte Bereiche werden wegen ihres geringen Aufkommens und der prozesstechnisch späten Bedeutung nicht berücksichtigt. Dafür werden die äußeren und inneren Verläufe der Legierungsschichten entlang des Querschleiffs im Sinne von Abbildung D.7 bewertet. Risse traten an keinem der 20 untersuchten Querschleiffe auf.

Die zwei Kennzeichen sowie die Verlaufsbeschreibung in Tabelle 6.7 präsentieren für die ersten acht Elektroden ein beachtlich ähnliches Verschleißergebnis. Zu diesen Elektroden zählen ungefräste und gefräste Varianten, mit welchen $1,0 mm$ und $1,5 mm$ dicke Bleche verschweißt wurden. Sowohl die Kontaktflächenerscheinung nach außen (Blechseite) wie auch die Legierungstiefenausprägung nach innen und die lokale Legierungstiefe, mit einem maximalen Wert von $58 \mu m$, sind weitestgehend identisch. Die flächige Verteilung der äußeren Merkmale zeigt Abbildung 6.7 und weist auch die flächige Ähnlichkeit zwischen den betrachteten vier Versuchskennungen nach. Weiterhin sind in Tabelle 6.7 die gestuften

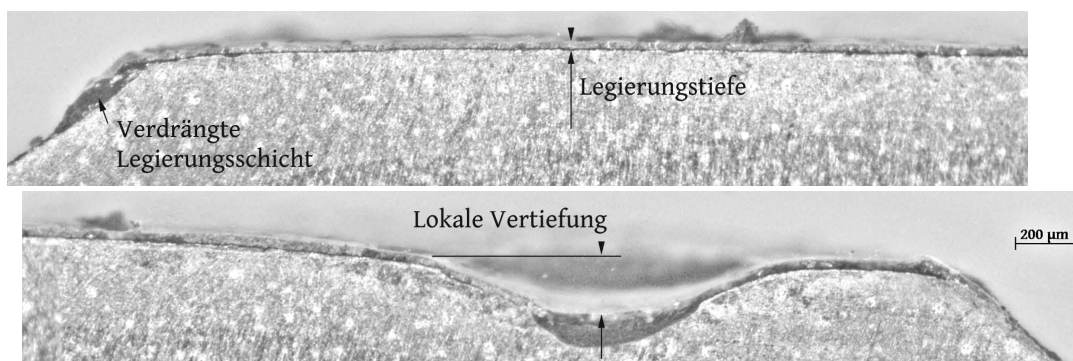


Abbildung 6.11.: Legierungsschichtausprägung und Kennzeichen am Beispiel der unteren Elektrode von CuCr1Zr-1-100_stm1

Tabelle 6.7.: Legierungsschichtausprägung bei Standard-CuCr1Zr-Elektroden, genutzt an feuerverzinkten Tiefziehstählen, unterteilt in obere und untere Elektrode

| Versuchs- kennung | Äußere Merkmale | | Innere Merkmale | |
|-------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| | Beschreibung | Vertiefung | Beschreibung | Legierungstiefe |
| CuCr1Zr-.. | | μm | | μm |
| 1-100_stm1+2 oben | glatt bis rau | 154 | leicht wellig | 27 ± 10 |
| 1-100_stm1+2 unten | | 195 ± 117 | | 22 ± 9 |
| 1-300_stm1+2 oben | glatt bis rau | – | wellig | 34 ± 9 |
| 1-300_stm1+2 unten | | – | | 34 ± 16 |
| ug-1-300_stm1bis3 oben | glatt bis rau | 34 | leicht wellig | 21 ± 5 |
| ug-1-300_stm1bis3 unten | | – | | 40 ± 18 |
| 1,5-300_stm1+2 oben | glatt bis rau | – | leicht wellig | 38 ± 6 |
| 1,5-300_stm1+2 unten | | – | | 35 ± 10 |
| 2-1000_400pkte oben | glatt bis rau | – | leicht wellig | 23 ± 5 |
| 2-1000_400pkte unten | | – | | 53 ± 12 |
| 2-1000_800pkte oben | glatt bis rau | – | wellig | 20 ± 8 |
| 2-1000_800pkte unten | | – | | 63 ± 24 |
| 2-1000_1200pkte oben | glatt bis rau | – | leicht wellig | 27 ± 12 |
| 2-1000_1200pkte unten | | – | | 60 ± 16 |
| 2-1000_1600pkte oben | glatt bis rau | – | leicht wellig | 20 ± 8 |
| 2-1000_1600pkte unten | | – | | 57 ± 33 |
| 2-1000_2000pkte oben | glatt bis rau | 40 | leicht wellig | 17 ± 5 |
| 2-1000_2000pkte unten | | – | | 57 ± 5 |
| 2-1000_2400pkte oben | glatt bis rau | – | leicht wellig | 23 ± 5 |
| 2-1000_2400pkte unten | | – | | 43 ± 5 |

Versuche an 2,0 mm dicken feuerverzinkten Tiefzieh-Stahlblechen aufgeführt. Unmittelbar nach dem Einfahren der Elektroden konnte keine Legierungsschicht gemessen werden. Ab Punktschweißverbindung 400 verändert sich die Legierungsschichtdicke (max. 90 μm) nicht mehr, was dafür spricht, dass bildende und abtragende Prozesse an der Legierungsschicht

zu gleichen Teilen ablaufen. Bei genauer Betrachtung ist ein Unterschied zwischen oberer und unterer Elektrode auszumachen. Dieser lässt sich durch die kürzere Verweilzeit und dem schnelleren Abheben der oberen Elektrode begründen, woraus eine größere Wirkung abtragender Prozesse abgeleitet wird.

Beim Schweißen hochfester 22MnB5-Bleche mit AlSi-Beschichtung ließen sich ebenfalls die drei Merkmale „verdrängte Legierungsschichten“, „Legierungstiefe“ und „(lokale) Vertiefung“ beobachten. Verdrängte Legierungsschichten sind in der Zahl nochmals geringer, wie aus der flächigen Betrachtung von Abbildung 6.8 hervorgeht. Neu hinzu kommen die für diese Arbeit formulierten Merkmale „Verästelung“ und „globale Legierungstiefe“. Un-

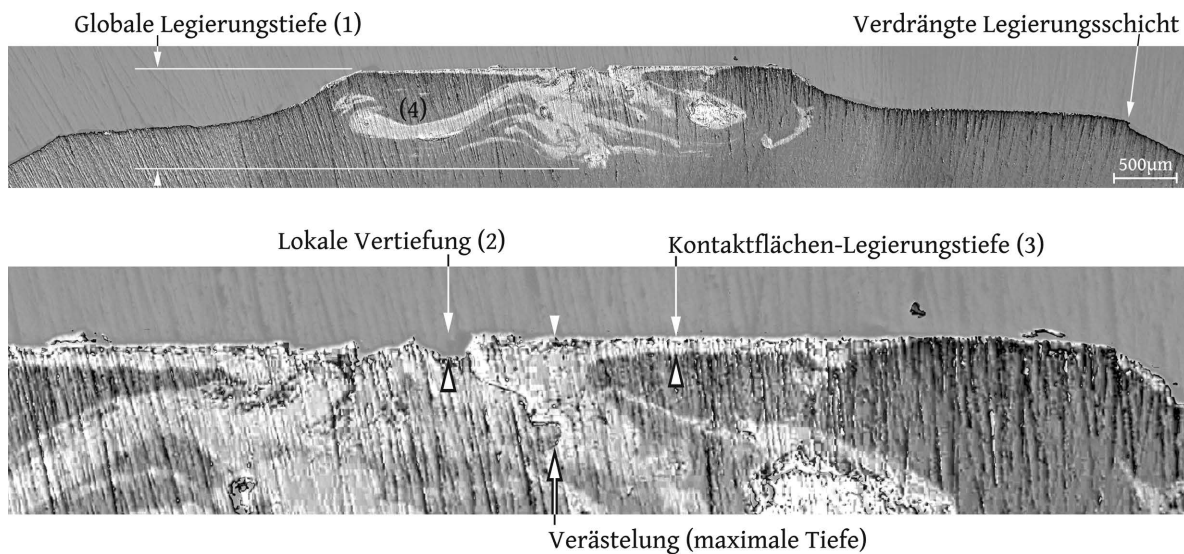


Abbildung 6.12.: Legierungsschichtausprägung und Kennzeichen am Schliffbild der oberen Elektrode von Versuchskennung CuCr1Zr-22Mn-400_stm1

ter Verästelung werden nahtlos von der Oberfläche ins Innere der Elektrode verlaufende Einarbeitungen (mech. Legieren) von Elementen der Kontaktzone verstanden. Sie weisen eine deutliche Grenzschicht zum Grundwerkstoff auf. Alle fünf Merkmale sind an einem beispielhaften Querschnitt in Abbildung 6.12 aufgeführt.

Diese Kennzeichen beim Schweißen von 22MnB5+AS gruppiert Tabelle 6.8 für die drei untersuchten Elektrodenpaare. Die Kontaktflächen nach außen (Stahlblechseite) ist wessensgleich mit jener bei Schweißungen feuerverzinkter Stahlbleche. Die Erscheinung nach innen weicht im selben Vergleich deutlich voneinander ab. Das neu hinzugekommene Merkmal der Verästelung tritt dominant auf und erstreckt sich bis zur globalen Legierungstiefe (1) hinein. Im Vergleich dazu sind die lokalen Vertiefungen (2) mit etwas mehr als $50 \mu m$ verschwindend gering. Die Kontaktflächen-Legierungstiefe (3) ist etwa drei mal so tief ($150 \mu m$) wie die lokalen Vertiefungen. Gegenüber der globalen Legierungstiefe (bis zu $1 mm$ tief), fällt sie aber gering aus. Die Gestalt der Legierungsausprägung kann als wellig bezeichnet werden, wobei sie in sich selbst zugleich der Form von Schlieren (4) ähnelt. Diese Schlieren bestehen aus ineinandergreifendem weichen Kupfer und Bestandteilen der

warmausgehärteten AlSi-Beschichtung.

Tabelle 6.8.: Legierungsschichtausprägung bei Standard-CuCr1Zr-Elektroden, genutzt an AlSi beschichtetem 22MnB5, unterteilt in obere und untere Elektrode

| Versuchs- kennung | Äußere Merkmale | | | Innere Merkmale | | |
|----------------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| | Beschreibung | Verästelung | Vertiefung | Beschreibung | Leg.-KF [§] | Leg. global [§] |
| CuCr1Zr-22MnB5.. | | μm | | μm | | |
| -400_stm1 oben | glatt bis rau | 280 | 41 ± 13 | global wellig | 62 ± 7 | 832 |
| -400_stm1 unten | wellig bis rau | 461 | 43 ± 2 | wirkend | 90 ± 18 | 1005 |
| -600_stm1 oben | glatt bis rau | 1030 ± 47 | 40 ± 5 | global wellig | 122 ± 66 | 1076 |
| -600_stm1 unten | | – | 44 ± 6 | wirkend | 98 ± 27 | 871 |
| -800_stm1 oben | glatt bis rau | – | 39 ± 16 | global wellig | 137 ± 52 | 954 |
| -800_stm1 unten | | – | 30 ± 3 | wirkend | 136 ± 89 | 845 |

[§] Leg.-KF = Kontaktflächen-Legierungstiefe, Leg. global = Globale Legierungstiefe.

Die **Legierungsschichtzusammensetzung** der Elektroden, mit welchen feuerverzinkte Tiefziehstähle verschweißt wurden, ähnelt den Beschreibungen aus Abschnitt 3.1.1. Aus Abbildung 6.13a wird ersichtlich, wie sich nach 400 Punktschweißverbindungen eine Schichtdicke von etwa $50 \mu m$ ausgebildet hat. Entsprechend des Linienscans besteht diese Schicht ausschließlich aus β -Mischkristall (kurz: β -MK). 2000 Punktschweißverbindungen später bildet sich gemäß Abbildung 6.13b außen eine $30 \mu m$ Fe geprägte Schicht (1) aus. Auf diese folgt Cu und Zn in Form des β -MK (2). Nach insgesamt etwa $70 \mu m$ liegt der Elektrodengrundwerkstoff (3) vor. In beiden Querschliffen von Abbildung 6.13 zeichnen sich die Legierungsgrenzen deutlich ab, weil eine Ätzung durchgeführt wurde.

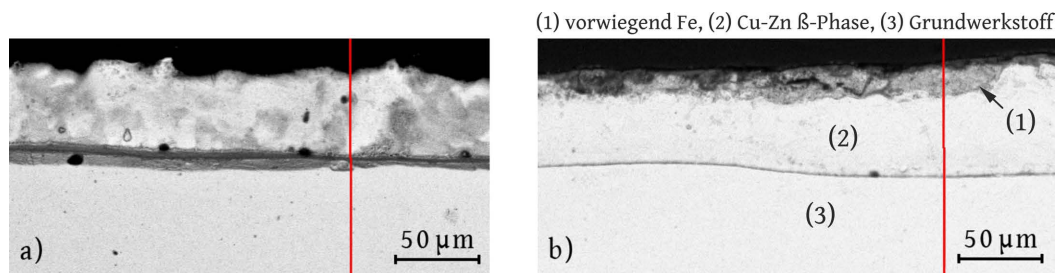


Abbildung 6.13.: BSE-Bilder der Legierungsschicht der oberen Elektrode von Versuchskennung CuCr1Zr-2-1000_stm1, a) nach 400 und b) nach 2400 Punkten

Abbildung 6.14 zeigt ein SE-Bild, an dem energiedispersive Röntgenspektroskopie-Messungen in Form eines Linienscans (rote Linie) und eines Element-Mappings (blaues Rechteck) vorgenommen wurden. Sie ergänzen die Erkenntnisse von Klages [176]. In der Kontaktfläche lassen sich Fe, Al, Cu und lokal auch Si nachweisen. Im schlierenartigen Verlauf der Legierungsbildung hinein in den Elektrodenwerkstoff erlaubt der Linienscan folgende Feststellung. Am Übergang zwischen Schliere und Elektrodengrundwerkstoff finden sich häufig Fe-Al-Mischkristallphasen von maximal 12 Masse% Al. Eine solche Phase tritt bei-

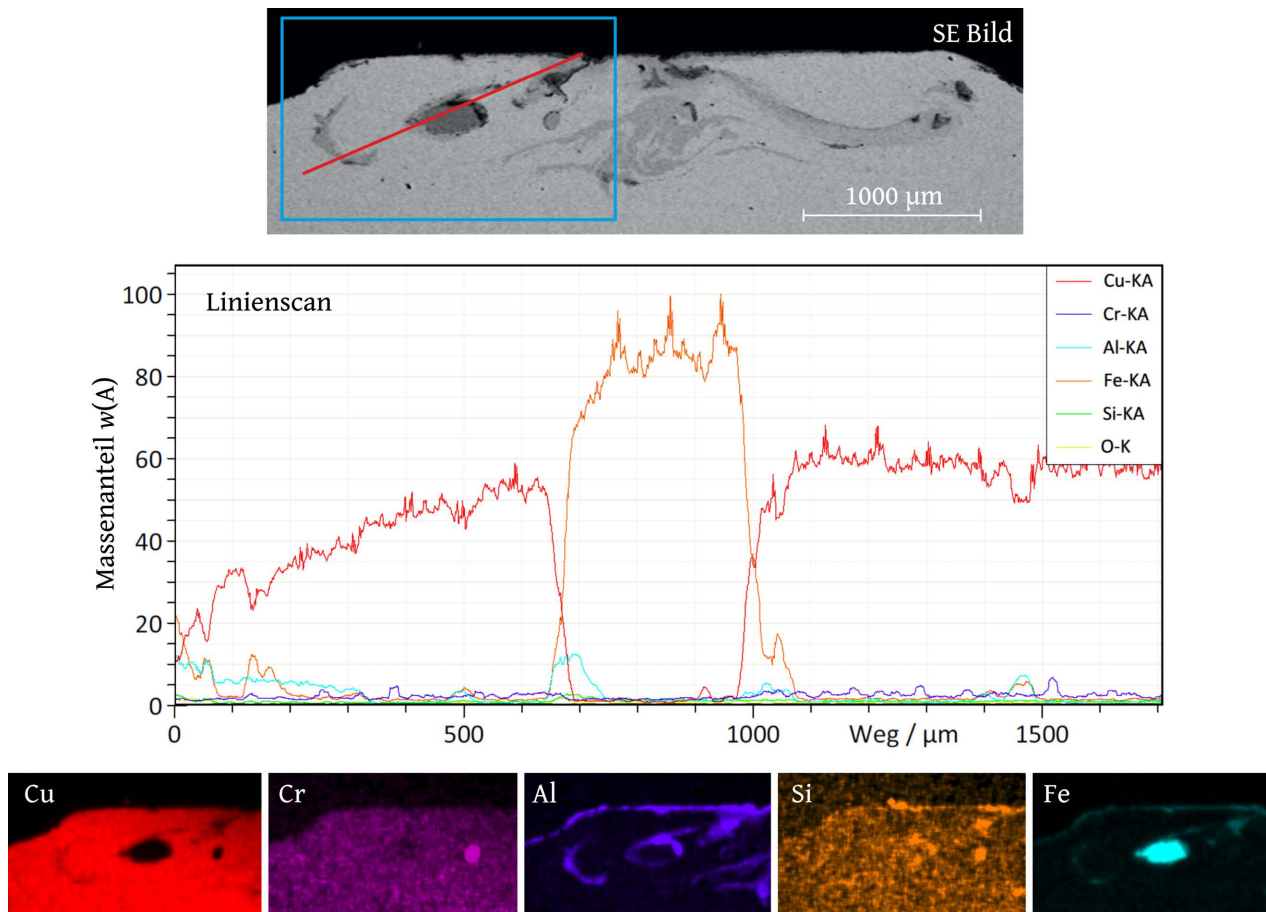


Abbildung 6.14.: Legierungsschichtzusammensetzung am Schliffbild der oberen Elektrode von (CuCr1Zr-22Mn-400_stm1 oben)

spielsweise im Linienscan von Abbildung 6.14 an Position 700 µm auf. Weitere Orte solcher Phasen lassen sich aus den Falschfarbenabbildungen für Al und Fe ableiten.

Bisweilen lassen sich die Beobachtungen aufgrund der hohen Druckkraft, der Temperaturwirkung welche auch zum Entfestigen des Elektrodenwerkstoffes führen und den anzutreffenden Legierungspartner mit einem mechanischen Legieren erklären. Aufgrund der konkav nach innen verteilten Prozesstemperaturen entfestigt CuCr1Zr in eben diesen Bereichen und ermöglicht es härteren und später ersmelzenden Legierungen unter entsprechender Druckkraft und schwacher Affinität gegenüber dem kontaktierten Blech, sich in den Elektrodenwerkstoff einzuarbeiten. Dieser Effekt könnte durch die ballige Elektrodenkontaktfläche begünstigt werden.

6.4. Ergebnisdiskussion

Aus den Standmengenversuchen für CuCr1Zr-Elektroden an feuerverzinkten Stählen weicher Güte zeigte sich anhand von Tabelle 6.4, dass die empirischen Vorgaben von typischerweise 120 Punktschweißverbindungen viel zu niedrig angesetzt sind. In den Experimenten

konnten Standmengen von minimal 552 und maximal 2764 Punktschweißverbindungen erzielt werden. Die Leistungssteigerung gegenüber der etablierten Vorgabe beträgt folglich 432 bis 2644 Punktschweißverbindungen (Ziel I aus Kapitel 1). Weiterhin zeigt die experimentell erfasste Streubreite von zumeist mehr als 300 Verbindungen innerhalb einer Versuchskennung auf, dass ein zusätzliches Standmengen-Potential von etwa 30 % nur durch bedarfsgerechte Elektrodenüberarbeitung ausgeschöpft werden kann. Diesem Ansatz widmet sich Kapitel 10.

Zwischen den Standmengenexperimenten der Versuchskennungen CuCr1Zr-1-100 und -1-300 wird der Einfluss der Stromzeit ersichtlich. Verlängert sich diese, muss für eine identische Verbindungsqualität die Stromstärke verringert werden, woraus eine systematisch vergrößerte Standmenge resultiert. Die hier untersuchte Verdreifachung der Stromzeit erhöhte die Standmenge um über 48 %, von ursprünglich 735 auf 1095 Punktschweißverbindungen. Der Einfluss der Blechdicke wurde durch Experimente an 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm dicken feuerverzinkten Stählen ermittelt. Eine verdoppelte Einzelblechdicke vergrößerte in etwa in gleichem Maße die verfügbare Standmenge. Beim Wechsel von verzinkten Stählen weicher Güte auf einen warmverfestigten Stahl mit hochfester AlSi-Beschichtung wurde das Standmengenende auch nach 2000 Punktschweißverbindungen nicht erreicht, d. h. die Elektrode kann weiter verwendet werden.

Aus der Verschleißdokumentation (Abschnitt 6.3) geht folgender Sachverhalt hervor: Sowohl bei steigender Stromzeit wie auch bei zunehmender Einzelblechdicke lag am Ende der Standmenge eine größere Kontaktfläche vor. Beim Schweißen feuerverzinkter Stähle ist diese Kontaktfläche stets eine flache Ebene mit kleinen aber charakteristischen lokalen Vertiefungen. Werden hingegen hochfeste 22MnB5-Bleche mit AlSi-Beschichtung verschweißt, bilden sich zwei Kontaktebenen aus, gekennzeichnet durch ein Plateau in der Mitte, wie in Abbildung 6.9 zu sehen. Lokale Vertiefungen treten weiterhin auf, sind aber deutlich kleiner und von größerer Zahl. Mit Mikrohärteprüfungen an Stufenversuchen konnte nachgewiesen werden, dass eine stationäre Entfestigung mit einer typischen Tiefe von 2,0 mm bereits wenige Schweißpunkte nach dem Einfahren der Elektroden vorliegt.

Die Analysen zur Legierungsausprägung bestätigen für CuCr1Zr beim Schweißen feuerverzinkter Stähle eine gering inhomogene Legierungsschicht. Bei der Quantifizierung konnte der β -MK aus Cu und Zn als vorherrschend nachgewiesen werden. Beim Schweißen von AlSi-beschichtetem 22MnB5 traten bereits in der Sichtprüfung deutliche Unterschiede zu den feuerverzinkten Stählen hervor. Mit der zeitlich gestuften Vermessung gelang es, ein aus der Kontaktfläche herauswachsendes inneres Plateau zu belegen. Im Querschliff zeigten sich schlierenartig eingearbeitete Blechbeschichtungsbestandteile. Beide Beobachtungen wurden bereits von Klages [176] beschrieben. Neu an den Ergebnissen dieser Arbeit ist, dass die Bildung des äußeren und inneren Plateaus scheinbar einem stationären Vorgang unterliegt. Denn die konfokale Messung zeigt auch sich verkleinernde Plateaus (Abbildung 6.8). Eine weitere neue Beobachtung ist, dass die Schlieren im Übergangsbe-

reich zum Elektrodenwerkstoff Fe-Al-Mischkristallphasen besitzen. Diese Phasen scheinen Elementkonzentrationen von Cr, Fe und auch Si gegenüber dem Elektrodengrundwerkstoff abzugrenzen. Schlussfolgerungen zu den beschriebenen Effekten dieses mechanischen Legierens werden in Kapitel 9 gezogen.

7. Verschleißverringderung durch modifizierte CuCr1Zr-Elektroden

Der ideale Elektrodenwerkstoff hat einen äußerst geringen elektrischen Widerstand, leitet Wärme gut ab, verformt sich an der Kontaktfläche nicht und legiert nicht an. Auf die Realität angewandt sollten die beschriebenen Eigenschaften möglichst gut verkörpert werden. CuCr1Zr wird als schmelzmetallurgisch hergestellte Legierung für Punktschweißaufgaben mit unlegiertem Stahl und beschichtetem Stahl empfohlen [81], wodurch angenommen werden kann, dass seine Eigenschaften für das Widerstandspunktschweißen gut ausbalanciert sind. Welche konkreten Einflüsse Festigkeit, Härte und elektrische Leitfähigkeit auf die Kontaktflächenverformung sowie auf die Legierungserscheinungen haben, ist bislang nicht allgemein bekannt, weshalb diese Gegenstand des folgenden Kapitels sind.

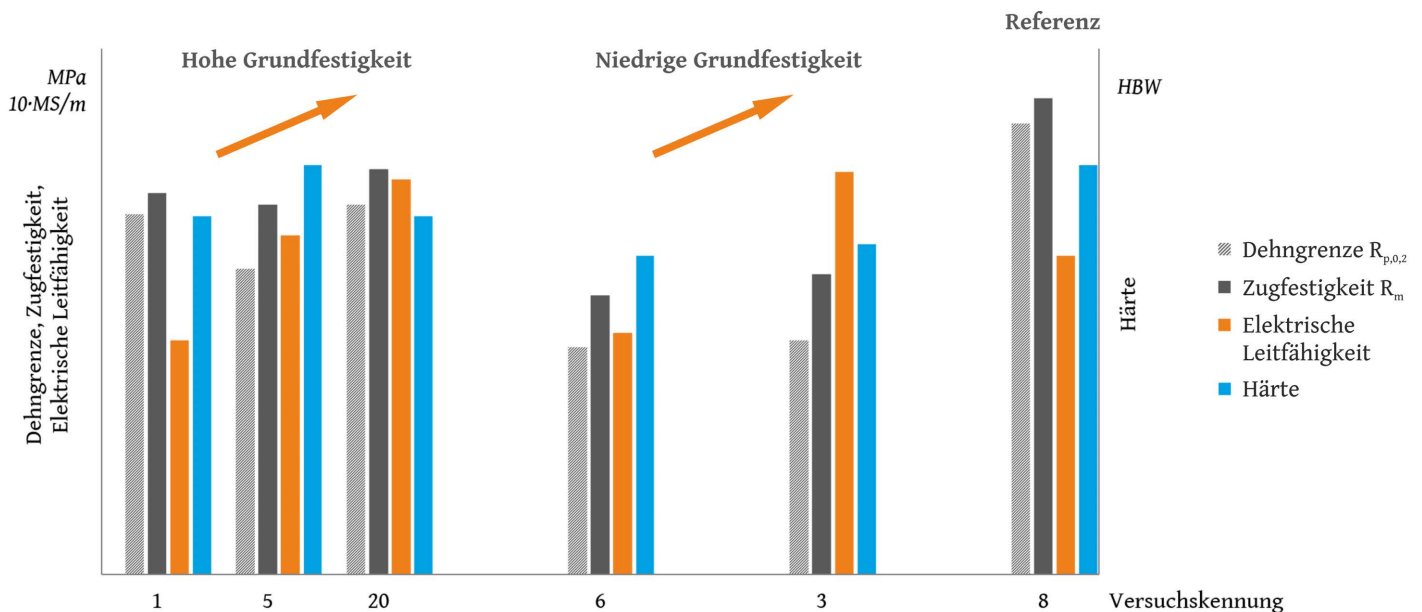


Abbildung 7.1.: Überblick der gefertigten CuCr1Zr-Modifikationen mit relativen Messwerten

Es ergab sich die Möglichkeit, CuCr1Zr durch einen großen deutschen Kupferhersteller in einer seriennahen Fertigung derart zu modifizieren, dass die Wirkungen von Festigkeit, Härte und elektrischer Leitfähigkeit getrennt voneinander untersucht werden konnten. Nach Festigkeit und steigender elektrischer Leitfähigkeit geordnet ergeben sich zwei Gruppen,

ergänzt durch die Referenzmodifikation nach ISO 5182 [81] gemäß Abbildung 7.1. Die erste Gruppe besitzt eine relativ hohe Festigkeit und steigt von Versuchskennung 1 über 5 bis auf 20 in der elektrischen Leitfähigkeit. Derselbe Unterschied in der Leitfähigkeit findet sich zwischen Kennung 6 und 3, allerdings auf niedrigerem Festigkeitsniveau. Zum Vergleich steht die Referenzmodifikation zur Verfügung, welche den Vorgaben der ISO 5182 [81] entspricht und durch eine besonders hohe Festigkeit bei mittlerer elektrischer Leitfähigkeit charakterisiert ist. Die Standmengenversuche werden entsprechend der sechs Modifikationen in sechs Versuchsnummern unterteilt, wie es Tabelle 7.1 zeigt.

Tabelle 7.1.: Versuchsmatrix für Elektroden aus modifiziertem CuCr1Zr, Werkstoffauswahl

| Elektrodenwerkstoff | oberes Stahlblech | unteres Stahlblech | Versuchskennung |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| CuCr1Zr-mod-1 | | | Mod-1 |
| CuCr1Zr-mod-5 | | | Mod-5 |
| CuCr1Zr-mod-20 | DX53D+Z100 | DX53D+Z100 | Mod-20 |
| CuCr1Zr-mod-6 | 1,0 mm | 1,0 mm | Mod-6 |
| CuCr1Zr-mod-3 | | | Mod-3 |
| CuCr1Zr-mod-8 | | | Mod-8 |

7.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix

Als grundlegende Prozessparameter für den einimpulsigen Punktschweißprozess wurden bereits im Abschnitt der Versuchsplanung Elektrodenkraft, Stromzeit und Startzustand der Elektrodenkontaktfläche festgelegt (Tabelle 5.6). Der Vollständigkeit halber sind diese Angaben für eine leichtere Übersicht in Tabelle 7.2 übernommen worden, auf deren Basis alle Wachstumskurven für die modifizierten CuCr1Zr-Elektroden erarbeitet wurden.

Tabelle 7.2.: Versuchsmatrix für Elektroden aus modifiziertem CuCr1Zr, primäre Prozessparameter

| Versuchskennung | Wachstumskurve | Mod- i _wk1 ^a | Mod- i _wk2 ^a |
|--|----------------|----------------------------|----------------------------|
| Kühlwasserdurchflussmenge $Q_{Kuehlwasser}$ | l/min | 4 | |
| Kühlwassertemperatur $\vartheta_{Kuehlwasser}$ | $^{\circ}C$ | 18 – 20 | |
| Elektrodenkraft F_{El} | kN | 2,7 | 2,5 |
| Vorhaltezeit $T_{squeeze}$ | ms | | 150 |
| Stromzeit t_w | ms | | 100 |
| Nachhaltezeit $t_{F_{El},hold}$ | ms | | 150 |
| Taktzeit | $Verb./min$ | 20 | |

^a Index: $i = 1, 3, 5, 6, 8, 20$.

Beginnend bei einer Stromstärke von 8,8 kA, welche auf Erfahrungswerten beruht, wird

der Punktdurchmesser im Bezug zur steigenden Stromstärke aufgezeichnet, wie Abbildung 7.2 für den Elektrodenwerkstoff CuCr1Zr-mod-3 zeigt. Den Einfluss, welchen eine leicht verringerte Elektrodenkraft hat, ergänzt die rechte Wachstumskurve. Dies ist interessant, wenn kleine und leichte Widerstandspunktschweißzangen mit geringerer verfügbarer Elektrodenkraft eingesetzt werden sollen.

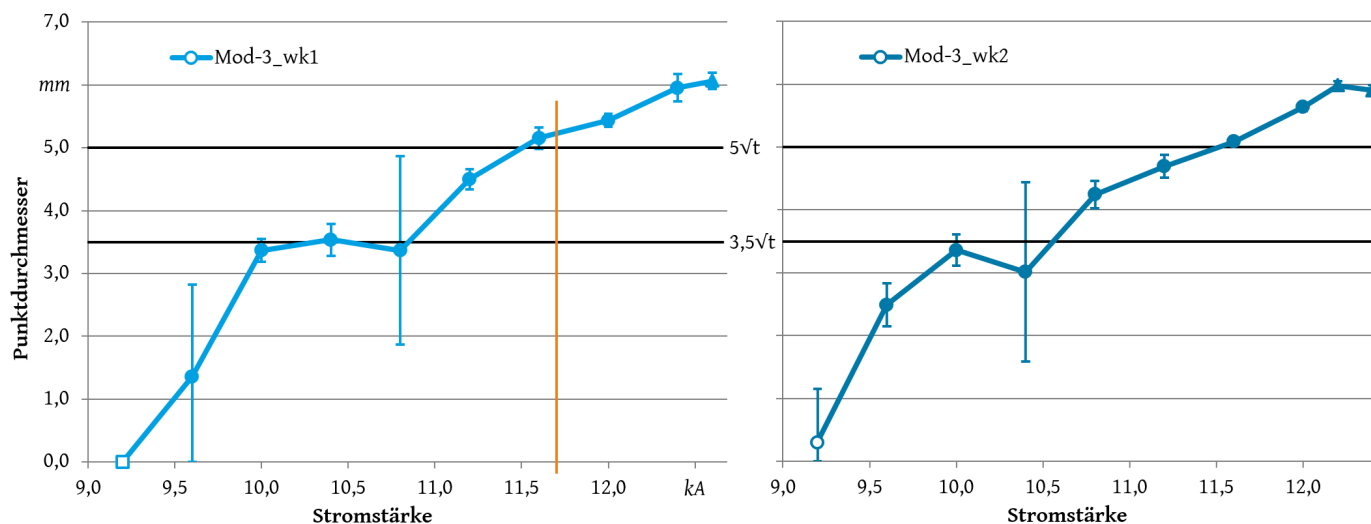


Abbildung 7.2.: Wachstumskurven für den Elektrodenwerkstoff Mod-3

In der Wachstumskurve für die in den Standmengenexperimenten eingesetzte Elektrodenkraft von $2,7 \text{ kN}$ (Mod-3_wk1) zeigen sich entlang der unteren Qualitätsgrenze von $d_w = 3,5\sqrt{t}$ größere Streubreiten des Punktdurchmessers, welche mit steigender Stromstärke deutlich abnehmen. Bei einem Punktdurchmesser von $5,2\sqrt{t}$ wird die Start-Qualität für hiesige Standmengenexperimente erreicht. Sie ist in Orange gekennzeichnet. Die Grenze des verfügbaren Schweißstrombereiches ergibt sich erst bei $12,6 \text{ kA}$, da dort erstmals Schweißspritzer auftreten. Wird die Elektrodenkraft um 200 N reduziert (Mod-3_wk2), steigt der erzielbare Punktdurchmesser aufgrund des höheren lokalen elektrischen Widerstandes bei gleicher Stromstärke geringfügig an. Etwas markanter ist, dass die Spritzergrenze bereits bei $12,2 \text{ kA}$, also 400 A früher erreicht wird. Diese genannten Veränderungen bei reduzierter Elektrodenkraft sind typisch, wie es der Vergleich zwischen $F_{El} = 2,7 \text{ kN}$ (Tabelle 7.3) und $F_{El} = 2,5 \text{ kN}$ (Tabelle E.1 im Anhang) für die fünf anderen CuCr1Zr-Modifikationen bekräftigt. Diese beiden Tabellen zeigen auch, dass der verfügbare Schweißstrombereich bei höherer Elektrodenkraft im Mittel ein wenig größer ist.

Bei mittlerer Festigkeit steigt mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit (Mod-1,5,20) erwartungsgemäß die notwendige Stromstärke für Punktdurchmesser von $3,5\sqrt{t}$ und für Schweißspritzer (Tabelle 7.3). Deutlich weniger auffällig steigt die benötigte Stromstärke für die Eingangsqualität von $d_w = 5,2\sqrt{t}$ bei den Standmengenexperimenten. Für den Schweißstrombereich und für den maximal erzielbaren Punktdurchmesser zeichnet sich eine andere Tendenz ab. Hier hat die Modifikation 5 die schlechtesten Werte. Steigt oder

Tabelle 7.3.: Ergebnisse der Wachstumskurven und Stromstärken für Standmengenversuche (Ergänzung zur Versuchsmatrix)

| Versuchskennung | Stromstärke I_w für | | | Schweißstrombereich | $d_w = max$ |
|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------|---------------------|-------------|
| | $d_w = 3,5\sqrt{t}$ | $d_w = 5,2\sqrt{t}$ | Spritzergrenze | | |
| | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>mm</i> |
| Mod-1_wk1 | 9,6 | 11,0 | 11,4 | 1,8 | 5,6 |
| Mod-5_wk1 | 9,8 | 11,1 | 11,2 | 1,4 | 5,4 |
| Mod-20_wk1 | 10,2 | 11,1 | 12,0 | 1,8 | 5,8 |
| Mod-6_wk1 | 10,3 | 11,4 | 12,2 | 1,9 | 5,8 |
| Mod-3_wk1 | 10,9 | 11,7 | 12,6 | 1,7 | 6,0 |
| Mod-8_wk1 | 9,9 | 11,2 | 11,6 | 1,7 | 5,6 |

sinkt die elektrische Leitfähigkeit der Elektrode ausgehend von Modifikation 5, vergrößern sich erreichbarer Schweißstrombereich und maximaler Punktdurchmesser.

Bei geringerer Festigkeit, also bei den Modifikationen 6 und 3, sind die beschriebenen Tendenzen ähnlich. Zwischen den beiden betrachteten Grundfestigkeitsplateaus steigen hin zur geringeren Festigkeit die jeweils benötigte Stromstärke sowie der jeweils maximal erzielbare Punktdurchmesser an. Einen direkten Vergleich des Festigkeitseinflusses ermöglichen die Elektroden der Modifikationen 3 und 20, bei welchen ein markanter Dehngrenzenunterschied vorliegt. Diese beiden belegen sicher, dass mit zugweicherem Kristallgitter eine höhere Stromstärke für den gleichen Punktdurchmesser notwendig ist. Einen zweiten direkten Vergleich erlauben die Modifikationen 5 und 8. Mod-8 weist eine charakteristisch höhere Dehngrenze auf. Den bisherigen Effekten nach müsste die Stromstärke sinken und ebenso der maximale Punktdurchmesser. Doch beide Größen steigen minimal an.

7.2. Standmengen

Mit der Werkstoffauswahl aus Tabelle 7.1, den Prozessparametern der Wachstumskurvenserie 1 (wk1) aus Tabelle 7.2 und den hervorgehobenen Stromstärken aus Tabelle 7.3 sind die Standmengenexperimente vollständig definiert. Darauf aufbauend wurden für jeden der sechs Elektrodenwerkstoffe stets drei Standmengenkurven (stm1 bis stm3) erarbeitet.

Für die Elektrodenwerkstoffe Mod-1, Mod-5 und Mod-20, welche sich alle auf einem mittleren Festigkeitsplateau befinden, wurden die Standmengenverläufe in die Abbildungen 7.3 und 7.4 eingetragen. Im Vergleich zeigt Mod-5 den zweckmäßigsten Verschleißverlauf. Denn der stetig abfallende Punktdurchmesser hält sich reproduzierbar auf einem konstant hohen Niveau, bis dieser bei frühestens 1194 Punktschweißverbindungen die minimal zulässige Qualitätsgrenze markant schneidet. Die beiden anderen CuCr1Zr-Modifikationen fallen hinsichtlich des Punktdurchmessers steiler ab, sie erreichen viel zeitiger die Qualitätsuntergrenze und haben eine größere Standmengen-Streubreite, wie Tabelle 7.4 zeigt.

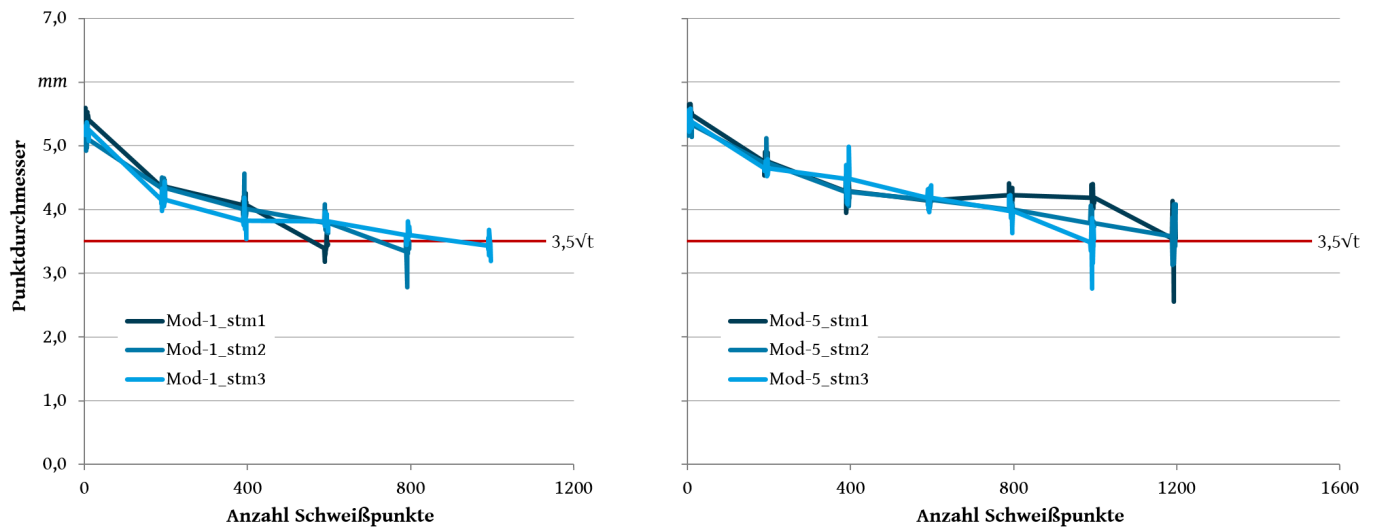


Abbildung 7.3.: Standmengenkurven für die Elektrodenwerkstoffe Mod-1 und Mod-5

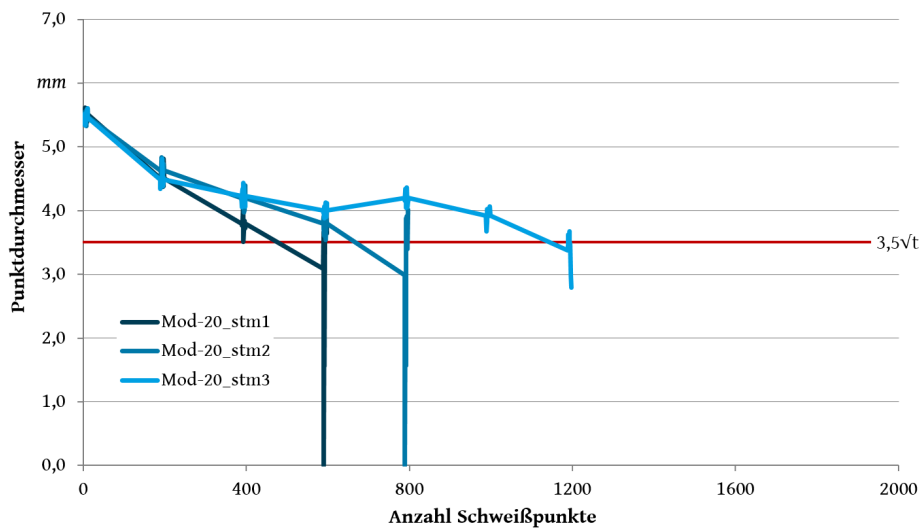


Abbildung 7.4.: Standmengenkurven für den Elektrodenwerkstoff Mod-20

Die Standmengenverläufe für Elektrodenwerkstoffe Mod-6 und Mod-3, welche auf einem niedrigen Festigkeitsplateau liegen, zeigt Abbildung 7.5. Bei geringer elektrischer Leitfähigkeit (Mod-6) bildet sich ein gut reproduzierbarer Verlauf ab, welcher zeitlich lange auf einem Niveau leicht oberhalb der Qualitätsuntergrenze von $d_w = 3,5\sqrt{t}$ verweilt. Mit einer prägnant größeren elektrischen Leitfähigkeit (Mod-3) verliert der Verlauf der Standmenge zwar an Reproduzierbarkeit, aber zugleich ist der Punktdurchmesser zumeist größer, bis dieser dem Standmengenende zuläuft. Das Verlaufsbild von Mod-3 ist erstrebenswert, wodurch sich weitere Untersuchungen (Kapitel 10) auf diese Modifikation konzentrieren werden. Die Zahlenwerte zum Vergleich der Standmengen zeigt Tabelle 7.4.

Mod-3 und Mod-20 weisen eine annähernd gleiche elektrische Leitfähigkeit auf, in der Festigkeit unterscheiden sich beide. Aus dieser Konstellation lässt sich vermuten, dass der mechanisch stabilere Werkstoff (Mod-20) über eine längere Zeit die Kontaktflächenform

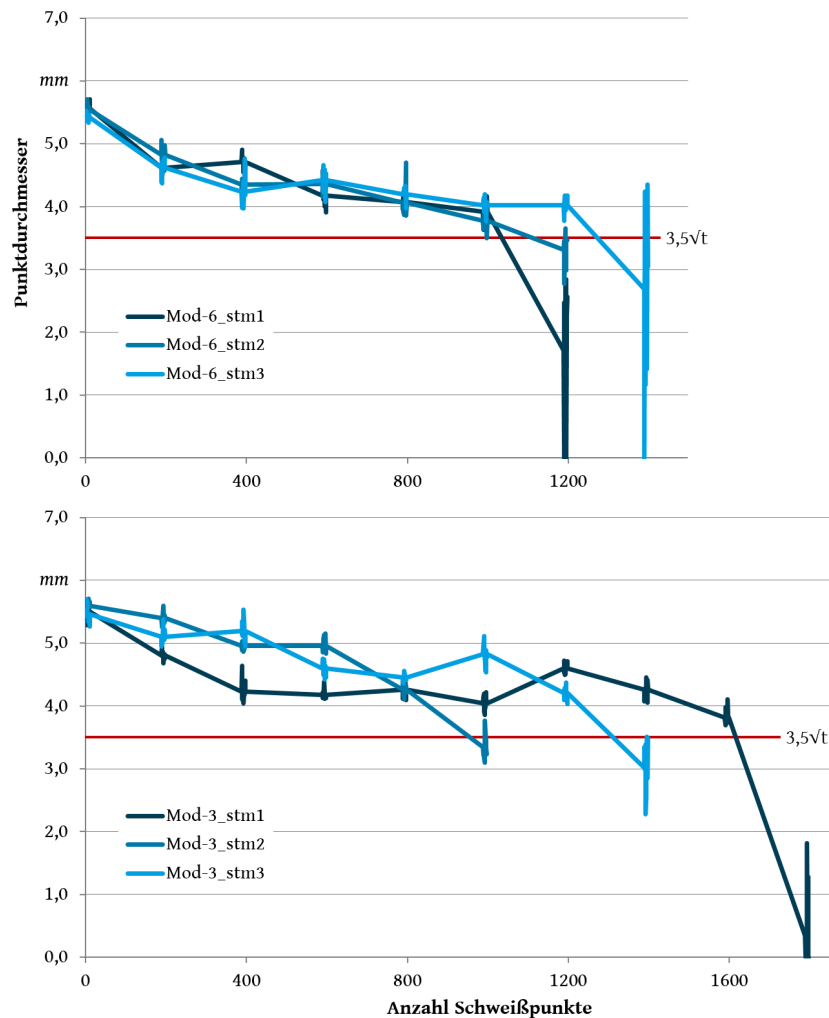


Abbildung 7.5.: Standmengenkurven für die Elektrodenwerkstoffe Mod-6 und Mod-3

behält und somit größere Standmengen ermöglicht. Das experimentell erarbeitete Ergebnis widerspricht dem allerdings, denn das weichere Kristallgitter (Mod-3) erlaubt auffallend größere Standmengen.

Einen Vergleich zwischen elektrisch ähnlich leitfähigen Elektrodenwerkstoffen erlauben Mod-5 und Mod-8, wobei letzterer eine charakteristisch höhere Festigkeit aufweist. Von den erreichbaren Punktschweißverbindungen sind sich beide Elektroden relativ ähnlich. Jedoch ist der Punktdurchmesserverlauf von Mod-5 über die Nutzungszeit hinweg reproduzierbarer, besitzt eine geringere Streuung in den Einzelmessungen und hat ein höheres Haupt-Niveau im Vergleich zu Mod-8. Somit zeigt sich in den beiden Vergleichen ein negativer Einfluss auf das Standmengenverhalten bei gesteigerter Elektroden-Werkstofffestigkeit.

Zum Vergleich sind die Erkenntnisse der Standmengenexperimente in Tabelle 7.4 zusammengestellt. In dieser erfolgt auch eine Bewertung des Verschleißverhaltens, wie es in Abschnitt 6.2 für Standard-CuCr1Zr bereits erfolgte. Entscheidungsgrundlage dafür sind erneut sieben Merkmale, nämlich die minimale und maximale Standmenge, die Streubreite der Einzelmessungen sowie Größe, Verlauf, Einteilmöglichkeit und Reproduzierbarkeit vom

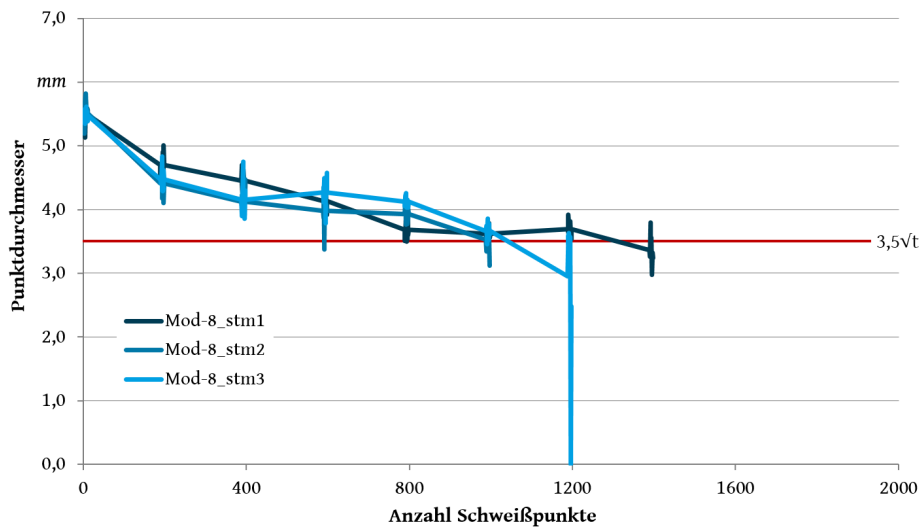


Abbildung 7.6.: Standmengenkurven für den Elektrodenwerkstoff Mod-8

Abfall des Standmengenverlaufs.

Aus Tabelle 7.4 ergeben sich mit Mod-5, Mod-6 und Mod-3 drei CuCr1Zr-Modifikationen mit zweckmäßigem Standmengenverhalten, welche tiefergehend untersucht werden sollten.

Tabelle 7.4.: Standmengenenergebnis-Überblick für Elektroden aus modifiziertem CuCr1Zr

| Versuchskennung ^b | $R_{p0,2}$ | Härte | σ | Standmenge | | | Verschleißverhalten |
|---------------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------|------|-------------|---------------------|
| | MPa ^c | HBW ^c | MS/m ^c | min. | max. | Streubreite | |
| <i>Punktschweißverbindungen</i> | | | | | | | |
| Mod-1_stm i | 0 | 0 | -- | 569 | 996 | 427 | – |
| Mod-5_stm i | – | ++ | + | 1194 | 1271 | 77 | + |
| Mod-20_stm i | + | 0 | ++ | 484 | 1156 | 672 | – |
| Mod-6_stm i | -- | -- | -- | 1038 | 1278 | 240 | + |
| Mod-3_stm i | -- | -- | ++ | 966 | 1618 | 652 | ++ |
| Mod-8_stm i | ++ | ++ | 0 | 1015 | 1318 | 303 | – |

^b Index: $i = 1..3$.

^c Relative Angabe zwischen den sechs Werkstoffen in fünf Stufen eingeteilt, ,--‘=sehr niedrig, ,-‘=niedrig, ,0‘=mittel, ,+‘=hoch, ,++‘=sehr hoch.

7.3. Verschleißdokumentation

Ausgangspunkt für die Bewertung verschlissener Elektrodenkappen ist die Kontaktfläche. Ein besonders eindrucksvolles Kennzeichen auf der Fläche sind ausgebrochene Stellen bzw. Vertiefungen. Zu deren quantitativen Beurteilung eignet sich in besonderer Weise die konfokal chromatische Messung, wie in Abschnitt 5.3.3 erarbeitet. Abbildung 7.7 stellt die

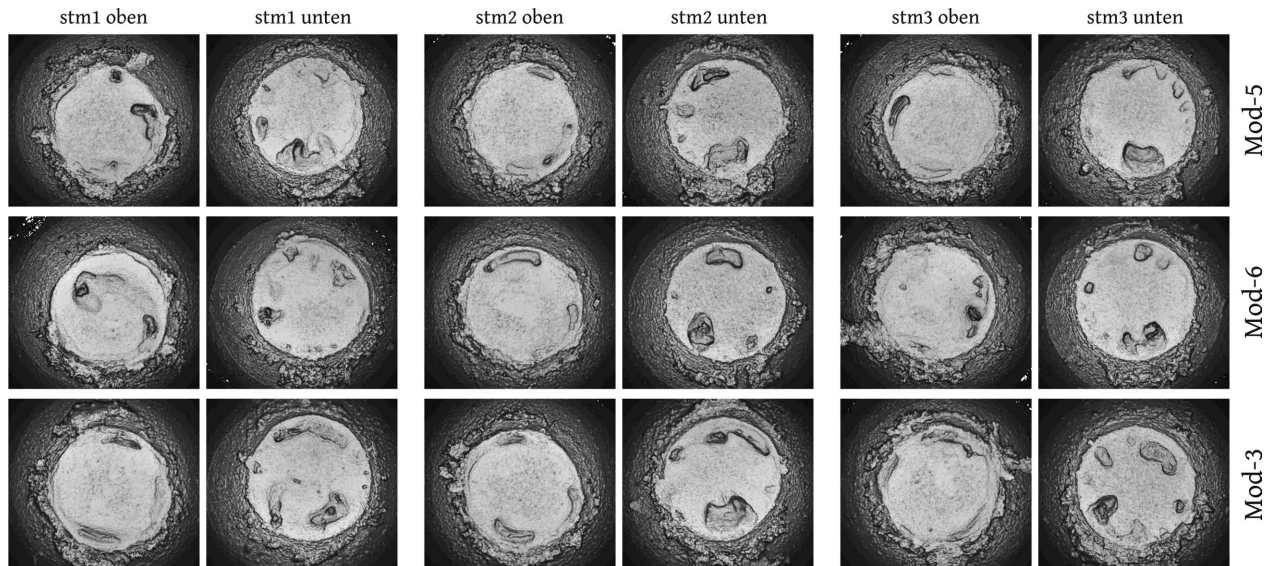


Abbildung 7.7.: Visualisierungen der konfokal chromatischen Ergebnisse von Mod-5, 6 & 3

konfokal chromatischen Ergebnisse für alle 18 Elektroden der Standmengenexperimente von Mod-5, Mod-6 und Mod-3 in grauwertcodierter Höhe zusammen. Helle Flächen kennzeichnen die Kontaktflächen. Dunkle Flächen liegen unterhalb dieser. Auffällig sind auf den ersten Blick die zahlreichen lokalen Vertiefungen auf allen Kontaktflächen. Diese zeigen durchweg eine Orientierung zum Rand hin. Anzahl, Tiefe und Verteilung können gemäß Abbildung 7.7 als typisch für das Widerstandspunktschweißen von verzinkten Stählen angenommen werden. Diese Erkenntnisse treffen auch auf alle anderen Kontaktflächen der modifizierten CuCr1Zr-Legierungen zu.

In Tabelle 7.5 werden zwei ausgewählte Merkmale aus den konfokal chromatischen Messdaten extrahiert, mit denen die Kontaktfläche quantitativ charakterisiert werden kann. Dies sind die projizierte Kontaktfläche, die sich bei einer Einsinktiefen von $50\ \mu\text{m}$ ergibt, und ihr Durchmesser. Beide werden gemäß Abbildung 5.8 ermittelt und für alle modifizierten CuCr1Zr-Elektroden aufgeführt.

Den größten Kontaktflächendurchmesser haben am Standmengenende die Mod-3 Elektroden mit etwa $6,9\ \text{mm}$. Die hohe elektrische Leitfähigkeit ist ein Kriterium, um auch bei sehr stark vergrößerter Kontaktzone noch eine qualitätsgerechte Verbindungsherstellung zu gewährleisten. Bei niedrigster elektrischer Leitfähigkeit (Mod-1) sind die Kontaktflächendurchmesser im Mittel um $0,5\ \text{mm}$ kleiner. Alle anderen Modifikationen bewegen sich dazwischen und zeigen im Zusammenspiel von elektrischer Leitfähigkeit und Zugfestigkeit unterschiedliche maximale Kontaktflächendurchmesser. Bei der Kontaktflächenberechnung besitzen im Mittel Mod-6 und Mod-3 die größte Fläche mit $31,6..31,7\ \text{mm}^2$. Die kleinste Fläche weisen die Mod-1-Elektroden mit $28,7\ \text{mm}^2$ auf. Alle anderen Modifikationen bewegen sich dazwischen gemäß den Kennzeichen der Standmengenkurven aus Abschnitt 7.2. Zwischen oberer und unterer Elektrode lassen sich keine eindeutigen Unterschiede in Durchmesser und Fläche erkennen.

Tabelle 7.5.: Kontaktflächen-Geometrie zum Standmengenende aller modifizierten CuCr1Zr-Elektroden

| Versuchs- kennung | Betreffende RSW-Verb. | d_w | Kontaktflächendurchmesser | | Kontaktfläche 50 μm tief | |
|----------------------|--------------------------|-------|---------------------------|------------|-------------------------------------|------------|
| | | | obere El. | untere El. | obere El. | untere El. |
| | | mm | mm | mm | mm^2 | mm^2 |
| Mod- i^d _sg | 0 | | 6,0 | 5,9 | 24,7 | 24,5 |
| Mod-1_stm1 | 600 | 3,4 | 6,5 | 6,4 | 29,7 | 27,2 |
| Mod-1_stm2 | 800 | 3,4 | 6,3 | 6,4 | 29,3 | 28,2 |
| Mod-1_stm3 | 1000 | 3,2 | 6,4 | 6,4 | 29,0 | 28,9 |
| Mod-5_stm1 | 1200 | 3,4 | 6,6 | 6,6 | 28,7 | 30,8 |
| Mod-5_stm2 | 1200 | 3,4 | 6,3 | 6,6 | 29,0 | 28,6 |
| Mod-5_stm3 | 1200 | 1,7 | 6,6 | 6,6 | 30,0 | 30,6 |
| Mod-20_stm1 | 1400 | 2,4 | 6,7 | 6,7 | 30,5 | 27,3 |
| Mod-20_stm2 | 800 | 3,4 | 6,5 | 6,6 | 30,3 | 29,1 |
| Mod-20_stm3 | 1200 | 2,8 | 6,3 | 6,5 | 29,7 | 29,3 |
| Mod-6_stm1 | 1200 | 2,3 | 6,7 | 6,7 | 31,6 | 32,0 |
| Mod-6_stm2 | 1200 | 3,3 | 6,7 | 6,6 | 32,1 | 30,1 |
| Mod-6_stm3 | 1400 | 3,1 | 6,7 | 6,7 | 31,6 | 32,7 |
| Mod-3_stm1 | 1800 | 0,0 | 6,8 | 6,9 | 32,3 | 32,3 |
| Mod-3_stm2 | 1000 | 3,2 | 6,8 | 7,1 | 31,9 | 30,9 |
| Mod-3_stm3 | 1400 | 3,4 | 6,8 | 6,8 | 31,5 | 30,7 |
| Mod-8_stm1 | 1400 | 3,3 | 7,0 | 6,8 | 31,6 | 31,1 |
| Mod-8_stm2 | 1200 | 3,3 | 6,7 | 6,8 | 30,9 | 30,9 |
| Mod-8_stm3 | 1200 | 2,5 | 6,3 | 6,7 | 28,3 | 29,4 |

^d Index: $i = 1, 5, 20, 6, 3, 8$; gemittelt über sechs Elektrodenpaare.

Die Ergebnisse der Mikrohärteuntersuchung visualisiert Abbildung 7.8 für die drei aus den Standmengenuntersuchungen hervorzuhebenden Modifikationen. Allen gemeinsam ist, dass diese in der Nähe der Kontaktfläche auf etwa 60 % der typischen Grundwerkstoffhärte abfallen, wobei der Wert der oberen Elektrode immer leicht geringer ist als jener der unteren Elektrode. Weiterhin gemeinsam ist ausgehend von der Kontaktfläche ein Anstieg der Härte, der spätestens bei 1,5 mm Tiefe wieder auf Höhe der Grundwerkstoffhärte liegt. An Standard-CuCr1Zr aus Abschnitt 6.3.2 konnte erst ab einer Tiefe von über 2,0 mm jene Grundwerkstoffhärte ermittelt werden. In Abbildung 7.8 ist weiterhin der erwartungsgemäße Unterschied zwischen den Grundwerkstoffhärten von Mod-5 und Mod-6 & 3 zu erkennen. Tabelle 7.6 beschränkt sich daher für die Betrachtung aller untersuchten Modifikationen auf die Einzelmesswerte von der Elektrodenkontaktfläche bis 2,0 mm in die Elektrode hinein.

Unter Berücksichtigung, dass die Messwerte einer Unsicherheit von etwa $\pm 2\%_{rel} HV 0,1$ unterliegen und jeder Eindruck ein hinsichtlich seiner Realstruktur abweichendes Kristallgitter trifft, zeigt sich an der oberen Elektrode ein im Mittel um etwa 5 % stärkerer

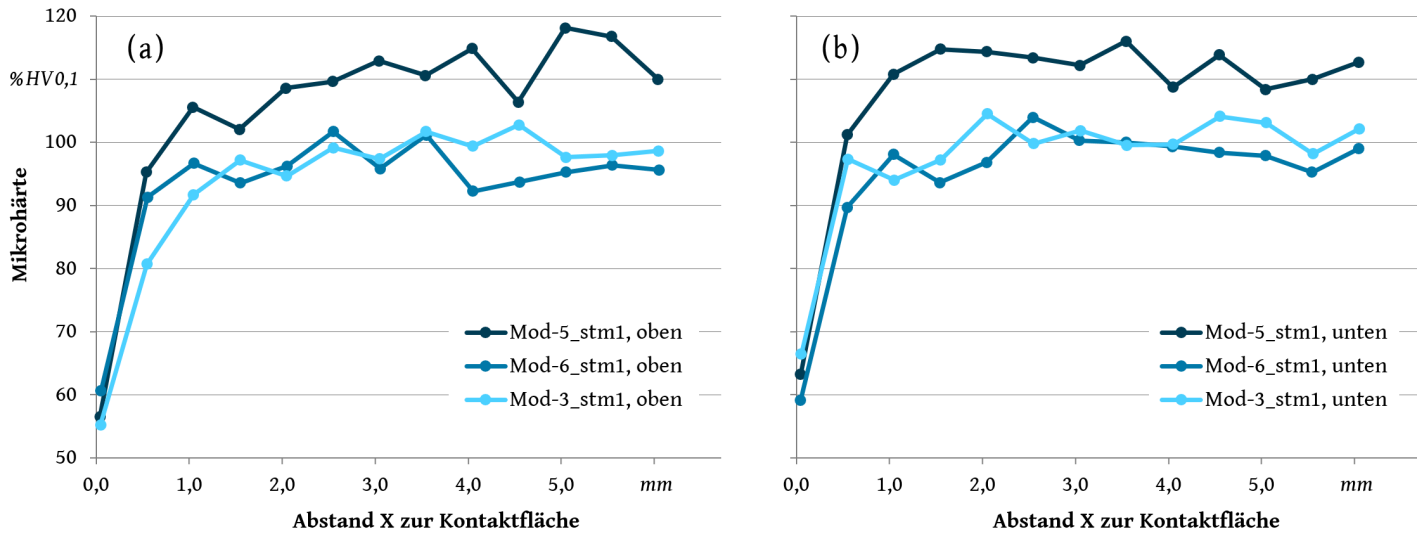


Abbildung 7.8.: Härteverläufe in den Elektrodenkappen Mod-5, Mod-6 und Mod-3 bezogen auf die typische Grundwerkstoffhärte

Härteabfall als an der unteren Elektrode. Diese Erscheinung ist bei allen Modifikationen zu beobachten und aus der Elektronenmigration heraus erklärbar. Wird der Härtewert in $0,5\text{ mm}$ Tiefe betrachtet, zeigen sich bereits tendenziell die zugehörigen Grundwerkstofffestigkeiten. Tabelle 7.6 belegt weiter, dass nach $1,0\text{ mm}$ Grundwerkstofffestigkeiten gemessen werden können. Ebenfalls lassen die Messwerte Schwankungen in der Grundwerkstofffestigkeit zwischen Elektroden einer Modifikation erkennen und leicht variierende Entfestigungstiefen zwischen den sechs Modifikationen.

Tabelle 7.6.: Ausschnitt aus den Härteverläufen aller Elektrodenkappen aus modifiziertem CuCr1Zr, Härte bezogen auf typischen Grundwerkstoffwert

| Versuchs- kennung | Messposition in mm , obere Elektrode \approx 0,5 1,0 1,5 2,0 0,07 | | | | | Messposition in mm , untere Elektrode \approx 0,5 1,0 1,5 2,0 0,07 | | | | |
|----------------------|---|----|-----|-----|-----|--|-----|-----|-----|-----|
| | %rel HV 0,1 | | | | | %rel HV 0,1 | | | | |
| Mod-1_stm1 | 63 | 90 | 101 | 97 | 101 | 61 | 91 | 94 | 97 | 90 |
| Mod-5_stm1 | 57 | 95 | 106 | 102 | 109 | 63 | 101 | 111 | 115 | 114 |
| Mod-20_stm1 | 60 | 83 | 88 | 90 | 100 | 60 | 88 | 94 | 93 | 96 |
| Mod-6_stm1 | 61 | 91 | 97 | 94 | 96 | 59 | 90 | 98 | 94 | 97 |
| Mod-3_stm1 | 55 | 81 | 92 | 97 | 95 | 66 | 97 | 94 | 97 | 105 |
| Mod-8_stm1 | 57 | 95 | 112 | 107 | 115 | 59 | 98 | 105 | 104 | 105 |

Werden die Querschliffe der Elektroden unter dem Lichtmikroskop betrachtet, lassen sich aus allen Einzelbildern vier Kennzeichen für die Legierungsschichtausprägung ableiten. Hierzu gehören: 1. verdrängte Legierungsschichten, in der Literatur auch als Bartbildung bezeichnet, 2. „Verästelungen“, 3. lokale Vertiefungen (Pittings) und 4. die Legierungstiefe.

Abbildung 7.9 stellt diese vier Kennzeichen repräsentativ an Mod-3_stm1 zusammen.

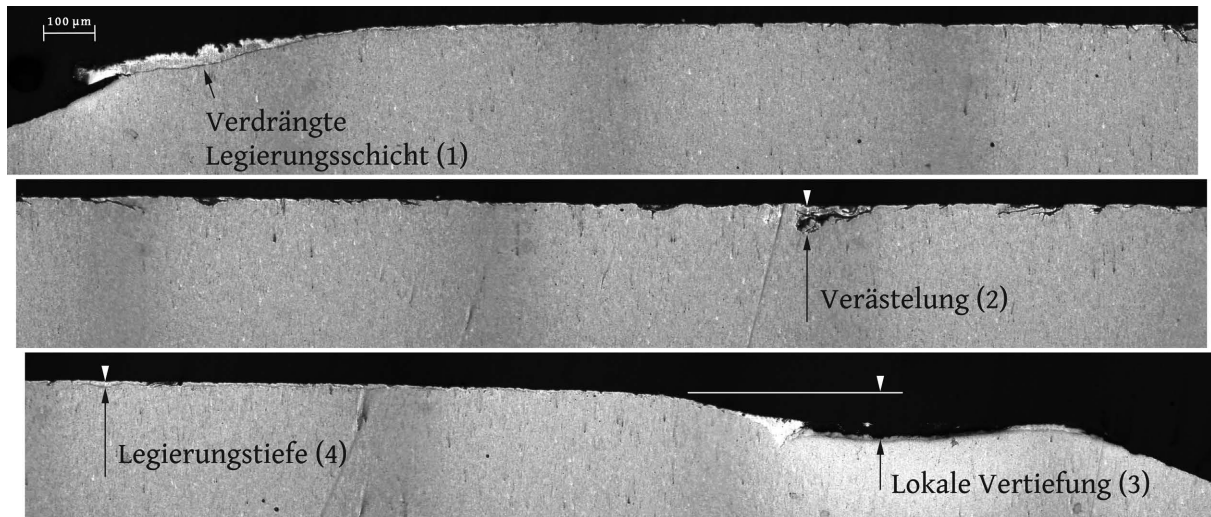


Abbildung 7.9.: Legierungsschichtausprägung und Kennzeichen am Beispiel Mod-3_stm1

Die detaillierte Betrachtung zur Legierungsschichtausprägung in Tabelle 7.7 zeigt folgende zwei Besonderheiten. Zum Ersten weisen die Beschreibungen der inneren Legierungsgrenze nach, dass diese bei den unteren Elektroden deutlich gleichförmiger und stetiger ist als bei den oberen Elektroden. Zum Zweiten ist an der jeweils oberen Elektrode stets eine stärkere „Verästelung“ detektiert worden. Beide Effekte können vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass die obere Elektrode als erstes angehoben wird und damit kürzer am Blech verweilt als die untere. Durch das Anheben lösen sich die aufgebracht Druckspannungen an der oberen Elektrode deutlich abrupter, was kombiniert mit der frühzeitigeren Wegnahme zu einem offenbar stärker diskontinuierlichen Ablösen von Elektrodenkontaktfläche und Blechoberfläche führt. Die lokalen Vertiefungen (bis $175\ \mu\text{m}$) sowie die Legierungstiefe ($15..60\ \mu\text{m}$) sind über alle Elektroden hinweg gleichartig ausgeprägt. Als allgemeine Erkenntnis für die Praxis lässt sich daraus für das Widerstandspunktschweißen von feuerverzinkten Stählen weicher Güte mit CuCr1Zr-Elektroden eine Frästiefe von $200\ \mu\text{m}$ ableiten. Grundlegend decken sich die erhaltenen Ergebnisse mit denen an Standard-CuCr1Zr aus Kapitel 6.

Die Analyse zur Elementverteilung an den vier Merkmalen (1) bis (4) (Abbildung 7.9) im Querschnitt wurde für alle Elektrodenkappen der ersten Standmengen-Versuchsreihe durchgeführt. Mit 15 Stellen je Elektrode ergaben sich somit für die Versuchskennung "Mod"60 analysierte Stellen. Die dabei ermittelten Erkenntnisse lassen sich auf vier verschiedene Beobachtungen eingrenzen, welche Abbildung 7.10 visualisiert. Unberücksichtigt dabei bleibt der Elektrodengrundwerkstoff. Die Markierung (a) besteht aus den Elementen der verschweißten Blechbeschichtung (Zn, Al) und geringen Anteilen des Blechwerkstoffs (Fe). In Markierung (d) befindet sich ein verästelter Hohlraum, welcher aus einem mechanischen Abreisen eines Teils der Elektrodenkontaktfläche mit anschließendem Andrücken

Tabelle 7.7.: Legierungsschichtausprägung der modifizierten CuCr1Zr-Elektroden aus den Versuchen stm1 und stm2, unterteilt in obere und untere Elektrode

| Versuchs- kennung | Äußere Merkmale | | | Innere Merkmale | |
|----------------------|-----------------|-------------|-------------|------------------------|-----------------|
| | Beschreibung | Verästelung | Vertiefung | Beschreibung | Legierungstiefe |
| | | μm | μm | | μm |
| Mod-1 oben | glatt bis rau | 19 ± 4 | 67 | leicht zerklüftet | 34 ± 19 |
| Mod-1 unten | | 14 ± 4 | 42 ± 2 | gleichmäßig | 23 ± 3 |
| Mod-5 oben | glatt bis rau | 31 ± 11 | 174 | leicht zerklüftet | 21 ± 6 |
| Mod-5 unten | | 26 ± 21 | 55 ± 46 | gleichmäßig bis wellig | 36 ± 21 |
| Mod-20 oben | glatt bis rau | 38 ± 23 | 161 | wellig bis zerklüftet | 22 ± 7 |
| Mod-20 unten | | 18 ± 4 | 99 | gleichmäßig bis wellig | 25 ± 3 |
| Mod-6 oben | glatt bis rau | 39 ± 18 | 58 | wellig bis zerklüftet | 37 ± 10 |
| Mod-6 unten | | 15 ± 6 | 29 ± 15 | gleichmäßig bis wellig | 30 ± 7 |
| Mod-3 oben | glatt bis rau | 46 ± 10 | 71 ± 31 | leicht zerklüftet | 29 ± 16 |
| Mod-3 unten | | 15 ± 9 | 28 ± 8 | gleichmäßig bis wellig | 26 ± 13 |
| Mod-8 oben | glatt bis rau | 44 ± 13 | – | leicht zerklüftet | 23 ± 13 |
| Mod-8 unten | | 17 ± 2 | 103 | gleichmäßig bis wellig | 25 ± 4 |

entstanden sein kann. Bedeutendster Legierungspartner in der Elektrodenkontakfläche ist Zn, wie der Linienscan in Abbildung 7.10 belegt. Die einzige detektierbare Phase, welche in zwei unterschiedlichen Konzentrationen und Homogenitätsbereichen vorliegt, ist der β -MK. In der Markierung (b) hat Zn einen Anteil von etwa 55% am β -MK, im Bereich (c) liegt der Anteil nur bei etwa 40%.

In der Konzentrations-Weg-Kurve (EDX-Linienscan) von Abbildung 7.10 zeigt der Schichtaufbau, dass innerhalb der ersten $5 \mu m$ die Elemente des verschweißten Stahlbleches zu finden sind. An diese schließt sich ein $5 \mu m$ tiefer β -MK (intermetallische Phase CuZn mit B2-Struktur) an, auf welchen ein $20 \mu m$ tiefer alpha-MK folgt. Das Element-Mapping von Abbildung 7.11 bestätigt diese Linieninformation für die umliegende Fläche.

7.4. Ergebnisdiskussion

Mit den Standmengenversuchen an modifiziertem CuCr1Zr konnte gezeigt werden, dass die reale Standmenge deutlich über den typisch festgelegten Fräszyklen liegt (Ziel I gemäß Kapitel 1 erreicht). Weiterhin konnte erstmals nachgewiesen werden, dass der genormte Werkstoffzustand für CuCr1Zr unter Betrachtung des Standmengenverhaltens nicht das Optimum ist (Ziel II gemäß Kapitel 1 erreicht). Beim standardkonformen CuCr1Zr-Elektrodenwerkstoff (Mod-8) sinkt die Verbindungsqualität sehr schnell ab, die Einzelmessungen streuen gegenüber den Alternativen Mod-5, Mod-6 und Mod-3 unvorteilhaft stark und das Standmengenkriterium zeichnet sich wenig charakteristisch ab. Besser geeignet für das Widerstandspunktschweißen verzinkter Stahlbleche sind Mod-6 und Mod-3. Beide

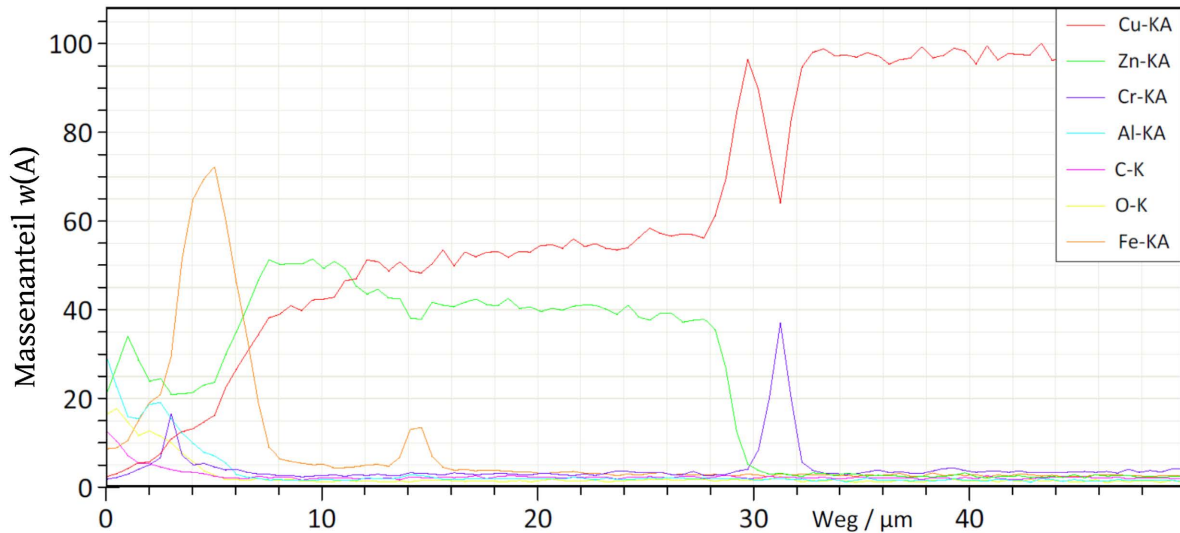
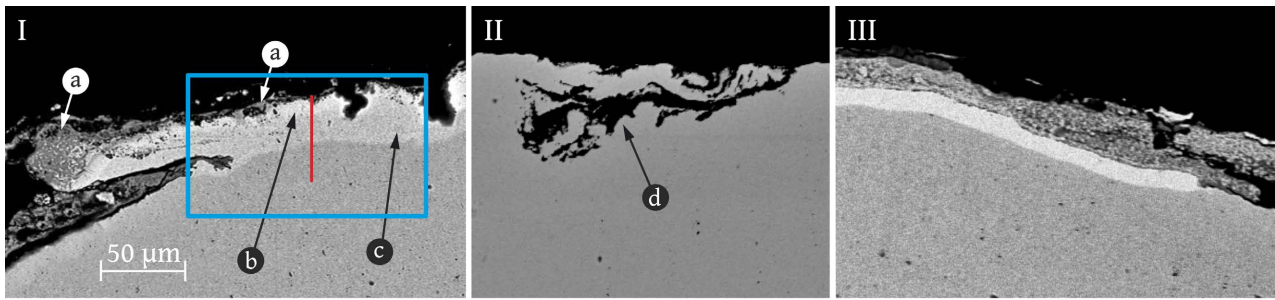


Abbildung 7.10.: Legierungsschichtzusammensetzung am Standmengenende der Elektroden Mod-3 und Mod-20, SE- und BSE-Bilder sowie EDX-Linienscan

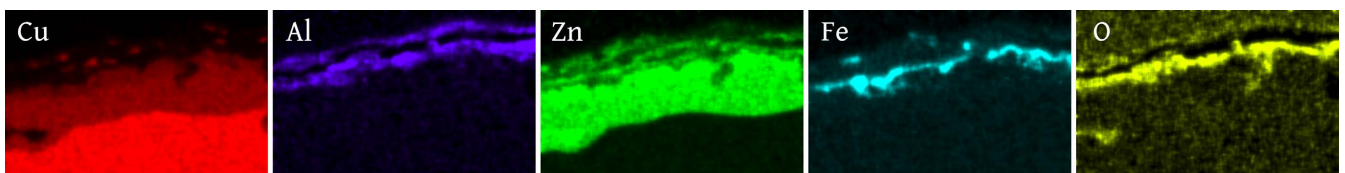


Abbildung 7.11.: Elementmapping für die blaue Markierung von Abbildung 7.10

ermöglichen eine große Standmenge, liefern einen reproduzierbaren Punktdurchmesser und sind gekennzeichnet durch ein charakteristisches Standmengenende. Insgesamt gesehen gewährleistet Mod-3 über einen langen Zeitraum hinweg die höchste Verbindungsqualität und belegt damit, dass die Modifikation mit vergleichsweise geringer Grundfestigkeit und sehr hoher elektrischer Leitfähigkeit die bessere Wahl ist.

Aus dem Vergleich der sechs Modifikationen von Tabelle 7.4 gelang es überdies nicht, einen linearen oder mathematisch einfachen Zusammenhang zwischen Werkstofffestigkeit, elektrischer Leitfähigkeit und dem Standmengenverhalten abzuleiten. Die Zusammenhänge modellhaft zu beschreiben könnte Inhalt fortführender Arbeiten sein. Solange keine annähernd zutreffende mathematische Modellierung des Widerstandspunktschweißens vorliegt, muss jedoch auf Experimente zur Erarbeitung optimaler Elektrodenwerkstoffe zurückgegriffen werden. Eine umfassende Herangehensweise für Experimente wird in Kapitel 9 ge-

geben.

Im Rahmen dieses Kapitels wurden 36 Oberflächenvermessungen und ebenso viele Schlif-
fe ausgewertet. Die Größe der Kontaktfläche und ihr Durchmesserwert sowie die Verteilung
der verdrängten Legierungsschichten und die lokalen Vertiefungen zeigen an allen Modifi-
kationen ein ähnliches Erscheinungsbild. Differenzierungen haben sich nicht ergeben. Die
Mikrohärtemessung erlaubt zwei Aussagen zu treffen, welche den Ergebnissen zu Standard-
CuCr1Zr ähneln (Kapitel 6). Erstens: Die Entfestigung aller CuCr1Zr-Modifikationen liegt
an der Kontaktfläche bei weniger als 65 % der jeweiligen Grundwerkstoffhärte. Zweitens:
Die Entfestigung wirkt bei allen Versuchen bis etwa 1,0 mm in die Elektrodenkappe hin-
ein. Aus den im Querschliff analysierten Legierungsschichten lassen sich verdrängte Legie-
rungsschichten, lokale Vertiefungen und die Legierungstiefe belegen, wie bereits bei den
Standard-CuCr1Zr Elektroden festgestellt. Diese Erkenntnisse zu auflegierenden und ab-
tragenden Vorgängen ermöglichen es, für die Praxis eine ressourceneffektive Frästiefe von
200 μm zu empfehlen. Bei Betrachtung der Legierungsschichten zeigten sich von der Elek-
trodenkontaktfläche nach innen gehend eine dünne Deckschicht und eine dickere Legie-
rungsschicht. Beide zusammen ergaben selten mehr als 50 μm Tiefe. Die Deckschicht be-
stand vorzugsweise aus Zn, Al, O und Fe. In die Legierungsschicht diffundierte aus dieser
fast ausschließlich Zn. Innerhalb der Kontaktebene finden sich auch bis zu 100 μm tief-
gehende Hohlräume in Form von „Verästelungen“. Deren Herkunft lässt sich auf starke
Verbindungen zum verschweißten Blech zurückführen, welche beim Abheben der Elektro-
den partiell abreißen und beim nächsten Blechkontakt wieder angedrückt werden.

8. Verschleißverringierung durch dispersionsgehärtete Cu-Elektroden

In Kapitel 3 wurde dargelegt, dass mit durch Al_2O_3 gehärteten Kupferelektroden Standmengen ähnlich wie bei CuCrZr [228] [174] und auch dreimal größere Standmengen [228] [19] erreicht werden. Ausschließlich in der Veröffentlichung von Nadkarni [228] wird behauptet, dass sich dieser Standmengenunterschied auf den Anteil von Al_2O_3 zurückführen lässt. Keine der jüngeren Quellen greift diese These erneut auf.

Mit den folgenden Abschnitten werden Einflüsse der Dispersionshärtung gegenüber dem Standard-CuCr1Zr-Elektrodenwerkstoff aktualisiert und seit Langem erstmals wieder der Wirkung des Al_2O_3 -Anteils nachgegangen. Die hierzu geführten Untersuchungen bestanden aus sieben Versuchsreihen, welche sich durch die Prozessbedingungen aus Tabelle 8.1 voneinander unterscheiden. Den steigenden Anteil von Al_2O_3 im Kupfer repräsentieren laut Hersteller die Kupferwerkstoffe C3/30, C3/60 und C3/80. Die EDX-Flächenanalyse aus Tabelle C.3 gibt einen Anhaltspunkt zur quantitativen Unterscheidung von C3/30 und C3/60.

Tabelle 8.1.: Versuchsmatrix für durch Al_2O_3 dispersionsgehärtete Kupferelektroden, Prozessbedingungen Teil 1

| Elektroden- werkstoff | Elektroden- zustand | oberes & unteres Stahlblech | $\frac{F_{El}}{kN}$ | $\frac{t_w}{ms}$ | Versuchskennung |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| Nitrode ^a Discup C3/60 | ungefräst | DX53D+Z100 1,0 mm | 2,7 | 300 | Nitrode-1-300 |
| | ungefräst | | 2,7 | 300 | C3/60-1-300 |
| Discup C3/30 | ungefräst | | 3,0 | 1000 | C3/30-2-1000 |
| | startgefräst | | 3,0 | 1000 | C3/30-ug-2-1000 |
| Discup C3/60 | ungefräst | HX300LAD+Z100 2,0 mm | 3,0 | 1000 | C3/60-2-1000 |
| | startgefräst | | 3,0 | 1000 | C3/60-ug-2-1000 |
| Discup C3/80 | ungefräst | | 3,0 | 1000 | C3/80-ug-2-1000 |

^a Die vollständige Bezeichnung lautet für alle Erwähnungen im Kapitel: LUVATA Nitrode.

8.1. Wachstumskurven und Versuchsmatrix

Weitere Prozessbedingungen für die folgenden Experimente zur Ermittlung der Wachstumskurven und anschließend für die Standmengenkurven stellt Tabelle 8.2 dar. Die verwendeten Versuchskennungen werden um weitere Zeichen ergänzt.

Tabelle 8.2.: Ergänzende Versuchsbedingungen für durch Al_2O_3 dispersionsgehärtete Kupferelektroden, Teil 2 zu Tabelle 8.1

| Versuchskennung Wachstumskurve | | $i^{\text{b-ug-1-300_wk}}$ | $j^{\text{c-2-1000_wk}}$ |
|---|--------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Kühlwasserdurchflussmenge $Q_{\text{Kuehlwasser}}$ | l/min | 4 | 4 |
| Kühlwasserdurchflusstemperatur $\vartheta_{\text{Kuehlwasser}}$ | $^{\circ}\text{C}$ | für alle Versuche gilt 18 – 20 | |
| Vorhaltezeit T_{squeeze} | ms | 150 | 500 |
| Nachhaltezeit $t_{\text{FEl,hold}}$ | ms | 150 | 500 |
| Taktzeit | $Verb./min$ | 20 | 5,4 |

^b Index: $i = \text{Nitrode, C3/60}$.

^c Index: $j = \text{C3/30, C3/30-ug, C3/60, C3/60-ug, C3/80-ug}$.

In Abbildung 8.1 sind die Wachstumskurven von Nitrode und Discup C3/60 an den $1,0\text{ mm}$ dünnen Blechen dargestellt. Beide Kurven schneiden den Punktdurchmesser von $5\sqrt{t}$ knapp oberhalb von $8,0\text{ kA}$ und kennzeichnen sich in den experimentell bestimmten Bereichen durch einen weitestgehend gleichartigen Anstieg. Folglich liegen die Stromstär-

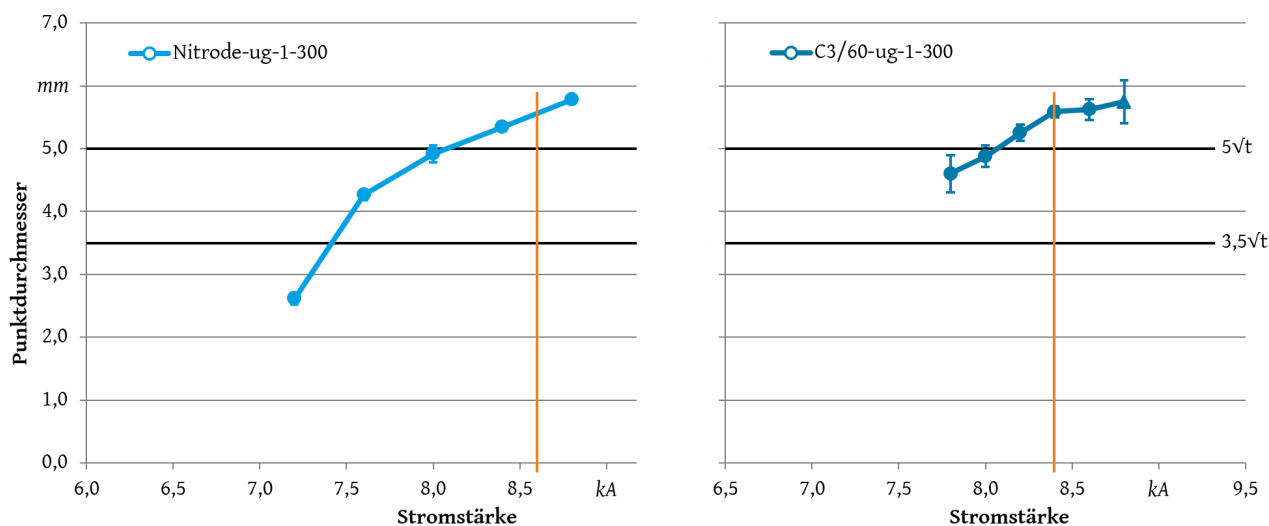


Abbildung 8.1.: Wachstumskurven für ungefräste dispersionsgehärtete Kupferelektroden an $1,0\text{ mm}$ DX53D bei 300 ms Stromzeit

ken der Standmengenversuche, welche zu $d_w = 5,6\text{ mm}$ führen, mit $8,6\text{ kA}$ für die Nitrode und $8,4\text{ kA}$ für Discup C3/60 nah beieinander. Ein Unterschied findet sich im Spritzerverhalten. Während mit den Discup C3/60-Elektroden bei $8,8\text{ kA}$ einige Spritzer auftraten,

wurde bei der Nitrode kein einziger erfasst. Daher erlaubt die Nitrode im Gesamtvergleich einen größeren maximalen Punktdurchmesser, wie aus Tabelle 8.3 hervorgeht.

Für die Versuchsreihen ..2-1000 und ..ug-2-1000 wird als Stromstärke jener Wert verwendet, welcher auch in Kapitel 6 für die Versuchskennung CuCr1Zr-2-1000 zum Einsatz kam. Um die hierdurch fehlenden Wachstumskurven zu kompensieren und einen anderen Vergleichswert bereitzustellen, sind in Tabelle 8.3 die nach 200 Punktschweißverbindungen erzielten Punktdurchmesser eingetragen. Deren Vergleich ergibt für C3/30 den größten Punktdurchmesser, für C3/60 einen mittelgroßen und für C3/80 den kleinsten. In diesem Vergleich fehlt C3/80 im startgefrästen Zustand. Ein Startfäsen zeigte sich als nicht erstrebenswert, weil die spröde Spanbildung ein derart zerklüftetes Schnittbild hinterließ, dass die Schweißergebnisse unvertretbar stark schwankten. Werden der startgefräste und ungefräste Zustand verglichen, so zeigt sich bei C3/30 kein Unterschied, während bei C3/60 der startgefräste Zustand zu einem fast 10 % kleineren Punktdurchmesser führte. Wird der Einfluss des Al₂O₃-Anteils betrachtet, so ermöglicht die geringste Menge des Dispersoidanteils (C3/30) im Mittel die größten Punktschweißverbindungen.

Tabelle 8.3.: Ergebnisse der Wachstumskurven und Stromstärken für Standmengenversuche mit Al₂O₃ dispersionsgehärteten Kupferelektroden

| Versuchskennung | Stromstärke I_w für | | | Schweißstrombereich | $d_w = max$ |
|------------------|-----------------------|------------|----------------|---------------------|------------------|
| | $d_w = 3,5\sqrt{t}^d$ | Standmenge | Spritzergrenze | | |
| | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>mm</i> |
| Nitrode-ug-1-300 | 7,4 | 8,6 | – | $\geq 1,4$ | $\geq 5,8$ |
| C3/60-ug-1-300 | $\approx 7,0$ | 8,4 | 8,8 | 1,6 | 5,6 |
| C3/30-2-1000 | – | 7,5 | – | – | 7,0 ^e |
| C3/30-ug-2-1000 | – | 7,5 | – | – | 7,0 ^e |
| C3/60-2-1000 | – | 7,5 | – | – | 6,4 ^e |
| C3/60-ug-2-1000 | – | 7,5 | – | – | 7,1 ^e |
| C3/80-ug-2-1000 | – | 7,5 | – | – | 6,3 ^e |

^d Bei 22Mn entsprechend $d_p = 3,5\sqrt{t}$.

^e Hierbei gilt: d_w für I_w nach 200 Punktschweißverbindungen.

8.2. Standmengen

Aus den zwölf folgenden Versuchen entfallen vier auf die dünne Blechkombination, welche Abbildung 8.2 zusammenstellt. Darin zeigt sich ausgehend von den Standard-CuCr1Zr-Elektroden (Versuchskennung CuCr1Zr-ug-1-300) eine Standmengenerhöhung durch Nitroden um das 2,3fache und durch Discup C3/60-Elektroden um das 3,1fache. Die Standmengenverläufe der beiden Varianten sind ähnlich erstrebenswert und jeweils durch einen charakteristischen Punktdurchmesserabfall gekennzeichnet. Die Vorteile der vermeintlich

geringeren Standmengen-Streubreite und der um 30 % größeren Standmenge führt zur besseren Verschleißwertung von Discup C3/60 in Tabelle 8.4.

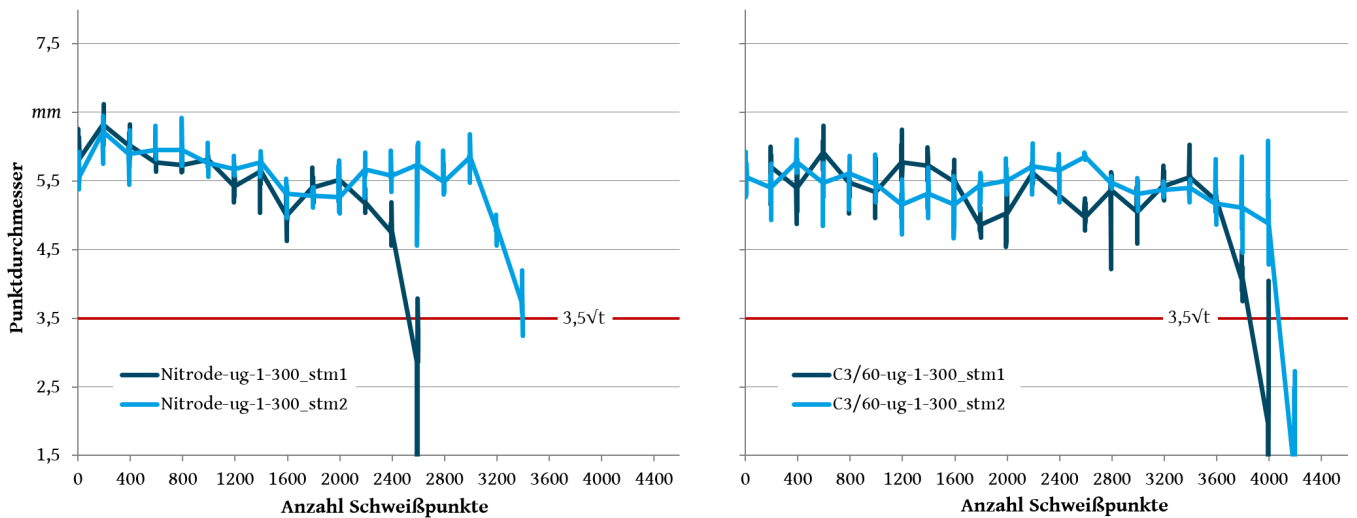


Abbildung 8.2.: Standmengenkurven für Nitrode und C3/60 in ungefrästem Zustand an $1,0\text{ mm DX53D+Z}$ bei 300 ms Stromzeit

Für die dickere Blechkombination, welche bereits in [141] publiziert wurde, stellt Abbildung 8.3 die größten vorliegenden Unterschiede zusammen. An der Discup C3/30-Elektrode (geringster Dispersoidanteil) treten im startgefrästem Zustand eine große Einzelwertstreuung sowie ein ungünstiger Punktdurchmesser-Abfall zum Standmengenende auf. Die Standmenge erhöht sich gegenüber den Standard-CuCr1Zr-Elektroden (Versuchskennung CuCr1Zr-2-1000) auf das 2,1fache. Werden die Elektroden nicht startgefräst, lässt sich eine Erhöhung auf das 2,3fache ermitteln. Im Punktdurchmesserverlauf zeichnet sich

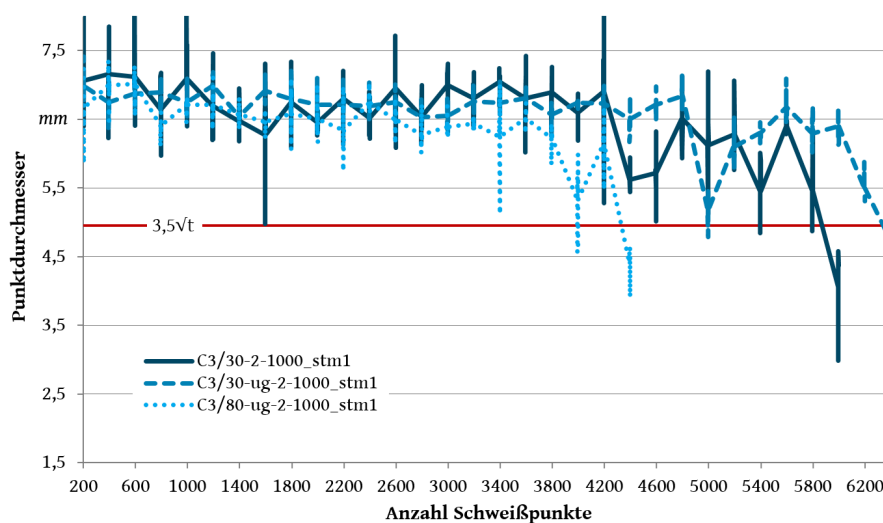


Abbildung 8.3.: Standmengenkurven für C3/30 und C3/80 in startgefrästem und ungefrästem Zustand an $2,0\text{ mm HX300LAD+Z}$ bei 1000 ms Stromzeit

zudem eine geringere Einzelergebnisstreuung ab, wobei sich das Standmengenende weiterhin wenig erstrebenswert abbildet. Für den Einfluss des Dispersoidanteils ist abschließend noch die ungefräste Discup C3/80 untersucht worden, deren Punktdurchmessererverlauf zur ungefrästen Discup C3/30 nahezu deckungsgleich ist. Die erreichbare Standmenge sinkt um 32 % auf einen Faktor von 1,5 gegenüber den Standard-CuCr1Zr-Elektroden.

In Abbildung 8.4 sind die Ergebnisse mit der Elektrode mittleren Dispersoidanteils (Discup C3/60) und startgefrästem Zustand dargestellt. Es zeigen sich große Punktdurchmesser, geringe Schwankungen im zeitlichen Verlauf und teilweise charakteristische Standmengenenden. Die Standmengenenden befinden sich in etwa auf der Höhe von C3/80-ug

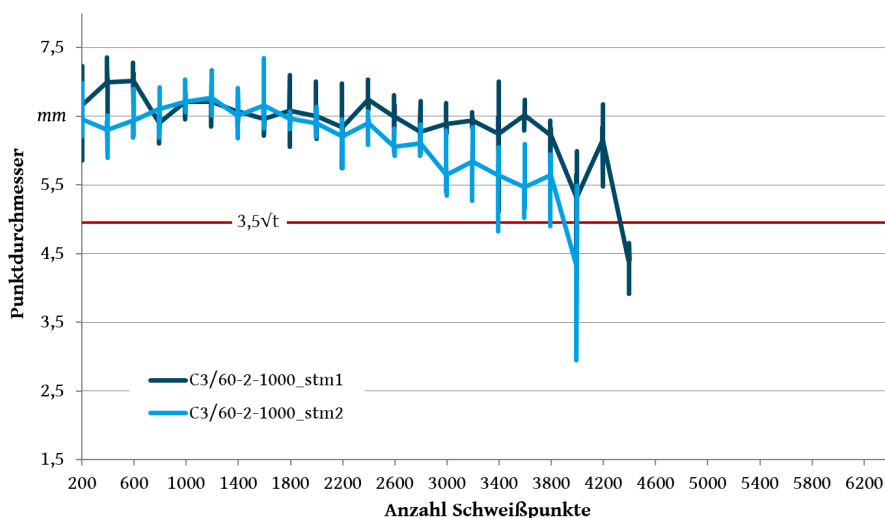


Abbildung 8.4.: Standmengenkurven für C3/60 in startgefrästem Zustand an 2,0 mm HX300LAD+Z bei 1000 ms Stromzeit

Tabelle 8.4.: Überblick der Standmengenenergebnisse für Elektroden aus durch Al₂O₃ dispersionsgehärtetem Kupfer an verzinkten Stahlblechen

| Versuchskennung ^f | Stahlbleche | F_{El} | t_w | Standmenge | | | Verschleißverhalten |
|-------------------------------|-------------|----------|-------|---------------------------------|------|-------------|---------------------|
| | | | | min. | max. | Streubreite | |
| | | | | <i>Punktschweißverbindungen</i> | | | |
| Nitrode-ug-1-300_stm <i>i</i> | DX53D+Z100 | 2,7 | 300 | 2533 | 3444 | 911 | ++ |
| C3/60-ug-1-300_stm <i>i</i> | 1,0 mm | | | 3855 | 4077 | 222 | ++ (+) |
| C3/30-2-1000_stm1 | | | | 5872 | – | | (+) |
| C3/30-ug-2-1000_stm1 | HX300LAD | | | 6346 | – | | + |
| C3/60-2-1000_stm <i>i</i> | +Z100 | 3,0 | 1000 | 3905 | 4337 | 432 | 0 |
| C3/60-ug-2-1000_stm <i>i</i> | 2,0 mm | | | 5021 | 6010 | 989 | – |
| C3/80-ug-2-1000_stm1 | | | | 4337 | – | | 0 |

^f Index: $i = 1..2$ bzw. $1..3$.

und somit etwa 40 % unterhalb jener von C3/30. Ausgehend von den Erkenntnissen bei

C3/30 wurde eine Verbesserung des Standmengenverhaltens vom startgefrästen Zustand zum ungefrästen erwartet. Abbildung F.1 zeigt, dass dies zwar auf das Standmengenende zutrifft, nicht jedoch auf die Ergebnisschwankungen in der Punktdurchmesserkurve. Da diese Schwankungen vergleichsweise groß ausfallen, kann nur eine eingeschränkte Empfehlung für den Werkstoff ohne Startfräsung ausgesprochen werden. In jedem Fall sind die statistischen Einflüsse für C3/30 und C3/80 noch zu prüfen.

Tabelle 8.4 fasst die geführte Interpretation zusammen. Im Kriterium des Verschleißverhaltens sind wiederkehrend die erreichbaren Standmengen, die vorliegenden Streubreiten sowie für den Punktdurchmesserabfall dessen Größe, Verlauf, Einstellmöglichkeit und Reproduzierbarkeit enthalten.

8.3. Verschleißdokumentation

Zur Dokumentation der verschlissenen Elektroden gehören die Geometrie, die Härte und die Legierung der Kontaktfläche. Insbesondere durch die Versuche an den 2,0 mm dicken Blechen ist es gelungen, einen nachhaltigen Umfang dieser Experimente mit Fokus auf relevante Verschleiß- und Messgrößen aufzubauen. Motiviert durch jene Experimente wurde neuartige Analytik entwickelt und aufgebaut, zu welcher z. B. das konfokal chromatische Mikroskop gehört. Aufgrund dieses Entwicklungsprozesses ist die analytische Tiefe der Versuche an 2,0 mm dicken Blechen geringer als bei allen anderen Versuchskennungen.

8.3.1. Kontaktflächen-Geometrie

Abbildung 8.5 visualisiert die geometrischen Zustände von Nitrode und Discup C3/60 nach dem Startfräsen und zum Standmengenende. Nach dem Fräsen ergab sich an der C3/60 Elektrode eine rauere Oberfläche als bei der Nitrode. Im verschlissenen Zustand zeigen

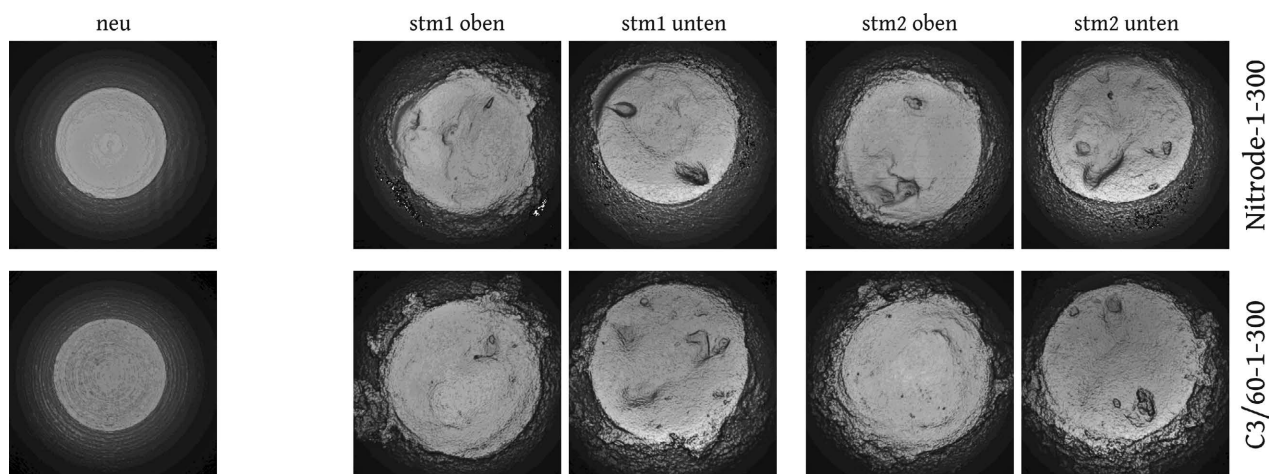


Abbildung 8.5.: Visualisierungen konfokal chromatischer Kontaktflächenvermessungen von Nitrode und Discup C3/60 Elektroden an 1,0 mm DX53D+Z100

sich am Rand verdrängte Schichten, welche zur Bartbildung zählen. Diese sind an C3/60 größer als bei der Nitrode. Wie bei CuCr1Zr an feuerverzinkten Stählen sind auch bei Nitrode und C3/60 lokale Vertiefungen in verschiedenartigster Gestalt zu erkennen. Sie treten vorzugsweise nahe des Randbereiches auf.

Zur quantitativen Bewertung sind in Tabelle 8.5 die Messwerte zum Kontaktflächendurchmesser und zur Kontaktfläche aufgeführt. Beide Größen wurden unter einer Eindringtiefe von etwa $60\ \mu\text{m}$ bestimmt. Zum Standmengenende ergibt sich an der Nitrode ein Durchmesser von $7,4\ \text{mm}$. Dieser ist an der C3/60 mit $8,3\ \text{mm}$ fast einen Millimeter größer. Bezogen auf den experimentellen Ausgangszustand ergibt sich eine Kontaktflächenvergrößerung von $40\ \%$ bei der Nitrode und von $67\ \%$ bei der C3/60-Elektrode. Zum Vergleich dazu liegt die Kontaktflächenvergrößerung von Standard-CuCr1Zr-Elektroden, mit einem Durchmesser von $6,7\ \text{mm}$ zum Standmengenende, in etwa bei $52\ \%$. Der Flächenwert bei CuCr1Zr liegt mit $29,5\ \text{mm}^2$ deutlich unterhalb jenen von Nitrode ($38,2\ \text{mm}^2$) und C3/60 ($47,0\ \text{mm}^2$). Gleiches gilt für den Durchmesser von $6,7\ \text{mm}$ bei CuCr1Zr.

In den Versuchen mit $2\ \text{mm}$ Einzelblechdicke steigt der Kontaktflächendurchmesser deutlich an. Bei mehr als verdreifachter Stromzeit unter der Randbedingung doppelt so dicker Bleche ist es also möglich, bis zu einem Durchmesser von $9,3\ \dots\ 10,0\ \text{mm}$ qualitätsgerechte Verbindungen herzustellen. Hierbei lassen sich für C3/60-ug die größten Durchmesserwerte erfassen. Trotz des größeren Dispersoidanteils liegt zum Standmengenende von C3/60 ein höherer Durchmesserwert vor als bei C3/30 mit geringerem Dispersoidanteil, obwohl mit C3/30 mehr Verbindungen hergestellt wurden. Grund dafür könnte die höhere Wärmeleitfähigkeit von C3/30 sein.

Tabelle 8.5.: Kontaktflächen-Geometrie zum Standmengenende von Nitrode und Discup C3/60-Elektroden an $1,0\ \text{mm}$ DX53D+Z100

| Versuchs- kennung | Betreffende RSW-Verb. | d_w | Kontaktflächendurchmesser | | Kontaktfläche ca. $65\ \mu\text{m}$ tief | |
|-----------------------|--------------------------|-----------|---------------------------|------------|--|------------------------|
| | | | obere El. | untere El. | obere El. | untere El. |
| | | <i>mm</i> | <i>mm</i> | <i>mm</i> | <i>mm</i> ² | <i>mm</i> ² |
| _sg | 0 | | 5,4 | 5,6 | 18,5 | 20,2 |
| _ug | 0 | | ca. 5,9 | ca. 6,0 | ca. 27,3 | ca. 28,1 |
| Nitrode-ug-1-300_stm1 | 2800 | 4,9 | 7,3 | 7,4 | 38,2 | 37,0 |
| Nitrode-ug-1-300_stm2 | 3400 | 3,7 | 7,4 | 7,6 | 40,2 | 37,5 |
| C3/60-ug-1-300_stm1 | 4200 | 3,9 | 8,4 | 8,5 | 46,6 | 49,0 |
| C3/60-ug-1-300_stm2 | 4200 | 1,3 | 7,8 | 8,5 | 46,2 | 46,4 |
| C3/30-2-1000_stm1 | 6000 | 4,1 | – | 9,9 | – | – |
| C3/60-2-1000_stm1 | 4400 | 4,4 | – | 9,1 | – | – |
| C3/60-ug-2-1000_stm2 | 5400 | 3,1 | 10,1 | 10,3 | – | – |
| C3/60-ug-2-1000_stm3 | 6000 | 4,7 | 9,6 | 10,1 | – | – |
| C3/80-ug-2-1000_stm1 | 4400 | 4,4 | 9,1 | 9,5 | – | – |

8.3.2. Kontaktflächen-Härte

Die Mikro-Härtemessung erfasst die Discup-Elektroden. Gemäß Hersteller müsste die Grundhärte für C3/30 etwa 15 % unter der von CuCr1Zr sein, die für C3/60 mit CuCr1Zr gleich auf liegen und jene für C3/80 um etwa 15 % größer sein. Aus eigenen Messungen (Abbildung 8.6a) geht hervor, dass C3/80 eine Härte von ca. 180 HV_{0,1} besitzt und damit etwa 8 % unter dem Wert der eigenen Messung der Standard-CuCr1Zr-Legierung bleibt. C3/60 pegelt sich auf einem Horizont von etwa 170 HV_{0,1} ein, Discup C3/30 bei etwa 160 HV_{0,1}. Somit sind die prozentualen Unterschiede zwischen den Discup-Varianten nur halb so groß, wie durch die Angaben des Herstellers zu erwarten war.

Die Veränderungen am Standmengenende zeigt Abbildung 8.6b für die jeweils unteren Elektroden von C3/30 und C3/80. Genau wie bei CuCr1Zr ist der Härteabfall an der Kontaktfläche am stärksten und nähert sich mit zunehmender Tiefe asymptotisch der Grundwerkstofffestigkeit an, welche in etwa nach 2,0 mm erreicht wurde. Als Unterschied zu CuCr1Zr ist festzuhalten, dass die Härte der Discup-Elektroden unmittelbar unter der Kontaktfläche nur auf etwa 112 HV_{0,1} abfällt. Dieser Wert liegt rund 10 % oberhalb der Messung an CuCr1Zr, welche 102 HV_{0,1} ergab (Abschnitt 6.3.2). Diese größere Resthärte bei Discup-Elektroden ist ein Grund für die größeren Standmengen.

Die Ergebnisse der unteren Elektroden von C3/60 enthält Abbildung F.2

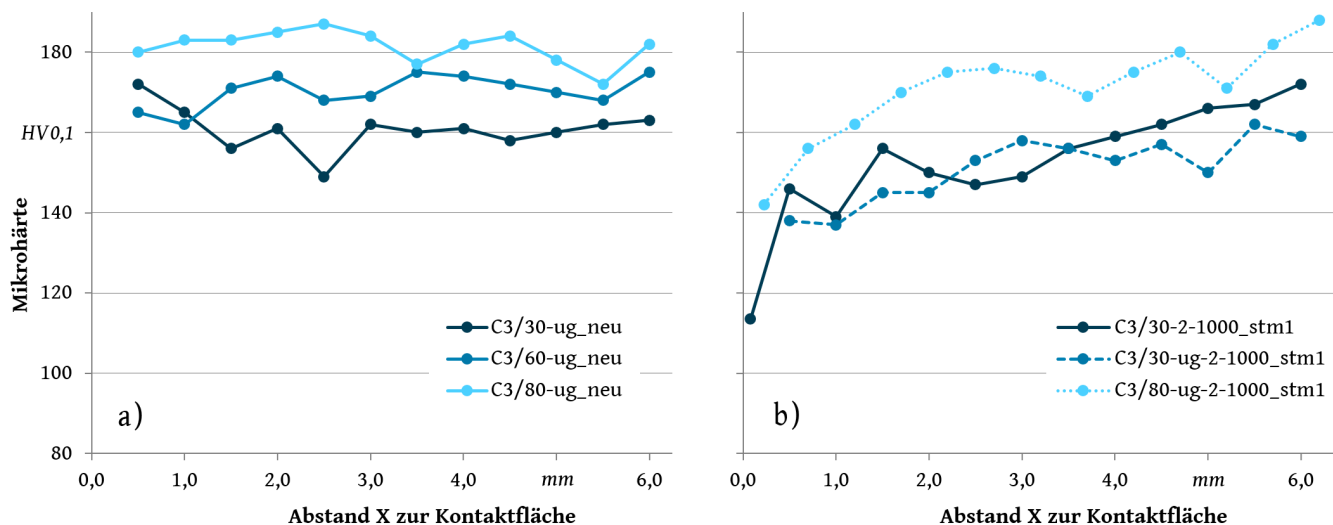


Abbildung 8.6.: Härteverläufe zur Versuchskennung C3/..-2-1000, a) neue Elektroden, b) C3/30 und C3/80 zum Standmengenende

8.3.3. Kontaktflächen-Legierung

Die Erkenntnisse der Querschleif-Analysen als äußere und innere Merkmale der **Legierungsschichtausprägung** stellt Tabelle 8.6 zusammen. Zu den äußeren Merkmalen ge-

hören lokale Vertiefungen (1) und verdrängte Legierungsschichten (2). Beide sind in Abbildung 8.7 beispielhaft dargestellt.

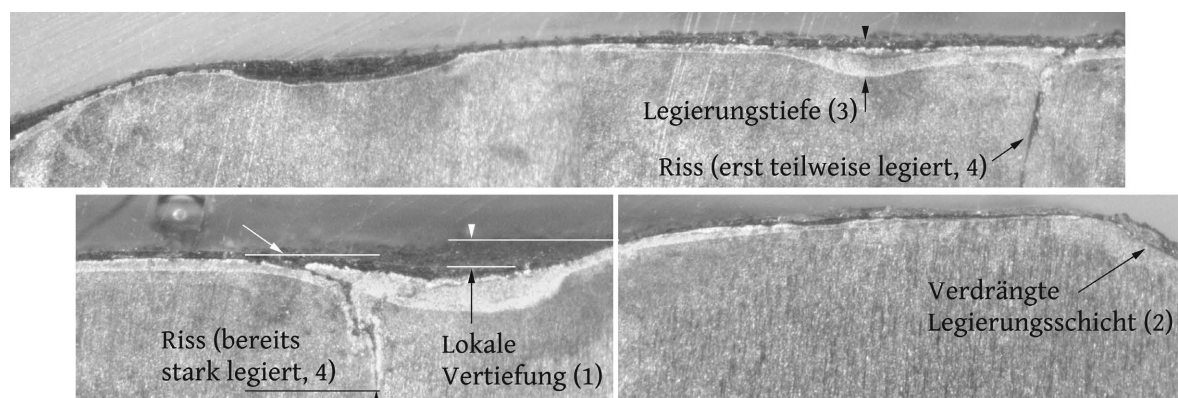


Abbildung 8.7.: Legierungsschichtausprägung und Kennzeichen am Beispiel der unteren Elektrode von Nitrode-ug-1-300_stm2

Tabelle 8.6.: Legierungsschichtausprägung bei dispersionsgehärteten Kupfer-Elektroden an feuerverzinkten Stahlblechen

| Versuchskennung ^g | Äußere Merkmale | | Innere Merkmale | | |
|------------------------------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| | Beschreibung | Vertiefung | Beschreibung | Legierungstiefe | Riss |
| | | μm | | μm | Anz., μm |
| Nitrode-ug-k_stm1 oben | glatt (bis rau) | – | stark wellig | 139 ± 76 | 1x, 682 |
| Nitrode-ug-k_stm1 unten | glatt bis rau | – | wellig | 78 ± 26 | 1x, 593 |
| Nitrode-ug-k_stm2 oben | glatt bis rau | 135 | leicht wellig | 86 ± 16 | – |
| Nitrode-ug-k_stm2 unten | rau bis glatt | – | wellig | 145 ± 76 | 2x, > 900 |
| C3/60-ug-k_stm1 oben | glatt bis rau | – | stark wellig | 157 ± 101 | – |
| C3/60-ug-k_stm1 unten | glatt bis rau | – | leicht wellig | 68 ± 23 | 2x, > 800 |
| C3/60-ug-k_stm2 oben | glatt bis rau | – | stark wellig | 122 ± 86 | 1x, > 500 |
| C3/60-ug-k_stm2 unten | rau/zerklüftet | 94 | wellig | 114 ± 49 | 2x, > 570 |
| C3/30-l_stm1 unten | rau bis glatt | – | wellig | 65 ± 24 | – |
| C3/30-ug-l_stm1 unten | rau/zerklüftet | 107 ± 21 | wellig/zerklüftet | 58 ± 30 | – |
| C3/60-l_stm1 unten | rau bis glatt | – | wellig | 107 ± 47 | – |
| C3/60-ug-l_stm1 unten | rau bis glatt | – | leicht wellig | 63 ± 11 | – |
| C3/80-ug-l_stm1 unten | rau bis glatt | – | stark wellig | 190 ± 158 | – |

^g Indizes: $k=1-300$, $l=2-1000$.

Da die verdrängte Legierungsschicht aufgrund ihrer mechanischen Instabilität und des sehr hohen elektrischen Widerstandes keinen bedeutsamen Einfluss auf den Schweißprozess ausübt, wird im tabellarischen Vergleich auf sie verzichtet. Zu den inneren Merkmalen gehören Legierungstiefe und Risse, welche exemplarisch in Abbildung 8.7 gekennzeichnet sind.

Aus den Werten in Tabelle 8.6 lassen sich keine Unterschiede zwischen Nitrode und den Discup-Varianten (C3/xx) erkennen. Die Beschaffenheit der Kontaktfläche nach außen hin ist weitgehend identisch zu den Ergebnissen an CuCr1Zr-Elektroden aus Abschnitt 6.3.3. Vertiefungen fallen im Vergleich zu jenem Abschnitt etwas geringer aus. Dafür ist die Legierungstiefe im Mittel etwa doppelt so groß. Risse wurden an keinem der zwanzig Querschliffe der CuCr1Zr-Elektroden erfasst, was der wesentliche Unterschied zu den hier untersuchten dispersionsgehärteten Elektroden ist. Bei einer Stromflusszeit von 300 ms reichen die Risse an Nitrode und Discup C3/60 bis 1 mm in den Elektrodenwerkstoff hinein. Abweichend davon zeigte sich bei 1000 ms Stromflusszeit kein Riss in den Querschliffen. Ob dieser Einfluss der Stromflusszeit zuzuordnen ist, sollte durch weitere Experimente untersucht werden.

Die **Legierungsschichtzusammensetzung** an den dispersionsgehärteten Elektroden ist aus Abbildungen 8.8, 8.9, 8.10 und F.3 ersichtlich. In den zugehörigen SE- bzw. BSE-Bildern zeichnet sich die zerrüttete sowie legierte Elektrodenkontaktfläche deutlich ab. Besonders hervorzuheben ist der Randbereich der C3/60 Elektrode aus Abbildung 8.8, an welchem ein Linienscan (rote Linie) und ein Element-Mapping (blaues Rechteck) erstellt wurden. Die Konzentrations-Weg-Kurve des Linienscans zeigt fast ausschließlich Cu und Zn. Von 10 μm bis 65 μm Tiefe liegt ein γ -MK vor. Auf diesen folgt nach einem Übergangsbereich von etwa 5 μm ein ungefähr 10 μm tiefgehender β -MK, bevor in einem sehr kurzen Übergangsbereich der Elektrodengrundwerkstoff erreicht ist. Die beiden Mischkristalle (γ und β) finden sich auch in den Messstellen von Abbildung F.3.

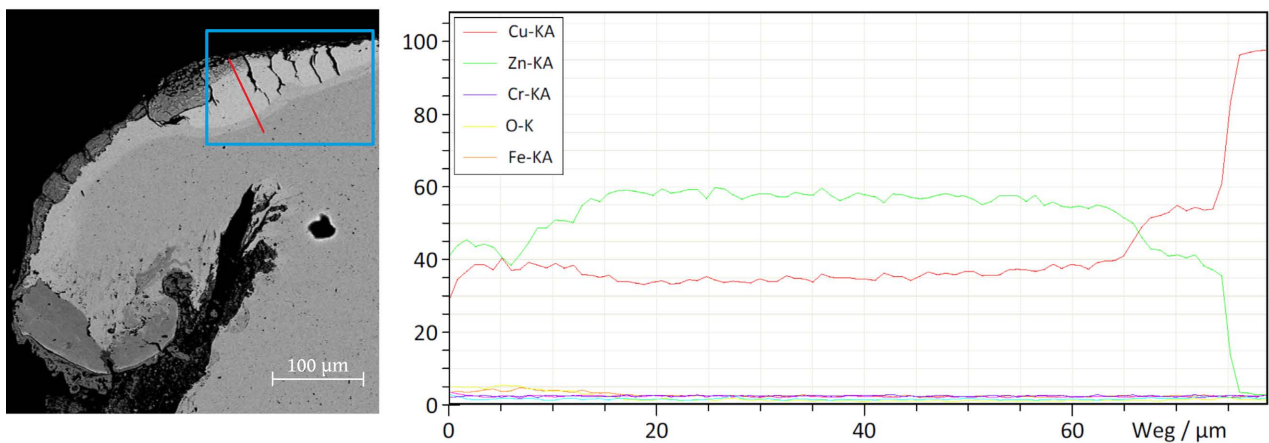


Abbildung 8.8.: Legierungsschichtzusammensetzung an dispersionsgehärteten Elektroden C3/60-1000, Linienscan (rote Linie im SE-Bild) mit Angaben des Massenanteils $w(A)$ in %

Mit dem Element-Mapping aus Abbildung 8.9 lässt sich durch die Einzelbilder für Cu und Zn die Verteilung von γ - und β -Mischkristallen erschließen. Die Bilder für Al, Fe und O legen dar, dass sich diese Elemente insbesondere an der Elektrode insbesondere oberflächennah absetzen.

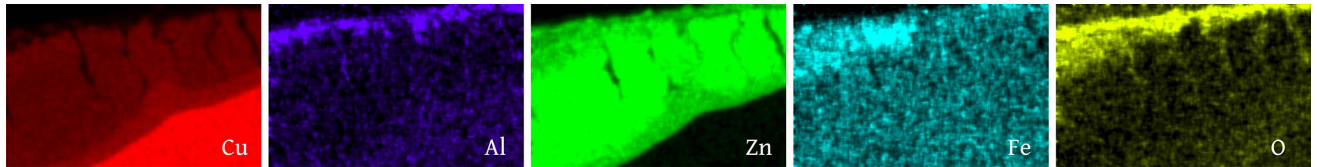


Abbildung 8.9.: Legierungsschichtzusammensetzung an dispersionsgehärteten Elektroden C3/60-1000, Element-Mapping

Abbildung 8.10 zeigt in beispielhaft ausgewählten Bereichen Stellen mit Legierungskonzentrationen. Türkisfarbene Bereiche innerhalb der Falschfarben-Summenbilder belegen Fe-Konzentrationen, welche aus dem Stahlblech stammen. Der γ -MK liegt überall dort vor, wo im Mischgebiet von Rot und Grün die Farbe Grün dominiert, was stets im äußeren Legierungsbereich der Fall ist. Dort, wo im Mischgebiet der beiden Farben eher Rot dominiert, liegt ein β -MK vor. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Art und Umfang der Legierungsschicht an dispersionsgehärteten Elektroden sehr ähnlich zu den Erscheinungen an CuCr1Zr-Elektroden ist.

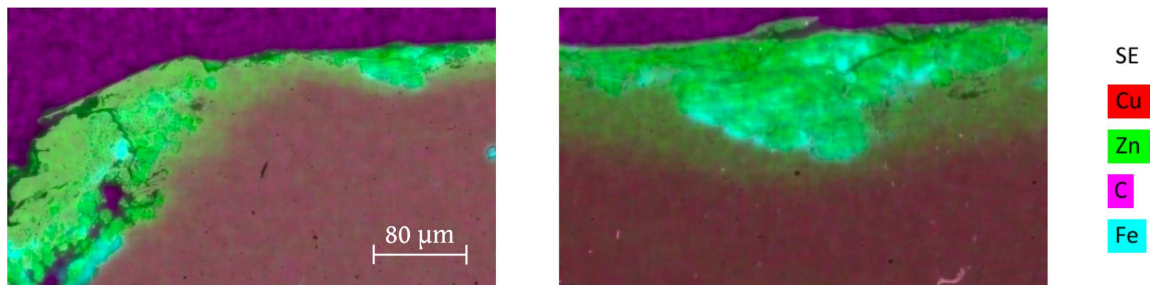


Abbildung 8.10.: Legierungsschichtzusammensetzung an dispersionsgehärteten Elektroden C3/30-1000, zwei ausgewählte Element-Mapping-Summenbilder

8.4. Ergebnisdiskussion

Wie die Experimente dieses Kapitels zeigten, liegen reale Standmengen für dispersionsgehärtete Elektroden beim Schweißen feuerverzinkter Stahlbleche zwischen 2533 und 6346 Punktschweißverbindungen. Mit dem üblichen Vorgehen der Industrie, aller 120 Punktschweißverbindungen zu fräsen, wird bei dispersionsgehärteten Elektroden folglich ein Potential von mehr als 2110 % verschonkt. Hierdurch ist besonders markant bewiesen, welche große Lebenszeitsteigerung mit auf die jeweilige Schweißaufgabe und den jeweiligen Elektrodenwerkstoff angepassten Fräszyklen möglich ist (Zielstellung I dieser Arbeit).

Alle untersuchten dispersionsgehärteten Elektroden zeigten beim Schweißen feuerverzinkter Stahlbleche 1,5- bis 3,8fache Standmengen gegenüber Standard-CuCr1Zr. Wirtschaftlich betrachtet wird diese gesteigerte Leistungsfähigkeit (Zielstellung III dieser Arbeit) interessant, sobald die Herstellungskosten gleichauf mit denen von CuCr1Zr sind.

Bei entsprechender Abnahmemenge gilt dieser Sachverhalt als relativ sicher erreichbar. Die höhere Leistungsfähigkeit führt auch zu einer verbesserten Ökobilanz. Zuvor sollte in weiterführenden Arbeiten nachgewiesen werden, dass der Standmengenvorteil auch bei weiteren - sprich für die jeweilige Produktion relevanten - Stahlblechlegierungen vorliegt.

Eine wichtige Rolle bei der Dispersionhärtung spielt der Al_2O_3 -Anteil in der Kupfermatrix (Zielstellung III dieser Arbeit). Mit dem geringsten Dispersoidanteil (hier etwa 0,9%) wurden die höchsten Standmengen erreicht. Der größte Anteil an Al_2O_3 (hier etwa 1,3%) resultierte in den niedrigsten Standmengen und der schlechtesten Zerspanbarkeit. Ein weiteres Merkmal der Elektroden mit dem geringsten Dispersoidanteil ist die größte Elektrodenkontaktfläche zum Standmengenende.

Mit den gewählten Prozessbedingungen lässt sich, ebenso wie bei Standard-CuCr1Zr, bei verlängerter Stromzeit eine Standmengenvergrößerung nachweisen.

Aus der Verschleißanalyse geht hervor, dass die höhere Leistungsfähigkeit der Elektroden unter anderem auf die um 20% geringere Entfestigung an der Kontaktfläche zurückzuführen ist. Die geometrischen und chemischen Betrachtungen entsprechen weitestgehend denen bei CuCr1Zr. Im Querschliff fiel noch auf, dass eine verdreifachte Stromzeit mit zugleich verringerter Stromstärke möglicherweise Risse im Elektrodenwerkstoff unterbindet.

Die zu Beginn der Ergebnisdiskussion aufgeführten Standmengenangaben entsprechen den minimal möglichen Punktschweißverbindungen. Bei Wiederholung der Experimente ergaben sich Streubreiten von 222 bis 989 Schweißungen. Die Ausnutzung dieser realitätsbedingten Schwankungen hin zur maximal möglichen Standmenge sind Ausgangspunkt der Untersuchungen in Kapitel 10.

9. Methodik zur Optimierung bzw. optimalen Auswahl von Elektrodenkappenwerkstoffen

Die Untersuchungen aus den Kapiteln 7 und 8 verfolgten jeweils das Ziel, verfügbare Schweißbereiche und Standmengen aufzuzeigen sowie diese durch geeignete Elektrodenwerkstoffe und Prozessparameter zu vergrößern. Derartige Betrachtungen zu führen ist motiviert durch steigende Kupferpreise und eine stark wachsende Zahl spezieller Stahlliegierungen. Beide Kriterien verschlechtern die Wirtschaftlichkeit des Widerstandspunktschweißens. Während im Jahr 1960 für eine Tonne Kupfer 678,76 \$ gezahlt werden musste, waren es im Jahr 1996 (36 Jahre später) bereits 2.294,86 \$ und 2014 (weitere 18 Jahre später) sogar 6.863,40 \$ [298]. Zu den Neu- und Weiterentwicklungen der Stähle gehören unter anderem die Gruppen DC, DP, TPN, MBW und Mangan-Bor [190], welche zusätzlich in vielfältigen Beschichtungen wie verzinkt, phosphatiert, organisch beschichtet u. a. angeboten werden. Die überwiegende Zahl dieser neuen Stähle führt zu einem veränderten, häufig verkleinerten Schweißbereich und stärkerem Elektrodenverschleiß. Kombinationen unterschiedlicher Stahlbleche erschweren einen sicheren Schweißprozess zusätzlich.

Als Gegenmaßnahme zu den verkleinerten Schweißbereichen und verringerten Standmengen haben sich adaptive Regelsysteme etabliert, die für jede Punktschweißverbindung die Stromstärke oder die Spannung, seltener auch die Elektrodenkraft an einen Idealverlauf angleichen. Solche Systeme werden von fast allen Herstellern von Schweißsteuerungen angeboten. Adaptive Regelungen verhindern allerdings die meisten Effekte des Elektrodenverschleißes zu erkennen. Um jene Vorgänge präzise zu verstehen und daraus schlussfolgernde Verbesserungen z. B. für Prozessabläufe und Elektroden abzuleiten, sind Versuche mit konstanten Prozessgrößen weiterhin unabdingbar. Bestrebungen, die Einflüsse von Prozessbedingungen, Elektroden und Kontaktbedingungen allgemeingültig zu beschreiben und tabellarisch zusammenzufassen, scheiterten bislang. Gründe dafür liegen neben der unüberschaubar gewordenen Anzahl möglicher Blech- und Beschichtungskombinationen auch im bedeutsamen Einfluss der Schweißsysteme (Stromsystem, Kraftsystem, Zangensystem, Kühlsystem) und den bei jeder Schweißaufgabe individuellen Prozessrandbedingungen (Bauteil- oder Baugruppenabweichungen, Randabstände, Nebenschlüsse). In der überwie-

genden Zahl experimenteller Arbeiten wird trotzdem nur eine sehr kleine Zahl von Kenngrößen dokumentiert und diskutiert, was eine globale Betrachtung zusätzlich erschwert. Intensive Entwicklungen im Bereich der Sensorik eröffnen gemeinsam mit rechnergestützten Analysen die Möglichkeit eines großen Dokumentationsumfangs und einer damit sehr breit aufgestellten Ergebnisauswertung. Damit sich die Dokumentation von Standmengenexperimenten auf relevante Kenngrößen konzentrieren kann, entstand die ISO 8166 [83], welche Grundlage aller in dieser Arbeit geführten Experimente ist. Zugleich wurden Erfahrungen gesammelt, welche über die Norm hinausgehen und zur nachfolgenden Methodik führten. Eine erste Entwicklungsstufe dieser wurde bereits in [142] veröffentlicht.

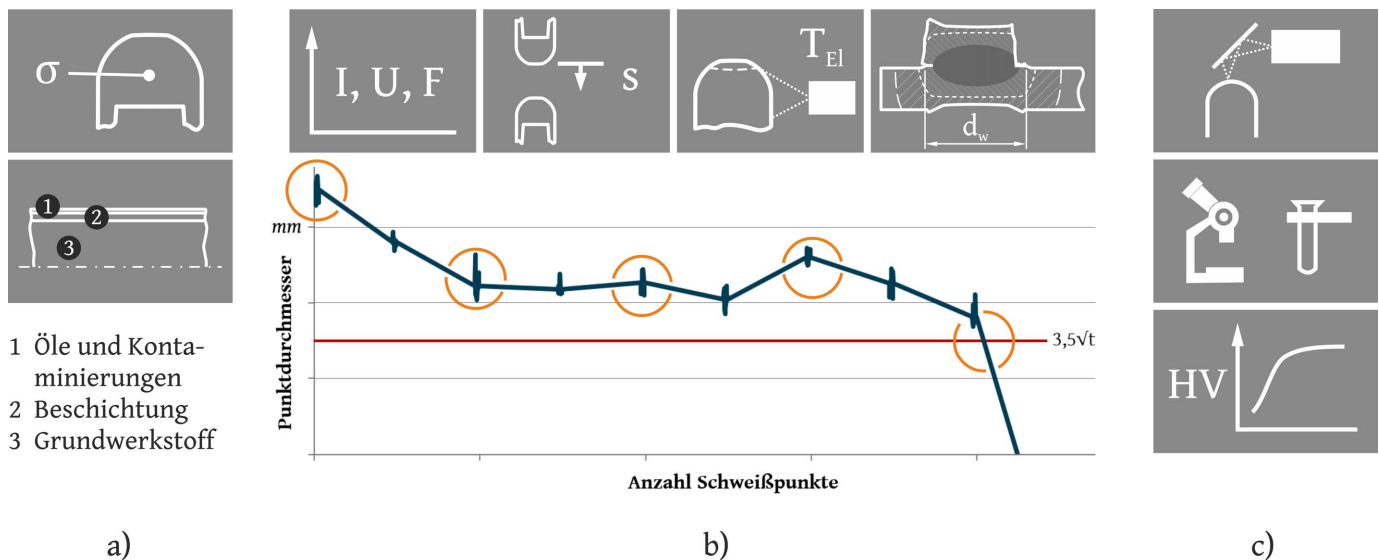


Abbildung 9.1.: Konzept zur Optimierung bzw. zur optimalen Auswahl von Elektrodenwerkstoffen

Abbildung 9.1 zeigt ein Schema der Methodik und unterteilt diese in drei Bereiche. Den Anfang, Bereich a), bilden Eingangsprüfungen, welche für Diskussionen zur Kontaktflächenanalyse benötigt werden. Hierzu zählen, gemäß unterem Piktogramm, Dimensionen und chemische Zusammensetzungen für Grundwerkstoffe der Stähle, für Beschichtungen und für Öle sowie Kontaminierungen. Ebenfalls von großer Bedeutung sind die mechanischen Kennwerte der Elektrodenwerkstoffe, welche zumeist herstellerseitig vorliegen sollten und die elektrische Leitfähigkeit (oberes Piktogramm), welche idealerweise über eine Wirbelstromprüfung an plangedrehten Elektrodenkappen selbst ermittelt wird.

Auf die Eingangsprüfung folgt die Schweißbereichsermittlung, für welche ein Vorgehen nach Abschnitt 5.3.1 geeignet ist. Eine Symbolik dieser ist in Abbildung 9.1 nicht explizit aufgeführt, da die Schweißbereichsermittlung eine eigenständige Methodik darstellt. Der Punktdurchmesser d_w ist dazu gemäß ISO 10447 (Fassung 2015) [61] bzw. praxisgerechter formuliert nach DVS 2902-3 (Fassung 2015) [95] zu ermitteln.

Im Bereich b) von Abbildung 9.1 werden die Standmengenexperimente mit vom Autor empfohlenen Einzelaufgaben symbolisiert. Deren Ablauf folgt grundlegend Abschnitt 5.3.2.

Im linken Piktogramm, der ersten Einzelaufgabe, wird eine Aufzeichnung der typischen Prozessgrößen Stromstärke, Spannung, und Elektrodenkraft dargestellt. Diese sollte angelehnt an das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem mit geeigneter Messfrequenz erfasst werden. Auch der Elektrodenweg erwies sich als verschleißrelevante Größe, weshalb dieser erfasst werden sollte (zweites Piktogramm). Als drittes wird empfohlen, die Elektrodenoberflächentemperatur mittels Thermographie aufzuzeichnen, um auf die reale thermische Beanspruchung zurückschließen zu können. Die an den Elektroden wirkenden Temperaturen definieren entscheidend Entfestigungs- und Legierungsvorgänge. Für diese Einzelaufgabe, dargestellt im dritten Piktogramm, sollten die Elektroden vor Verwendung mit geeignetem Lack geschwärzt werden, um im interessanten Temperaturbereich auf einen konstanten Emissionskoeffizienten zurückgreifen zu können. Nach dem Einbau der Elektroden sind diese startzufräsen, sodass die Lackschicht im Kontaktbereich abgetragen wird. Alternativ kann die Kontaktfläche beim Lackieren auch abgedeckt werden. Als letzte Einzelaufgabe innerhalb der Standmengenexperimente wird, verbildlicht mit dem vierten Piktogramm, eine Bestimmung des Punktdurchmessers an fünf Punktschweißverbindungen eines jeden Prüfblechs empfohlen. Hierzu erwies sich die Meißelprüfung als besonders zielführend. Darüber hinaus sollten die Prüfblechstreifen so geschnitten sein, dass an weiteren fünf Schweißpunkten zusätzlich eine instrumentierte, zerstörende Verbindungsprüfung durchgeführt werden kann. Auf diesen Vorschlag wird weiter unten im Detail eingegangen. Aus den Ergebnissen des Bereichs b) wird die Standmengenkurve gebildet, welche schematisch unter den Piktogrammen visualisiert ist.

Je nachdem, wie umfangreich eine Verschleißanalyse durchgeführt werden soll, können Elektrodenkappen entweder am Ende einer Standmenge oder in Pausen innerhalb einer Standmenge oder aber in einer gestuften Versuchsreihe untersucht werden. Für eine Analyse seien die drei Einzelaufgaben gemäß Abbildung 9.1 Bereich c) empfohlen. Das obere Piktogramm repräsentiert die zerstörungsfreie Oberflächenvermessung, welche im Idealfall durch ein konfokal chromatisches Mikroskop erfolgt. Das mittlere Piktogramm steht für eine quantitative Elementanalyse auf der Kontaktfläche sowie im Querschliff. Bei Verwendung einer Röntgenspektroskopie besteht die Möglichkeit, durch Nutzung unterschiedlicher Beschleunigungsspannungen und unter Betrachtung der L-Strahlung verschiedene Tiefen zu erfassen. Zweckmäßig ist ein Mapping. Als drittes wird mit dem unteren Piktogramm eine Mikrohärteprüfung am vorliegenden Elektrodenquerschliff empfohlen. Eine punktuelle Analyse von der Kontaktfläche hinein in den Grundwerkstoff genügt. Eine flächige Analyse kann weiterführend von Vorteil sein.

Mit dem Vorgehen aus Abbildung 9.1 wird auf Basis umfangreicher Erkenntnisse eine gezielte Anpassung der Prozessgrößen sowie des Prozessablaufs beim Widerstandspunktschweißen möglich, um große und stabile Prozessfenster zu erarbeiten sowie Verschleiß und Standmengen spezifisch zu nutzen oder zu steuern. Weiterhin erlaubt dieses Vorgehen Veränderungen durch beliebige Prozessbedingungen wie z. B. Elektrodenwerkstoffe

transparent zu analysieren.

Im folgenden wird die Empfehlung aufgegriffen, im Bereich b) von Abbildung 9.1 neben der Meißelprüfung zusätzliche Kennwerte aus einer instrumentierten, zerstörenden Prüfung zu ermitteln. Wie es zu diesem Vorgehen kam, zeigen Scherzugprüfungen am Beispiel widerstandspunktgeschweißter Bleche aus 1,5 mm dickem HCT600X (Werkstoff-Nr. 1.0941) und warmausgehärtetem, 1,1 mm dickem 22MnB5+AS. Alle hergestellten Schweißungen besaßen den selben Punktdurchmesser. Einzig in der Strategie den Schweißstrom zu pulsen, also in der Erwärmungsstrategie, unterschieden sich die Versuche. Erwärmungsstrategien mit allmählich ansteigendem oder gepulstem Schweißstrom werden unter anderem für warmausgehärtetes 22MnB5 empfohlen [237]. Die Prüfbleche entsprachen mit 105 mm Länge, 45 mm Breite und einer Überlappung von 16 mm den geometrischen Vorgaben der ISO 14273 [65]. Auch die Prüfbedingungen entsprachen besagter Norm. Geschweißt wurde mit startgefrästen Elektroden aus Standard-CuCr1Zr im eingefahrenen Zustand, wie aus Kapitel 6 bekannt. Die am gemittelten Punktdurchmesser der Schweißbereiche ausgerichtete Stromstärke ist in Tabelle 9.1 zusammen mit den verschiedenen Schweißstrom-Pulsstrategien aufgeführt.

Tabelle 9.1.: Prozessparameter zu den Ergebnissen in Abbildung 9.2

| Versuchs- kennung | F_{El} <i>kN</i> | $t_{I_w,pre}$ <i>ms</i> | $I_{w,pre}$ <i>kA</i> | t_{chill} <i>ms</i> | t_w <i>ms</i> | I_w <i>kA</i> | $t_{I_w,post}$ <i>ms</i> | $I_{w,post}$ <i>kA</i> | d_w <i>mm</i> |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------|
| Hauptpuls | | – | – | | | 8,1 | – | – | |
| mit Vorpuls | 3,0 | 50 | 7,0 | | 300 | 8,8 | – | – | 6,1 |
| mit Nachpuls | | – | – | 40 | | 8,0 | 100 | 7,5 | |
| mit Vor- und Nachpuls | | 50 | 7,0 | | | 7,5 | 100 | 7,5 | |

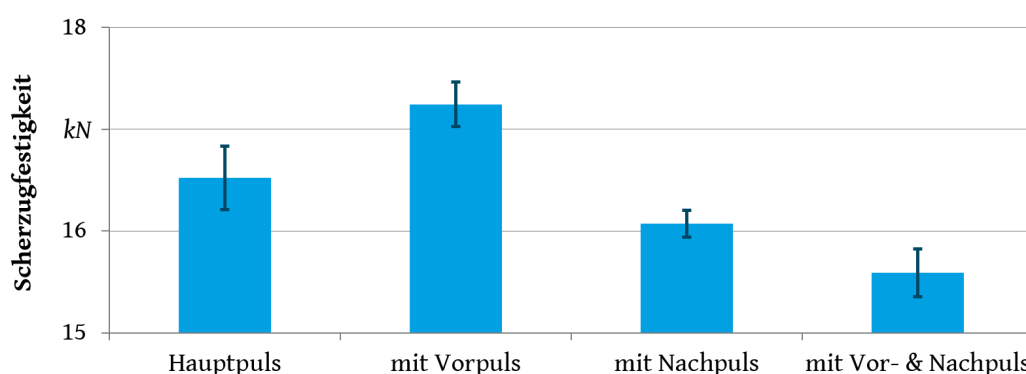


Abbildung 9.2.: Einfluss von Vorwärm- und Nachwärmepuls auf die Scherzugfestigkeit bei HCT600X+Z 1,5 mm sowie auf 22MnB5+AS150 1,1 mm

Abbildung 9.2 zeigt die erreichten Scherzugfestigkeiten sortiert nach Versuchskennung der Tabelle 9.1. Die darin enthaltenen statistisch gesicherten Ergebnisse zeigen ausgehend

von der einpulsigen Strategie, welche dem Standard dieser Arbeit entsprach, dass mit einem Vorpuls eine Zugfestigkeitssteigerung von 4,4 % möglich ist. Sowohl ein ergänzter Nachpuls wie auch die Kombination von Vor- und Nachpuls zum Hauptpuls wirken sich negativ auf die Zugfestigkeit der Verbindung aus. Diese Gegenüberstellung zeigt, dass neben dem Punktdurchmesser ein weiterer Kennwert zur Verbindungsbewertung absolut sinnvoll ist. Damit Vergleiche zu anderen Arbeiten gezogen werden können, ist die Verwendung eines typischen Prüfverfahrens absolut sinnvoll. Ein solches ist beim Widerstandspunktschweißen die Scherzugprüfung.

10. Standmengenausnutzung und Elektrodenverschleißerkennung mittels Data-Mining

In den vier vorangegangenen Kapiteln gelang es, die Wirkung von Stromstärke, Stromzeit und insbesondere vom Elektrodenwerkstoff zu erörtern. Dabei zeigte sich, dass große Reserven für stabile Prozessfenster verfügbar sind und die real möglichen Standmengen zur Zeit kaum ausgenutzt werden.

Das Widerstandspunktschweißen ökonomisch und ökologisch aufzubessern scheitert jedoch bisher häufig an zwei Problemstellungen. So gelingt es zum einen nicht, zur Vergrößerung von Prozessfenstern veränderte Prozessabläufe einzusetzen, weil die engen Zeitvorgaben in Serienproduktionen dies zumeist nicht erlauben und Untersuchungen in diese Richtung verhindern. Zum anderen gelingt es nicht, die verfügbaren Standmengen auszuschöpfen, weil statische Fräszyklen in der sehr großen Vielfalt von Elektroden sowie Prozess- und Kontaktbedingung kaum individuell berücksichtigt werden können. Stabile Prozessfenster (erste Problemstellung) lassen sich also durch flexiblere Zeitvorgaben und breitere Prozessanalysen vergleichsweise einfach erreichen. Die notwendigen Änderungen, um Standmengen auszuschöpfen (zweite Problemstellung), lassen sich hingegen nicht so einfach benennen. Ende der 1980er Jahre versuchte Sitte [266] alle Einflüsse in Gleichungen und Nomogramme zu fassen. Trotz der damals noch geringen Zahl an Stahllegierungen und Schweißsteuerungen konnte das Ziel nicht erreicht werden. In den letzten 25 Jahren wuchsen die Einflussfaktoren kontinuierlich weiter. So wurde der Markt mit neuen Stahllegierungen überflutet, welche stets auch in unterschiedlichen Beschichtungen geliefert werden können. Thyssen bietet aktuell 17 Stahlsorten für den Karosseriebau mit durchschnittlich vier wählbaren Beschichtungen an [190]. In einer Analyse zu derzeit bekannten Einflussgrößen beim Widerstandspunktschweißen kam Uran [283] auf über 70 Stück. Von diesen konnte er aufgrund starker Wechselbeziehungen nur einen Teil in eine mathematische Form bringen.

Ein Lösungsansatz, die tatsächlich verfügbaren Standmengen auszuschöpfen, könnte sich im Bereich der intelligenten Datenverarbeitung, also im Fachgebiet der Informatik finden. Basierend auf Methoden des Data-Mining wird hierzu nachfolgend ein bisher noch nicht verwendeter Lösungsast vorgestellt. Dieser besitzt bei hinreichend nachvollziehbarer Da-

tenverarbeitungslogik durch Experten, d. h. es liegt eine Modelltransparenz vor, den großen Mehrwert, zusätzlich auch Haftpflichtrisiken an die Logik zu überantworten. In [140] sind die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ergebnisse veröffentlicht.

10.1. Definition Data-Mining und Auswahl eines geeigneten Teilgebietes

Unter Data-Mining oder dem sinngemäß ins Deutsche übersetzten Datenschürfen sind alle Vorgänge zu verstehen, um Muster in großen Datenmengen aufzuspüren [33]. Zu diesen zählen Methoden aus den Bereichen der künstlichen Intelligenz, des maschinellen Lernens, der Statistik und der Datenbankverarbeitung. Es wird damit als interdisziplinäres Feld der Informatik angesehen und gehört als Hauptbestandteil zum Gesamtprozess der Knowledge Discovery in Databases, auf Deutsch Wissensentdeckung in Datenbanken. Dieser Gesamtprozess berücksichtigt explizit die Datenvorbereitung und die Ergebnisbewertung [117].

Die zahlreichen Modelle und Algorithmen des Data-Mining erfordern für die angestrebte Analyse Einschränkungen. Orientierungshilfe dafür bieten gegenwärtige Forschungsarbeiten mit großem Erfolgspotential, wodurch sogleich das supervised learning, zu Deutsch überwachtes Lernen, als Teilgebiet des maschinellen Lernens definiert werden kann. Motiviert wird diese Entscheidung durch die bereits weitestgehend abgeschlossenen Arbeiten zum Meistercomputerprogramm für das Spiel „Go“. Dieses stellt als mathematisch komplexeste Konstruktion des Menschen einen besonderen Meilenstein dar. Basis jener Arbeit bildet das Teilgebiet supervised learning und zeigt eine 100%ige Gewinnrate des Algorithmus gegen den Europameister [265] und eine 80%ige gegen einen Weltmeister [222]. Diese Entwicklung bestärkte die bereits parallel erfolgte Entscheidung, auch in den eigenen Arbeiten das Teilgebiet des supervised learning zu verwenden.

10.2. Verwandte Arbeiten

Trotz der weltweit sehr großen Zahl von Arbeiten im Bereich des Widerstandspunktschweißens ist deren Thematik weit gefächerter, wodurch nur wenige im Bereich des Data-Mining zu finden sind (50 Quellen). Diese wiederum widmen sich vorrangig der Prozessregelung, wie sie bei den meisten Stromquellenherstellern bereits in unterschiedlichem Umfang integriert sind. Somit fand sich in der Literatur zum gewählten Ansatz dieser Arbeit keine hinreichend ähnliche Quelle. Verwandte Arbeiten ließen sich anhand folgender drei Merkmale filtern:

- i Wird der Punkt- oder Linsendurchmesser vorhergesagt?

- ii Wendet das Vorhersagemodell Techniken der Merkmalsauswahl und der Modelloptimierung an Prozessgrößen (U, I, F, ...) an?
- iii Wird der Evaluationsprozess des Modells dargestellt und erfolgt eine Diskussion über eine Praxistauglichkeit?

Nach dieser Eingrenzung verbleiben die folgenden sechs Quellen, welche zum eigenen Ansatz hin zumindest verwandt sind.

Garza und Das [125] begannen in ihrer ersten Arbeit (2001) damit, qualitätsgerechte Punktschweißverbindungen von unzulässigen zu unterscheiden. Sie verwendeten dafür ausschließlich Stromstärke und Spannung in Form des Widerstandsverlaufs. Dieser wird durch Extremwertbetrachtung und einen rekursiven Algorithmus für kleinste Fehlerquadrate verdichtet und unter Verwendung einer diskreten Kosinustransformation sowie eines autoregressiven Modells und dessen Koeffizienten nachgestellt. Mittels ausformulierter Klassifizierung und Modelloptimierung werden bei 50 % Trainingsdaten 95 % aller Schweißungen korrekt eingeordnet. Weitere Entwicklungen mündeten 2007 in einem Patent zur Linsendurchmesser- und Schweißparameter-Prognose [42]. Darin werden die Elektrodenkraft als dynamische Messgröße ergänzt, die Analyse auf neuronale Netze abgewandelt und zur Aussageverbesserung Kenngrößen der Bleche, der Beschichtungen und zerstörungsfrei sowie zerstörend bestimmte Merkmale dem Algorithmus mitgegeben. Es ist nicht bekannt, dass dieses Patent verwendet wird.

Auch Junno [170] widmete sich der präzisen Qualitätsbestimmung aus Prozessparametern. In seiner Arbeit aus dem Jahr 2008 definierte er als Zielgröße den zerstörend ermittelten Punktdurchmesser, welcher aus Stromstärke, Spannung und Elektrodenkraft erkannt werden sollte. Ausgangspunkt bildeten 192 Punktschweißverbindungen, deren Prozessgrößen innerhalb der Stromzeit in zehn gleichlange Teile zerlegt wurden. Die Mittelwerte daraus stellten die Eingangsmerkmale für die Analysemethode der selbstorganisierenden Karten (SOM) dar. Jene Methode zählt zu den künstlichen neuronalen Netzen. Aus den Ergebnissen ließ sich bei einer Trainingsdatenmenge von 80 % eine Erfolgsquote zur Vorhersage des Punktdurchmessers von 92 % ableiten. Von derselben Gruppe und an der gleichen Datenmenge wurden zwei bayessche Netze der Tiefe eins aufgestellt, welche die deskriptiven Statistikmaße oberes und unteres Quartil sowie Median verwendeten [191]. Die jeweils aus drei Zielvariablen bestehenden Netze unterstreichen den Wert verständlicher Modelle und sie zeigten zugleich, dass die Resubstitution selbst bei Einteilung in Durchmesserklassen nicht zu einer allgemeingültigen Antwort führt.

Zwei weitere Methoden aus dem Gebiet der neuronalen Netze nutzten Park und Cho (2004) [239] an 180 zuvor hergestellten Schweißungen. Dazu trainierten sie eine lernende Vektorquantisierung (LVQ) und eine Backpropagation (BP) mit jeweils 50 % der Daten. Zu den Trainingsdaten zählte allein der Elektrodenkraftverlauf. Als Zielgrößen dienten gemeinschaftlich Elektrodeneindrucktiefe und Scherzugfestigkeit, welche in fünf Gruppen

unterteilt waren. Im Ergebnis wird von einer Einteilungsgenauigkeit zwischen 90 % (LVQ) und 95 % (BP) berichtet.

In der Arbeit von Afshari [2] wird eine Vorgehensweise verwendet, die der in dieser Arbeit angewandten sehr ähnlich ist. Von den Prozessparametern verwendete er Stromstärke und Stromzeit. Zielgröße war der zerstörend bestimmte Punktdurchmesser. Aus den 54 Versuchen wurden 49 zum Einlernen und Optimieren des neuronalen Netzes mit dem Verfahren der Backpropagation verwendet. Die Backpropagation gehört zu den supervised learnern. Es ergab sich ein außerordentlich kleiner mittlerer quadratischer Fehler von 3 %.

Trotz der vorwiegend sehr guten Ergebnisse beim Bewerten oder Vorhersagen der Verbindungsqualität sind Anwendungen der vorangegangenen Quellen nicht bekannt. Gründe dafür können nur vermutet werden. Auffallend ist zumindest, dass die überwiegenden Arbeiten nur wenige Schweißungen für die Modellerstellungen und deren Erprobung verwenden. Dabei entspricht die Zielgröße nur selten direkt dem Punktdurchmesser bzw. dem Linsendurchmesser. Die Auswertung stützt sich vielmehr auf eine Gruppe von Durchmesserwerten. Auch fehlt es dem dargestellten Vorgehen sowie den erzielten Ergebnissen an Transparenz. So gelingt es kaum, die benannten Modelle zu reproduzieren. In der nachfolgend aufgestellten Datenanalyse wird abweichend davon explizit auf eine große Zahl von Schweißungen, auf eine breite Verwendung von Prozessgrößen und eine hohe Transparenz beim Modellaufbau und der Ergebnisdiskussion Wert gelegt.

10.3. Aufbau und Durchführung des Data-Mining

Die Eingrenzung des vorangegangenen Abschnitts verdrängt Ideen und Konzepte, die analytisch großen Wert in Bezug zum Datenschürfen beim Widerstandspunktschweißen haben. So finden sich beispielsweise in einer Arbeit von Muhammad [223] sowie in einer Arbeit der Gruppe um Haapalainen [144] spannende Ansätze zur Merkmals- und Modellauswahl, welche in das folgende Konzept (Abschnitte 10.3.3 und 10.3.4) mit einfließen. Der Aufbau folgt unter Verwendung der Programmiersprachen Python und R entsprechend der Teilschritte des Knowledge Discovery in Databases [117]. Auf Python entfallen alle vorbereitenden Schritte und auf R die Modellbildung und deren Bewertung.

10.3.1. Datenbasis

Als Grundlage der Analyse dienen 20 013 Punktschweißverbindungen aus 16 Standmengenkurven des Kapitels 7. Jeweils drei der Kurven stammen aus den Versuchen von CuCr1Zr-mod-3 bis ..mod-20 und eine ergänzende ist den Versuchen von ..mod-1 entnommen. Jede einzelne Schweißung besteht aus sieben Messkanälen sowie zwei errechneten Kanälen. Die Kühlwasservorlauf- und -rücklauf-temperatur sowie deren Temperaturdifferenz sind als überwachende Größen enthalten. Als typische Prozessgrößen werden Stromstärke, Span-

nung und Elektrodenkraft erfasst. Ergänzt werden diese sechs Kanäle durch Messungen der Wege von oberer und unterer Elektrode sowie der sich daraus errechnenden Distanz. Jeder der genannten Kanäle setzt sich durchschnittlich aus 24 000 Werten zusammen und erfasst ein Zeitfenster von 2,4 Sekunden. Pro Schweißpunkt ergeben sich somit 168 000 Messwerte und 216 000 Datenpunkte.

Als Zielgröße wird, wie in Abschnitt 4.4 erarbeitet, der Punktdurchmesser verwendet. In der Datenanalyse existiert dafür der Begriff des Goldstandards [38]. Dieser ist für insgesamt 3 241 Schweißungen ermittelt worden. Ergänzend zu den Prüfblechen waren dafür alle Verschleißbleche aus zwei Standmengenkurven zerstörend zu prüfen. Abbildung 10.1 zeigt eines der beiden vollständigen Punktdurchmesserdiagramme.

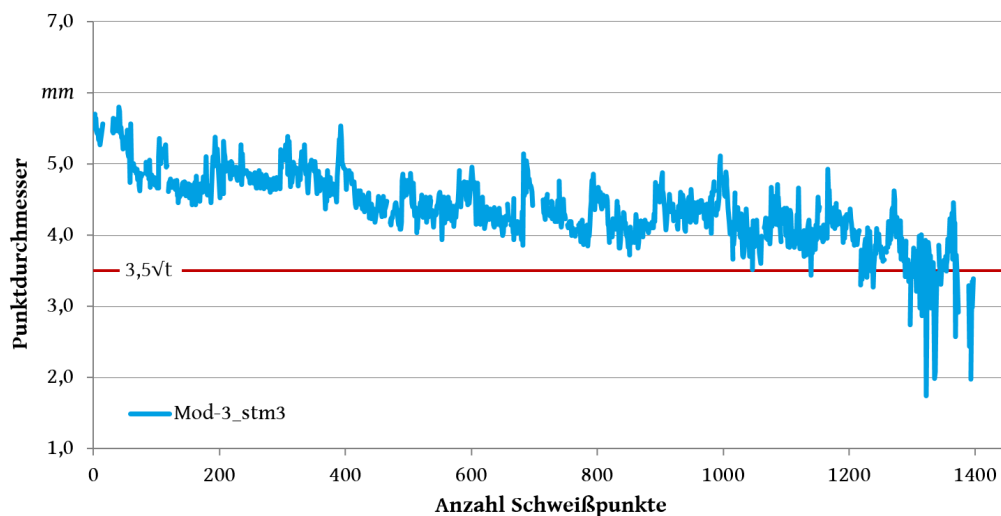


Abbildung 10.1.: Standmengenkurve für Versuchskennung Mod-3_stm3 inklusive aller bestimmbarer Punktdurchmesser $\hat{=}$ vollständig klassifiziert

10.3.2. Datenauswahl und -bereinigung

Die Rohdaten der Messungen wurden nur soweit verändert, wie es für die Datenanalyse unbedingt notwendig war. Es fanden lediglich der Tiefpassfilter gemäß Tabelle 5.1 und ein Medianfilter mit Fenstergröße 50 Anwendung. Beide wurden benötigt, um messtechnisches Rauschen zu eliminieren. Im sich anschließenden Schritt, der Vorverarbeitung, wurden die Daten in größtmöglichen Gruppen visualisiert, um die Messungen auf Plausibilität zu prüfen und offensichtliche Anomalien der Messtechnik auszuschließen. Mit diesem Schritt zeigte sich die Notwendigkeit, alle Messungen auf einen gemeinsamen Startpunkt hin auszurichten. Denn innerhalb des Messfensters schwankte der Beginn der Prozessgrößen in einem Zeitbereich von 20..200 ms vorwiegend unsystematisch, woraufhin alle Kanäle und alle Schweißungen einer Versuchskennung am jeweiligen Spannungskanal (steigende Flanke) ausgerichtet wurden. Ergänzend dazu wurden vorverarbeitend alle Messkanäle bezogen

auf die Wegmessung der oberen Elektrode zugeschnitten. Alle Daten oberhalb von 10 % des kleinsten Wegmesswertes wurden behalten. Für die Plausibilitäts- und Anomalienprüfung der Kanäle eigneten sich zwei Diagramme in besonderer Weise: eines über die Standmenge mit allen klassifizierten und unklassifizierten Schweißungen und eines, welches nur die klassifizierten Schweißungen enthält. Den zweiten Diagrammaufbau zeigt beispielhaft Abbildung 10.2. In dieser sind alle Spannungsverläufe von Versuchsreihe Mod-3_stm3 in ausgerichteter, zugeschnittener und nach Punktdurchmesser sortierter Gestalt aufgeführt. Im Teilbild a) repräsentiert jede Zeile einen Spannungsverlauf einer einzelnen Schweißung. Der Spannungswert wird dabei durch die Farben aus der Legende wiedergegeben, wie Teilbild c) darstellt. Teilbild b) repräsentiert den jeweiligen zur Messwertzeile zerstörend ermittelten Punktdurchmesser. Durch die zwei Diagramme für alle 9 Kanäle kann für jede Versuchskennungen nachgewiesen werden, dass keine offensichtlichen Anomalien existieren und die Messungen plausibel sind.

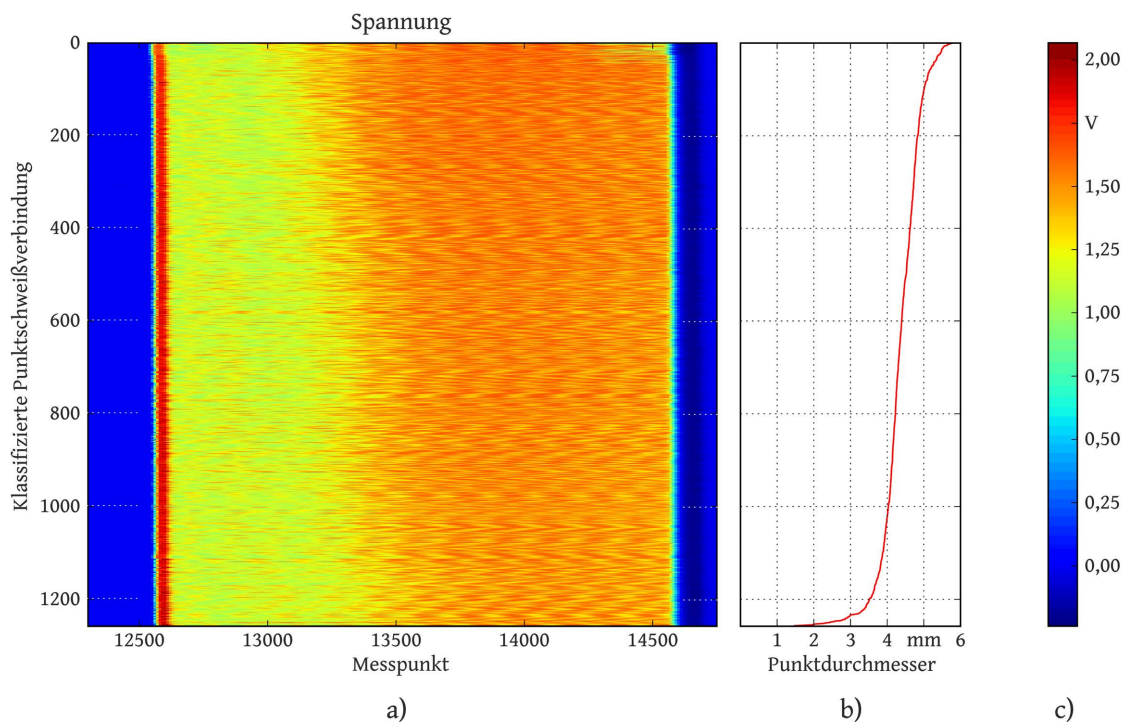


Abbildung 10.2.: Überblick der Spannungssignale aller klassifizierten Schweißungen von Mod-3_stm3

Neben den aufgeführten Analysen der Vorverarbeitung erlauben die Diagramme auch sekundäre Effekte zu erfassen. Ein solcher zeigt sich beispielhaft in Abbildung 10.2a anhand der kontinuierlichen Verkürzung des zweiten Spannungshochs im Bereich von Messpunkt 13100 und 13500. Für die nachfolgenden Schritte, zu denen Datenreduktion und Modellbildung gehören, ist die gerade eben erarbeitete Datenqualität das entscheidende Merkmal. Denn sie ist die Grundlage für belastbare Ergebnisse beim Datenschrufen.

10.3.3. Datenreduktion

Um eine zeitlich überschaubare Datenanalyse gewährleisten zu können, ist es notwendig, die 216 000 Datenpunkte einer einzelnen Schweißung auf wenige relevante und bedeutsame Merkmale zu verdichten. Daher wurden mit dem Teilschritt der Segmentierung die Ziele verfolgt, (i) eine größere Dichte relevanter Merkmale zu erreichen und (ii) möglichst alle in den jeweiligen Schweißphasen bekannten Merkmale herauszustellen. Um dabei möglichst transparente Zwischenergebnisse zu erhalten, erfolgte die Segmentierung stets prozessbezogen und wurde in zwei Gruppen unterteilt.

Die kraft- bzw. wegbezogenen Messgrößen bildeten die erste Gruppe (Abbildung 10.3). Zu diesen zählen die Elektrodenkraftmessung, die Wegmessungen der beiden Elektroden und deren Berechnungsgröße (Distanz). Orientierend am Kraftsignal wurden sie in sechs Segmente unterteilt. Der erste Schwellenwert, welcher Segment eins und sechs definiert, lag bei 20 % des in der Messung erreichten Kraftwertes (Gleichung G.1 im Anhang). Die Schnittpunkte für Segment zwei und fünf lagen bei einem globalen Durchschreiten von 90 % des Kraftwertes (Gleichung G.2 im Anhang). Der verbliebene mittlere Bereich wurde gleich aufgeteilt und bildete damit die Segmente drei und vier. Diese sechs Segmente sind beispielhaft in Abbildung 10.3 aufgeführt.

Beschreiben lassen sich die sechs Segmente der kraft- und wegbezogenen Messgrößen wie folgt: (1) Schließen der Elektrodenzange, (2) Elektrodenkraftaufbau, (3) erste Hälfte der maximalen Elektrodenkraft, (4) zweite Hälfte der maximalen Elektrodenkraft, (5) Kraftabfall und (6) Öffnen der Elektrodenzange.

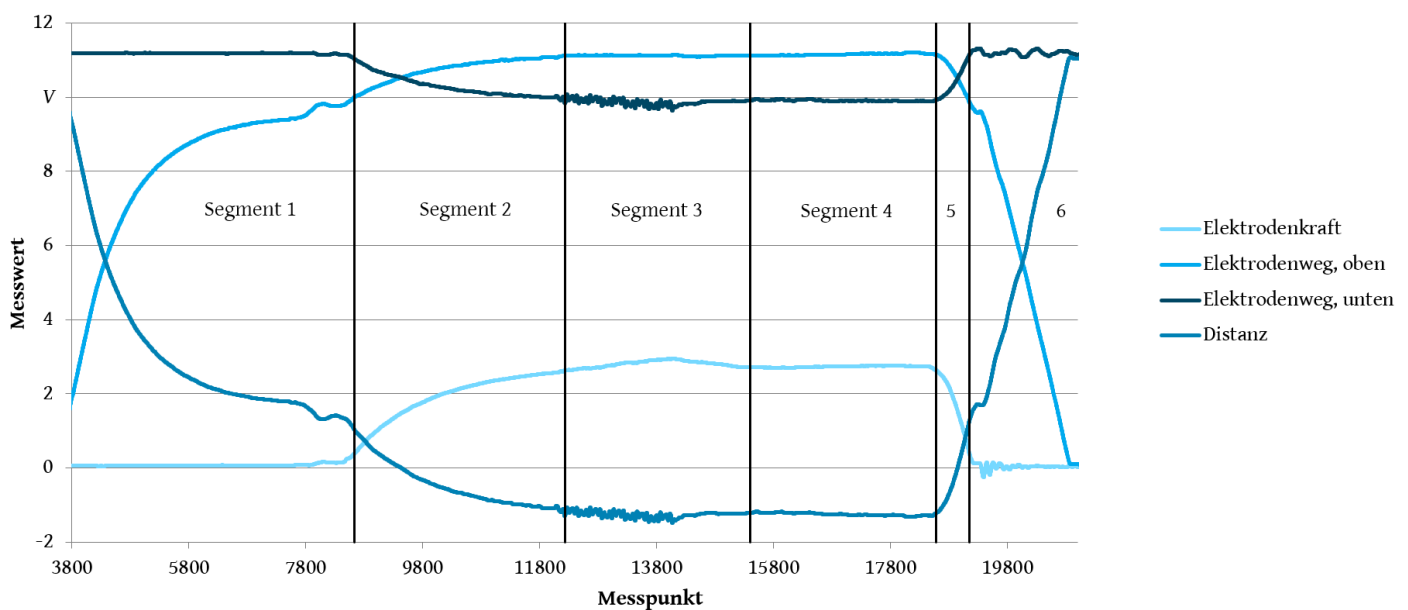


Abbildung 10.3.: Die Segmentierung der Kraft- und Wegsignale am Beispiel von Schweißpunkt 50 aus Mod-3_stm3

Die zweite Gruppe in der Segmentierung wurde durch den Bezug zum Schweißstrom ge-

bildet (Abbildung 10.4). Hierzu zählten der Schweißstrom selbst, die dazugehörige elektrische Spannung und die drei Temperaturgrößen. Auch diesmal gibt es sechs Segmente. Fünf entstanden durch Maxima und Minima der zweifach abgeleiteten Stromkurve, welche durch einen Vorwärtsdifferenzenquotienten (Gleichung G.3 im Anhang) gebildet und durch einen Gauß-Filter geglättet wurde. Der große mittlere Bereich innerhalb der Ableitung wurde durch Gleichteilung in zwei Segmente aufgetrennt. Die so entstandene Aufteilung lässt sich inhaltlich wie folgt beschreiben: (1) Vorstromzeit, (2) Stromanstieg, (3) erster Teil der Stromphase, (4) zweiter Teil der Stromphase, (5) Stromabfall und (6) Nachstromzeit. In den Segmenten (3) und (4) erfolgt die Schweißlinsenbildung.

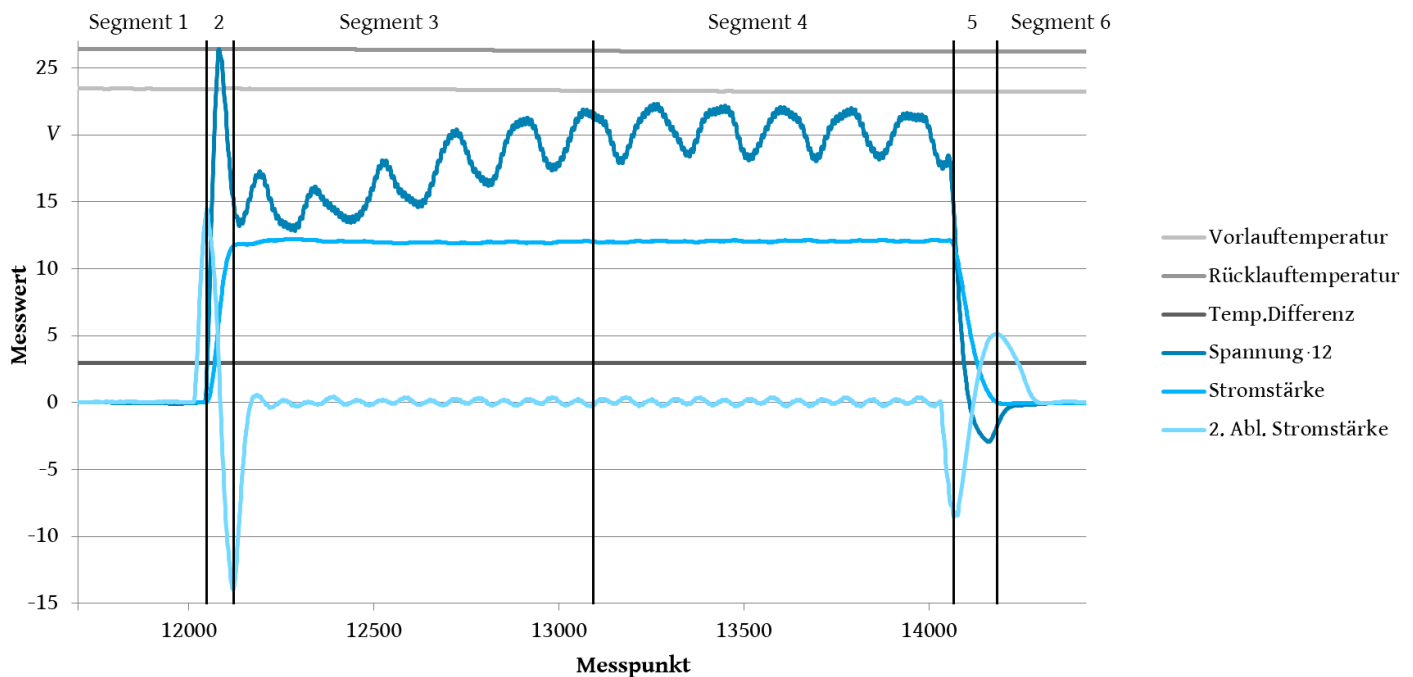


Abbildung 10.4.: Die Segmentierung der elektrischen Signale und Kühlwassergrößen am Beispiel von Schweißpunkt 50 aus Mod-3_stm3

Die Merkmalsextraktion greift diese insgesamt 54 Segmente jeder Schweißung auf. In jedem Segment wurden dabei die folgenden geometrischen und statistischen Merkmale berechnet: Minimum und Maximum mit jeweiligem Indexwert, Anzahl der Minima und Maxima, Mittelwert, Standardabweichung, Varianz, erster und letzter Messwert im Segment, das 25 %-, 50 %- und 75 %-Quantil sowie die Segmenthöhe ($max - min$) und Segmentlänge. Um sicherzustellen, dass später kein Messsignal mit sich selbst in Beziehung gesetzt werden konnte, erfolgte zusätzlich eine Schätzung der Autokorrelation gemäß Gleichung G.4 aufgeführt im Anhang. In dieser entsprechen σ der Standardabweichung und μ dem arithmetischen Mittelwert des gesamten Messsignals. Daran anknüpfend wurden die folgenden bekannten geometrischen und statistischen Merkmale für die Autokorrelation ermittelt: Minimum und Maximum mit jeweiligem Indexwert, Mittelwert, Standardabweichung, Varianz sowie das 25 %-, 50 %- und 75 %-Quantil. Darüber hinaus werden noch Metadaten

gespeichert, welche das Messsignal eindeutig zum jeweiligen Experiment zuordnen lassen. In Summe ergeben sich damit 1 426 Merkmale für jede der 20 013 Schweißungen.

10.3.4. Modellbildung und Auswahl relevanter Modelle

Die folgende Systematik nimmt einen besonders bedeutsamen Schritt beim Datenschrufen ein. Zielstellungen dabei sind, die Merkmale großer Informationsdichte herauszustellen und die besten Modelle zu finden, welche gemeinsam eine möglichst treffsichere Vorhersage des Punktdurchmessers aus den Prozessdaten gewährleisten. Dazu müssen verschiedenste Programmaufbauten - sogenannte Setups - ausgewählt, geprüft und bewertet werden.

Alle dafür notwendigen Schritte stellt Abbildung 10.5 zusammen. Zu Beginn wurden dazu alle klassifizierte Datensätze in eine Trainingsmenge (90 %) und eine Testmenge (10 %) aufgeteilt. Die Trainingsmenge wiederum wurde in zehn gleichgroße Gruppen getrennt, von denen in zehn Einzelschritten immer nur eine Gruppe zur Modellierung genutzt wurde, während jeweils alle anderen dazu dienten, diese zu testen (10-fache Kreuzvalidierung). Vor einer Modellierung wurden jedoch die Merkmale einer Auswahlroutine unterzogen, um den negativen Einfluss von zu vielen irrelevanten Merkmalen zu verringern. Nachdem alle konstanten oder doppelten Merkmale entfernt waren, wurden die verbliebenen durch drei Auswahlalgorithmen auf deren Korrelation mit dem Punktdurchmesser hin evaluiert. Zu diesen drei Algorithmen gehörten die Bravais-Pearson-Korrelation (Maß für den linearen Zusammenhang), der Spearmans Rangkorrelationskoeffizient (Maß für Zusammenhang über monotone Funktionen) und der Chi-Quadrat-Test (Maß über vorwiegend stochastische Zusammenhänge). Aus deren Ergebnismenge kamen von jedem Algorithmus die besten 10, 50, 100, 250 und 400 Merkmale (fünf Varianten) für die Modellierung zum Einsatz. Ergänzend dazu wurde ein Durchlauf ohne Merkmalsreduktion evaluiert. Diese 16 Merkmalskonstellationen ergaben letztendlich gemeinsam mit den sechs vordefinierten Lernalgorithmen insgesamt 96 Setups. Als Lernalgorithmen kamen die Lineare Regressi-

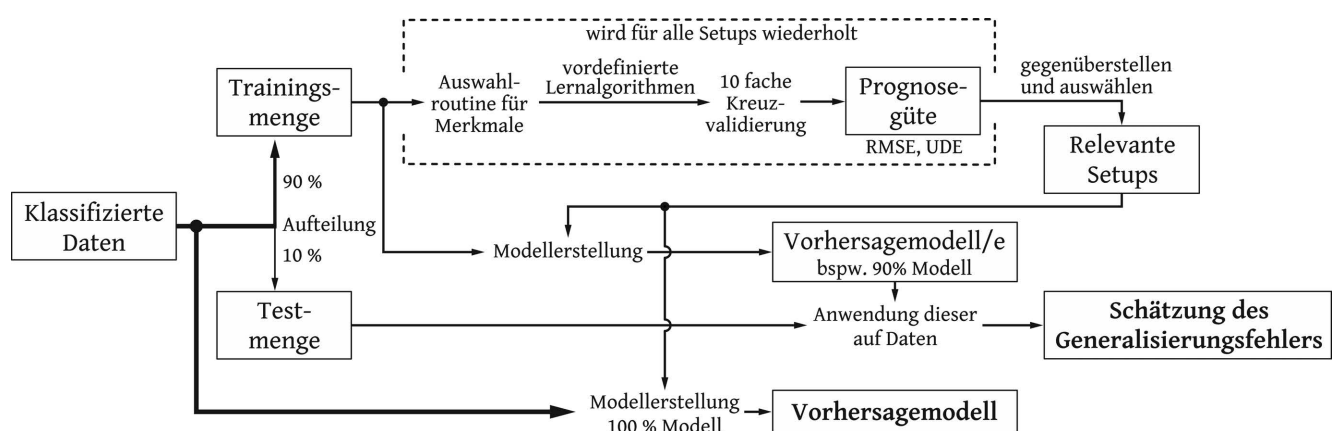


Abbildung 10.5.: Systematik zur Evaluation der Setups und zum Aufbau der unterschiedlichen Vorhersagemodelle

on, der M5 Entscheidungsbaum, kurz M5P ([246] und [290]), die Weka M5'Regeln bzw. M5'Rules ([160]), der Random Forest Entscheidungsbaum ([27]), die sogenannte „Stützvektormaschine“ (korrekt: Support Vector Machine, [275]) und der k-nächste-Nachbarn-Algorithmus (k-Nearest-Neighbor-Algorithmus, kurz k-NN) mit $k = 1$ zum Einsatz.

Für jedes durchgerechnete Setup wurden zusätzlich zu den Ergebnissen eine einzigartige Identifikationsnummer, das Datum der Berechnung, die Dauer dieser, der verwendete Merkmalsauswahlalgorithmus sowie dessen Merkmale, der Lernalgorithmus und vier Größen, um die Prognosegüte zu quantifizieren, abgespeichert. Diese vier Größen ergaben sich aus zwei Fehler-Messgrößen: dem Root Mean Squared Error (RMSE, Gleichung 10.1), welcher eine typische Beurteilungsgröße beim Datenschürfen ist, und dem Nutzerdefinierten Fehler (User Defined Error, kurz UDE, Gleichung 10.2). Der RMSE gibt an, wie stark die Prognosewerte im Durchschnitt vom tatsächlichen Punktdurchmesser abweichen. Der UDE gibt den prozentualen Anteil an, welcher sich außerhalb von $\pm 10\%$ des wahren Punktdurchmesser befindet. Der UDE entspricht damit typischen Forderungen aus der Praxis beim Widerstandspunktschweißen. Beide Größen wurden stets für die jeweils betrachtete Trainingsmenge und für die dazugehörige Testmenge ermittelt, wodurch sich vier Werte ergaben. In beiden Formeln entspricht \hat{d}_w dem vorhergesagten Punktdurchmesser und d_w dem zerstörend ermittelten Punktdurchmesser.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_{w_i} - d_{w_i})^2} \quad (10.1)$$

$$UDE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \begin{cases} 0, & \text{falls } 0,9d_{w_i} < \hat{d}_{w_i} < 1,1d_{w_i}. \\ 1, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (10.2)$$

10.4. Ergebnisse des Data-Mining

Die Ergebnisse für die Modellauswahl, erstellt über die Trainingsdaten der Kreuzvalidierung, entsprechend dem obersten Pfad aus Abbildung 10.5, sind im Diagramm von Abbildung 10.6 zusammengestellt. Dabei wurde der RMSE genutzt, weil dieser konkreter als der UDE ist. Weiterhin sind die Ergebnisse in Abbildung 10.6 dadurch gekennzeichnet, dass zur Modellauswahl der Übersicht halber nur ein RMSE-Wert der Trainingsdaten pro Setup dargestellt wird. Dieser entsprach dem Mittelwert aus jeweils zehn Durchläufen der Kreuzvalidierung. Es entstanden dadurch aufgrund der Merkmalskombinationen für jeden Modellbildner immer 16 Datenpunkte. Als ersten wichtigen Sachverhalt erlaubte die gewählte Darstellung schnell zu erfassen, dass die Lernstrategie für die Modelle weit von einer Überanpassung (engl. overfitting) entfernt war. Denn nahezu alle Setups lieferten bessere Ergebnisse mit den Testdaten als mit den Trainingsdaten. Dies ist ein sehr wichtiges Kriterium, um seriöse und erfolgreiche Modelle nachzuweisen.

Für die Setups in Abbildung 10.6 lässt sich für die intransparenten Modellbildner (gefüllte Markierungstypen) hervorheben, dass sowohl die treffsicherste als auch die ungenaueste Vorhersage geliefert werden. Mit dem in Orange markierten Random Forest Entscheidungsbaum sind die geringsten Koeffizienten möglich, was die treffsicherste Vorhersage kennzeichnet. Der unterste Datenpunkt entstand im Zusammenspiel mit den relevantesten 400 Merkmalen, ausgewählt durch den Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten (SRKK). An den unbekanntenen Daten (Testdaten) gelang damit eine Punktdurchmesser-Vorhersage

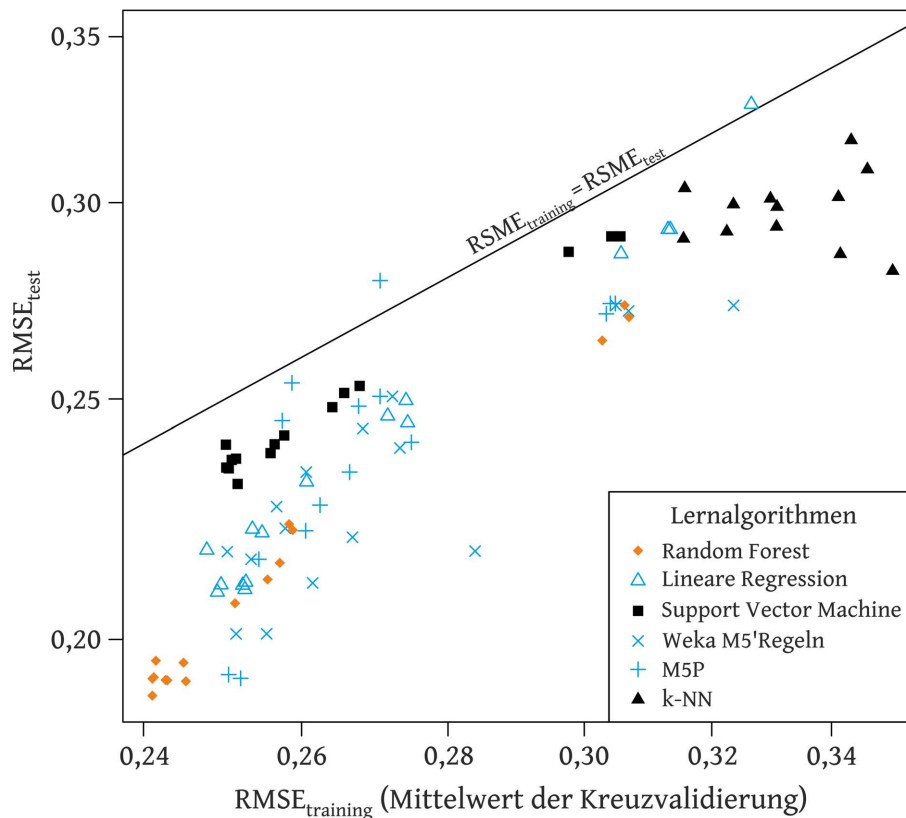


Abbildung 10.6.: $RMSE_{training}$ als Mittelwert der Kreuzvalidierung gegenüber $RMSE_{test}$; für alle verwendeten Modellbildner

mit über 95 %iger Genauigkeit bei sehr geringem RMSE innerhalb des 10 %-Korridors, wie Tabelle 10.1 darlegt. Dem gegenüber lieferte die Support Vector Machine eine grundlegend geringere Treffsicherheit. Am schlechtesten sah die Prognose beim k-NN Algorithmus ($k = 1$) aus.

Die verbliebenen drei Modellbildner, der M5P, die M5'Rules und die Lineare Regression sind in Abbildung 10.6 blau dargestellt. Auf diesen soll im Folgenden das Hauptaugenmerk liegen, weil sie entsprechend ihrer mathematischen Methoden transparente, das heißt von Experten lesbare Modelle ermöglichen. Werden alle Datenpunkte zu einer Wertemenge zusammengestellt, lässt sich eine Pareto-Front ermitteln, welche aus vier Setups besteht: der Linearen Regression mit den obersten 250 Merkmalen aus dem Chi-Quadrat-Test, der Linearen Regression mit 250 Merkmalen ermittelt über SRKK, dem M5P mit SRKK (oberste

Tabelle 10.1.: Prognosegüte der ausgewählten Setups aus Merkmalsauswahl und Modellbildner

| Setup | <i>Trainingsmenge</i> | | <i>Testmenge</i> | |
|--------------------------------------|-----------------------|---------|------------------|---------|
| | RMSE | UDE | RMSE | UDE |
| Random Forest, top 400 SRKK | 0,241 | 93,45 % | 0,190 | 95,69 % |
| Lineare Regression, top 250 χ^2 | 0,248 | 93,04 % | 0,217 | 95,38 % |
| Lineare Regression, top 250 SRKK | 0,249 | 92,76 % | 0,209 | 95,38 % |
| M5P / top 250 Bravais-Pearson | 0,252 | 92,73 % | 0,193 | 96,00 % |
| M5P / top 250 SRKK | 0,251 | 92,93 % | 0,194 | 94,46 % |
| M5P / top 249 SRKK | 0,250 | 93,07 % | 0,194 | 94,46 % |

250 Merkmale) und dem M5P mit den obersten 250 Merkmalen, systematisiert durch die Bravais-Pearson-Korrelation. Im Zusammenspiel von Trainings- und Testergebnissen sowie einem möglichst geringen RMSE ließ sich anschließend der M5P mit dem SRKK als bestes Setup ermitteln. Eine hiernach folgende Feinabstimmung brachte die Ergebnisse von Training und Test noch ein klein wenig näher. Am Ende des Datenschürfens stand ein Modell zur Verfügung, mit dem eine Vorhersagesicherheit für den Durchmesserbereich von über 94 % realistisch erscheint, wie die letzte Zeile in Tabelle 10.1 anzeigt.

Wenn der experimentell ermittelte Punktdurchmesser und der prognostizierte für das optimale Setup aufgetragen werden, wie in Abbildung 10.7 geschehen, wird offenkundig, dass das Vorhersagemodell für Durchmesser $\geq 3,5 \text{ mm}$ außerordentlich treffsicher ist. Die Prognosegüte oberhalb des Durchmessers von $3,5 \text{ mm}$ ist also weit besser als 95 %. Unterhalb $3,5 \text{ mm}$ ist die Prognose folglich schlechter, was aller Voraussicht nach auf die vergleichsweise sehr wenigen Trainingsdaten zurückzuführen ist.

Das mit dem optimalen Setup konstruierte Modell in Form eines Entscheidungsbaums legt die zwei Seiten umfassende Codeausgabe G.1 (siehe Anhang) dar. Der dabei entstehende Baum besteht aus 32 binärischen Entscheidungsknoten (Attributen) innerhalb von neun Ebenen mit 33 Blättern in der Krone (Klassifikationen). Trotz dieser vergleichsweise noch überschaubaren Größe ist die Transparenz des Entscheidungsbaums aus zwei Gründen eher als gering einzustufen. Erstens kommen viele statistische Merkmale an den Knoten zum Einsatz, wie z. B. bereits im Wurzelknoten die minimale Autokorrelation des vierten Segments der Distanz, welche außerhalb von Expertenwissen liegt. Und zweitens sind nicht die einzelnen Knoten, sondern nur die Summe einer Vielzahl von Entscheidungen auf einen Punktdurchmesser bezogen, wie beispielhaft die drei Seiten umfassende Codeausgabe G.2 für das Blatt „LM1“ darlegt. Dadurch kann die Relevanz einzelner Knoten nicht direkt erfasst werden.

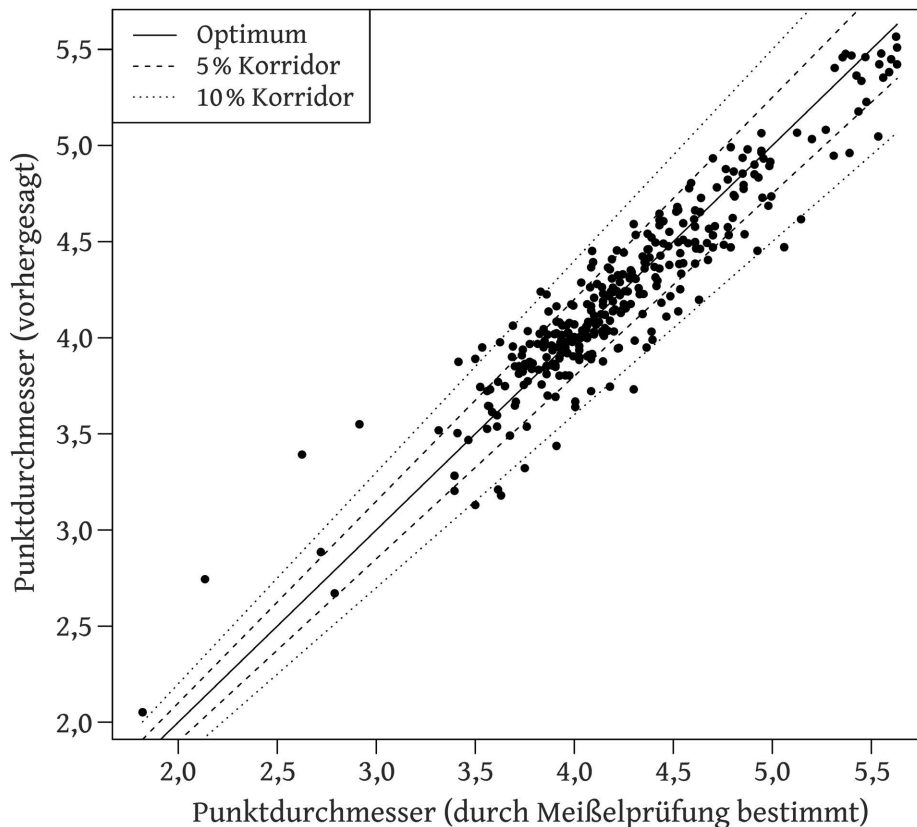


Abbildung 10.7.: Vorhersage des M5P Modells mit den relevantesten 249 Merkmalen, ermittelt über Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten

10.5. Ergebnisdiskussion und Ausblick auf die Praxis

Das Datenschrufen in sieben relevanten Messgrößen mit dem Ziel der zerstörungsfreien Bewertung des Punktdurchmessers zeigte überraschend hohe Prognosegüten von über 93 %. Als Zielvorgabe galt es, den praxisrelevanten Korridor von 10 % um den realen Wert d_w zu erreichen. Wird die Tauglichkeit des optimalen M5P Setups in den Vordergrund gestellt, so wäre der Algorithmus bereits jetzt in der Lage, unterschiedlichste CuCr1Zr-Elektroden beim Schweißen dünner feuerverzinkter Stähle geringer Dicke zum richtigen Zeitpunkt dem Überfräsen zu übergeben. Bei einer Qualitätsgrenze von $d_w = 4,0 \sqrt{t}$ würde die Prognosegüte sogar bei etwa 98 % liegen. Ein Einsatz in der Praxis ist folglich möglich und sollte unbedingt erprobt werden. Dazu sind lediglich ein vergleichbarer messtechnischer Umfang (Abschnitte 2.5 und 5.1) sowie ein PC mit der beschriebenen Routine nötig.

Trotz dieser hohen Prognosegüte und teilweise auch erhaltener Modelltransparenz besteht weiteres Entwicklungspotential. Hierzu werden zwei Wege vorgeschlagen. Der erste Weg ergibt sich aus der Zielstellung, transparente, das heißt von Experten nachvollziehbare, Modelle zu erreichen. In diesem Fall müssten die Lernalgorithmen nivelliert werden. Daran anschließend sollte mit folgender Anpassungen eine höhere Prognosegüte als die bereits erhaltene erreichbar sein: eine größere Datenmenge, im Idealfall durch Integration in

einem Produktionsprozess mit Stichprobenprüfungen, begleitet mit einer weiterentwickelten Merkmalsauswahl (verbesserte Algorithmen) und ergänzt durch eine Detailbetrachtung der Modellschritte unter Bezug auf Expertenwissen. Der zweite Weg weitere Verbesserungen zu erzielen besteht darin, intransparente Modelle zuzulassen. Denn bereits die erste Ergebniszeile aus Tabelle 10.1 zeigt, dass ohne Feinjustage eine höhere Prognosegüte realistisch ist. Hierfür sollten weitere von Informatikern des Fachbereichs der Künstlichen Intelligenz als geeignet benannte Lernalgorithmen aufgenommen werden und die Möglichkeit geschaffen werden, den Lernprozess in eine Produktionsanlage zu integrieren, sowie ebenfalls verbesserte Algorithmen zur Merkmalsauswahl ausfindig zu machen.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Dem Widerstandspunktschweißen als etabliertes, stoffschlüssiges Fügeverfahren in Serienprozessen wird nachgesagt, dass es kaum noch zu optimieren sei. In den sehr aufwendigen Recherchen von Kapitel 3 zeigte sich zwar, dass umfassende Verschleißerkennnisse für das Werkzeug Elektrodenkappe vorliegen, diese aber nicht zur Ausnutzung von Elektrodenstandmengen in Betracht gezogen werden. Durch fehlende Verallgemeinerungen und eine daraus resultierende Unsicherheit bei realen Schweißaufgaben werden Elektrodenkappen viel zu häufig überfräst (Kapitel 1). Aus diesem Beweggrund lag das zentrale Ziel der vorliegenden Arbeit darin, verschiedene Wege zur Ausnutzung der Elektrodenwerkstoffe sowie zur Verringerung des Elektrodenverschleißes zu entwickeln. Für die notwendigen Versuche wurden technisch gebräuchliche Karosserie-Stahllegierungen herangezogen.

Zusammenfassung Weil konkretes Wissen zum Kontaktelement Elektrode, zur Bewertung der Verbindungsqualität und zur Messwertgewinnung nicht sofort verfügbar war, wurde in Kapitel 2 versucht, die wesentlichen Sachverhalte erstmals geschlossen für Fachleute zusammenzustellen. Die Betrachtung der in der Literatur beschriebenen Verschleißvorgänge erfolgte in Kapitel 3. Aus diesen folgernd wurde das Vorgehen der ISO 8166 [83] ganzheitlich weiterentwickelt. Es ermöglicht nun, für Standmengenexperimente eine belastbare Auswahl von verschleißrelevanten Größen vorzunehmen und deren Bewertung verlässlich zu planen.

Aus den experimentellen Untersuchungen zur Verbindungsqualität wurde in Kapitel 4 herausgearbeitet, welches Prüfverfahren sich für die internationale Fassung zur Standmengenmittlung, der ISO 8166 [83], am besten eignet. Die Vielzahl der zerstörenden Prüfverfahren wurde hierzu aufgrund der vorgegebenen Prüflingsgröße vorerst auf Torsions-, Abroll-, Meißelprüfung und Messungen am Querschliff eingegrenzt. Von diesen zeigte in den Experimenten nur die Meißelprüfung eine für typische Stahlblech-Verbindungen und auch eine für die meisten Grenzbereiche eindeutige Punktdurchmesserbestimmung. Gegenüber zerstörungsfreien Prüfverfahren ermöglicht die Meißelprüfung derzeit ebenfalls die zuverlässigste und belastbarste Verbindungsbewertung. Die experimentellen Untersuchungen erfassten für alle grundlegend geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren die derzeit technologisch abbildbaren Grenzen. Zu den Prüfverfahren gehörten solche, die auf Magnetfeldern, Strompfaden, Wärmefeldern, Röntgenstrahlen und Ultraschallwellen basieren.

Durch die Erkenntnisse aus den Kapiteln 3 und 4 wurde im Rahmen dieser Arbeit mit

der konfokal chromatischen Kontaktflächenvermessung eine neuartige mikroskopische Verschleißanalyse erarbeitet. Mit dieser kann die Kontaktflächengeometrie der beiden Elektroden erstmals nicht nur sehr detailliert, sondern auch im eingebauten Zustand quantitativ erfasst werden. In Kapitel 5 ist die erarbeitete Vorgehensweise zur Erfassung und Analyse der Daten beschrieben.

Standmengenuntersuchungen wurden an drei Elektrodengruppen durchgeführt, welche gemeinsam in Abbildung 11.1 zusammengestellt sind. Die Standard-CuCr1Zr-Elektrode (Kapitel 6) bildet die erste Gruppe, deren Ergebnisse in Teilbild a) veranschaulicht sind. Diese enthalten 6 Versuchsreihen mit 13 Standmengenergebnissen. Dem Füge techniker fällt dabei die sehr große Spannweite von 552 bis 2764 Punktschweißverbindungen ins Auge, welche belegt, dass die Industrie mit Fräszyklen aller 120 Punktschweißverbindungen [288] momentan sehr viel Potential verschenkt. Innerhalb der Versuchsreihen weisen die Ergebnisse von CuCr1Zr-1-100 und ..-1-300 eine systematische Standmengenvergrößerung von mehr als 49 % bei verdreifachter Stromzeit nach. Weiterhin belegen die Versuchsreihen CuCr1Zr-1-100 und CuCr1Zr-2-1000, dass die Standmenge mit steigender Blechdicke deutlich ansteigt. In der metallographischen Analyse kann an feuerverzinkten Stählen bereits nach 50 Schweißungen zwischen legierenden und abtragenden Wirkungen ein stationärer Verschleißprozess bestätigt werden. Dieses Ergebnis bekräftigt, dass statisch vorgegebene Fräszyklen für diese Schweißaufgaben problemlos verlängert werden können. An warmausgehärteten Stählen mit AlSi-Beschichtung konnten an der Kontaktfläche ebenfalls nach nur wenigen Schweißpunkten stationäre Verschleißprozesse nachgewiesen werden. Mit einem inneren Plateau sehen die Kontaktflächen zwar anders aus, aber die Kontinuität von anlegierenden und abtragenden Vorgängen lässt sich sowohl in den konfokalen Messungen, wie auch in den angefertigten metallographischen Schliffen quantifizieren. Im Elektrodenquerschliff zeigt

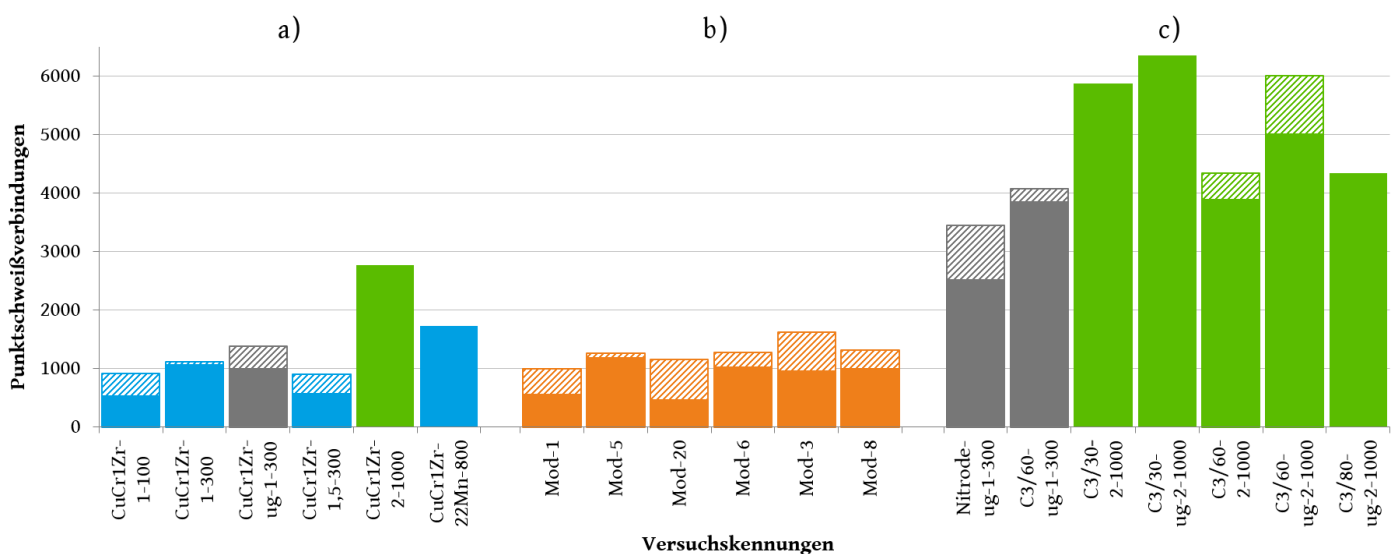


Abbildung 11.1.: Standmengenergebnisse dieser Arbeit

die Plateaubildung einen deutlich anderen Verschleißprozess als an feuerverzinkten Stählen. Zu dem bereits von Klages [176] beobachteten schlierenartigen mechanischen Legieren ($> 1\text{ mm}$) von Al und Fe konnte darüber hinaus mittels Elektronenstrahl-Mikroanalyse bestimmt werden, dass die Grenzschicht zwischen Schliere und Elektrodengrundwerkstoff stets aus Fe-Al-Mischkristallphasen besteht.

Die Standmengenergebnisse mit Elektroden aus modifiziertem CuCr1Zr (Kapitel 7), deren Prozessparameter und Stahlbleche mit CuCr1Zr-1-100 übereinstimmen, sind als Gruppe b) in Abbildung 11.1 wiedergegeben. An den 6 Versuchsreihen mit 18 Standmengenkurven konnte im Rahmen dieser Arbeit unter anderem belegt werden, dass die Referenzelektrode Mod-8, welche laut Hersteller genau der Elektrode von CuCr1Zr-1-100 entsprechen sollte, im direkten Vergleich mit dieser eine über 83% größere Standmenge aufwies. Dies beweist eindeutig eine Abhängigkeit des Standmengenverhaltens vom jeweiligen Hersteller der genormten Elektrode. Weiterhin wurde im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen, dass die Elektrode Mod-3 das durchweg beste Standmengenverhalten aufweist. Gegenüber der Referenzelektrode stellten sich bei Mod-3 auffallend geringere Einzelwertstreuungen und eine hohe Verbindungsqualität über eine große Zahl an Punktschweißverbindungen hinweg ein. Das Standmengenende wurde stets charakteristisch überschritten. Mit Mod-3 konnte nachgewiesen werden, dass die in der ISO 5182 [81] genormte CuCr1Zr-Elektrode (Mod-8) nicht für das Schweißen feuerverzinkter Stähle optimiert ist. Die Elektrode Mod-3 besitzt eine geringere Grundhärte und eine höhere elektrische Leitfähigkeit als die Referenz (Mod-8), was allein mittels Wärmebehandlung erreicht wurde. In der Verschleißdokumentation (Kontaktflächen-Geometrie, -Härte, -Legierung) zeigten sich bekannte Legierungsprozesse und Diffusionserscheinungen aus Cu und Zn, welche nie tiefer als $200\ \mu\text{m}$ in den Elektrodenwerkstoff hineinreichten.

Die größten Standmengen wurden mit dispersionsgehärteten Elektroden (Kapitel 8) erzielt. Sie sind in Abbildung 11.1 als Gruppe c) zusammengestellt. Zum experimentellen Umfang gehörten 7 Versuchsreihen mit insgesamt 12 Standmengenkurven. In der Gegenüberstellung mit CuCr1Zr fallen deutlich die um 2,5- bis 3,8fach größeren Standmengen auf (graue Balken). Bei den verschweißten Blechen handelte es sich um $1,0\text{ mm}$ dicke Stähle weicher Güte und feuerverzinkter Oberfläche. An $2,0\text{ mm}$ dicken Blechen unter gleichen Schweißbedingungen wurden mit den dispersionsgehärteten Elektroden nur 1,4- bis 2,3fache Standmengenerhöhungen gegenüber CuCr1Zr erreicht (grüne Balken). Diese Ergebnisse belegen, dass der Einsatz von dispersionsgehärteten Elektroden an dünnen Stählen besonders viel Sinn ergibt. Weiterhin beweisen die Standmengen, dass bei einem geringen Anteil an Al_2O_3 (C3/30) mehr qualitätsgerechte Schweißungen hergestellt werden können als bei einem hohen Anteil an Al_2O_3 (C3/60 und C3/80). Über all diese Standmengen hinweg zeigt sich gegenüber der bekannten Fräsvorgabe aus der Industrie für den ungünstigsten Fall eine 20 mal längere Nutzbarkeit. Die Verschleißdokumentation belegt für dispersionsgehärtete Elektroden analoge Ergebnisse zu CuCr1Zr. Aus den Mikrohärtmessungen geht hervor,

dass die Kontaktflächenhärte zum Standmengenende bei dispersionsgehärteten Elektroden 20 % höher als bei CuCr1Zr war. Diese höhere Warmformbeständigkeit liefert eine Erklärung für den langsameren Verschleißprozess und damit für eine längere Nutzungszeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden weit mehr als 100 000 Schweißungen hergestellt. Aus den Analysen von Standmengen- und Legierungsverhalten wurde in Kapitel 9 die in der ISO 8166 [83] beschriebene Methodik für Standmengenuntersuchungen weiterentwickelt. Es wurden Details zu relevanten Eingangsprüfungen, zum Dokumentationsumfang der Experimente und zu Untersuchungen am Standmengenende bzw. an ausgewählten Haltepunkten ergänzt. Mit der weiterentwickelten Methodik ist es nun besonders effizient möglich, Optimierungen an Elektroden oder aber eine optimale Auswahl für Prozessbedingungen vorzunehmen. Darüber hinaus wurde der experimentelle Umfang der Standmengenuntersuchungen so erweitert, dass zuverlässige Vergleiche zu anderen Arbeiten und Prozesssimulationen gewährleistet werden können. Von dem in der Methodik mit Bedacht erweiterten messtechnischen Umfang profitiert auch die an Bedeutung zunehmende Datenanalyse, wodurch künftig Vorhersagen von Prozessparametern oder Verbindungsqualitäten genauer werden können.

Aus den schraffierten Balkenanteilen in Abbildung 11.1, welche die Streubereiche der Versuchsreihen darstellen, lassen sich Standmengenpotentiale von 43 % bei den standardkonformen CuCr1Zr-Elektroden und von 18 % bei dispersionsgehärteten Elektroden ablesen. Dieser Anteil an der real verfügbaren Standmenge lässt sich nur durch eine bedarfsgerechte Frässtrategie nutzen, was so viel bedeutet wie eine prozessbegleitende Parameteranalyse mit automatischer Fräsentscheidung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu eine Messwertanalyse basierend auf Methoden des Datenschürfens (Data-Mining) aufgebaut (Kapitel 10). Bereits mit den ersten auf diese Weise generierten Modellen gelang es, aus den typischen Prozessgrößen (Stromstärke, Spannung, Elektrodenkraft, ergänzt durch Elektrodenwege und Kühlwassertemperaturen) den Punktdurchmesserbereich ($d_w \pm 10\%$) zu über 93 % treffsicher vorherzusagen. Würde die Qualitätsuntergrenze (Punktdurchmesser) beim Schweißen der verwendeten feuerverzinkten Stähle auf $4,0\sqrt{t}$ erhöht werden, so ließe sich mit dem optimierten Setup sogar eine Vorhersagegenauigkeit des Punktdurchmessers von über 98 % erreichen. Das optimierte Setup bestand aus dem Entscheidungsbaummodell M5P als Lernalgorithmus und den obersten 249 Merkmalen der Messergebnisse, ausgewählt mit Hilfe des Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten (SRKK). Aufgrund des experimentellen Umfangs von 20 013 Punktschweißverbindungen mit 3 241 klassifizierten Schweißungen sowie durch das lückenlos dokumentierte Vorgehen heben sich die Ergebnisse von allen bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiet in positiver Hinsicht ab. Sie sind gekennzeichnet durch eine hohe Vertrauenswürdigkeit und die Möglichkeit, von jedem Informatiker nachvollzogen sowie weiterentwickelt werden zu können.

Ausblick Es wird empfohlen, die in den Kapiteln 6 bis 8 erzielten Erkenntnisse zu real verfügbaren Standmengen und deren prozesstechnischen Beeinflussung unbedingt in Fertigungsprozessen einfließen zu lassen. Sie ermöglichen es, den Elektrodenverbrauch unmittelbar zu senken, was Verfahrenskosten reduziert und Kupfer einspart. Welches wirtschaftliche Potential in den erarbeiteten Ergebnissen enthalten ist, zeigt Tabelle 11.1 repräsentativ anhand der weltweiten Pkw-Fertigung [221]. Vorausgesetzt wird, dass sich die Elektrodenlebensdauer aus 10 Überarbeitungen (Fräsungen) definiert, das bedeutet 10 Standmengen [274]. Um die innerhalb dieser Arbeit erreichten enormen Einsparpotentiale hervorzuheben, sind diese in Spalte fünf prozentual dargestellt.

Tabelle 11.1.: Einsparpotentiale durch Standmengenausnutzung, Beispiel: Pkw-Fertigung

| | Schweiß- punkte | genutzte / erreichbare Standmenge | Elektroden- bedarf | Ein- sparung pro Jahr | Kapitel |
|---|--------------------|---|----------------------------------|-----------------------------|------------|
| | <i>Pkte.</i> | <i>Pkte.</i> | <i>Stck.</i> | % | <i>Nr.</i> |
| Ausgangslage | 303,86 Mrd. | 120 | 506,5 Mio. | – | 3 |
| Tatsächlich verfügbare Standmengen | | ca. 500 | 121,6 Mio. | 76 | 6 |
| Optimierte CuCr1Zr- Legierung | 303,86 Mrd. | ca. 900 | 67,6 Mio. | 86 | 7 |
| Dispersionsgehärtete Elektroden | | ca. 2600 | 23,4 Mio. | 95 | 8 |
| Elektrodenverschleißdiagnose & 100 % Qualitätsbewertung mittels Data-Mining | | + 40 % | abzügl. $\bar{x} = 28,3$ Mio. | zusätzl. $\bar{x} = 5,6$ | 10 |

Es ist bekannt, dass kleine und mittelständische Unternehmen für eine Elektrodenkappe aus CuCr1Zr gegenwärtig 0,54 € aufwenden müssen [16]. Für große Abnahmemengen, welche im Pkw-Sektor üblich sind, wird von einem Einkaufspreis von 0,27 € ausgegangen. Trotz dieses recht geringen Preises ergeben sich mit statisch erhöhten Fräszyklen gemäß zweiter Zeile in Tabelle 11.1 jährliche Einsparpotentiale von etwa 104 Mio. €. Wird die optimierte CuCr1Zr-Legierung Mod-3 verwendet (dritte Zeile in Tabelle 11.1), könnten weitere ca. 14,5 Mio. € eingespart werden. Eine bedarfsgerechte Frässtrategie bietet die größtmögliche Werkstoffnutzung und würde eine zusätzliche mittlere Ersparnis von 7,6 Mio. € bringen.

Abschließend seien wichtige Anregungen für Datenanalysen basierend auf dem Gebiet des Data-Minings (sinngemäß: Datenschnüffeln) bzw. dem übergeordneten Knowledge Discovery in Databases (zu deutsch: der Wissensentdeckung in Datenbanken) benannt. Unter Bezug der in Kapitel 10 erarbeiteten Ergebnisse im Teilgebiet des supervised learning, wird hier der Vorschlag unterbreitet, in nachfolgenden Arbeiten weitere Algorithmen zur Merkmalsauswahl und weitere Lernalgorithmen zu untersuchen. Für die Merkmalsauswahl

werden unter anderem Forward Selection und evolutionäre Ansätze vorgeschlagen. Bei den Lernalgorithmen müsste entweder der erstmals mit dieser Arbeit verfolgte Weg zu Modelltransparenz vertieft oder aber der Weg intransparenter Modelle verfolgt werden. Es wird empfohlen, die erfolgreichsten Setups (Programmaufbauten) zeitnah in einen Serienprozess einzubinden.

Im Rahmen der Untersuchungen fanden sich weitere große Merkmalschwärme bei zerstörungsfreien Prüfverfahren mit teilweise unbekanntem bzw. unzureichend bekannten Zusammenhängen. Die überwiegende Zahl an Signalwechselwirkungen werden bislang von Experten durch manuelle Analysen mit den Zielgrößen Punktdurchmesser, Linsendurchmesser oder Verbindungsqualität ins Verhältnis gesetzt. Da es äußerst vielversprechend erscheint, sei hiermit empfohlen, die vorhandenen Messdaten zusätzlich mit systematisch ausgewählten, rechnerbasierten Methoden (Data-Mining) nach Zusammenhängen zu den Zielgrößen zu durchforschen. Aus der großen Zahl zerstörungsfreier Prüfverfahren sollten dafür die Magnetfeldprüfung (Abschnitt 4.3.1), die Leitfähigkeitsprüfung als Vierleitermessung während Vor- und Nachhaltezeit (Abschnitt 4.3.2) sowie die prozessintegrierte Ultraschallprüfung mit Transversalwellen (Abschnitt 4.3.5) verwendet werden.

Literatur

- [1] ABB Switzerland Ltd. Fiber-Optic Current Sensors: *FOCS – Fiber-Optic Current Sensor: Make light work of DC current measurement*. Technical documentation. ABB Switzerland Ltd. Fiber-Optic Current Sensors, Jan. 2012.
- [2] Afshari, Davood u. a.: „Prediction of the nugget size in resistance spot welding with a combination of finite-element analysis and an artificial neural network“. In: *Materials and technology* 48.1 (2014), S. 33–38.
- [3] Alvarez, Ignacio u. a.: „On-Line Metrology with Conoscopic Holography: Beyond Triangulation“. In: *Sensors* (Sep. 2009), S. 7021–7037.
- [4] Arbeitsgruppe 1 des Gemeinsamen Ausschusses für Leitfäden in der Metrologie (JCGM/WG 1): *Evaluation of measurement data - An introduction to the >Guide to the expression of uncertainty in measurement< and related documents*. Leitfaden Deutsche Ausgabe 2011-03-30. Arbeitsgruppe 1 des Gemeinsamen Ausschusses für Leitfäden in der Metrologie (JCGM/WG 1), 2011.
- [5] Arndt, Volker u. a.: „Ultraschall-Sensor für die Prozesssteuerung beim Widerstandspunktschweißen“. EP 1 358 476 B1 (Stuttgart und Wuppertal, Germany). 2006.
- [6] Azuma, H. und Sugimoto, H.: „Life of coated electrodes in resistance spot welding of galvanized steel“. In: *International symposium of the IIW – Resistance welding and related welding processes*. 3. Osaka, Japan, Juli 1986, S. 113–117.
- [7] Babu, S. S., Santella, M. L. und Peterson, W.: „Modeling Resistance Spot Welding Electrode Life“. In: *Sheet Metal Welding Conference XI* 11.paper 7-2 (2004). American Welding Society, 16 pages.
- [8] Baehr, Hans Dieter und Stephan, Karl, Hrsg.: *Wärme- und Stoffübertragung*. ISBN 978-3-540-87688-5. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [9] Bargel, Hans-Jürgen u. a.: *Werkstoffkunde*. Hrsg. von Bargel, Hans-Jürgen und Schulze, Günter. 10. Aufl. ISBN 978-3-540-79296-3. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

- [10] Bauer, C.-O.: „Anforderungen aus der Produkthaftung an Fügeverfahren“. In: *Roboter '92 – Roboterschweißen und Widerstandsschweißen*. Bd. 143. ISBN 3-87155-448-0. DVS-Verlag GmbH, 1992.
- [11] Beitz, W. und Grote, K.H., Hrsg.: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Aufl. ISBN: 3-540-67777-1. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.
- [12] Benjamin, John S.: „Dispersion Strengthened Superalloys by Mechanical Alloying“. In: *Metallurgical Transactions* 1.10 (1970), S. 2943–2951. DOI: 10.1007/BF03037835.
- [13] Beratungsstelle für die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen, Auskunft- und: *Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing)*. Informationsdruck. Am Bonnhof 5, 40474 Düsseldorf, Germany: Deutsches Kupferinstitut, März 2007.
- [14] Bergmann, Ludwig und Schäfer, Clemens: *Lehrbuch der Experimentalphysik – Band 6: Festkörper*. Hrsg. von Kassing, Rainer. 2., überarb. Aufl. ISBN 3-11-017485-5. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2005.
- [15] Bersch, Bernhard, Fuchs, Alex und Eck, Ralf: „Elektrode zum Widerstandsschweißen von oberflächenveredelten Stahlblechen und Verfahren zu deren Herstellung“. EP 0 383 060 A1. 1990.
- [16] Bogdan, Andreas: *Angebot zu Elmedur X Elektrodenkappen - Kleinmenge*. Duro Metall GmbH, ein Unternehmen der Wieland-Gruppe. Mai 2015.
- [17] Bonfig, Karl W.: *Technische Durchflussmessung – unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussmeßverfahren*. 3. Aufl. ISBN 9783802721908. Vulkan-Verlag, 2002.
- [18] Bonfig, Karl W.: *Temperatursensoren – Prinzipien und Applikationen*. Sensorik. ISBN 9783816912613. Expert Verlag, 1995.
- [19] Boni, Michael de: „Untersuchungen zur Elektrodennacharbeit an unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffen sowie Feinblechbeschichtungen beim Widerstandspunktschweißen“. Diplomarbeit. Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2009.
- [20] Bönisch, Sven: „EMV in Meßsystemen – Grundlagen und Anwendungen“. In: *SEI-Tagung DESY Hamburg*. Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Hahn-Meitner-Platz 1, 14109 Berlin, Germany, März 2010.
- [21] Borgelt, Ralf, Hecht, Meinhard und Licher, Ferdinand: „Elektrode für die elektrische Widerstandsschweißung“. P 25 54 990.0 (30179 Hannover). 1977.

- [22] Bosch Rexroth AG: *PRC7300 – neue Schweißsteuerung von Rexroth*. www.bosch-rexroth.de/welding. Apr. 2015.
- [23] Bosch Rexroth AG: *Rexroth PSI 6xxx – Schweißsteuerung mit Mittelfrequenz-Umrichter*. 6. Aufl. Electric Drives und Controls, P.O. Box 13 57, 97803 Lohr, Germany, Nov. 2012. URL: <http://boschrexroth.com/electrics>.
- [24] Bosch Rexroth AG: *Rexroth PSQ 6000 Ultraschallsystem – Technische Information*. 1070080091 Ausgabe 05. Bosch Rexroth AG. Postfach 1162, 64701 Erbach, Germany, 2004.
- [25] Bothfeld, R und Fiebag, St.: „Integriertes Qualitätssicherungssystem: Steuerung mit adaptiver Regelung und Inline-Überwachung - GeniusMF“. In: *20. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen – Treffpunkt Widerstandsschweißen 20* (Mai 2007), S. 6–11.
- [26] Bothfeld, Ralf: „System IQR – ein neues Regelverfahren beim Widerstandspunktschweißen“. In: *DVS-Berichte 213* (2001). ISBN 3-87155-671-8, S. 138–142.
- [27] Breimann, Leo: „Random Forests“. In: *Machine Learning, Kluwer Academic Publishers 45.1* (2001), S. 5–32.
- [28] Bruckner, J. u. a.: „DeltaSpot – Punktschweißen am laufenden Band“. In: *DVS-Berichte 244* (2007). ISBN 978-3-87155-250-2, S. 453–456.
- [29] Brunst, Walter und Fahrenbach, Wolfgang: *Widerstandsschweißen*. Werkstattbücher 73 a/b. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1962. ISBN: 978-3-662-24696-2. DOI: 10.1007/978-3-662-24696-2.
- [30] Burkhardt, Arthur, Hrsg.: *Technologie der Zinklegierungen*. Reine und angewandte Metallkunde in Einzeldarstellungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1937.
- [31] Buschke, Paul und Wagner, Joachim: „Schweißpunktprüfung in der Produktion an schwer zugänglichen oder kritischen Punkten in der Produktionslinie“. In: *DGZfP-Jahrestagung 2009* (Mai 2009). ISBN 978-3-940283-16-0, Poster 50.
- [32] Carl, V.: „Qualitätsprüfung von Punktschweißverbindungen mit aktiver Thermografie“. In: *DVS-Berichte 213* (2001). ISBN 3-87155-671-8, S. 147–149.
- [33] Chakrabarti, Soumen u. a.: *Data Mining Curriculum: A Proposal*. Techn. Ber. Association for Computing Machinery, Apr. 2006. URL: <http://www.kdd.org/curriculum/index.html>.

- [34] Chan, Kevin R. und Scotchmer, Nigel: „Predicting Electrode Life with FEM Software“. In: *The 6th International Seminar on Advances in Resistance Welding*. Hrsg. von Zhang, Wenqi u. a. Hamburg: SWANTEC Software, Engineering ApS und Harms & Wende GmbH & Co KG, Sep. 2010, S. 174–194.
- [35] Chang, In-Sung: „Verbundelektroden zum Widerstandspunktschweißen verzinkter Stahlbleche“. DE 198 45 815 A1 (10781 Berlin). 1998.
- [36] Chang, In-Sung: „Vergrößerte Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen verzinkter Stahlbleche mittels neuartiger Verbundelektroden“. ISBN: 3-89574-316-X. Dissertation. Technische Universität Berlin, 1998.
- [37] Cho, Yongjoon und Rhee, Sehun: „Quality Estimation of Resistance Spot Welding by Using Pattern Recognition With Neural Networks“. In: *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement* 53.2 (Apr. 2004), S. 330–334.
- [38] Cios Krzysztof J. Pedrycz, W., Swiniarski, R.W. und Kurgan, L.: *Data mining – a knowledge discovery approach*. ISBN: 978-0-387-36795-8. New York, NY: Springer-Verlag, 2010.
- [39] CMW Inc.: *Elkaloy[®] 20 electrodes - CMW[®] Resistance Welding Product*. Technical Data Sheet. P.O. Box 2266, Indianapolis, Indiana 46206-2266 USA: CMW Inc., 2009.
- [40] Craggs, James und Coquillaud, Denis: *Luvata Nitrode*. Techn. Ber. Centrapark, Bessemer Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1HT, UK: nippert-dawson, Luvata Welwyn Garden Ltd, 2007.
- [41] D., Assel und Nadkarni, V.: *Resistance spot welding performance of Dispersion-Strengthened Copper Electrodes vs. Copper-Zirconium and Copper-Chromium Electrodes on electrogalvanized steel*. Techn. Ber. SCM Metal Products 11000Cedar Avenue Cleveland, OH 44106, 1988.
- [42] Das, Manohar u. a.: „Method for estimating nugget diameter and weld parameters“. Englisch. 7 244 905 B2. Juli 2007.
- [43] Dello, Fabian: „Ermittlung der Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen beschichteter hochfester Bleche“. Großer Beleg. Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Professur für Fügetechnik und Montage, März 2008.

- [44] Denkmayr, K. u. a.: „Prognose der Elektrodenstandmenge beim Punktschweißen verzinkter phosphatierter Feinbleche“. In: *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik* 114.2 (1997), S. 92–98.
- [45] Deutsches Kupfer Institut: *CuCr1Zr*. Werkstoff-Datenblatt. Am Bonneshof, Düsseldorf, Germany: Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2005.
- [46] Deutsches Kupfer Institut: *Cu-ETP*. Werkstoff-Datenblatt. Am Bonneshof, Düsseldorf, Germany: Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2005.
- [47] Deutsches Kupfer Institut: *Niedriglegierte Kupferwerkstoffe – Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung*. Techn. Ber. Am Bonneshof, Düsseldorf, Germany: Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2012.
- [48] Dierk, Schröder: *Leistungselektronische Bauelemente*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [49] Dies, Kurt: *Kupfer- und Kupferlegierungen in der Technik*. ISBN: 978-3-642-48932-7. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1967.
- [50] Dilthey, U. und Dickersbach, J.: „Einsatz Neuronaler Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen“. In: *17. Sondertagung Widerstandsschweißen*. Bd. 189. ISBN: 3-87155-494-4. DVS-Verlag, 1998, S. 92–95.
- [51] Dilthey, U. und Marek, U.: „Legierungsschichten und Elektrodenverschleiß beim Widerstandspunktschweißen.“ In: *Blech, Rohre, Profile* 43.10 (1996). ISSN: 0006-4688, S. 527–534.
- [52] Dilthey, U., Marek, U. und Pöll, K.: „Entwicklung eines Systems zur automatischen Durchführung von Elektrodenstandmengenuntersuchungen beim Widerstandspunktschweißen“. In: *Roboter '92 – Roboterschweißen und Widerstandsschweißen*. Bd. 143. ISBN 3-87155-448-0. DVS-Verlag GmbH, 1992.
- [53] *DIN 1319-3: Grundlagen der Meßtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*. Normenausschuß Technische Grundlagen (NATG), Mai 1996.
- [54] *DIN 1319-4: Grundlagen der Meßtechnik – Teil 4: Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit*. Normenausschuß Technische Grundlagen (NATG), Feb. 1999.
- [55] *DIN 1910-100: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen*. Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Feb. 2008.

- [56] *DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.* Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) - Geometrische Produktspezifikation und -prüfung, Sep. 2003.
- [57] *DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines.* Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) - Geometrische Produktspezifikation und -prüfung, Sep. 2003.
- [58] *DIN EN 10292: Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen.* Normenausschuss Eisen und Stahl (FES), März 2005.
- [59] *DIN EN 10346: Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl – Technische Lieferbedingungen.* Normenausschuss Eisen und Stahl (FES), Juli 2009.
- [60] *DIN EN 12163: Kupfer und Kupferlegierungen - Stangen zur allgemeinen Verwendung.* Normenausschuss Nichteisenmetalle (FNNE), Aug. 2011.
- [61] *DIN EN ISO 10447: Widerstandsschweißen - Prüfung von Schweißverbindungen - Schäl- und Meißelprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen.* deutsch. Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), Mai 2015.
- [62] *DIN EN ISO 14270: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenmaße und Verfahren für die mechanisierte Schälprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln.* deutsch. Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), Juli 2014.
- [63] *DIN EN ISO 14271: Widerstandsschweißen – Vickers-Härteprüfung (Kleinkraft- und Mikrohärtbereich) von Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißverbindungen.* Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS) und Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Nov. 2012.
- [64] *DIN EN ISO 14272: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenmaße und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln.* Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS) und Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Juli 2014.
- [65] *DIN EN ISO 14273: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln.* deutsch. Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS) und Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Juli 2014.

- [66] *DIN EN ISO 14323: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenabmessungen und Durchführung des Schlagscherzugversuchs und des Schlagkopfzugversuchs von Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln.* DIN-Normausschuss Schweißen und Verwandte Verfahren (NAS), Juni 2015.
- [67] *DIN EN ISO 14324: Widerstandspunktschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißungen – Schwingfestigkeitsprüfung von Punktschweißverbindungen.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS) und Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Dez. 2003.
- [68] *DIN EN ISO 14327: Widerstandsschweißen – Verfahren für das Bestimmen des Schweißbereichsdiagramms für das Widerstandspunkt-, Buckel und Rollennahtschweißen.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Juni 2004.
- [69] *DIN EN ISO 14329: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Brucharten und geometrische Messgrößen für Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen.* deutsch. Normenausschuss Schweißtechnik (NAS) und Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Dez. 2003.
- [70] *DIN EN ISO 14373: Widerstandsschweißen – Verfahren zum Punktschweißen von niedriglegierten Stählen mit oder ohne metallischem Überzug.* DIN-Normausschuss Schweißen und Verwandte Verfahren (NAS), Juni 2015.
- [71] *DIN EN ISO 17653: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Torsionsversuch an Widerstandspunktschweißverbindungen.* Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS) und Normenausschuss Materialprüfung (NMP).
- [72] *DIN EN ISO 17657-1: Widerstandsschweißen – Schweißstrommessung für das Widerstandsschweißen – Teil 1: Leitfaden für die Messung.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Sep. 2007.
- [73] *DIN EN ISO 17657-2: Widerstandsschweißen – Schweißstrommessung für das Widerstandsschweißen – Teil 2: Schweißstrommessgeräte mit Strommessspule.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Sep. 2007.
- [74] *DIN EN ISO 17657-3: Widerstandsschweißen – Schweißstrommessung für das Widerstandsschweißen – Teil 3: Strommessspule.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Sep. 2007.

- [75] *DIN EN ISO 17657-4: Widerstandsschweißen – Schweißstrommessung für das Widerstandsschweißen – Teil 4: Kalibriersystem.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Sep. 2007.
- [76] *DIN EN ISO 17677-1: Widerstandsschweißen – Begriffe – Teil 1: Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen.* deutsch, englisch, französisch. Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Jan. 2010.
- [77] *DIN EN ISO 18278-1: Widerstandsschweißen – Schweißbeignung – Teil 1: Allgemeine Anforderungen an die Bewertung der Schweißbeignung von Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißen von metallischen Werkstoffen.* Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), Aug. 2015.
- [78] *DIN EN ISO 18278-2: Widerstandsschweißen – Schweißbeignung – Teil 2: Verfahren zum Bewerten der Eignung für das Widerstandspunktschweißen.* Normenausschuss Schweißen und verwandte Verfahren (NAS), Mai 2014.
- [79] *DIN EN ISO 18592: Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Verfahren zur Schwingfestigkeitsprüfung von Mehrpunktproben.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Mai 2010.
- [80] *DIN EN ISO 4063: Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), März 2011.
- [81] *DIN EN ISO 5182: Widerstandsschweißen – Werkstoffe für Elektroden und Hilfseinrichtungen.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Aug. 2009.
- [82] *DIN EN ISO 5821: Widerstandsschweißen – Punktschweiß-Elektrodenkappen.* Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Apr. 2010.
- [83] *DIN EN ISO 8166: Widerstandsschweißen – Verfahren für das Bewerten der Standmenge von Punktschweißelektroden bei konstanter Maschinen-Einstellung.* deutsch. Normenausschuss Schweißtechnik (NAS), Sep. 2003.
- [84] *DIN EN ISO 9712: Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung.* Normenausschuss Materialprüfung (NMP), Dez. 2012.
- [85] Doebbelin, Reinhard u. a.: „Measurement and evaluation of pulsating environmental magnetic fields by the example of resistance welding installations“. In: *3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (Mai 2002), S. 47–50. DOI: 10.1109/ELMAGC.2002.1177360.

- [86] Dong, P., Li, M.V. und Kimchi, M.: „Finite element analysis of electrode wear mechanisms: face extrusion and pitting effects“. In: *Science and Technology of Welding and Joining* 3.2 (1998). ISSN: 1362-1718, S. 59–64.
- [87] Dorn, L. und Juech, A.: „Einflussgrößen und Auswirkungen des Elektrodenverschleißes beim Punktschweißen verzinkter Stahlbleche“. In: *DVS-Berichte*. Bd. 51. DVS-Verlag, 1978, S. 89–95.
- [88] Dorn, L. und Xu, P.: „Einfluß der mechanischen Maschineneigenschaften auf die Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen“. In: *Roboter '92 – Roboterschweißen und Widerstandsschweißen*. Bd. 143. ISSN: 0418-9639. DVS-Verlag GmbH, 1992, S. 139–144.
- [89] Dorn, Lutz und Jüch, Arnim: „Prozeßanalyse des Widerstandspunktschweißen - Einfluß des Elektrodenverschleißes und Folgerungen für die Prozeßregelung“. In: *Schweissen und Schneiden* 35.1 (1983), S. 20–24.
- [90] Dorn, L. u. a.: „Beitrag zur Gütesicherung beim Widerstandspunktschweißen von beidseitig verzinktem Stahlblech in der Automobilindustrie“. In: *Roboter '92 – Roboterschweißen und Widerstandsschweißen*. Bd. 143. ISBN 3-87155-448-0. DVS-Verlag GmbH, 1992.
- [91] Dorn, L. u. a.: „Vergrößerte Elektrodenstandmenge beim Punktschweißen verzinkter Stahlbleche mittels neuartiger Verbundelektroden“. In: *17. Sondertagung Widerstandsschweißen*. Bd. 189. ISBN: 3-87155-494-4. DVS-Verlag, 1998, S. 44–48.
- [92] Dunn, Thomas J.: „Interferometrie mit Frequenzabtastung“. In: *Quality Engineering* 10 (2005), S. 32.
- [93] *DVS 1003-2: Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung in der Schweißtechnik; Verfahrensarten; Aussagefähigkeit und Anwendungsbereiche der Verfahren*. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Prüfen von Schweißungen, Juli 1989.
- [94] *DVS 2902-3: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke – Konstruktion und Berechnung*. Technischer Ausschuss, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen und verwandte Verfahren, Feb. 1991.
- [95] *DVS 2902-3: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke – Konstruktion und Berechnung*. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Mai 2015.

- [96] *DVS 2902-4: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke Grundlagen, Vorbereitung und Durchführung.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Okt. 2001.
- [97] *DVS 2903: Elektroden für das Widerstandsschweißen.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Okt. 1998.
- [98] *DVS 2908: Messen beim Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Apr. 2008.
- [99] *DVS 2916-1: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Zerstörende Prüfung, quasistatisch.* deutsch. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Jan. 2009.
- [100] *DVS 2916-1: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Zerstörende Prüfung, quasistatisch.* deutsch. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, März 2014.
- [101] *DVS 2916-2: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Schwingfestigkeitsprüfung.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Apr. 2009.
- [102] *DVS 2916-3: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Zerstörende Prüfung, schlagartig.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Jan. 2013.
- [103] *DVS 2916-4: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Metallografische Prüfung.* deutsch. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Dez. 2006.
- [104] *DVS 2916-5: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Zerstörungsfreie Prüfung.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Dez. 2006.
- [105] *DVS 2920: Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlblechen bis 3 mm mit metallischen Überzügen.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Feb. 2000.
- [106] *DVS 2942-2: Meßgeräte für das Widerstandsschweißen Strommeßspulen – Begriffe, Kalibrierung, Prüfungen, Anbau- und Einbau-Meßspulen.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Juli 1999.
- [107] *DVS 2942-3: Messgeräte für das Widerstandsschweißen – Schweißstrommessung - Effektivwerte, Definitionen, Berechnung, Beispiele.* Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Jan. 2013.

- [108] *DVS 2945 Beiblatt 3: DVS-Lehrgang – Prüffachkraft für Verbindungen durch Widerstandsschweißen – Modul III: Ultraschallprüfung von Schweißpunkten*. Okt. 2001.
- [109] *DVS 2951: Prüfen von widerstandsgeschweißten Verbindungen in der Elektrotechnik und Feinwerktechnik – Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfungen*. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Mai 2010.
- [110] *DVS 2960: Unregelmäßigkeiten bei Widerstandspunktschweißverbindungen an Stahlwerkstoffen*. Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Widerstandsschweißen, Aug. 2015.
- [111] Eck, R., Fuchs, A. und Bersch, B.: „Molybdän- und Wolframbasislegierungen in Punktschweißelektroden für verzinkte Feinbleche“. In: *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 136.1 (1991). ISSN: 0005-8912, S. 23–29.
- [112] Eichhorn, Friedrich, Hrsg.: *Schweisstechnische Fertigungsverfahren – 1 : Schweiss- und Schneidtechnologien*. ISBN 9783184006037. Düsseldorf: VDI Verlag, 1983.
- [113] Eichhorn, Friedrich, Emonts, Manfred und Leuschen, Bernhard: „Untersuchungen zur Verbesserung der Kühlbedingungen von Widerstandspunktschweisselektroden“. In: *Schweissen und Schneiden* 35.1 (1983), S. 12–17.
- [114] Eichhorn, Friedrich und Singh, S.: „Einfluss der Kuehlbedingungen auf Temperatur und Standzeit der Elektroden“. In: *DVS-Berichte*. Bd. 51. 1978, S. 96–100.
- [115] Erbach, M. u. a.: „Datenerfassung und -analyse des dynamischen Verhaltens von Widerstandspunktschweißzangen“. In: *DVS-Berichte* 250 (2008). ISBN 978-3-87155-256-4, S. 498–499.
- [116] Fachausschuss Messunsicherheit: *Praxisgerechte Ermittlung der Messunsicherheit – Grundlagen und Vorgehensweisen für einfache Modelle ohne Korrelation*. Leitfaden Version 5.3. Abbestraße 2-12, 10587 Berlin-Charlottenburg, Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Feb. 2012.
- [117] Fayyad, Usama, Piatetsky-Shapiro, Gregory und Smyth, Padhraic: „From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases“. In: *American Association for Artificial Intelligence*. (1996). URL: <http://www.kdnuggets.com/gpspubs/aimag-kdd-overview-1996-Fayyad.pdf>.
- [118] Franz, Joachim: *EMV – Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen*. 5., erw. u. überarb. Aufl. ISBN 978-3-8348-1781-5. Springer Vieweg, 2013.

- [119] Fritz, Alfred Herbert u. a.: *Fertigungstechnik*. Hrsg. von Fritz, Alfred Herbert und Schulz, Günter. 8. Aufl. ISBN 978-3-540-76695-7. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [120] Fronius International GmbH: „Punktschweisselektrode und Punktschweisszange mit einer solchen Elektrode“. Patent WO 2007092974 A1 (Pettenbach, Austria). 2007.
- [121] *FRT CSL - Konoskopische Holographie*. Bergisch Gladbach, 2008.
- [122] Fujita, M. u. a.: „Ultrasonic Evaluation of spot welding nugget diameter with a line-focused probe“. In: *Welding in the World* 53.11/12 (2009), R281–289.
- [123] Galler, M. und Vallant, R.: „The influence of zinc coatings on the electrode wear during resistance spot Welding of sheet metal“. In: *IWS Werkstofftagung*. Graz, 2008, S. 117–119.
- [124] Ganowski, F. J. und Williams, N. T.: „Advances in resistance spot and seam welding of zinc coated steel strip, 692, 1972. 2“. In: *Sheet Metal Industries* 49.2 (1972), S. 692–705.
- [125] Garza, Frank und Das, Manohar: „On real time monitoring and control of resistance spot welds using dynamic resistance signatures“. In: *Proceedings of the 44th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems*. Bd. 1. MWSCAS. 2001, S. 41–44.
- [126] General Electric Company: *Krautkramer USLT 2000B – The proven and tested ultrasonic notebook as a PC-based instrument*. Document GEIT-20041US. März 2005.
- [127] General Electric Company: *SpotChecker – A Truly Mobile Solution for Spot Weld Testing Offering Significant Gains in Productivity*. Document GEIT-20059. 2009.
- [128] *Gesamtkatalog Laser-Wegmessensoren*. Neu-Isenburg, 2008.
- [129] Geschossmann, Nikolaus u. a.: „Punktschweiß-Elektrode“. DE 44 16 504 A1. 1995.
- [130] Gevatter, Hans-Jürgen und Grünhaupt, Ulrich, Hrsg.: *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. ISBN 978-3-540-34823-8y. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [131] Gobrecht, Jürgen, Hrsg.: *Werkstofftechnik – Metalle*. Bd. 3. ISBN: 978-3-486-58977-1. München: Oldenbourg Verlag, 2009.
- [132] Gockel, Tilo: „Interaktive 3D-Modellerfassung mittels One-Shot-Musterprojektion und Schneller Registrierung“. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2006.

- [133] Godeke, A. u. a.: „A superconducting transformer system for high current cable testing“. In: *Review of Scientific Instruments* 81.035107 (2010), S. 1–9.
- [134] Göklü, S. u. a.: „Widerstandsschweißen von dünnfilmlackierten Stahlblechen für die Automobilindustrie“. In: *17. Sondertagung Widerstandsschweißen*. Bd. 189. ISBN: 3-87155-494-4. DVS-Verlag, 1998, S. 49–56.
- [135] Gottstein, Günter: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Physikalische Grundlagen*. 4. Aufl. ISBN-13: 978-3642366024. Springer Vieweg, Dez. 2013.
- [136] Gouraud, Henri: „Continuous Shading of Curved Surfaces“. In: *IEEE Transactions on Computers* C-20.6 (Juni 1971). ISSN: 0018-9340, S. 623–629. DOI: 10.1109/T-C.1971.223313.
- [137] Großmann, C., Mathiszik, C. und Füssel, U.: „Potential der prozessbegleitenden zerstörungsfreien Prüfung beim Widerstandspunktschweißen mit transversal polarisierten Ultraschallwellen“. In: *33. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik*. DVS-Berichte Band 295. ISBN 978-3-87155-615-9. Düsseldorf, 2013, S. 45–49.
- [138] Großmann, C., Zschetzsche, J. und Füssel, U.: „Increasing service life and tool life of spot welding electrodes“. In: *5th annual International Doctoral Seminar*. Hrsg. von Rešetová, DhD. PhDr. Kvetoslava. Slovenská technická univerzita v Bratislave. Smolenice Castle, Slovakia, 2010, S. 166–175.
- [139] Großmann, C., Zschetzsche, J. und Füssel, U.: „Punktschweißen – Potentiale zur Erhöhung der Standmenge und Lebensdauer von Elektroden“. In: *31. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik*. DVS-Berichte Band 270. ISBN 978-3-87155-263-2. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2010, S. 72–79.
- [140] Großmann, C. u. a.: „Data mining in resistance spot welding – A non-destructive method to predict the weld diameter by monitoring process parameters“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Dez. 2016). DOI: 10.1007/s00170-016-9847-y. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9847-y>.
- [141] Großmann, C. u. a.: „Methoden zur Diagnose des Elektrodenverschleißes beim Widerstandspunktschweißen“. In: *DVS Congress 2010*. DVS-Berichte Band 267. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. Düsseldorf, 2010, S. 122–127.

- [142] Großmann, C. u. a.: „New ways to improve resistance spot welding“. In: *Tailored Joining 2012 – Proceedings of the International Symposium Tailored Joining*. Fraunhofer IWS Dresden & TU Dresden. Dresden, 2012. URL: www.iws.fraunhofer.de/de/veranstaltungen/archiv_2012/tailored_joining_2012.html.
- [143] Großmann, C. u. a.: „Resistance spot welding – quality assurance and new testing methods“. In: *Tailored Joining 2014 – Proceedings of the International Symposium Tailored Joining*. Fraunhofer IWS Dresden & TU Dresden. Dresden, 2014.
- [144] Haapalainen, Eija u. a.: „Methods for Classifying Spot Welding Processes: A Comparative Study of Performance“. In: *The 18th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems*. 2005, S. 9.
- [145] Habinger, Ernst und Bachmann, Herbert: *Handbuch elektromagnetische Verträglichkeit – Grundlagen, Maßnahmen, Systemgestaltung*. 2. Aufl. Berlin, München: Verl. Technik, 1992.
- [146] Harms & Wende GmbH & Co. KG: *SchweißZEIT*. Dez. 2013. URL: www.harms-wende.de.
- [147] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften: *BGI 5011: Beurteilung magnetischer Felder von Widerstandsschweißeinrichtungen*. Berufsgenossenschaftliche Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit. Isaac-Fulda-Allee 18, 55124 Mainz, Germany: Berufsgenossenschaft Holz und Metall, Oktober 2006.
- [148] Haynes, William M., Hrsg.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 2010-2011. 91. ISBN-13: 978-1439820773. Taylor & Francis Ltd., 2010.
- [149] Hering, Ekbert und Schönfelder, Gert, Hrsg.: *Sensoren in Wissenschaft und Technik – Funktionsweise und Einsatzgebiete*. ISBN 978-3-8348-0169-2. Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [150] HIE SCHWEISS-SYSTEME GmbH: *Akzent-5000 – Kurzinfor Schweißstromsteuerung*. Okt. 2012. URL: www.hie-gmbh.de.
- [151] HIE SCHWEISS-SYSTEME GmbH: *Schweißstromsteuerung MTW-9000*. Jan. 2004. URL: www.hie-gmbh.de.
- [152] Hipp, R. u. a.: „Hochaufgelöste Ultraschallprüfung an Widerstandspunktschweißverbindungen“. In: *DGZfP-Jahrestagung*. DGZfP-Berichtsband BB 141. ISBN 978-3-940283-49-8. Berlin, 2013, Mi.2.A.3 1 –11.

- [153] Hipp, R. u. a.: „Quantitative Charakterisierung von Punktschweißverbindungen mittels Ultraschallmikroskopie unter besonderer Berücksichtigung von Oberflächentopographie und Gefügedämpfung“. In: *DGZfP-Jahrestagung*. DGZfP-Berichtsband. DGZfP e.V. Berlin, 2015, P54 1–2. URL: <http://jt2015.dgzfp.de/Berichtsband>.
- [154] Hoffmann, B. u. a.: „Data Mining beim Widerstandspunktschweißen: Vorgehensweise und erste Ergebnisse der Prognose von Punktdurchmessern“. In: *Informatiktage 2014*. Bd. S-13. ISBN 978-3-88579-447-9. Gesellschaft für Informatik. Bonn: Köllen Druck+Verlag GmbH, 2014.
- [155] Hoffmann, Jörg, Hrsg.: *Handbuch der Messtechnik*. 3. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2007.
- [156] Hofmockel, Markus: *ECKA DISCUP – Neue Hochleistungskupferwerkstoffe durch P/M-Technologie*. Präsentation. Hochschulkupfersymposium 2004. eckagranules, Nov. 2004.
- [157] Holliday, R., Parker, J. D. und Williams, N. T.: „Electrode deformation when spot welding coated steel“. In: *Welding in the World* 35.3 (1995). ISSN: 0043-2288, S. 160–164.
- [158] Holliday, R., Parker, J. D. und Williams, N. T.: „Relative contribution of electrode tip growth mechanisms in spot welding zinc coated steel“. In: *Welding in the World* 37.4 (1996). ISSN: 0043-2288, S. 186–193.
- [159] Holm, Ragnar: *Electric Contacts – Theory and Applications*. Repr. of the 4. completely rewritten ed. 1967, 3. print. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2000. ISBN: 9783540038757.
- [160] Holmes, Geoffrey, Hall, Mark und Frank, Eibe: „Generating rule sets from model trees“. In: *Proceedings of the 12th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*. Springer-Verlag, 1999, S. 1–12.
- [161] Holzapfel, L.: „Produzentenhaftung und Qualitätssicherung – Wechselwirkungen in technischer und juristischer Sicht“. In: *Roboter '92 – Roboterschweißen und Widerstandsschweißen*. Bd. 143. ISBN 3-87155-448-0. DVS-Verlag GmbH, 1992.
- [162] Holzhauer, Anton: „Widerstandsschweißelektrode“. DE 10 2009 047 920 1 (72517 Sigmaringendorf). 2010.

- [163] Howe, Peter und Chen, Chih-Chang: „The Effects of Coating Composition, Substrate, and Welding Machine on the Resistance Spot Welding Behavior of Hot-Dip Galvanized and Galvannealed Sheet Steels“. In: *SAE Technical Papers* 1999.01-3213 (1999), S. 1–12.
- [164] Huidong, Gao, Syed, Ali und Borja, Lopez: *Austenitic Weld Inspection with EMAT Phased Array*. Innerspec Technologies, Inc. Juli 2012. URL: <http://www.innerspec.com>.
- [165] Ikeda, T. u. a.: „Development of new Ultrasonic Inspection Technique for spot welds with Matrix Arrayed Probe and SAFT“. In: *Welding in the World* 50.5/6 (2006), S. 3–13.
- [166] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: „Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)“. In: *Health Physics* 99.6 (2011), S. 818–836.
- [167] Irrgang, Klaus und Michalowsky, Lothar, Hrsg.: *Temperaturmesspraxis – mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen*. ISBN 978-3802722004. Vulkan-Verl., 2004.
- [168] Ishikawa, Sakae: „Method for controlling resistance welding using adjustable fuzzy reasoning“. EP 0 774 319 A1. 1996.
- [169] Jonata, M. und Neumann, H.: „Share of Spot Welding and Other Joining Methods in Automotive Production“. In: *Welding in the World* 52.3-4 (März 2008), S. 12–16.
- [170] Junno, Heli u. a.: „Studying the Quality of Resistance Spot Welding Joints Using Self-Organising Maps“. In: *Fourth International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS)*. 2008, S. 8.
- [171] Jüttner, Sven, Ferkel, Hans und Moll, Oliver: „Verfahren zur Herstellung eines Dispersionswerkstoffes“. DE102009015156 A1 (38440 Wolfsburg, Germany). Sep. 2010.
- [172] Karasawa, H. u. a.: „3D-SAFT Ultrasonic Inspection Equipment „Matrixeye““. In: *7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components JRC-NDE 2009* (2009). ID=8893, S. 15. URL: <http://www.ndt.net/article/jrc-nde2009/papers/97.pdf>.
- [173] Kimchi, M., White, C. L. und Gugel, M. D.: „Mechanisms of Resistance Welding Electrode Wear on Galvanized Steel“. In: *Symposium on Automotive Technology & Automation*. Hrsg. von Roller, Dieter. 29. 32A Queen Street, Croydon CR0 1SY, England: Automotive Automation Limited, 1996, S. 839–850.

- [174] Kimchi, M. u. a.: „Evaluation of various electrode materials for resistance spot welding thin galvanized steel sheets“. In: *DVS-Berichte* 124 (1989). ISSN: 0418-9639, S. 54–60.
- [175] Kindsvater, A. u. a.: „Zerstörungsfreie Prüfung des Punktdurchmessers mittels Ultraschall und (elektro-)magnetische Felder an Punktschweißungen“. In: *DVS Congress 2011*. DVS-Berichte Band 275. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. Düsseldorf, 2011, S. 434–437.
- [176] Klages, Eike-Christian: „Beurteilung der Beanspruchung von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen von höher- und höchstfestem Stahl“. ISBN-13: 978-3-8325-3868-2. Dissertation. Technische Universität Clausthal, 2014.
- [177] KME Germany GmbH & Co. KG: *ELBRODUR® – Werkstoffe für das Widerstandsschweißen / Alloys for resistance welding*. Broschüre | brochure 0913.010.0108. Klosterstraße 29, 49074 Osnabrück, Germany: KME Germany GmbH & Co. KG, Press- und Zieherzeugnisse, 2013.
- [178] Knoblauch, Günter und Mitautoren, 19: *Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien*. Hrsg. von Mettner, Michael. 2. Aufl. Bd. 558. Kontakt & Studium. Renningen: expert-Verl., 2002. ISBN: 3816921213.
- [179] *Konfokale Laser-Wegmesssensoren zur hochpräzisen Oberflächenabtastung: Modellreihe LT-9000*. Neu-Ilsenbach, 2004.
- [180] Körtvélyessy, László von: *Thermoelement-Praxis*. 2. Aufl. ISBN 9783802721403. Vulkan-Verlag, 1987.
- [181] Krause, H. J.: „Untersuchungen zur Elektrodenstandzeit beim Widerstandspunktschweißen feueraluminierter Bleche aus Stahl“. In: *Schweißen und Schneiden* 29.1 (1977), S. 5–9.
- [182] Krause, H. J. u. a.: „Diffusionsbarrieren zur Verbesserung der Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen von Stahl - Elektrodenstandmengen und Einfluss der Oelzusammensetzung“. In: *Schweißen und Schneiden* 37.5 (1985), S. 206–210.
- [183] Krause, H.-J., Berndt, A. und Lehmkuhl, B.: „Vergleichende Bewertung des Störgrößeneinflusses auf die Qualität von Punktschweißverbindungen“. In: *17. Sondertagung Widerstandsschweißen*. Bd. 189. ISBN: 3-87155-494-4. DVS-Verlag, 1998, S. 57–72.
- [184] Krause, H.-J. und Simon, G.: „Standmengen von Punktschweißelektroden, abhängig von variierten Einflußgrößen“. In: *DVS-Berichte* 70 (1981), S. 85–100.

- [185] Krautkrämer, Josef und Krautkrämer, Herbert: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Bd. 5. ISBN: 9780387157542. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1986.
- [186] Krüger, U.: „Wege zur Erhöhung der Elektrodenstandzeit beim Punktschweißen verzinkter Feinbleche unter Berücksichtigung ihres Korrosionsverhaltens“. In: *Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung und Oberflächenbehandlung e. V.* 18.22 (1967), S. 209–217.
- [187] Kulikov, V. P. und Bolotov, S. V.: „Magnetic-thermal method of inspection quality of resistance spot welded joints“. In: *Welding International* 18.2 (2004), S. 135–138.
- [188] Kümpel, Renald: „Pressversuche für Elektrodenkappen“. Angebot der Pressteilfirma Kümpel-Ingenieur-Betrieb aus Obermaßfeld-Grimmenthal. Okt. 2012.
- [189] Kustron, P. u. a.: „In-line Ultrasonic Investigation of Spot Weld Quality using Multi-Transducer Set-Up“. In: *AIP Conference Proceedings* 1211.1 (2010), S. 1615–1622. DOI: 10.1063/1.3362261.
- [190] Laurenz, Robert: „Stahlentwicklung aus Sicht der Fügetechnik“. In: *AfT-Tagung in Halle (Saale)*. ThyssenKrupp Steel Europe AG. Ausschuss für Technik im DVS, Mai 2014.
- [191] *Studying the quality of resistance spot welding joints using bayesian networks*. 2004, S. 705–711.
- [192] Link, Norbert, Pollak, Jürgen und Sarveniazi, Alireza: „Adaptive Welding Control and Production Configuration Technique“. In: *The 6th International Seminar on Advances in Resistance Welding*. Hrsg. von Zhang, Wenqi u. a. Hamburg: SWAN-TEC Software, Engineering ApS und Harms & Wende GmbH & Co KG, Sep. 2010, S. 95–109.
- [193] Lohbrandt, H. und Frings, A.: „Widerstandspunktschweißen von verzinkten Stahlblechen“. In: *Thyssen Technische Berichte* 21 (1989). ISSN 0340-5060, S. 213–220.
- [194] Loipetsberger, Mario: „Band zum Schutz der Elektroden einer Punktschweißzange“. WO 2007090212 A2 (Pettenbach, Austria). 2007.
- [195] Lu, F. und Dong, P.: „Characterization of Nugget Development under Electrode Wear Conditions in Resistance Spot Welding“. In: *SAE Technical Paper* paper 982363 (1998), S. 6. DOI: 10.4271/982363.
- [196] Lücke, Peter: „Mikrooptische Sensoren nach dem konfokalen Messprinzip“. Dissertation. Universität Karlsruhe, 2006.

- [197] Luo, Pan-dian, Li, Hong-bin und Li, Zhen-hua: „Two high accuracy digital integrators for Rogowski current transducers“. In: *Review of Scientific Instruments* 85.015102 (2014), S. 1–7.
- [198] Ly, Giang-Khanh: „Meßverfahren zur makro- und mikroskopischen Oberflächentopographiebestimmung“. Dissertation. Universität Stuttgart, 1994.
- [199] MacLauchlan, Daniel T. und Latham, Wayne M.: „EMATS for spot weld examination“. US 6250163 B1 (New Orleans, LA (US)). 2001.
- [200] Madsen, A. u. a.: „Analysis and Modelling of Electrode Wear in Resistance Spot Welding“. In: *The 6th International Seminar on Advances in Resistance Welding*. Hrsg. von Zhang, Wenqi u. a. Hamburg: SWANTEC Software, Engineering ApS und Harms & Wende GmbH & Co KG, Sep. 2010, S. 159–173.
- [201] Mair, Peter: „Effects on the Human Body and Assessment Methods of Exposure to Electro-Magnetic-Fields Caused by Spot Welding“. In: *4th International Seminar on Advances in Resistance Welding* (Nov. 2006), S.1–7.
- [202] Marek, Udo: „Beitrag zur Klärung der Legierungsschichtbildungs- und Verschleißvorgänge an Widerstandspunktschweißelektroden beim Schweißen feuerverzinkter Stahlbleche“. ISBN: 978-3-8265-1215-5. Dissertation. Templergraben 55, 52062 Aachen: RWTH Aachen, Feb. 1996.
- [203] Maschinenbau- und Metall-Berufsgenossenschaft: *BGVB 11: Unfallverhütungsvorschrift – Elektromagnetische Felder*. Apr. 2002.
- [204] Maschotta, Ralph: „Merkmalslistenbasierte Kreuzkorrelationsmethoden für die medizinische Bildverarbeitung“. Dissertation. Technischen Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Okt. 2008.
- [205] Mathiszik C. and Großmann, C. u. a.: „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“. In: *Schweissen und Schneiden* 68.1 (2016), S. 28–37.
- [206] Mathiszik, Christian: „Simulation der Ausbreitung transversaler Ultraschallwellen eines ausgewählten Ultraschallmoduls zur Linsendurchmesserbestimmung beim Widerstandspunktschweißen mittels Finite-Elemente-Methode“. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Jan. 2013.

- [207] Mathiszik, Christian: *Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren*. Forschungsvorhaben des AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.) IGF-Nr.: 17.539 B / DVS-Nr.: 04.058. Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Professur für Fügetechnik und Montage, Apr. 2015.
- [208] Mathiszik, C. u. a.: „Remanent Magnetization for Non-Destructive Testing of Spot Welds“. In: *19th World Conference on Non-Destructive Testing* (Juni 2016). ISBN: 978-3-940283-78-8, S. 11. URL: <https://www.wcndt2016.com/portals/wcndt/bb/Fr1B3.pdf>.
- [209] Mathiszik, C. u. a.: „Ultraschallprüfung mittels Transversalwellen beim Widerstandspunktschweißen – Simulation der Schallausbreitung“. In: *DGZfP-Jahrestagung*. DGZfP-Berichtsband BB 141. ISBN 978-3-940283-49-8. Berlin, 2013, P61 1 –7.
- [210] Mathiszik, C. u. a.: „Zerstörungsfreie Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen mit elektromagnetischen Feldern und Ultraschall“. In: *22. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen*. GSI SLV Duisburg, 2013, S. 249–256.
- [211] Matting, A. und Krüger, U.: „Fortschritte beim Punktschweißen feuerverzinkter Bleche“. In: *Bänder Bleche Rohre* 7.1 (Jan. 1966), S. 8–14.
- [212] Matuschek Meßtechnik GmbH: *Widerstandsschweißen von Stahlblechen*. Aug. 2015. URL: <http://www.matuschek.de/html/de/anwendung-bleche-schweissen.htm>.
- [213] McDonald, D. W.: „Temperature measurement error due to the effects of time varying magnetic fields on thermocouples with ferromagnetic thermoelements“. In: *Review of Scientific Instruments* 48.8 (1977), S. 1106–1107. DOI: 10.1063/1.1135194.
- [214] Menshikov, G.A. u. a.: „Improving the working efficiency of electrodes in resistance spot welding of steels“. In: *Welding International* 24.5 (2010). ISSN: 0950-7116, S. 380–384.
- [215] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG: *Mehr Präzision. Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. Technische Dokumente. Königbacher Str. 15, 94496 Ortenburg, Germany: MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG, 2011.
- [216] Möhler, Wolfram u. a.: „Elektrode für das Widerstandspunktschweißen und Verfahren zu deren Herstellung“. DE 197 38 957.0 (09599 Freiberg). 1999.
- [217] Moll, Oliver: „Herstellung und Bewertung von Nanopartikelverstärkten Kupferschweißkappen“. Diplomarbeit. TU Clausthal, 2006.

- [218] Moos, Waike, Leonenko, Natalya und Klöpfer, Julia: *Gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung aus Fügetechniken in der EU und ausgewählten Ländern Europas*. Gutachten. Hochschule Bochum, Fachbereich Wirtschaft, Feb. 2013.
- [219] Motor Vehicle Manufacturers, OICA - International Organization of: *1998 Production Statistics*. Englisch. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. 1999. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/1998-statistics/>.
- [220] Motor Vehicle Manufacturers, OICA - International Organization of: *2006 Production Statistics*. Englisch. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. 2007. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2006-statistics/>.
- [221] Motor Vehicle Manufacturers, OICA - International Organization of: *2014 Production Statistics*. Englisch. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Feb. 2015. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/>.
- [222] Moyer, Christopher: „How Google’s AlphaGo Beat a Go World Champion: Inside a man-versus-machine showdown“. In: *The Atlantic* (März 2016). march 28th in technology section. URL: <http://www.theatlantic.com/technology/archive/2016/03/the-invisible-opponent/475611/>.
- [223] Muhammad, Norasiah und Manurung, Yupiter HP: „Design Parameters Selection and Optimization of Weld Zone Development in Resistance Spot Welding“. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology* 6.11 (Nov. 2012), S. 1188–1193.
- [224] Müller, Dietmar u. a.: „Punktschweißwerkzeug mit einer Wickelvorrichtung“. DE 197-54 546 A1 (80809 München). 1999.
- [225] Müller, Heinz-Ullrich und Waschkies, Eckhart: „Sicherung der Schweißpunktqualität online im Karosserierohbau mit Ultraschall“. In: *DGZfP-Jahrestagung 2002* 7.11 (Mai 2002). ISBN: 3-931381-39-0, S. V48.
- [226] Müller, Ulrich: *Anorganische Strukturchemie*. 6. ISBN 9783834806260. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [227] Nadkarni, Anil V. und Klar, Erhard: „Dispersion strengthening of metal by internal oxidation“. 3,779,714 (Cleveland, Ohio, US). 1973.
- [228] Nadkarni, A.V. und Weber, E.P.: „A new dimension in resistance welding electrode materials“. In: *Welding Journal* 1977.11 (1977), S. 331–338.

- [229] Nitzsche, Karl: *Schichtmeßtechnik*. 1. Aufl. ISBN 9783802315305. Würzburg: Vogel-Fachbuch, 1996.
- [230] Offterdingera, Klaus und Waschkie, Eckhard: „Temperature dependence of the ultrasonic transmission through electrical resistance heated imperfect metal–metal interfaces“. In: *NDT&E International* 37 (Nov. 2004), S. 361–371.
- [231] Okabe, Yoshio und Furudate, Masato: „Control Method of Spot Welding“. 4,634,829. 1987.
- [232] Olympus NDT: *Spotweld Transducers – For Ultrasonic Testing*. 48 Woerd Avenue, Waltham, MA 02453, USA, 2007.
- [233] OMEGA Press LLC.: *Transactions in Measurement and Control – Non-Contact Temperature Measurement*. Techn. Ber. Vol. 1, 2nd Edition. Putman Publishing Company und OMEGA Press LLC., Feb. 2005. URL: <http://www.omega.com>.
- [234] *Optische Messköpfe und Sensoren*. Rodgau, Apr. 2009.
- [235] Optris GmbH: *Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. Technische Dokumentation. Ferdinand-Buisson-Str. 14, 13127 Berlin, Germany: Optris GmbH, Feb. 2014.
- [236] Osten, Wolfgang u. a.: „Interferometrische Messtechnik: Ein altes Prinzip mit modernen Anwendungen“. In: *Optik & Photonik* 3 (Okt. 2008), S. 50–56.
- [237] Overrath, J. u. a.: „Schweißen von warmumgeformten Bauteilen“. In: *Umformtechnisches Kolloquium Hannover – Umformtechnik - Ein Wirtschaftszweig mit Potential*. Bd. 19. 2008, S. 105–113.
- [238] Pangerl, Ch.: „DeltaSpot - die innovative Verbindungstechnik eröffnet neue Möglichkeiten im Karosserierohbau“. In: *DVS-Berichte* 250 (2008). ISBN 978-3-87155-256-4, S. 7–11.
- [239] *Quality evaluation by classification of electrode force patterns in the resistance spot welding process using neural networks*. Bd. 218. 11. ISSN: 0954-4054. 2004, S. 1513–1524.
- [240] Pavlic, Theodore P.: *Practical Integrators and Operational Amplifier Offset – Lab 2: The Field Effect Transistor – ECE 327: Electronic Devices and Circuits Laboratory I*. Techn. Ber. The Ohio State University, 2009.

- [241] Perez Regalado, Waldo J., Maev, Roman Gr. und Chertov, Andrey: „Real-Time Ultrasonic Evaluation of the Aluminum Resistance Spot Welding Process“. In: *NDT in Canada 2012 Conference*. University of Windsor. Juni 2012, presentation with 28 slides.
- [242] Peuker, Claudia und Hauner, Franz: „Method of producing dispersion-hardened copper by mechanical alloying“. C22C 1/10, B22F 9/04 WO 97/08351 (Wittelsbacherplatz 2, 80333 München, Germany). März 1997.
- [243] Pfeifer, Tino: *Fertigungsmesstechnik*. 2. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2001.
- [244] Podržaj, Primož und Simončič, Samo: „Resistance spot welding control based on fuzzy logic“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52.9 (2011), S. 959–967. DOI: 10.1007/s00170-010-2794-0.
- [245] Quanz, Andreas: „Prozeßanalyse beim Widerstandspunktschweißen beidseitig feuerverzinkter Stahlbleche“. ISSN: 0178-9406. Dissertation. TU Berlin, 1995.
- [246] Quinlan, J. R.: „Learning with continuous classes“. In: *Proceedings of the Australian Joint Conference on Artificial Intelligence: World Scientific*. Hrsg. von Adams und Sterling. Singapore, 1992, S. 343–348.
- [247] Rao, Z. H. u. a.: „Mathematical Modeling of Electrode Cooling in Resistance Spot Welding“. In: *Welding Journal* 88.5 (2009), S. 111–119.
- [248] Regio, Teddy und Borja, Lopez: *Inspection of Joints with Ultrasonic EMAT*. Inner-spec Technologies, Inc. Nov. 2010.
- [249] Rensch, Claus: „Fi(e)ber-Thermometer – Prinzipien und Anwendungen der faseroptischen Temperaturmessung“. In: *Laser + Photonik* (Nov. 2004), S. 38–40.
- [250] *Richtlinie 2013/35/EU: Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) (20. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG)*. Juni 2013.
- [251] Rippl, P.: „RoboSpin – eine neue Verfahrenstechnik beim Widerstandspunktschweißen durch Elektrodendrehung mittels Industrieroboter zur Taktzeitverkürzung und Qualitätsverbesserung“. In: *DVS-Berichte* 244 (2007). ISBN 978-3-87155-250-2, S. 380–384.

- [252] Rivas, S., Servent, R. und Belda, J.: „Automated Spot Welding in the Automotive Industry“. In: *16th World Conference on NDT*. Rheintalstr 3, 53498 Bad Breisig, Germany: NDT.net, Sep. 2004.
- [253] Rodewald, Arnold: *Elektromagnetische Verträglichkeit – Grundlagen – Praxis*. 2., verb. und erw. Aufl. ISBN: 978-3-663-07951-4. Vieweg Braunschweig Wiesbaden, 2000.
- [254] Roos, Eberhard und Maile, Karl: *Werkstoffkunde für Ingenieure – Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Bd. 2. ISBN 3-540-22034-8. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [255] Roye, Werner: *Ultraschallprüfung von Schweißpunkten im Automobilbau*. Techn. Ber. Robert-Bosch-Str. 3, 50354 Hürth, Germany: Krautkraemer GmbH & Co. OHG, Nov. 1999.
- [256] *scanCONTROL 2710: Kompakter 2D/3D-Profilsensor für Raupem, Rillen, Kanten & Winkel*. Ortenburg, Okt. 2008.
- [257] Schaller, Christian, Penne, Jochen und Hornegger, Joachim: „Time-of-flight sensor for respiratory motion gating“. In: *Medical Physics* 35 (Juli 2008), S. 3090–3093.
- [258] Schatt, Werner, Wieters, Klaus-Peter und Kieback, Bernd, Hrsg.: *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [259] Schindele, Paul: „Verfahren zum Ermitteln des Verschleißes von Widerstandspunktschweißelektroden“. DE 3436499 A1. 1986.
- [260] Schlichting, Joachim: „Integrale Verfahren der aktiven Infrarotthermografie“. Dissertation. Technischen Universität Berlin, Mai 2012.
- [261] Schreiber, St.: „Ultraschallprüfen beim Widerstandspunktschweißen – Überblick“. In: *20. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen – Treffpunkt Widerstandsschweißen* 20 (Mai 2007), S. 122–127.
- [262] Schreiber, Stefan u. a.: „Practical Resistance Welding“. In: *The 6th International Seminar on Advances in Resistance Welding* (Sep. 2010), S. 195–206.
- [263] Schultz, Ludwig und Freudenberger, Jens: *Physikalische Werkstoffeigenschaften*. Leibniz Institute for Solid State und Material Research Dresden. Juli 2004.
- [264] Schwab, Adolf J. und Kürner, Wolfgang: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 5., aktualisierte u. erg. Aufl. ISBN 978-3-540-42004-0. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

- [265] Silver, David u. a.: „Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search“. In: *Nature* 529 (2016), S. 484–489. DOI: 10.1038/nature16961.
- [266] Sitte, Gernot: „Bestimmung der Elektrodenstandmenge“. In: *ZIS-Report: Schweißtechnik aus Forschung und Praxis* 1.4 (1990). ISSN: 0863-2162, S. 26–28.
- [267] Sitte, Gernot: „Die kritische Punktfolge beim WP-Schweissen“. In: *ZIS-Mitteilungen* 4 (1978). ISSN: 0044-1465, S. 357–359.
- [268] Sitte, Gernot: „Einfluss der inneren Elektrodengeometrie auf die Standzeit beim WP-Schweissen“. In: *ZIS-Mitteilungen* 18.4 (1976). ISSN: 0044-1465, S. 396–399.
- [269] Sitte, Gernot: „Elektrodenstandzeit beim WP-Schweißen“. In: *ZIS-Mitteilungen* 17 (1975), S. 950–956.
- [270] Sopp, H.: „Einfluss verschiedener Parameter auf das Standzeitverhalten der Elektroden beim Widerstandspunktschweissen bleibeschichteter Bleche aus Stahl“. In: *Schweissen und Schneiden* 30.1 (1978), S. 2–5.
- [271] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: *Lexikon der Physik*. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, part of the nature publishing group. 1998. URL: <http://spektrum.de/lexikon/physik>.
- [272] Spitz, M. u. a.: „Einfluss der Beölung auf die Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen von feuerverzinkten Stahlbandoberflächen“. In: *DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen* 22 (2013), S. 41–52.
- [273] Stadelmann, Claudia: „Extrusion von Metallpulvern durch kontinuierliches Pulverstrangpressen“. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Okt. 2009.
- [274] *Standmengenerhöhung beim Widerstandschweissen durch Elektrodenfräsen*. Forschungsvorhaben AiF-Nr. 13.134 N / DVS-Nr. 4.031. Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre der Universität Stuttgart und Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt München, 2004.
- [275] Steinwart, Ingo und Christmann, Andreas: *Support Vector Machines*. Hrsg. von Jordan, Michael, Schölkopf, Bernhard und Schölkopf, B. Springer Science+Business Media, 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-77242-4.
- [276] Stumm, Wolfgang u. a.: „Ultraschall-Sensoranordnung“. DE 199 37 479 A 1 (Stuttgart und Wuppertal, Germany). 2001.
- [277] Tessonics Inc.: *RIWA – Real-Time In-Line Spot Weldanalyzer*. Englisch. Mai 2014. URL: <http://www.tessonics.com>.

- [278] Tessonics Inc.: *RSWA – Resistance Spot Weld Analyzer*. Englisch. Nov. 2011. URL: <http://www.tessonics.com>.
- [279] Testo Industrial Services Team: *Messunsicherheitsfibel – Praxisgerechte Bestimmung von Messunsicherheiten nach GUM (bei Kalibrierungen)*. Leitfaden 0980.4233/R/-08.2013. Gewerbestraße 3, 79199 Kirchzarten, Germany: Testo Industrial Services GmbH, Aug. 2013.
- [280] Todtermuschke, Marcel u. a.: *Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. Hrsg. von Matthes, Klaus-Jürgen und Scheider, Werner. 5. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2012.
- [281] Tsukada, Keiji u. a.: „A magnetic flux leakage method using a magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation of spot welds“. In: *Elsevier NDT&E International* 44 (2011), S. 101–105.
- [282] Tumanski, Slawomir: „Induction coil sensors – a review“. In: *Measurement Science and Technology* 18 (2007), R31–R46. DOI: 10.1088/0957-0233/18/3/R01.
- [283] Uran, Miro: „Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen mittels mehrparametrischer Analyse“. Dissertation. Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme: Technischen Universität Berlin, 2004.
- [284] „Verfahren zur Herstellung von Formteilen aus dispersionsverfestigten Metalllegierungen“. DE 10 2006 031 366 B3 (91235 Velden, Germany). 2007.
- [285] Vervaeke, Koen: „Magnetic Spot Weld Testing Using Fast High Resolution MagCam - Magnetic Field Mapping“. In: *6th International Seminar on Advances in Resistance Welding*. Hrsg. von Zhang, Wenqi u. a. Hamburg: SWANTEC Software, Engineering ApS und Harms & Wende GmbH & Co KG, Sep. 2010, S. 147–158.
- [286] Vogt, Göran, Rieger, Dirk und Köhler, Carsten: „Inline-Process and Quality Control of Spotwelds of Car Bodies - Ultrasonic Sensors Integrated in Resistance Welding Electrodes“. In: *European NDT Conference* 11.11 (Sep. 2006), Poster 26.
- [287] Vogt, Göran, Rieger, Dirk und Köhler, Carsten: „State of Art in Ultrasonic Spotweld Testing – Offline & Inline – New Materials and Coatings“. In: *European NDT Conference* 11.11 (Sep. 2006), Th.3.4.5 with 7 pages.
- [288] Voigt, Alexander: „Entwicklung eines stoffschlüssigen Fügeverfahrens zum Fügen eines Stahl-Kunststoff-Verbundbleches mit höchstfesten Stahl“. ISBN-13: 978-3-95-908007-1. Dissertation. Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 2015.

- [289] Wagner, Matthias und Seyboldt, D.: „Ultraschallprüfungen von Punktschweißverbindungen – Erfahrungen aus der Praxis (DaimlerChrysler AG)“. In: *20. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen – Treffpunkt Widerstandsschweißen 20* (Mai 2007), S. 144–147.
- [290] Wang, Yong und Witten, Ian H.: „Introducing model trees for continuous classes“. In: *Proceedings of the 9th European Conference on Machine Learning*. Sep. 1997, S. 128–137.
- [291] Weber, G. und Burmeister, J.: „On-line-Prozessüberwachung durch Fuzzy-Klassifikation beim Widerstandspunktschweißen mit Wechselstrom“. In: *17. Sondertagung Widerstandsschweißen*. Bd. 189. ISBN: 3-87155-494-4. DVS-Verlag, 1998, S. 86–91.
- [292] Weißbach, Wolfgang und Dahms, Michael: *Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Bd. 16. ISBN 978-3-8348-0295-8. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [293] Weymueller, C. R. und Pickel, N.: „Widerstandsschweißen sendzimir-verzinkter Tiefziehbleche“. In: *Bänder Bleche und Rohre 6.1* (1965), S. 1–5.
- [294] Wild, H. und Schmid, G.: „Ultraschallprüfungen von Punktschweißverbindungen – Erfahrungen aus der Praxis (Audi AG)“. In: *20. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen – Treffpunkt Widerstandsschweißen 20* (Mai 2007), S. 130–143.
- [295] Wilhelm, Stefan u. a.: *Die konfokale Laser Scanning Mikroskopie: Grundlagen*. Techn. Ber. Entwicklungsabteilung Carl Zeiss Jena, 2000.
- [296] Williams, N.T. und Parker, J.D.: „Review of resistance spot welding of steel sheets. Part2: Factors influencing electrode life“. In: *International Materials Reviews 49.2* (2004). ISSN: 0950-6608, S. 77–108.
- [297] Wittke, Klaus und Füssel, Uwe: *Kombinierte Fügeverbindungen*. Bd. Reprint of the original 1st. ed. 1996. ISBN-13: 978-3642768903. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [298] World Bank u. a.: *Durchschnittlicher Preis für Kupfer weltweit in den Jahren 1960 bis 2015*. online. Mai 2016. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/432911/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-kupfer-weltweit>.
- [299] Wu, D. und Busse, G.: „Lockin-Thermographie in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung“. In: *ZfP-Journal of DGZfP 1997.06* (1997).
- [300] Zhang, Hongyan und Senkara, Jacek: *Resistance welding: fundamentals and applications*. 2. Aufl. CRC Press Inc., 2011.

- [301] Ziegler, Mathias u. a.: „Wärmebehandlung und zerstörungsfreie Prüfung: Oberflächenrisse mit der Laser-Thermografie finden“. In: *HärtereiKongress HeatTreatment-Congress*. F&E Technologiebroker Bremen GmbH. Köln, Okt. 2014.

A. Anhang – Grundlagen

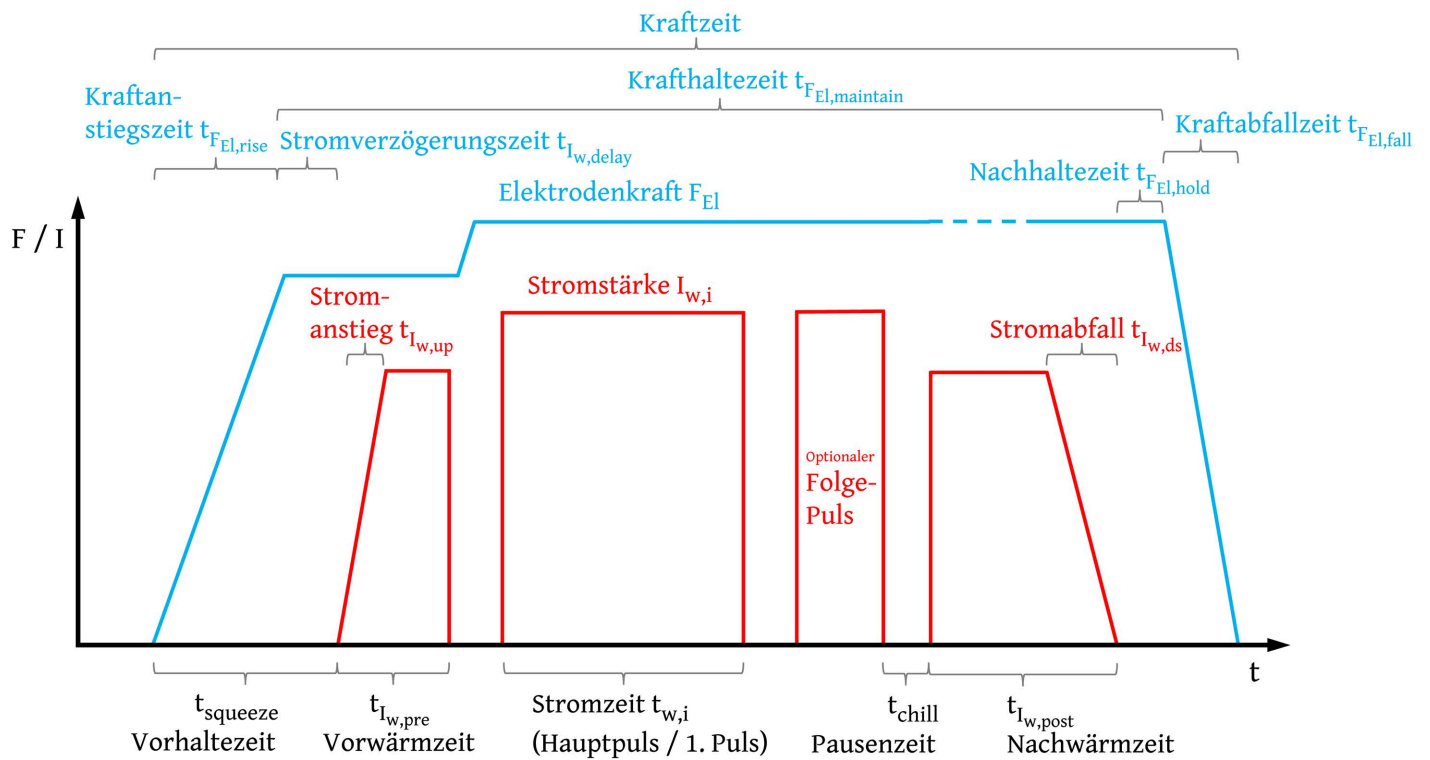


Abbildung A.1.: Schematisches Strom- und Elektrodenkraft-Diagramm für das Widerstandspunktfügen, nach [76]

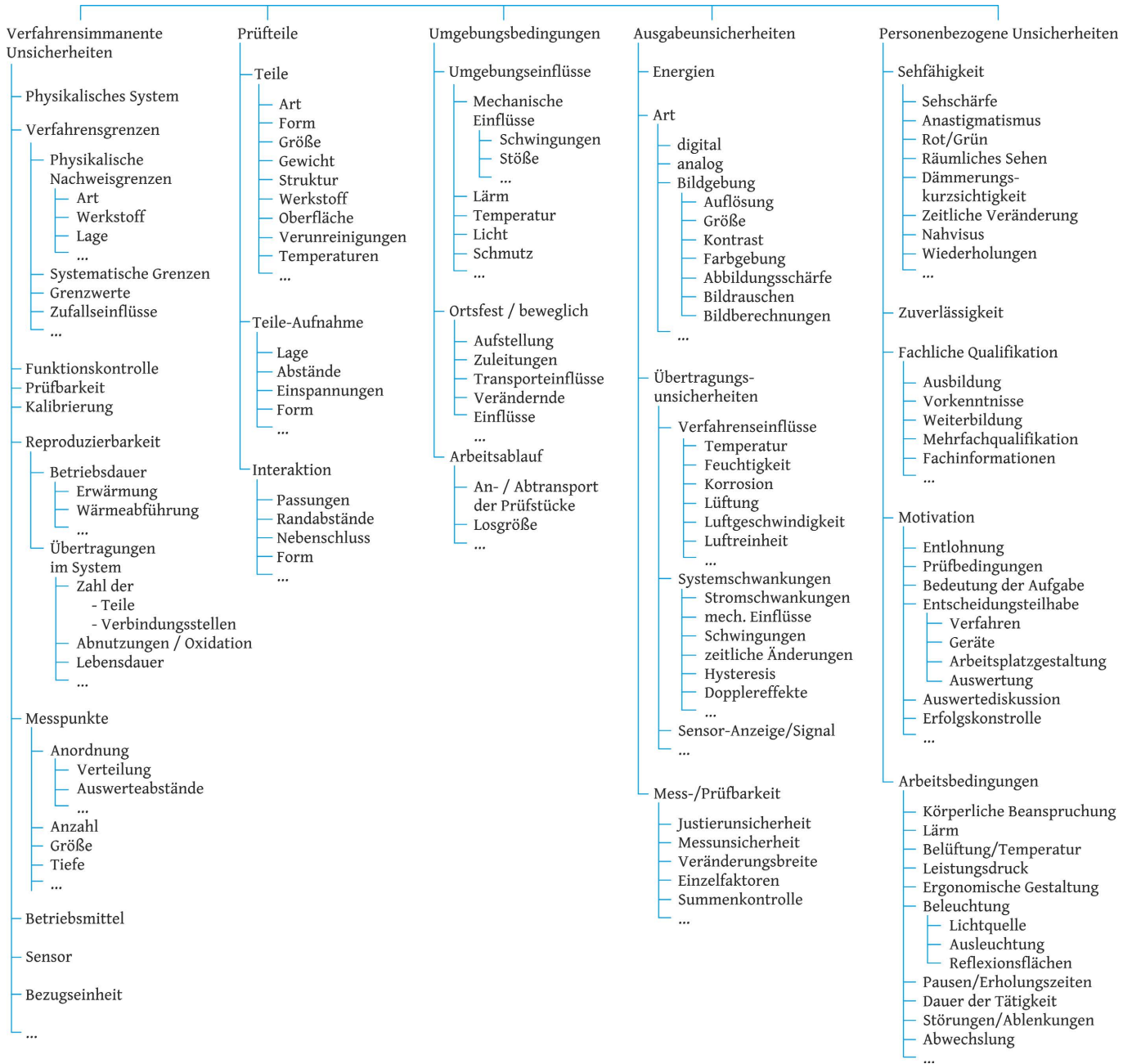


Abbildung A.2.: Einflüsse auf die Aussagesicherheit von Prüfergebnissen, modifiziert auf Basis von [10]

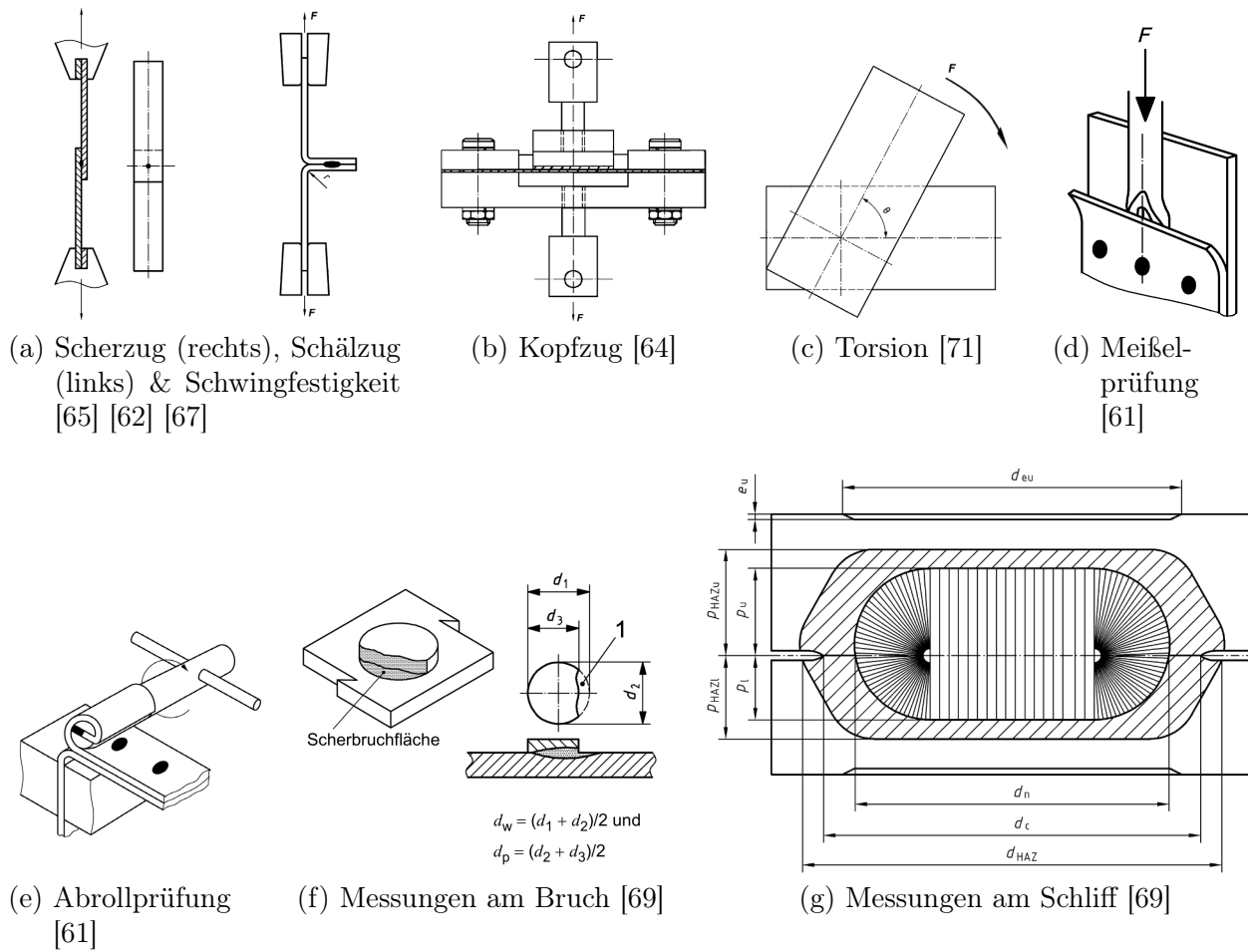


Abbildung A.3.: Schematische Abbildungen der standardisierten zerstörenden Verbindungsprüfungen

Tabelle A.1.: Einflussgrößen der verwendeten Messtechnik auf die Messkette

| Teilsystem | Formelzeichen | Ursache | Messunsicherheit |
|---|-----------------|--------------------------------------|---|
| Goldammer Messkarte G0S-1034-4 | χ_{G0S} | Signalkonditionierung ^{a,b} | $\pm 0,009\% \cdot MB^c$ |
| | χ_{G0Snl} | Nichtlinearität ^{a,b} | $\pm 0,046\% \cdot MB$ |
| | χ_{G0Ssf} | Stufungsfehler ^{a,b} | $\pm 0,046\% \cdot MB$ |
| | χ_{G0Sqf} | Quantisierungsfehler ^{a,b} | $\pm 0,015\% \cdot MB$ |
| | χ_{G0Snpd} | A/D-Nullpunktdrift ^{a,b} | $\pm 7 ppm/\Delta K$ |
| | χ_{G0Smo} | Monotonie ^{a,b} | $\pm 0,038\% \cdot MB$ |
| HKS P100K Spannung | χ_{HKS-U} | Grundgenauigkeit ^{a,d} | $\pm 1,0\% \cdot MB$ |
| HKS P100K Strom inkl. Rogowski | χ_{HKS-I} | Grundgenauigkeit ^{a,d} | $\pm 1,5\% \cdot MB$ |
| Quarz Mess- scheibe Kistler Typ 9031A | χ_{FQ-nl} | Linearität ^{a,b} | $\pm 0,3\% \cdot FSO^e$ |
| | χ_{FQ-hy} | Hysterese ^{a,b} | $+0,1\% \cdot FSO^e$ |
| | χ_{FQ-td} | Temperaturdrift ^{a,b} | $\pm 0,02\% \cdot MW/\Delta K$ |
| Ladungsverstär- ker Kistler ICAM 5073A | χ_{FL-uef} | Übertragungsfehler ^{a,b} | $\pm 0,5\% \cdot MB$ |
| | χ_{FL-wf} | Wiederholbarkeit ^{a,b} | $\pm 0,05\% \cdot MB$ |
| | χ_{FL-rf} | Resetfehler ^{a,b} | $\pm 2 pC$ |
| | χ_{FL-npd} | Nullpunktabweichung ^{a,b} | $\pm 30 mV$ |
| | χ_{FL-ass} | Ausgangsstörsignal ^{a,b} | $30 mV$ |
| Triangulator Allsens AM300-25 | χ_{LT-nl} | Nichtlinearität ^{a,b} | $\pm 20 \mu m$ |
| | χ_{LT-td} | Temperaturdrift ^{a,b} | $\pm 0,01\% \cdot MB/\Delta K$ |
| Kühlwasser- durchfluss | χ_{KW-gg} | Grundgenauigkeit ^{a,d} | $\pm 3,0\% \cdot MB$ |
| Thermoelement Typ K, Klasse 1 | χ_{TE-K} | Grundgenauigkeit ^{a,d} | $\pm 1,5\text{ °C}$ od. $0,004 \cdot \vartheta$ |
| Messumformer OMEGA ISC-TK für Thermoelement K | χ_{ISC} | Grundgenauigkeit ^{a,b} | $\pm 0,3\% \cdot MB$ |
| | χ_{ISC-nl} | Nichtlinearität ^{a,b} | $\pm 0,2\% \cdot MB$ |
| | χ_{ISC-td} | Temperaturdrift ^{a,b} | $\pm 250 ppm/\Delta K$ |

^a Rechteckverteilung.

^b Quelle: jeweiliges Datenblatt.

^c MB = Messbereich.

^d Quelle: Support des jeweiligen Herstellers.

^e Full Scale Output = Spanne des Ausgabesignals.

Tabelle A.2.: Messunsicherheitsberechnung zur Spannungsmessung mit Einflussgrößen gemäß Tabelle A.1

| Einflussgröße | Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$ | Sensitivitätskoeffizient c_i | Divisor | Wert der Einflussgröße |
|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|
| | mV | – | – | mV |
| χ_{G0S} | $0,0090\% \cdot MB = 1,80$ | | | 1,04 |
| χ_{G0Snl} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16$ | | | 5,29 |
| χ_{G0Ssf} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 5,29 |
| χ_{G0Sqf} | $0,0153\% \cdot MB = 3,05$ | | | 1,76 |
| χ_{G0Snpd} | $7ppm/\Delta K = 0,02$ | | | 0,01 |
| χ_{G0Smo} | $0,0382\% \cdot MB = 7,63$ | | | 4,40 |
| χ_{HKS-U} | $1,0000\% \cdot MB = 200,00$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 115,47 |
| Summe (68,3%) | | | | 133,26 |
| Summe (95,4%) | | | | 226,52 |
| Summe ohne Temperaturdrift (95,4%) | | | | 266,50 |

Tabelle A.3.: Messunsicherheitsberechnung zur Strommessung mit Einflussgrößen gemäß Tabelle A.1

| Einflussgröße | Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$ | Sensitivitätskoeffizient c_i | Divisor | Wert der Einflussgröße |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|
| | | | – | mV |
| χ_{G0S} | $0,0090\% \cdot MB = 1,80 mV$ | | | 1,04 |
| χ_{G0Snl} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 |
| χ_{G0Ssf} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 5,29 |
| χ_{G0Sqf} | $0,0153\% \cdot MB = 3,05 mV$ | | | 1,76 |
| χ_{G0Smo} | $0,0382\% \cdot MB = 7,63 mV$ | | | 4,40 |
| χ_{HKS-I} | $1,5000\% \cdot MB = 450,00 A$ | | | $0,3333 mV/A$ |
| Summe (95,4%) | | | | 208,76 |
| Summe in A (95,4%) | | | | 626,28 |

Tabelle A.4.: Messunsicherheitsberechnung zur Kraftmessung mit Einflussgrößen gemäß Tabelle A.1

| Einflussgröße | Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$ | Sensitivitätskoeffizient c_i | Divisor | Wert der Einflussgröße | | |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|------------|----------|
| | | | – | mV | | |
| χ_{G0S} | $0,0090\% \cdot MB = 1,80 mV$ | | | 1,04 | | |
| χ_{G0Snl} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 | | |
| χ_{G0Ssf} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 5,29 | | |
| χ_{G0Sqf} | $0,0153\% \cdot MB = 3,05 mV$ | | | 1,76 | | |
| χ_{G0Smo} | $0,0382\% \cdot MB = 7,63 mV$ | | | 4,40 | | |
| χ_{FQ-nl} | $0,3000\% \cdot MB = 120,00 N$ | | | $430 mV/N$ | $\sqrt{3}$ | 29791,27 |
| χ_{FQ-hy} | $0,1000\% \cdot MB = 40,00 N$ | | | $430 mV/N$ | $\sqrt{3}$ | 9930,42 |
| χ_{FL-uef} | $0,5000\% \cdot MB = 50 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 28,87 | | |
| χ_{FL-wf} | $0,0500\% \cdot MB = 5 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 2,89 | | |
| χ_{FL-rf} | $2,0000 pC$ | $100 mV/pC$ | $\sqrt{3}$ | 115,47 | | |
| χ_{FL-npd} | $30,000 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 17,32 | | |
| χ_{FL-ass} | $30,000 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 17,32 | | |
| Summe (95,4 %) | | | | 79842,68 | | |
| Summe in N (95,4 %) | | | | 185,68 | | |

Tabelle A.5.: Messunsicherheitsberechnung zur Elektrodenwegmessung mit Einflussgrößen gemäß Tabelle A.1

| Einflussgröße | Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$ | Sensitivitätskoeffizient c_i | Divisor | Wert der Einflussgröße | | |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|------------|------|
| | | | – | mV | | |
| χ_{G0S} | $0,0090\% \cdot MB = 1,80 mV$ | | | 1,04 | | |
| χ_{G0Snl} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 | | |
| χ_{G0Ssf} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 5,29 | | |
| χ_{G0Sqf} | $0,0153\% \cdot MB = 3,05 mV$ | | | 1,76 | | |
| χ_{G0Smo} | $0,0382\% \cdot MB = 7,63 mV$ | | | 4,40 | | |
| χ_{LT-nl} | $20 \mu m$ | | | $0,4 mV/\mu m$ | $\sqrt{3}$ | 4,62 |
| Summe (95,4 %) | | | | 44,79 | | |
| Summe in μm (95,4 %) | | | | 111,98 | | |

Tabelle A.6.: Messunsicherheitsberechnung zur Kühlwasserdurchflussmessung mit Einflussgrößen gemäß Tabelle A.1

| Einflussgröße | Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$ | Sensitivitätskoeffizient c_i | Divisor | Wert der Einflussgröße |
|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|
| | | | – | mV |
| χ_{G0S} | $0,0090\% \cdot MB = 1,80 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 1,04 |
| χ_{G0Snl} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 |
| χ_{G0Ssf} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 |
| χ_{G0Sqf} | $0,0153\% \cdot MB = 3,05 mV$ | | | 1,76 |
| χ_{G0Smo} | $0,0382\% \cdot MB = 7,63 mV$ | | | 4,40 |
| χ_{KW-gg} | $3,0000\% \cdot MB = 0,72 l/min$ | $278,55 mV/(l/min)$ | $\sqrt{3}$ | 115,79 |
| Summe (95,4 %) | | | | 267,14 |
| Summe in l/min (95,4 %) | | | | 0,96 |

Tabelle A.7.: Messunsicherheitsberechnung zu den Kühlwassertemperaturmessungen mit Einflussgrößen gemäß Tabelle A.1

| Einflussgröße | Unsicherheitsbeitrag $u_i(y)$ | Sensitivitätskoeffizient c_i | Divisor | Wert der Einflussgröße |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|
| | | | – | mV |
| χ_{G0S} | $0,0090\% \cdot MB = 1,80 mV$ | 1 | $\sqrt{3}$ | 1,04 |
| χ_{G0Snl} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 |
| χ_{G0Ssf} | $0,0458\% \cdot MB = 9,16 mV$ | | | 5,29 |
| χ_{G0Sqf} | $0,0153\% \cdot MB = 3,05 mV$ | | | 1,76 |
| χ_{G0Smo} | $0,0382\% \cdot MB = 7,63 mV$ | | | 4,40 |
| χ_{ISC} | $0,3000\% \cdot MB = 0,45 ^\circ C$ | $66,6667 mV/(^\circ C)$ | $\sqrt{3}$ | 17,32 |
| χ_{ISC-nl} | $0,2000\% \cdot MB = 0,30 ^\circ C$ | $66,6667 mV/(^\circ C)$ | $\sqrt{3}$ | 11,55 |
| χ_{TE-K} | $1,5 ^\circ C$ | $66,6667 mV/(^\circ C)$ | $\sqrt{3}$ | 57,74 |
| Summe (95,4 %) | | | | 208,76 |
| Summe in $^\circ C$ (95,4 %) | | | | 3,13 |

B. Anhang – Bewerten der Verbindungsqualität

Tabelle B.1.: Vergleich der Arbeit und der Maximalwerte bei Torsions- und Scherzugprüfung

| Ken- nung | Strom <i>inkA</i> | Torsionsarbeit W_T in <i>J</i> | Scherzugarbeit W_S in <i>J</i> | W_T/W_S | Drehmoment $M_{T_{max}}$ in <i>Nm</i> | Zugkraft $F_{S_{max}}$ in <i>kN</i> | M_T/F_S |
|--------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------|--|--|-----------|
| TT-1 | 7,3 | 0,31 ± 62% | 2,3 ± 86% | 0,14 | 6,3 ± 5% | 2,1 ± 8% | 3,00 |
| | 7,8 | 0,39 ± 72% | 0,8 ± 30% | 0,51 | 7,8 ± 5% | 1,9 ± 17% | 4,17 |
| | 8,3 | 0,66 ± 45% | 0,5 ± 3% | 1,27 | 10,4 ± 17% | 1,4 ± 2% | 7,26 |
| TT-2 | 7,2 | 2,3 ± 22% | 28,5 ± 24% | 0,08 | 35,9 ± 6% | 16,0 ± 7% | 2,24 |
| | 8,7 | 19,0 ± 30% | 46,2 ± 14% | 0,41 | 59,1 ± 3% | 19,0 ± 7% | 3,11 |
| | 11,2 | 18,5 ± 55% | 93,2 ± 71% | 0,20 | 65,9 ± 12% | 21,0 ± 3% | 3,14 |
| TT-3 | 7,6 | 1,8 ± 19% | 24,0 ± 10% | 0,08 | 32,4 ± 12% | 16,5 ± 4% | 1,96 |
| | 9,0 | 3,6 ± 7% | 35,4 ± 13% | 0,10 | 53,4 ± 5% | 19,5 ± 7% | 2,73 |
| | 10,4 | 5,2 ± 28% | 46,8 ± 5% | 0,11 | 68,8 ± 7% | 22,2 ± 2% | 3,10 |

Tabelle B.2.: Kenndaten der IR-Kamera des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden

| Typ | Sonderanfertigung ausgeführt durch Automation Technology GmbH aus CH-8404 Winterthur | |
|-------------------------|--|---------------------|
| Thermische Auflösung | <i>mK</i> | 2 |
| Lastfrequenzbereich | <i>Hz</i> | 0,6 .. 1000 |
| Bildrate | <i>Hz</i> | > 1000 |
| Detektorempfindlichkeit | μm | 3 .. 5 |
| Detektormaterial | | Indium-Antimon |
| Objektive | <i>mm</i> | 25 / 50 / 100 |
| Auflösung | <i>Pixel</i> | 254 x 320 |
| Farbraum und Tiefe | | Graustufen in 8-Bit |

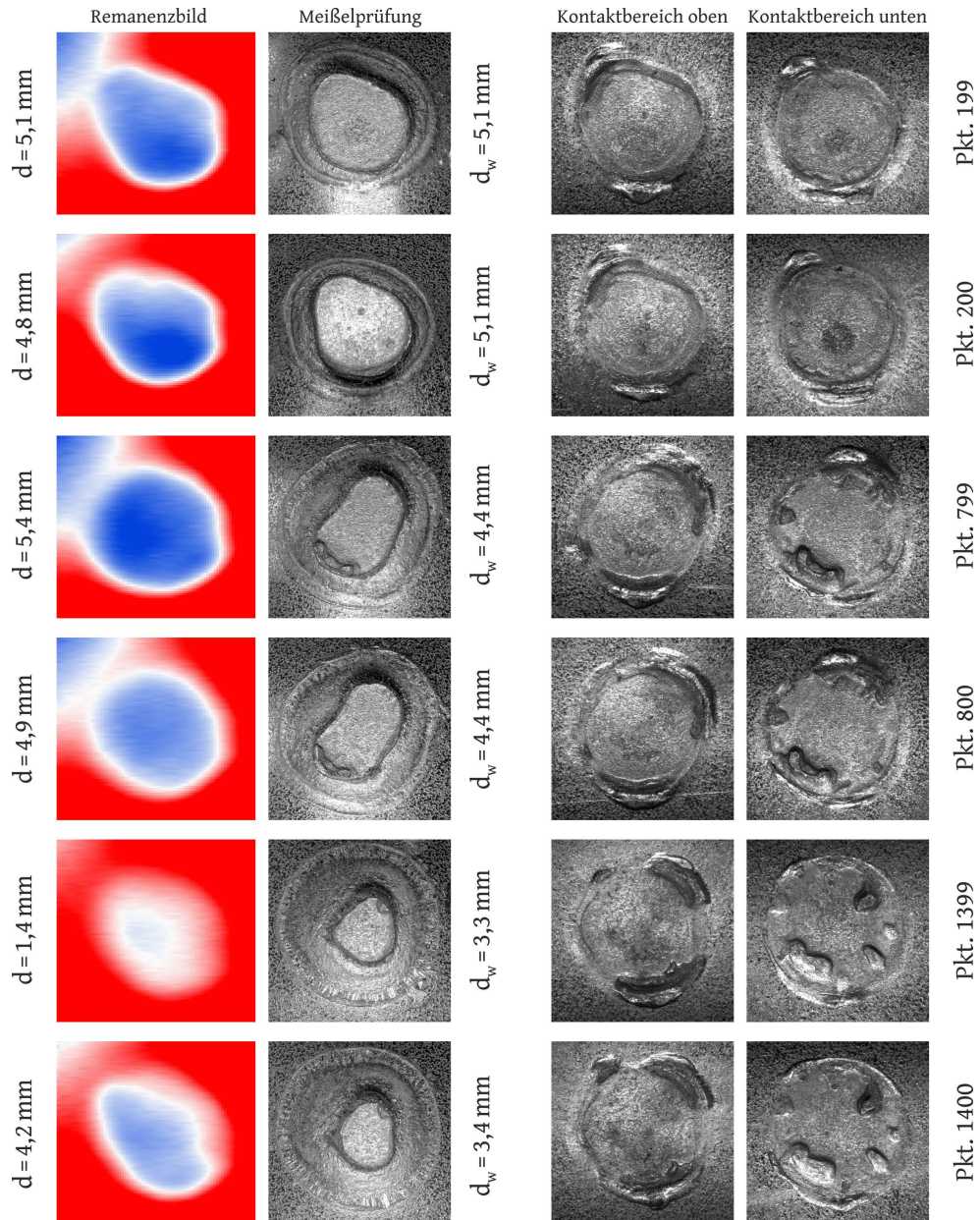


Abbildung B.1.: Magnetfeld-Visualisierung an sechs relevanten Verbindungen der Versuchsreihe Mod-3_stm3 (siehe Kapitel 7)

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\mathbf{X}_{i,j} - \bar{x}) \cdot (\mathbf{Y}_{i,j} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\mathbf{X}_{i,j} - \bar{x})^2 \cdot (\mathbf{Y}_{i,j} - \bar{y})^2}} \quad \text{mit} \quad (B.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{\min}^n \mathbf{X}_{i,j} \quad \text{und}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{\min}^n \mathbf{Y}_{i,j}$$

Tabelle B.3.: Emissionskoeffizienten typischer Elemente und Legierungen beim RSW von Stahl [233]

| Material | Temperatur | Emissionskoeffizient |
|----------------------------|------------|----------------------|
| Baustahl, glatt | 24 °C | 0,12 |
| Eisen, glatt | 38 °C | 0,35 |
| Eisen, matt | 25 °C | 0,94 |
| Zink im verzinkten Zustand | 38 °C | 0,23..0,28 |
| Messing, matt | 20 °C | 0,07 |
| Messing, unoxidiert | 25 °C | 0,04 |
| Kupfer, matt | 38 °C | 0,22 |
| Kupfer, rau | 38 °C | 0,07 |
| Kupfer, grob poliert | 38 °C | 0,74 |

Tabelle B.4.: Kenndaten des Computertomographen v|tome|x l 450 vom Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden

| Typ | Hochauflösendes Mikrofokus-Computertomographiesystem v tome x l 450 der Firma General Electric | |
|--------------------------|--|-------------|
| Beschleunigungsspannung | kV | 10 .. 450 |
| Detailerkennbarkeit | μm | > 1 |
| Pixelgröße des Detektors | μm^2 | 200 x 200 |
| Auflösung des Detektors | <i>Pixel</i> | 2048 x 2048 |
| Anzahl der Graustufen | <i>bit</i> | 14 |
| Max. Probendurchmesser | mm | 800 |
| Max. Probenhöhe | mm | 2500 |
| Max. Probenmasse | kg | 200 |

| | |
|--------------------------------------|--|
| \mathbf{X}, \mathbf{Y} | Bilder |
| $\mathbf{X}_{i,j}, \mathbf{Y}_{i,j}$ | Bildpunkte der Bilder \mathbf{X} und \mathbf{Y} |
| \bar{x}, \bar{y} | Mittelwerte der Bilder \mathbf{X} und \mathbf{Y} |
| $m \cdot n$ | Anzahl der Bildpunkte in die zwei Raumrichtungen |

Tabelle B.5.: Technische Daten des Scannenden Akustischen Mikroskops (kurz SAM) am Institutsteil Materialdiagnostik des Fraunhofer IKTS Dresden

| Typ | Evolution II entwickelt von PVA TePla Analytical Systems GmbH | |
|-----------------------------------|--|-------------|
| Scanfläche (x-y-Ebene) min. | <i>mm</i> | 0,25 x 0,25 |
| Scanfläche (x-y-Ebene) max. | <i>mm</i> | 320 x 300 |
| Verfahrweg (z-Achse) max. | <i>mm</i> | 100 |
| Beschleunigung (x-y-Achsen) max. | <i>m/s</i> | 1,0 |
| Positionsgenauigkeit (x-y-Achsen) | <i>μm</i> | ±0,1 |
| Auflösung (x-y-Achsen) max. | <i>nm</i> | 15 |

Tabelle B.6.: Am SAM eingesetzte Ultraschallwandler der Firma PVA TePla Analytical Systems

| Typ | Transducer 20 MHz | |
|----------------------|-------------------|-------|
| Axiale Auflösung | <i>μm</i> | 75,64 |
| Detektionsgrenze | <i>μm</i> | 25,21 |
| Fokallänge in Wasser | <i>mm</i> | 10,00 |
| Typ | Transducer 50 MHz | |
| Axiale Auflösung | <i>μm</i> | 29,90 |
| Detektionsgrenze | <i>μm</i> | 9,97 |
| Fokallänge in Wasser | <i>mm</i> | 12,00 |

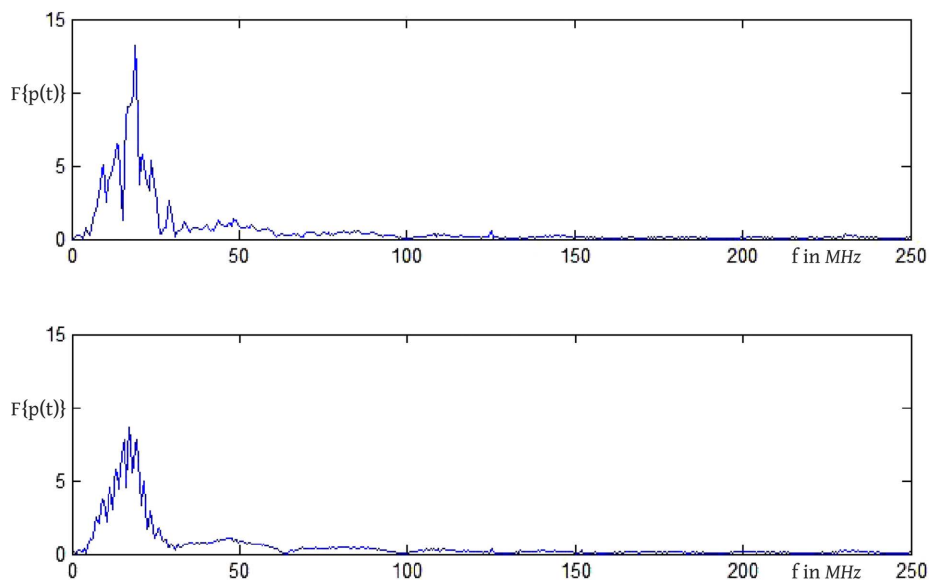


Abbildung B.2.: Spektren zweier A-Bilder unterschiedlicher Punktschweißverbindungsqualitäten

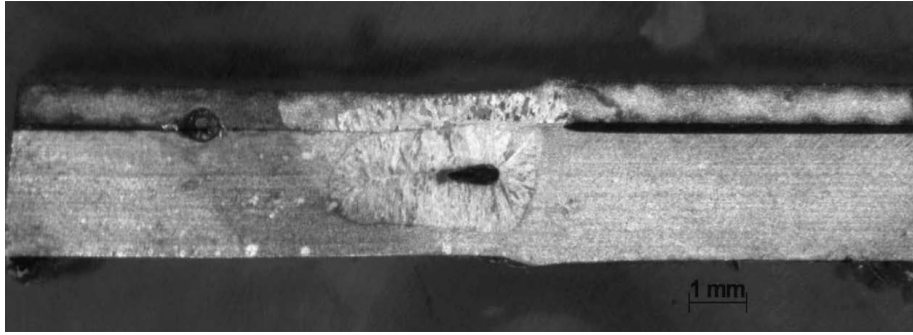


Abbildung B.3.: Metallographischer Schliff aus Versuchsnr. us-sam_iii-min

Tabelle B.7.: Werkstoffe und Prozessparameter zur US-Verbindungsbewertung

| oberes Blech | unteres Blech | I_w | Versuchsreihe |
|------------------------|------------------------|--------------|---------------|
| DX56+Z100MB 0,65 mm | DX56+Z100MB 1,00 mm | 6,2 – 9,0 kA | us-sam_i |
| DX56+Z100MB 0,65 mm | DX56+Z100MB 2,00 mm | 6,4 – 7,8 kA | us-sam_ii |
| DX56+Z100MB 0,65 mm | X5CrNi18-10 2,00 mm | 4,2 – 7,0 kA | us-sam_iii |
| S235JR 2,00 mm | S235JR 2,00 mm | | us-sam_iv |

Tabelle B.8.: Ergebnisse der Meißelprüfung zur US-Verbindungsbewertung aus Tabelle B.7

| Versuchsnr. | eingestellte Verbindungsqualität | d_{w1} in mm | d_{w2} in mm | d_{w3} in mm | d_{w4} in mm | d_{w5} in mm | d_w in mm |
|-------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| i-ks | Klebschweißung | 0,94 | 0,62 | 0,72 | 1,60 | 1,91 | 1,16 |
| i-kl | $3 \cdot \sqrt{t_1}$ | 2,50 | 2,61 | 2,85 | 2,82 | 3,27 | 2,81 |
| i-min | $3,5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 4,31 | 4,37 | 4,46 | 4,59 | 4,61 | 4,47 |
| i-max | $5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 5,51 | 5,65 | 5,45 | 5,44 | 5,54 | 5,52 |
| ii-ks | Klebschweißung | 1,38 | 1,67 | 1,97 | 1,59 | 1,95 | 1,71 |
| ii-kl | $3 \cdot \sqrt{t_1}$ | 2,94 | 3,24 | 3,12 | 2,84 | 2,67 | 2,96 |
| ii-min | $3,5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 4,89 | 4,57 | 4,39 | 4,47 | 4,78 | 4,62 |
| ii-max | $5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 5,24 | 5,33 | 5,46 | 5,10 | 5,05 | 5,24 |
| iii-ks | Klebschweißung | 0,00 | 1,59 | 0,00 | 1,34 | 0,00 | 1,47 |
| iii-kl | $3 \cdot \sqrt{t_1}$ | 1,93 | 1,77 | 1,99 | 1,86 | 1,94 | 1,90 |
| iii-min | $3,5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 2,88 | 2,86 | 2,86 | 2,96 | 2,61 | 2,26 |
| iii-max | $5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 4,22 | 4,59 | 4,42 | 4,65 | 4,77 | 4,53 |
| iv-kl | $3 \cdot \sqrt{t_1}$ | 3,92 | 3,98 | 3,89 | 3,57 | 3,35 | 2,95 |
| iv-min | $3,5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 4,40 | 4,45 | 4,62 | 4,48 | 4,47 | 4,48 |
| iv-max | $5 \cdot \sqrt{t_1}$ | 5,37 | 5,40 | 5,31 | 5,44 | 0,00 | 5,38 |

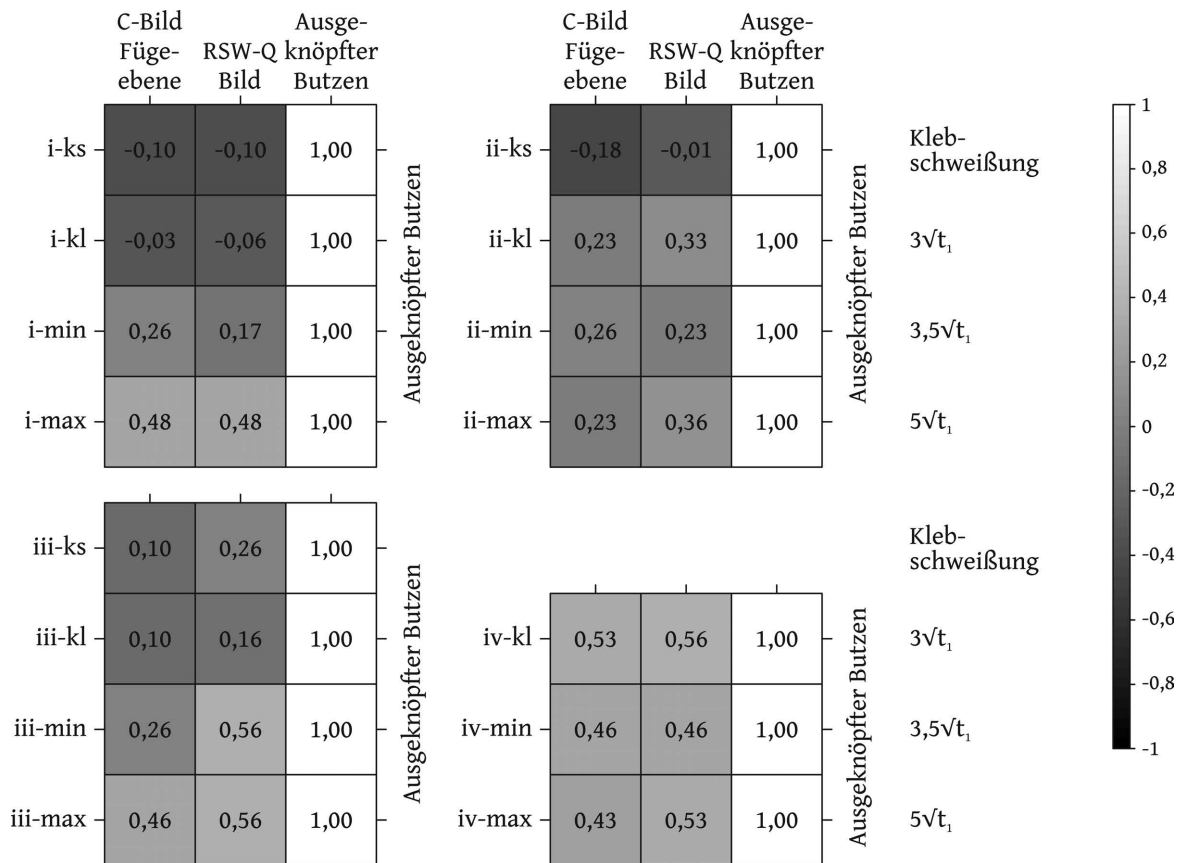


Abbildung B.4.: Kreuzkorrelationsmatrix für C-Bild in der Fügeebene, RSW-Q-Bild und ausgeknöpftes Bild für alle Versuchsreihen us-sam_...

Tabelle B.9.: Technische Daten des Ultraschallsenders Y40S-3B für Inline-Prüfung mit Transversalwellen [24]

| Größe | Messwerte |
|---------------------|--|
| Kapazität | $2300 \pm 400 \text{ pF}$, gemessen mit RLC-Messbrücke bei 1 kHz Messfrequenz |
| Innenwiderstand | $3,5 \pm 0,3 \text{ M}\Omega$, gemessen mit RLC-Messbrücke bei 1 kHz Messfrequenz |
| Sendespannung | 1000 V |
| max. Sendespannung | 1500 V |
| max. Einschaltdauer | 20% |


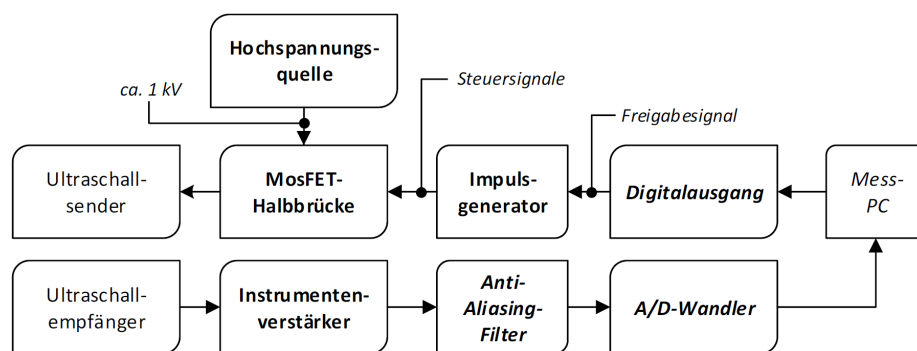


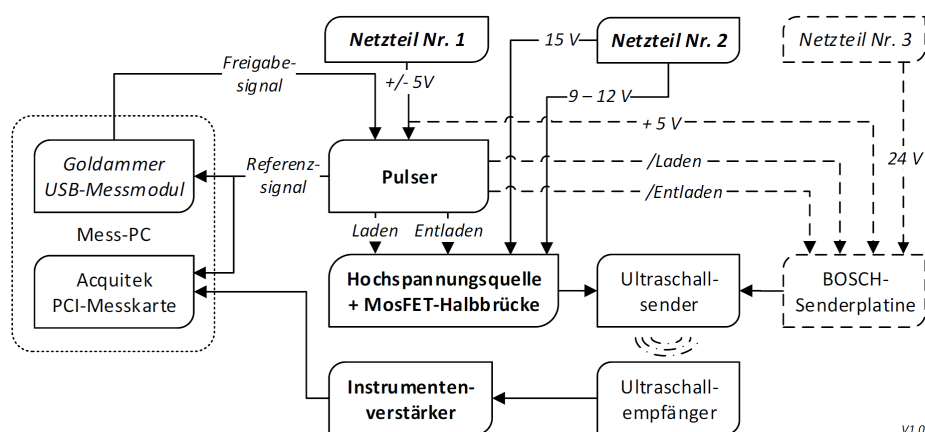
Tabelle B.10.: Technische Daten des Ultraschallempfängers Y30E-5C für Inline-Prüfung mit Transversalwellen [24]

| Größe | Messwerte |
|-----------------|---|
| Kapazität | $400 \pm 50 \text{ pF}$, gemessen mit RLC-Messbrücke bei 1 kHz Messfrequenz |
| Innenwiderstand | $11 \pm 1 \text{ M}\Omega$, gemessen mit RLC-Messbrücke bei 1 kHz Messfrequenz |



VI.1

Abbildung B.5.: Überblick zur Eigenentwicklung von Sender-, Empfänger- und Anschlussplatine (schematische Darstellung)



VI.0

Abbildung B.6.: Gesamtansicht des Messaufbaus mit Vergleichsmöglichkeit zur Bosch-Senderplatine (schematische Darstellung)

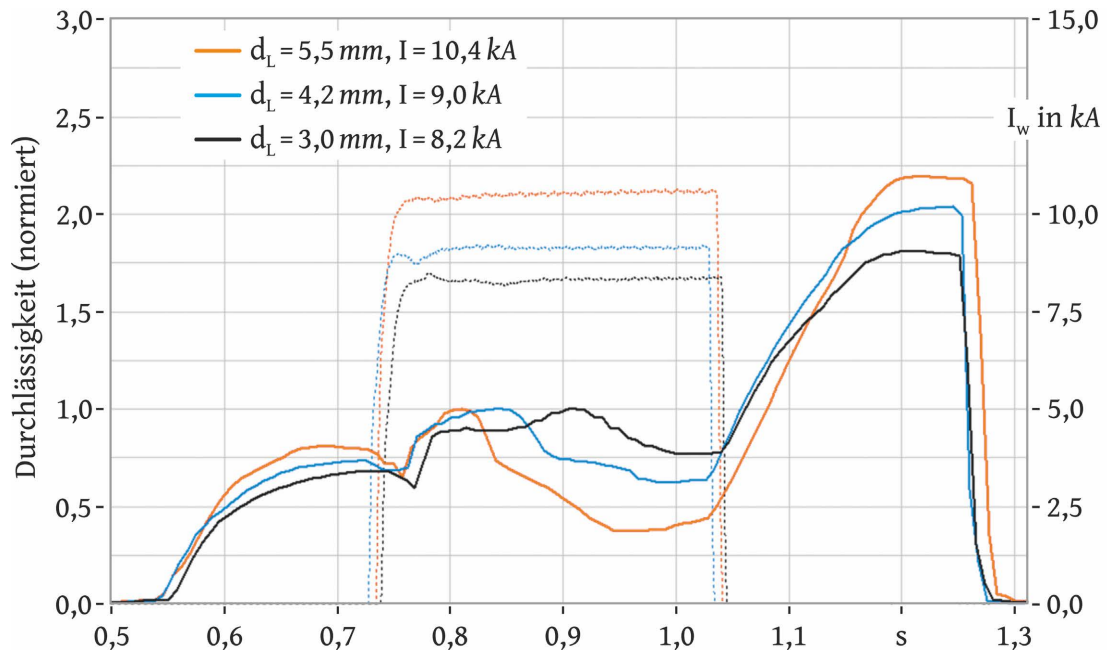


Abbildung B.7.: Einfluss von Stromstärke auf die Ultraschalltransmission, 2x 1,0 mm DX53D+Z100MB und ISO 5821-F1-16-20-50-5,5

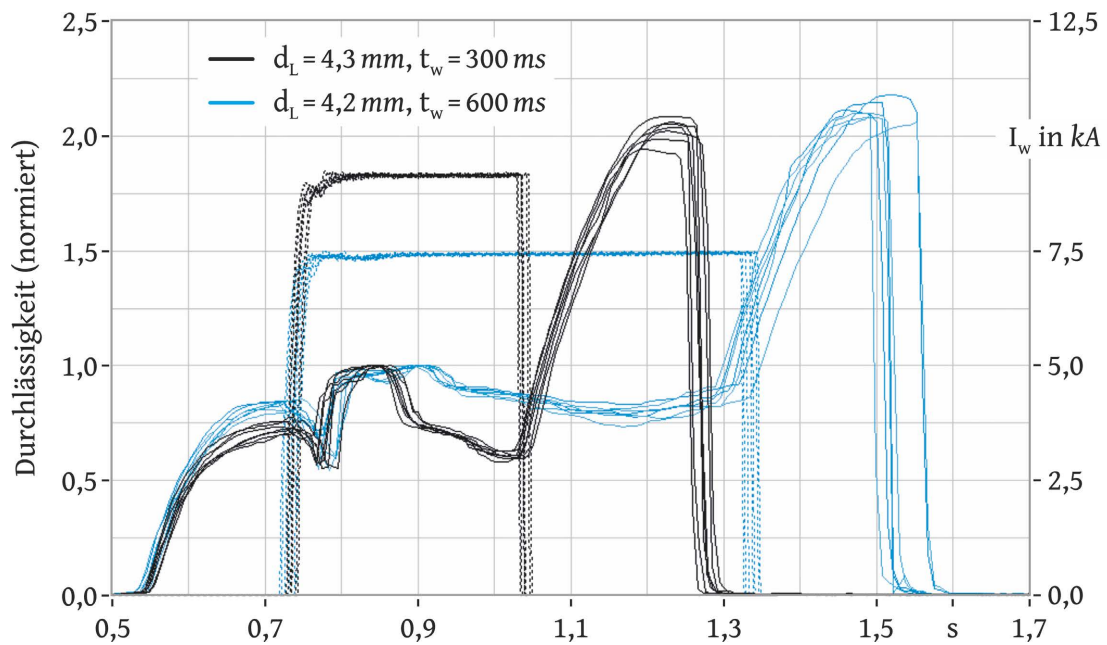


Abbildung B.8.: Einfluss von Stromzeit auf die Ultraschalltransmission, 2x 1,0 mm DX53D+Z100MB und ISO 5821-F1-16-20-50-5,5

C. Anhang – Versuchsaufbau, -planung und -durchführung

Tabelle C.1.: Kenndaten der Mittelfrequenzschweißsteuerung
der Harms & Wende GmbH & Co. KG

| | | |
|------------------------|---|----------------------------|
| Typ | GENIUS HWI 416L-01 Benennung HWG 2708 SK IQR-05 VW Inventarnummer 9118430 | |
| Regelgeschwindigkeit | <i>ms</i> | 1,0 |
| Max. Nennleistung | <i>kVA</i> | 73 bei 50 % Einschaltdauer |
| Max. Kurzschlussstrom | <i>kA</i> | 18,2 |
| Sekundärspannung | <i>V</i> | 8,0 |
| Anschlussleistung | <i>kW</i> | 87 |
| Primärspannung | <i>V</i> | 400 |
| Leihgerät Auftrags-Nr. | 218503 | |
| Lieferdatum | 09.06.2006 | |

Tabelle C.2.: Kenndaten der Widerstandspunktschweißzange
der Düring Schweißtechnik GmbH

| | | |
|----------------------|-----------------|-----|
| Typ | EURO C-50 Servo | |
| Max. Elektrodenkraft | <i>kN</i> | 3,5 |
| Zangenausladung | <i>mm</i> | 195 |
| Fensterhöhe C-Bügel | <i>mm</i> | 255 |
| Gewicht | <i>kg</i> | 106 |
| Maschinennummer | RC 11 03 2534 | |
| Zeichnungsnummer | 11-59D 325 481 | |

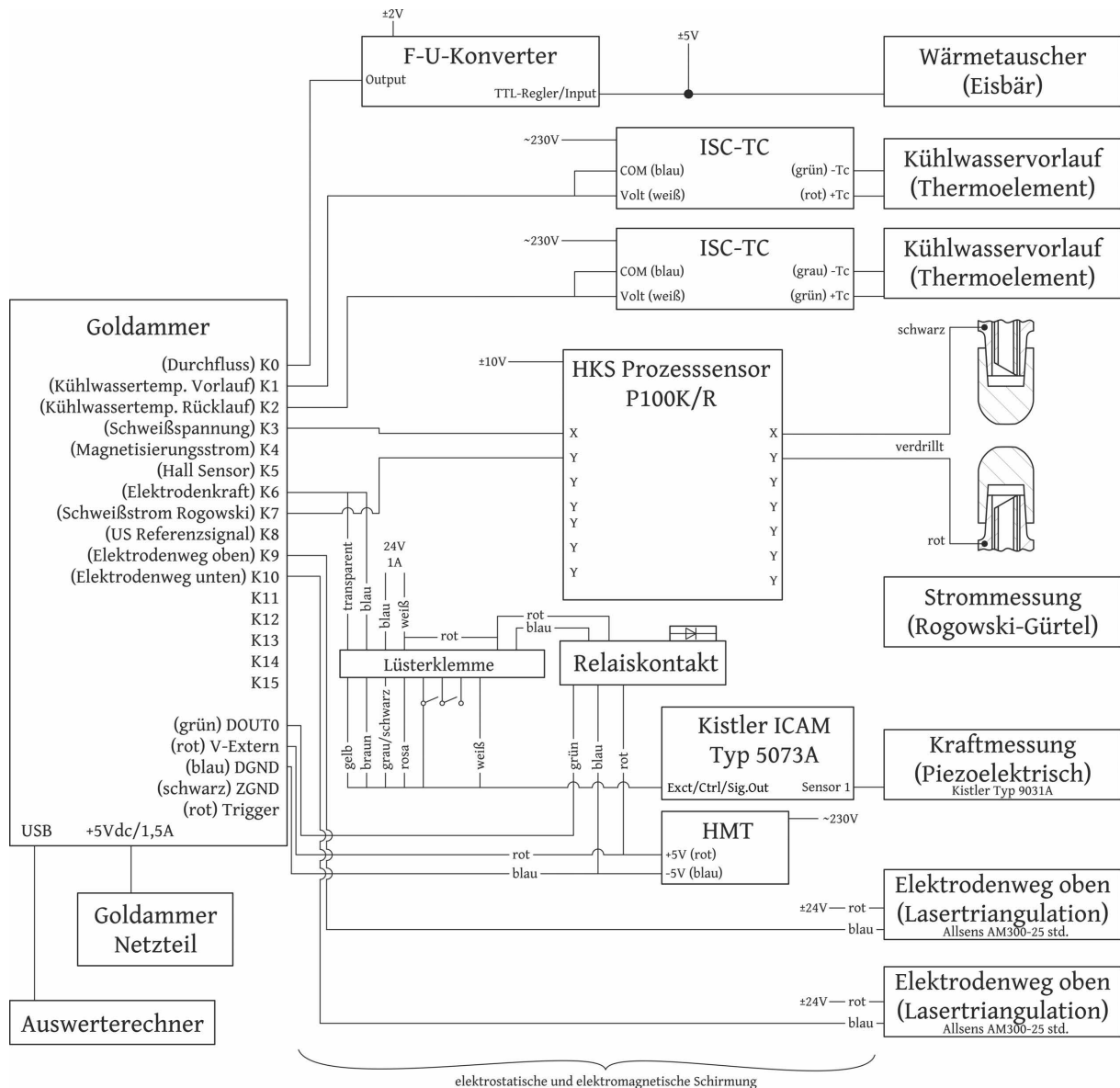


Abbildung C.1.: Schaltplan mit Messtechnik für Standmengen- und Stufenversuche

Tabelle C.3.: Elementanalyse an Discup C3/30 und C3/60 bei 20 keV und 100 Rasterläufen

| Elektrodenwerkstoff/ Element | Discup C3/30 neu | | | Discup C3/60 neu | | |
|---------------------------------|------------------|--------|------------------------|------------------|--------|------------------------|
| | Linie | c in % | c _{100%} in % | Linie | c in % | c _{100%} in % |
| O | K-Serie | 3,29 | 3,35 ± 0,59 | K-Serie | 3,46 | 3,57 ± 0,61 |
| Cu | K-a1/2 | 93,78 | 95,22 ± 10,23 | K-a1/2 | 91,69 | 94,64 ± 9,10 |
| Al | K-Serie | 1,41 | 1,43 ± 0,25 | K-Serie | 1,74 | 1,79 ± 0,23 |

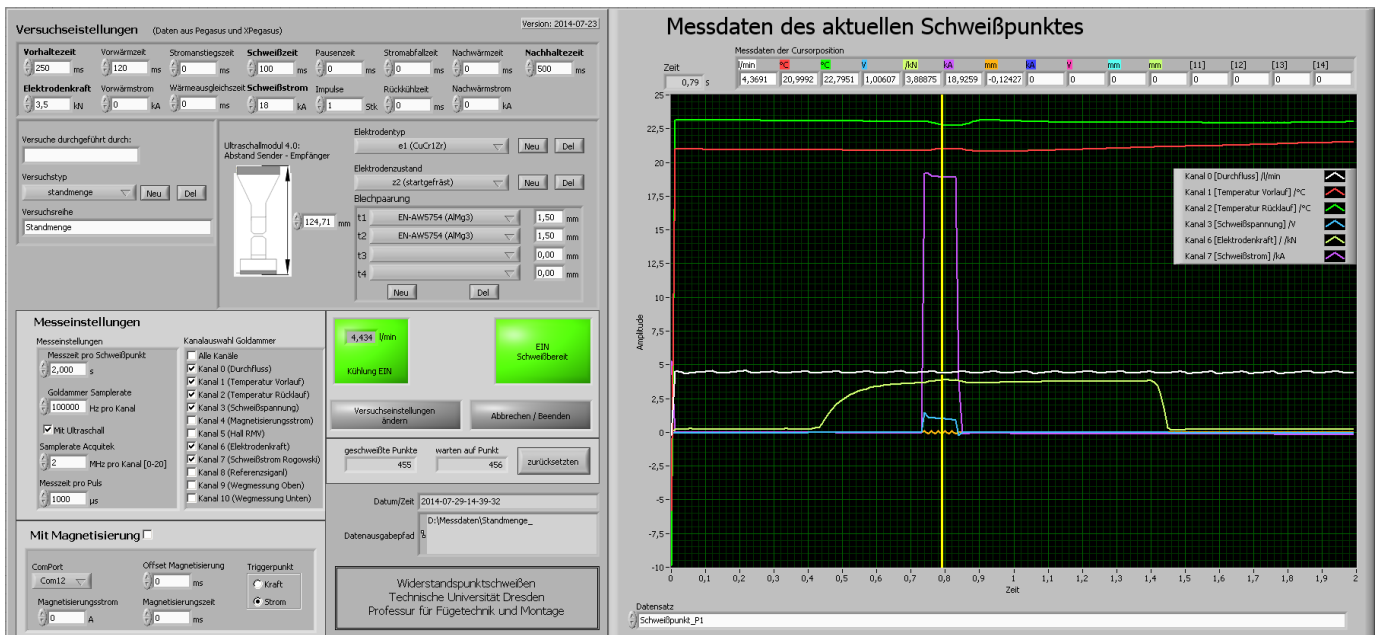
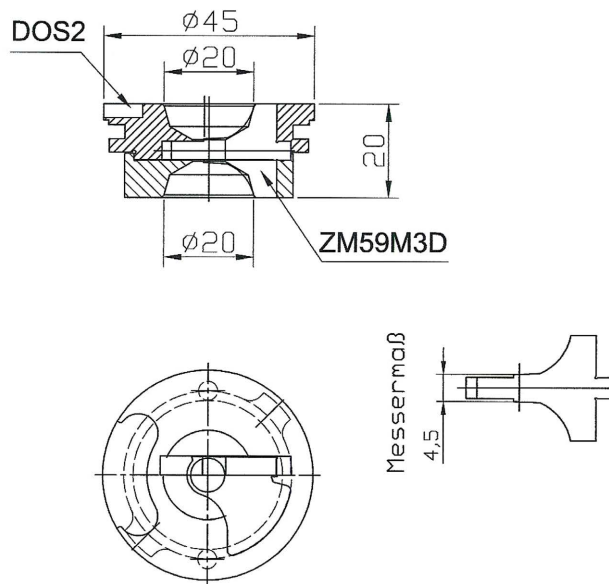


Abbildung C.2.: Nutzeroberfläche des entwickelten Messprogramms zur Datenerfassung inkl. Ultraschall- und Magnetfeldprüfung, Stand Juli 2014



| Bezeichnung: | Beschreibung: | AEG Art. Nr.: |
|--------------|---------------|---------------|
| Fräskopf | ZMK6FFKT3SD2 | 59222320 |

Abbildung C.3.: Werkzeuge zur Elektrodenbearbeitung: AEG Fräskopf ZMK6FFKT3SD2 und AEG Zapfenmesser ZM59M3D, Zeichnung der AEG Schweißtechnik GmbH

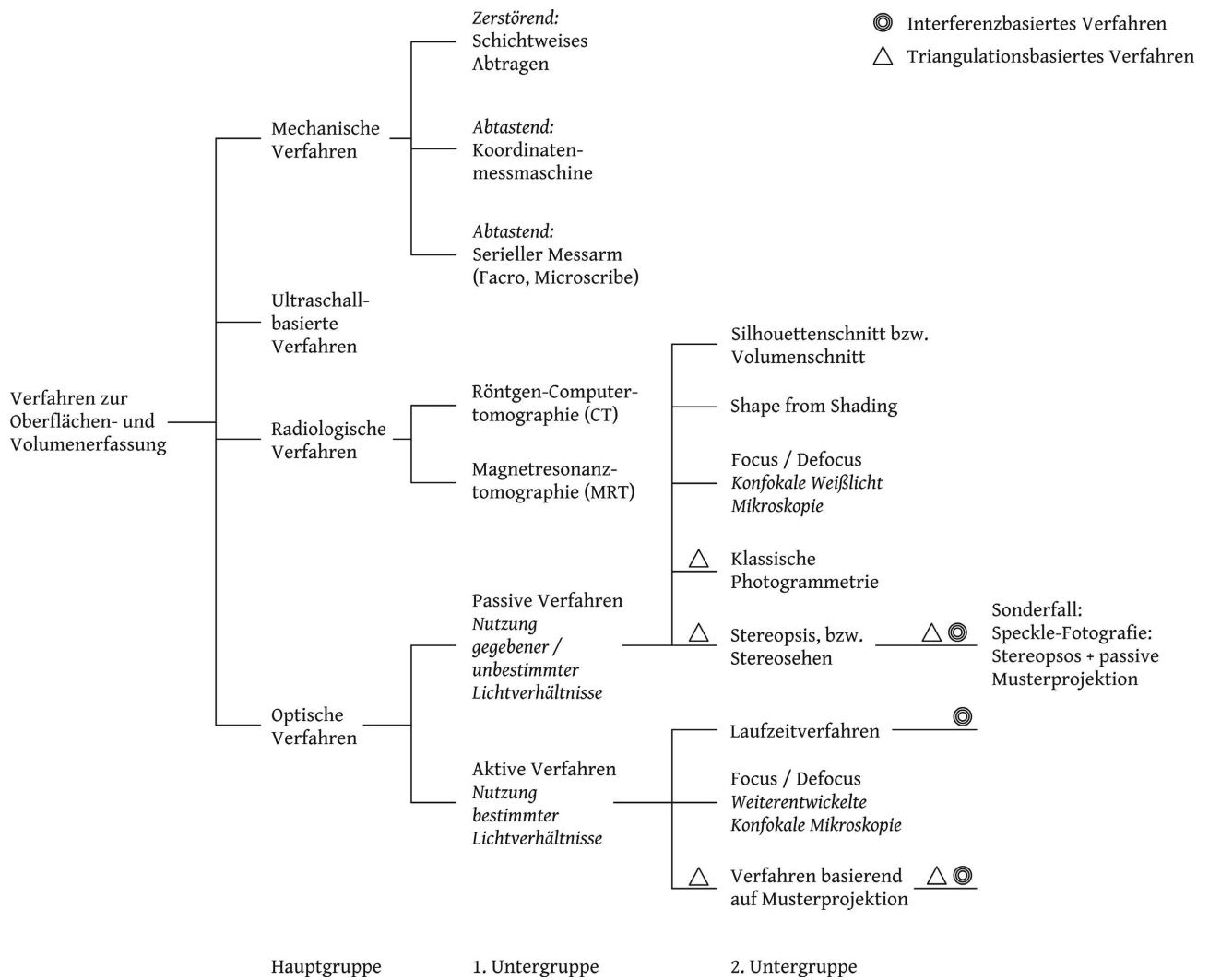


Abbildung C.4.: Klassifizierung von Verfahren zur Geometrie und Oberflächenvermessung, angelehnt an [132]

D. Anhang – Verschleiß und Standmenge von Standard-CuCr1Zr-Elektroden

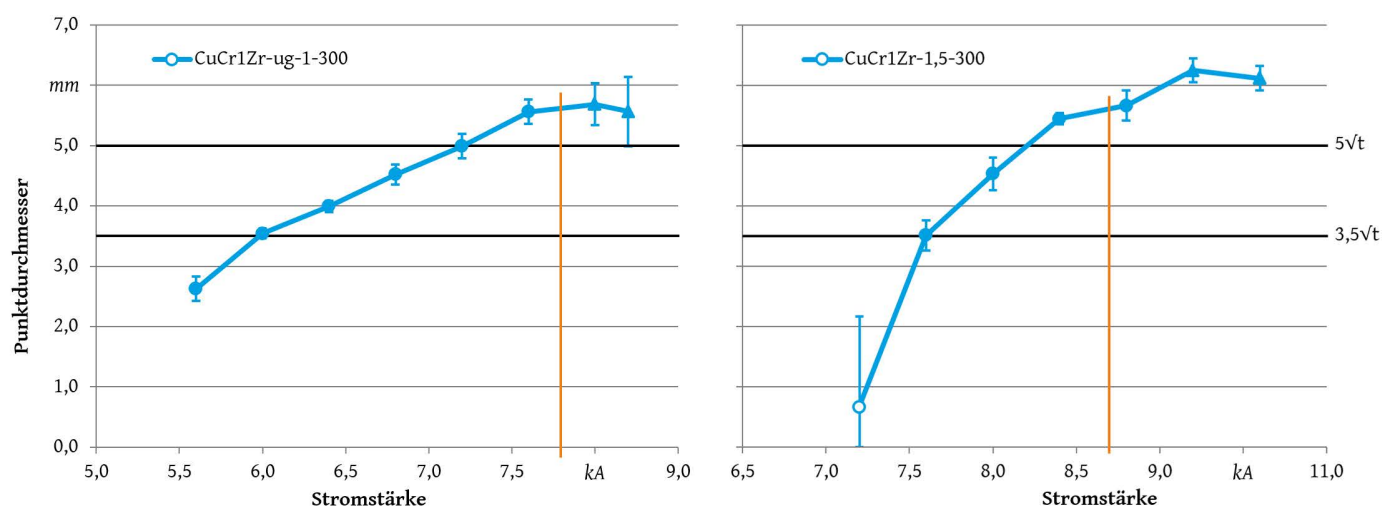


Abbildung D.1.: Wachstumskurven für ungefräste CuCr1Zr-Elektroden an 1,0 mm DX53D und für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an 1,5 mm DX54D, je bei 300 ms Stromzeit

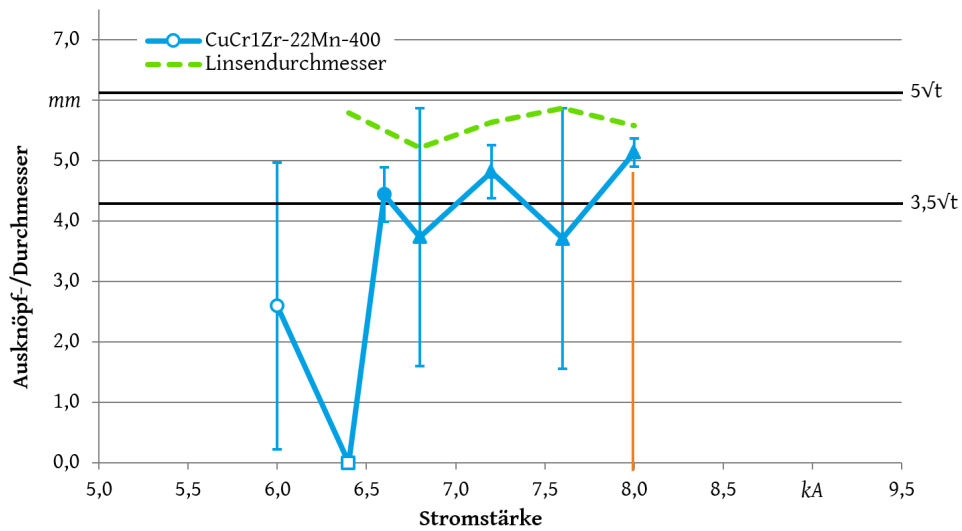


Abbildung D.2.: Wachstumskurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an 1,5 mm 22MnB5+AS bei 400 ms Stromzeit

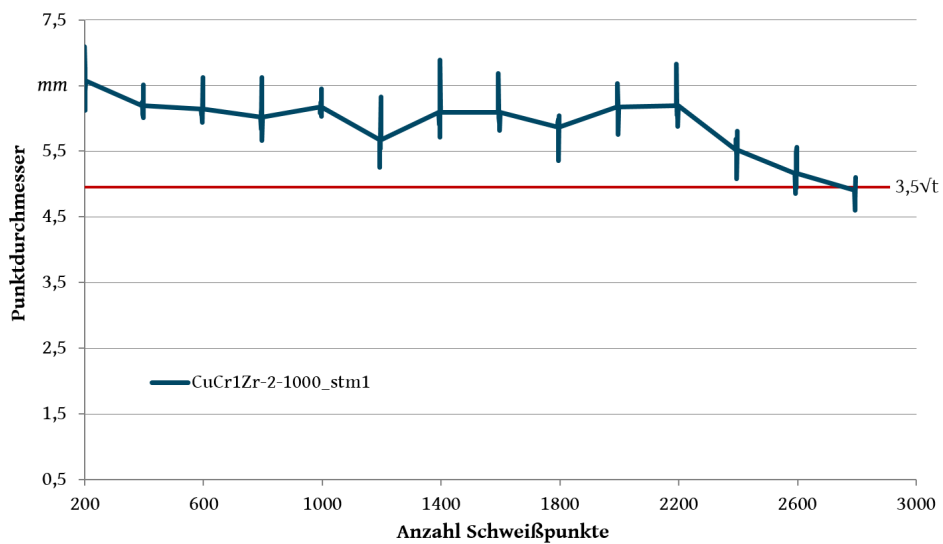


Abbildung D.3.: Standmengenkurven für startgefräste CuCr1Zr-Elektroden an 2,0 mm HX300LAD bei 1000 ms Stromzeit

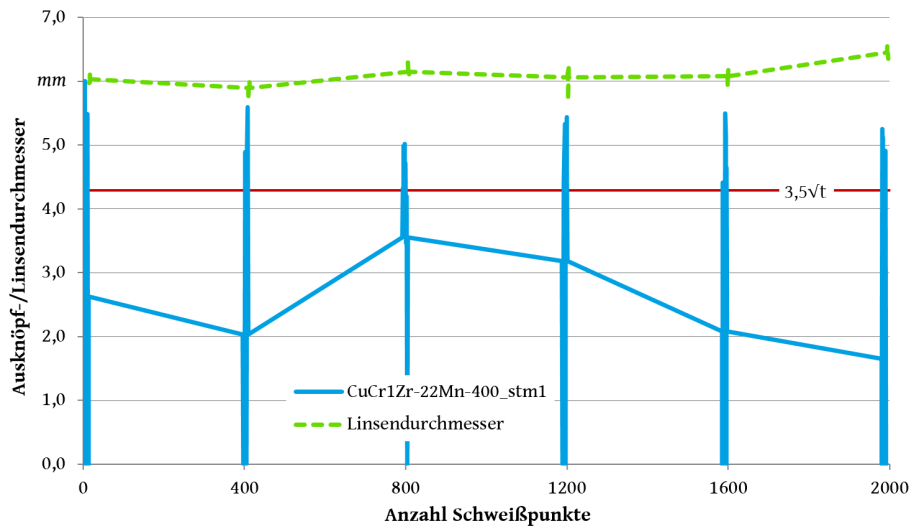


Abbildung D.4.: Standmengenkurven für startgefäzte CuCr1Zr-Elektroden an 1,5 mm 22MnB5+AS bei 400 ms Stromzeit

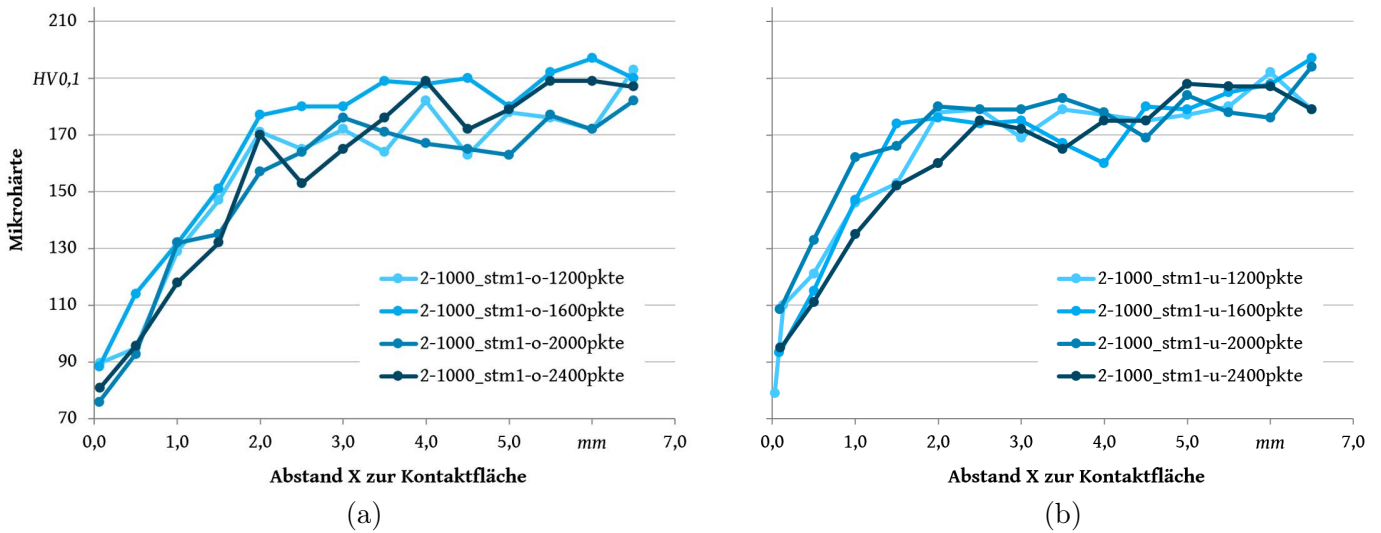


Abbildung D.5.: Härteverläufe in den Elektrodenkappen der Versuchskennung CuCr1Zr-2-1000_stm1, Teil 1200 bis 2400 Punktschweißverbindungen

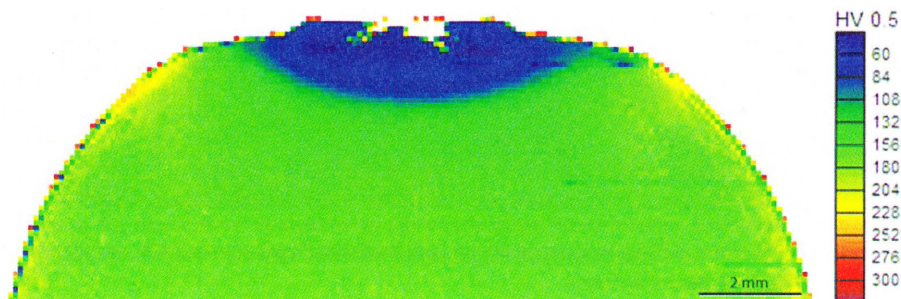


Abbildung D.6.: Mikrohärteverteilung über den Querschnitt bzw. Flächenhärte eines Versuches gleichartig zur Versuchskennung CuCr1Zr-22Mn-800, aus [176]

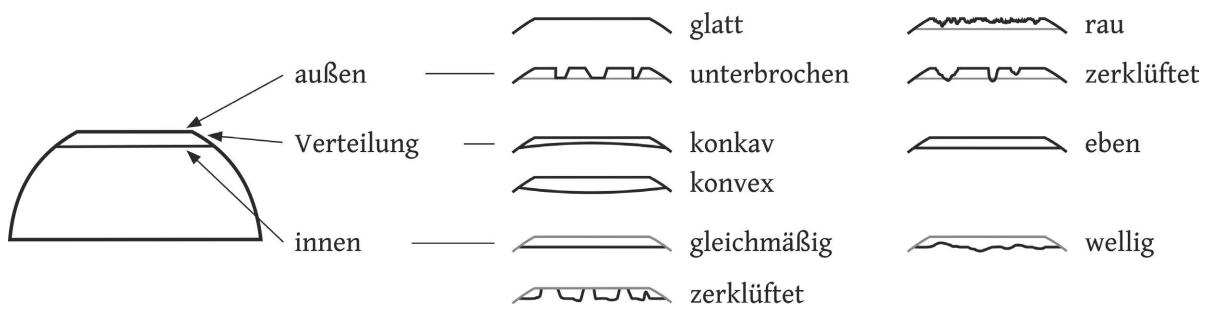


Abbildung D.7.: Systematik bei der Bewertung der äußeren und inneren Legierungsschichtverläufe über dem Querschnitt sowie der Legierungsverteilung dazwischen

E. Anhang – Verschleißverringierung durch modifizierte CuCr1Zr-Elektroden

Tabelle E.1.: Ergebnisse der Wachstumskurven und Stromstärken für Standmengenversuche (Ergänzung zur Versuchsmatrix)

| Versuchskennung | Stromstärke I_w für | | | Schweißstrombereich | $d_w = max$ |
|-----------------|-----------------------|---------------------|----------------|---------------------|-------------|
| | $d_w = 3,5\sqrt{t}$ | $d_w = 5,2\sqrt{t}$ | Spritzergrenze | | |
| | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>kA</i> | <i>mm</i> |
| Mod-1_wk2 | 9,7 | 11,0 | 11,8 | 2,1 | 5,4 |
| Mod-5_wk2 | 9,6 | 10,8 | 11,0 | 1,4 | 5,3 |
| Mod-20_wk2 | 9,8 | 11,2 | 11,6 | 1,8 | 5,6 |
| Mod-6_wk2 | 9,9 | 11,2 | 11,6 | 1,7 | 5,5 |
| Mod-3_wk2 | 10,6 | 11,7 | 12,0 | 1,4 | 5,6 |
| Mod-8_wk2 | 9,4 | N/A | 10,6 | 1,2 | 5,1 |

F. Anhang – Verschleißverringierung durch dispersionsgehärtete Cu-Elektroden

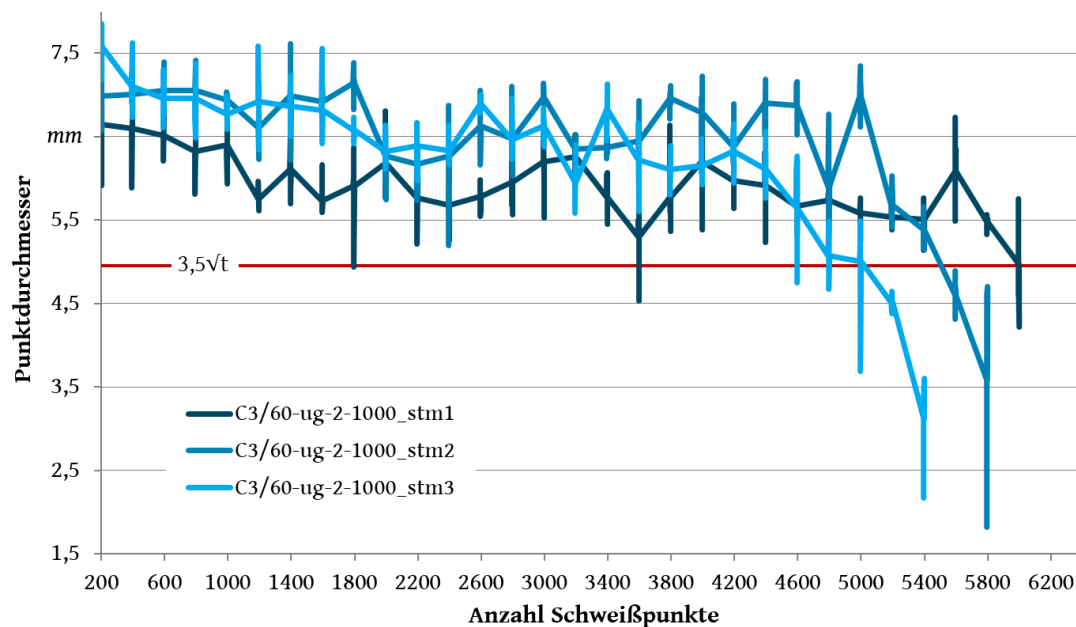


Abbildung F.1.: Standmengenkurven für C3/60 in ungefräster Gestalt an 2,0 mm HX300LAD+Z bei 1000 ms Stromzeit

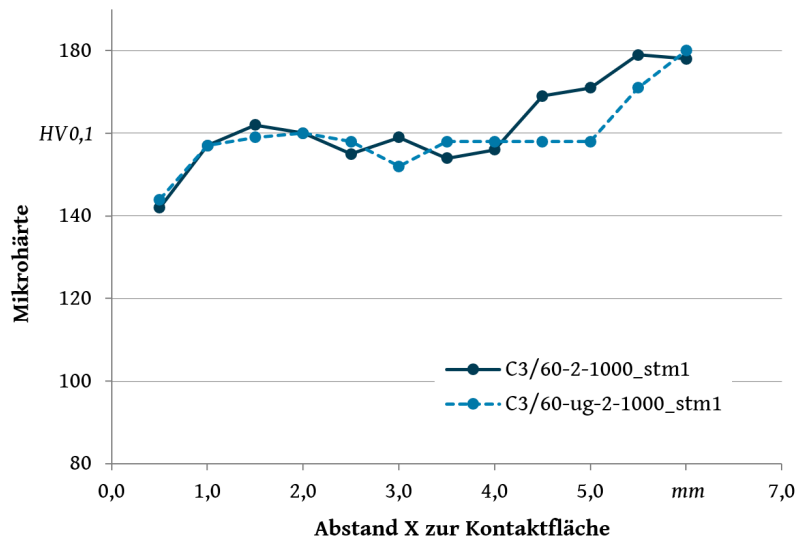
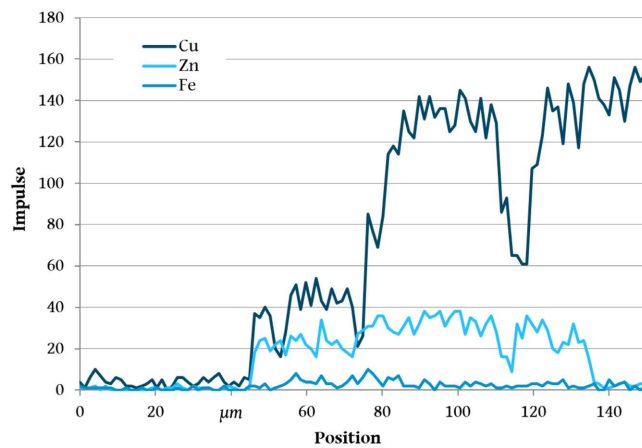
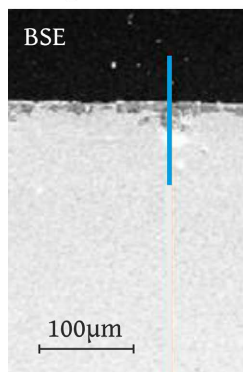


Abbildung F.2.: Härteverläufe zur Versuchskennung C3/..-2-1000; Teil 2: C3/60

Discup C3/60-2-1000



Discup C3/60-2-1000

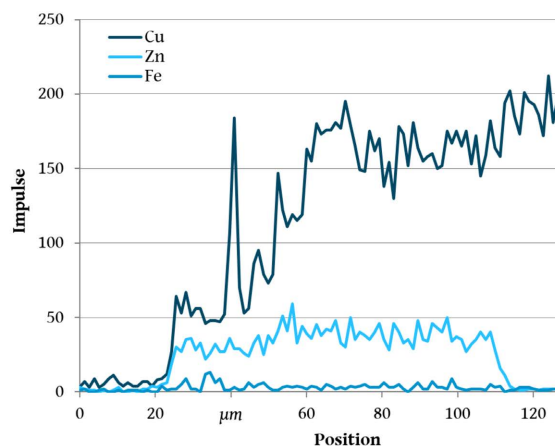
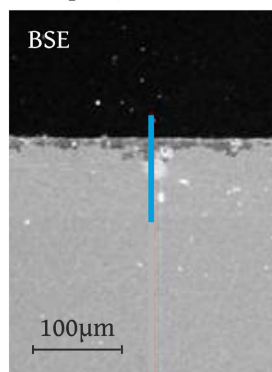


Abbildung F.3.: Legierungsschichtzusammensetzung an dispersionsgehärteten Elektroden beim Verschweißen feuerverzinkter Stahlbleche, weitere Beispiele an C3/60-2-1000

G. Anhang – Data-Mining

$$F_{El}(i) > F_{El,min} + 0,2 \cdot (F_{El,max} - F_{El,min}) \quad (G.1)$$

$$F_{El}(i) > F_{El,min} + 0,9 \cdot (F_{El,max} - F_{El,min}) \quad (G.2)$$

$$\frac{\Delta I_w}{\Delta t} = \frac{I_w(t + \Delta t) - I_w(t)}{\Delta t} \quad (G.3)$$

$$\hat{R}(k) = \frac{1}{(n - k)\sigma^2} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu) \quad (G.4)$$

Listing G.1: Ausgabe des Modells M5P mit ersten 249 Merkmalen, ermittelt via Spearmans

Rangkorrelationskoeffizienten, Teil: Modellbaum

```

1  entfernung_seg4_auto_corr_min_index <= 498.5 :
2  |  kraftmessung_seg3_height <= 0.242 : LM1
3  |  kraftmessung_seg3_height > 0.242 :
4  |  |  n <= 1160.5 : LM2
5  |  |  n > 1160.5 :
6  |  |  |  kraftmessung_seg2_auto_corr_min_index <= 2380.5 : LM3
7  |  |  |  kraftmessung_seg2_auto_corr_min_index > 2380.5 :
8  |  |  |  |  entfernung_seg4_auto_corr_min <= -2.702 :
9  |  |  |  |  |  entfernung_seg3_quartile_3 <= 0.09 :
10 |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg1_max <= 1.251 : LM4
11 |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg1_max > 1.251 : LM5
12 |  |  |  |  |  entfernung_seg3_quartile_3 > 0.09 :
13 |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg2_min_index <= 2218.5 :
14 |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationoben_seg4_auto_corr_mean <= -0.64 : LM6
15 |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationoben_seg4_auto_corr_mean > -0.64 : LM7
16 |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg2_min_index > 2218.5 :
17 |  |  |  |  |  |  |  rogowski_seg2_auto_corr_min <= -1.586 : LM8
18 |  |  |  |  |  |  |  rogowski_seg2_auto_corr_min > -1.586 :
19 |  |  |  |  |  |  |  |  kraftmessung_seg4_quartile_2 <= 1.924 : LM9
20 |  |  |  |  |  |  |  |  kraftmessung_seg4_quartile_2 > 1.924 : LM10
21 |  |  |  |  |  |  |  entfernung_seg4_auto_corr_min > -2.702 :
22 |  |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationoben_seg2_std <= 0.019 : LM11
23 |  |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationoben_seg2_std > 0.019 :
24 |  |  |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_quartile_3 <= 0.182 :
25 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_quartile_3 <= 0.15 : LM12
26 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_quartile_3 > 0.15 :
27 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  entfernung_seg4_quartile_2 <= 1.233 : LM13

```


13 - 0.011 * kraftmessung_seg2_auto_corr_mean
14 - 0.0615 * lasertriangulationunten_seg3_mean
15 - 0.0243 * kraftmessung_seg4_auto_corr_min
16 - 0.0001 * lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_min_index
17 - 0.016 * lasertriangulationunten_seg3_quartile_2
18 - 1.6888 * lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_mean
19 + 0.0003 * entfernung_seg1_seg_len
20 - 0.0004 * n
21 - 1.8191 * entfernung_seg4_quartile_1
22 + 0.0087 * kraftmessung_seg1_mean
23 + 1.333 * entfernung_seg2_auto_corr_mean
24 - 0.0013 * lasertriangulationoben_seg3_auto_corr_quartile_1
25 + 4.0058 * lasertriangulationunten_seg3_quartile_1
26 - 0.027 * kraftmessung_seg2_height
27 - 0.2939 * kraftmessung_seg1_min
28 - 0.0254 * entfernung_seg4_quartile_2
29 - 0.107 * kraftmessung_seg1_height
30 - 1.5513 * kraftmessung_seg4_height
31 + 0.3978 * kraftmessung_seg4_std
32 - 0.0079 * kraftmessung_seg1_quartile_1
33 - 51.3372 * entfernung_seg4_auto_corr_std
34 - 0.0006 * lasertriangulationunten_seg1_auto_corr_min_index
35 + 72.1805 * lasertriangulationoben_seg4_auto_corr_std
36 + 0.483 * entfernung_seg4_auto_corr_mean
37 + 0.0085 * entfernung_seg2_auto_corr_quartile_2
38 + 79.6462 * lasertriangulationoben_seg4_auto_corr_mean
39 + 1.656 * kraftmessung_seg1_quartile_2
40 + 16.3213 * entfernung_seg4_auto_corr_quartile_1
41 + 2.6314 * spannung_seg3_quartile_2
42 + 0.7864 * spannung_seg3_quartile_1
43 + 0.002 * lasertriangulationunten_seg3_min
44 + 0.0989 * kraftmessung_seg5_height
45 - 0.0434 * kraftmessung_seg4_min
46 + 8.3125 * entfernung_seg4_mean
47 - 0.0009 * lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_quartile_2
48 - 6.6896 * spannung_seg3_mean
49 - 0.7254 * kraftmessung_seg1_quartile_3
50 - 0.1134 * kraftmessung_seg4_auto_corr_quartile_2
51 + 0.0011 * kraftmessung_seg2_auto_corr_max
52 - 0.0503 * lasertriangulationunten_seg3_val_first
53 - 0.0313 * kraftmessung_seg1_auto_corr_quartile_1
54 + 0.9108 * entfernung_seg3_height
55 + 19.8921 * kraftmessung_seg4_auto_corr_quartile_3
56 + 0.9973 * spannung_seg3_quartile_3
57 + 0.0385 * lasertriangulationunten_seg5_quartile_3
58 + 9.4728 * entfernung_seg4_auto_corr_min
59 + 0.9951 * entfernung_seg4_quartile_3
60 - 0.0008 * kraftmessung_seg3_auto_corr_quartile_3
61 - 0.0015 * kraftmessung_seg2_auto_corr_quartile_1
62 - 32.4183 * lasertriangulationoben_seg4_std
63 - 7.2686 * lasertriangulationunten_seg4_auto_corr_quartile_1
64 - 0.1363 * entfernung_seg1_auto_corr_quartile_1
65 + 1.3256 * spannung_seg2_std

```

66 - 2.4189 * lasertriangulationoben_seg4_auto_corr_min
67 - 25.9056 * lasertriangulationunten_seg1_auto_corr_quartile_3
68 - 2.7242 * lasertriangulationunten_seg0_mean
69 - 3.5825 * lasertriangulationunten_seg5_mean
70 - 1.5797 * lasertriangulationunten_seg1_auto_corr_quartile_1
71 + 2.4319 * lasertriangulationunten_seg0_quartile_2
72 + 1.2274 * entfernung_seg3_val_first
73 - 16.3126 * entfernung_seg1_auto_corr_mean
74 - 5.2201 * kraftmessung_seg1_auto_corr_quartile_3
75 - 0.0571 * lasertriangulationunten_seg0_quartile_3
76 + 0.0094 * entfernung_seg3_quartile_3
77 + 0.0358 * kraftmessung_seg2_quartile_3
78 - 73.7893 * lasertriangulationunten_seg4_std
79 + 0.0052 * lasertriangulationunten_seg2_quartile_2
80 + 6.2284 * entfernung_seg4_height
81 - 0.0115 * lasertriangulationunten_seg3_height
82 + 54.2696 * entfernung_seg1_auto_corr_quartile_3
83 + 5.5124 * kraftmessung_seg3_quartile_2
84 + 0.0221 * lasertriangulationoben_seg3_height
85 + 0.0029 * kraftmessung_seg2_auto_corr_quartile_3
86 - 0.0074 * lasertriangulationunten_seg0_max
87 - 4.9294 * kraftmessung_seg3_quartile_1
88 + 2.0847 * lasertriangulationunten_seg5_quartile_2
89 + 5.677 * lasertriangulationunten_seg1_auto_corr_mean
90 + 0.7814 * lasertriangulationunten_seg0_val_first
91 + 21.2138 * lasertriangulationunten_seg4_auto_corr_std
92 + 0.5939 * spannung_seg3_min
93 - 10.3847 * entfernung_seg4_min
94 + 0.0067 * spannung_seg2_height
95 - 0.061 * entfernung_seg3_val_last
96 - 3.3239 * kraftmessung_seg2_mean
97 - 10.4832 * kraftmessung_seg3_mean
98 + 6.0529 * kraftmessung_seg3_quartile_3
99 + 0.1681 * lasertriangulationunten_seg2_std
100 - 9.9869 * lasertriangulationoben_seg4_auto_corr_quartile_1
101 + 6.8516 * lasertriangulationoben_seg1_auto_corr_mean
102 - 0.0123 * lasertriangulationunten_seg1_auto_corr_std
103 + 1.7693 * lasertriangulationoben_seg1_auto_corr_quartile_1
104 + 4.4914 * kraftmessung_seg3_max
105 - 0.3105 * lasertriangulationoben_seg4_height
106 - 0.2267 * lasertriangulationoben_seg3_auto_corr_quartile_2
107 + 7.7457 * lasertriangulationoben_seg2_std
108 + 0.0046 * kraftmessung_seg3_auto_corr_quartile_1
109 + 12.2087 * lasertriangulationunten_seg4_height
110 + 7.9411 * entfernung_seg4_auto_corr_quartile_2
111 + 0.0053 * spannung_seg2_quartile_3
112 + 0.003 * lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_quartile_1
113 + 0.0013 * entfernung_seg2_auto_corr_quartile_3
114 + 0.037 * lasertriangulationunten_seg5_val_first
115 - 23.2735 * lasertriangulationoben_seg1_auto_corr_quartile_3
116 - 1.0024 * lasertriangulationunten_seg5_quartile_1
117 - 0.0002 * entfernung_seg3_auto_corr_max
118 + 1.2948 * spannung_seg3_max

```

```

119 - 13.3696 * lasertriangulationunten_seg1_max
120 + 13.4331 * lasertriangulationunten_seg0_min
121 - 0.1194 * lasertriangulationunten_seg2_mean
122 - 0.3059 * spannung_seg2_max
123 + 0.0262 * lasertriangulationunten_seg5_min
124 + 0.086 * lasertriangulationunten_seg4_quartile_2
125 - 0.0119 * lasertriangulationoben_seg2_height
126 + 2.5983 * rogowski_seg4_std
127 + 0.0014 * entfernung_seg2_auto_corr_quartile_1
128 - 0.8815 * rogowski_seg3_max
129 - 0.0777 * kraftmessung_seg1_auto_corr_mean
130 - 0.002 * lasertriangulationunten_seg2_auto_corr_quartile_3
131 - 0.0168 * rogowski_seg3_mean
132 - 0.0483 * lasertriangulationoben_seg3_auto_corr_min
133 + 1.9017 * kraftmessung_seg2_quartile_2
134 - 0.0095 * rogowski_seg3_quartile_2
135 + 1.0837 * rogowski_seg3_min
136 + 0.6795 * rogowski_seg3_quartile_1
137 + 0.0029 * rogowski_seg2_val_last
138 - 0.7796 * rogowski_seg3_val_first
139 - 2.4822 * spannung_seg3_std
140 - 0.0019 * lasertriangulationunten_seg4_auto_corr_min
141 - 0.8532 * lasertriangulationoben_seg0_auto_corr_std
142 - 0.413 * rogowski_seg4_height
143 + 0.0534 * entfernung_seg0_auto_corr_std
144 + 0.0025 * lasertriangulationunten_seg3_auto_corr_mean
145 - 0.6726 * entfernung_seg0_auto_corr_quartile_2
146 - 0.0004 * rogowski_seg2_auto_corr_min
147 + 0.0003 * entfernung_seg2_auto_corr_min
148 + 1.6075 * kraftmessung_seg2_val_last
149 - 2.3306 * lasertriangulationoben_seg0_auto_corr_mean
150 - 0.4805 * lasertriangulationoben_seg2_auto_corr_mean
151 - 0.0648 * lasertriangulationunten_seg4_quartile_1
152 + 0.3139 * rogowski_seg4_val_first
153 + 0.1948 * rogowski_seg4_mean
154 - 0.6016 * rogowski_seg4_quartile_3
155 - 0.0709 * lasertriangulationunten_seg2_quartile_1
156 - 0.0016 * spannung_seg2_mean
157 - 0.0027 * spannung_seg3_height
158 - 0.038 * ruecklauf_seg3_std
159 + 0.1158 * rogowski_seg2_auto_corr_quartile_1
160 + 0.452 * kraftmessung_seg1_auto_corr_min
161 + 26.7099

```