

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18.456 B

## Thema

Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe

## Berichtszeitraum

01.07.2015 - 30.09.2017

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

## Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dresden

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Magdeburg, 07.12.2018

Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Prof. Dr.-Ing. Sven Jüttner

---

Ort, Datum

---

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

Gefördert durch:

## **Abschlussbericht**

Titel: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe

IGF-Nr.: 18.456 B

Forschungseinrichtung 1: Technische Universität Dresden  
(FE1) Institut für Fertigungstechnik  
Professur für Fügetechnik und Montage  
01062 Dresden

Forschungseinrichtung 2: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
(FE2) Institut für Werkstoff- und Fügetechnik  
39106 Magdeburg

Projektleiter FE1: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Projektleiter FE2: Prof. Dr.-Ing. S. Jüttner

Projektbearbeiter FE1: Dipl.-Ing. David Köberlin

Dipl.-Ing. Christian Mathiszik

Projektbearbeiter FE2: M. Sc. Oleksii Sherepenko

## Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben „Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe“ (IGF-Nr. 18.456 B/DVS-Nr. 04.062) verfolgte drei wesentliche Ziele:

- Bestimmung des bedarfsgerechten Fräszeitpunkts während der Fertigung
- Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl
- Verschleißmodell und Simulation.

Zum Erreichen der drei Ziele kooperierten die Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage (Forschungseinrichtung 1) und die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (Forschungseinrichtung 2) miteinander. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden vier unterschiedliche Kupferlegierungen, die für das Widerstandspunktschweißen geeignet sind, untersucht. Zwei Kupferlegierungen werden schmelzmetallurgisch, die anderen beiden pulvermetallurgisch (dispersionsgehärtet) hergestellt. An der Forschungseinrichtung 1 wurden mit allen Kupferlegierungen Zerspanbarkeits- und Standmengenuntersuchungen an vier unterschiedlichen Materialdickenkombinationen durchgeführt. Forschungseinrichtung 2 führte Untersuchungen zur Werkstoffcharakterisierung an den Kupferlegierungen und an den verschlissenen Elektroden der Standmengenuntersuchungen durch. Der gesamte Versuchsumfang des Vorhabens ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchsumfang des Forschungsvorhabens in Zahlen

Anzahl geschweißter Punkte	ca. 65000
Datensätze für die Parameteranalysen	Zerspanversuche: ca. 250 Schweißversuche: ca. 85000
Datensätze der Topographiemessungen	Zerspanversuche: ca. 500 Schweißversuche: 2224
präparierte Querschliffe für metallographische Untersuchungen (EDX-Analysen, Härtemessungen, Schichtdickenmessungen,...)	320

Die umfassenden werkstofftechnischen Untersuchungen und die Implementierung der Messergebnisse in Simulationsmodelle führten zu einem vertieften Verständnis über die Vorgänge beim Elektrodenverschleiß. Die Verschleißmechanismen können in mechanische und metallurgische eingeteilt werden. Abhängig vom verwendeten Grundwerkstoff äußerten sich die mechanischen Verschleißerscheinungen in Form von Pilz- oder Plateaubildung. Es zeigte sich weiterhin, dass die pulvermetallurgisch hergestellten Elektroden zu Makrorissen insbesondere bei verzinkten Blechen neigen. Zudem wiesen diese Elektroden geringere Erweichungstiefen als die schmelzmetallurgisch hergestellten auf. Diese Forschungsergebnisse führten zu einer Methodik der anwendungsgerechten Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl. Darauf aufbauend und gestützt durch

umfangreiche Schweißparameteranalysen konnten ineinandergreifende Modelle zur bedarfsgerechten Bestimmung des Zerspanzeitpunktes zum Nachbearbeiten der Elektroden während der Fertigung entwickelt werden.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 18.456 BR / DVS-Nr. 04.062) der Forschungsvereinigung, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Die Autoren bedanken sich bei den mitwirkenden Studenten, die durch ihre Studien- und Abschlussarbeiten zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben:

Technische Universität Dresden (Forschungseinrichtung 1)	
Max-Martin Ketzler	Diplomarbeit
Tino Gröger	Diplomarbeit
Paul Präkelt	Großer Beleg
Christian Otto	Großer Beleg
Tobias Schilde	Großer Beleg
Sönke Längericht	Diplomarbeit
Markus Erdmann	Forschungsseminar
Robert Kitzmann	statistische Datenanalyse
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Forschungseinrichtung 2)	
Christian Maaß	Masterprojektarbeit
Vinzent Schreiber	Masterprojektarbeit
Hannes Zapf	Masterarbeit

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

Unser Dank gilt:

Dr. Ahmad Parsi (Projektpate)	IBP Beratung Werkstoffe Schweißen Löten
Dr. Eike-Christian Klages	Volkswagen AG
Jens Klostermann, Sarita Hernesniemi	Luvata Welwyn Garden Ltd.
Dr. Wolfram Möhler	CEP - Compound Extrusion Products GmbH

---

---

Dr. Peter Böhlke, Christoph Hülsmann	KME Germany GmbH & Co. KG
Michael Rotzsch	ELEKTRO-SCHWEISSTECHNIK-DRESDEN GmbH
Hans-Jürgen Rusch, Ralf Bothfeld	Harms & Wende GmbH & Co. KG
Dr. Wenqi Zhang	SWANTEC Software and Engineering ApS
Michael Teutloff Tina Grundert	Bräuer Systemtechnik GmbH
Dr. Robert Sierlinger Sabine Ritsche	voestalpine Stahl GmbH
Michael Nowasz	voestalpine Automotive Components Schmölln GmbH
Volker Arndt, Jürgen Häufglöckner	Bosch Rexroth AG
Wolfgang Grötschel, Sven Grötschel	Grötschel GmbH
Renald Kümpel	Kümpel-Ingenieurbetrieb
Dipl. Ing. Bernd Giggel	Vorrichtungsbau Giggel GmbH
Peter Pimpl	KUKA Systems GmbH
Dr. Olaf Schwedler	MKM Hettstedt GmbH
Markus Meyer, Markus Hölscher	Duro Metall GmbH
Harald Schmidt	SVS Schweißtechnik GmbH
Matthias Wagner	Daimler AG
Wolfgang Hahn	Opel Automobile GmbH

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	2
Danksagung.....	4
Inhaltsverzeichnis .....	6
Abbildungsverzeichnis .....	11
Tabellenverzeichnis .....	21
Abkürzungsverzeichnis .....	23
Verzeichnis der Formelzeichen .....	24
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	28
1.1 Anlass für den Forschungsantrag.....	28
1.2 Ausgangssituation.....	29
2 Stand der Technik.....	32
2.1 Widerstandspunktschweißen .....	32
2.2 Herstellung von Elektrodenkappen .....	34
2.3 Verschleißerscheinungen und –mechanismen .....	36
3 Forschungsziel.....	38
4 Versuchswerkstoffe.....	41
5 Eingesetzte Anlagentechnik .....	43
5.1 Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen .....	43
5.2 Elektrodenkappenfräser .....	43
5.3 Messtechnik zur Datenerfassung beim Widerstandspunktschweißen ....	45
5.4 Chromatisch konfokale Mikroskopie zur Oberflächentopographiemessung.....	45
5.5 Thermomechanischer Simulator Gleeble 3500 .....	47
6 Ermittlung der Werkstoffeigenschaften.....	50
6.1 Versuchsdurchführung.....	50
6.1.1 Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands .....	50
6.1.2 Messung der elektrische Leitfähigkeit mit Wirbelstrom .....	52
6.1.3 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit.....	55
6.1.3.1 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit HotDisk .....	55

---

6.1.3.2	Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Widemann-Franz'schen Gesetz .....	57
6.1.4	Durchführung der Druckversuche mit dem Gleeble 3500 .....	58
6.1.4.1	Beurteilung der Versuchsgültigkeit.....	61
6.1.4.2	Fügen von Thermoelementen .....	64
6.1.4.3	Charakterisierung des Verformungsverhaltens der Versuchswerkstoffe .....	65
6.1.5	Zyklische thermische Belastung der Elektrodenwerkstoffe .....	65
6.2	Ergebnisse der Werkstoffcharakterisierung.....	66
6.2.1	Verformungsverhalten der Versuchswerkstoffe .....	66
6.2.2	Verformungsverhalten zyklisch thermisch belasteter Werkstoffe ...	67
6.2.3	Spezifischer elektrischer Widerstand .....	69
6.2.4	Wärmeleitfähigkeit .....	69
7	Zerspanbarkeit der Elektrodenwerkstoffe.....	71
7.1	Bewertung der entstandenen Spanformen.....	74
7.2	Berechnung der Abtragtiefe beim Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche .....	78
7.3	Verschleiß am Schneidmesser.....	80
8	Versuchsmethodik der Standmengenuntersuchungen.....	83
8.1	Versuchsmatrix .....	83
8.2	Versuchsablauf und Messgrößen .....	85
8.3	Oberflächentopographiemessungen der Elektrodenkappen und Schweißpunkte .....	88
8.4	Metallographische Untersuchungen von Schweißverbindungen .....	89
8.5	Metallographische Untersuchungen an verschlissenen Elektrodenkappen .....	90
8.5.1	REM-Untersuchung der Kappenoberfläche .....	90
8.5.2	REM-Untersuchung und EDX-Linescan am Querschleiff.....	90
8.5.3	Härtemessungen .....	92
8.5.4	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	93
8.6	Ermittlung der Schweißbereiche.....	94

---

8.6.1	VR01: HX340LAD+Z100 (t = 2,0 mm) – HX340LAD+Z100 (t = 2,0 mm) .....	94
8.6.2	VR02: DX53D+Z100 (t = 0,65 mm) – DX53D+Z100 (t = 0,65 mm)..	95
8.6.3	VR03: 22MnB5+AS150 (t = 1,0 mm) – 22MnB5+AS150 (t = 1,0 mm) .....	96
8.6.4	VR04: DX53D+Z100 (t = 0,65 mm) – HC340LA+ZE75/75 (t = 1,75 mm) – 22MnB5+AS150 (t = 1,5 mm) .....	98
8.6.5	Schweißparameter für die Standmengenuntersuchungen .....	99
9	Finite-Elemente Simulation: Versuchsmethodik .....	101
9.1	Sensitivitätsanalysen.....	101
9.2	Simulationen der Schweißbereiche .....	102
10	Versuchsergebnisse der Standmengenuntersuchungen .....	104
10.1	Standmengenuntersuchung VR01 .....	104
10.1.1	Punktdurchmesser .....	104
10.1.2	Elektrodentopographie .....	104
10.1.3	Metallographische Untersuchungen.....	106
10.2	Standmengenuntersuchung VR02 .....	108
10.2.1	Punktdurchmesser .....	108
10.2.2	Elektrodentopographie .....	108
10.2.3	Metallographische Untersuchungen.....	110
10.3	Standmengenuntersuchung VR03 .....	112
10.3.1	Punktdurchmesser .....	112
10.3.2	Elektrodentopographie .....	112
10.3.3	Auftreten von Schweißspritzern .....	115
10.3.4	Metallographische Untersuchungen.....	115
10.4	Standmengenuntersuchung VR04 .....	117
10.4.1	Punktdurchmesser .....	117
10.4.2	Elektrodentopographie .....	118
10.4.3	Auftreten von Schweißspritzern .....	119
10.4.4	Metallographische Untersuchungen.....	120

---

10.5	Beschreibung der Verschleißmodelle .....	122
10.5.1	Mechanischer Verschleiß der Elektroden .....	123
10.5.1.1	Plateaubildung: axiales Fließen der Elektrodenkappen .....	123
10.5.1.2	Pilzbildung: radiales Fließen der Elektrodenkappen .....	124
10.5.2	Metallurgischer Verschleiß der Elektroden .....	127
10.5.2.1	Auswertung der Anlegierungsschichten .....	127
10.5.2.2	Rissbildung .....	131
10.6	Methodik zur Elektrodenwerkstoff- und Schweißparameterauswahl ....	133
10.7	Modelle zur bedarfsgerechten Nachbearbeitung der Elektrodenarbeitsflächen .....	134
10.7.1	Modell t-e: Bewertung der Restgesamtblechdicke .....	135
10.7.2	Modell rho: Bewertung des spezifischen elektrischen Widerstands .....	137
10.7.3	Modell Q: Vergleich der theoretisch notwendigen mit der tatsächlichen Wärmemenge .....	139
10.7.4	Modell Q-Punkt: Bewertung der Erwärmungsgeschwindigkeit .....	142
11	Ergebnisse der Simulationen .....	144
11.1	Sensitivitätsanalysen .....	144
11.2	Simulationen und Vergleich der Schweißbereiche .....	145
12	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen .....	148
13	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen .....	149
13.1	Forschungseinrichtung 1 .....	149
13.2	Forschungseinrichtung 2 .....	149
14	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen .....	150
14.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse .....	150
14.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit .....	150
15	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen .....	151
15.1	Fachtagungen, Kolloquien .....	151
15.2	Studien- und Abschlussarbeiten .....	152
16	Transfermaßnahmen .....	153

16.1	Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen .....	153
16.2	Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende .....	154
16.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts .....	156
17	Literaturverzeichnis.....	157
18	Anhang .....	164

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Endwiderstandsverlauf über eine Standmengenkurve [16] .....	30
Abbildung 2: schematische Darstellung einer einschnittigen Punktschweißverbindung .....	32
Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrenscharakter beim Widerstandspunktschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [19], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [17] .....	33
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses dispersionsgehärteter Werkstoffe durch innere Oxidation nach [24] .....	35
Abbildung 5: Stadien des mechanischen Legierens [31] .....	36
Abbildung 6: Arbeitsteilung und Interaktion der Forschungseinrichtungen während des Forschungsprojektes .....	39
Abbildung 7: Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen der Professur für Fügetechnik und Montage an der Technischen Universität Dresden .....	43
Abbildung 8: Elektrodenkappenfräser, Links: Fräser mit Nenndrehzahl $330 \text{ min}^{-1}$ Rechts: Fräser mit Nenndrehzahl $620 \text{ min}^{-1}$ (1: Drehzahlsensor) .....	44
Abbildung 9: Konfokale Mikroskopie (links) und konfokal-chromatische Mikroskopie (rechts) - Funktionsprinzip [35, S. 31 ff.].....	46
Abbildung 10: Links: Elektrodenkontaktfläche einer CuCr1Zr-Elektrode kurz vor dem Standmengenende; Rechts: das konfokal chromatische Messsystem beim Vermessen im eingebauten Zustand .....	47
Abbildung 11: Gleeble 3500 in der Gesamtansicht (links) mit Schaltschrank, Hydrauliksystem, Absaugung und Vakuumpumpe. Nicht dargestellt ist der Programmierer-PC. Zentral befindet sich die Arbeitskammer (rechts) .....	48
Abbildung 12: Schema der Gleeble-Anlage .....	48
Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Ermittlung des spezifischen elektrischen Widerstands mittels Vier-Leiter-Methode: (a) Versuchsstand 1 - Infrarotofen; 2 - Stromquelle; 3 - Voltmeter; 4 - Temperaturmessgerät; (b) Probe mit Stromanschlüsse und Spannungsabgriffe in eine Quarzglassrethorte des Infrarotofens; (c) schematische Darstellung des Messsystems .....	52
Abbildung 14: Wirbelstrommessgerät SIGMATEST 2.068 .....	53
Abbildung 15: Versuchsaufbau bei der Wirbelstrommessung; a) SIGMATEST 2.068, b) Kupferproben mit Thermoelement in Eiswasser,	

---

c) Messlaptop, d) Analog-Digital-Umwandler, e) Heizplatte, f) Kupferpaste .....	54
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Probengeometrie und des Messaufbaus für das Hot-Disk-Verfahren nach [46] .....	56
Abbildung 17: Messaufbau für Hot-Disk-Verfahren (Probendurchmesser 80 mm). (a) Positionierung des Hot-Disk-Sensors zwischen den Proben; (b) Messaufbau .....	56
Abbildung 18: Wärmeleitfähigkeit von CuCr1Zr, ermittelt mit drei unterschiedlichen Methoden.....	57
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für den Druckversuch .....	59
Abbildung 20: Beispiel eines Versuchsablaufs zur Ermittlung der Fließkurve bei einer Prüftemperatur von 500°C. Links: zeitliche Verläufe von Temperatur und Traversenweg im Druckversuch ((a) Aufheizung der Probe, (b) Haltezeit 10 s zum Temperatúrausgleich, (c) Verformung der Probe, (d) freie Abkühlung); Rechts: Änderung der Verformungsgeschwindigkeit im Verformungsprozess.....	60
Abbildung 21: Erforderliche Messgrößen zur Bestimmung der Koeffizienten zur Bewertung der Versuchsgültigkeit .....	62
Abbildung 22: Beispiele von Proben nach dem Stauchungsvorgang: ungültig, $B > 1,1$ (links); ungültig, Winkelabweichung gegenüber $90^\circ > 10^\circ$ (Mitte); gültige Probe (rechts).....	63
Abbildung 23: Vergleich gültiger und ungültiger Versuche von CuCr1Zr bei 20°C .....	64
Abbildung 24: Ermittlung der wahren Spannung bei der wahren Dehnung von 0,01 ....	65
Abbildung 25: Temperaturverlauf bei der zyklischen thermischen Belastung von Proben .....	66
Abbildung 26: Fließkurven für Discup C3/60 (e4).....	67
Abbildung 27: Abhängigkeit der wahren Dehnung bei 0,01 von der Temperatur .....	67
Abbildung 28: Fließkurven für die Versuchswerkstoffe e2, e3 und e4 vor und nach der zyklischen thermischen Beanspruchung .....	68
Abbildung 29: Spezifischer elektrischer Widerstand der untersuchten Elektrodenwerkstoffe. Links: extrapoliert aus den Wirbelstrommessungen bei Raumtemperatur; rechts - spezifische elektrische Widerstände, gemessen mit der Vier-Leiter-Methode.....	69
Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeiten für die Versuchswerkstoffe, berechnet aus den spezifischen elektrischen Widerständen .....	70

---

Abbildung 31: Links: „Elektrodenfräsen“; Mitte: Konventioneller Bohrvorgang; Rechts: Schnittgeschwindigkeit beim Zerspanen der Elektrodenkappen.....	72
Abbildung 32: Spanformen und Bewertungen nach [57, S.22] .....	74
Abbildung 33: Spanformen der e4-Elektrode bei R40 mit $620 \text{ min}^{-1}$ und 1,2 kN [62, S.70] .....	75
Abbildung 34: Nahaufnahme der Späne von e4 bei R15 mit $330 \text{ min}^{-1}$ und 1 kN, [62, S.70] .....	76
Abbildung 35: Maskieren der Arbeitsfläche und Anlegen der Profilschnitte [62, S.45] .....	76
Abbildung 36: Konfokalaufnahmen; Links: e1, R15, $330 \text{ min}^{-1}$ bei 1,5 kN; Rechts: e3, R40, $620 \text{ min}^{-1}$ bei 1 kN .....	77
Abbildung 37: Gemittelte Rautiefe der e1-Elektrode unter Einfluss unterschiedlicher Zerspanparameter .....	77
Abbildung 38: Herleitung der Abtraggeometrie je Zerspanvorgang und deren Fläche .....	78
Abbildung 39: Abtragtiefe $h_{Ab}$ für einen Zerspanvorgang und den Balligkeitsradius R40 .....	80
Abbildung 40: Verschleiß an der Schneide [64, S.32] .....	81
Abbildung 41: Verschleiß an der Freifläche; Links: nach 100 Zerspanvorgängen, R15 mit $330 \text{ min}^{-1}$ bei 1 kN, Eckenverrundung $\sim 0,0095 \text{ mm}^2$ ; Rechts: nach 300 Zerspanvorgängen, R15 mit $620 \text{ min}^{-1}$ bei 1,5 kN, Eckenverrundung $\sim 0,0472 \text{ mm}^2$ [62, S. 99].....	82
Abbildung 42: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite in Abhängigkeit der Anzahl der Zerspanvorgänge für R15 mit 620 U/min und 1,5 kN nach [62, S. 99] .....	82
Abbildung 43: Versuchsablauf der Stufenversuche .....	86
Abbildung 44: Schema der Versuchsdurchführung bei den Untersuchungen der verschlissenen Elektrodenkappen .....	88
Abbildung 45: Bestimmung der Parameter der Schweißverbindung in Anlehnung an DVS-Merkblatt 2916-4 [74] .....	89
Abbildung 46: VR01 Ergebnis des Linescans der Kathode. Werkstoff CuCr1Zr (e1) nach 4000 Schweißpunkten .....	91
Abbildung 47: VR02 Messungen im Querschliff der Anode von Glidcop Al-60 (e3) nach 400 Schweißpunkten .....	92

---

Abbildung 48: Härtemessungen zur Bestimmung der Erweichungstiefe (VR02, alle Kappen, jeweils Stufe 1) .....	93
Abbildung 49: Messung der Gesamtschichtdicke in der Kappenmitte am Beispiel VR01-e2-sv2 .....	93
Abbildung 50: VR01: Wachstumskurven .....	95
Abbildung 51: VR02: Wachstumskurven .....	96
Abbildung 52: VR03: Wachstumskurven .....	97
Abbildung 53: VR04: Wachstumskurven .....	99
Abbildung 54: Temperaturfeld in der Elektrodenkappe, simuliert in SORPAS 2D mit gekennzeichneten Knoten, dessen Temperaturverläufe für die Sensitivitätsanalyse verwendet werden .....	102
Abbildung 55: links: Temperaturverläufe in den Knoten 1 und 2 bei Variation der Wärmeleitfähigkeit des Elektrodenwerkstoffs; rechts: Ermittlung der Maximaltemperaturen .....	102
Abbildung 56: VR01-e4 Schweißbereich, simuliert mit SORPAS 2D .....	103
Abbildung 57: VR01: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen .....	104
Abbildung 58: VR01: Elektrodenoberflächen der Anode .....	105
Abbildung 59: VR01: Elektrodenoberflächen der Kathode .....	106
Abbildung 60: VR01 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktmenge: oben – für CuCr1Zr (e1); unten – für C0/65 (e3)..	107
Abbildung 61: VR01 gemessene Elektrodeneindrucktiefe: links: für CuCr1Zr (e1); rechts: für C3/065 (e3) .....	107
Abbildung 62: VR02: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen .....	108
Abbildung 63: VR02: Elektrodenoberflächen der Anode .....	109
Abbildung 64: VR02: Elektrodenoberflächen der Kathode .....	110
Abbildung 65: VR02 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer .....	111
Abbildung 66: rechts: Schweißpunkt nach der Meißelprüfung mit zwei ausgeknöpften Butzen mit möglicher Schliffebene; links: Verbindung mit einem kleinen Linsendurchmesser (VR02-e2, Schweißpunktnummer 300) .....	111
Abbildung 67: VR02 Verbindung mit ungleichmäßigem Elektrodeneindruck und einer Pore in der Linsenmitte (e2, Schweißpunktnummer 2000) .....	111

---

Abbildung 68: VR03: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen .....	112
Abbildung 69: VR03: Elektrodenoberflächen der Anode .....	113
Abbildung 70: VR03: Elektrodenoberflächen der Kathode .....	114
Abbildung 71: VR03: Plateaubildung an den Elektrodenarbeitsflächen .....	114
Abbildung 72: VR03: Auftreten von Schweißspritzern.....	115
Abbildung 73: VR03 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer mit prozentualem Porenanteil; oben: für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr (e1); unten: für Glidcop Al-60 (e3) .....	116
Abbildung 74: VR03 Abhängigkeit der Eindrucktiefe der oberen Elektrode (Anode) in das Blech von der Schweißpunktanzahl .....	117
Abbildung 75: VR04: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen .....	118
Abbildung 76: VR04: Elektrodenoberflächen der Anode .....	119
Abbildung 77: VR04: Elektrodenoberflächen der Kathode .....	119
Abbildung 78: VR04: Auftreten von Schweißspritzern.....	120
Abbildung 79: VR04 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer; oben: für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr, mod. (e2); unten: für Glidcop Al-60 (e3).....	121
Abbildung 80: VR04 Entwicklung der Linseneindringtiefe in das dünne Blech mit zunehmender Schweißpunktnummer .....	121
Abbildung 81: VR04 Abhängigkeit der Elektrodeneindrucktiefe von der Schweißpunktnummer: oben links: für CuCr1Zr (e1); oben rechts: für CuCr1Zr, mod. (e2); unten links: für Glidcop Al60 (e3); unten rechts: für Discup C0/65 (e4).....	122
Abbildung 82: VR03-e3, Kathode: Querschliff der Elektrodenkappe nach 822 Schweißpunkten mit ausgeprägter Plateaubildung .....	124
Abbildung 83: VR03: Querschliff mit Darstellung der zunehmenden Elektrodeneindrucktiefe mit fortschreitender Schweißpunktanzahl .....	124
Abbildung 84: Pilzbildung durch radiales Fließen der Elektroden am Beispiel von VR01-e1-sv3 Anode nach 1200 Schweißpunkten im Querschliff .....	124
Abbildung 85: Längenänderung der Elektroden durch radiales Fließen und Materialverlust (VR01-e3-sv5).....	125

---

Abbildung 86: Veränderung der Elektrodenkontaktfläche durch radiales Fließen und Materialverluste zu Schweißbeginn, Schweißende und Prozessende (VR01-e3-sv5).....	126
Abbildung 87: Veränderung der Elektrodeneindrucktiefen zu Schweißende und Prozessende über 2000 Schweißpunkte (VR01-e3-sv5) .....	126
Abbildung 88: Einfluss der Elektrodenarbeitsflächenzunahme auf die Wärmemenge am Beispiel von VR01-e2-sv5 .....	127
Abbildung 89: VR02: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen, links: VR02-e2, rechts: VR02-e3.....	128
Abbildung 90: VR04: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen, links: VR04-e2, rechts: VR04-e3.....	128
Abbildung 91: VR01, VR02: Schichtausbildung an den verschlissenen Elektrodenkappen mit chemischer Zusammensetzung und Phasendiagramm [82] (Beispiel: VR02-e1-sv1) .....	129
Abbildung 92: VR04: Schichtausbildung an den verschlissenen Elektrodenkappen (Beispiel: VR04-e1-sv1, 282 Schweißpunkte) .....	129
Abbildung 93: Erweichungstiefen aller Elektrodenkappen zum Stufenversuchsende von VR01 (links), VR02 (mittig) und VR04 (rechts) .....	130
Abbildung 94: Dicken der Anlegierungsschichten aller Elektrodenkappenwerkstoffe von VR01, VR02 und VR04 .....	131
Abbildung 95: Risstiefe der verschlissenen Elektrodenkappen von VR01, VR02, jeweils e3, e4 .....	132
Abbildung 96: Verschleißerscheinungen und Auswirkungen auf den Schweißprozess in Abhängigkeit von der gewählten Kombination von Elektrodenwerkstoff-Blechmaterial.....	134
Abbildung 97: Korrelationsmatrix zur erweiterten Parameteranalyse (Beispiel VR01-e2-sv5) .....	135
Abbildung 98: anodenseitige Elektrodeneindrucktiefen von VR01 und VR03 für Stufenversuch 5 .....	136
Abbildung 99: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektroden nach Modell t-e für VR01 (links) und VR03 (rechts) .....	136
Abbildung 100: Modell rho beispielhaft für VR01-e4-sv5.....	138
Abbildung 101: ermittelte Zeitpunkte zum Elektrodennachbearbeiten der VR02-e2 mit Modell rho mit dem Verlauf der zugehörigen Punktdurchmesser der Stufenversuche .....	138

---

Abbildung 102: Falschfarbendiagramm der partiellen Wärmemenge über der Schweißzeit für alle Schweißpunkte von VR02-e2-sv3.....	139
Abbildung 103: gesamte Wärmemenge für alle Schweißpunkte von VR02-e2-sv3.....	139
Abbildung 104: Beispiel zur Beschreibung von Modell Q.....	140
Abbildung 105: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01 .....	141
Abbildung 106: Verlauf der erzeugten Wärmemenge über der Schweißzeit während der Standmengenuntersuchung bei VR01-e2-sv2 und VR01-e3-sv2.....	141
Abbildung 107: Modell Q-Punkt: Vergleich der Erwärmungsgeschwindigkeiten zwischen VR01-e2-sv5 und VR01-e3-sv5 .....	142
Abbildung 108: Modell Q-Punkt: Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01 .....	143
Abbildung 109: Einfluss der Werkstoffparameter auf Punktdurchmesser (WLFK: Wärmeleitfähigkeit, WK: Wärmekapazität) .....	144
Abbildung 110: Einfluss der Variation von Wärmeleitfähigkeit auf Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe.....	145
Abbildung 111: VR01 Vergleich der Wachstumskurven aus Experiment und Simulation.....	146
Abbildung 112: VR02 Vergleich der Wachstumskurven aus Experiment und Simulation.....	147
Abbildung 113: Gemittelte Rautiefe der e2 unter Einfluss verschiedener Zerspanparameter .....	165
Abbildung 114: Gemittelte Rautiefe der e3 unter Einfluss verschiedener Zerspanparameter .....	165
Abbildung 115: Gemittelte Rautiefe der e4 unter Einfluss verschiedener Zerspanparameter .....	166
Abbildung 116: anodenseitige Elektrodeneindrucktiefen der Versuchsreihen von Stufenversuch 5 .....	168
Abbildung 117: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01 .....	168
Abbildung 118: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02 .....	169
Abbildung 119: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03 .....	169

---

Abbildung 120: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04 .....	169
Abbildung 121: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01 .....	170
Abbildung 122: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02 .....	170
Abbildung 123: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03 .....	171
Abbildung 124: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04 .....	171
Abbildung 125: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01 .....	172
Abbildung 126: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02 .....	172
Abbildung 127: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03 .....	173
Abbildung 128: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04 .....	173
Abbildung 129: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01 .....	174
Abbildung 130: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02 .....	174
Abbildung 131: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03 .....	175
Abbildung 132: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04 .....	175
Abbildung 133: Beispiel eines Programms zur Durchführung der Druckversuche mittels Gleeble 3500. Zieltemperatur 500°C .....	176
Abbildung 134: Temperaturabhängige Fließkurven von CuCr1Zr (e1).....	177
Abbildung 135: Temperaturabhängige Fließkurven von CuCr1Zr, mod. (e2).....	177
Abbildung 136: Temperaturabhängige Fließkurven von Glidcop AL-60 (e3).....	178
Abbildung 137: Temperaturabhängige Fließkurven von Discup C3/60 (e4) .....	178
Abbildung 138: Proben nach dem Druckversuch: links e1 T=500°C; Mitte e1 T=900°C; rechts e3 T=900°C .....	179
Abbildung 139: Abbildung eines Modells in SORPAS 2D mit FE-Netz. ....	180

---

Abbildung 140 : VR01 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer mit zusätzlich dargestellten prozentuellen Porenanteil: oben für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr, mod. (e2); unten für C0/65 (e4).....	181
Abbildung 141: VR01 Abhängigkeit der Elektrodeneindrucktiefe von der Schweißpunktnummer: oben links – für e1; oben rechts – für e2; unten links – für e3; unten rechts – für e4.....	182
Abbildung 142: VR03 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer mit zusätzlich dargestellten prozentuellen Porenanteil: oben für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr, mod. (e2); unten für C0/65 (e4).....	183
Abbildung 143: VR03 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer: oben für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr (e1); unten für C0/65 (e4).....	184
Abbildung 144: VR01-sv1: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	185
Abbildung 145: VR01-sv3: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	185
Abbildung 146: VR01-sv5: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	185
Abbildung 147: VR02-sv1: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	186
Abbildung 148: VR02-sv3: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	186
Abbildung 149: VR02-sv5: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	186
Abbildung 150: VR04-sv1: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	187
Abbildung 151: VR04-sv3: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	187
Abbildung 152: VR04-sv5: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW) .....	187
Abbildung 153: VR01-sv5: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen .....	188
Abbildung 154: VR02-sv5: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen .....	189

---

Abbildung 155: VR04-sv5: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen .....	190
Abbildung 156: Variation der wärmephysikalischen Werkstoffeigenschaften für die Sensitivitätsanalysen. Links: Variation der Wärmekapazität, mittig: Variation der Wärmeleitfähigkeit, rechts: Variation des spezifischen elektrischen Widerstands .....	191
Abbildung 157: Einfluss der Variation der Wärmekapazität auf Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe .....	191
Abbildung 158: Einfluss der Variation des spezifischen elektrischen Widerstands auf Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe .....	192
Abbildung 159: VR01-e1: Simulierter Schweißbereich .....	193
Abbildung 160: VR01-e2: Simulierter Schweißbereich .....	193
Abbildung 161: VR01-e3: Simulierter Schweißbereich .....	194
Abbildung 162: VR01-e4: Simulierter Schweißbereich .....	194
Abbildung 163: VR02-e1: Simulierter Schweißbereich .....	195
Abbildung 164: VR02-e2: Simulierter Schweißbereich .....	195
Abbildung 165: VR02-e3: Simulierter Schweißbereich .....	196
Abbildung 166: VR02-e4: Simulierter Schweißbereich .....	196

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsumfang des Forschungsvorhabens in Zahlen .....	2
Tabelle 2: Elektrodenwerkstoffe für die Werkstoffcharakterisierung und Standmengenuntersuchungen .....	41
Tabelle 3: Materialdickenkombinationen für die Standmengenuntersuchungen .....	42
Tabelle 4: Geometrien der Elektrodenschneidmesser .....	42
Tabelle 5: Kenndaten des Versuchsstands zum Widerstandspunktschweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage .....	43
Tabelle 6: Kenndaten des Versuchsstands zum Elektrodenkappenfräsen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage .....	44
Tabelle 7: Messgrößen und Gerätetechnik zur Datenerfassung für die Zerspan- und Schweißversuche .....	45
Tabelle 8: Auswahl von technischen Daten der Gleeble 3500, ausgestattet mit WC-Co Druckbacken nach [36] .....	49
Tabelle 9: Übersicht der im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung ermittelten Werkstoffeigenschaften und der dafür verwendeten Methoden .....	50
Tabelle 10: Übersicht zu den reflektierten und den ausgewählten Parametern bei der Fließkurvenermittlung .....	61
Tabelle 11: Zugehörige Probenformen der gültigen und ungültigen Fließkurven für CuCr1Zr bei 20°C unter Berücksichtigung des Barrelling- Koeffizienten $B$ , der Winkelabweichung $\theta$ und des Ovality-Koeffizient $OV$ .....	64
Tabelle 12: Schweißparameter für das Befestigen von Thermoelementen .....	65
Tabelle 13: Zerspanbarkeitsuntersuchungen bei Variation der Elektrodenkraft .....	73
Tabelle 14: Zerspanbarkeitsuntersuchungen bei Variation der Zerspanzeit .....	73
Tabelle 15: Entstandene Spanformen bei der Bearbeitung der untersuchten- Elektroden .....	75
Tabelle 16: Dichte der Elektrodenkappenwerkstoffe .....	79
Tabelle 17: Schneidmesser–Verschleißstufenversuche mit Nitrode-Elektrode .....	81
Tabelle 18: Versuchsmatrix der Standmengenuntersuchungen mit der Einteilung der Stufen und Anzahl der Schweißpunkte je Stufe .....	84

---

Tabelle 19: Eigenschaften der Verschleiß- und Prüfbleche für die Standmengenuntersuchungen nach SEP 1220-2 [66] .....	85
Tabelle 20: Aufgezeichnete Messgrößen während der Standmengenuntersuchungen .....	87
Tabelle 21: Versuchsmatrix der Untersuchungen an verschlissenen Elektrodenkappen.....	87
Tabelle 22: Messparameter für die Oberflächentopographiemessungen .....	89
Tabelle 23: Parameter bei den EDX-Linescans am REM .....	91
Tabelle 24: VR01: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche .....	94
Tabelle 25: VR02: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche .....	95
Tabelle 26: VR03: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche .....	97
Tabelle 27: VR04: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche .....	98
Tabelle 28: Schweißparameter für die Standmengenuntersuchungen .....	100
Tabelle 29: Variation der Werkstoffeigenschaften für die Sensitivitätsanalysen.....	101
Tabelle 30: Strom- und Zeitwerte zur Simulation der Schweißbereiche .....	103
Tabelle 31: Auftreten von Makrorissen in Anode (A) und Kathode (K) .....	132
Tabelle 32: Elektrodenwerkstoffauswahl für die Versuchsreihen .....	133
Tabelle 33: Prozessparameterauswahl für die Versuchsreihen und Elektrodenwerkstoffe .....	134
Tabelle 34: Taktzeiten der Schweißversuche (Median), nicht berücksichtigt sind die Messzeiten der Topographiemessungen.....	167

---

## Abkürzungsverzeichnis

GW	Grundwerkstoff
MDK	Materialdickenkombination
EWST	Elektrodenwerkstoff
VR	Versuchsreihe
VR01	MDK: HX340LAD+Z100 (t = 2,0 mm) – HX340LAD+Z100 (t = 2,0 mm)
VR02	MDK: DX53D+Z100 (t = 0,65 mm) – DX53D+Z100 (t = 0,65 mm)
VR03	MDK: 22MnB5+AS150 (t = 1,0 mm) – 22MnB5+AS150 (t = 1,0 mm)
VR04	MDK: DX53D+Z100 (t = 0,65 mm) – HC340LA+ZE75/75 (t = 1,75 mm) – 22MnB5+AS150 (t = 1,5 mm)
e1	Elektrodenkappenwerkstoff CuCr1Zr
e2	Elektrodenkappenwerkstoff CuCr1Zr, modifiziert
e3	Elektrodenkappenwerkstoff Glidcop Al60
e4	Elektrodenkappenwerkstoff Discup C0/65, Discup C3/60
sv1	Stufenversuch 1
sv2	Stufenversuch 2
sv3	Stufenversuch 3
sv4	Stufenversuch 4
sv5	Stufenversuch 5

## Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$a$	Überlapplänge	mm
$A$	Elektrodenkontaktfläche	mm <sup>2</sup>
$A_{Ab}$	Abtragfläche	mm <sup>2</sup>
$A_B$	mechanische Bruchdehnung	mm
$B$	Barrelling-Koeffizient	
$d$	Durchmesser	mm
$d_{eu}$	Durchmesser des Elektrodeneindrucks oberes Blech (anodenseitig)	mm
$d_{el}$	Durchmesser des Elektrodeneindrucks unteres Blech (kathodenseitig)	mm
$d_{HAZ}$	Durchmesser der Wärmeeinflusszone	mm
$d_n, d_l$	Linsendurchmesser	mm
$d_{l,min}$	minimaler Linsendurchmesser	mm
$d_0$	Ausgangsdurchmesser	mm
$d_p$	Punktdurchmesser	mm
$d_{p,soll}$	Soll-Punktdurchmesser	mm
$e_u$	Tiefe des Elektrodeneindrucks oberes Blech (anodenseitig)	mm
$e_l$	Tiefe des Elektrodeneindrucks unteres Blech (kathodenseitig)	mm

---

<b>Formelzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
$h$	Höhe	mm
$h_{\text{Ab}}$	Abtragtiefe	mm
$H$	Height-Koeffizient	
$f$	Frequenz	Hz
$F$	Kraft	N
$F_{\text{El}}$	Elektrodenkraft	kN
$I$	Strom	A
$I_{\text{E}}$	Erwärmungsstromstärke	A
$I_{\text{w}}$	Schweißstromstärke	kA
$m$	Masse	g
$n$	Anzahl, Punktzahl	
$L$	Lorenz-Zahl	$W\Omega K^{-2}$
$L_0$	Anfangslänge	mm
$r$	Radius	mm
$O_{\text{V}}$	Ovality-Koeffizient	
$P$	Schweißpunktnummer	
$Q$	Wärmemenge	J
$Q_{\text{ges}}$	gesamte Wärmemenge	J
$\dot{Q}$	Erwärmungsgeschwindigkeit	J/s

---

<b>Formelzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
$R$	elektrischer Widerstand	$\Omega$
$R_{1,\dots,n}$	elektrische Einzelwiderstände	$\Omega$
$R_{\text{ges}}$	elektrischer Gesamtwiderstand	$\Omega$
$R_m$	mechanische Bruchspannung	MPa
$R_{p0,2}$	mechanische Dehngrenze	MPa
$R_z$	gemittelte Rautiefe	$\mu\text{m}$
$S$	Shear-Koeffizient	
$t$	Blechdicke, Zeit	mm, s
$t_h$	Vorhaltezeit	ms
$t_s$	Nachhaltezeit	ms
$t_w$	Schweißstromzeit	ms
$t_u$	Blechdicke oberes Blech	mm
$t_l$	Blechdicke unteres Blech	mm
$t_z$	Dauer der Elektrodenzerspannung	s
$T$	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
$T_s$	Schmelztemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$U$	elektrische Spannung	V
$V$	Volumen	$\text{mm}^3$
$v$	lineare Geschwindigkeit	mm/s

---

<b>Formelzeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Einheit</b>
$x$	Spaltmaß	mm
$\alpha$	Freiwinkel, Temperaturkoeffizienten 1. Ordnung	°, K <sup>-1</sup>
$\beta$	Temperaturkoeffizienten 2. Ordnung	K <sup>-2</sup>
$\gamma$	Spanwinkel	°
$\delta$	Eindringtiefe	mm
$\varepsilon$	Dehnung	
$\dot{\varepsilon}$	Dehnungsgeschwindigkeit	s <sup>-1</sup>
$\kappa$	elektrische Leitfähigkeit	( $\Omega\text{m}$ ) <sup>-1</sup>
$\mu$	Erwartungswert	
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	$= 4\pi 10^{-7} \text{N/A}^2$
$\mu_r$	relative Permeabilität	
$\rho$	Dichte, spezifischer elektrischer Widerstand	g/mm <sup>3</sup> , $\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$
$\sigma$	mechanische Spannung	MPa
$\omega$	Kreisfrequenz	Hz
$\theta$	Winkelabweichung	°

# 1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

## 1.1 Anlass für den Forschungsantrag

Das Widerstandspunktschweißen ist im heutigen dünnblechverarbeitenden Kraft- und Schienenfahrzeugbau, im Metallbau und in der Gerätetechnik das am häufigsten angewendete Fügeverfahren. In diesen Branchen steigt die Nachfrage an höherfesten und hochsteifen Produkten. Für verbesserte korrosive oder umformtechnische Eigenschaften werden sie meist beschichtet ausgeliefert. Die dadurch entstehenden vielfältigen und hoch anspruchsvollen Fügeaufgaben führen beim Widerstandspunktschweißen zu höheren Elektrodenkräften, höheren Stromstärken und längeren Schweißstromzeiten in kleineren Parameterbereichen. Durch die erhöhten Prozessgrößen und durch die unterschiedlichen Blechbeschichtungen steigt der Elektrodenverschleiß und die Prozessstabilität verringert sich.

Als Gegenmaßnahme wurde zur Erhöhung der Elektrodenlebensdauer das Elektrodenkappenfräsen entwickelt, mit dem die prozessbedingte Auflegierungsschicht abgespant und die ursprüngliche Elektrodengeometrie hergestellt wird. Die Festlegung der Fräszyklen erfolgt dabei über empirisch ermittelte Erfahrungswerte, so dass häufig zu früh zu viel Material abgetragen wird [1]. Diese starren Fräszyklen nach 75 bis 200 Punktschweißungen führen zur ersten Problemstellung, dem unnötig hohen Materialverbrauch durch Elektrodenfräsen. Dieser verschärft sich für die Anwender zusätzlich durch die Abhängigkeit von schwankenden Kupferrohstoffpreisen und dem aktuell und zukünftig erwartetem Versorgungsproblem mit Kupfer [2].

Direkt mit den erhöhten Prozessgrößen ist eine stark verringerte Prozessfähigkeit von Standard CuCr1Zr-Elektroden beim Einsatz unterschiedlichster beschichteter hochfester und höchstfester Stähle (z. B. [3]) gekoppelt. Für derartige Sonderanwendungen gilt es abzuwägen, die CuCr1Zr-Elektroden durch dispersionsgehärtete Kupferelektroden zu ersetzen. In Voruntersuchungen der Forschungseinrichtungen wurde festgestellt, dass dispersionsgehärtete Elektroden das Potential bieten, bei erhöhten Anforderungen, ein großes Prozessfenster zu gewährleisten. Dispersionsgehärtete Kupferelektroden sind etwa doppelt bis drei Mal so teuer wie Standardelektroden. Dennoch werden in der Industrie die statischen Fräszyklen aus dem Einsatz der CuCr1Zr-Elektroden direkt übernommen. Verschleißuntersuchungen der Forschungseinrichtungen gemäß DIN EN ISO 8166 [4] weisen für dispersionsgehärtete Kupferelektroden aber doppelte bis dreifache Standmengen im Vergleich zu konventionellen CuCr1Zr-Elektroden nach [5], [6], [7]. Mit Kenntnissen über die Prozessfenster und das Verschleißverhalten ist ein Einsparpotenzial bei dispersionsgehärteten Kupferelektroden gegeben.

Die auf Basis von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dispersionsgehärteten Kupferelektroden, genormt in der DIN EN 5182 [8], sind seit einigen Jahren mit leicht variierendem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteil bei der Firma Luvata unter der Bezeichnung Glidcop® kommerziell verfügbar. Die Herstellung des Glidcop® -Elektrodenmaterials erfolgt durch innere Oxidation. Das Verschleißverhalten dieser Materialien ist bislang unzureichend bekannt und in der Literatur noch nicht beschrieben. Aufgrund ihrer laut Hersteller um etwa 60% bis 100% höheren Warmfestigkeit bei gleicher oder bis 20% besserer elektrischer Leitfähigkeit [7], [8], [9], [10] unterscheidet es sich von dem der Standardelektroden aus CuCr1Zr. Beide Eigenschaften können zu einer späteren Verformung der Elektrodenkontaktfläche und zu einer geringeren thermischen Belastung führen. Die aufgezeigten Standmengenunterschiede sind vermutlich ein Effekt des differenten Gefüges. Die Unterschiede der physikalischen und der metallographischen Eigenschaften sind, wie oben aufgeführt, grundlegend bekannt, aber noch immer nicht hinreichend beschrieben, um die höheren Standmengen sicher nutzen zu können. Um das Widerstandspunktschweißen auch in Zukunft für neue hoch- und höchstfeste Stähle mit unterschiedlichsten Beschichtungen einsetzen zu können, muss der Verschleißcharakter der Elektrodenkappen beschrieben werden können. Bislang beschränkt sich die Literatur auf einfache Stahlblechgüten und Standard-CuCr1Zr-Elektroden [11], [12], [13]. Dieses Forschungsvorhaben wird fehlende Kenntnisse erarbeiten und hat als Zielstellung, diese Ergebnisse in praktikabler Art für kleine und mittelständische Unternehmen nutzbar zu machen. Somit wird es möglich sein, Standard-CuCr1Zr-Elektroden und dispersionsgehärteten Elektroden entsprechend des Einsatzfalls auszuwählen und mit praktikablen, bedarfsgerechten Frässtrategien die Vorteile der gewählten Elektroden optimal auszunutzen. Daraus resultieren eine größere Prozesssicherheit, eine höhere Wirtschaftlichkeit und ein bedachter Umgang mit der Ressource Kupfer.

## 1.2 Ausgangssituation

Ausgangspunkt sind die Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Standmengenuntersuchung von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen am Institut für Werkstoff- und Fügetechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg [9] und am Lehrstuhl Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden [5], [6], [14] und [15].

Das aus den benannten Arbeiten erkennbare Potential zur Lebensdauererhöhung von Elektrodenkappen führte zu Standmengen-Voruntersuchungen in Anlehnung an die DIN EN ISO 8166 [4]. Aus diesen resultiert, dass neben der Aufzeichnung der typischen Prozessparameter Schweißstromstärke, Schweißspannung, Elektrodenkraft sowie Kühlwasserbedingungen die Ermittlung des Elektrodenweges und die Elektrodentemperatur sinnvoll sind. Beide Messgrößen erlauben Aussagen zum Verschleißverhalten und Verschleißzustand der Elektrodenkappen.



aufweist: eine Anstiegsphase, eine quasistatische Phase und eine abfallende Phase (Abbildung 5). Die abfallende Phase geht einher mit dem Erreichen der unteren Qualitätsgrenze. Sie kann folglich, als Kriterium dienen, den Nachbearbeitungsvorgang bedarfsgerecht einzuleiten und Einsparungen beim Kupferverbrauch zu erreichen. Durch den Einsatz von Mittelfrequenztechnik und der damit einhergehenden zeitsynchronen Messung von Strom und Spannung für jeden Schweißpunkt ergibt sich die Möglichkeit, den Parameterverlauf für jeden Schweißpunkt zu berechnen, zu überwachen und für eine Verschleißdetektion zu nutzen. Zum Zeitpunkt der Antragstellung 2012 wurde diese Methode in der Praxis nicht eingesetzt, weil gesicherte Daten und Erfahrungen fehlten.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Widerstandspunktschweißen

Beim Widerstandspunktschweißen entstehen zwischen zwei oder mehreren sich überlappenden Blechen durch einen Stromfluss über zwei Elektroden stoffschlüssige, punktförmige Fügeverbindungen. Abbildung 2 zeigt schematisch die Gestalt einer Punktschweißung.

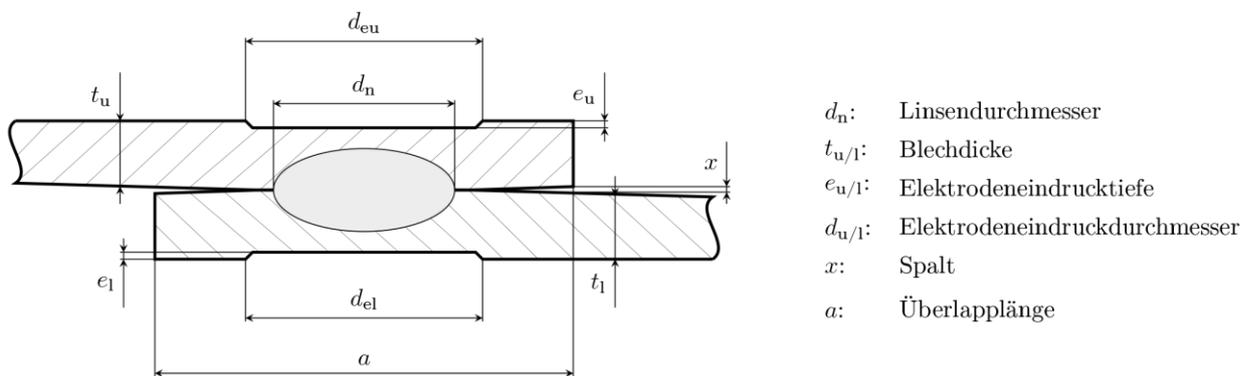


Abbildung 2: schematische Darstellung einer einschnittigen Punktschweißverbindung

Das Einsatzgebiet des Widerstandspunktschweißens umfasst vorrangig Stahlbleche in einem Dickenbereich von 0,5 mm bis 3,0 mm. Als Werkstoffe kommen dabei überwiegend verzinkte hochfeste Bleche zum Einsatz. Auch niedriglegierte Stähle mit und ohne Verzinkung und verstärkt auch höchstfeste Stähle mit organischer Beschichtung werden mit diesem Verfahren gefügt. [17, 18]

Die Ausbildung der Fügezone beruht auf einer konduktiven Widerstandserwärmung der zu fügenden Werkstoffe unter Krafteinwirkung der Elektroden. Durchfließt ein elektrischer Strom  $I$  einen Werkstoff mit dem elektrischen Widerstand  $R$  über eine bestimmte Zeit  $t$ , so bewirkt dieser eine Vergrößerung der Wärmemenge im Werkstoff. Diese Wärmezunahme unterliegt während der Stromflusszeit  $t_w$  einer zeitlichen Veränderung und lässt sich nach Formel (1) beschreiben.

$$Q = \int_{t=t_0}^{t=t_w} I^2(t) R_{ges}(t) dt \quad (1)$$

Der Gesamtwiderstand übt somit einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Schweißlinse aus. Er lässt sich aufteilen in die Stoffwiderstände  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  und die Kontaktwiderstände  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_7$  (Abbildung 3, links) und verändert sich im Verlauf des Schweißprozesses (Abbildung 3, rechts). Für das Punktschweißen von einfachen Stahlblechgüten ergibt sich eine Wärmeverteilung nach Abbildung 3.

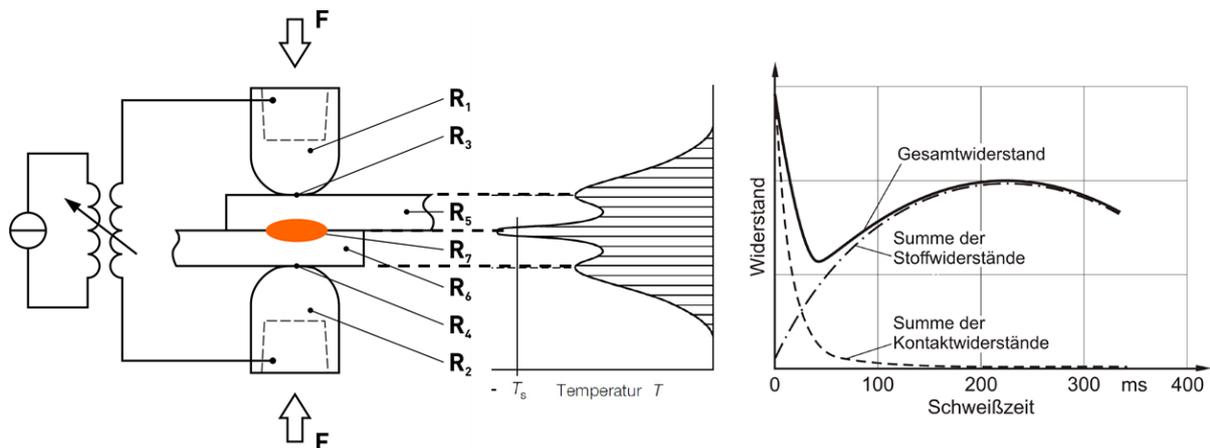


Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrensscharakter beim Widerstandspunktschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [19], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [17]

Der Gesamtwiderstand teilt sich unterschiedlich stark auf die Einzelwiderstände auf. Dort, wo der größte elektrische Widerstand auftritt, erfolgt die größte Erwärmung, welche zum Aufschmelzen der Werkstoffe und zur Ausbildung einer Schweißlinse führt. Zum Prozessbeginn sind die Übergangswiderstände, hervorgerufen durch die Oberflächenrauheit und Oberflächenbeschichtung, entscheidend. Mit zunehmendem Prozessfortschritt dominiert der Einfluss der Stoffwiderstände. Abbildung 3 zeigt rechts schematisch den Widerstandsverlauf. Die Punktschweißelektroden müssen bei artgleichen Verbindungen über einen möglichst geringen elektrischen Widerstand verfügen und zugleich eine hohe Warmfestigkeit aufweisen. Geringe Anlegierungsneigungen sind für eine hohe Lebensdauer der Elektroden vorteilhaft.

Um den Widerstand an die vielfältigen Schweißaufgaben anzupassen, können die Kontaktflächengröße oder der Stoffwiderstand der Elektroden verändert werden. Eine Auswahl dazu bieten die DIN EN ISO 5182 [6] und die DIN EN ISO 5821 [20]. Weiterhin ermöglicht die Elektrodenkraft  $F_{El}$  eine Beeinflussung der Kontaktwiderstände.

Neben dem Gesamtwiderstand und der Elektrodenkraft gehören nach Formel (1) noch die Stromstärke  $I$  und die Stromflusszeit  $t_w$  zu den Prozessparametern des Widerstandspunktschweißens. Es gibt ein- und mehrimpulsige Punktschweißprozesse. Einen wesentlichen Einfluss auf die Prozessparameter besitzt die Punktschweißeinrichtung. Sie besteht aus einem Kraftsystem und einem elektrischen System. Ersteres bestimmt die Ausführungsform als Ständermaschine oder Schweißzange. Das elektrische System kann vom Kraftsystem räumlich getrennt werden und unterscheidet sich in der Ausführung nach der verwendeten Stromart. Es dominieren die Verwendung von Wechselstrom mit 50 Hz (einphasig) und Gleichstrom im Mittelfrequenzbereich mit etwa 1000 Hz (dreiphasig). Die konventionelle 50 Hz-Technologie ist kostengünstig, führt aber zu

unvorteilhaften Netzurückwirkungen. Aufgrund symmetrischer Netzbelastung bei der Mittelfrequenztechnologie steht hierbei eine um den Faktor drei höhere Leistung zur Verfügung. Weitere Vorteile der teureren Mittelfrequenztechnologie sind der höhere effektive Energieeintrag sowie das geringe Anlagengewicht und -volumen.

Auf das Schweißergebnis haben weitere, bisher nicht genannte Randerscheinungen einen unterschiedlich großen Einfluss. Dies betrifft u. a. die Zangensteifigkeit, den Stromnebenschluss, die Sekundärfensteröffnung und den Peltier-Effekt sowie Öle und Fette auf den Blechoberflächen.

## 2.2 Herstellung von Elektrodenkappen

Die Elektrodenwerkstoffe zum Widerstandspunktschweißen werden kontinuierlich weiterentwickelt. Werkstoffe, die sich bereits in der Praxis bewährt haben, sind in der DIN EN ISO 5182 [8] zusammengestellt. All diese Werkstoffe wurden mit der Zielstellung nach den folgenden sechs Eigenschaften entworfen, welche sie unterschiedlich gut erfüllen [21]:

- gute elektrische und thermische Leitfähigkeit
- hohe Grund- und Warmhärte
- hohe Anlassbeständigkeit
- geringe Anlegierungsneigung zum Blechwerkstoff
- sichere Kühlung der Elektrodenspitze
- leicht austauschbar

Die Normung [8] ordnet die Werkstoffe zum Punktschweißen in drei Hauptgruppen. Ausschlaggebend sind dabei die chemische Zusammensetzung und der Herstellungsprozess. Zur Gruppe A gehören das reine Kupfer und die Kupferlegierungen. Gruppe B umfasst gesinterte Werkstoffe mit den Elementen Kupfer, Molybdän, Silber, Wolfram und Wolframkarbid. Gruppe C wird aus den dispersionsgehärteten Kupferlegierungen gebildet.

Die Werkstoffe der Gruppe A werden gegossen, gewalzt, stranggepresst und zur abschließenden Formgebung kalt umgeformt. Als wichtigster Vertreter in der Praxis ist CuCr1Zr zu nennen. Die Herstellung der Elektroden aus Gruppe B erfolgt auf Basis gemischter Pulvermassen. Im ersten Prozessschritt wird das zumeist endformnahe Pulver zu einem Grünling vorgepresst oder geformt. Im zweiten Prozessschritt, dem Sintervorgang, wird der Grünling über mehrere Stadien bei hohen Temperaturen verdichtet und verfestigt.

Dispersionsgehärtete Kupferlegierungen mit zwei oder mehr metallischen Elementen beschreiben die Patente [22, 23] aus den 1970er Jahren. Die Verfahren zur Dispersionshärtung von Kupfer beruhen entweder auf dem Prinzip des mechanischen Legierens oder

auf dem der inneren Oxidation. Beim mechanischen Legieren wird extrem feines Pulver des Matrixmetalls mit dem Dispersoid, zumeist  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vermischt, komprimiert und stranggepresst. Bei der inneren Oxidation werden die Legierungen des Matrixmetalls mit kleinen Anteilen an leicht oxidierbaren Metallen, wie Beryllium oder Aluminium, zu Pulvern verarbeitet und in einer zweiten Stufe einer inneren Oxidation unterzogen. Das Ergebnis ist jeweils eine gleichmäßige Verteilung von Oxidteilchen mit einem Durchmesser von weniger als  $0,1 \mu\text{m}$  in der Matrix. Das Verfahrensprinzip der inneren Oxidation zeigt Abbildung 4 und das Verfahrensprinzip des mechanischen Legierens Abbildung 5.

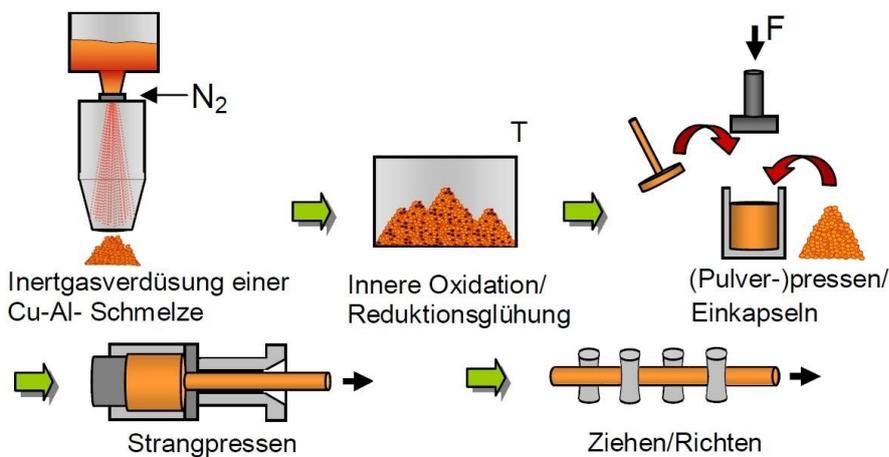


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses dispersionsgehärteter Werkstoffe durch innere Oxidation nach [24]

Elektrodenkappen aus dispersionsgehärtetem Kupfer sind seit etwa 2004 auf dem Markt und bereits seit 2006 in der Norm aufgeführt. Die Eigenschaften dieser Elektroden sind laut Herstellerdatenblatt eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit bei zugleich hoher Warmhärte [10]. Von den beiden Herstellungsverfahren ist das mechanische Legieren vielfältiger einsetzbar, da nahezu beliebige Partikel bzw. Dispersoide in die Kupfermatrix eingebracht werden können. Beide Herstellungsprozesse dispersionsgehärteter Elektrodenkappen sind in Patenten der 1990er Jahre beschrieben [25, 26]. Deren Erkenntnisse sind aufgrund ausgebliebener Jahresgebühren seit 1999 bzw. 2000 frei verwertbar.

Außerhalb der Normung beschreibt die Literatur noch Verbundelektroden mit Metallstiften in der Symmetrieachse der Elektrodenkappen, welche dort eingepresst oder eingelötet werden [27–30]. Als Grundkörper kommen in allen Untersuchungen Standardelektroden zur Anwendung. Diese werden in der Mitte rotationssymmetrisch ausgearbeitet und mit einem zumeist dünnen Strang ausgefüllt, welcher andere Eigenschaften, vorrangig eine größere Warmhärte, als der Grundkörper aufweist.

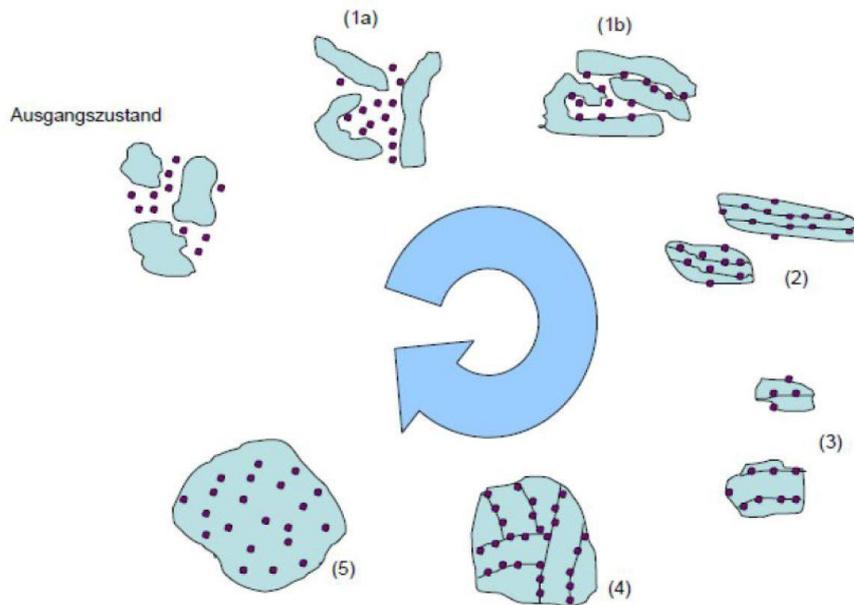


Abbildung 5: Stadien des mechanischen Legierens [31]

### 2.3 Verschleißerscheinungen und -mechanismen

Während des Widerstandspunktschweißens ist die Elektrodenkappe hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Diese führen an der Elektrodenkontaktfläche zu Diffusionsvorgängen und zur Verformung. Mit fortschreitender Punkanzahl steigt somit der Übergangswiderstand an den Elektroden an, die Elektroden werden höher thermisch belastet, verformen sich, und die Stromdichte nimmt ab. Der erreichbare Punktdurchmesser bei konstanten Prozessparametern sinkt. Ist er zu klein, muss die Kontaktfläche überarbeitet, z. B. gefräst werden. Die Zeit zwischen zwei Nachbearbeitungsvorgängen wird Standmenge genannt [4]. An einer Elektrodenkappe sind mehrere Fräsvorgänge möglich. Die Elektrodenlebensdauer stellt die Summe der Anzahl maximal möglicher Standmengen einer Elektrodenkappe dar.

Der Verschleiß zeigt sich in den Materialkenngrößen, den geometrischen Dimensionen und daraus folgend auch in den Prozessparametern. Zu den Materialkenngrößen zählen die Diffusionsschichtdicke, die Zusammensetzung der Diffusionsschicht und die Härte. Bei den geometrischen Dimensionen zeigt sich der Verschleiß besonders in der Größe und Beschaffenheit der Kontaktfläche sowie in der Elektrodeneindrucktiefe.

Für die am häufigsten verwendete Legierung CuCr1Zr existiert eine große Zahl an Untersuchungen zur Beschreibung der Verschleißmechanismen. So ist für unverzinkte und verzinkte Stahlbleche bekannt, dass die Standmengen bei Verwendung von Gleichstrom 30% höher sind als bei Wechselstrom. Bei Gleichstromschweißungen zeigen die Untersuchungen von [11] an der Anode eine etwa doppelt so große Diffusionstiefe wie an der

Kathode, hervorgerufen womöglich durch den Peltier-Effekt. In Untersuchungen der Forschungseinrichtungen konnte nachgewiesen werden, dass die Länge der Diffusionszeit einen stärkeren Einfluss auf die Diffusionstiefe besitzt als der Peltier-Effekt [14, 16]. Die Diffusionsvorgänge bewirken nicht nur ein Anwachsen der Legierungsschicht sondern auch ein Anlöten der Elektroden am Blech, das wiederum zu einem partiellen Herausbrechen dieser Schicht führen kann. Bereits nach etwa 100 Schweißpunkten herrscht ein Gleichgewicht zwischen diesen Prozessen, wodurch die Legierungsschicht nicht weiter anwächst [11]. Stufenversuche der Forschungseinrichtungen zeigen zugleich, dass die Entfestigung zu einem ähnlichen Zeitpunkt (zwischen 50 und 400 Schweißpunkten) in einen stationären Zustand übergeht [6]. In [11] konnte nachgewiesen werden, dass im Labormaßstab nachgebildete Diffusionsbeziehungen nicht der Realität entsprechen. In den Forschungseinrichtungen durchgeführte Elementanalysen an Querschliffen verschlissener Elektroden zeigen von außen nach innen einen Legierungsaufbau mit einer Deckschicht aus den Elementen Al, Fe, Cr, Cu und einer darauf folgenden Schicht aus  $\alpha$ -Mischkristallen mit vereinzelt Einlagerungen an  $\beta$ -Mischkristallen [6].

Wolfram- oder Molybdänbasiselektroden zeigen ein vollkommen anderes Verschleißverhalten, da sie mit der Zinkschicht nicht reagieren [11]. Die Erkenntnisse zu diesen Materialien und ihrem Verschleißverhalten sind allerdings gering. Verbundelektroden mit einer CuCr1Zr-Matrix wurden untersucht, aber in ihrer Legierungsbildung bisher noch nicht detailliert beschrieben [11, 28–30].

Sehr wenige Informationen finden sich zu Verschleißmechanismen von dispersionsgehärteten Elektrodenkappen. Vorgegangene Standmengenuntersuchungen der Forschungsstellen an unterschiedlich beschichteten Stahlwerkstoffen zeigen auch hier ein anderes Verhalten als es bei den Standardelektroden zu finden ist. Die Verformung der Elektrodenkappen aufgrund der Wärmeeinwirkung beim Schweißen ist sehr gering. Es kommt zum Aufbau einer dickeren Diffusionsschicht und zum Teil zur Rissbildung. Bei langen Schweißzeiten (1000 ms) überwiegt ab einer bestimmten, nicht bekannten Warmhärte der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit. Das äußert sich darin, dass Elektroden mit geringerem Dispersoidanteil und geringfügig höherer elektrischer Leitfähigkeit höhere Standzeiten aufweisen als solche mit höherem Dispersoidgehalt und höherer Warmhärte. [5, 6, 16, 32]

### 3 Forschungsziel

Dieses Forschungsvorhaben verfolgte drei wesentliche Ziele:

- Bestimmung des bedarfsgerechten Fräszeitpunkts während der Fertigung
- Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl
- Verschleißmodell und Simulation.

Das erste Ziel widmet sich der Bestimmung des bedarfsgerechten Zeitpunkts zur Nachbearbeitung der Elektrodenarbeitsfläche während der Fertigung. Gemäß Voruntersuchungen der Antragsteller [6, 15, 32, 33] zeigen sich bei Übernahme der bekannten Zyklen auf Elektroden aus dispersionsgehärtetem Kupfer ein doppeltes bis dreifach größeres Potential in der ressourcenschonenden Materialnutzung. In Anbetracht der steigenden Kupferrohstoffpreise ist eine Elektrodenlebensdauererhöhung sehr erstrebenswert. Sowohl bei den Standard-Elektroden, als auch bei den dispersionsgehärteten Elektroden kann eine optimale Nutzung der Elektrodenkappen nur durch bedarfsgerechte Nachbearbeitungsstrategien gewährleistet werden. Dieses erste Ziel des Forschungsvorhabens soll durch eine teilautomatisierte oder vollautomatisierte Verschleißerkennung auf Basis der Prozessgrößen und einem minimal benötigten Abtrag erreicht werden. In den Untersuchungen wird auch das Zerspanverhalten, sprich die mechanische Zerspanbarkeit, der dispergierten Elektroden einbezogen.

Das zweite Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung einer Methodik zur Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl für Bauteile mit hoch anspruchsvollen Punktschweißaufgaben. Solche Bauteile bestehen z. B. aus hochfesten oder aluminieren Stählen, weisen große Blechdickenverhältnisse auf und können mit konventionellen Parametersätzen und Elektrodenwerkstoffen nicht geschweißt werden. Die Methodik soll kleine und mittelständische Unternehmen in die Lage versetzen, diese Punktschweißaufgaben effektiv zu bearbeiten. Dazu werden Schweißbereichsdiagramme erstellt und Standmengenexperimente durchgeführt. Sowohl mit Standard-CuCr1Zr-Elektroden, als auch mit dispersionsgehärteten Elektroden. Diese zweite Zielstellung ist aus der Problemstellung abgeleitet, das es bislang nur unzureichende Prozess- und Verschleißkenntnisse für hoch anspruchsvolle Punktschweißaufgaben gibt.

Das dritte Ziel ist die Erforschung der Verschleißvorgänge und die Simulation. Das Verständnis der Verschleißvorgänge, insbesondere für die dispersionsgehärteten Elektrodenwerkstoffe, soll mit der Analyse der Prozessparameterverläufe und der metallographischen Bewertung der Elektrodenkappen im Verlauf der Elektrodenlebensdauer erarbeitet werden. Diese Basis des dritten Ziels wird um die temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte erweitert. Mit den Materialkennwerten ist es möglich, SORPAS® Simulationen zur Ermittlung der Schweißbereiche zu erstellen und zu validieren.

Die drei Forschungsziele werden durch eine Kopplung von umfassender Metallographie, Ermittlung temperaturabhängiger Werkstoffkennwerte und Simulationen an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (Forschungseinrichtung 2) sowie von umfangreichen Schweißversuchen, konsistenter Parameteranalyse und einer Zerspananalyse an der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage (Forschungseinrichtung 1) erreicht. Das Vorhaben ist in neun aufeinander aufbauende und parallel verlaufende Arbeitspakete (AP) unterteilt. Die Interaktion zwischen den Forschungseinrichtungen ist in Abbildung 6 dargestellt. Arbeitspunkt 1 (AP 1) beinhaltet die Vorbereitung der Versuchsanlagen und die Materialbeschaffungen.

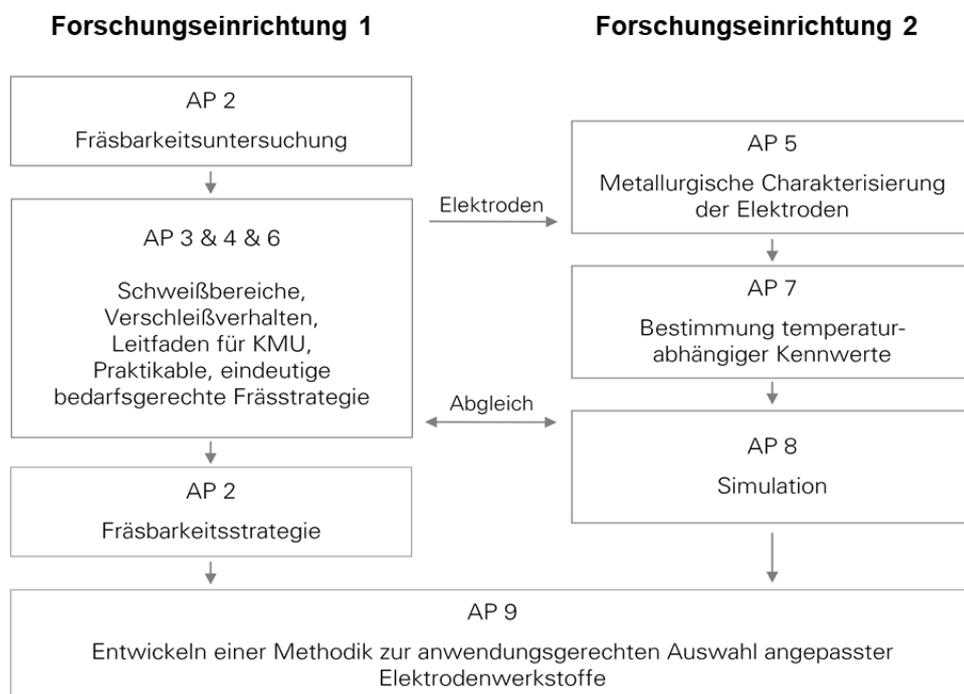


Abbildung 6: Arbeitsteilung und Interaktion der Forschungseinrichtungen während des Forschungsprojektes

Mit der ersten Zielstellung wird angestrebt die Elektrodenlebensdauer durch Einsatz verschleißabhängiger Nachbearbeitungsintervalle zu erhöhen. Da sich die Lebensdauer aus der Standmenge und der Anzahl der Nachbearbeitungszyklen ergibt, wird in AP 2 die Zerspanbarkeit der Elektroden untersucht. In den sich anschließenden AP 3 und AP 4 liegt der Fokus auf den Schweißbereichen und Standmengenuntersuchungen des Forschungsvorhabens. AP 3 konzentriert sich dabei auf einschnittige Schweißaufgaben mit typischen, verzinkten Stahlblechen (DC, DX bzw. HX), um mathematische Grundverständnisse bei Verschleißcharakterisierung, Parameteranalyse und auch Simulationsvalidierung zu ermöglichen. In AP 4 wird ein Spektrum an praxisnahen anspruchsvollen Schweißaufgaben abgebildet. Es finden Untersuchungen an Feinblechen

unterschiedlicher Festigkeiten und unterschiedlichen Beschichtungen (+Z, +AS) statt. Zum Einsatz kommen bei beiden Arbeitsschritten Standard-Elektroden und die am Markt verfügbaren dispersionsgehärteten Elektroden. Wesentliche Prozessgrößen werden während des Schweißens erfasst und mit den Daten der Prozessüberwachung für nachfolgende Arbeitspunkte aufgezeichnet. Die mit AP 5 folgende metallographische Charakterisierung der Elektroden am Standmengenende ermöglicht es, Verformungen und Anlegierungen der Kontaktfläche zu bestimmen. Hieraus lässt sich die notwendige Abtragtiefe beim Zerspanen bestimmen und optimieren. Neben dem richtigen Zeitpunkt zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche bestimmt diese Einstellung die Elektrodenlebensdauer wesentlich. Aus den Messgrößen von AP 3 und AP 4 lassen sich unter Bezug auf den jeweils realen Punktdurchmesser bedarfsgerechte Zerspanstrategien ableiten, mit denen sich wertvolle Kupferressourcen einsparen lassen. Dabei wird auch eine vollautomatische Verschleißerkennung angestrebt.

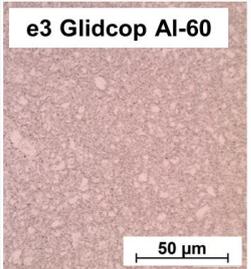
Der Fokus der zweiten Zielstellung wird auf der Zusammenstellung von Grenzen und Möglichkeiten der Standard-Elektroden und der dispergierten Elektroden für hochanspruchsvolle Schweißaufgaben liegen. Diese Erkenntnisse fließen in den praxisgerechten Abschnitt der „Methodik zur anwendungsgerechten Auswahl von Elektroden und Prozessparametern hinsichtlich Verschleiß und Zerspanstrategie“ ein. Eine solche Orientierungshilfe zur Umsetzbarkeit des sehr wirtschaftlichen Widerstandspunktschweißens an neuen Fertigungsaufgaben wird zur Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen erarbeitet. Dieses Ziel ist unmittelbar mit dem ersten Ziel verbunden, da die Zusammenstellung aus den in AP 4 erarbeiteten Schweißbereichen generiert wird.

In der dritten Zielstellung sind eine Beschreibung des Elektrodenverschleißes der dispergierten Elektroden, die Erstellung eines Simulationsmodells und der wissenschaftliche Abschnitt der „Methodik zur anwendungsgerechten Auswahl von Elektroden und Prozessparametern hinsichtlich Verschleiß und Zerspanstrategie“ vorgesehen. Die Beschreibung des Elektrodenverschleißes (AP 7) wird aus den Erkenntnissen der Schweißbereichsermittlung sowie der Standmengenuntersuchung (AP 3 und AP 4), der Prozessparameteranalysen (AP 6), der metallographischen Untersuchungen zu Anlegierungsneigungen sowie Verschleißbeständigkeit (AP 5) und der Werkstoffkennwertermittlung (AP 7) erstellt. Um das Simulationsmodell zu erzeugen, wird auf die in AP 7 durch Warmdruckversuche bestimmten wesentlichen temperaturabhängigen mechanischen und elektrischen Kennwerte zurückgegriffen. Zur anschließenden Validierung des Simulationsmodells werden die Schweißbereiche aus AP 3 und AP 4 genutzt.

## 4 Versuchswerkstoffe

Auf der ersten und zweiten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses am 29.09.2015 und am 07.04.2016 wurden die Versuchswerkstoffe (Elektroden, Bleche, Schneidmesser) konkretisiert (Tabelle 2, Tabelle 3, Tabelle 4). Der Elektrodenkappenwerkstoff e4 Discup C0/65 konnte nicht in den für die Werkstoffcharakterisierung notwendigen Dimensionen bereitgestellt werden. Daher wurden für die Untersuchungen der Werkstoff Discup C3/60 und Discup C3/80 (C3/80 nur für Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten mit dem HotDisk-Verfahren vgl. Tabelle 9) herangezogen. Laut Hersteller sind die Messdaten skalierbar. Die Bezeichnung der Versuchsreihen (VR) wurde von der Bezeichnung laut Forschungsantrag für das Forschungsvorhaben angepasst. Laut Forschungsantrag wurden im Arbeitspaket AP 3 Schweißbereiche und Standmengenuntersuchungen für zwei optimal simulierbare Punktschweißaufgaben erarbeitet. Hierzu gehörten VR01 und VR02. Im Arbeitspaket AP 4 wurden für ausgewählte hochanspruchsvolle Punktschweißaufgaben die Schweißbereiche ermittelt und teilweise Standmengenuntersuchungen durchgeführt. Zu diesem Arbeitspaket gehörten VR03 und VR04.

Tabelle 2: Elektrodenwerkstoffe für die Werkstoffcharakterisierung und Standmengenuntersuchungen

Schmelzmetallurgisch hergestellt		Pulvermetallurgisch hergestellt	
ISO 5182:2015-A2/2 <i>chem.</i> Zusammensetzung: Cr: 0,5-1,4 Wt.-% Zr: 0,03-0,3 Wt.-% Cu: Rest  Eingestellte optimale el. Leitfähigkeit	 <p><b>e1 CuCr1Zr</b></p>	 <p><b>e3 Glidcop Al-60</b></p>	ISO 5182:2015-C20/2  <i>chem.</i> Zusammensetzung: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,6 Wt.-% Cu: Rest  Hergestellt durch innere Oxidation
	 <p><b>e2 CuCr1Zr mod.</b></p>	 <p><b>e4 Discup C3/60 Discup C0/65</b></p>	ISO 5182:2015-C20/4 -C20/5  <i>chem.</i> Zusammensetzung: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,94 Wt.-% B: 0,2 Wt.-%  Hergestellt durch Reaktionsmahlen

Bezeichnung im Vorhaben	Werkstoff
e1	CuCr1Zr
e2	CuCr1Zr, modifiziert
e3	Glidcop AL60
e4	C0/65, C3/60

Tabelle 3: Materialdickenkombinationen für die Standmengenuntersuchungen

Bezeichnung laut Antrag	Bezeichnung im Projekt	Oberes Blech (Anode)	Mittleres Blech	Unteres Blech (Kathode)
VR2	VR01	HX340LAD+Z100, t = 2,0 mm		HX340LAD+Z100, t = 2,0 mm
VR3	VR02	DX53D+Z100, t = 0,65 mm		DX53D+Z100, t = 0,65 mm
VR6	VR03	22MnB5+AS150, t = 1,0 mm		22MnB5+AS150, t = 1,0 mm
VR8	VR04	DX53D+Z100, t = 0,65 mm	HC340LA+ZE75/75, t = 1,75 mm	22MnB5+AS150 t = 1,5 mm

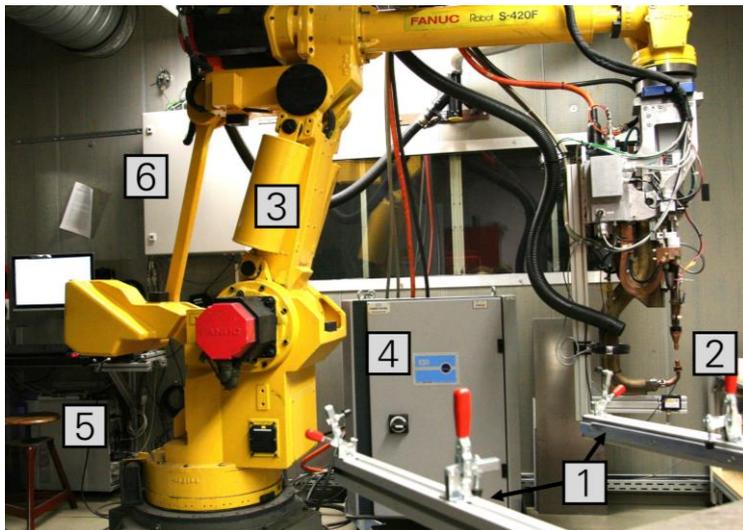
Tabelle 4: Geometrien der Elektrodenschneidmesser

F1-16-40	Arbeitsfläche 6 mm (r 40 mm)
F1-16-15	Arbeitsfläche 6 mm (r 15 mm)

## 5 Eingesetzte Anlagentechnik

### 5.1 Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen

Für die Ermittlung der Schweißbereiche und Durchführung der Standmengenuntersuchungen wurde der Versuchsstand an der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage eingesetzt (Abbildung 7). Die Kenndaten des Versuchstandes sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



- 1: Probenhalter
- 2: Schweißzange
- 3: Schweißroboter
- 4: Stromquelle
- 5: Mess- und Steuerrechner
- 6: Schaltschrank mit Messtechnik

Abbildung 7: Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen der Professur für Fügetechnik und Montage an der Technischen Universität Dresden

Tabelle 5: Kenndaten des Versuchsstands zum Widerstandspunktschweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage

Schweißstromquelle	Harms & Wende GmbH: HWG2708SKIQR-05, Inverterfrequenz: 1 kHz
Bediensoftware	Pegasus (Version 1.2r17), XPegasus (Version 1.0.0.395)
Schweißzange	C-Bauform an 6-Achs-Industrieroboter
Zangensteifigkeit	2,35 kN/mm
Zangenfenster	30 mm
Kraftsystem	servoelektrisch von 500 N – 3,6 kN
Messdatenaufzeichnung	Goldammer GmbH: G0S-1034-4

### 5.2 Elektrodenkappenfräser

Zur Durchführung der Zerspanbarkeitsuntersuchungen wurden zwei Elektrodenkappenfräsergeräte der Firma Bräuer Systemtechnik GmbH eingesetzt und zwei unterschiedliche Geometrien der Schneidmesser verwendet. Die Fräser bestehen aus einem Einfachkopfgetriebe und einer Antriebseinheit (Abbildung 8). Die Kenndaten sind in Tabelle 6

zusammengefasst. Zur genaueren Erfassung der Drehzahl während der Versuche wurde ein selbstentwickelter Drehzahlsensor (Abbildung 8) an beiden Fräsern appliziert.

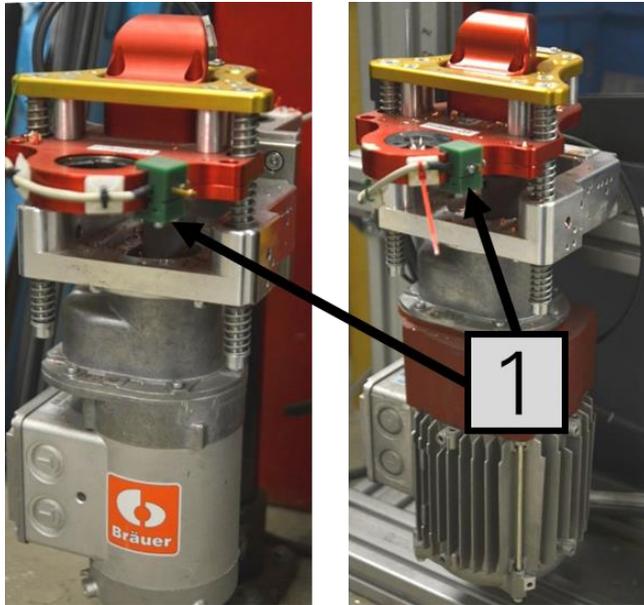


Abbildung 8: Elektrodenkappenfräser, Links: Fräser mit Nenndrehzahl  $330 \text{ min}^{-1}$  Rechts: Fräser mit Nenndrehzahl  $620 \text{ min}^{-1}$  (1: Drehzahlsensor)

Tabelle 6: Kenndaten des Versuchsstands zum Elektrodenkappenfräsen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage

Fräser $330 \text{ min}^{-1}$	Typ: F-3600.037.500, Motor Nenndrehzahl: $390 \text{ min}^{-1}$
Fräser $620 \text{ min}^{-1}$	Typ: BF-3600.034.500, Motor Nenndrehzahl: $750 \text{ min}^{-1}$
Schneidmesser R15	Material: Schnellarbeitsstahl/HSS Beschichtung: Titanitrid (TiN) Spanwinkel: $0^\circ$ Freiwinkel: $3^\circ$ Balligkeitsradius: 15 mm Arbeitsflächenradius: 6 mm
Schneidmesser R40	Material: Schnellarbeitsstahl/HSS Beschichtung: Titanitrid (TiN) Spanwinkel: $0^\circ$ Freiwinkel: $3^\circ$ Balligkeitsradius: 40 mm Arbeitsflächenradius: 6 mm

### 5.3 Messtechnik zur Datenerfassung beim Widerstandspunkt-schweißen

Die Datenerfassung während der Zerspan- und Schweißversuche erfolgte mit der am Versuchsstand angeschlossenen G0S-1034-4 der Goldammer GmbH. Die Messdaten nach Tabelle 7 wurden mit einer Messfrequenz von 100 kHz pro Kanal aufgezeichnet.

Tabelle 7: Messgrößen und Gerätetechnik zur Datenerfassung für die Zerspan- und Schweißversuche

Messgröße	Sensor	Versuchstyp
Drehzahl	Hall-Sensor A1324, Allegro Systems	Zerspanversuche
Durchflussmenge Kühlwasser	Durchflussmessturbinen VISION 2000, BioTech	Schweißversuche
Temperatur Kühlwasservorlauf	Thermoelement Typ-T, Messumformer: TXDIN1600T, Omega Engineering GmbH	Schweißversuche
Temperatur Anode/Kathode	Thermoelement Typ-K, Messumformer: ,ISC-TC Omega Engineering GmbH	Schweißversuche
Schweißspannung	Prozesssensor P 100 K, HKS Prozesstechnik GmbH	Schweißversuche
Elektrodenkraft	Ladungsverstärker ICAM Type 5073, Kistler Instrumente AG	Zerspanversuche, Schweißversuche
Schweißstrom	Prozesssensor P 100 K, HKS Prozesstechnik GmbH	Schweißversuche
Wegmessung Anode/Kathode	Wegmesssensoren OADM 20U2460/S14C, Baumer Electric AG	Zerspanversuche, Schweißversuche
Widerstandsmessung	Freigabemodul V01 [34]	Schweißversuche

### 5.4 Chromatisch konfokale Mikroskopie zur Oberflächentopographiemessung

Ein Konfokal-Mikroskop ist eine spezielle Form eines Lichtmikroskops. Übliche Lichtmikroskope ermöglichen durch eine mehrstufig vergrößerte Abbildung eine detaillierte Betrachtung des Objekts. Ähnlich wie bei einem Fotoapparat entspricht das Abbild einer Überlagerung von Punkten innerhalb und außerhalb der Fokusebene (Fokalebene), welche vom Detektor, beispielsweise dem menschlichen Auge, nicht unterschieden werden können oder noch als scharf empfunden werden. Die konfokale Mikroskopie reduziert diese Unschärfe deutlich und ermöglicht somit eine detaillierte Auswertung des Objekts auch in axialer Richtung. Aus diesem Grund eignet sich die konfokale Mikroskopie besonders für flächenhafte Rauheitsmessungen und Abbildung von 3D-Mikrogeometrien.

In Abbildung 9 werden die Messprinzipien der konfokalen Mikroskopie gezeigt. Eine Lochblende (Pinhole) mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern wird von einer

Weißlichtquelle beleuchtet (s. Abbildung 9 links, Markierung 1). Daraus entsteht eine Punktlichtquelle, welche durch entsprechende Objektive und Strahlleiter auf der Oberfläche des Werkstücks abgebildet wird. Die Lage des Werkstücks in Richtung der optischen Achse bestimmt die Schärfe, mit der die Punktlichtquelle als Lichtscheibe mit unterschiedlichem Durchmesser auf dem Werkstück abgebildet wird. Das von diesem beleuchteten Werkstückpunkt ausgehende Licht (Fluoreszenzlicht, reflektiertes Licht) wird über die gleiche Optik und Strahlteiler auf eine Lochblende vor dem Sensor abgebildet. Bei Abbildung 9 links, Markierung 2 befindet sich die Werkstückoberfläche exakt in der Fokalebene, so dass sich ein scharfer Lichtpunkt auf der Blende abbildet. Ist die Werkstückoberfläche, wie bei Markierung 3, außerhalb der Fokalebene sinkt die Intensität des reflektierten Lichts dementsprechend am Sensor ab. Einen speziellen Anwendungsfall der konfokalen Mikroskopie stellt die Verwendung eines konfokal-chromatischen Sensors dar (s. Abbildung 9 rechts). Der Messbereich solcher Sensoren liegt zwischen 100  $\mu\text{m}$  bis hin zum Millimeterbereich bei einer Auflösung von ca. 10 nm – 30 nm vertikal und einem Mikrometer lateral. Der Aufbau einer konfokal-chromatischen Messeinrichtung unterscheidet sich von einem konfokalen Mikroskop im Sensor, wo stattdessen ein Spektrometer eingesetzt wird, und im fokussierenden Objektiv, welches über eine möglichst große chromatische Aberration verfügt.

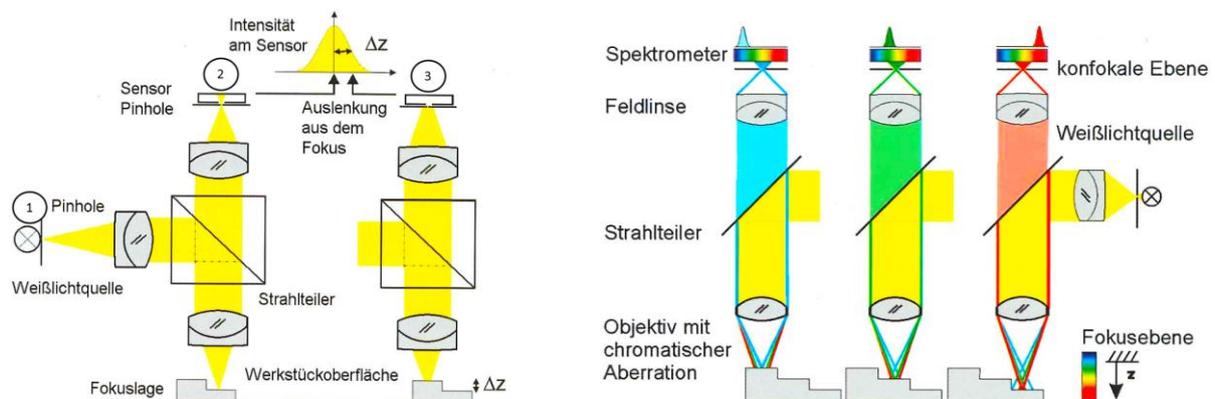


Abbildung 9: Konfokale Mikroskopie (links) und konfokal-chromatische Mikroskopie (rechts) - Funktionsprinzip [35, S. 31 ff.]

Die Erfassung der Oberflächentopographien der Elektrodenkappen und der Schweißpunkte erfolgte mit dem chromatisch-konfokalen Präzisionsgerät CHRcodile E der Firma Precitec. Dieses System verfügt über einen Messfleckdurchmesser von 15  $\mu\text{m}$  und einer Tiefenauflösung von 300 nm bei einer absoluten Messunsicherheit von 3  $\mu\text{m}$  (Abbildung 10). Es erlaubt die Vermessung von Elektrodenkappen im eingebauten Zustand und damit eine detaillierte Verschleißbewertung der Elektrodenkappen zwischen zwei Punktschweißvorgängen. Der verwendete Messkopf trägt die Bezeichnung „PV-Portable Alio“ mit Seriennummer 0460-B.0000/03-03.

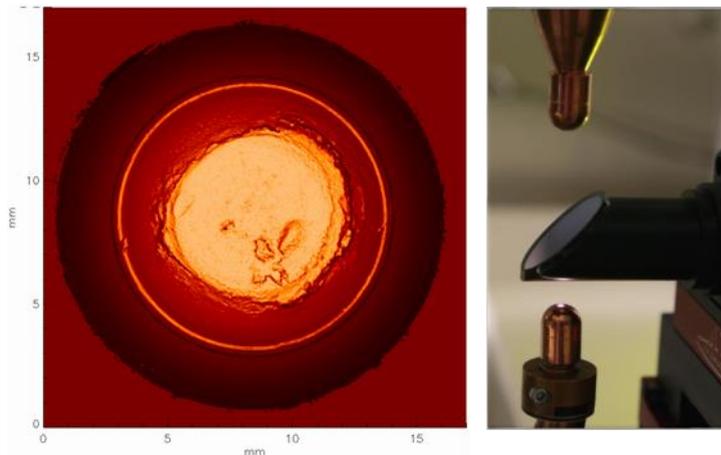


Abbildung 10: Links: Elektrodenkontaktfläche einer CuCr1Zr-Elektrode kurz vor dem Standmengenende; Rechts: das konfokal chromatische Messsystem beim Vermessen im eingebauten Zustand

## 5.5 Thermomechanischer Simulator Gleeble 3500

Die Gleeble® 3500-Anlage des Entwicklers und Herstellers Dynamic Systems Incorporated ist ein thermomechanischer Simulator, der eine Kombination aus Hochgeschwindigkeitsdilatometer und Zug-/Druck-Prüfmaschine ist (Abbildung 11). Mit der Anlage ist nicht nur die Simulation beliebiger konventioneller Temperaturzyklen wie bei der Wärmebehandlung und beim Schmelzschweißen möglich, sondern auch die Simulation von Strahlprozessen mit hohen Aufheizgeschwindigkeiten und einer hohen Wärmekonzentration. Andere Einsatzgebiete dieser Anlage sind die Simulation von Schweißtemperaturzyklen mit begleitender Nachwärmung, Abschreckvorgänge, pulvermetallurgische Prozesse, die Ermittlung wärmephysikalischer Materialkennwerte, usw. Eine schematische Darstellung der Anlage ist in Abbildung 12 zu finden.

Das mechanische System der Anlage ist ein integriertes hydraulisches Servosystem, das die mechanische Belastung der Proben mit Werten von bis zu 100 kN mit hohen Geschwindigkeiten bis 1 m/s ermöglicht. Die Messvorrichtungen der Anlage ermöglichen zudem eine hochpräzise Durchführung und eine hohe Wiederholbarkeit der mechanischen Untersuchungen bei Raum- oder höheren Temperaturen.

Die Erwärmung der Proben erfolgt über das thermische System. Die Proben werden konduktiv mit einer Leistung von bis zu 75 kW erwärmt. Dieses System ermöglicht prinzipiell extrem hohe Aufheizgeschwindigkeiten bis 10000°K/s, die vom Versuchswerkstoff und von der Probengeometrie abhängig sind. Unter Anwendung der WC-Co Einspannbcken ist die Aufheiz- bzw. Abkühlgeschwindigkeit auf 5°K/s begrenzt. Die Temperaturmessung und -steuerung erfolgt über die Thermodrähte, die auf der Oberfläche der Probe aufgeschweißt werden, oder kontaktlos über ein Pyrometer.

Beide Systeme sind miteinander gekoppelt. Die Programmierung des mittels Windows betriebenen PC-Steuersystems erfolgt tabellarisch oder in einer maschineneigenen Sprache. Eine Auswahl technischer Daten der Gleeble 3500 ist in Tabelle 8 dargestellt.

Die Gleeble Anlage besteht im Wesentlichen aus den Einheiten Arbeitskammer, hydraulischer Pumpe, Kontroll- und Steuereinheit, Computer sowie Kühlung, siehe Abbildung 11.



Abbildung 11: Gleeble 3500 in der Gesamtansicht (links) mit Schaltschrank, Hydrauliksystem, Absaugung und Vakuumpumpe. Nicht dargestellt ist der Programmierer-PC. Zentral befindet sich die Arbeitskammer (rechts)

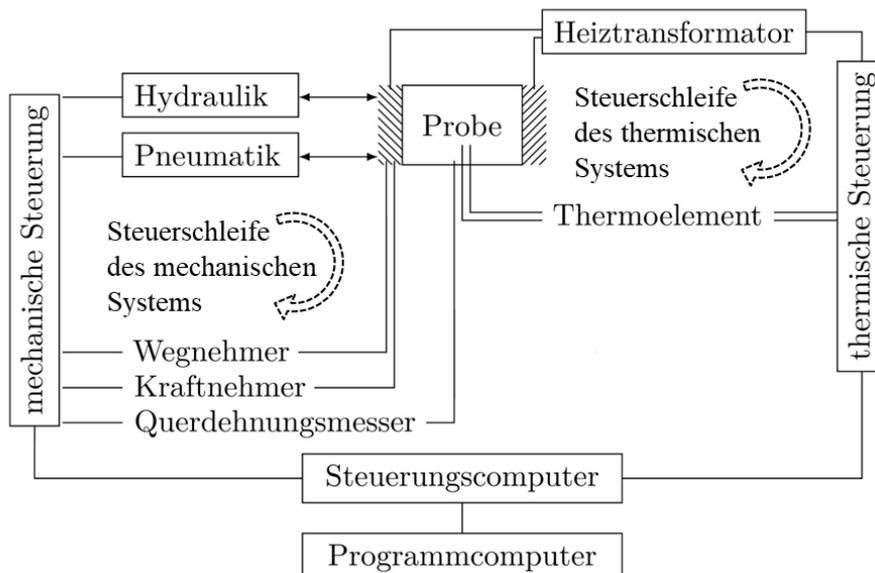


Abbildung 12: Schema der Gleeble-Anlage

Tabelle 8: Auswahl von technischen Daten der Gleeble 3500, ausgestattet mit WC-Co Druckbacken nach [36]

Aufheiz- und Abkühlrate	max.: 5°K/s
Bewegungsgeschwindigkeiten für Schlag, Zug und Druck	0,01 bis 1.000 mm/s
Hub	max.: 100 mm
Kraft	max.: 100 kN
Probengröße	max. Ø 19 mm

## 6 Ermittlung der Werkstoffeigenschaften

Im Rahmen des Projektes erfolgte die Ermittlung der Werkstoffeigenschaften, mit dem Ziel, genaue Einflüsse der jeweiligen Werkstoffkennwerte auf das Verhalten der Elektrodenkappen im Schweißprozess zu beurteilen und Schweißprozesssimulation in der Software „SORPAS“ für neuartige partikelverfestigte und schmelzmetallurgisch hergestellte Legierungen zu ermöglichen. Eine Übersicht der charakterisierten Werkstoffeigenschaften und der dafür verwendeten Messmethoden ist in der Tabelle 9 dargestellt. Außerdem wurden für alle Versuchswerkstoffe und Werkstoffzustände metallographische Untersuchungen und Härtemessungen durchgeführt. Im Weiteren werden die einzelnen Versuchsmethoden erklärt, die Randbedingungen für die Versuchsdurchführung, sowie die Versuchsergebnisse vorgestellt. Die Charakterisierung des Werkstoffs CuCr1Zr (e1) erfolgte durch WSK GmbH im Rahmen eines Auftrags, die Messergebnisse wurden im Projekt übernommen und für die Überprüfung der verwendeten Messmethoden angewendet.

Tabelle 9: Übersicht der im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung ermittelten Werkstoffeigenschaften und der dafür verwendeten Methoden

			Wärmeleitfähigkeit		Fließkurven	elektrische Leitfähigkeit	
			Hot Disk	Laser Flash	Druckversuch	Wirbelstrom 0-50°C	4-Leiter Methode RT-900°C
Werkstoff	e1	CuCr1Zr	O***	O*	O	O	O*
	e2	CuCr1Zr mod.	O***	X	O	O	O
	e3	Glidcop Al-60	X	X	Bis 600°C**	O	O
	e4	Discup C3/60	X	X	O	O	O
		Discup C3/80	O***	X	X	O	O
O – Messungen abgeschlossen					X – Messungen nicht erforderlich/möglich		

\* Messungen durchgeführt durch WSK GmbH (gegeben im Auftrag durch Forschungseinrichtung 1)

\*\* Ermittlung der Fließkurven möglich nur bis 600°C, danach erfolgte eine starke Beschädigung der Proben, die Gründe dafür werden in Abschnitt 6.2.1 diskutiert

\*\*\* Messungen nur bei Raumtemperatur möglich

### 6.1 Versuchsdurchführung

#### 6.1.1 Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands

Der spezifische elektrische Widerstand ist eine werkstoff- und temperaturabhängige Größe, die den Energiefluss eines Werkstoffs beeinflusst. Für eine Widerstandspunktschweißelektrode ist ein möglichst geringer spezifischer elektrischer Widerstand anzustreben, um einen effizienten Stromfluss ohne hohe Verluste durch Erwärmung zu

gewährleisten. Zur Ermittlung des spezifischen elektrischen Widerstands stehen prinzipiell zwei potentielle Messmethoden zur Verfügung. Einerseits lässt sich aus Messungen der fließenden Erwärmungsstromstärke  $I_E$  und Spannung  $U$  auf den Widerstand  $R$  schließen. Unter Anwendung des Ohm'schen Gesetzes in Verbindung mit dem Querschnitt  $A$  und der Länge  $l$  des Probekörpers kann somit auf den spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  geschlossen werden. Durch Umstellen der Formel (2) ergibt sich der spezifische elektrische Widerstand zu:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} = \frac{U}{I_E} \cdot \frac{A}{l} \quad (2)$$

Da es sich bei dem spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$  um den Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa$  handelt, kann andererseits der spezifische elektrische Widerstand auch über die Leitfähigkeit ermittelt werden. Eine Leitfähigkeitsbestimmung unter Ausnutzung des Wirbelstromprinzips berechnet über Wirbelstromwiderstände den Wert von  $\kappa$ . Es gilt der Zusammenhang:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Nach DIN EN ISO 5182 [37] hat die Überprüfung der elektrischen Eigenschaften von Elektrodenwerkstoffen in Übereinstimmung mit der ASTM E 1004 [38] zu erfolgen, die Hinweise auf die Wirbelstrommessung liefert. Wirbelströme werden je nach spezifischem elektrischen Widerstand des Werkstoffs behindert und können über die angesprochene Kehrwertbildung wiederum in die elektrische Leitfähigkeit umgerechnet werden. Jedoch beschreibt die ASTM E 1004 [38] keinen Versuchsaufbau, Durchführung oder Auswertung. So ist unter anderem die Messung bei Raumtemperatur empfohlen, wiederum ohne Hilfestellung für die Messungen bei erhöhten Temperaturen.

Die Messung des spezifischen elektrischen Widerstands erfolgt mittels Vier-Leiter-Methode. Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 13 dargestellt. Die Proben mit dem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 50 mm werden mit vier Anschlüssen zur Anleitung von Strom und Abgriff der Spannung versehen. Die Befestigung der Drähte erfolgt mittels Cr-Ni Schrauben (Abbildung 13(b)). Die Abstände zwischen den Spannungsabgriffen wurden gemessen und dokumentiert. Die Temperaturmessung erfolgte mit Typ-K Thermoelementen, die an der Probenstirnfläche befestigt wurden. Die Temperierung der Proben erfolgte in einem Infrarotofen (Abbildung 13(a)). Zum Schutz vor Oxidation wurde der Ofen mit Stickstoff gespült. Die Probe wurde auf Zieltemperatur gebracht und fünf Minuten gehalten, um eine gleichmäßige Durchwärmung der Probe zu gewährleisten. Danach wurde ein Gleichstrom von 10 A an der Probe angeschaltet, nach

ca. 15 Sekunden wurden die Anzeigen der Stromquelle und des Voltmeters abgelesen. Pro Werkstoff wurden zwei Proben mit jeweils drei Messungen pro Temperaturstufe (RT (ca. 21°C), 100°C, 200°C, 500°C, 700°C und 900°C) gemessen.

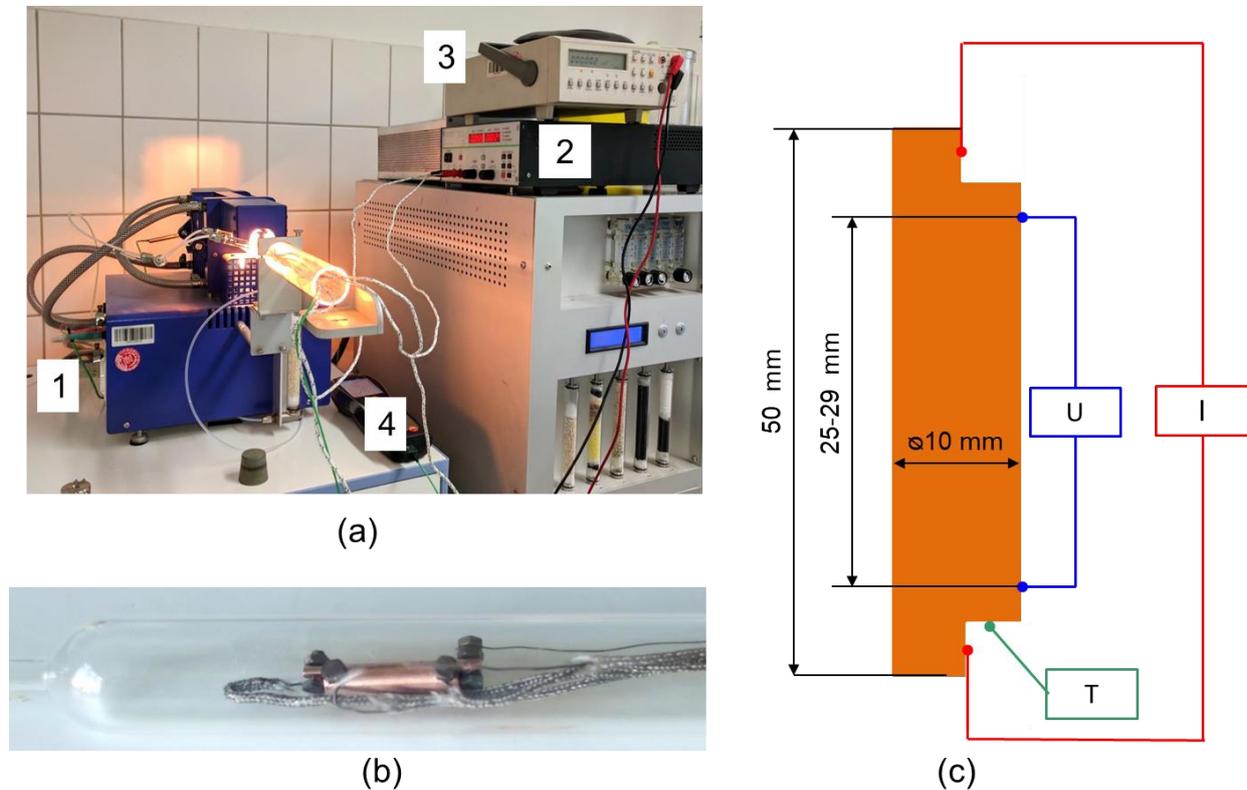


Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Ermittlung des spezifischen elektrischen Widerstands mittels Vier-Leiter-Methode: (a) Versuchsaufbau 1 - Infrarotofen; 2 - Stromquelle; 3 - Voltmeter; 4 - Temperaturmessgerät; (b) Probe mit Stromanschlüssen und Spannungsabgriffen in einer Quarzglasröhre des Infrarotofens; (c) schematische Darstellung des Messsystems

### 6.1.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit mit Wirbelstrom

Die Messung der Leitfähigkeit erfolgte durch die Anwendung des Geräts SIGMATEST 2.068, dargestellt in Abbildung 14. Das Gerät arbeitet nach dem Wirbelstromprinzip und besteht im Wesentlichen aus einem Messsensor, einer Kalibriereinheit und der Anzeigeeinheit. In dem Messsensor befindet sich eine Spule. Diese wird von Wechselstrom durchflossen und bildet ein Magnetfeld um die Spule. Wird der Sensor auf ein elektrisch leitfähiges Material gesetzt, dringt das magnetische Feld in den Werkstoff ein und generiert darin Wirbelströme. Gemäß der Lenz'schen Regel wirken die Wirbelströme ihrer Ursache entgegen und lassen sich als Änderung der Wirbelstromwiderstände, auch Impedanzen genannt, von der Sensorspule als Messwert abgreifen. Dieses Signal erscheint als Angabe der elektrischen Leitfähigkeit auf der Anzeige [39]. Nach dem Einschalten

wurde das Gerät zunächst kalibriert. Hierzu wurde der Messsensor nacheinander auf zwei Kalibrierwerkstoffe im unteren Teil des Geräts aufgesetzt, die sich am unteren bzw. oberen Rand des Messbereichs befanden. Eine Probeleitfähigkeitsmessung auf diesen Kalibriernormalen zeigte, ob das Gerät korrekt eingestellt ist. Entsprechend der angezeigte Wert nicht der zugehörigen Leitfähigkeitsangabe der Testmaterialien, wurde das Ergebnis auf diese Angabe nachgeregelt.



Abbildung 14: Wirbelstrommessgerät SIGMATEST 2.068

Für die Messung eignen sich ausschließlich plane oder nur sehr gering gewölbte Oberflächen. Bei der eigentlichen Messung ist darauf zu achten, dass sich der Messsensor stets in der Mitte der Probe mit ausreichend Abstand zur Kante befindet, damit das Ergebnis nicht verfälscht wird. Die einzige einstellbare variable Größe ist die Eindringtiefe  $\delta$ , welche sich über die Messfrequenz  $f$  am Gerät regeln lässt. Die Eindringtiefe gibt an, wie weit die Wirbelströme in das Material hineinreichen. Diese ist in Anlehnung an [40] definiert als:

$$\delta = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\omega \cdot \kappa \cdot \mu_0 \cdot \mu_R}} \quad (4)$$

mit  $\omega = 2\pi f$  folgt:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \kappa \cdot \mu_0 \cdot \mu_R}} \quad (5)$$

Nach Formel (5) ist ersichtlich, dass die Eindringtiefe nur abhängig von der Frequenz  $f$  ist, da die anderen Größen Werkstoffkonstanten sind. Um die größte Eindringtiefe zu generieren, erfolgte die Messung mit der minimal einstellbaren Frequenz von 60 kHz. Somit ließen sich Einflüsse von Oberflächenschichten, Oberflächenrauheit, möglicher

Verunreinigungen auf der Probenoberfläche und einem möglichen Verkippen des Messsensors auf der Probe vermindern. Für den Werkstoff CuCr1Zr ergab sich somit beispielsweise eine Eindringtiefe von ca. 0,2 mm. Abbildung 15 zeigt den Versuchsaufbau der Wirbelstrommessung, dessen Durchführung für die drei Messtemperaturen 0°C, Raumtemperatur und 50°C erfolgt ist. Diese Einsatzgrenzen sind durch die empfindliche Gerätetechnik des Messgeräts bedingt. Die unterschiedlichen Bauteile im Inneren würden sich bei noch kleineren bzw. größeren Temperaturen zu schnell und unterschiedlich stark zusammenziehen bzw. ausdehnen und könnten somit den Messkopf beschädigen. Die Proben wurden mit Thermoelementen vom Typ-K bestückt, die ein kontinuierliches Signal an den Analog-Digital-Umwandler HBM MX1600 sendeten, welches vom Laptop visualisiert wurde. Eine Messreihe pro Temperatur bestand aus zehn Messpunkten. Um die Probe auf 0°C herunter zu kühlen, wurde sie in ein Gefäß mit Eiswasser gelegt, welches die Proben bis 1mm unterhalb der zylindrischen Stirnfläche umspült. Der Temperaturverlauf konnte mit Hilfe der Thermoelemente überwacht und der Zeitpunkt der Messung festgelegt werden. Der durch das Aufsetzen des Wirbelstromsensors verursachte Temperaturanstieg konnte durch eine entsprechende Pause zwischen den Messpunkten ausgeglichen werden. Für die 50°C-Messung wurden die gleichen Proben mittels einer Heizplatte erwärmt. Zur besseren Wärmeübertragung wurde zusätzlich eine Paste auf Kupferbasis zwischen Probe und Heizplatte aufgetragen. Auch hier konnte der genaue Messmoment durch die Temperaturüberwachung mittels der Thermoelemente bestimmt werden. Eine exakte Zuordnung der Temperatur pro Messpunkt erfolgte im Nachhinein durch Auswertung der Temperaturverläufe.

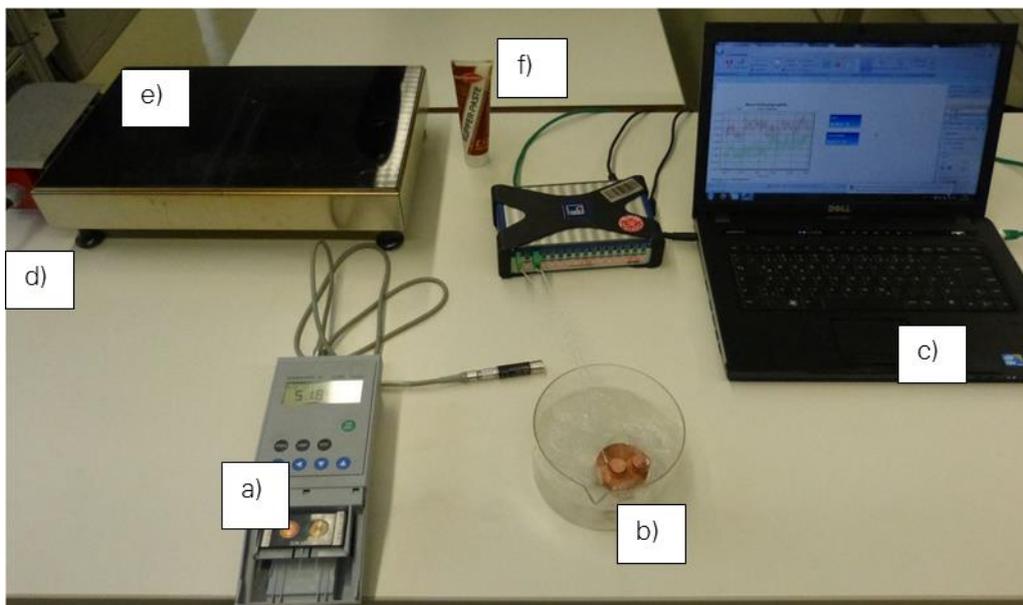


Abbildung 15: Versuchsaufbau bei der Wirbelstrommessung; a) SIGMATEST 2.068, b) Kupferproben mit Thermoelement in Eiswasser, c) Messlaptop, d) Analog-Digital-Umwandler, e) Heizplatte, f) Kupferpaste

Die ermittelten Messwerte konnten über den physikalischen Zusammenhang der Temperaturabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstands für den festen Aggregatzustand durch Formel (6) und (7) beschrieben und über den gewünschten Temperaturbereich extrapoliert werden. Nach [41] gilt:

$$\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6)$$

$$\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad (7)$$

Für die meisten Anwendungen kann von einem linearen Verlauf ausgegangen werden. Speziell im Temperaturbereich oberhalb von 500°C würde es dann zu höheren Abweichungen zwischen dem linearen und dem tatsächlichen Widerstandsverlauf kommen. Jedoch entspricht der Temperaturbereich um 900°C eher den Einsatztemperaturen von Elektrodenkappen [42].

In Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde daher der Zusammenhang der Temperaturabhängigkeit nach Formel (7) für CuCr1Zr (e1) und CuCr1Zr, mod. (e2) berechnet. Für die Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeiten für Glidcop AL60 (e3) und Discup C3/60 (e4) wurde ein linearer Zusammenhang nach Formel (6) verwendet. Für eine Extrapolation wurden die Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  aus den in Abschnitt 6.1.3 beschriebenen Messungen berechnet. Anschließend wurden die mittels Wirbelstrom gemessenen Punkte des Widerstands mit den ermittelten Temperaturkoeffizienten über den gewünschten Temperaturbereich bis 900°C extrapoliert.

### 6.1.3 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

#### 6.1.3.1 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit mit HotDisk

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte mit dem transienten Flächenquellenverfahren (Hot Disk Verfahren) [43–45]. Mit dem Verfahren ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der volumenspezifischen Wärmekapazität, sowie der Temperaturleitfähigkeit möglich. Das Verfahren ist in [45] für die Messungen an Kunststoffen ausführlich beschrieben.

Die Messungen mit dem Hot-Disk TPS 2500S wurden mit folgenden Messparametern durchgeführt: Sensor 4992 mit dem Radius  $r_s = 14,97$  mm, Messzeit 1 s, Heizleistung 10 W (nach [46]). Aus der Messzeit kann die Eindringtiefe der Wärme in einen Messkörper nach Formel (8) berechnet werden, wobei  $\kappa$  die Temperaturleitfähigkeit des untersuchten Werkstoffes in  $\text{mm}^2/\text{s}$  ist.

$$\Delta p_{\text{prob}} = 2(\kappa t_{\text{mess}})^{1/2} \quad (8)$$

Während der Messung wurde die Wärmeausbreitung innerhalb eines Messvolumens mit der Höhe von  $h = 2\Delta_{prob}$  und einem Durchmesser  $d = 2r_s + 2\Delta_{prob}$  aufgenommen (Abbildung 16). Das Messvolumen muss unbedingt innerhalb des Messkörpers liegen. Für reines Kupfer mit  $\kappa = 107 \text{ mm}^2/\text{s}$  ergeben sich die Probenabmessungen: Probenhöhe  $h_p \geq 20,7 \text{ mm}$  und der Probendurchmesser  $d_p \geq 71,3 \text{ mm}$ . Die Proben mit einem Durchmesser von  $d_p = 80 \text{ mm}$  und einer Mindesthöhe von 28 mm wurden aus zwei CuCr1Zr Werkstoffen und einem dispersionsverfestigten Werkstoff gedreht. Anschließend wurde die Oberfläche, die mit dem Sensor kontaktiert, mit SiC-Schleifpapier in zwei Stufen mit 500er und 1000er Körnung geschliffen.

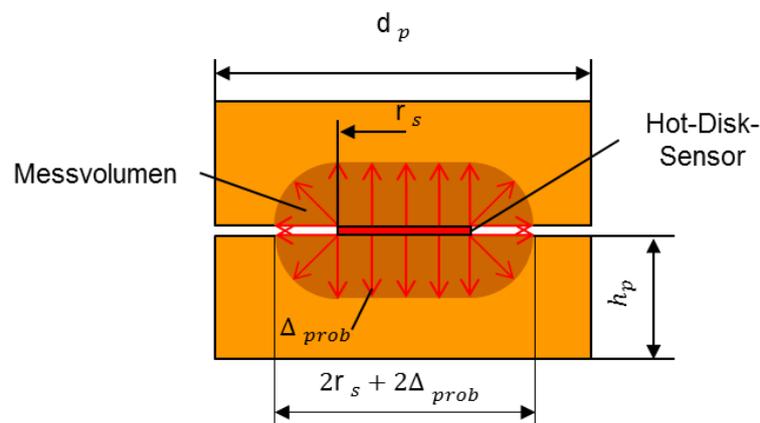
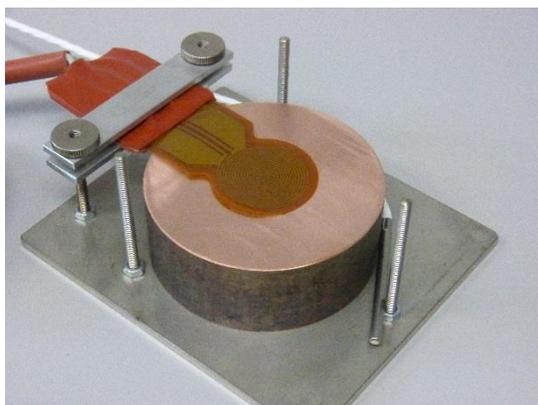


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Probengeometrie und des Messaufbaus für das Hot-Disk-Verfahren nach [46]



(a)



(b)

Abbildung 17: Messaufbau für Hot-Disk-Verfahren (Probendurchmesser 80 mm). (a) Positionierung des Hot-Disk-Sensors zwischen den Proben; (b) Messaufbau

Der Hot-Disk-Sensor wurde zwischen zwei Proben eingelegt (Abbildung 17 (a)). Um einen sicheren Kontakt zwischen dem Sensor und den Proben zu gewährleisten, wurde die obere Probe mit einem 3 kg Gewicht belastet. Bei der Raumtemperaturmessung (ca.  $23^\circ\text{C}$ ), erfolgte die Temperaturmessung mittels eines externen Temperatursensors

(Abbildung 17 (b)). Die Probe wurde 240 Minuten bei der eingestellten Temperatur gehalten, um zu sichern, dass das thermische Gleichgewicht in der Probe eingestellt ist. Danach erfolgten mindestens zehn Messungen mit 45 Minuten Wärmeausgleichzeit dazwischen.

### 6.1.3.2 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wiedemann-Franz'schen Gesetz

Die Wärmeleitfähigkeit im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 900°C kann aus dem gemessenen spezifischen elektrischen Widerstand mit Hilfe des Wiedemann-Franz'schen Gesetzes nach Formel (9) berechnet werden. Dabei wird die Lorenzzahl für Kupfer aus [47]  $L = 2,33 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega\text{K}^{-2}$  verwendet.

$$\lambda = \frac{LT}{\rho} \quad (9)$$

Der Vergleich zwischen Wärmeleitfähigkeiten, die aus den spezifischen elektrischen Widerständen berechnet wurden, den Messwerten der HotDisk und Laserflash-Messungen ist in Abbildung 18 veranschaulicht. Es sind zwar Abweichungen zwischen den Methoden zu sehen, Änderungen der Wärmeleitfähigkeit können jedoch mit dem Wiedemann-Franz'schen Gesetz qualitativ gut beschrieben werden. Im Weiteren wurden die Wärmeleitfähigkeiten für alle vier Versuchswerkstoffe berechnet.

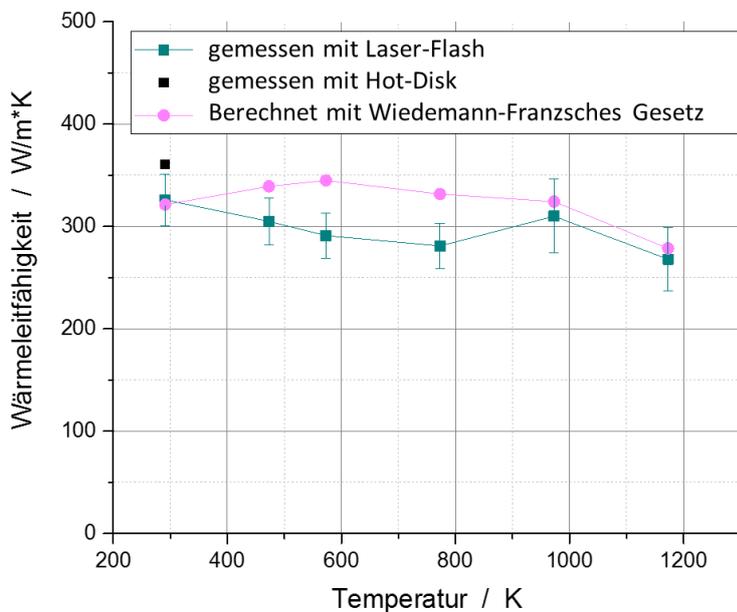


Abbildung 18: Wärmeleitfähigkeit von CuCr1Zr, ermittelt mit drei unterschiedlichen Methoden

### 6.1.4 Durchführung der Druckversuche mit dem Gleeble 3500

In den vorliegenden Experimentreihen war der Druckversuch mit zylindrischen Proben das am besten geeignete Verfahren. Beim Druckversuch wird eine Probe zwischen zwei parallelen Stempeln platziert, die anschließend aufeinander zu fahren und auf die Probe drücken. Homogene Deformation und ein einachsiger Spannungszustand sind für die korrekte Bestimmung der Fließkurven unbedingt erforderlich. Um dies zu gewährleisten, muss die Reibung möglichst gering gehalten werden. Ist die Reibung oberhalb eines optimalen Bereichs, wird die Messung verfälscht, da sich die Probe ungleichmäßig verformt [48]. Für minimale Reibungsverhältnisse kann die wahre Fließspannung  $\sigma$  und die wahre Dehnung  $\varepsilon$  unter Annahme der Volumenkonstanz der Probe wie folgt berechnet werden:

$$\sigma = 2 \cdot \ln\left(\frac{F}{\frac{\pi \cdot (d_0 + \Delta d)^2}{4}}\right) \quad (10)$$

$$\varepsilon = 2 \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d_0 + \Delta d}\right) \quad (11)$$

Für Proben zur Fließkurvenermittlung im Druckversuch geben zahlreiche Quellen ein Höhe/Durchmesser-Verhältnis von  $1 < h/d < 2$  vor, in Anlehnung an DIN 50106 [49]. Ein optimales Verhältnis beträgt der Wert 1,5 [50]. Es besteht bei größeren Verhältnissen eine hinreichende Knickgefahr während des Versuchs. Dementsprechend werden die Druckversuche mit den Proben  $\varnothing 10 \times 15$  mm durchgeführt.

Die Druckversuche wurden mit Gleeble 3500 durchgeführt. Zur Steuerung der Versuche wurde ein Programm geschrieben, welches im Anhang C.5 zu finden ist. Die Proben wurden auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, 10 s gehalten um einen Temperaturausgleich in der Probe zu erreichen und anschließend auf Druck belastet. Dabei wurden kontinuierlich Temperatur, Zeit, Kraft und Durchmesser der Probe aufgenommen, die wahre Spannung und wahre Dehnung wurden nach Formel (10) und Formel (11) berechnet.

Im Gegensatz zu anderen Heizsystemen, beispielsweise einem Ofen, erwärmt die Gleeble 3500 den Versuchskörper konduktiv, was die Erwärmung mit einer wesentlich höheren Aufheizgeschwindigkeit ermöglicht (5 K/s mit der Gleeble 3500 im Vergleich zu ca. 5 K/min in dem Ofen).

Dadurch, dass die elektrische Leitfähigkeit der Kupferproben wesentlich höher ist, als die der WC-Co Einspanbacken, werden die Backen widerstandserwärmt, die Wärme wird anschließend in die Probe geleitet.

In der Arbeitskammer (Abbildung 11 (b)) befinden sich zwei wassergekühlte Einspannbacken aus Kupfer, auf denen jeweils ein ISO-T Druckstempel aus Wolframkarbid sitzt (Abbildung 19). Zwischen den beiden Stempeln wurde die zylindrische Druckprobe mit Hilfe einer Haltevorrichtung eingespannt. Hierbei war darauf zu achten, die Probe nicht zu beschädigen. Deshalb erfolgte die Kraftanbringung beim Einspannen der Probe mit dem pneumatischen System der Anlage.

Die Probe musste senkrecht und mittig auf den Wolframkarbidstempel positioniert werden. Dies setzte parallele Stempeloberflächen voraus. Um die Parallelität der Einspannbacken zu gewährleisten, wurden die Druckstempel mit einer Druckkraft von 90 kN zusammengefahren und ca. 30 s gehalten, so dass durch das Nachsetzen der Grafitfolien die parallele Lage der Backen zueinander eingestellt wurde. Die Parallelität der Einspannbacken wurde nach jedem Versuch kontrolliert.

Zur besseren Energieübertragung und Reibungsreduzierung wurde zusätzlich mit der 0,25 mm dicken Grafitfolie zwischen Probe und Stempel gearbeitet, die als Schmiermittel für Druckversuche an Kupfer empfohlen wird [51]. Die Grafitfolie wurde an den WC-Co Backen mittels Grafitpaste angebracht. Um die Oxidation der Proben zu vermeiden, wurde in der Arbeitskammer ein Vakuum von -1 Bar erzeugt. Anschließend wurde die Kammer mit Argon gefüllt. Für Versuche ab einschließlich 500°C wurde die Evakuierung und nachfolgende Füllung der Kammer mit Schutzgas zweimal durchgeführt, zwischen Raumtemperatur und 500°C.

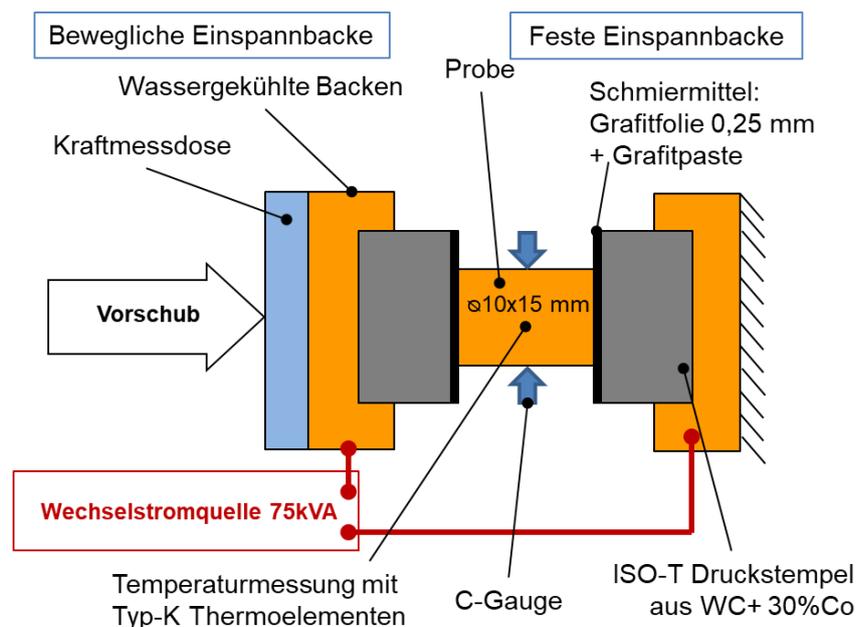


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für den Druckversuch

Die Temperatur wurde durch ein aufgeschweißtes Thermoelement vom Typ K kontrolliert. Diese wurden durch Punktschweißen auf die Probe gefügt (Tabelle 12). Letztlich wurde die Probe durch das Zusammenfahren der Backen auf die Hälfte ihrer Anfangshöhe gestaucht.

Bei konstanter Traversengeschwindigkeit (weggesteuert) wird die Dehnungsgeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}$  größer mit steigendem Verformungsgrad. Die Verformungsgeschwindigkeit von  $0,1 \text{ s}^{-1}$  wird aus den Abmessungen der Probe nach Formel (12) berechnet, wobei  $v(t)$  die lineare Geschwindigkeit der Einspannbacke und  $L_0$  die Anfangslänge der Probe ist. Der Wert entspricht jedoch einem realistischen Mittelwert von typischen Verformungsgeschwindigkeiten bei Warmumformprozessen, die sich typischerweise in den Größenordnungen von  $10^{-4}$  bis  $10^2 \text{ s}^{-1}$  erstrecken [50]. Die Verformungsgeschwindigkeit  $\dot{\varepsilon}$  lässt sich nur zu Beginn auf  $0,1 \text{ s}^{-1}$  einstellen, im Anschluss steigt sie konstant an, der Wert von  $0,17 \text{ s}^{-1}$  wird nicht überschritten.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v(t)}{L_0} \quad (12)$$

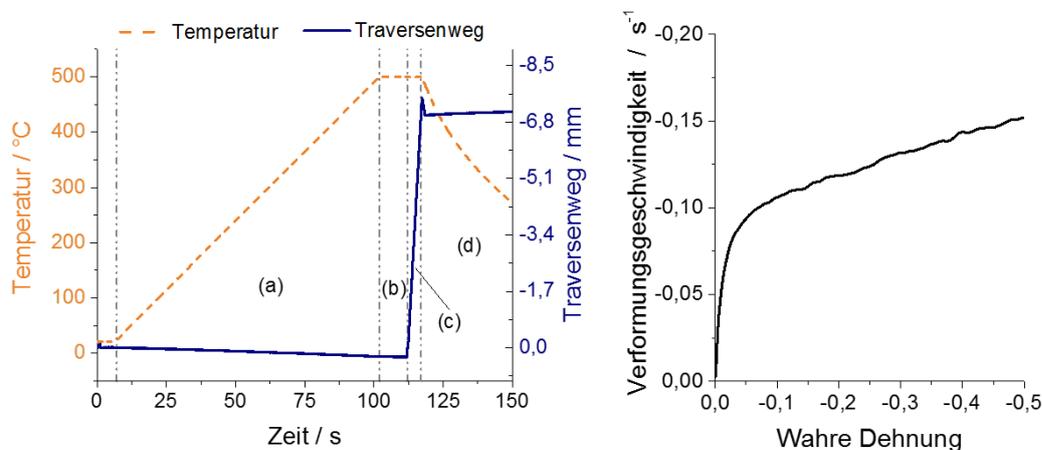


Abbildung 20: Beispiel eines Versuchsablaufs zur Ermittlung der Fließkurve bei einer Prüftemperatur von  $500^\circ\text{C}$ . Links: zeitliche Verläufe von Temperatur und Traversenweg im Druckversuch ((a) Aufheizung der Probe, (b) Haltezeit 10 s zum Temperatúrausgleich, (c) Verformung der Probe, (d) freie Abkühlung); Rechts: Änderung der Verformungsgeschwindigkeit im Verformungsprozess.

Um wahre Spannung und wahre Dehnung aus den Druckversuchen zu ermitteln, wurden die Probendurchmesser gemessen. Dies erfolgte über ein Querdehnungsmesser, sogenanntes C-Gauge. Im Vergleich zur Bestimmung der wahren Spannung und wahren Dehnung aus dem Traversenweg der Anlage, wurde beim Messen mit der C-Gauge nur

das Fließverhalten des Kupferwerkstoffes berücksichtigt. Die Steifigkeit der Anlage, sowie die Verformung der Graphitfolien flossen in die Auswertung nicht ein.

Beim Messen mit der C-Gauge besteht bei der ungleichmäßigen Verformung der Probe quer zu der Probenachse die Gefahr, dass die Messergebnisse verfälscht werden. Wenn sich die Probe ausbeult, kann aufgrund der Positioniergenauigkeit nicht davon ausgegangen werden, dass der maximale Durchmesser erfasst wird. Vielmehr ist es wahrscheinlicher, dass ein beliebiger Durchmesser zwischen der Stirnfläche und der Ausbeulung gemessen wird. Um den dadurch verursachten Fehler bei der Aufnahme der Fließkurven zu vermeiden, erfolgte die Bewertung der Probengeometrie nach einer in [52] beschriebenen Methode. Erfüllten die Proben die unten beschriebenen Randbedingungen nicht, musste der Versuch wiederholt werden.

Tabelle 10: Übersicht zu den reflektierten und den ausgewählten Parametern bei der Fließkurvenermittlung

Fließkurvenermittlungsmethode	Druckversuch
Aufheizmöglichkeiten	konduktive Erwärmung
Steuerung der Traversengeschwindigkeit	weggesteuert
Dehnungsmessung	C-Gauge: Querdehnungsaufnehmer
Temperaturmessung	geschweißte Thermoelemente Typ-K
Schmiermittel	Graphitpaste+Graphitfolie
Backenwerkstoff	WC+30%Co
Aufheizgeschwindigkeit	5 K/s
Haltezeit	10 s
Dehnungsgeschwindigkeit	1 s <sup>-1</sup>
Oberflächenzustand der Probe	gedreht

#### 6.1.4.1 Beurteilung der Versuchsgültigkeit

Die Beurteilung der Versuchsgültigkeit erfolgte anhand mehrerer Koeffizienten, welche die äußere geometrische Form der Probe widerspiegeln. Lagen die Koeffizienten innerhalb bestimmter Grenzen, konnte eine gleichmäßige Verformung angenommen und somit die Daten ausgewertet werden. Zur Bestimmung der Koeffizienten wurden der Durchmesser und die Höhe vor und nach dem Test in mehreren Messungen bestimmt. In Anlehnung an [50] erfolgte die Bildung des Höhenmittelwertes aus drei Messungen an der Kante in einem Winkel von ca. 120° zueinander und einem Messwert in der Mitte der Stirnfläche. Der Durchmesser wurde an vier Stellen gleichmäßig über dem Umfang verteilt gemessen. Zur Vermessung der gestauchten Probe wurde hierfür der Maximaldurchmesser bestimmt, der sich durch ein mögliches Ausbeulen der Probe bildete. Die Messung erfolgte mit einer Bügelmessschraube mit einem Messbereich von 0 – 25 mm

und einem Skalenteilungswert von 0,01 mm, wodurch die Messung zügig und gleichzeitig mit hoher Genauigkeit erfolgte. In Abbildung 21 sind die benötigten Messgrößen für die Parameterbildung veranschaulicht.

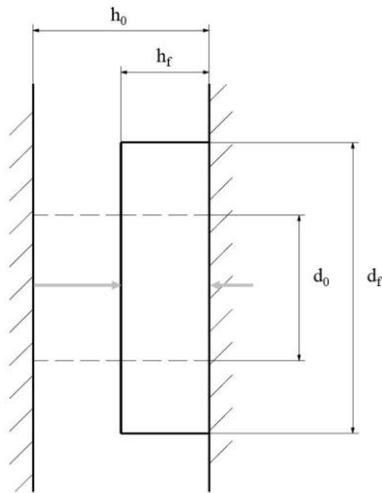


Abbildung 21: Erforderliche Messgrößen zur Bestimmung der Koeffizienten zur Bewertung der Versuchsgültigkeit

Die Aussage zur Gültigkeit eines Tests anhand der nachfolgenden Koeffizienten nach Roebuck et al. [50] wurde bereits in Bennett et al. [53] und Xu et Al. [54] genutzt. Der Barrelling-Koeffizient  $B$  nach Formel (13) ist das Verhältnis von Endvolumen, errechnet aus Maximaldurchmesser und Endhöhe  $h_f$  der gestauchten Probe, zu Anfangsvolumen und beschreibt das Ausbeulen einer Probe. Verursacht durch Temperaturgradienten und Reibung zwischen Probe und Stempel, darf dieser einen Wert von 1,1 nicht erreichen bzw. überschreiten. Andernfalls wäre die Abweichung von gemessener zu wahrer Spannung unzulässig hoch und würde einer Korrektur bedürfen [54], beispielsweise nach [55].

$$B = \frac{h_f \cdot d_f^2}{h_0 \cdot d_0^2} \quad (13)$$

Der Ovality-Koeffizient  $O_V$  ergibt sich aus der Division von maximalem Durchmesser  $d_{fmax}$  zu minimalem Durchmesser  $d_{fmin}$  der verformten Probe. Für  $O_V$  ist seitens der Literatur kein Maximalwert festgelegt, kann jedoch als Indikator für unregelmäßige Verformung der Probe im Stauchversuch betrachtet werden.

$$O_V = \frac{d_{fmax}}{d_{fmin}} \quad (14)$$

Aufschluss über die Parallelität der verformten Probe gibt der Height-Koeffizient  $H$ . Dieser ist definiert als Quotient aus Standardabweichung der ermittelten Höhe  $Sh_f$  und der durchschnittlichen Höhe  $h_f$ , jeweils für den komprimierten Versuchskörper. Ist das Ergebnis größer gleich 0,04, ist der Test ungültig.

$$H = \frac{Sh_f}{h_f} \quad (15)$$

Zur Beschreibung einer Scherung wird der Shear-Koeffizient  $S$  genutzt. Gemessen wird hierfür der Winkel zwischen der Mittellinie des Ausgangs- und Endzustandes des Testobjekts. Mögliche Ursache ist ein fehlerhafter Einbau und daraus resultierender unsymmetrischer Kraftangriff während des Stauchens. Nach [50] wird der  $S$ -Wert über die Tangensbildung des Winkels ermittelt, welcher nicht größer als 0,175 sein darf, siehe Formel (16).

$$S = \tan \theta \quad (16)$$

Der Einfachheit geschuldet, wird im Folgenden nicht der  $S$ -Wert, sondern nur der Winkel  $\theta$  angegeben, dessen Maximalwert bei  $\tan^{-1}(0,175) \approx 10^\circ$  ergibt.

Abbildung 22 zeigt mögliche Probenformen, wie sie nach dem Verformungsvorgang aufgetreten sind. In Abbildung 22 (links) ist eine Probe dargestellt, an der sich ein überhöhtes Ausbeulen erkennen lässt und dessen Barrelling-Koeffizient oberhalb des Grenzwerts liegt. Dieser Fehler trat nur sehr selten auf und konnte durch die Wahl der Graphit-Folie als Schmiermittel nahezu vollständig vermieden werden. Abbildung 22 (Mitte) zeigt ein Beispiel für eine unzulässige Winkelabweichung der verformten Probe. Dieser Fehler trat in Verbindung mit einem Knicken der Probe auf und war der überwiegende Ausschlussgrund für eine Probe in den durchgeführten Untersuchungen.

Um statistisch abgesicherte Messwerte für eine Fließkurve zu bekommen, wird es in Roebuck et al [52] empfohlen, mindestens zwei Versuche pro Versuchstemperatur durchzuführen.

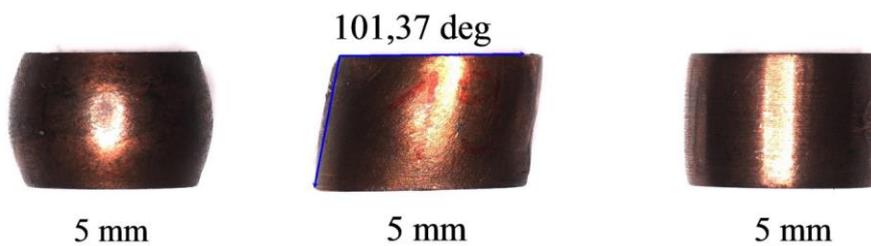


Abbildung 22: Beispiele von Proben nach dem Stauchungsvorgang: ungültig,  $B > 1,1$  (links); ungültig, Winkelabweichung gegenüber  $90^\circ > 10^\circ$  (Mitte); gültige Probe (rechts)

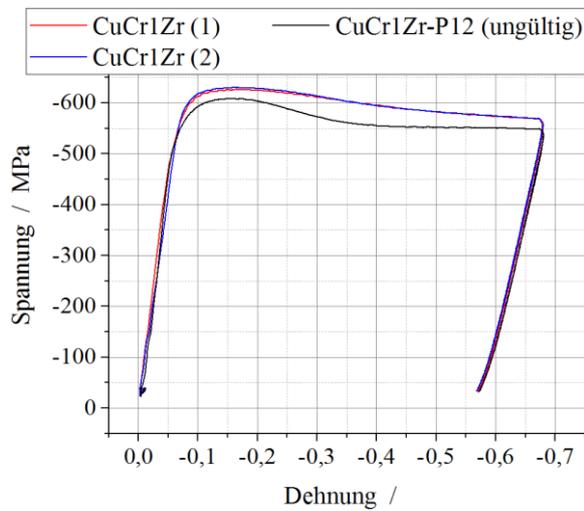
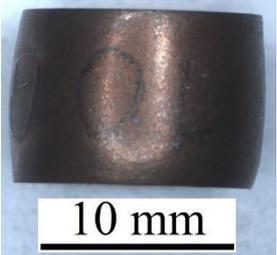
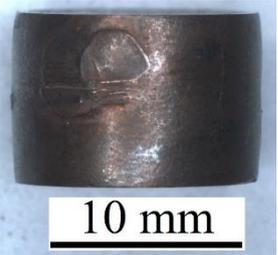
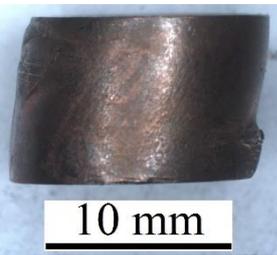


Abbildung 23: Vergleich gültiger und ungültiger Versuche von CuCr1Zr bei 20°C

Tabelle 11: Zugehörige Probenformen der gültigen und ungültigen Fließkurven für CuCr1Zr bei 20°C unter Berücksichtigung des Barrelling-Koeffizienten  $B$ , der Winkelabweichung  $\theta$  und des Ovality-Koeffizienten  $O_V$

CuCr1Zr (1)	CuCr1Zr (2)	CuCr1Zr -P12 (ungültig)
		
		
$B = 1,06$	$B = 1,02$	$B = 0,98$
$\theta = 0^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 11,4^\circ$
$O_V = 1,005$	$O_V = 1,005$	$O_V = 1,047$

### 6.1.4.2 Fügen von Thermoelementen

Das Fügen der Thermoelemente erfolgte mittels Buckelschweißen. Die Schweißparameter für beide Werkstoffgruppen sind in der Tabelle 12 aufgeführt. Das Schweißen erfolgte mit der Kappenform A0 Ø16 mm und dem Elektrodenwerkstoff CuAg.

Tabelle 12: Schweißparameter für das Befestigen von Thermoelementen

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Versuchswerkstoff	
			e1,e2	e3,e4
Elektrodenkraft	$F_{el}$	kN	2,25	2,25
Vorhaltezeit	$t_s$	ms	1000	1000
Schweißzeit	$t_w$	ms	70	20
Schweißstrom	$I_w$	kA	18	28
Nachhaltezeit	$t_h$	ms	2000	2000

### 6.1.4.3 Charakterisierung des Verformungsverhaltens der Versuchswerkstoffe

Um das Verformungsverhalten der Werkstoffe miteinander zu vergleichen, wurde die wahre Spannung bei der wahren Dehnung von 0,01 ermittelt, wie in Abbildung 24 veranschaulicht ist.

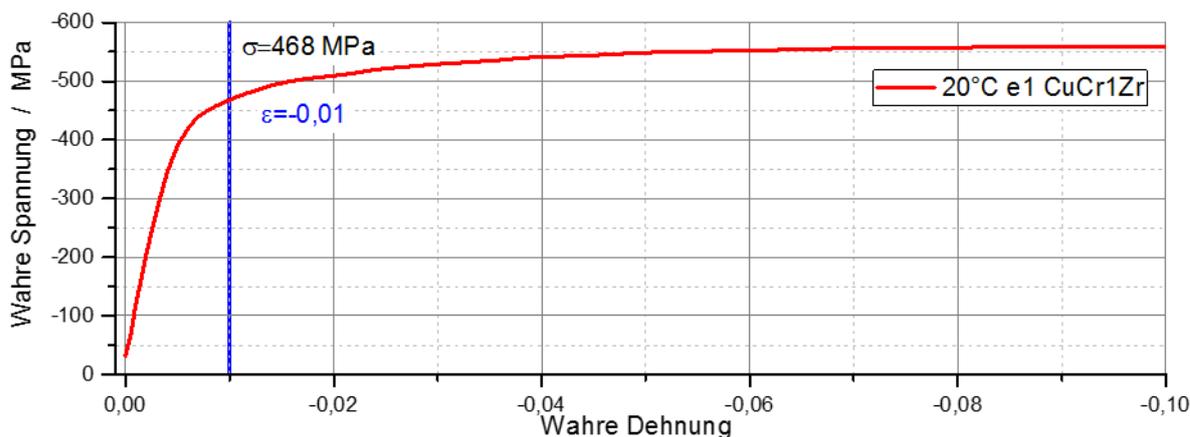


Abbildung 24: Ermittlung der wahren Spannung bei der wahren Dehnung von 0,01

### 6.1.5 Zyklische thermische Belastung der Elektrodenwerkstoffe

Um das Werkstoffverhalten unter einer beim Widerstandsschweißen auftretenden Temperaturbeanspruchung zu simulieren, wurden in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss die Druckversuche mit einer zyklisch-thermischen Beanspruchung der Proben in fünf Zyklen zwischen 500°C und 900°C durchgeführt.

Der gemessene Temperaturverlauf aus dem zyklischen Versuch ist in der Abbildung 25 dargestellt. Die Probe wurde mit 5 K/s auf 900°C erwärmt und anschließend auf 500°C abgekühlt. Am Ende des fünften Zyklus wurde die Probe gestaucht, wie beschrieben im Abschnitt 6.1.4.

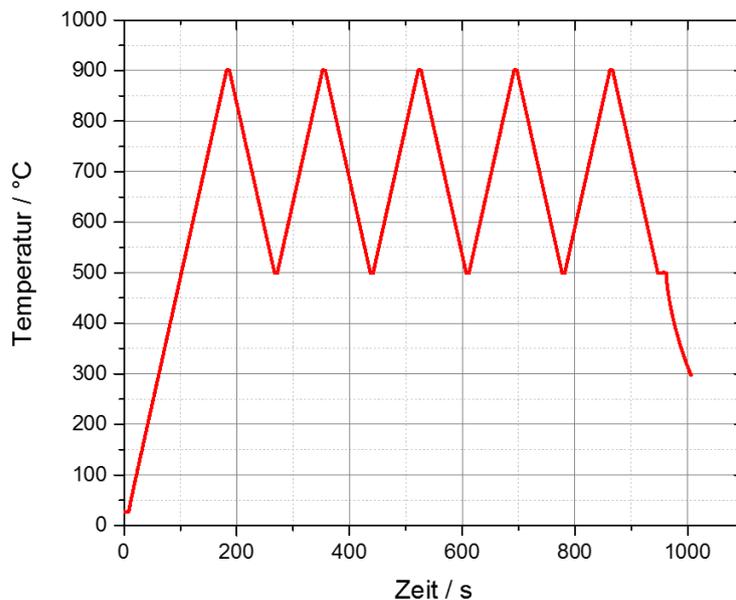


Abbildung 25: Temperaturverlauf bei der zyklischen thermischen Belastung von Proben

## 6.2 Ergebnisse der Werkstoffcharakterisierung

### 6.2.1 Verformungsverhalten der Versuchswerkstoffe

Aus den Ergebnissen der Druckversuche konnten Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten der Elektrodenwerkstoffe im Schweißprozess gezogen werden. Ein Beispiel der ermittelten Fließkurven ist in Abbildung 26 dargestellt. Weitere Fließkurven sind im Anhang C.6 zu finden. Um den Vergleich der Werkstoffe untereinander zu vereinfachen, wurden die wahren Spannungen bei der wahren Dehnung von 0,01 ( $\sigma_{1\%}$ ) aus den gemessenen Kurven ermittelt (vgl. Abschnitt 6.1.4), weil die zu erwartende Plastifizierung sich in diesem Bereich vermuten lässt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 27 zu sehen. Bei Raumtemperatur haben alle untersuchten Werkstoffe annähernd gleiche mechanische Eigenschaften. Die Werkstoffe e1 und e3 weisen im Vergleich zu e2 und e4 höhere Festigkeiten auf. Schon ab 100°C ist ein Abfall der für die plastische Verformung benötigten Spannung, für pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe zu beobachten. Bis 900°C bleibt  $\sigma_{1\%}$  für e1 und e2 höher, als für e3 und e4. Die niedrigsten Werte der für die plastische Verformung benötigten Spannung wurden über den ganzen Temperaturbereich für den partikelverstärkten Werkstoff Discup C3/60 (e4) gemessen. Bei 900°C konvergieren die Verläufe von  $\sigma_{1\%}$  für die Werkstoffe e1, e2 und e4 bei ca. 50 MPa. Für Werkstoff e3 konnten die Fließkurven nur bis 600°C gemessen werden. Bei höheren Temperaturen erfolgte eine stark ungleichmäßige Verformung, oftmals kombiniert mit der Rissbildung in den Druckproben (vgl. Anhang C.7).

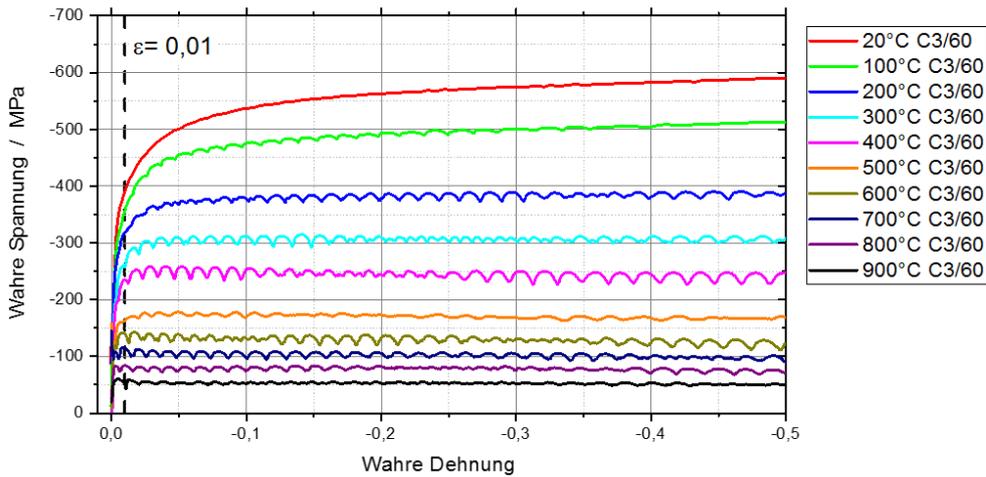


Abbildung 26: Fließkurven für Discup C3/60 (e4)

Die geringere Festigkeit der Elektrodenwerkstoffe e3 und e4 bei erhöhten Temperaturen führt zur stärkeren Verformung der Elektrodenkappen aus pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffen im Schweißprozess (vgl. Abschnitte 10.3.4 und 10.5.1) sowie zur Erhöhung des Zerspanabtrags im Vergleich zu den schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffen (vgl. Abschnitt 7.2). Die Beschädigung der Druckproben von e3 im Druckversuch steht in guter Korrelation zur hohen Rissanfälligkeit der Elektrodenkappen aus diesem Werkstoff, die in Abschnitt 10.5.2 beschrieben ist.

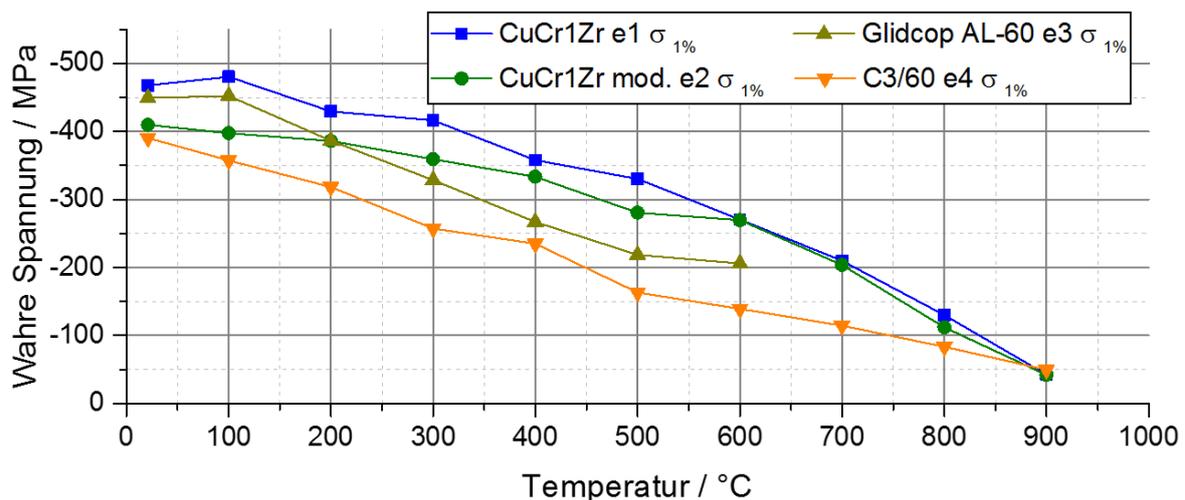


Abbildung 27: Abhängigkeit der wahren Dehnung bei 0,01 von der Temperatur

### 6.2.2 Verformungsverhalten zyklisch thermisch belasteter Werkstoffe

Zyklisch-thermische Beanspruchungen der Werkstoffe, bei denen sich die Werkstoffe 850 s oberhalb von 500°C befanden, führen zu einem starken Abfall der Fließspannungen

für die schmelzmetallurgisch hergestellte Legierung e2 (CuCr1Zr, mod.). Bei den pulvermetallurgisch hergestellten Legierungen e3 und e4 ist nur ein kleiner Abfall der Fließspannungen festzustellen, wie in Abbildung 28 zu sehen ist.

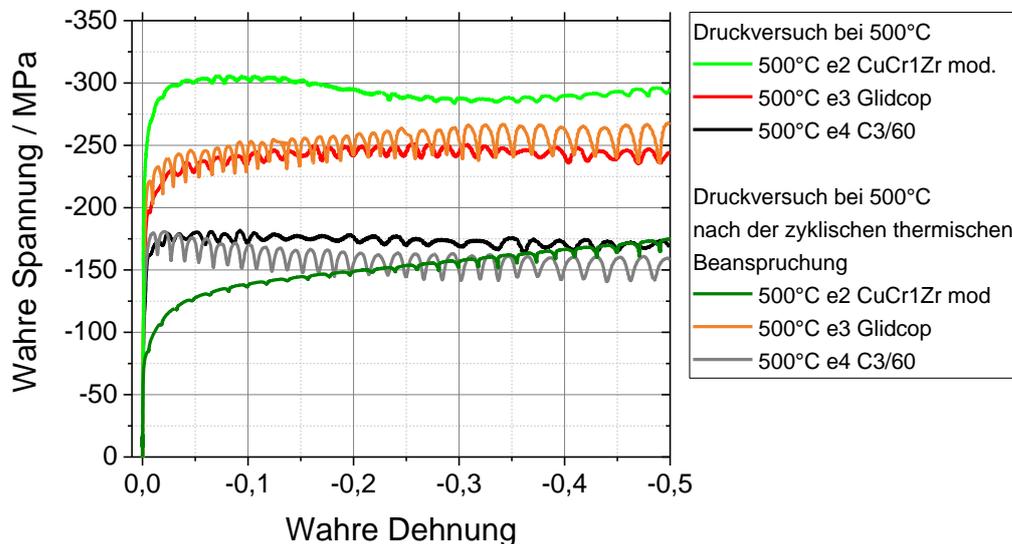


Abbildung 28: Fließkurven für die Versuchswerkstoffe e2, e3 und e4 vor und nach der zyklischen thermischen Beanspruchung

Starker Festigkeitsverlust nach der zyklischen thermischen Beanspruchung kann dadurch erklärt werden, dass oberhalb von 450°C bei den schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffen e1 und e2 die CuCr- und CuZr-Partikel in Lösung gehen. Dies ist bei den mit thermisch stabilen Korundpartikeln verstärkten Werkstoffen e3 und e4 nicht der Fall. Durch das Auflösen der Teilchen wird die Bewegung der Korngrenzen nicht mehr verhindert, was zur Entfestigung der Werkstoffe e1 und e2 führt. Da das Auflösen der Partikel diffusionsgesteuert ist, erfolgt der Verlust der Festigkeit erst ab einer bestimmten Verweilzeit oberhalb der kritischen Temperatur von 450°C. Bei der Ermittlung der Fließkurven mit der Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/s reichen die Verweilzeiten oberhalb von 450°C zum Auflösen der Partikel nicht aus. Dies begründet den nicht ausgeprägten Festigkeitsverlust der Elektrodenwerkstoffe e1 und e2 im Druckversuch (Abschnitt 6.2.1). Für übliche Widerstandspunktschweißprozesse sind die Verweilzeiten oberhalb von 450°C noch geringer, jedoch ist bei mehreren nacheinander folgenden Schweißungen in Summe von einer längeren Wärmebelastung auszugehen. In diesem Fall können die dispersionsverfestigten Legierungen eine höhere Festigkeit zeigen. Inwieweit dieser Effekt einen Festigkeitsverlust von dispersionsverfestigten Elektrodenkappen beim schnellen Aufheizen kompensiert, ist nicht bekannt.

### 6.2.3 Spezifischer elektrischer Widerstand

Die mit unterschiedlichen Methoden gemessenen Widerstandswerte weisen eine gute Übereinstimmung auf (vgl. Abbildung 29). Erwartungsgemäß weisen die pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffe e3 (Glidcop AL60) und e4 (Discup C3/60) höhere Widerstände auf. Die niedrigsten Widerstandswerte wurden für e1 (CuCr1Zr) ermittelt, die höchsten für e4 (Discup C3/60) gemessen. Beide schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffe weisen eine nichtlineare Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur auf. Dies erklärt sich durch das Auflösen von CuCr- und CuZr-Partikeln ab ca. 450°C. Pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe haben eine nahezu lineare Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur, wie in Abbildung 29 rechts veranschaulicht ist. Durch die nichtlineare Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Widerstände von Temperatur für schmelzmetallurgisch hergestellte Werkstoffe, konvergieren die spezifischen elektrischen Widerstände bei 900°C.

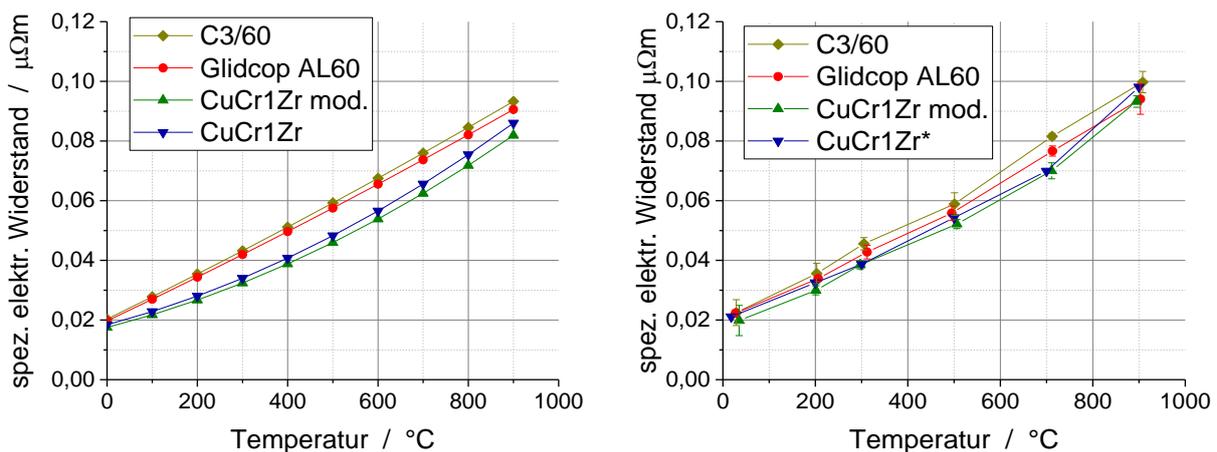


Abbildung 29: Spezifischer elektrischer Widerstand der untersuchten Elektrodenwerkstoffe. Links: extrapoliert aus den Wirbelstrommessungen bei Raumtemperatur; rechts - spezifische elektrische Widerstände, gemessen mit der Vier-Leiter-Methode.

Die gemessenen spezifischen elektrischen Widerstände dienen der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Wiedemann-Franz'schen Gesetz, beide Werkstoffkennwerte fließen in die FE-Simulationsmodelle ein.

### 6.2.4 Wärmeleitfähigkeit

Die berechneten Werte der Wärmeleitfähigkeit sind in Abbildung 30 dargestellt. Die schmelzmetallurgisch hergestellten Werkstoffe e1 und e2 haben höhere Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich zu den pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffen e3 und e4. Dies deckt sich mit den Messungen mittels HotDisk (vgl. Abbildung 18 und [56]). Analog

zum spezifischen elektrischen Widerstand konvergieren die Wärmeleitfähigkeiten bei 900°C.

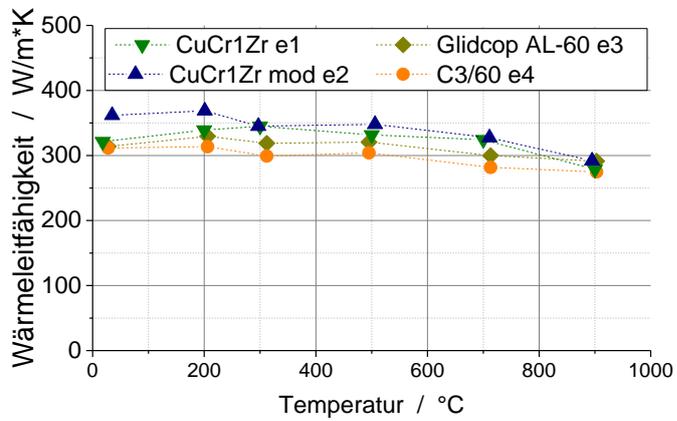


Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeiten für die Versuchswerkstoffe, berechnet aus den spezifischen elektrischen Widerständen

## 7 Zerspanbarkeit der Elektrodenwerkstoffe

Laut DIN 6583 ist „Zerspanbarkeit [...] die Eigenschaft eines Werkstückes oder Werkstoffes, sich unter gegebenen Bedingungen spanend bearbeiten zu lassen“. Für die Zerspanbarkeit von Kupfer gibt es eine Unterteilung in drei vom Deutschen Kupferinstitut kategorisierte Hauptgruppen.

In der Zerspanungshauptgruppe 1 befinden sich gut zerspanbare blei-, schwefel- oder tellurlegierte Kupferwerkstoffe mit homogenem oder heterogenem Gefüge. Durch den Zusatz der spanbrechenden Legierungselemente entstehen bei der Bearbeitung kurze Bröckelspäne. Der Werkzeugverschleiß beim Zerspanen dieser Werkstoffe ist gering. In der Gruppe 2 sind Kupferwerkstoffe höherer Festigkeit und besserer Kaltumformbarkeit, mit heterogener Zusammensetzung zu finden. Durch die bessere Kaltumformbarkeit entsteht beim Zerspanen, ein längerer Wendelspan, bei mittlerem Werkzeugverschleiß. Die Gruppe 3 enthält schwer zerspanbare Kupferwerkstoffe. Diese weisen ein homogenes Gefüge mit besserer Kaltumformbarkeit auf, was zu hohen Schnittkräften und langen, zähen Spänen führt. Die Einteilung in diese Hauptgruppe erfolgt für manche Werkstoffe auch aufgrund ihrer großen Verschleißwirkung auf das Schneidwerkzeug.

CuCr1Zr gehört laut Deutschem Kupferinstitut im ausgehärteten Zustand zur Zerspanungshauptgruppe 2, im lösungsgeglühten Zustand Hauptgruppe 3 und besitzt mit einem Zerspanungsindex von 25 eine mäßige Zerspanbarkeit [57]. Der Zerspanungsindex ist ein Maß für die erreichbare Produktivität, die im Vergleich mit einem serientauglichen Werkstoff erreicht werden kann. Bei Kupferlegierungen ist der Referenzwerkstoff Automatenmessing, mit einem Zerspanungsindex von 100 [57]. In der Literatur sind keine genauen Angaben zur Zerspanbarkeit, der in dieser Arbeit untersuchten Elektrodenkappen Glidcop AL60 (e3) und DISCUP C0/65 (e4) zu finden. Der Zerspanungsindex von Aluminiumoxid dispersionsverfestigten Kupferlegierungen C15710, C15720 und C15735 liegt bei 20 [58].

Die Zerspanbarkeit eines Werkstoffes wird nach [59] unter Betrachtung des Bearbeitungsverfahrens, des Schneidstoffes und den Schnittbedingungen bewertet. Zur Bearbeitung der Elektrodenkappen wurden Elektrodenkappenfräsgeräte der Firma Bräuer Systemtechnik GmbH verwendet, welche im Abschnitt 5.2 beschrieben sind. Als Schneidstoff kamen Schneidmesser aus Hochleistungsschnellarbeitsstahl (HSS) in zwei Ausführungen zur Ausbildung einer Elektrodengeometrie mit Außendurchmesser von 16 mm, einem Arbeitsflächendurchmesser von 6 mm und Balligkeitsradien am Arbeitsflächendurchmesser von 15 bzw. 40 mm (R15 bzw. R40) zum Einsatz (siehe Abschnitt 5.2, Tabelle 6).

Fräsen beschreibt nach [60] das Spanen mit kreisförmiger Schnittbewegung, mit einer Vorschubrichtung senkrecht bzw. schräg zur Werkzeugachse. Die Vorschubbewegung

beim Zerspanen der Elektroden ist jedoch coaxial zur Drehachse, daher findet sich eine treffendere Prozessbeschreibung in der Definition des Bohrens [61, S.3, 61, S. 3] mit „[...] Spanen mit kreisförmiger Schnittbewegung, bei dem die Drehachse des Werkzeuges und die Achse der zu erzeugenden Innenflächen identisch sind [...]“. Im Gegensatz zum klassischen Bohren wird beim Zerspanen der Elektroden keine Innenfläche, sondern eine Außenkontur erzeugt. Am nächsten steht dieser Bearbeitung nach der Ansicht der Autoren das Profilbohren. Abbildung 31 vergleicht schematisch den konventionellen Bohrvorgang mit dem Zerspanen der Elektroden. Das Diagramm zeigt die Schnittgeschwindigkeit über den Radius und verdeutlicht deren stetigen Abfall im Bereich der Arbeitsfläche bis hin zu einer Schnittgeschwindigkeit von 0 mm/s im Zentrum der Arbeitsfläche, was den Bezug auf einen Bohrprozess erhärtet. Diese Überlegungen führten zu der Schlussfolgerung, sich für eine Prozessparameterauswahl am Bohren zu orientieren. Das Deutsche Kupferinstitut empfiehlt für die Bearbeitung von CuCr1Zr mit HSS Bohrern eine Schnittgeschwindigkeit von 35 m/min [57]. Mit einem Standardelektrodenfräser der Firma Bräuer Systemtechnik GmbH, welcher eine Nenndrehzahl von  $330 \text{ min}^{-1}$  realisiert, wurde eine Schnittgeschwindigkeit von 16,74 m/min erreicht, also in etwa die Hälfte der empfohlenen Schnittgeschwindigkeit. Zur Annäherung an die empfohlene Schnittgeschwindigkeit wurde daher ein zusätzlicher Fräser mit einer Nenndrehzahl von 620 U/min verwendet, womit eine Schnittgeschwindigkeit von 31,14 m/min erreicht wurde.

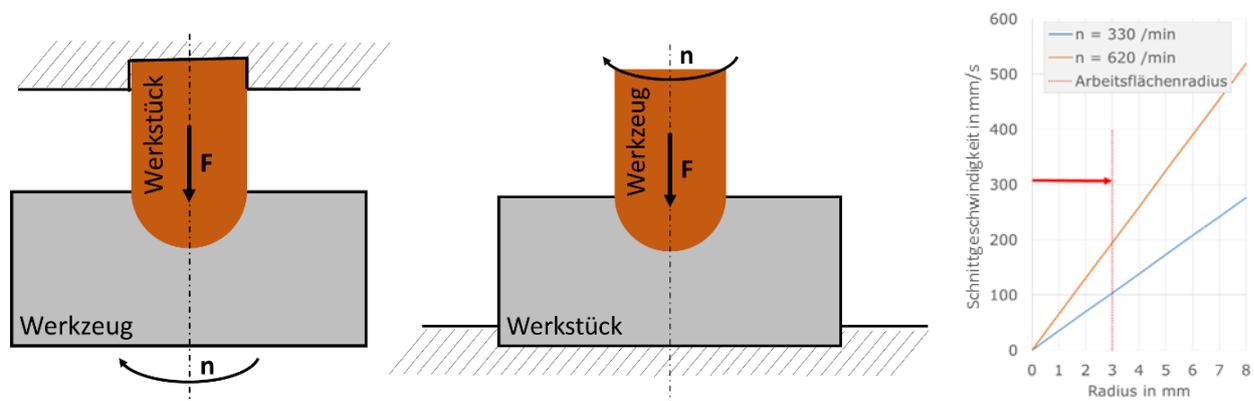


Abbildung 31: Links: „Elektrodenfräsen“; Mitte: Konventioneller Bohrvorgang; Rechts: Schnittgeschwindigkeit beim Zerspanen der Elektrodenkappen

Zur Betrachtung des Einflusses der Elektrodenkraft auf die Zerspanbarkeit der unterschiedlichen Elektrodenkappenwerkstoffe (EWST) wurden diese in drei Stufen variiert. Daraus ergab sich die in der Tabelle 13 dargestellte Versuchsmatrix. Die Versuchsmatrix mit variabler Zerspanzeit beinhaltet wegen geringer Verfügbarkeit des Elektrodenkappenwerkstoffs nur die CuCr1Zr Standardelektrode (e1) und deren Modifikation (e2) (Tabelle 14).

Tabelle 13: Zerspanbarkeitsuntersuchungen bei Variation der Elektrodenkraft

EWST	e1	e2	e3	e4	e1	e2	e3	e4
$N$	330 min <sup>-1</sup>				620 min <sup>-1</sup>			
$F_{Ei}$	1,0 kN; 1,2 kN; 1,5 kN							
$t_z$	0,5 s; 1,5 s; 2,0 s		1,5 s		0,5 s; 1,5 s; 2,0 s		1,5 s	
	Versuchswiederholungen je Parametereinstellung: 5							

Tabelle 14: Zerspanbarkeitsuntersuchungen bei Variation der Zerspanzeit

EWST	e1	e2	e1	e2
$N$	330 min <sup>-1</sup>		620 min <sup>-1</sup>	
$F_{Ei}$	1,0 kN; 1,2 kN; 1,5 kN			
$t_z$	0,5 s; 1,5 s; 2,0 s		0,5 s; 1,5 s; 2,0 s	
	Versuchswiederholungen je Parametereinstellung: 3			

Beide Versuchsmatrizen wurden sowohl mit einem Schneideinsatz mit Balligkeitsradius R40 als auch mit Radius R15 abgearbeitet. Nach jedem Versuch wurden die Elektroden zur Bestimmung des abgetragenen Volumens gewogen.

Die Auswertung erfolgte anhand der erzeugten Späne, der erzeugten Oberflächenrauheit sowie der Abtragtiefe (Eindringtiefe des Schneidwergzeugs).

Zur vollständigen Betrachtung der Zerspanbarkeit ist die Charakterisierung der Spanbildung von großer Bedeutung. Durch diese können Aussagen über den Werkstoff und den Zerspanprozess abgeleitet werden. Die Späne können zum einen durch vier Spanarten (Fließ-, Lamellen-, Scher- und Reißspan), wodurch der Prozess der Spanentstehung charakterisiert wird, und zum anderen durch die Spanform, welche unter anderen Abtransportierbarkeit und Verletzungsgefahr für Maschinenbediener umreißt, definiert werden. Eine Zusammenstellung von Spanformen und deren Bewertung erfolgt in Abbildung 32. Da die Spanart vermehrt werkstoffabhängig ist und durch Variieren der Prozessparameter hauptsächlich die Spanform verändert wird, konzentrieren sich die Auswertungen im Folgenden auf die Spanform.

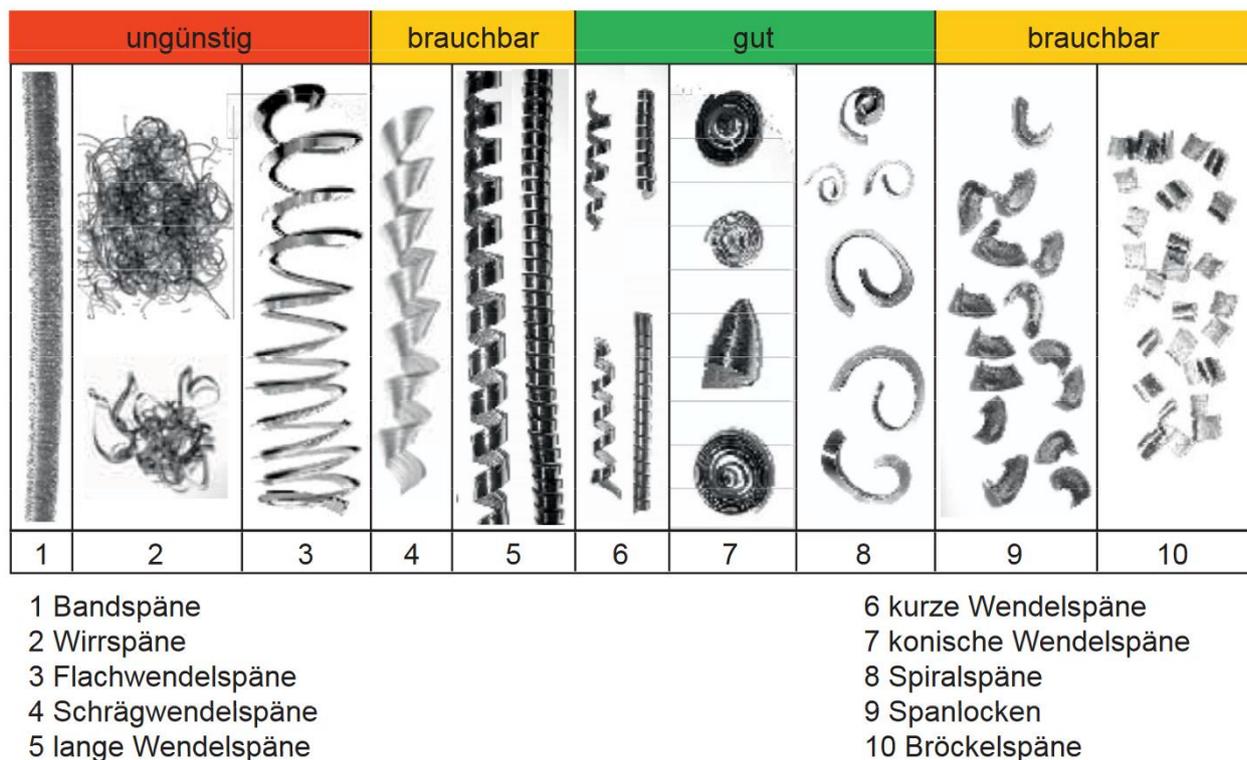


Abbildung 32: Spanformen und Bewertungen nach [57, S.22]

### 7.1 Bewertung der entstandenen Spanformen

Die angefallenen Späne wurden pro Elektrodenwerkstoff über alle Versuche hinweg gesammelt und kategorisiert. Die verwendeten Zerspanparameter wurden im Anschluss durch die erzeugten Späne bewertet. Tabelle 15 zeigt die Auswertung für die untersuchten Elektrodenwerkstoffe. Bei der e1-Elektrode und einer Drehzahl von  $330 \text{ min}^{-1}$  und dem Balligkeitsradius R15 war bei allen Zerspanvorgängen, unabhängig von der Kraft, hauptsächlich die Entstehung von konischen Wendelspänen zu beobachten. Die Anzahl der Bröckelspäne nahm mit steigender Kraft ab. Die Schneidkante wurde tiefer in den Werkstoff gedrückt und der Kontakt brach nicht ab. Auch bei einem Balligkeitsradius R40 wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt. Mit Erhöhen der Schnittgeschwindigkeit auf  $620 \text{ min}^{-1}$  stieg der Materialabtrag. Bei einem Balligkeitsradius R15 und einer Elektrodenkraft von 1 kN bildeten sich vereinzelt Wirrspäne.

Bei der e1-Elektrode ist somit hinsichtlich des Spanbildes ein klarer Trend zu erkennen. Bei geringer Kraft und Drehzahl entstehen vorwiegend konische Wendelspäne, welche nach Deutschem Kupferinstitut als „Gut“ bewertet werden. Mit steigender Kraft und Drehzahl steigt auch der Anteil an Bröckelspänen (Einstufung „brauchbar“) und vereinzelt entstehen Wirrspäne, welche das Werkzeug verstopfen können. Dieser Trend ist bei beiden Balligkeitsradien zu beobachten.

Die e2-Elektrode erzeugt im Zerspanprozess ähnlich der e1-Elektrode anfangs mit R15 und  $333 \text{ min}^{-1}$  konische Wendelspäne und Bröckelspäne. Die Bröckelspäne werden manchmal durch Spanlocken mit ebenfalls brauchbarer Einstufung ersetzt oder auch ergänzt. Das Erhöhen der Drehzahl führt zum vereinzelt Entstehen von Wirrspänen. Ähnlich wie die e1- und e2- Elektrode verhält sich die e3-Elektrode. Eine Erhöhung der Drehzahl resultiert im vereinzelt Auftreten von Wirrspänen. Somit bestätigen e2 und e3 den beschriebenen Trend.

Tabelle 15: Entstandene Spanformen bei der Bearbeitung der untersuchten-Elektroden

Radius	Drehzahl / $\text{min}^{-1}$	Kraft /kN	Spanform CuCr1Zr	Spanform CuCr1Zr, mod.	Spanform Glidcop Al60	Spanform C0/65
R15	330	1	7, 10	7, 10	7, 9, 10	9, 10
		1,2	7, 10	7, 10	7, 10	9, 10
		1,5	7, 10	7, 9	7, 10	9, 10
	620	1	7, 9, 10	7, 9	2, 7, 9, 10	9, 10
		1,2	2, 7, 9, 10	2, 7	2, 7, 9, 10	9, 10
		1,5	2, 7, 10	2, 7, 9, 10	2, 7, 9	9, 10
R40	330	1	7, 10	7, 9, 10	7, 8, 9, 10	9, 10
		1,2	7, 10	7, 10	7, 10	9, 10
		1,5	7, 10	7, 9, 10	7, 10	9, 10
	620	1	2, 7, 9, 10	2, 7, 9, 10	2, 7, 9, 10	9, 10
		1,2	2, 7, 9, 10	7, 10	2, 7, 9, 10	9, 10
		1,5	2, 7, 9, 10	2, 7, 9, 10	2, 7, 9, 10	9, 10

Als einziges weicht die e4-Elektrode vom beschriebenen Trend ab. Diese erzeugt beim Zerspanen ausschließlich Bröckelspäne und einen geringen Anteil an Spanlocken. Abbildung 33 zeigt beispielhaft die für alle Parameter bei der e4-Elektrode entstandenen Spanformen.



Abbildung 33: Spanformen der e4-Elektrode bei R40 mit  $620 \text{ min}^{-1}$  und 1,2 kN [62, S.70]

Im Falle der e4-Elektrode lohnt sich außerdem ein Blick auf die Spanart. Eine Nahaufnahme der Späne (s. Abbildung 34) bringt eine rissige Struktur zum Vorschein, woraus

auf ein sprödes Werkstoffverhalten geschlossen wird. Aus Abbildung 34 werden Reiß- und Scherspäne abgeleitet. Wenn Späne an den Scherbändern kurzzeitig getrennt werden und anschließend wieder verschweißen, werden sie als Scherspäne bezeichnet. Reißspäne treten meist bei spröden Werkstoffen mit ungleichmäßigem Gefüge auf. Die Späne werden von der Oberfläche abgerissen, wodurch die Werkstoffoberfläche beschädigt werden kann [63].



Abbildung 34: Nahaufnahme der Späne von e4 bei R15 mit  $330 \text{ min}^{-1}$  und  $1 \text{ kN}$ , [62, S.70]

Die Oberflächenuntersuchungen bestätigen mit vergleichsweise rauen Oberflächen den Schluss auf Scher- und Reißspäne bei der e4-Elektrode. Mit Erhöhung der Drehzahl auf  $620 \text{ min}^{-1}$  verringert sich der Anteil an Reißspänen und die Oberflächenrauheit nimmt ab.

Zur weiteren Auswertung des Zerspanergebnisses wurde die Arbeitsfläche der Elektroden mit dem chromatisch-konfokalen Mikroskop aus Abschnitt 5.4 aufgezeichnet. Im Anschluss wurde die Aufnahme in der Software Precitec Optronik Mark III maskiert und mit acht Profilschnitten ein Mittelwert der Rauheit gebildet. Abbildung 35 verdeutlicht das Maskieren und Legen der Profilschnitte. Die Maskierung erfolgte mit einer Kreisfläche mit Durchmesser 5,4 mm.

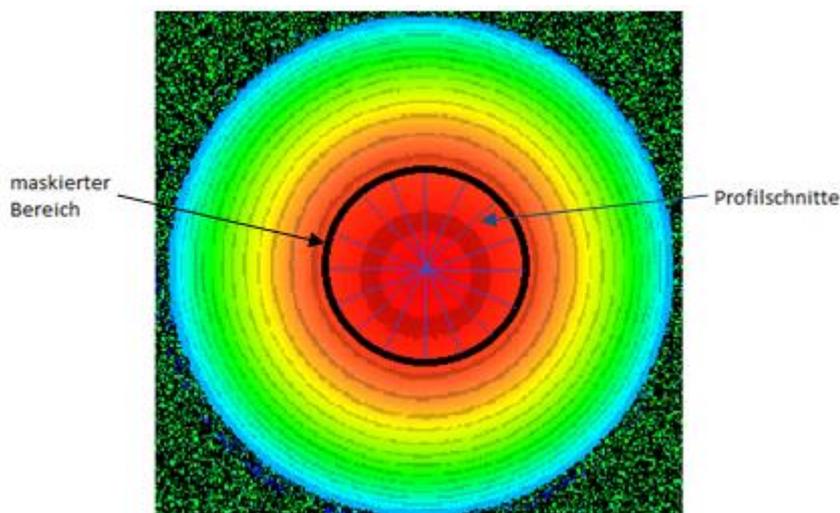


Abbildung 35: Maskieren der Arbeitsfläche und Anlegen der Profilschnitte [62, S.45]

Zwischen den Zerspanvorgängen an einer Elektrode weist die Oberflächenrauheit keine nennenswerten Unterschiede auf. Zur vergleichenden Auswertung wurde die gemittelte Rautiefe  $R_z$  nach DIN EN ISO 4287 herangezogen. Eine Bewertung der Oberflächenrauheit hinsichtlich positiver oder negativer Einflüsse auf das Schweißergebnis erfolgte nicht. Auf allen Konfokalaufnahmen ist die Auswirkung der nicht vorhandenen Schnittgeschwindigkeit im Zentrum der Arbeitsfläche (s. Abbildung 31) durch einen kraterartigen Ausriss zu erkennen. Abbildung 36 verdeutlicht diese Feststellung. Die entstandenen Rauheiten der e1-Elektrode unter Einsatz der unterschiedlichen Parameter sind in Abbildung 37 aufgeführt.

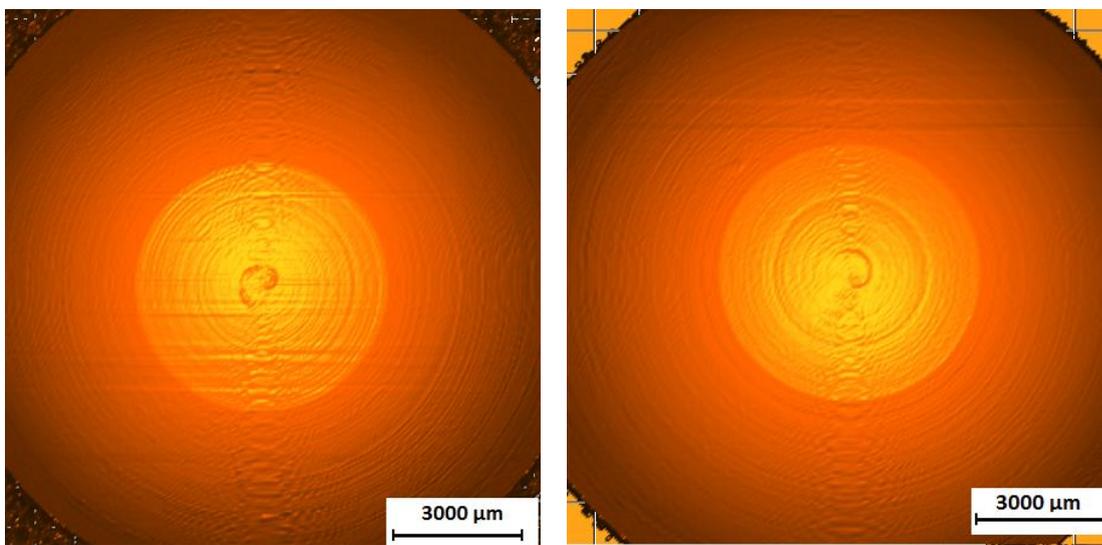


Abbildung 36: Konfokalaufnahmen; Links: e1, R15,  $330 \text{ min}^{-1}$  bei  $1,5 \text{ kN}$ ; Rechts: e3, R40,  $620 \text{ min}^{-1}$  bei  $1 \text{ kN}$

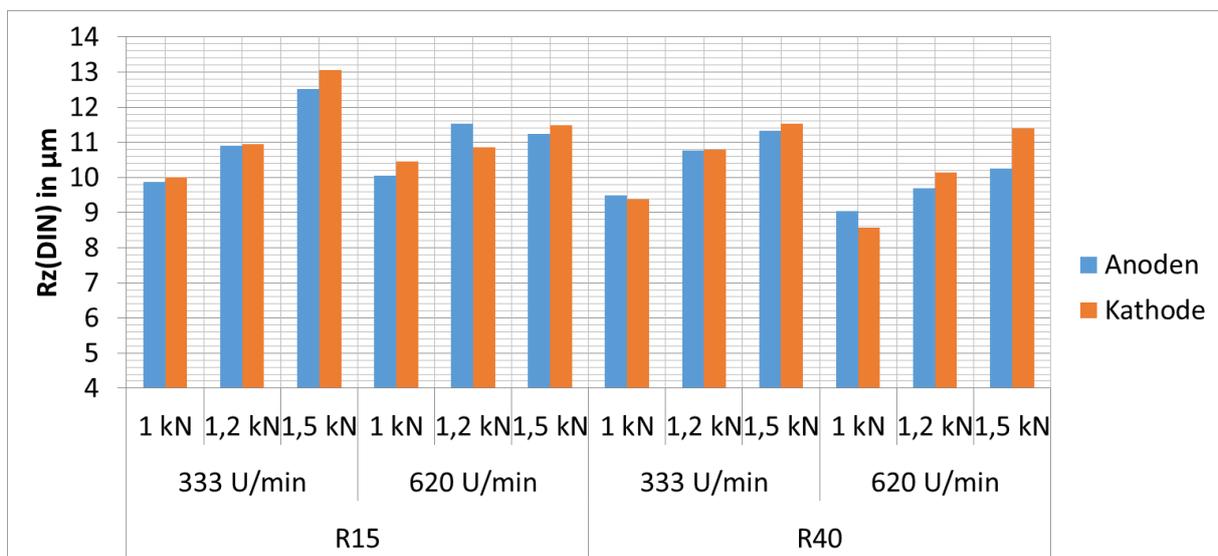


Abbildung 37: Gemittelte Rautiefe der e1-Elektrode unter Einfluss unterschiedlicher Zerspanparameter

Bei beiden Schneidgeometrien führt innerhalb einer einheitlichen Drehzahl das Erhöhen der Kraft zu einer Erhöhung der Rautiefe. Dieser Trend ist bei allen Elektrodenkappen nachzuvollziehen. Geringer ausgeprägt ist die Reduzierung der Rautiefe durch Einsatz der höheren Drehzahl. Vor allem bei der höchsten Elektrodenkraft mit 1,5 kN ist die geringere Rautiefe ersichtlich. Auch dieser Trend ist bei allen Elektrodenkappen nachvollziehbar. Allgemein befindet sich die Rautiefe bei allen Elektrodenkappen zwischen 9 – 12 µm. Die unterschiedlichen Werkstoffe ergeben demnach ähnliche Rautiefen. Bei e4 führte ein Rotieren der Anode auf dem Elektrodenschaft bei einem Balligkeitsradius R40 zu stark erhöhten Rautiefen. Diese Elektrode befindet sich in der Entwicklungsphase und wird aus vollem Stangengut spanend hergestellt. Die Passung der Elektrode auf den Elektrodenschaft ist daher vermutlich mit größerer Fertigungstoleranz behaftet, woraus die Rotation resultiert. Als Referenz gilt daher die Rautiefe an der Kathode, welche nicht rotierte. Die Abbildungen der Rautiefen der restlichen drei Elektroden sind im Anhang A.1 zu finden.

## 7.2 Berechnung der Abtragtiefe beim Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche

Zum Vergleich der Elektrodenkappen untereinander und zur Herstellung eines Bezugs zur Metallographie und den daraus ermittelten Daten zur Auflegierungsstärke und der Wärmeeindringzone an den Elektroden, wird der Begriff „Abtragtiefe“ eingeführt. Dieser beschreibt die Höhe des abgetragenen Volumens an der Elektrode. Die Abtragtiefe wird über eine Volumengleichung aus Masseunterschied zur Dichte gleichgesetzt mit einer theoretischen Abtraggeometrie berechnet. Abbildung 38 zeigt die Herleitung der Abtraggeometrie.

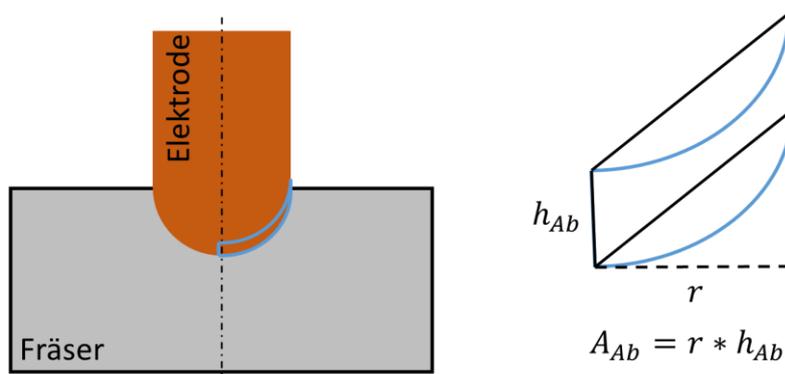


Abbildung 38: Herleitung der Abtraggeometrie je Zerspanvorgang und deren Fläche

Die Dichte  $\rho$  berechnet sich nach Formel (17):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (17)$$

Wobei das Volumen einem Zylinder entspricht, wie aus Abbildung 38 entnommen werden kann, und sich somit aus einem Produkt der Fläche mit dem Radius berechnet nach Formel (18).

$$V = \pi r^2 h = \pi r \cdot A_{ab} = \pi r^2 h_{ab} \quad (18)$$

Das Einsetzen des Volumens in die Dichteformel mit anschließendem Umstellen nach  $h_{ab}$  ergibt die Berechnung der Abtragtiefe  $h_{ab}$  nach Formel (19):

$$h_{ab} = \frac{\Delta m}{\rho \pi r^2} \quad (19)$$

Neben der Massendifferenz ist somit die Dichte der Elektroden zur Berechnung der Abtragtiefe notwendig. Diese wurden in [62, S. 37-38] experimentell bestimmt. Tabelle 16 führt die Ergebnisse auf.

Tabelle 16: Dichte der Elektrodenkappenwerkstoffe

Elektrode	Dichte / g/cm <sup>3</sup>
e1	8,91
e2	8,78
e3	8,81
e4	8,68

Damit konnte die Abtragtiefe berechnet werden (Abbildung 39). Für die Elektroden e1 und e2 zeigen die Diagramme einen Anstieg des Abtrags in Verbindung mit einem Anstieg der Elektrodenkraft und Drehzahlerhöhung. Dies entspricht den Erwartungen. Für die dispersionsverfestigten Elektroden ist ein ähnlicher Trend nachvollziehbar. Dennoch sind größere Schwankungen der Abtragtiefe zu erkennen.

Der Zerspanprozess verlief bei der Standardelektrode aus CuCr1Zr und deren Modifizierung stabiler. Zum Vergleich der Elektrodenkappen erfolgte in Abbildung 39 eine Mittelwertbildung über die fünf Wiederholungen der Versuche. Als Fehlerindikator wurde der minimale und maximale berechnete Wert für die Abtragtiefe der Parameterkombinationen angegeben.

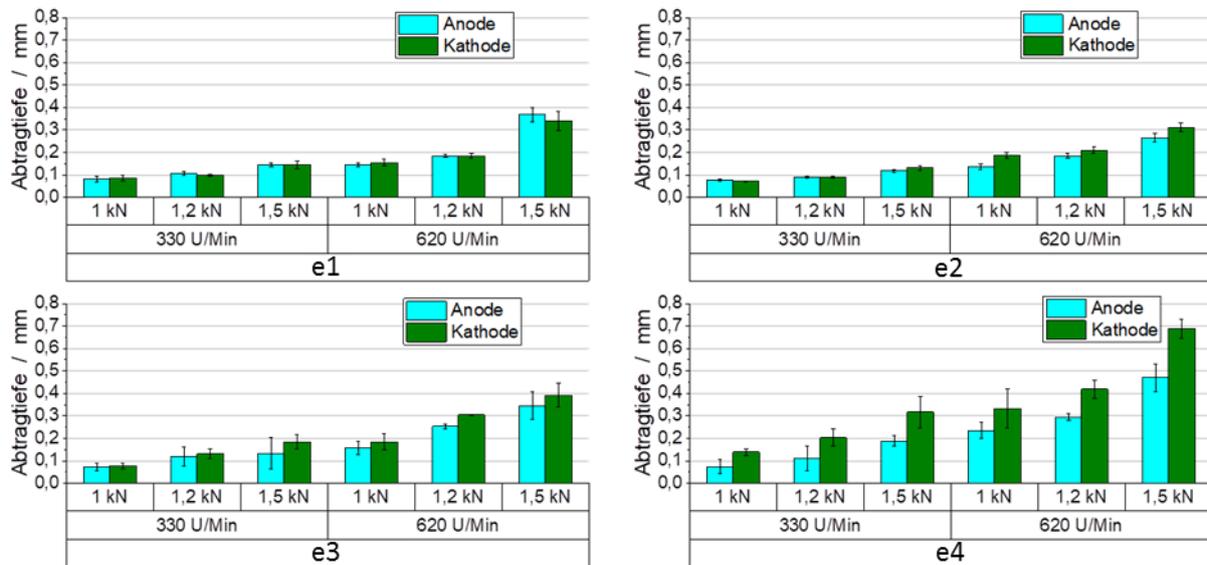


Abbildung 39: Abtragtiefe  $h_{Ab}$  für einen Zerspanvorgang und den Balligkeitsradius R40

Es ist zu erkennen, dass die Abtragtiefen an Anode und Kathode nahezu gleich sind. Zwischen den Elektrodentypen ist keine sich unterscheidende Tendenz zu erkennen. Die großen Abweichungen zwischen Anode und Kathode der e4 sind auf das bereits erläuterte Rotieren im Zerspanprozess zurückzuführen. Als Referenz gilt daher erneut die Abtragtiefe der Kathode, welche nicht rotierte.

Der Abtrag bei e4 ist, bezogen auf die Kathode ohne Prozessfehler, im Vergleich mit den anderen Elektrodenwerkstoffen erhöht. Eine Ursache dafür ist nach Ansicht der Autoren die Entwicklung der wahren Spannung bei Temperaturbeanspruchung der Elektrodenwerkstoffe (vgl. Abschnitt 6.2.1, Abschnitt 6.2.2).

Das Zerspanen erzeugt Wärme an den Schneidmessern und der Elektrode. Die geringere Spannung bei e4 in Verbindung mit dem Abfallen bei steigender Temperatur spricht für eine höhere Plastizität und somit einen erhöhten Abtrag (vgl. Abschnitt 6.2.2).

### 7.3 Verschleiß am Schneidmesser

An den Schneidmessern, welche für den in Tabelle 13 und Tabelle 14 beschriebenen Versuchsumfang genutzt wurden, war kein markantes Verschleißkriterium feststellbar. Allgemein fand bei allen Elektrodentypen ein Kupferaufrieb und im Gegenzug ein Abrieb der Hartmetallschicht statt, jedoch kein messbarer Verschleiß im Sinne einer Verschleißmarkenbreite oder eines Schneidkantenversatzes, wie in Abbildung 40 dargestellt ist. Es kann abgeleitet werden, dass eine stärkere Abnutzung an den Ecken stattfindet und das Schneidmesser mit einer Balligkeit R40 scheinbar einem erhöhten Auf- und Abrieb unterworfen ist.

Zur Dokumentation von Verschleißerscheinungen am Schneidstoff wurden daher an einer dispersionsverfestigten Elektrode Versuche durchgeführt. Als Kriterium wurde der Freiflächenverschleiß gewählt, welcher durch die Verschleißmarkenbreite charakterisiert wird. Eine große Verschleißmarkenbreite führt zu einer Verkürzung der Schneidkante um den Schneidkantenversatz. Die Folge sind eine verringerte Maßhaltigkeit und Oberflächengüte des zu bearbeiteten Werkstücks. Die Verschleißmarkenbreite wird in Abbildung 40 verdeutlicht. Die Versuche wurden mit dem Balligkeitsradius R15 durchgeführt.

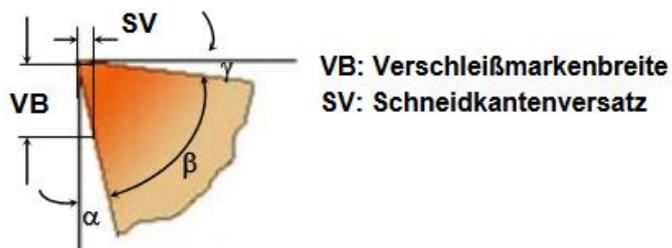


Abbildung 40: Verschleiß an der Schneide [64, S.32]

Die Elektrode ist der e3-Elektrode ähnlich, die Zusammensetzung weicht jedoch von den Literaturwerten [65] ab. Tabelle 17 zeigt die durchgeführten Untersuchungen. Da nach den 100 Versuchen mit 1 kN bei  $330 \text{ min}^{-1}$  und bei  $620 \text{ min}^{-1}$  noch kein Verschleiß erkennbar war, wie in Abbildung 41 zu sehen ist, wurde für die nächste Stufe mit 1,5 kN auf 300 Versuche direkt mit  $620 \text{ min}^{-1}$  weitergearbeitet.

Tabelle 17: Schneidmesser–Verschleißstufenversuche mit Nitrode-Elektrode

Elektrode/Zeit	$330 \text{ min}^{-1}$			$620 \text{ min}^{-1}$		
	1 kN	1,5 kN	2 kN	1 kN	1,5 kN	2 kN
e3	100 x			100 x	300 x	50 x

Durch die dreifache Anzahl an Zerspanvorgängen und die erhöhte Kraft ergab sich die rund fünffache Eckenverrundung und nach 150 Zerspanvorgängen konnte mit dem Mikroskop eine Verschleißmarkenbreite nachgewiesen werden. Die Verschleißmarkenbreite wird in Abbildung 42 über die Anzahl an Zerspanvorgängen aufgetragen.

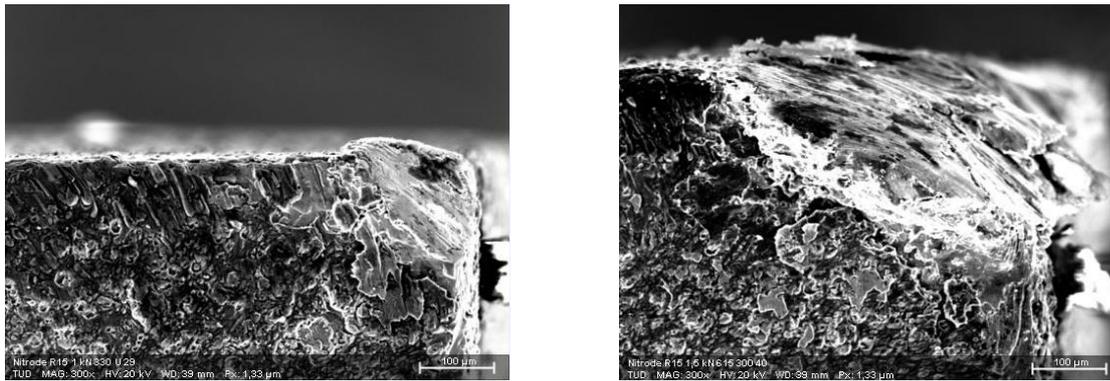


Abbildung 41: Verschleiß an der Freifläche; Links: nach 100 Zerspanvorgängen, R15 mit  $330 \text{ min}^{-1}$  bei  $1 \text{ kN}$ , Eckenverrundung  $\sim 0,0095 \text{ mm}^2$ ; Rechts: nach 300 Zerspanvorgängen, R15 mit  $620 \text{ min}^{-1}$  bei  $1,5 \text{ kN}$ , Eckenverrundung  $\sim 0,0472 \text{ mm}^2$  [62, S. 99]

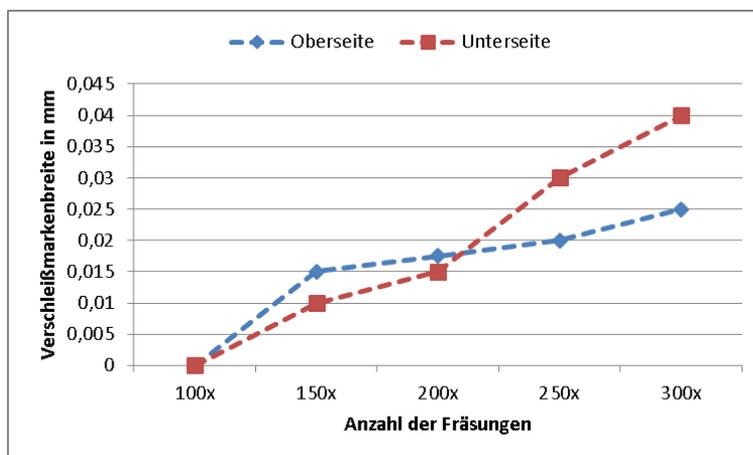


Abbildung 42: Ausbildung der Verschleißmarkenbreite in Abhängigkeit der Anzahl der Zerspanvorgänge für R15 mit  $620 \text{ U/min}$  und  $1,5 \text{ kN}$  nach [62, S. 99]

Um den Einfluss von höheren Kräften auf den Prozess zu ermitteln, wurden 50 Zerspanvorgänge mit  $2 \text{ kN}$  ausgeführt. Aufgrund der höheren Reibung nahm der Verschleiß stark zu. Vermutlich begünstigt eine stärkere Erwärmung den Abrieb als Resultat der höheren Reibung den Verschleiß deutlich und erweicht den Schneidwerkstoff verstärkt. Die Verschleißmarkenbreiten, die dadurch entstanden sind, waren denen nach 300 Zerspanvorgängen bei  $1,5 \text{ kN}$  ähnlich.

## 8 Versuchsmethodik der Standmengenuntersuchungen

Die Schweißversuche der Standmengenuntersuchungen wurden an der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage (Forschungseinrichtung 1) durchgeführt. Die dazugehörigen metallographischen Untersuchungen wurden an Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik (Forschungseinrichtung 2) durchgeführt.

### 8.1 Versuchsmatrix

Jede Materialdickenkombination wurde mit jedem Elektrodenwerkstoff in unterschiedlichen Stufen geschweißt. Die einzelnen Stufen dienen dazu, den jeweiligen Verschleißzustand der Elektrodenkappen nach einer festgelegten Anzahl an geschweißten Punkten metallographisch zu untersuchen. Die Stufen wurden in Abstimmung mit dem projektbegleitendem Ausschuss am 7.4.2016 festgelegt. Daraus ergab sich die Versuchsmatrix für die Standmengenuntersuchungen nach Tabelle 18. Im Vorfeld der Standmengenuntersuchungen wurden für jede Versuchsreihen- und Elektrodenwerkstoffkombination die Schweißbereiche ebenfalls nach SEP 1220-2 [66] ermittelt.

Die Standmengenuntersuchungen wurden zunächst nach DIN EN ISO 8166 [4] geplant und VR01-e1 entsprechend dieser Norm durchgeführt. Nach der Präsentation der Versuchsergebnisse zur zweiten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses am 07.04.2016 wurden alle weiteren Untersuchungen (alle außer VR01-e1) nach SEP 1220-2 [66] durchgeführt. Beide Standards ermöglichen die Verschleißcharakterisierung mit in konstanten Abständen geschweißten Punkten. Dies wird durch die Einteilung der Blechgeometrien in Verschleiß- und Prüfbleche realisiert. Prüfbleche dienen der Ermittlung der Punktdurchmesser während einer Standmengenuntersuchung. Diese werden nach DIN EN ISO 10447 [67] mit der Meißelprüfung erfasst. Bei der VR04 wurden die Punktdurchmesser der Fügeebene 1 (oberes und mittleres Blech) durch die manuelle Schälprüfung ermittelt. Verschleiß- und Prüfbleche wurden alternierend geschweißt. Nach SEP 1220-2 [66] werden häufiger Prüfbleche geschweißt, was einen detaillierteren Einblick in den Verschleißzustand der Elektroden ermöglicht. Abweichend von beiden Normen, wurde in keiner Stufe nach Unterschreiten des Mindestpunktdurchmessers abgebrochen, sondern bis zum Ende der jeweiligen Stufe durchgeschweißt. Die unterschiedlichen Schweißpunktanzahlen der Stufenversuche zwischen VR01, VR02 und VR03, VR04 ergaben sich aus den unterschiedlichen geometrischen Abmessungen und Eigenschaften der Bleche (Tabelle 19) und dem zu erwartenden höheren Elektrodenverschleiß bei VR03 und VR04. Bei VR03 und VR04 fanden die Standmengenuntersuchungen auf Grund der Materialverfügbarkeit in einem geringeren Umfang statt. Des Weiteren liegen bereits fundierte Erkenntnisse zu VR03 vor [68]. Für

jeden einzelnen Stufenversuch innerhalb einer Versuchsreihe wurden folgende Startbedingungen festgelegt und konstant gehalten:

- Soll-Punktdurchmesser Versuchsbeginn:  $5,2\sqrt{t}$ , ermittelt aus den Schweißbereichen
- Elektrodenkraft, Vorhaltezeit, Schweißzeit, Nachhaltezeit
- Bei Mehrimpulsschweißungen: Vor-/Nachimpulszeiten, -stromstärken
- Kühlwasserdurchflussmenge
- Schweißgeschwindigkeit (Taktzeit, Anhang B)
- Schweißstrom (Hauptimpuls) für  $d_{p,soll} = 5,2\sqrt{t}$

Tabelle 18: Versuchsmatrix der Standmengenuntersuchungen mit der Einteilung der Stufen und Anzahl der Schweißpunkte je Stufe

		Elektrodenwerkstoff			
		e1	e2	e3	e4
Versuchsreihe	Stufe	Punktanzahl	Punktanzahl	Punktanzahl	Punktanzahl
VR01	1	400	400	400	400
	2	800	800	800	800
	3	1200	1200	1200	1200
	4	1600	1600	1600	1600
	5	4000	2000	2000	2000
VR02	1	400	400	400	400
	2	800	800	800	800
	3	1200	1200	1200	1200
	4	1600	1600	1600	1600
	5	2000	2000	2000	2000
VR03	5	822	822	822	822
VR04	1	282	282	282	282
	3	552	552	552	552
	5	822	822	822	822

Tabelle 19: Eigenschaften der Verschleiß- und Prüfbleche für die Standmengenuntersuchungen nach SEP 1220-2 [66]

Blechtyp	Eigenschaft	VR01	VR02	VR03	VR04
Prüfblech	Punktanzahl	8		12	
	Punkte für Meißeltest	2, 3, 4, 5, 6, 7		2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	
	Punkt für Querschleiff	8		12	
	Maße (Länge x Breite)	500 mm x 30 mm		400 mm x 30 mm	
	Punktabstand	30 mm		30 mm	
	Randabstand (min.)	15 mm		15 mm	
Verschleißblech	Punktanzahl	92		78	
	Maße (Länge x Breite)	500 mm x 180 mm		400 mm x 180 mm	
	Punktabstand	30 mm		30 mm	
	Randabstand (min.)	15 mm		15 mm	

## 8.2 Versuchsablauf und Messgrößen

Der Versuchsablauf einer einzelnen Stufe ist in Abbildung 43 dargestellt. Während der Stufenversuche wurden die Messdaten nach Tabelle 20 aufgezeichnet und dokumentiert. Diese dienen ebenso wie die metallographischen Untersuchungen der Verschleißcharakterisierung der Elektrodenkappen. Dabei wurden Widerstandsmessungen mit einer separaten Gleichstromquelle (EA-PS 8080-60DT [69]) auf den Prüfblechstreifen und auf einem mit Gold beschichtetem Kupferblech (Blechdicke 1 mm) in Anlehnung an das DVS Merkblatt 2929-3 [70] durchgeführt, wobei ein Messstrom von 45 A gewählt wurde. Die Messung auf den Prüfblechstreifen wurde in der Vorhalte- und Nachhaltezeit durchgeführt. Die detaillierte Versuchsbeschreibung ist in [71, 72] festgehalten.

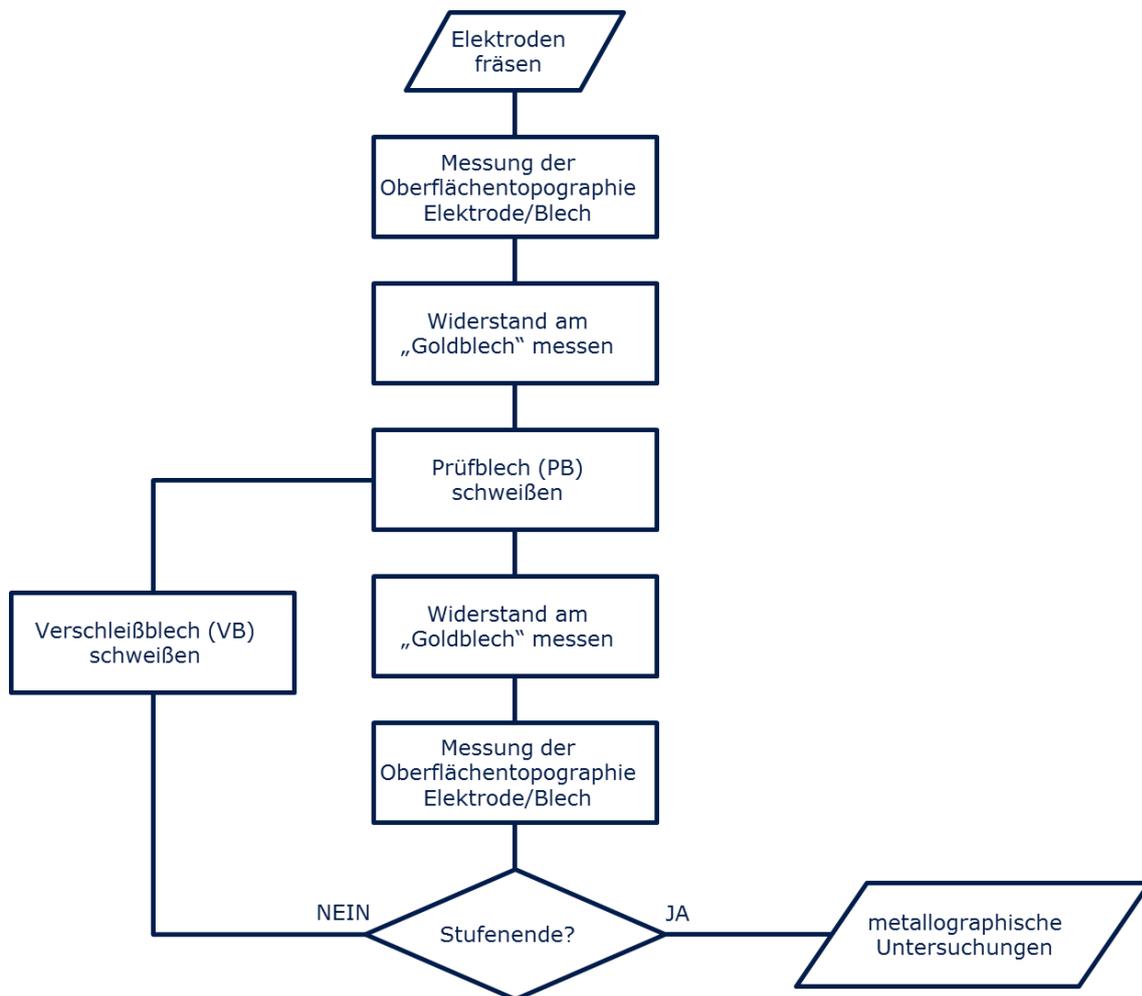


Abbildung 43: Versuchsablauf der Stufenversuche

Tabelle 20: Aufgezeichnete Messgrößen während der Standmengenuntersuchungen

	Messgröße	Prüfblech	Verschleißblech
Schweißversuche	Durchflussmenge Kühlwasser	X	X
	Temperatur Kühlwasservorlauf	X	X
	Temperatur Anode/Kathode	X	X
	Schweißspannung	X	X
	Elektrodenkraft	X	X
	Schweißstrom	X	X
	Wegmessung Anode/Kathode	X	X
Widerstandsmessung VHZ/NHZ	X		
Widerstandsmessung auf goldbeschichtetem Kupferblech	Strom, Spannung (separate DC-Stromquelle) Wegmessung Anode/Kathode	jeweils nach letztem Schweißpunkt	
Oberflächenmessung	Topographie Anode/Kathode	nach dem „Startfräsen“ und jeweils nach letztem Schweißpunkt	
	Topographie Blech	jeweils letzter Schweißpunkt	

Die Untersuchung der Elektrodenkappen nach den Stufenversuchen erfolgte nach dem in Abbildung 44 abgebildeten Schema. Tabelle 20 veranschaulicht die Versuchsmatrix der Untersuchungen an verschlissenen Elektrodenkappen.

Tabelle 21: Versuchsmatrix der Untersuchungen an verschlissenen Elektrodenkappen

		Elektrodenwerkstoff			
		e1	e2	e3	e4
Versuchsreihe	Stufe				
VR01	1	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S
	2	O/E/L/H	O/L/S	L/S	L/S
	3	O/E/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S
	4	O/E/L/H	L	L	O/L
	5	O/E/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S
VR02	1	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S
	2	O/E/L/H	L	L	L
	3	O/E/L/H	O/L/S	O/L/S	O/L/S
	4	O/E/L/H	L	L	L
	5	O/E/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S
VR03	5	L	L	L	L
VR04	1	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S	O/E/L/H/S
	3	O/L/S	O/L/S	O/L/S	O/L/S
	5	O/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S	O/L/H/S

O: EDX auf der Kappenoberfläche; L: Lichtmikroskopische Aufnahme im Querschliff;  
E: EDX im Querschliff; H: Härtemessungen; S: Messung der Schichtdicke

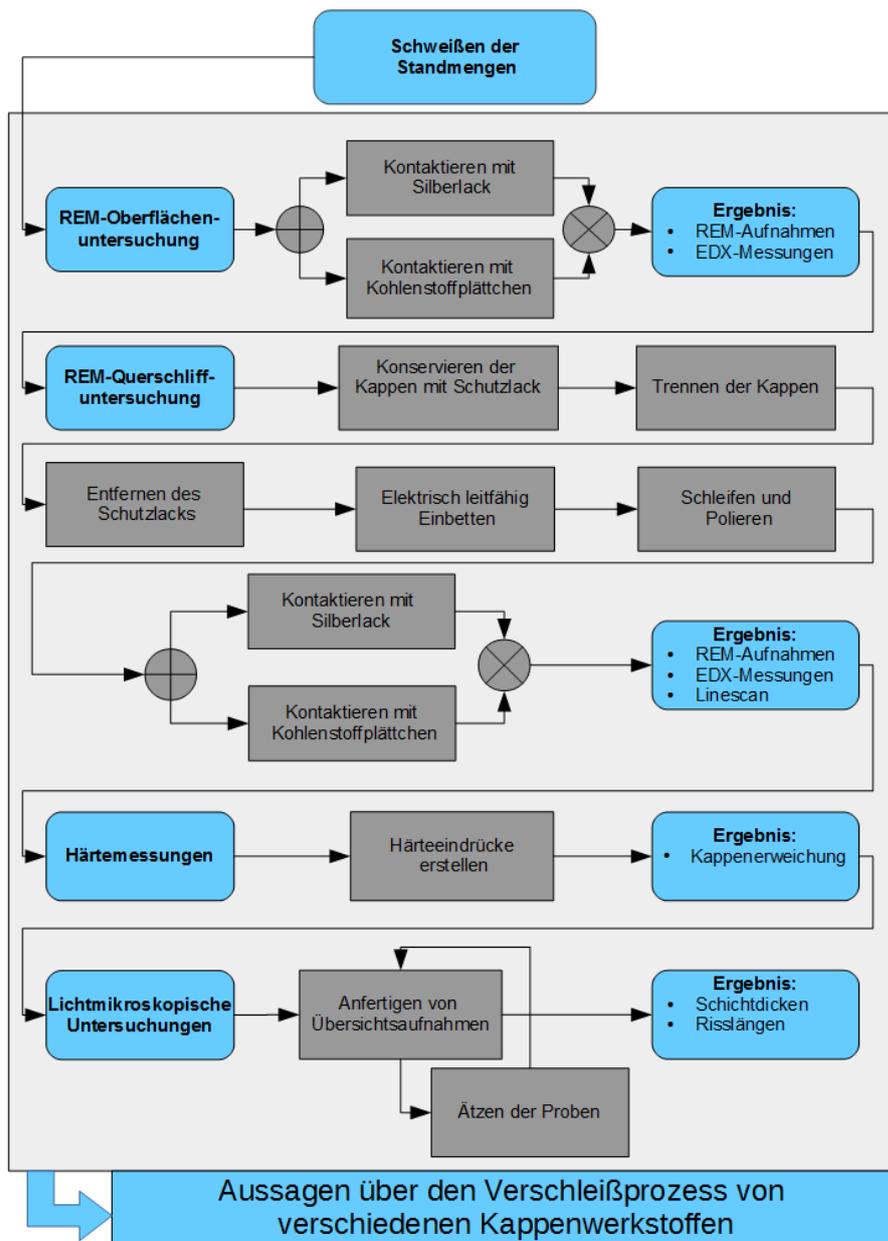


Abbildung 44: Schema der Versuchsdurchführung bei den Untersuchungen der verschlissenen Elektrodenkappen

### 8.3 Oberflächentopographiemessungen der Elektrodenkappen und Schweißpunkte

Die Oberflächentopographiemessungen der Elektrodenkappen und Schweißpunkte erfolgten mit dem in Abschnitt 5.4 beschriebenen chromatisch-konfokalem Mikroskop. Die Messungen an den Elektroden erfolgten nach dem „Startfräsen“. Für die VR01 und VR02 erfolgte anschließend aller 400 Punkte eine Messung. Auf Grund des zu erwartenden hohen Elektrodenverschleißes wurden bei VR03 und VR04 nach 12, 38, 64, 90 und 102 Punkten Messungen durchgeführt. Anschließend erfolgte jede weitere Messung nach

90 geschweißten Punkten, d. h. nach jedem weiteren Prüfblech [vgl.73]. Der letzte Schweißpunkt auf einem Prüfblech wurde ebenfalls beidseitig gemessen. Die Messungen dienten der fortlaufenden Verschleißdokumentation der Elektroden. Mit Hilfe dieser Messdaten konnte die Elektrodenarbeitsfläche gemessen werden, die in Kombination mit den aufgezeichneten Prozessparametern der Verschleißcharakterisierung dienen. Die Messungen der Schweißpunkte wurden für die Ermittlung der Kontaktflächen zwischen Elektrode und Blech zum jeweiligen Schweißende genutzt. Die Messparameter sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Messparameter für die Oberflächentopographiemessungen

Messbereich	x: 17 mm y: 17 mm
Auflösung	x: 0,05 mm y: 0,05 mm
Messfrequenz	1000 Hz
Messzeit	ca. 15 Minuten pro Messung

### 8.4 Metallographische Untersuchungen von Schweißverbindungen

Die metallographische Untersuchungen der Schweißverbindungen erfolgten an der Forschungseinrichtung 2. Die Prüfbleche wurden mit dem Bühler Isomet 4000 Präzisionsnasstrennanlage so getrennt, dass die Schnittebene 0,5 mm von der Mitte des Elektrodeneindrucks lag, anschließend wurden die Proben eingebettet, geschliffen, poliert und mit der 5% Nital-Lösung geätzt.

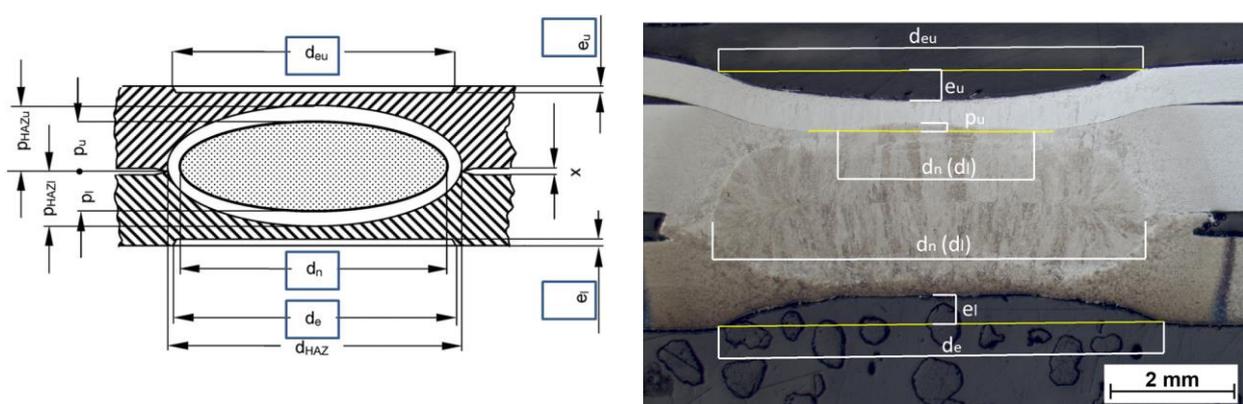


Abbildung 45: Bestimmung der Parameter der Schweißverbindung in Anlehnung an DVS-Merkblatt 2916-4 [74]

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen erfolgten mit den Lichtmikroskopen Leica MZ APO, Wild und Carl Zeiss Smartzoom. Anschließend erfolgte das Ausmessen der wichtigsten Kenngrößen der Schweißverbindungen in Anlehnung an das DVS-Merkblatt 2916-

4 [74] mit der AxioVision 4.8.2.0 Software, wie in Abbildung 45 dargestellt ist. Außerdem erfolgte, soweit zutreffend, die Ausmessung der Poren in der Schweißlinse und deren Bewertung in Anlehnung an das DVS-Merkblatt 2690 [75].

## **8.5 Metallographische Untersuchungen an verschlissenen Elektrodenkappen**

### **8.5.1 REM-Untersuchung der Kappenoberfläche**

Gegenstand der Untersuchung waren die oberflächennahen gebildeten Legierungsprodukte und die Morphologie der Elektrodenkappen. Daher bat sich die Analyse mit dem Rasterelektronenmikroskop REM FEI XL30 ESEM an. Zusammen mit der energiedispersiven Röntgenanalyse EDX EDAX war es möglich, die chemische Zusammensetzung zu bestimmen. Außerdem erlaubte das Rasterelektronenmikroskop, eine Aussage über die Oberflächenbeschaffenheit.

Um eine Übersicht über die Elemente und damit eine Einschätzung der gebildeten Legierungen auf den Elektrodenkappen zu geben, wurde die Mitte der Kappe als repräsentatives Element ausgewählt und dort stellvertretend gemessen. Anschließend wurden Bereiche von Interesse festgelegt. Dabei waren neben der Kappenmitte die Kallotten auf der Kappe Gegenstand der Untersuchung. Im REM wurde mindestens eine Aufnahme der Kappenmitte und eine EDX-Messung über diesen Bereich angefertigt. Des Weiteren waren auftretende Risse in den Elektroden Gegenstand von intensiven Untersuchungen.

### **8.5.2 REM-Untersuchung und EDX-Linescan am Querschliff**

Ziel der Untersuchung war es, die chemische Zusammensetzung der auflegierten Schichten zu bestimmen. Zunächst musste die Elektrode halbiert werden. Damit die empfindlichen auflegierten Schichten nicht ausbrechen und um Reaktionen mit dem Kühlschmierstoff zu verhindern, wurde die Kappe mit einem acrylbasierten Schutzlack versehen. Nach dem Trocknen des Lackes erfolgte das Trennen mit einer Präzisionsnastrennanlage Bühler Isomet 4000. Die Kappen wurden mit einer Bearbeitungszugabe von 0,5 mm halbiert. Danach wurde der Schutzlack mittels Ultraschallbad in Aceton entfernt. Die Proben wurden nun elektrisch leitfähig eingebettet und präpariert. Dies belief sich auf ein Schleifen und nachfolgendes Polieren mit dem Vibrationspoliergerät Buehler Vibromet 2, um die Abrundung der Kanten und Beschädigungen der Schichten zu minimieren.

Die Analyse der Querschliffe erfolgte mittels REM FEI XL30 ESEM. Die EDX-Linescans dienten der Bestimmung der Elemente in der Kappe und deren Änderung mit zunehmender Tiefe. Da im vorher beschriebenen Schritt die Proben bereits elektrisch leitfähig

eingebettet und ausreichend präpariert wurden, konnten die Proben nach der Härtemessung für Untersuchungen im REM verwendet werden. Sofern sich Oxide aufgrund des zeitlichen Abstandes zwischen den beiden Untersuchungen gebildet haben, wurden die Prüflinge noch einmal poliert.

Zur Bestimmung und Quantifizierung der Elemente wurde, wie bei der vorherigen REM-Untersuchung, die EDX-Analyse benutzt. Die Messung der Elementenverteilung in Tiefenrichtung der Elektrodenkappen quer zu der Arbeitsfläche erfolgte mittels EDX-Linescans mit definiertem Abstand und entlang einer vorher festgelegten Linie (Abbildung 46). Für eine ausreichende Vergleichbarkeit wurden die Kappenmitten der jeweiligen Elektroden auf diese Weise untersucht. Die Parameter der Untersuchung wurden dabei konstant gehalten und sind in Tabelle 23 aufgezeigt.

Tabelle 23: Parameter bei den EDX-Linescans am REM

Parameter	Größe
Points, Punkte	400
HV	250
Magnitude/Vergrößerung	1200
Dwell Time/Verweildauer	800 ms
TC	350 $\mu$ s

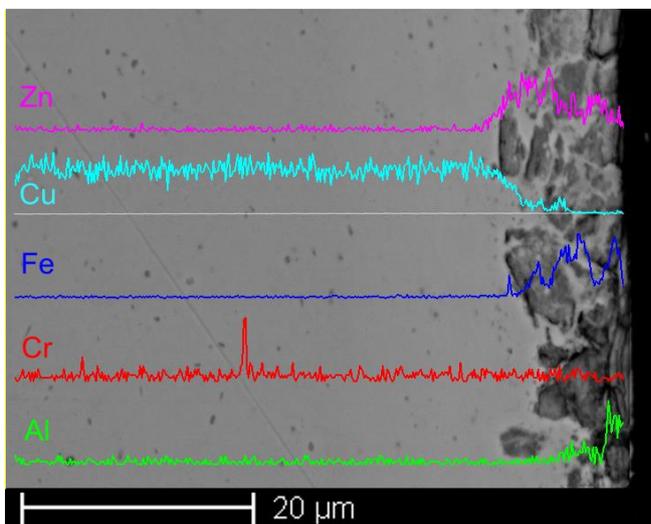


Abbildung 46: VR01 Ergebnis des Linescans der Kathode. Werkstoff CuCr1Zr (e1) nach 4000 Schweißpunkten

Außerdem erfolgten die EDX Flächen- und punktuellen Messungen in unterschiedlichen Bereichen der anlegierten Schichten, um deren genaue chemische Zusammensetzung zu ermitteln, wie in Abbildung 47 gezeigt ist.

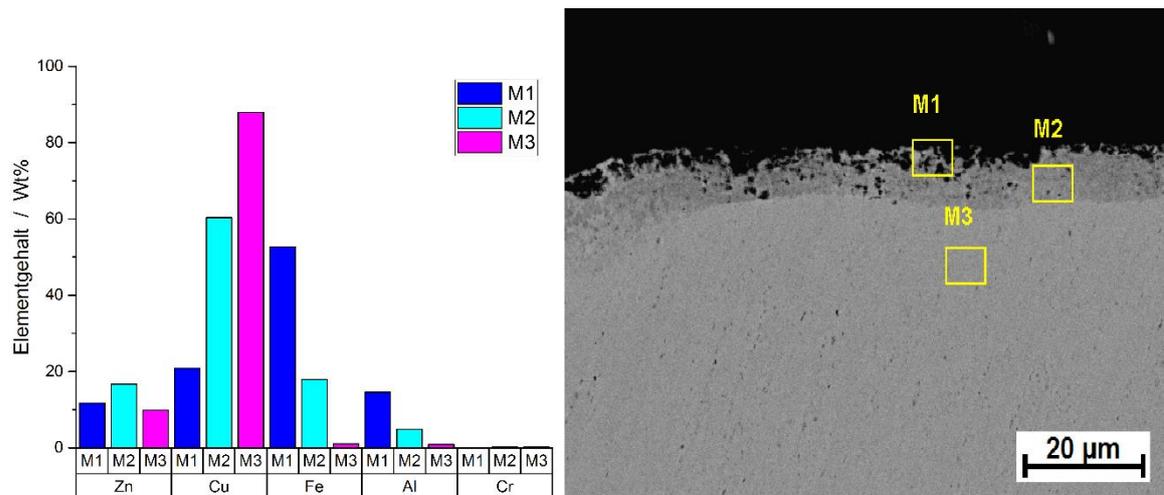


Abbildung 47: VR02 Messungen im Querschliff der Anode von Glidcop Al-60 (e3) nach 400 Schweißpunkten

### 8.5.3 Härtemessungen

Die Härteprüfung erfolgte nach Vickers mit dem Leica VMHT Härtemessgerät für die Elektrodenkappen aus VR02 und teilweise aus VR01. Für Kappen aus VR01, VR03 und VR04 kam eine automatische Härteprüfmaschine Qness Q60A PLUS im Einsatz. Als Prüflast wurde 0,981 N gewählt (HV 0,1) und die Haltezeit wurde mit 10 s festgelegt. Damit erfolgte eine Mikrohärtprüfung in der Mitte der Elektrodenkappe quer zu der Kappenarbeitsfläche. Bei der Prüfung wurden die Mindestabstände eingehalten. Der Abstand zwischen den Härteeindrücken sollte mindestens 3xDurchmesser des Eindrucks sein. Der Mindestabstand zur Oberfläche belief sich auf 2,5xDurchmesser des Härteeindrucks [76]. Die Ermittlung der Erweichungstiefe wird in Abbildung 48 veranschaulicht. Die Tiefe der Erweichung wurde bestimmt, sobald 90% der Grundwerkstoffhärte erreicht wurde.

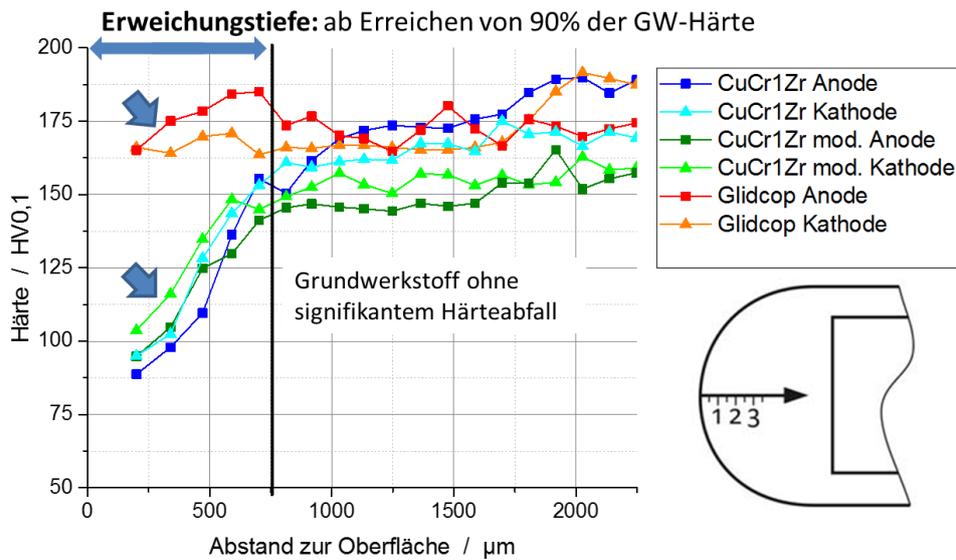


Abbildung 48: Härtemessungen zur Bestimmung der Erweichungstiefe (VR02, alle Kappen, jeweils Stufe 1)

### 8.5.4 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Neben den Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop und den Härtemessungen wurden weitere Untersuchungen benötigt, um die Werkstoffe zu charakterisieren. Dies erfolgte an optischen Aufnahmen der Kappen. Dafür wurden Panoramaaufnahmen angefertigt. Diese wurden aus einer Abfolge von lichtmikroskopischen Aufnahmen mit 400-facher Vergrößerung zusammengesetzt. Die Aufnahmen wurden mit einem Carl Zeiss Smartzoom Mikroskop angefertigt. Die Panoramaaufnahmen wurden einmal für die Proben nach der Präparation für die Querschliffuntersuchungen und eine weitere Aufnahme nachdem die Untersuchungen beendet und die Probe geätzt wurde. Die angefertigten Panoramaaufnahmen wurden benutzt, um die einzelnen Schichtdicken mittels AxioVision 4.8.2.0 zu bestimmen (vgl. Abbildung 49). Die mittlere Schichtdicke wurde anhand der fünf Messungen jeweils in der Kappenmitte und am Kappenrand berechnet. Zur Charakterisierung wurden die Risstiefen anhand der Panoramaaufnahmen ausgemessen.

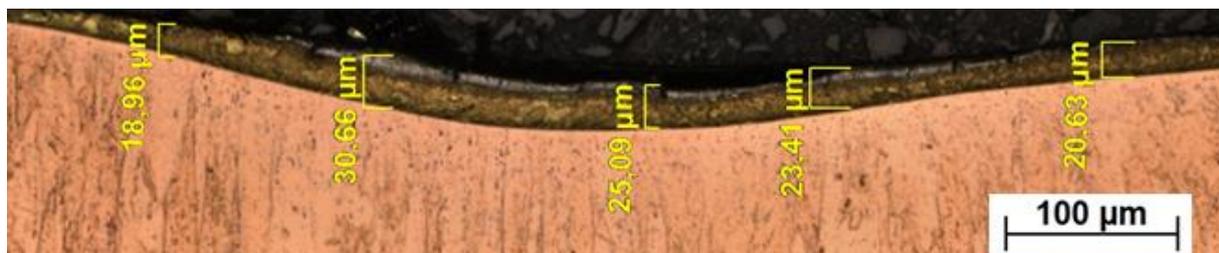


Abbildung 49: Messung der Gesamtschichtdicke in der Kappenmitte am Beispiel VR01-e2-sv2

## 8.6 Ermittlung der Schweißbereiche

Für jede Versuchsreihen- und Elektrodenwerkstoffkombination wurden die Schweißbereiche in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss in Anlehnung an das Stahleisen-Prüfblatt SEP 1220-2 [66] ermittelt. Als Elektrodengeometrie wurde eine Elektrodenarbeitsfläche mit einem Durchmesser von 6 mm und einem Balligkeitsradius von 40 mm eingesetzt (Geometrie nach Tabelle 4). Zur Ermittlung der Schweißbereiche jeder einzelner Versuchskombination wurden zunächst Simulationen mit Hilfe der kommerziellen Software SORPAS®2D durchgeführt. Dadurch konnte der experimentelle Versuchsaufwand stark reduziert werden.

### 8.6.1 VR01: HX340LAD+Z100 (t = 2,0 mm) – HX340LAD+Z100 (t = 2,0 mm)

Für VR01 wurden folgende Schweißparameter zur Ermittlung der Schweißbereiche mit allen Elektrodenwerkstoffen festgelegt:

Tabelle 24: VR01: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Größe
Elektrodenkraft	$F_{el}$	kN	3,5
Vorhaltezeit	$t_s$	ms	400
Schweißzeit	$t_w$	ms	600
Schweißstrom	$I_w$	kA	variabel
Nachhaltezeit	$t_h$	ms	400

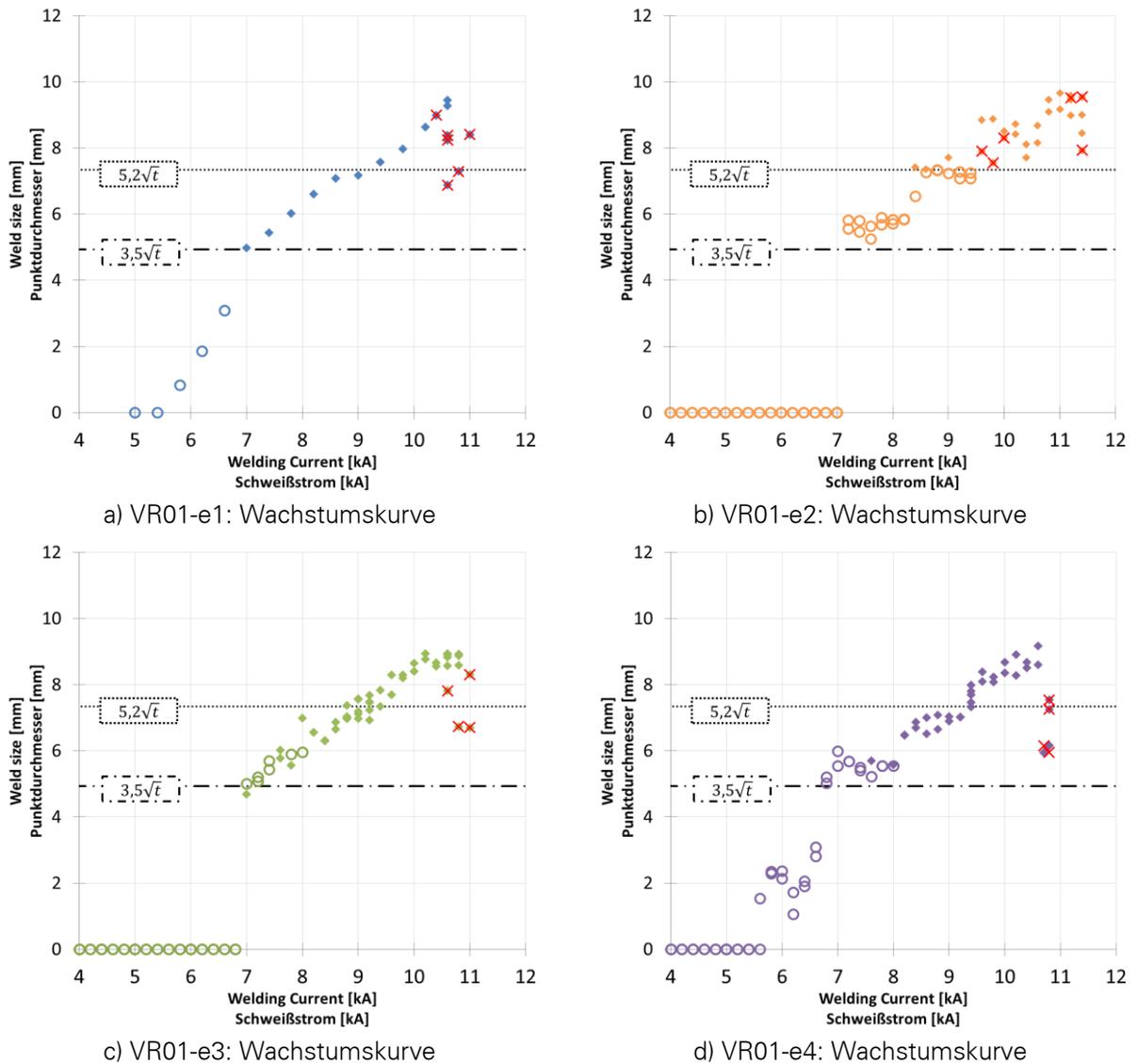


Abbildung 50: VR01: Wachstumskurven

**8.6.2 VR02: DX53D+Z100 (t = 0,65 mm) – DX53D+Z100 (t = 0,65 mm)**

Für VR02 wurden folgende Schweißparameter zur Ermittlung der Schweißbereiche mit allen Elektrodenwerkstoffen festgelegt:

Tabelle 25: VR02: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Größe
Elektrodenkraft	$F_{el}$	kN	2,1
Vorhaltezeit	$t_s$	ms	120
Schweißzeit	$t_w$	ms	180
Schweißstrom	$I_w$	kA	variabel
Nachhaltezeit	$t_h$	ms	120

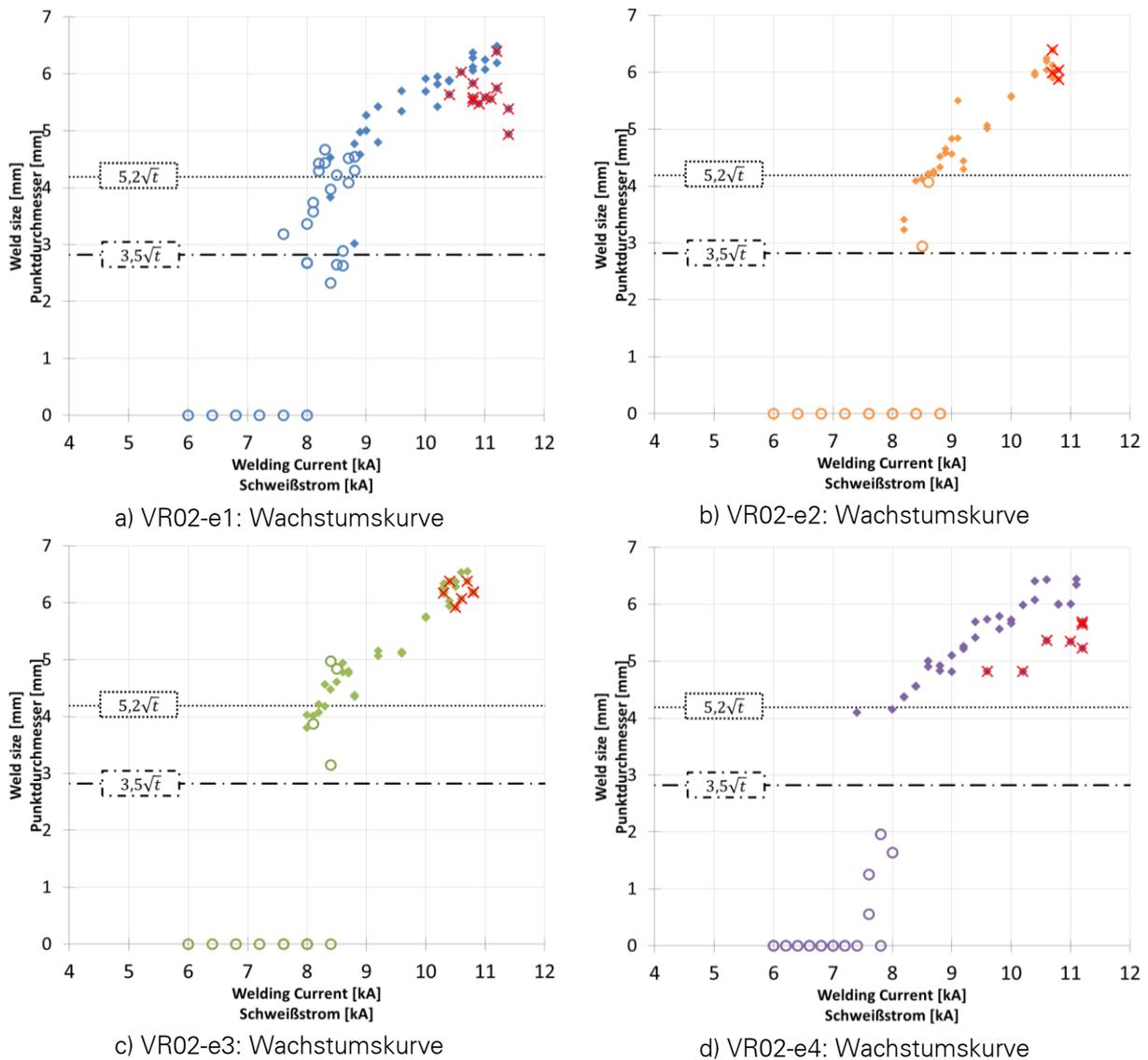


Abbildung 51: VR02: Wachstumskurven

**8.6.3 VR03: 22MnB5+AS150 (t = 1,0 mm) – 22MnB5+AS150 (t = 1,0 mm)**

Bei den Simulationen von VR03 konnte der Bereich der einsetzbaren Stromstärken durch Verwendung der größtmöglichen Elektrodenkraft von 3,5 kN im Vergleich zu niedrigeren Kraftwerten bei einem einfachen Rechteckverlauf des Schweißstromes am stärksten erweitert werden. Die Verwendung von zwei getrennten Stromimpulsen mit einer Pausenzeit von 30 ms bei 3,0 kN Elektrodenkraft erweiterte den Bereich guter Simulationsergebnisse zusätzlich in Richtung geringerer Ströme und Zeiten. VR03 wurde daher mit zwei Schweißimpulsen und einer Pausenzeit von 30 ms zwischen den Impulsen geschweißt. Der Schweißstrom des ersten Schweißimpulses wurde konstant gehalten,

während der Schweißstrom des zweiten Impulses variiert wurde. Für VR03 wurden folgende Schweißparameter zur Ermittlung der Schweißbereiche mit allen Elektrodenwerkstoffen festgelegt:

Tabelle 26: VR03: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Größe
Elektrodenkraft	$F_{el}$	kN	3,0
Vorhaltezeit	$t_s$	ms	400
Schweißzeit	$t_w$	ms	Vorimpuls: 100; Hauptimpuls: 300
Pausenzeit	$t_p$	ms	30
Schweißstrom	$I_w$	kA	Vorimpuls: 4,5; Hauptimpuls: variabel
Nachhaltezeit	$t_h$	ms	400

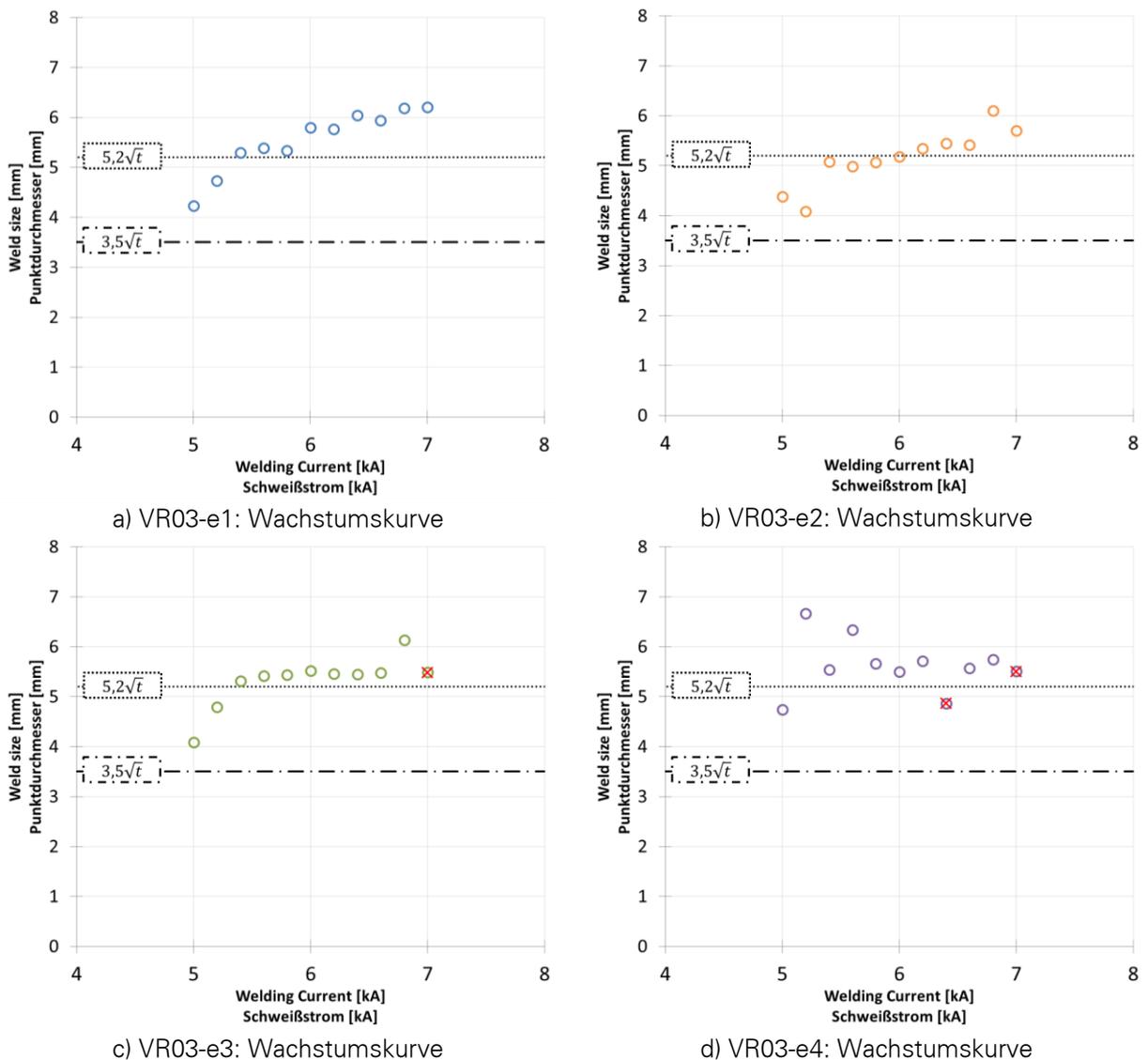


Abbildung 52: VR03: Wachstumskurven

#### 8.6.4 VR04: DX53D+Z100 (t = 0,65 mm) – HC340LA+ZE75/75 (t = 1,75 mm) – 22MnB5+AS150 (t = 1,5 mm)

Bei der Simulation der VR04 stellten sich die stark unterschiedlichen Blechdicken als problematisch heraus. Unterschiedliche Simulationsansätze mit einem und mehreren Stromimpulsen und mit unterschiedlichen Verläufen zeigten keine erfolgreiche Anbindung des dünnsten Bleches. Die simulierte Schweißlinse begann meist sich im Inneren des 22MnB5-Blechtes zu bilden und dehnte sich anschließend aus. Das dünnste Blech wurde dabei gar nicht oder zu geringfügig mit angebunden, selbst wenn die Parameter so hoch gewählt wurden, dass es zur Spritzerbildung kam. Zudem ließ das Programm die Einstellung von Simulationsintervallen für die Stromstärke und die Zeiten zu, jedoch nicht für die Variation der Elektrodenkraft. Wurde eine Simulation mit mehrstufigem Kraftverlauf und z. B. einer Variation des Stromes gestartet, wurde der gewählte Kraftverlauf nur für den ersten Simulationsdurchlauf korrekt berechnet. Bei den folgenden Simulationsschritten kam es zu Fehlern, so dass die Kraft zum Zeitpunkt eines geplanten Anstiegs oder Abfalls zunächst auf null absank, bevor der eingestellte Wert erreicht wurde. Aus diesen Gründen wurden für VR04 85 einzelne Simulationen durchgeführt, ein großer Teil davon zum Test verschiedener Kraftverläufe. Die simulierten Kraftverläufe, die eine zumindest knapp ausreichende Anbindung des dünnsten Bleches erreichen, konnten durch die vorhandene Schweißzange nicht praktisch realisiert werden. Zudem übertraf das Dickenwachstum der Linse stark den sich gebildeten Linsendurchmesser, sodass die simulierte Schmelze sich bis zur Blechoberfläche ausgebildet hat und in Berührung mit den Elektroden kam. Mit den gewonnenen Kenntnissen aus den einzelnen Simulationen wurden schließlich Parameter für praktische Schweißversuche ausgesucht, welche zufriedenstellende Ergebnisse in der zerstörenden Prüfung durch Meißeltest lieferten und für die Schweißbereichsermittlung übernommen werden konnten [73]. Für VR04 wurden folgende Schweißparameter zur Ermittlung der Schweißbereiche mit allen Elektrodenwerkstoffen festgelegt:

Tabelle 27: VR04: Schweißparameter für die Ermittlung der Schweißbereiche

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Größe
Elektrodenkraft	$F_{el}$	kN	3,5
Vorhaltezeit	$t_s$	ms	400
Schweißzeit	$t_w$	ms	1000 mit 100 Stromanstieg inkl.
Schweißstrom	$I_w$	kA	variabel
Nachhaltezeit	$t_h$	ms	400

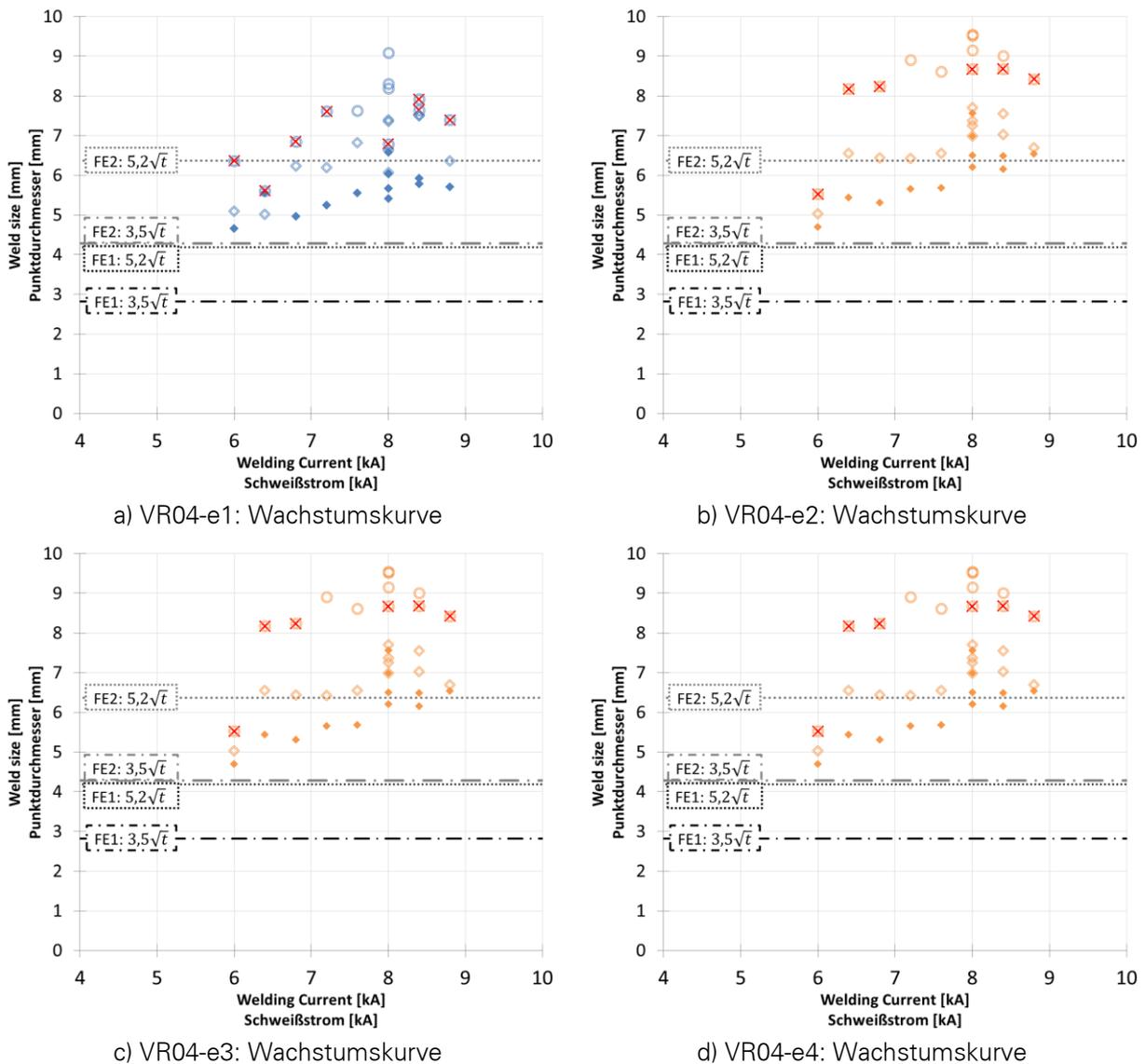


Abbildung 53: VR04: Wachstumskurven

### 8.6.5 Schweißparameter für die Standmengenuntersuchungen

Für die Standmengenuntersuchungen diente der Soll-Punktdurchmesser von  $5,2\sqrt{t}$  als Startkriterium für die Auswahl des Schweißstroms (Tabelle 28). Beim Vergleich der Schweißströme ist festzustellen, dass für VR02 unterschiedliche Schweißströme verwendet werden mussten, um den gleichen Punktdurchmesser zu erzielen. Dabei ist wiederum festzustellen, dass beide schmelzmetallurgisch hergestellten Elektrodenwerkstoffe e1 und e2 keinen Unterschied aufwiesen. Für die pulvermetallurgisch hergestellten dispersionslegierten Elektroden konnte ein geringerer Schweißstrom genutzt werden. Dies erklärt sich durch die geringere thermische und elektrische

Leitfähigkeit der Werkstoffe. Hinzu kam der Einfluss des vergleichsweise geringen Abstandes der Elektrodenarbeitsflächen zur Fügeebene, der geringere Gesamtwiderstand durch die dünnen Blechstärken der eingesetzten Materialien, da bei den anderen Versuchsreihen dieser elektrodenwerkstoffspezifischer Einfluss nicht zu erkennen war.

Tabelle 28: Schweißparameter für die Standmengenuntersuchungen

Versuchsreihe	Kraft /kN	Vorhaltezeit /ms	Nachhaltezeit /ms	Vorwärmstrom /kA	Vorwärmzeit /ms	Pausenzeit /ms	Schweißstrom /kA				Stromanstiegszeit /ms	Schweißzeit /ms	Durchfluss //min
							e1	e2	e3	e4			
VR01	3,5	400	400	0	0	0	9,2	9,2	9,2	9,2	0	600	6
VR02	2,1	120	120	0	0	0	9,2	9,2	8,6	8,4	0	180	6
VR03	3,0	400	400	4,5	100	30	6,8	6,8	6,8	6,8	0	300	4
VR04	3,5	400	400	0	0	0	8	8	8	8	100	1000	4

## 9 Finite-Elemente Simulation: Versuchsmethodik

Die FE-Simulationen erfolgten im Rahmen des Projektes unter Anwendung der kommerziell verfügbaren Simulationssoftware SORPAS 2D in der Version 11,6. Die Schweißparameter, Elektroden- und Blechgeometrien aus den jeweiligen Versuchsreihen (vgl. Abschnitt 4) wurden im Simulationsprogramm abgebildet. Die Abbildung eines vernetzten Modells ist im Anhang C.8, Abbildung 139 dargestellt. Bei der Simulation der Schweißbereiche wurde ein Modell mit 1046 Elementen und 1118 Knoten verwendet. Die Sensitivitätsanalysen erfolgten mit einem Modell mit 4801 Elementen und 5083 Knoten. Die Parameter der Schweißanlage aus Abschnitt 5.1 wurden in der SORPAS-Datenbank hinterlegt, um die Parameter aus Tabelle 5 abzubilden.

### 9.1 Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluss einzelner Werkstoffeigenschaften auf das Schweißergebnis zu beurteilen, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hierfür wurden der spezifische elektrische Widerstand, die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Elektrodenkappenwerkstoffs variiert, wie in der Tabelle 29 dargestellt ist. Die Abhängigkeiten der variierten Werkstoffeigenschaften von der Temperatur sind im Anhang C.12 zu finden. Die Variationen erfolgten für VR01. Es wurden vier aufeinander folgende Schweißungen mit der Taktzeit von 1 s simuliert.

Um den Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf den Schweißprozess zu ermitteln, wurden die Änderungen der Punktdurchmesser und der Maximaltemperaturen (vgl. Abbildung 55) von den zwei in Abbildung 54 gekennzeichneten Knoten mit den aus dem Referenzversuch ermittelten Werten verglichen.

Tabelle 29: Variation der Werkstoffeigenschaften für die Sensitivitätsanalysen

		Versuchsnummer			
		Referenz V0	V1,2	V 2,3	V4,5
Werkstoffeigenschaft	Spezifischer elektrischer Widerstand	SORPAS-Datenbank	+/- 0,00286 $\mu\Omega\cdot m$ (+/- 13% bezogen auf Wert bei RT)	SORPAS-Datenbank	SORPAS-Datenbank
	Spezifische Wärmekapazität	SORPAS-Datenbank	SORPAS-Datenbank	+/- 50 J/(kg·K) (+/- 13% bezogen auf Wert bei RT)	SORPAS-Datenbank
	Thermische Leitfähigkeit	SORPAS-Datenbank	SORPAS-Datenbank	SORPAS-Datenbank	+/-40 W/(m·K) (+/- 12% bezogen auf Wert bei RT)

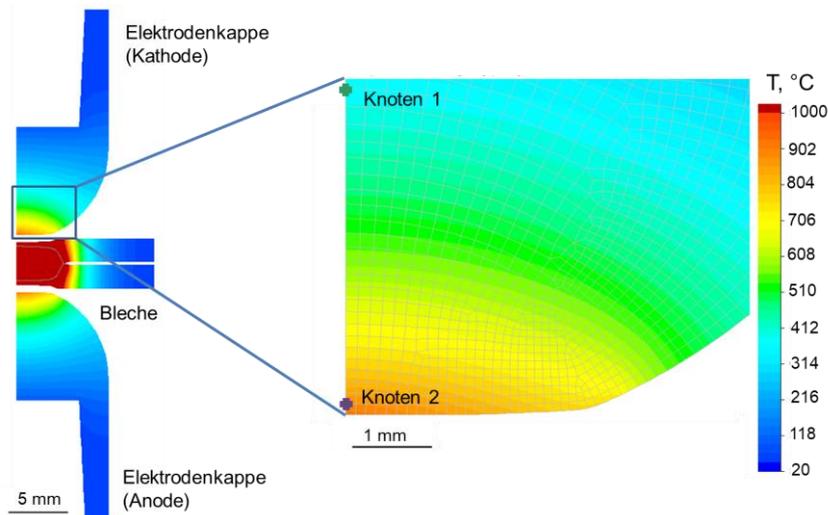


Abbildung 54: Temperaturfeld in der Elektrodenkappe, simuliert in SORPAS 2D mit gekennzeichneten Knoten, dessen Temperaturverläufe für die Sensitivitätsanalyse verwendet werden

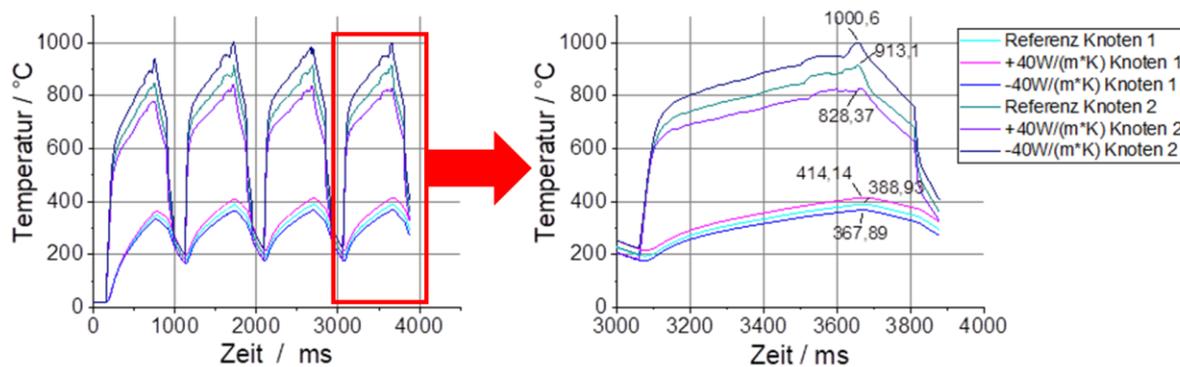


Abbildung 55: links: Temperaturverläufe in den Knoten 1 und 2 bei Variation der Wärmeleitfähigkeit des Elektrodenwerkstoffs; rechts: Ermittlung der Maximaltemperaturen

## 9.2 Simulationen der Schweißbereiche

Die Simulationen der Schweißbereiche erfolgten unter Anwendung der im Rahmen des Forschungsprojektes ermittelten Werkstoffeigenschaften. Da die Software die Elektrodenkappen als starre Körper betrachtet, flossen nur die elektrischen Widerstände und Wärmeleitfähigkeiten in die Simulationen ein. Alle anderen für die Simulationen benötigten Werkstoffeigenschaften, wie z. B. Wärmeausdehnungskoeffizient oder Wärmekapazität wurden aus der SORPAS-Werkstoffdatenbank übernommen. Für CuCr1Zr (e1) und CuCr1Zr, mod. (e2) wurden die Werkstoffeigenschaften vom Elektrodenwerkstoff CuCr1Zr verwendet. Für die Elektrodenkappenwerkstoffe e3 und e4 wurden die Werkstoffkennwerte von der Nitrode übernommen. Es wurden Schweißbereiche für die Versuchsreihen VR01 und VR02 simuliert. Ein Beispiel des

Schweißbereiches ist in Abbildung 56 gezeigt. Die aus der Simulation ermittelten Wachstumskurven sowie obere und untere Qualitätsgrenzen wurden mit den Ergebnissen der Experimente verglichen. Die Parameter zur Simulation der Schweißbereiche sind in der Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Strom- und Zeitwerte zur Simulation der Schweißbereiche

		Strom in kA			Zeit in ms		
		Anfang	Ende	Schrittweite	Anfang	Ende	Schrittweite
Versuchsreihe	VR01	6,0	10	0,4	500	750	50
	VR02	4,0	12,0	0,4	60	300	40

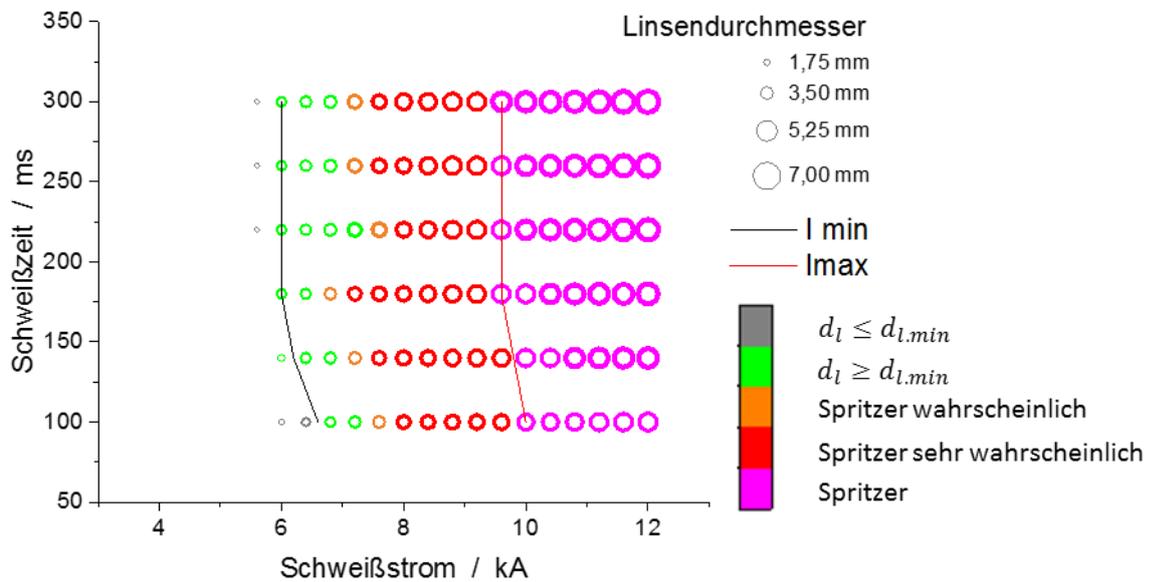


Abbildung 56: VR01-e4 Schweißbereich, simuliert mit SORPAS 2D

## 10 Versuchsergebnisse der Standmengenuntersuchungen

### 10.1 Standmengenuntersuchung VR01

#### 10.1.1 Punktdurchmesser

Die Schweißpunktdurchmesser jeder Versuchskombination und Stufe sind in Abbildung 57 dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind alle Diagramme bis 2000 Schweißpunkte dargestellt. Die Ergebnisse von VR01-e1 bis 4000 Schweißpunkte sind in Abbildung 60 zu finden. Die gemessenen Punktdurchmesser unterschreiten den Mindestpunktdurchmesser in keiner Versuchskombination. Es ist festzustellen, dass die Kurven für die Kappen e1, e3 und e4 vergleichsweise geringe Schwankungen und über die Gesamtzahl der Punkte eine leicht fallende Tendenz aufweisen. VR01-e2 weist die größten Schwankungen auf. Die Punktdurchmesser fallen für die Kappen e3 und e4 nahezu über die gesamte Stufe größer aus als die der anderen [73].

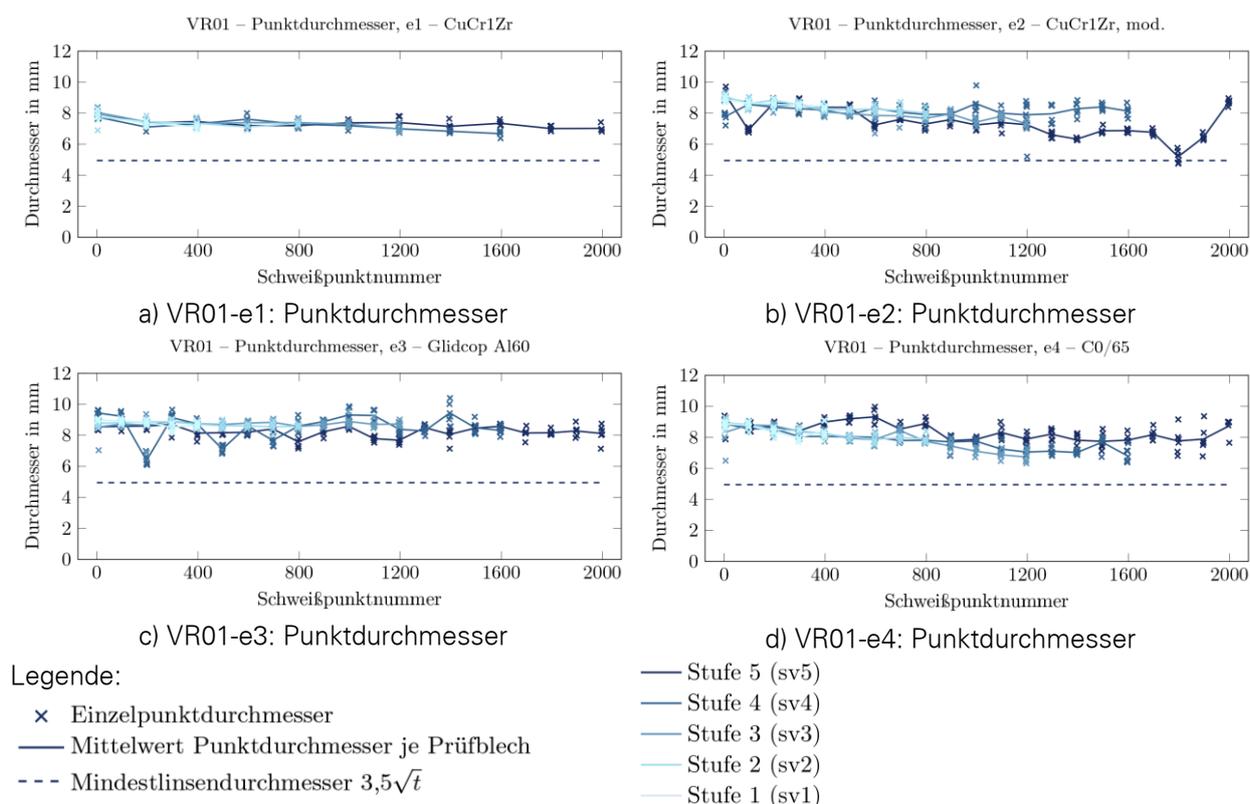


Abbildung 57: VR01: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen

#### 10.1.2 Elektrodentopographie

Die Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen die Oberflächentopografien der Elektroden der jeweiligen Stufe 5. Punkt 0 zeigt die „startgefräste“ Elektrodenkappe. Nach 400

Schweißpunkten zeigen sich deutliche Veränderungen an den Elektrodenoberflächen, welche bis zum Ende der Stufen zunehmen. Dabei ist eine Vergrößerung der Arbeitsflächen in radialer Richtung zu erkennen. Nach [77, 78] kommt es bei einer radialen Aufweitung der Elektrodenkappen auf Grund des Gesetzes der Volumenkonstanz zu axialem Verschleiß der Elektrodenkappen. Diese Erscheinung wird als Pilzbildung bzw. Mushrooming bezeichnet. Außerdem sind Kraterbildungen auf den Oberflächen zu beobachten. Diese bilden sich durch lokales Aufschmelzen oder Herausbrechen der spröden Legierungsschicht, was als Pitting bezeichnet wird [79]. Beschichtungswerkstoffe mit niedriger Schmelztemperatur wie Zink (420°C) können in diese Krater eindringen und erneut mit dem Elektrodenwerkstoff in Kontakt treten. Im Randbereich der Krater konzentrieren sich mechanische Spannungen und der Stromfluss, was zu beschleunigtem Materialabtrag und Kraterwachstum führen kann. [vgl.73]

VR01-sv5: Konfokal-chromatische Oberflächenmessung, Anode							
Punktnr.		0	400	800	1200	1600	2000
Elektrode	e1 (CuCr1Zr)						
	e2 (CuCr1Zr, mod)						
	e3 (Glidcop AL60)						
	e4 (DISCUP C0/65)						

Abbildung 58: VR01: Elektrodenoberflächen der Anode

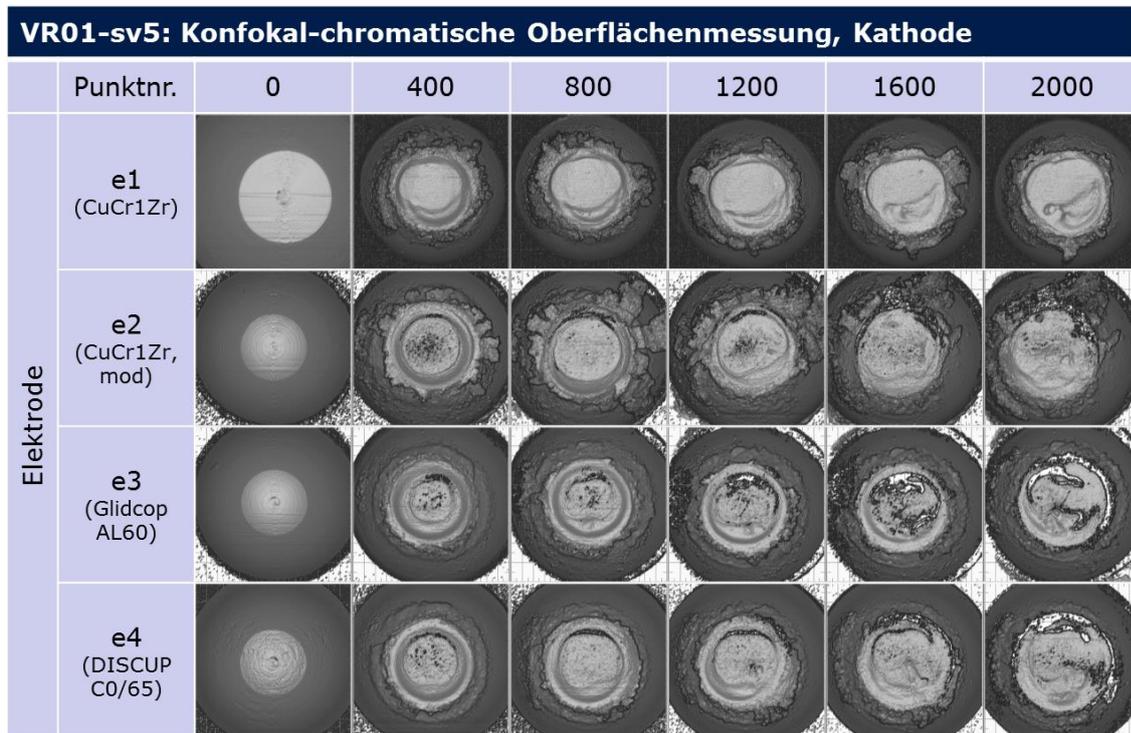


Abbildung 59: VR01: Elektrodenoberflächen der Kathode

### 10.1.3 Metallographische Untersuchungen

Die metallographischen Untersuchungen der Schweißverbindungen von VR01 zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Punktdurchmesser der Meißelprüfungen. Die ermittelten Abhängigkeiten des Linsendurchmessers von der Schweißpunktanzahl sind in Abbildung 60 für Werkstoffe e1 und e3 dargestellt, für Werkstoffe e2 und e4 sind die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen im Anhang C.9 zu finden. Für alle Werkstoffe können die in Abschnitt 10.1.1 beschriebenen Tendenzen bestätigt werden.

Für den Elektrodenwerkstoff e1 ist der gemessene Linsendurchmesser bis 2000 Schweißpunkte kleiner, als der Punktdurchmesser, ab 2000 Schweißpunkte ist eine starke Streuung des Linsen- und Punktdurchmessers zu beobachten. Die gemessenen Porenanteile der Schweißlinsen überschreiten bis ca. 3500 Schweißungen den Grenzwert von 25% nicht.

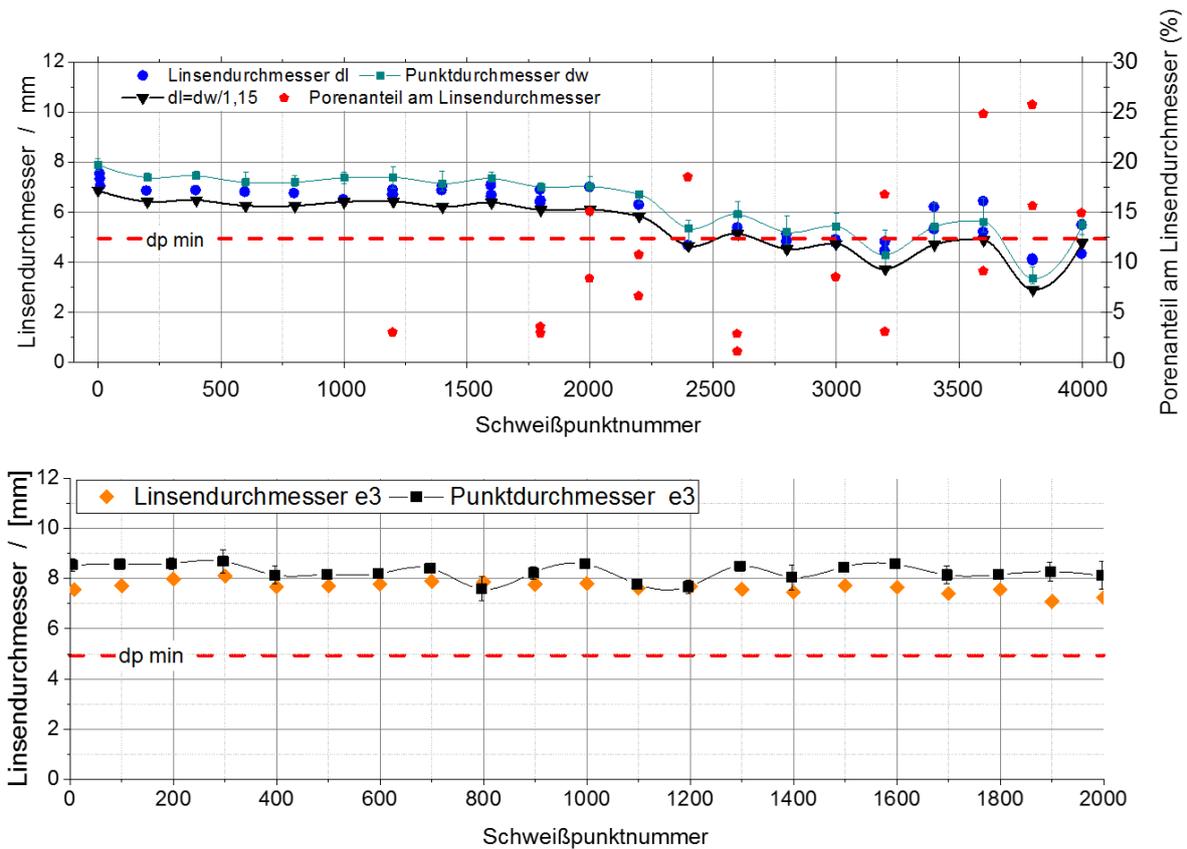


Abbildung 60: VR01 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktmenge: oben – für CuCr1Zr (e1); unten – für C0/65 (e3)

Die Elektrodeneindrucktiefen für die Elektrodenkappenwerkstoffe e1 und e3 sind in Abbildung 61 dargestellt. Bei allen Elektrodenwerkstoffen (vgl. Anhang C.9) ist eine Tendenz zur Reduktion der Elektrodeneindrucktiefe mit zunehmender Schweißpunktnummer zu beobachten. Es kann kein signifikanter Unterschied zwischen Elektrodeneindrucktiefe der oberen und unteren Elektrode beobachtet werden.

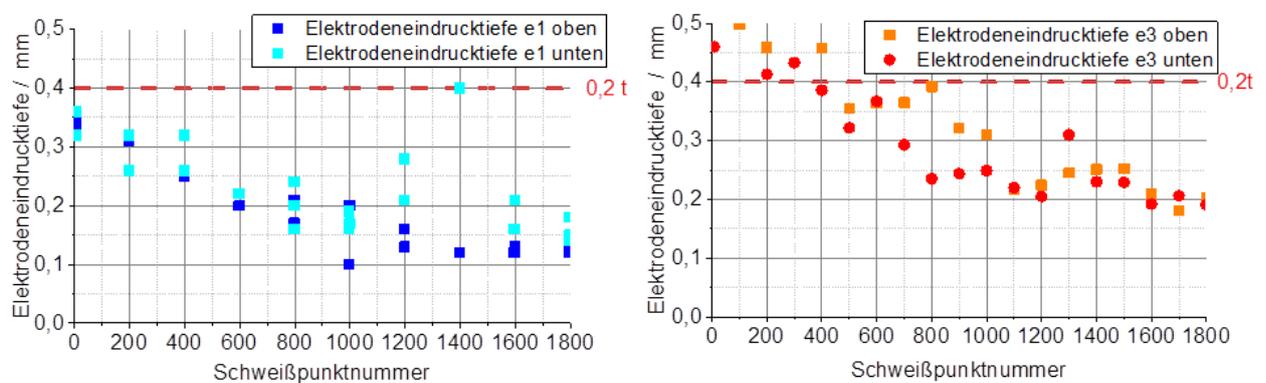


Abbildung 61: VR01 gemessene Elektrodeneindrucktiefe: links: für CuCr1Zr (e1); rechts: für C3/065 (e3)

## 10.2 Standmengenuntersuchung VR02

### 10.2.1 Punktdurchmesser

Die Schweißpunktdurchmesser jeder Versuchskombination und Stufe sind in Abbildung 62 dargestellt. VR02 weist deutliche Schwankungen der mittleren Punktdurchmesser bei allen Kappen mit Ausnahme der e3 auf. Bei der e2-Kappe kommt es bei den ersten Schweißpunkten nach dem „Startfräsen“ zur Ausbildung von Haftscheidungen ohne Schweißlinse. Nach 100 Punkten werden ausreichend große Punkte erreicht, was auf ein Einschweißverhalten der Elektrodenkappen schlussfolgern lässt. Trotz mehrmaligen Unterschreitens des Mindestdurchmessers steigt der Punktdurchmesser zum Ende der Stufen wieder an. Die stabilste Kurve mit einer insgesamt fallenden Tendenz weist VR02-e3 auf. Sie ist die einzige, die den Mindestdurchmesser nicht unterschreitet. VR02-e3 und VR02-e4 erzielen trotz niedrigerer Stromstärke im Schnitt größere Durchmesser als VR02-e1 und VR02-e2. [vgl.73]

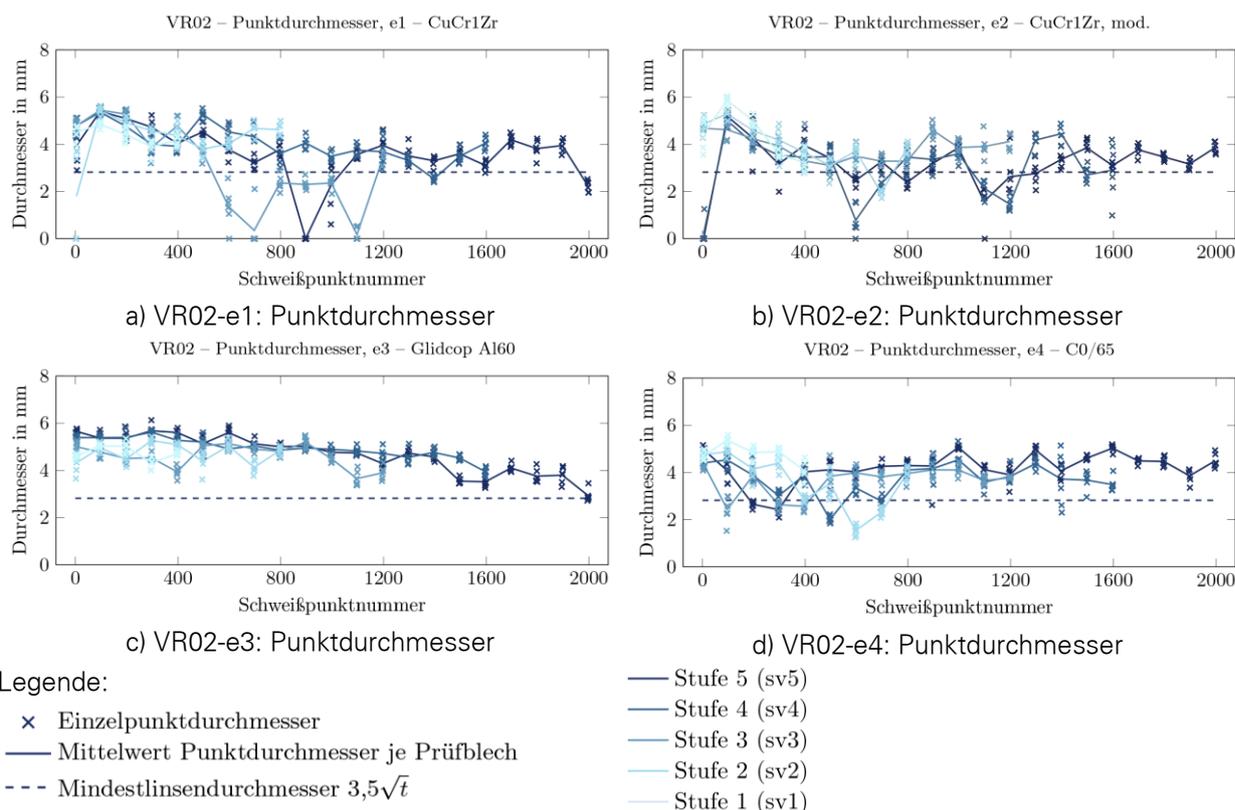


Abbildung 62: VR02: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen

### 10.2.2 Elektrodentopographie

Im Zuge der Durchführung der Schweißversuche musste nach einer Beschädigung und anschließender Reparatur des Mikroskops die Lichtquelle des Mikroskops ausgetauscht werden. In der Folge traten bei zahlreichen Messungen besonders viele Fehlstellen auf.

Betroffen davon sind vor allem die Versuche der VR02. VR02 weist gleiche, wenn auch nicht so ausgeprägte Verschleißerscheinungen an den Oberflächen der Elektroden wie VR01 auf (Abbildung 63, Abbildung 64). Durch geeignete Datenverarbeitungsalgorithmen können die Daten bei nicht zu starken Fehlmessungen (z. B. Abbildung 64, VR03-e3-P2000) dennoch für die Auswertung genutzt werden.

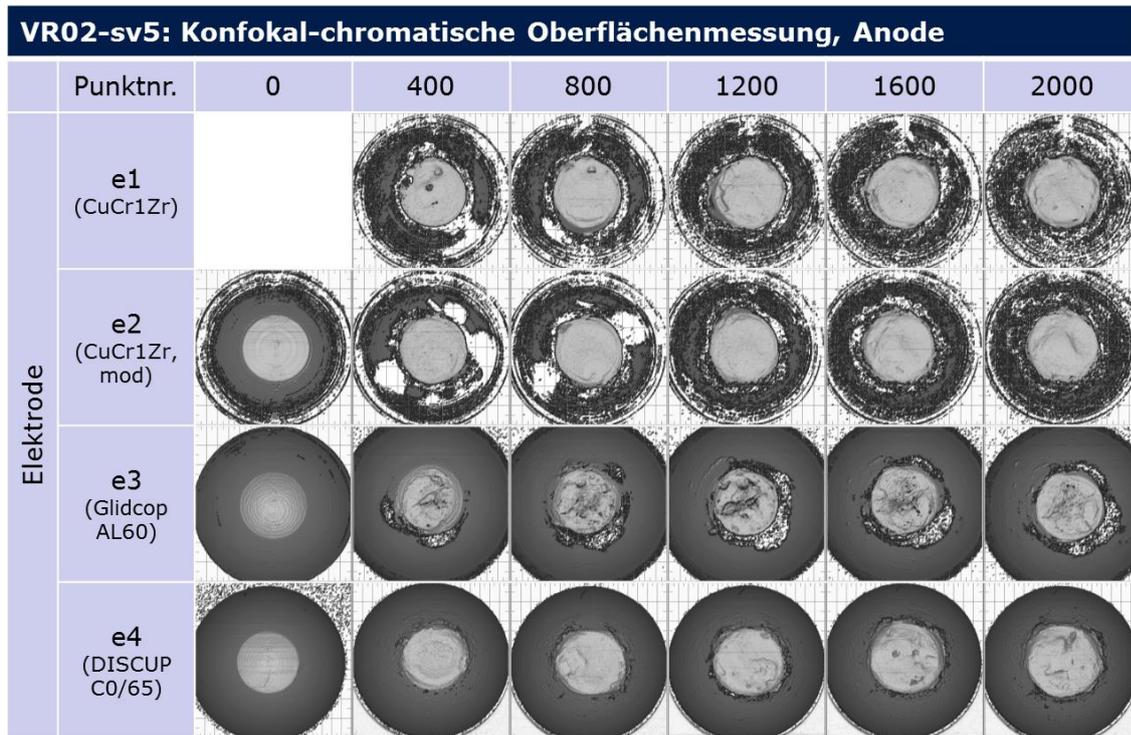


Abbildung 63: VR02: Elektrodenoberflächen der Anode

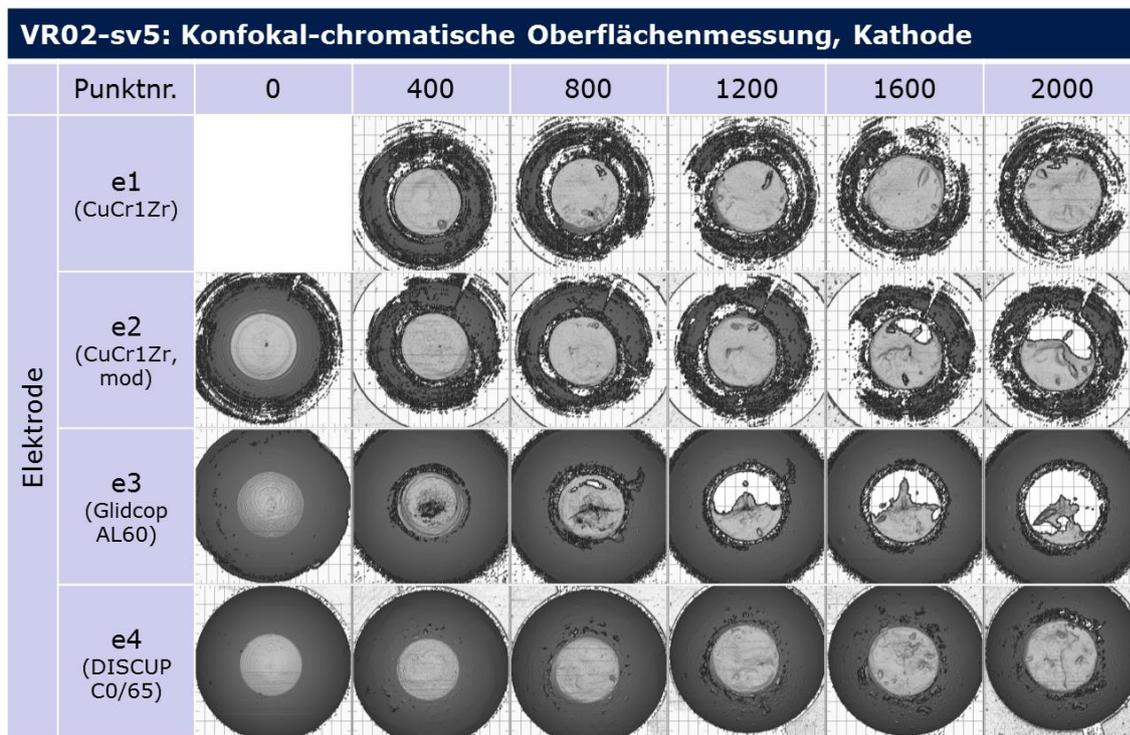


Abbildung 64: VR02: Elektrodenoberflächen der Kathode

### 10.2.3 Metallographische Untersuchungen

Bei den metallographischen Untersuchungen der Schweißverbindungen von VR02 kann eine geringe bis keine Übereinstimmung der metallographischen Prüfung mit der Meißelprüfung festgestellt werden (vgl. Abbildung 65). Es ist eine große Streuung des Punkt- bzw. Linsendurchmessers im Vergleich zu VR01 zu beobachten. Die im Schliff ermittelten Linsendurchmesser sind überwiegend kleiner als die in der Meißelprüfung ermittelten Punktdurchmesser.

Teilweise kann keine bzw. eine kleine Linse im Schliff gemessen werden, obwohl in der Meißelprüfung ein ausreichend großer Punktdurchmesser der ausgeknöpften Punkte vorhanden ist. Besonders stark ist dieses Verhalten für die Werkstoffe e2 und e4 bereits am Anfang der Standmenge ausgeprägt. Die beobachtete Diskrepanz kann durch das Auftreten der Bindefehler, bzw. ungleichmäßige Linsenausbildung (z. B. sog. Halbmondlinse) verursacht werden. Im Schliff ist in diesem Fall keine bzw. eine unzulässig kleine unsymmetrische Linse erkennbar, obwohl die Verbindung in der Meißelprüfung mit einem Ausknöpfbruch versagt (vgl. Abbildung 66).

Die Messungen der Elektrodeneindringtiefe kann für VR02 aufgrund des ungleichmäßig ausgeprägten Elektrodeneindrucks nicht durchgeführt werden (vgl. Abbildung 67).

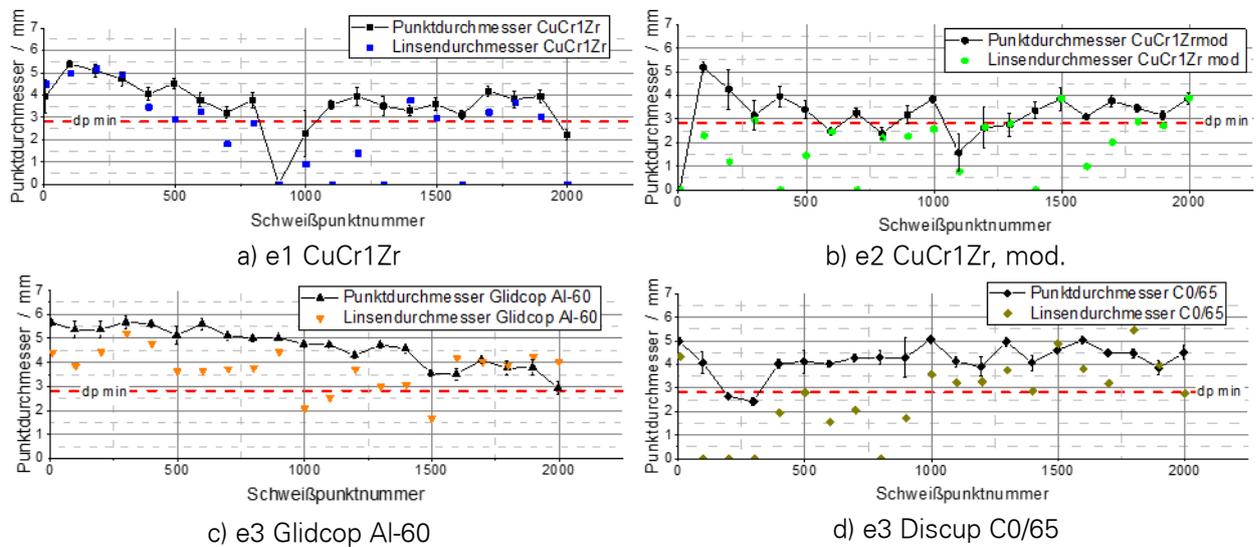


Abbildung 65: VR02 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer

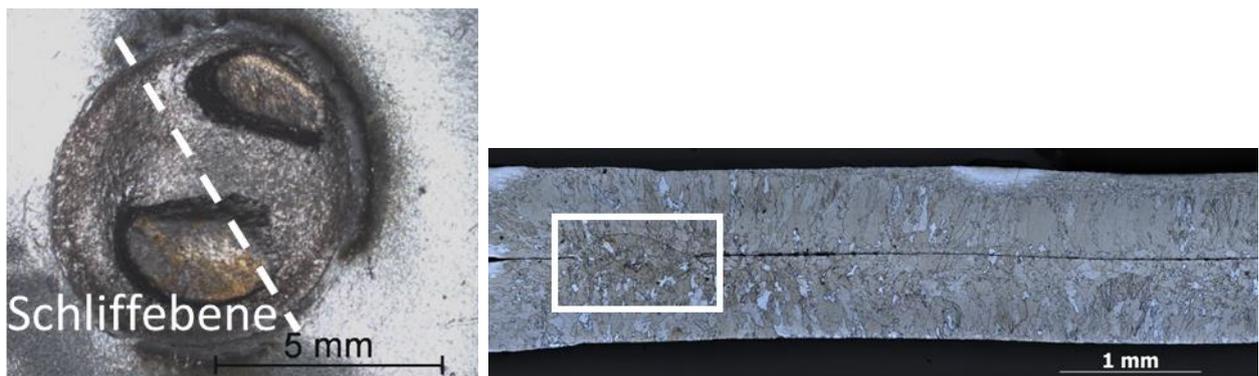


Abbildung 66: rechts: Schweißpunkt nach der Meißelprüfung mit zwei ausgeknöpften Butzen mit möglicher Schliffebene; links: Verbindung mit einem kleinen Linsendurchmesser (VR02-e2, Schweißpunktnummer 300)

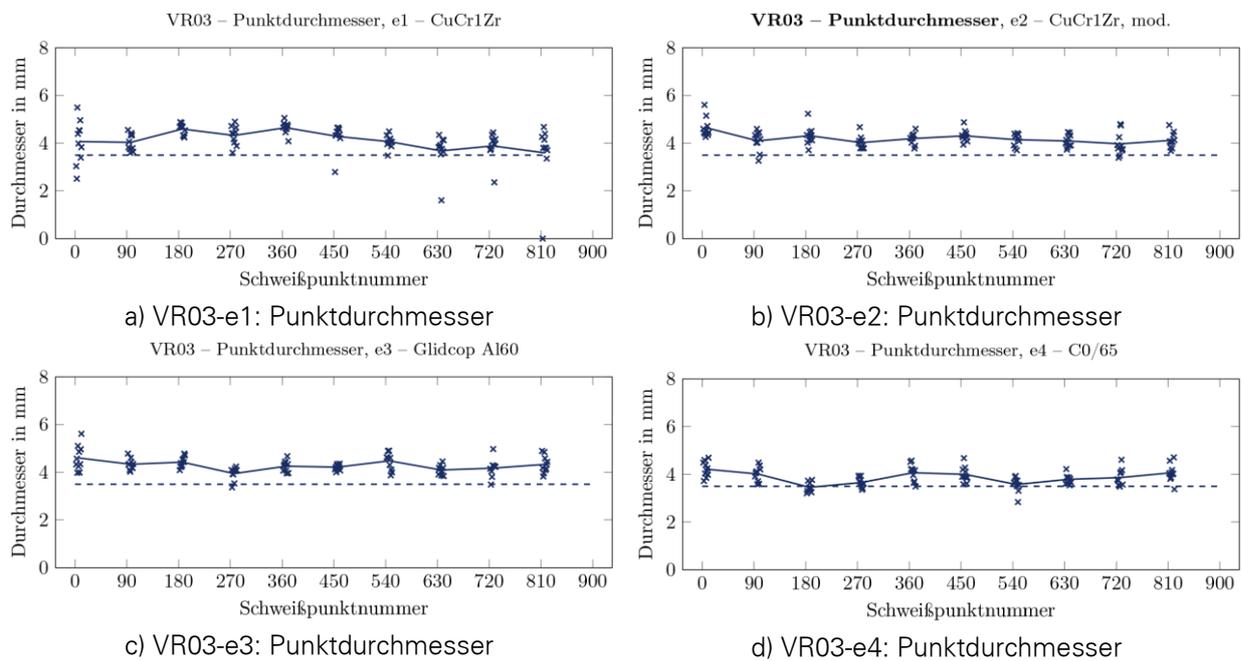


Abbildung 67: VR02 Verbindung mit ungleichmäßigem Elektrodeneindruck und einer Pore in der Linsenmitte (e2, Schweißpunktnummer 2000)

### 10.3 Standmengenuntersuchung VR03

#### 10.3.1 Punktdurchmesser

Die Schweißpunktdurchmesser jeder Versuchskombination und Stufe sind in Abbildung 68 dargestellt. Bei VR03-e4 wird nach 192 Punkten der Mindestdurchmesser unterschritten. Auf einen anschließenden Anstieg der Punktdurchmesser erfolgt ein weiterer Abfall. Zum Ende der Stufe stellt sich wieder eine steigende Tendenz ein. VR03-e1 zeigt zunächst ein Einschweißverhalten mit steigenden Punktdurchmessern. Ab 360 Punkten sinkt dieser nahezu stetig ab. VR03-e3 weist ein weitgehend stabiles Verhalten mit leicht fallender Tendenz auf. [vgl. 73]



Legende:

- × Einzelpunktdurchmesser
- Mittelwert Punktdurchmesser je Prüfblech
- Mindestlinsendurchmesser  $3,5\sqrt{t}$

Abbildung 68: VR03: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen

#### 10.3.2 Elektrodentopographie

Bei VR03 kommt es zu einer ausgeprägten Plateaubildung bereits nach wenigen Schweißpunkten, was mit Hilfe der Oberflächentopographiemessungen gemessen werden kann. Der Plateaudurchmesser wird in der Draufsicht der Messungen durch den Mittelwert des längsten Durchmessers  $d_1$  und dem dazu senkrecht stehenden Durchmesser  $d_2$  ermittelt. Die Plateaus weisen nur eine geringe numerische Exzentrizität auf. Die Profilschnitte der beiden Durchmesser  $d_1$  und  $d_2$  dienen anschließend der Bestimmung der Plateauhöhe. Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen, dass das Plateau bei

höheren Punktzahlen zunehmend aus dem Zentrum der Arbeitsfläche in Richtung der Öffnung der Schweißzange herauswandert. Grund dafür ist möglicherweise die elastische Aufbiegung der Schweißzange, wodurch die Elektrodenkraft nicht vollkommen senkrecht auf die Arbeitsflächen wirkt. Die zunehmende Erweichung im Bereich der Oberfläche ermöglicht dadurch dem Werkstoff, unter Einwirkung der Kraft aus dem Zentrum der Kappe herauszufließen. VR03-e3 ist hiervon nicht betroffen. Abbildung 71 zeigt das Plateauwachstum über die Punktzahl. Demnach werden konstante Plateaudurchmesser und -höhen bereits nach wenigen Schweißpunkten erreicht. Wesentliche Unterschiede zwischen Anode und Kathode sind nicht festzustellen.

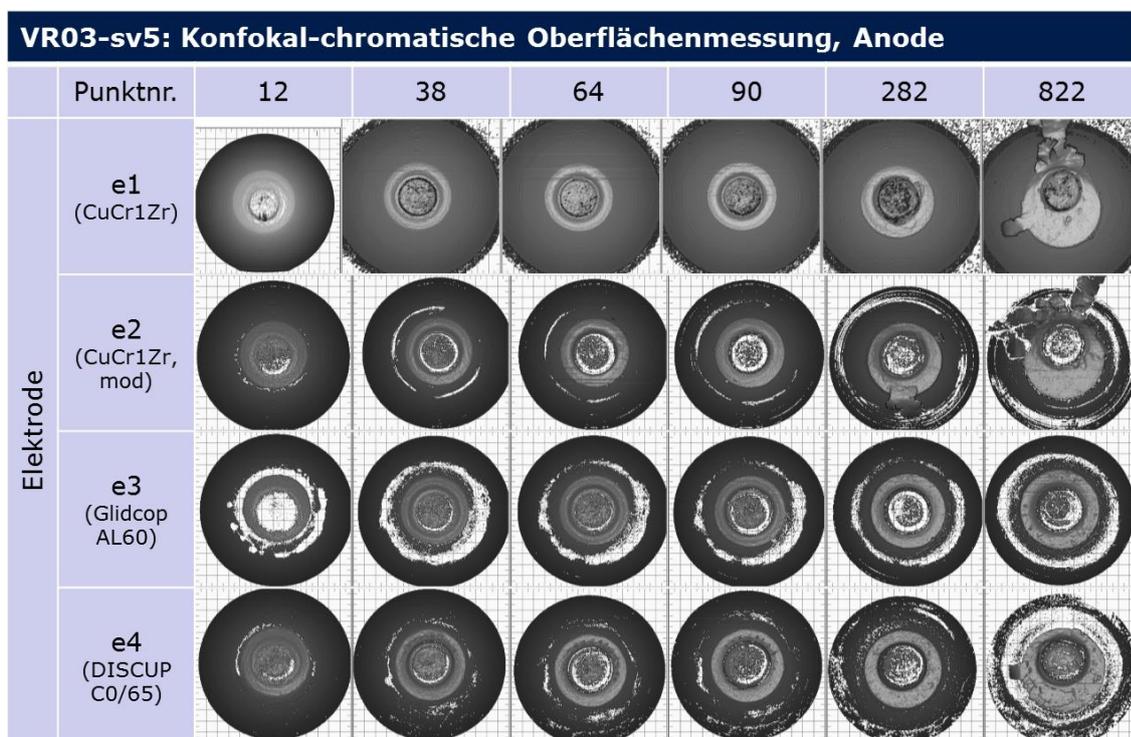


Abbildung 69: VR03: Elektrodenoberflächen der Anode

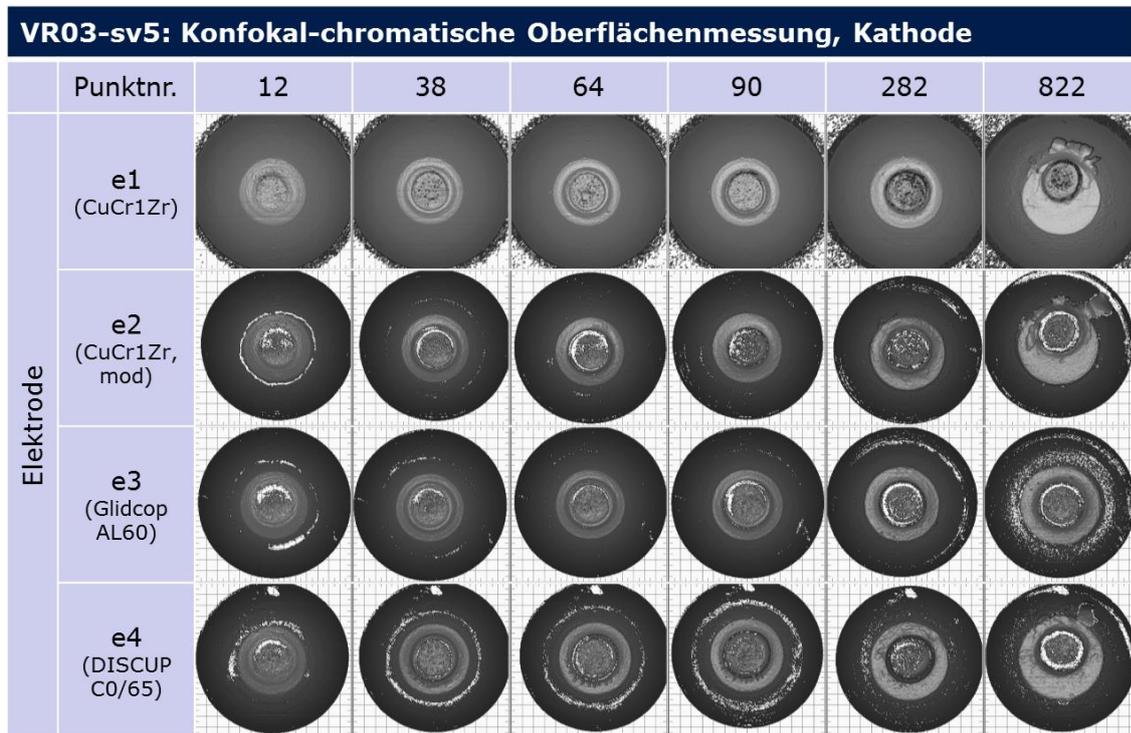
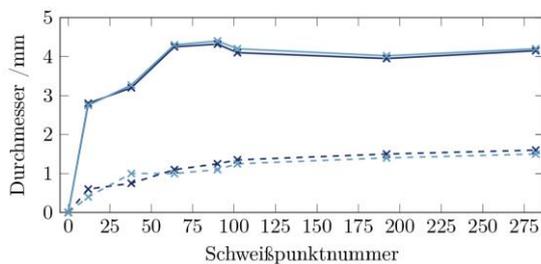
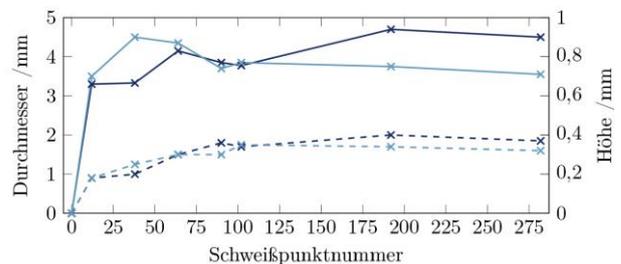


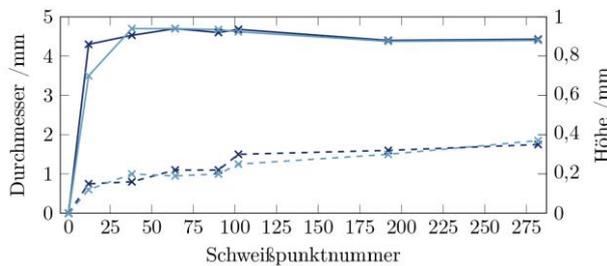
Abbildung 70: VR03: Elektrodenoberflächen der Kathode



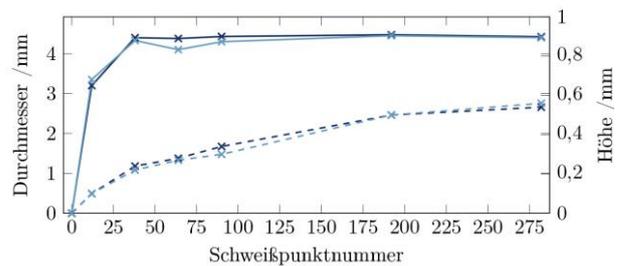
a) VR03-e1: Plateaubildung



b) VR03-e2: Plateaubildung



c) VR03-e3: Plateaubildung



d) VR03-e4: Plateaubildung

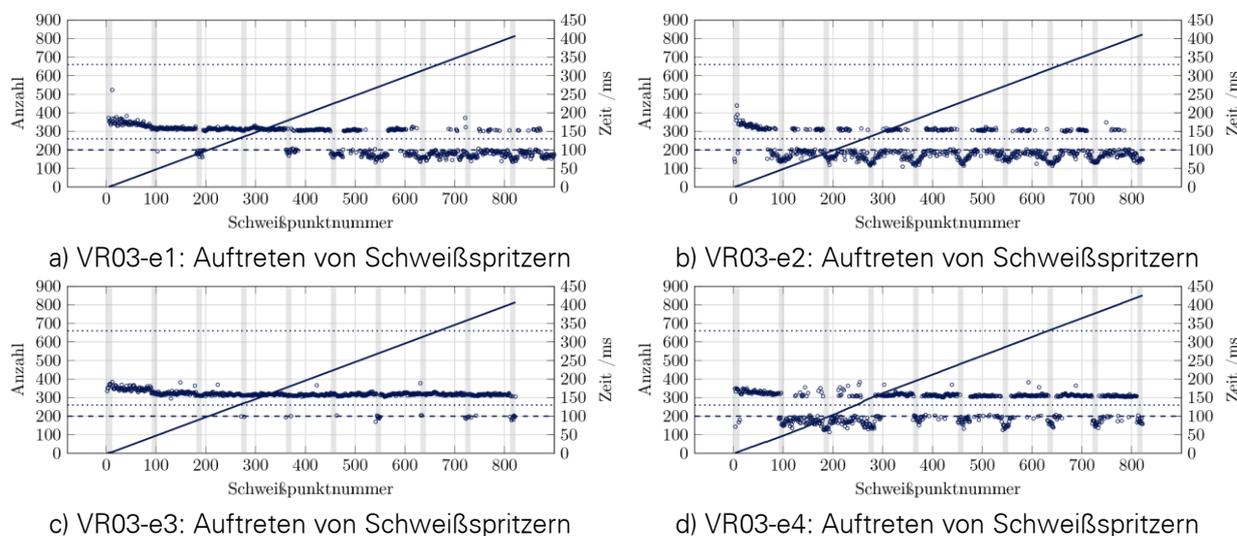
Legende:

- x— Durchmesser Anode
- x— Durchmesser Kathode
- x- Höhe Anode
- x- Höhe Kathode

Abbildung 71: VR03: Plateaubildung an den Elektrodenarbeitsflächen

### 10.3.3 Auftreten von Schweißspritzern

Während der Versuche sind Schweißspritzer fast bei allen Schweißpunkten unabhängig von Prüf- oder Verschleißblech aufgetreten. Dabei sind Unterschiede im Zeitpunkt des Auftretens zwischen den einzelnen Elektrodenwerkstoffen zu erkennen. Bei VR01-e1 treten die Schweißspritzer bis ca. 450 Schweißpunkten im zweiten Schweißimpuls auf und im Anschluss beim ersten Schweißimpuls. Bei VR03-e2 und VR03-e4 wechselt das Auftreten der Schweißspritzer zwischen den Impulsen ohne Tendenzen hin und her. Bei VR03-e3 treten die Schweißspritzer zeitlich sehr konstant im zweiten Schweißimpuls auf.



Legende:

- Anzahl der Schweißspritzer
- Spritzerzeitpunkt
- - - Schweißzeit  $I_{w1}$
- ⋯⋯⋯ Schweißzeit  $I_{w2}$
- Prüfblech

Abbildung 72: VR03: Auftreten von Schweißspritzern

### 10.3.4 Metallographische Untersuchungen

Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Meißelprüfungen beim Schweißen mit Elektrodenkappen sowohl aus schmelzmetallurgisch hergestellten, als auch pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffen. Die Abhängigkeit des Linsen- und Punktdurchmessers von der Schweißpunktanzahl ist in Abbildung 73 beispielsweise für e1 und e3 aufgeführt. Der Zusammenhang für e2 und e4 ist ähnlich.

Der gemessene Linsendurchmesser ist sogar höher, als der in der Meißelprüfung ermittelte Punktdurchmesser. Der Mindestlinsendurchmesser von  $3,5\sqrt{t}$  wird nicht unterschritten.

Für VR03 kann eine starke Zunahme der Elektrodeneindrucktiefe mit zunehmender Schweißpunktanzahl im Querschliff der Schweißverbindungen gemessen werden. Dabei können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Eindrucktiefen der Kathode und Anode nachgewiesen werden. Die Eindrucktiefe der oberen Elektrode ist in Abbildung 74 zu sehen. Die Elektrodeneindrucktiefe nimmt in den ersten 200 Schweißungen stark zu und bleibt danach annähernd konstant. Die größte Elektrodeneindrucktiefe kann für den pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoff C0/65 (e4) beobachtet werden. Die dahinterstehenden Verschleißmechanismen werden im Abschnitt 10.5.1.1 diskutiert.

Sowohl in der Mitte, als auch am Rand der Schweißverbindungen können Poren beobachtet werden. Diese werden jedoch nicht als unzulässige Unregelmäßigkeiten in Anlehnung an DVS-Merkblatt 2960 [80] klassifiziert.

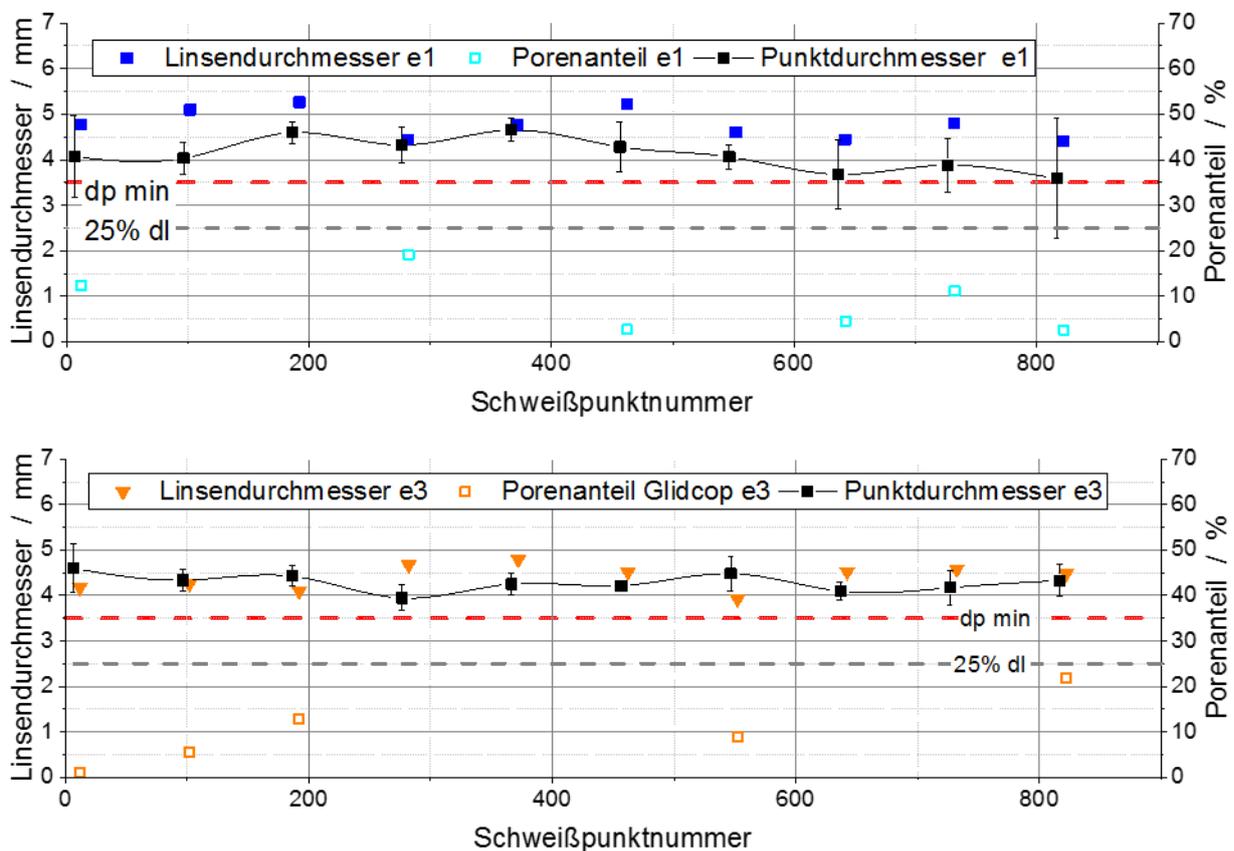


Abbildung 73: VR03 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer mit prozentalem Porenanteil; oben: für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr (e1); unten: für Glidcop Al-60 (e3)

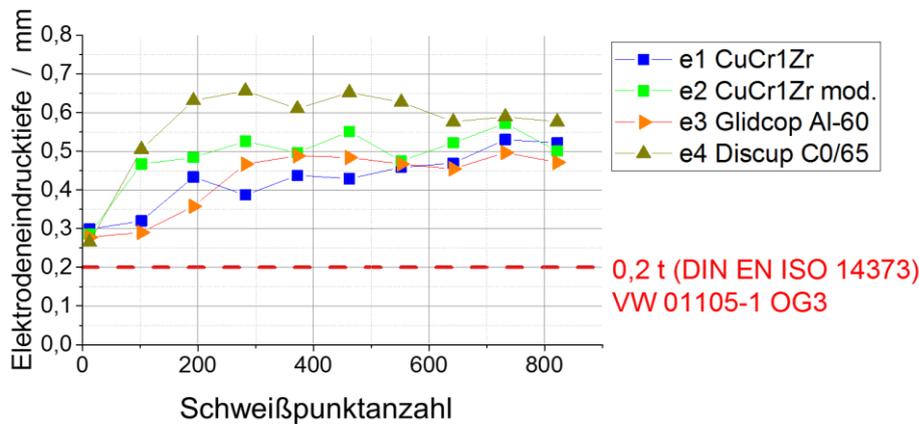
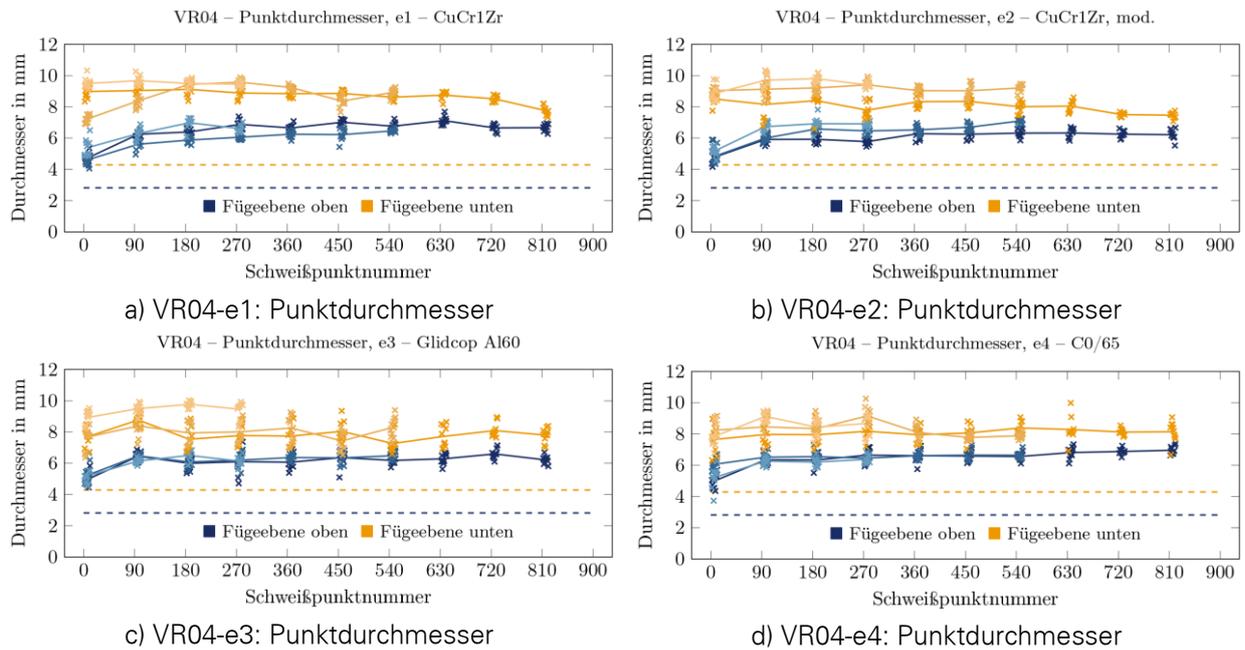


Abbildung 74: VR03 Abhängigkeit der Eindrucktiefe der oberen Elektrode (Anode) in das Blech von der Schweißpunktanzahl

## 10.4 Standmengenuntersuchung VR04

### 10.4.1 Punktdurchmesser

Die Schweißpunktdurchmesser jeder Versuchskombination und Stufe sind in Abbildung 75 dargestellt. Die Punktdurchmesser der Fügeebene 1 weisen bei allen Kappen ein deutliches Einschweißverhalten und im weiteren Verlauf verhältnismäßig geringe Schwankungen auf. VR04-e1 und VR04-e4 erzielen geringfügig größere Durchmesser bei gleicher Stromstärke für alle Stufenversuche. Die Ergebnisse der Fügeebene 2 zeigen stabile Punktdurchmesser über die gesamte Anzahl der geschweißten Punkte und liegen weit über dem Mindestpunktdurchmesser. Die mittleren Durchmesser von VR04-e1 liegen zu Beginn über eine Stufe hinweg am höchsten. Im Bereich der hohen Punktzahlen ist eine leichte fallende Tendenz zu erkennen. [vgl.73]



Legende:

- × Einzelpunkt Durchmesser
- Mittelwert Punkt Durchmesser je Prüfblech
- Mindestlinsendurchmesser  $3,5\sqrt{t}$

Abbildung 75: VR04: Schweißpunktdurchmesser der Standmengenuntersuchungen

### 10.4.2 Elektrodentopographie

Bei VR04 berühren nur die kathodenseitigen Elektroden den Werkstoff 22MnB5+AS150. Es erfolgt hierbei keine deutliche Ausbildung eines Plateaus wie bei VR03. Nach 12 und 38 Punkten ist ansatzweise eine Plateaubildung bei VR04-e1 und VR04-e2 zu erkennen, jedoch mit keiner vergleichbaren Ausprägung zur VR03. Nach 64 Punkten nimmt die Elektrodenarbeitsfläche im Durchmesser zu und es lässt sich keine Plateaubildung mehr feststellen.

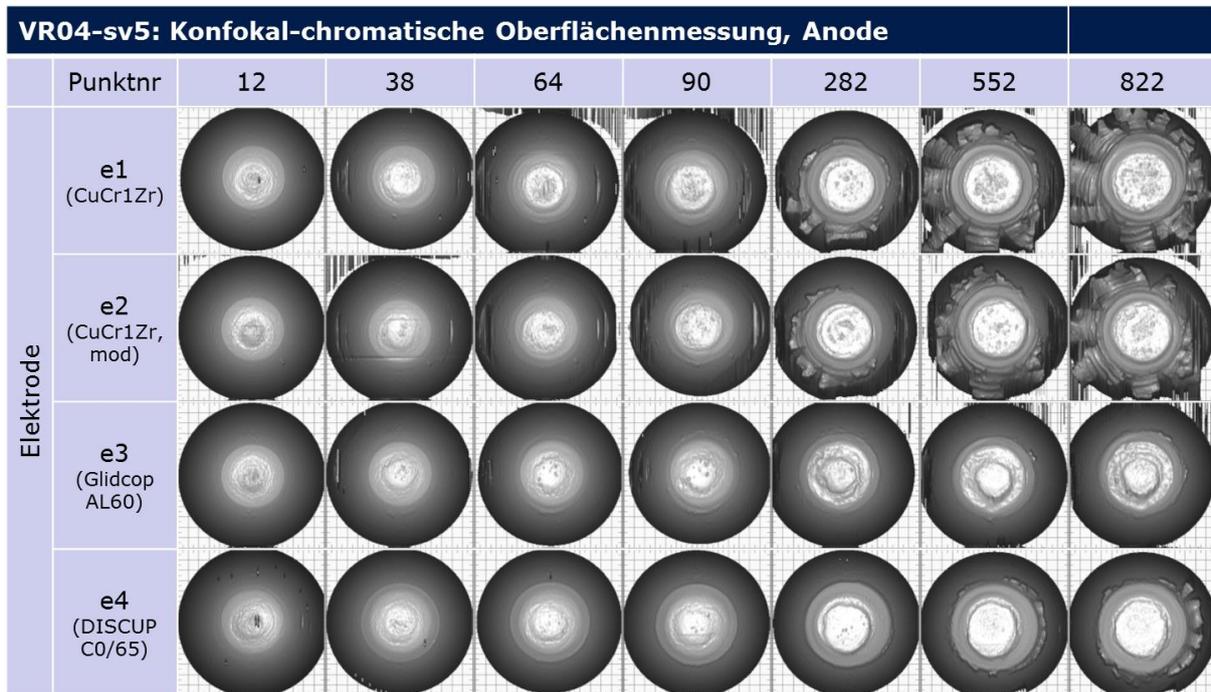


Abbildung 76: VR04: Elektrodenoberflächen der Anode

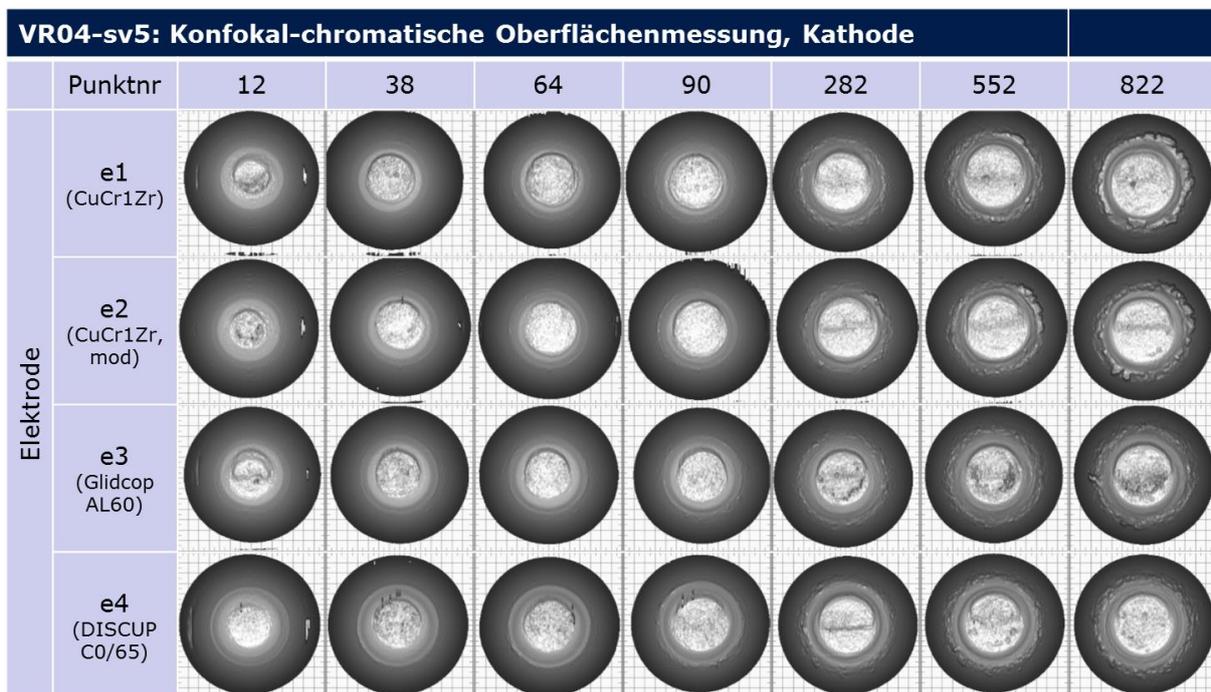
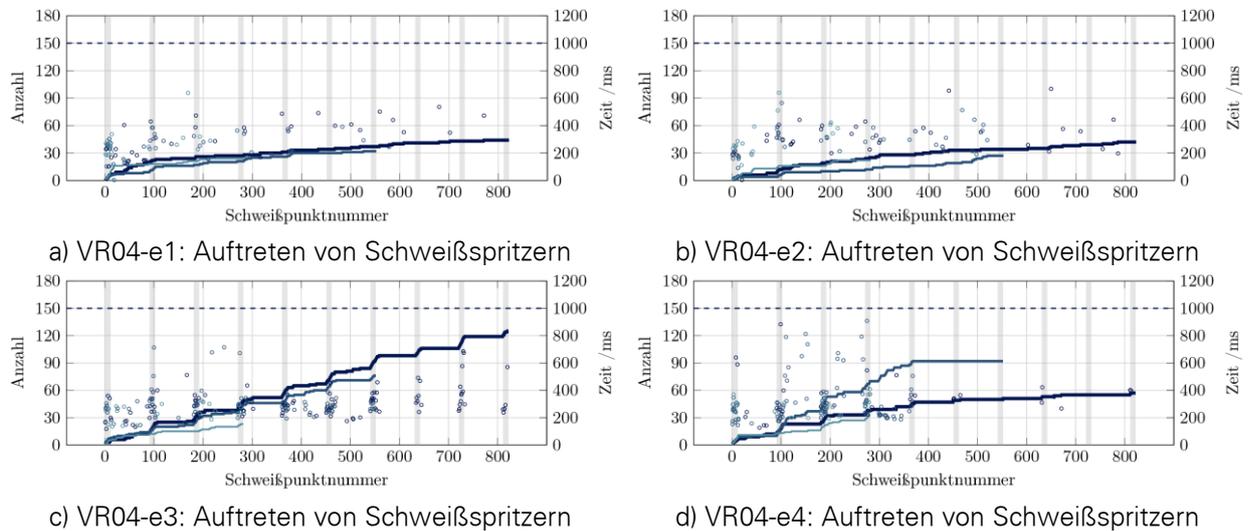


Abbildung 77: VR04: Elektrodenoberflächen der Kathode

### 10.4.3 Auftreten von Schweißspritzern

Während der Versuche kam es sporadisch zeitlich inkonstant zu Schweißspritzern. Auffällig hierbei ist VR03-e3, wo es vermehrt bei den Prüfblechstreifen zu Schweißspritzern kommt. Dieses Verhalten ist auch bei VR04-e4 innerhalb der ersten 400 Schweißpunkte

zu beobachten. Hier scheint die Blechgeometrie in Kombination mit dem verwendeten Elektrodenwerkstoff Einfluss auf das Spritzerverhalten zu haben.



Legende:

- Anzahl der Schweißspritzer
- Spritzerzeitpunkt
- Schweißzeit
- Prüfblech

Abbildung 78: VR04: Auftreten von Schweißspritzern

### 10.4.4 Metallographische Untersuchungen

Die metallographisch ermittelten Linsendurchmesser für e2 und e3 sind in Abbildung 79 dargestellt. Die Messergebnisse für e1 und e3 sind im Anhang C.11 zu finden. Die Linsendurchmesser für e1 und e2 sind kleiner als die in der Meißel- bzw. Schälprüfung ermittelten Punktdurchmesser. Die für e3 und e4 gemessenen Linsendurchmesser nähern sich stark dem Punktdurchmesser an. Die Streuung des Linsendurchmessers in der oberen Fügeebene ist für Elektrodenwerkstoffe e1 und e2 größer im Vergleich zu e3 und e4.

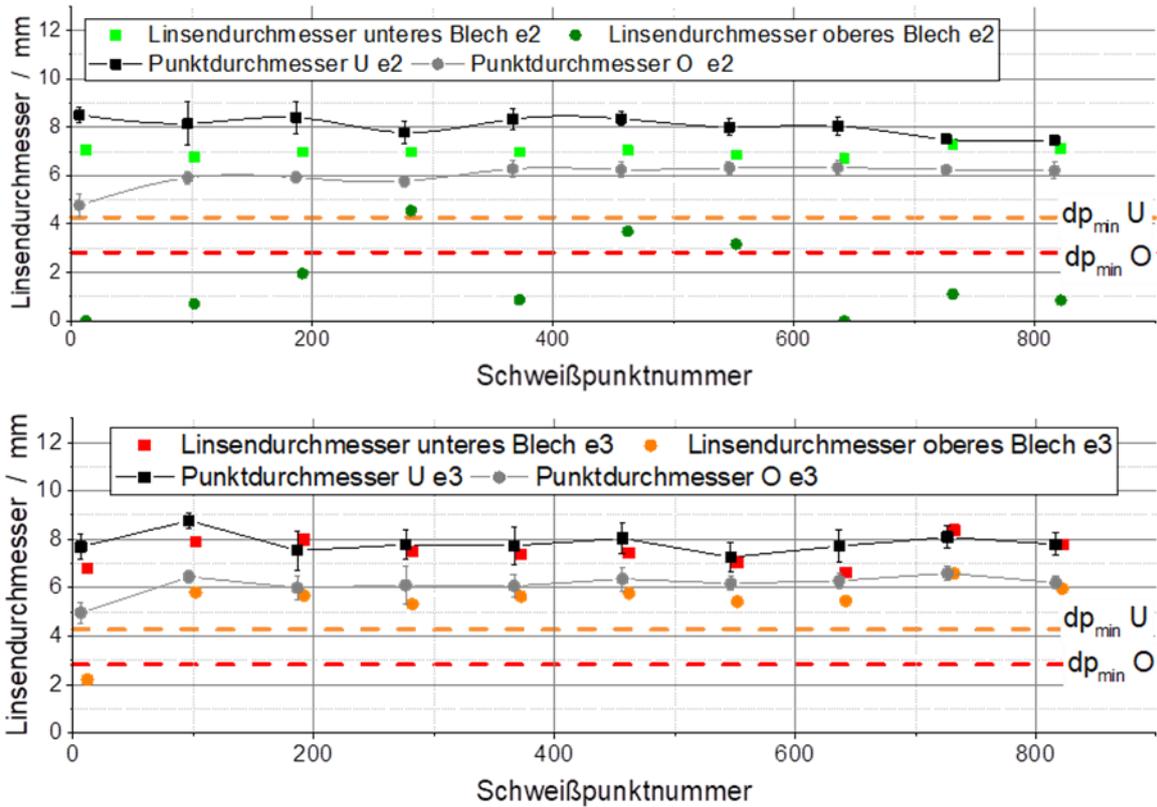


Abbildung 79: VR04 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer; oben: für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr, mod. (e2); unten: für Glidcop Al-60 (e3)

Die Linseneindringtiefen in das jeweilige obere Blech, dargestellt in Abbildung 80, ist für den Elektrodenwerkstoff e4 im Vergleich zu denen von e1, e2 und e3 höher. Dies kann durch die geringere Wärmeleitfähigkeit von e4 und daher mit geringerer Kühlwirkung erklärt werden. Des Weiteren wird für e4 eine leichte Steigung der Linseneindringtiefe in das dünnere Blech mit Zunahme der Punkanzahl festgestellt.

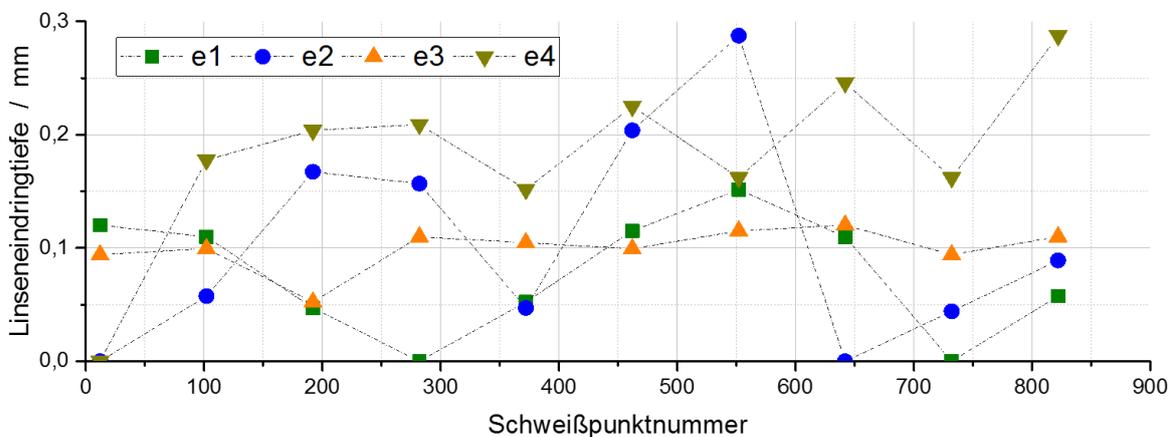


Abbildung 80: VR04 Entwicklung der Linseneindringtiefe in das dünne Blech mit zunehmender Schweißpunktnummer

Ähnlich wie bei VR01 (Abschnitt 10.1.3) wird für alle Kappenwerkstoffe der VR04 eine Tendenz zur Abnahme der Elektrodeneindringtiefe mit zunehmender Schweißpunktanzahl beobachtet. Dies korreliert mit den Ergebnissen der konfokalen Messungen für VR04, bei denen nur geringfügig bis keine ausgeprägte Plateaubildung auf der Kathode beobachtet werden kann (vgl. Abschnitt 10.3).

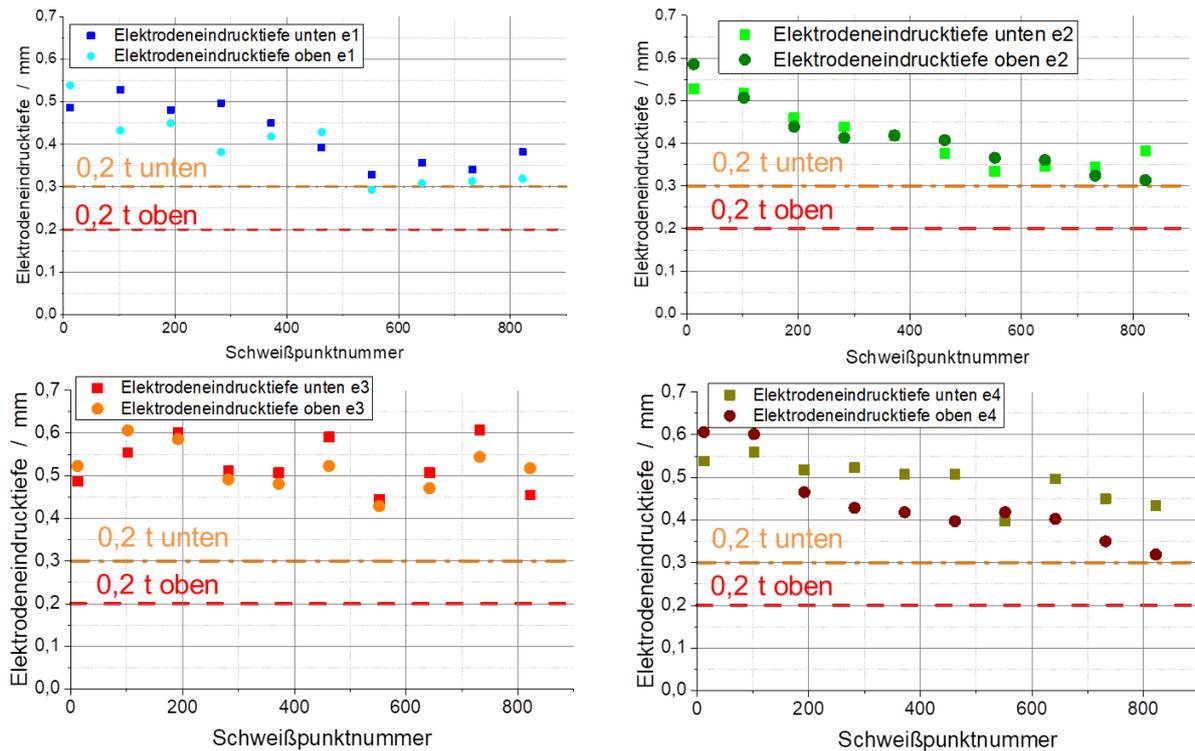


Abbildung 81: VR04 Abhängigkeit der Elektrodeneindringtiefe von der Schweißpunktanzahl: oben links: für CuCr1Zr (e1); oben rechts: für CuCr1Zr, mod. (e2); unten links: für Glidcop Al60 (e3); unten rechts: für Discup C0/65 (e4)

## 10.5 Beschreibung der Verschleißmodelle

Zunächst wird auf die Beschreibung der Verschleißmodelle eingegangen. Daraus leitet sich die Methodik zur anwendungsgerechten Auswahl von Elektrodenwerkstoffen und Prozessparametern hinsichtlich Verschleiß und Zerspanstrategie ab. Abschließend werden aus den gewonnenen Erkenntnissen der Verschleißmodelle und dem Elektrodenwerkstoffverhalten Kriterien zur bedarfsgerechten Ermittlung des Zeitpunkts zur Nachbearbeitung der Elektrodenarbeitsfläche für CuCr1Zr und dispersionsgehärtete Elektroden vorgestellt.

Das Verschleißverhalten der unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffe ist abhängig von der Beschichtung und dem Grundwerkstoff der Fügepartner. Es äußert sich in Form von mechanischen und metallurgischen Verschleißerscheinungen.

### **10.5.1 Mechanischer Verschleiß der Elektroden**

Der mechanische Verschleiß kann in radiales (Pilzbildung) und axiales (Plateaubildung) Fließen der Elektroden unterteilt werden, was bereits bei den jeweiligen Betrachtungen der Elektrodentopographien beschrieben wurde.

#### **10.5.1.1 Plateaubildung: axiales Fließen der Elektrodenkappen**

Ein axiales Fließen bzw. eine ausgeprägte Plateaubildung kann bei allen Elektrodenwerkstoffen bei VR03 beobachtet werden (Abbildung 82). Die gleiche Beobachtung wird in [68] beschrieben, wo ebenfalls pressgehärteter 22MnB5+AS150 beidseitig verschweißt wurde. In [68] wird nachgewiesen, dass das Plateau in diesem Fall nicht durch Legierungsschichtbildung entsteht, sondern durch einen Umformvorgang der Kappe beim Schweißen. Es kommt zu einer stärkeren Temperaturentwicklung im Zentrum der Arbeitsfläche, wodurch die Festigkeit des Kappenwerkstoffs lokal abnimmt. Der Randbereich behält zum größten Teil eine höhere Festigkeit bei. Durch Verdrängung des durch die Erwärmung erweichten Werkstoffs im Bereich der Schweißlinse fließt der Kappenwerkstoff in Richtung der Schweißlinse nach und das Plateau entsteht. Aus Abbildung 71 geht hervor, dass das Plateau schon nach wenigen Schweißpunkten ausgebildet ist und lediglich an Höhe zunimmt. Dies führt zu einer anhaltend hohen und konstanten Stromdichte im Bereich des Plateaus, was zu stabilen Punktdurchmessern über die Standmengen führt. Die sich bildende Legierungsschicht bewirkt zudem eine schlechtere Wärmeableitung über die Kappen, wodurch mehr Prozesswärme in den Blechen verbleibt und ein stärkeres Dickenwachstum der Schweißlinsen erfolgt [68]. Beim Vergleich der Punkt- und Plateaudurchmesser ist festzustellen, dass diese im gleichen Bereich liegen, jedoch kleiner sind als der ursprüngliche Durchmesser der Elektrodenarbeitsflächen. Die Plateauausbildung führt durch das Nachsetzen der Elektroden zu tiefen Elektrodeneindrücken (vgl. Abschnitt 10.3.4 und Abbildung 83). Diese Erscheinung kann bei den kathodenseitigen Elektroden der VR04 nicht festgestellt werden, obwohl ebenfalls Kontakt mit pressgehärteter 22MnB5+AS150 während der Schweißversuche bestand. Anders als bei VR03 liegen die gemessenen Schweißpunktdurchmesser über dem Durchmesser der Elektrodenarbeitsfläche. Der infolge der Widerstandserwärmung erweichte Blechbereich ist somit größer als die Elektrodenarbeitsfläche, wodurch es nicht zu einer Plateaubildung kommen kann.

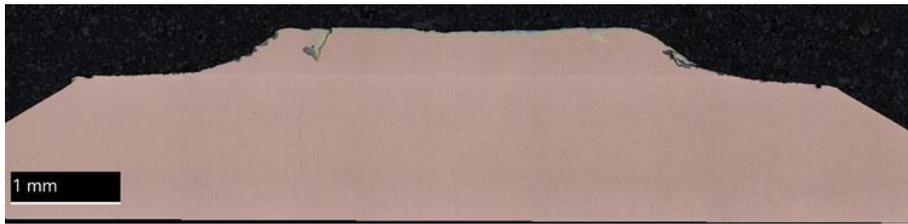


Abbildung 82: VR03-e3, Kathode: Querschliff der Elektrodenkappe nach 822 Schweißpunkten mit ausgeprägter Plateaubildung

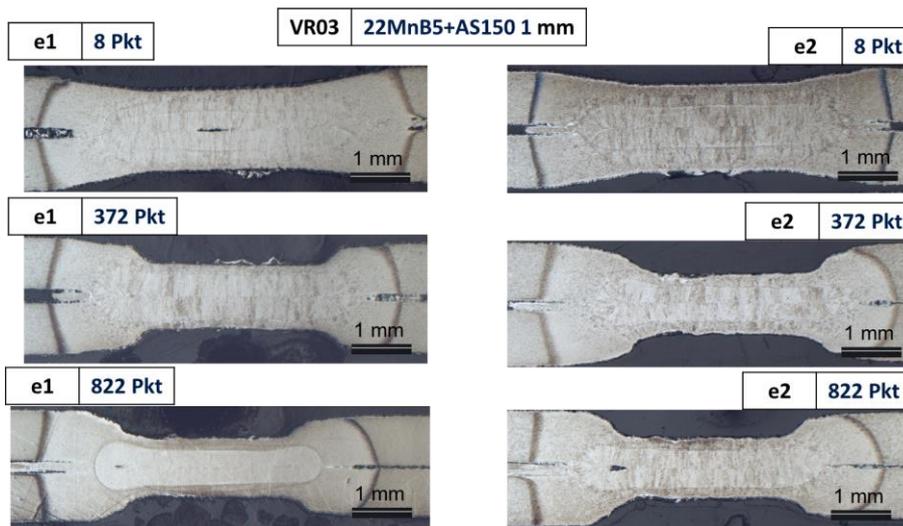


Abbildung 83: VR03: Querschliff mit Darstellung der zunehmenden Elektrodeneindringtiefe mit fortschreitender Schweißpunktanzahl

### 10.5.1.2 Pilzbildung: radiales Fließen der Elektrodenkappen

Das radiale Fließen und Materialverlust aus der Elektrodenoberfläche bewirken eine Längenabnahme der Elektroden. In Abbildung 84 ist ein Querschliff der Anode von VR01-e1-sv3 nach 1200 Schweißpunkten zu sehen. Das geätzte Gefüge zeigt den Materialfluss in radialer Richtung in der Nähe der Elektrodenoberfläche. Des Weiteren sind Anlagerungen am Elektrodenrand (rechts in Abbildung 84) zu erkennen.



Abbildung 84: Pilzbildung durch radiales Fließen der Elektroden am Beispiel von VR01-e1-sv3 Anode nach 1200 Schweißpunkten im Querschliff

Ein Materialverlust wird dabei durch das Bilden und Zerstören von Legierungsschichten hervorgerufen [81]. Die Längenabnahme kann durch die Auswertung der Wegmesssignale in der Vorhaltezeit kurz vor Schweißbeginn ermittelt werden (Abbildung 85).

Schwankungen der Daten können durch anhaftende Schweißspritzer oder anderen Unreinheiten auf den Elektrodenarbeitsflächen auftreten. Tendenzen lassen sich dennoch eindeutig feststellen. Aus diesen Daten werden zudem die Elektrodenarbeitsfläche zum Schweißbeginn, Schweißende und Prozessende berechnet. Zum Schweißende und Prozessende kommen zur Elektrodenarbeitsfläche noch die Mantelflächen hinzu, die sich durch den Elektrodeneindruck ergeben. In Abbildung 86 sind stellvertretend für die anderen Versuche die Veränderungen der Elektrodenkontaktflächen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass es durch die Längenänderung der Elektroden zu einer Vergrößerung der Kontaktflächen kommt. Bis ca. 1000 Schweißpunkte sind die Kontaktflächen zum Prozessende größer als die zum Schweißbeginn und Schweißende. Anschließend nähern sie sich an, bis sie fast gleich groß sind. Dies lässt sich durch die verringerte Flächenpressung erklären, was durch die Abnahme der ermittelten Elektrodeneindringtiefen (Abbildung 87) bestätigt wird. Ab ca. 1000 Schweißpunkten ist kaum noch ein Elektrodeneindruck zum Prozessende vorhanden. Abbildung 87 zeigt auch, dass sich die Elektroden zum Schweißende noch nicht in die Bleche hineingedrückt haben. Vielmehr werden die Elektroden durch die thermische Erwärmung in lateraler Richtung auseinandergedrückt.

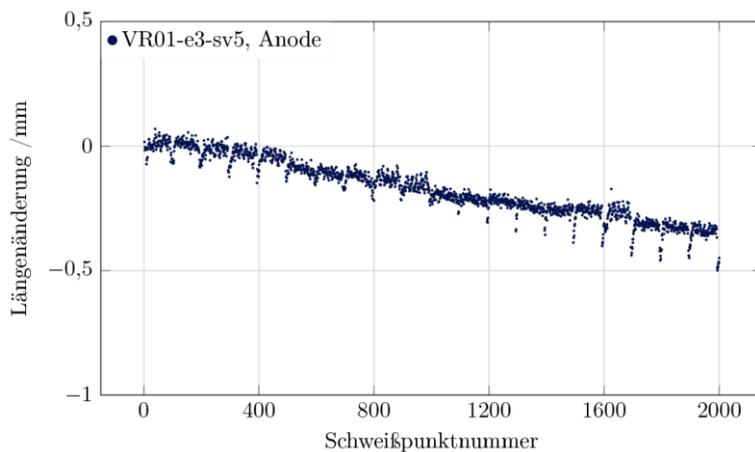


Abbildung 85: Längenänderung der Elektroden durch radiales Fließen und Materialverlust (VR01-e3-sv5)

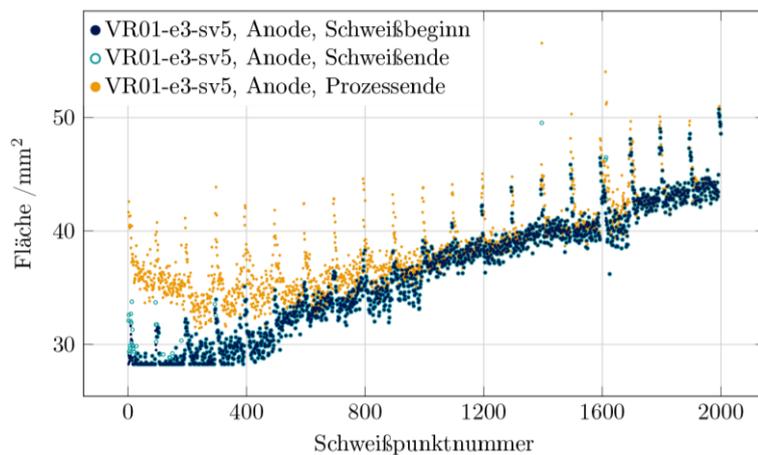


Abbildung 86: Veränderung der Elektrodenkontakfläche durch radiales Fließen und Materialverluste zu Schweißbeginn, Schweißende und Prozessende (VR01-e3-sv5)

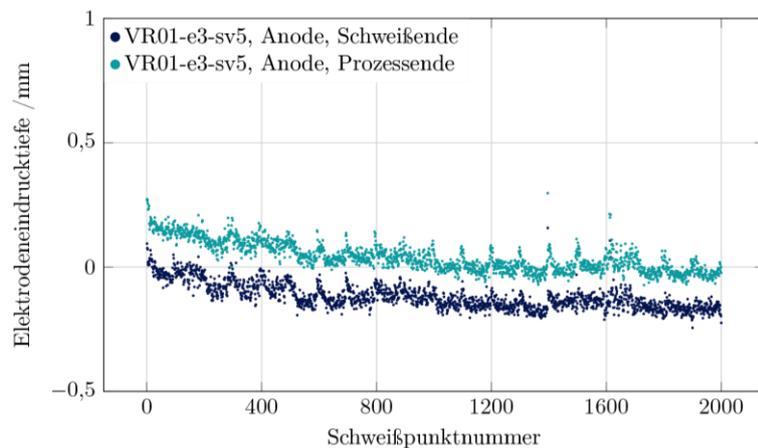


Abbildung 87: Veränderung der Elektrodeneindringtiefen zu Schweißende und Prozessende über 2000 Schweißpunkte (VR01-e3-sv5)

Die Topographiemessungen der Elektroden von VR01, VR02 und VR04 zeigen ein kontinuierliches Wachsen der Elektrodenarbeitsflächen über alle Elektroden hinweg. Die Folge dieser Verschleißerscheinung ist eine Verringerung der Stromdichte, was zu einer Abnahme des Wärmeeintrags in der Fügezone führt. Gleichzeitig nimmt die Flächenpressung ab, was zu einer Zunahme des Wärmeeintrags in den Kontaktwiderständen des Schweißprozesses führt. Hinzu kommt, dass die Anlegierungsschichten auf den Elektrodenkappen durch den höheren Kontaktwiderstand zu einem höheren Wärmeeintrag führen. Abbildung 88 zeigt stellvertretend für die Versuchsreihen VR01, VR02 und VR04 den Einfluss des radialen Fließens der Elektrodenkappen auf die Wärmemenge über 2000 Schweißpunkte. In Abbildung 88 a und b ist die Vergrößerung der Elektrodenarbeitsfläche und die damit verbundene Abnahme der Flächenpressung zu erkennen. In Abbildung 88 c, d sind die gemittelten Prozesswiderstände zum Schweißbeginn (sb, ersten 10% des Schweißprozesses) und zum Schweißende (se, letzten 10% des Schweißprozesses) dargestellt. Als diesem Größenvergleich ist zu erkennen, dass die

Zunahme der Elektrodenarbeitsfläche den größten Einfluss auf die Erreichte gesamte Wärmemenge im Schweißprozess hat. Die Wärmemenge nimmt mit zunehmender Elektrodenarbeitsfläche ab.

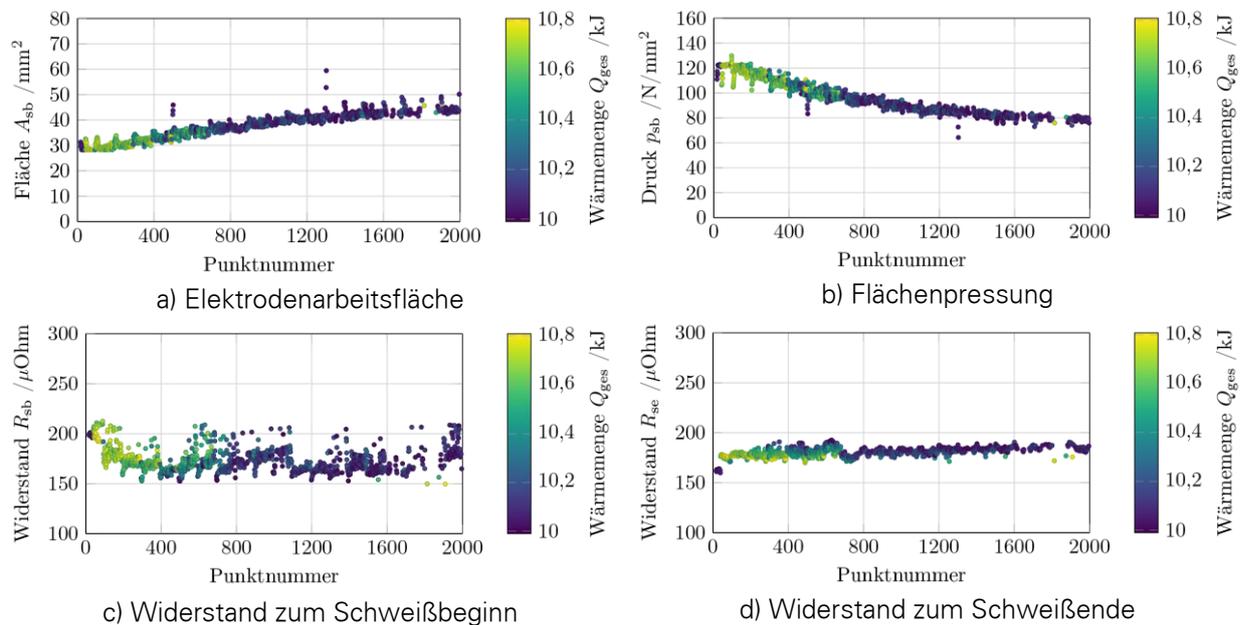


Abbildung 88: Einfluss der Elektrodenarbeitsflächenzunahme auf die Wärmemenge am Beispiel von VR01-e2-sv5

## 10.5.2 Metallurgischer Verschleiß der Elektroden

Die Untersuchungen der verschlissenen Elektrodenkappen der Standmengenuntersuchungen führen zu einem vertiefenden Verständnis der Verschleißvorgänge auf metallurgischer Basis. Dabei werden Schichtdicken und Schichtzusammensetzungen, sowie Härtemessungen an den Elektrodenkappen durchgeführt.

### 10.5.2.1 Auswertung der Anlegierungsschichten

Für die Untersuchung der Elektrodenarbeitsflächen wurden EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen der VR01, VR02 und VR04 durchgeführt und die Messergebnisse in der Mitte der Elektrodenarbeitsfläche miteinander verglichen. Die Messungen liefern eine qualitative Aussage über die Änderung der chemischen Zusammensetzung von Randschichten der Elektrodenkappen abhängig von der Anzahl der Schweißpunkte. Die Messergebnisse aller Versuchsreihen sind im Anhang C.13 zu finden. Bei VR01 und VR02 kann an der Oberfläche der Anode eine deutlich höhere Menge an Eisen und niedrigere Mengen an Zink im Vergleich zur Kathode nachgewiesen werden (Abbildung 89 links). Dieses Phänomen ist sowohl bei den pulvermetallurgisch, als auch bei den schmelzmetallurgisch hergestellten Legierungen zu beobachten. Sowohl die Anode als auch die Kathode wiesen Anlegierungen mit Aluminium auf. Den pulvermetallurgisch hergestellten Legierungen wurden diesbezüglich

leicht höhere Mengen an Aluminium auf den Kappenoberflächen nachgewiesen (Abbildung 89 rechts). Für VR04 wurden deutliche Unterschiede im Anlegierungsverhalten zwischen Anode und Kathode aufgrund der unterschiedlichen Beschichtungen auf den geschweißten Blechen beobachtet (Abbildung 90). Dabei legierte die Kathode mit Kontakt zur Al-Si-Schicht stärker mit Eisen und Aluminium, sowie Silizium an der Oberfläche auf. Die chemische Zusammensetzung der Anode entspricht den Messungen aus VR01 und VR02.

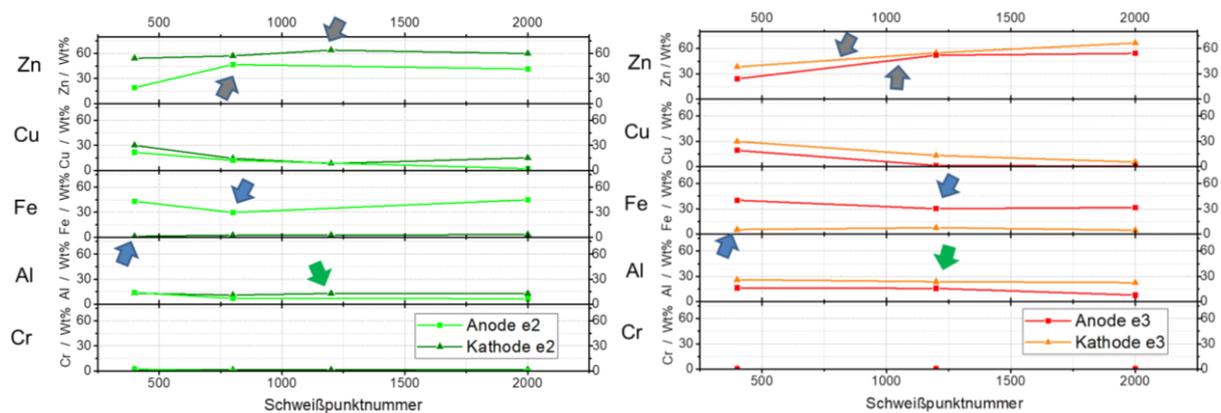


Abbildung 89: VR02: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen, links: VR02-e2, rechts: VR02-e3

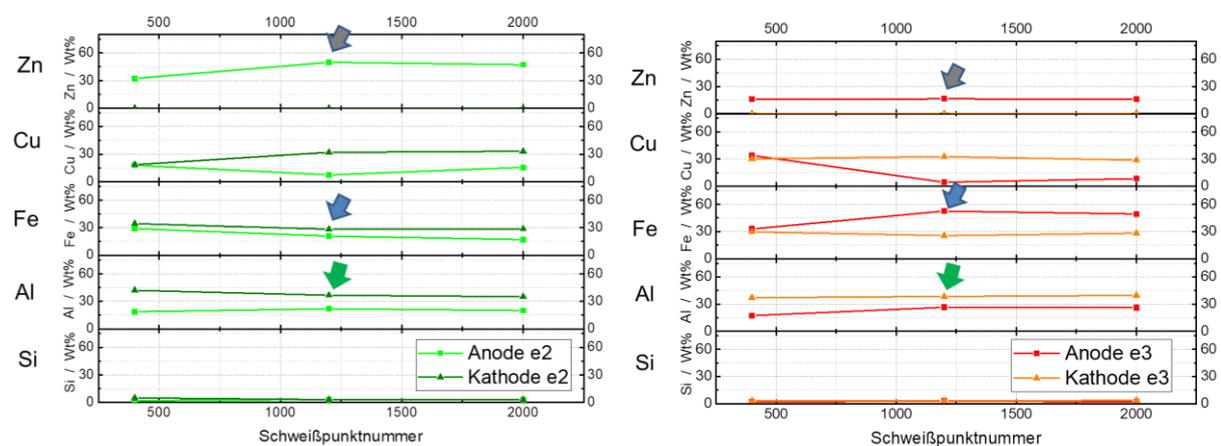


Abbildung 90: VR04: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen, links: VR04-e2, rechts: VR04-e3

Zur Bewertung der Diffusionsschichten von VR01, VR02 und VR04 wurden chemische Analysen am Querschliff mit EDX-Flächenmessungen und Linescans durchgeführt. Die Messergebnisse korrelieren mit den EDX-Messungen auf der Elektrodenoberfläche. Für VR01 und VR02 wurden zwei Typen von Zn-Schichten auf den auflegierten Kathoden festgestellt (Abbildung 91):

Diffusionszone a:  $\beta$ -Messing: Auflegierte Schicht mit Zn-Gehalt  $\leq 50\%$   
 Diffusionszone b:  $\gamma$ -Messing + Al, Fe, Auflegierte Schicht mit Zn-Gehalt  $> 50\%$ .

Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung ist für die Diffusionszone b ( $\gamma$ -Messing) eine höhere Sprödigkeit charakteristisch. Hierbei liegen die Zn-Gehalte außerhalb vom Bereich der technisch nutzbaren Messinge. Die Anoden wiesen einen niedrigeren Zink-Gehalt (bis 50%) und eine starke Auflegierung mit Fe- und Al-reichen Phasen auf, die teilweise in Form von großen Einschlüssen ausschließlich in der Nähe der Elektrodenarbeitsfläche in den Schichten eingepreßt sind. Mikrorisse traten in der Diffusionsschicht b der Kathoden auf. Beim Schweißen der Al-Si beschichteten Bleche erfolgte die Auflegierung der Elektrodenkappen mit Al und Fe. Dabei ist Fe nur oberflächennah vorhanden, während Al tiefer in die Elektrode eindringt (Abbildung 92).

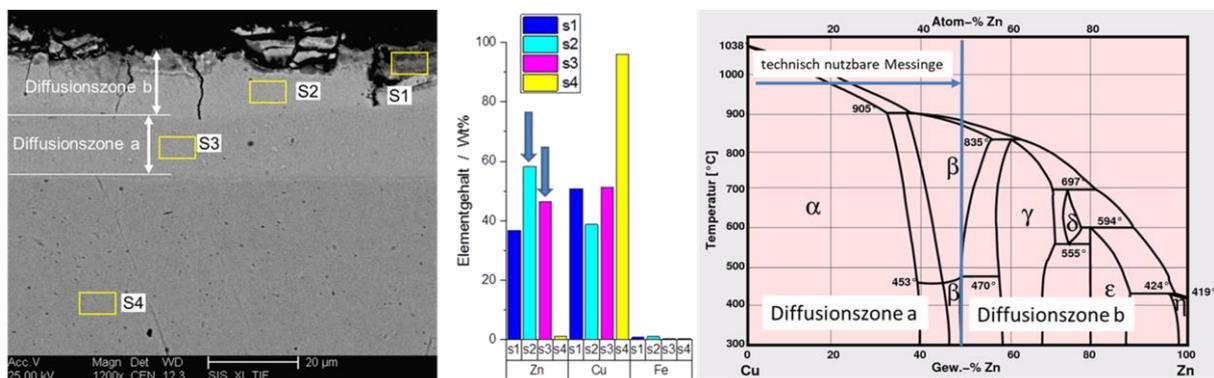


Abbildung 91: VR01, VR02: Schichtausbildung an den verschlissenen Elektrodenkappen mit chemischer Zusammensetzung und Phasendiagramm [82] (Beispiel: VR02-e1-sv1)

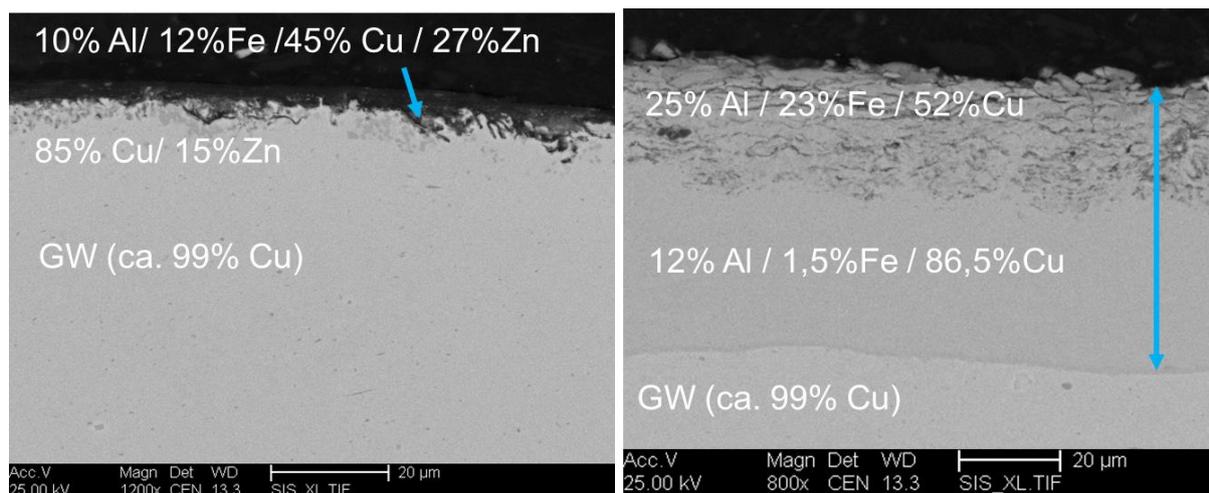


Abbildung 92: VR04: Schichtausbildung an den verschlissenen Elektrodenkappen (Beispiel: VR04-e1-sv1, 282 Schweißpunkte)

In Abbildung 93 sind die ermittelten Erweichungstiefen der verschlissenen Elektrodenkappen zu VR01, VR02 und VR04 dargestellt. Die Härtemessungen zeigen, dass

schmelzmetallurgisch hergestellte Werkstoffe (e1, e2) um bis zu 1900  $\mu\text{m}$  größere Erweichungstiefe als pulvermetallurgisch hergestellte Legierungen (e3, e4) aufwiesen. Die Legierung e3 wies erwartungsgemäß keine Erweichung auf. Bei e4 wurde eine erweichte Zone an der Elektrodenarbeitsfläche mit bis zu 600  $\mu\text{m}$  Tiefe ermittelt. Mit zunehmender Punkanzahl konnte kein Wachstum der Erweichungstiefe beobachtet werden. Für VR01 und VR04 wies die Anode tendenziell eine tiefere Erweichungszone im Vergleich zur Kathode auf. Bei VR02 konnte der Einfluss der Elektrodenpolung auf die Tiefe der Erweichungszone nicht festgestellt werden. Im Anhang C.12 sind die Härteverluste der Elektrodenkappen bezogen auf die Grundwerkstoffhärte dargestellt.

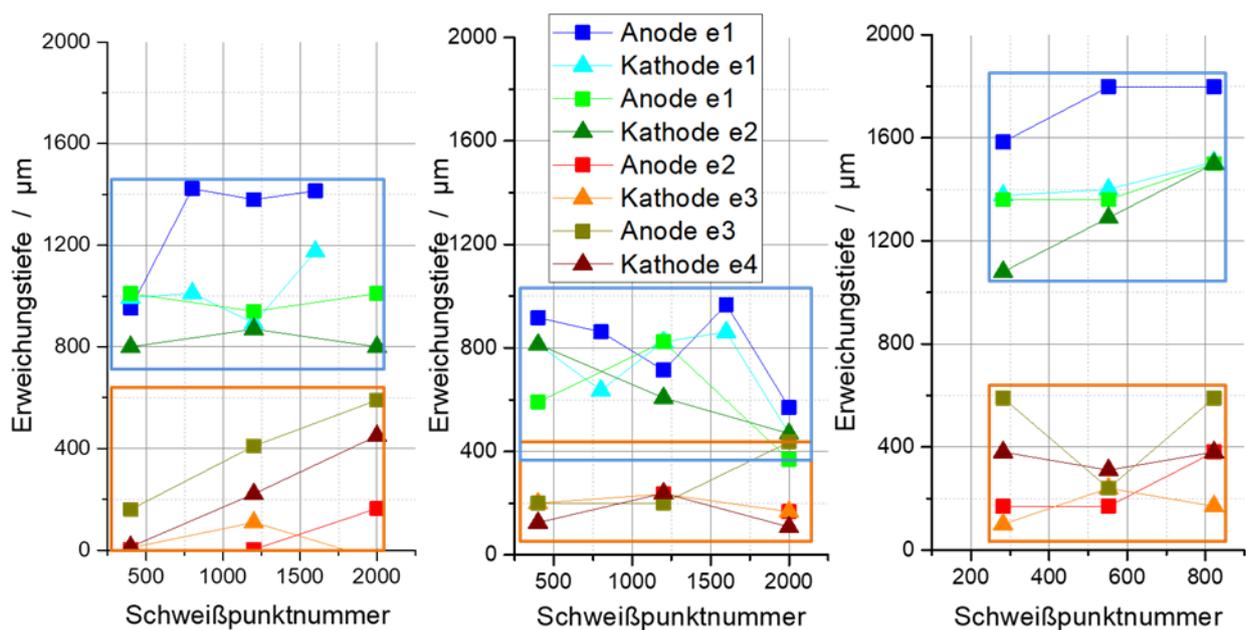


Abbildung 93: Erweichungstiefen aller Elektrodenkappen zum Stufenversuchsende von VR01 (links), VR02 (mittig) und VR04 (rechts)

Die Schichtdickenausmessungen wurden an den lichtmikroskopischen Aufnahmen durchgeführt. Beim Vermessen der einzelnen Schichtdicken ist festzustellen, dass diese in keinem Fall auf mehr als 150  $\mu\text{m}$  anwuchs (Abbildung 94). Der Vergleich zwischen der Erweichungszone und der Dicke der auflegierten Schichten zeigt, dass die Tiefe der Erweichungszone für die Elektrodenwerkstoffe e1, e2 und e3 immer größer war, als deren Schichtdicke.

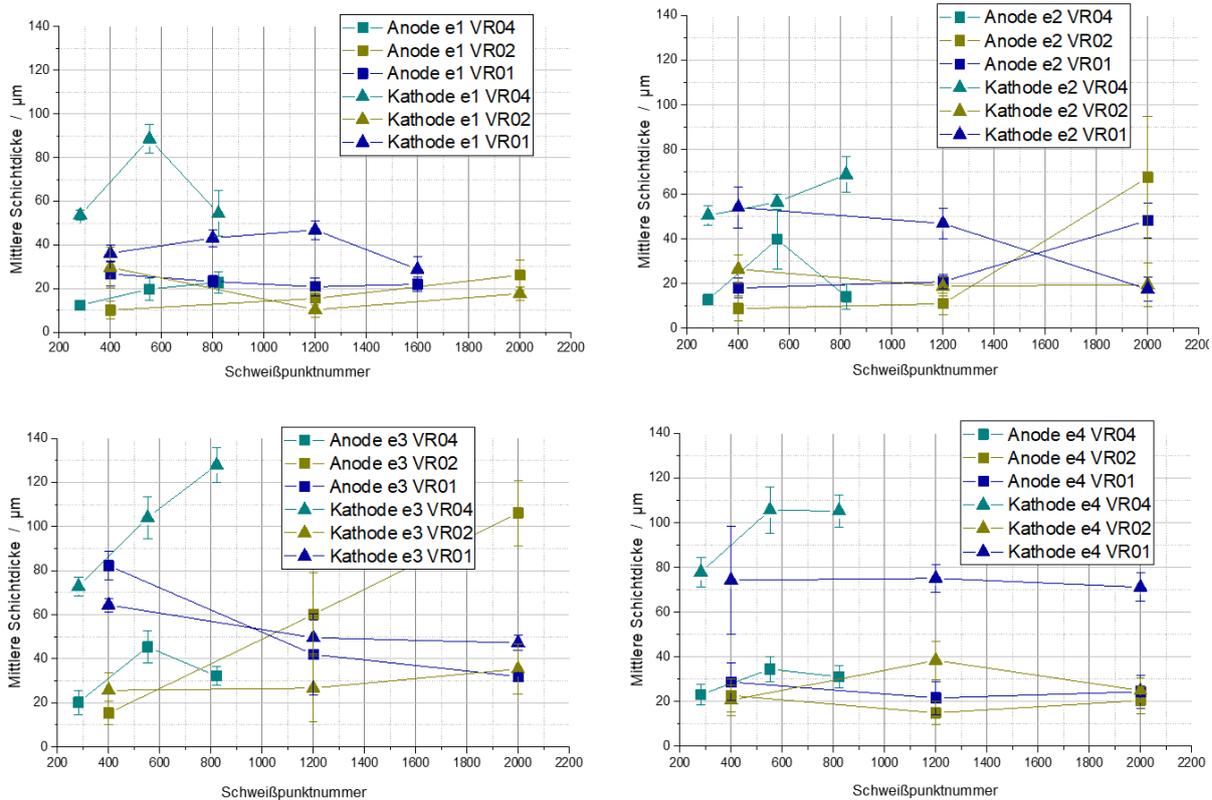


Abbildung 94: Dicken der Anlegierungsschichten aller Elektrodenkappenwerkstoffe von VR01, VR02 und VR04

### 10.5.2.2 Rissbildung

Bei der Untersuchung der verschlissenen Elektrodenkappen konnten Mikrorisse in hochzinkhaltigen Schichten (über 50% Zinkgehalt), sowie Makrorisse quer zu der Elektrodenarbeitsfläche identifiziert werden. Eine einheitliche Unterteilung der Makro- und Mikrorisse existiert nicht. In [83] werden Makrorisse mit der Länge größer 1 mm definiert. Im Rahmen des Projektes wurden als Mikrorisse die in den Anlegierungsschichten entstandenen Risse mit der Länge von wenigen Mikrometer bezeichnet (vgl. Abbildung 91), als Makrorisse werden Risse definiert, die aus den Anlegierungsschichten in die Kappe hineinwachsen und in der Regel mehrere hundert Mikrometer lang sind. Makrorisse traten nur bei VR01 und VR02 beim Schweißen zinkbeschichteter Stähle auf. Dabei neigten insbesondere die pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffe (e3, e4) zur Bildung der Makrorisse in der Kappenmitte, die bis 3 mm in die Elektrodenkappe hineinwanderten. Dabei war der Werkstoff e3 ohne ausgeprägte erweichte Zone deutlich rissanfälliger als e4, bei dem die Erweichung in der Nähe der Arbeitsfläche vorhanden war (vgl. Abbildung 93). Durch optische Lichtmikroskopie und EDX-Messungen an den Rissflanken konnte kein Zink an der Risspitze nachgewiesen werden. Die Anwesenheit von Zink im Riss in der Nähe der Arbeitsfläche konnte nicht als Nachweis für flüssigmetallinduzierte Versprödung dienen,

da die Anzahl der Schweißungen nach der Rissentstehung nicht bekannt war. Dennoch korreliert die Makrorissbildung mit der Anwesenheit der zinkreichen, spröden und mikrorissanfälligen Schichten auf der Kappenoberfläche. Die entstehenden Mikrorisse in Kombination mit der starken thermomechanischen Belastung der Kappen können zur Entstehung der Makrorisse beitragen. Eine Übersicht zum Auftreten von Rissen bietet Tabelle 31.

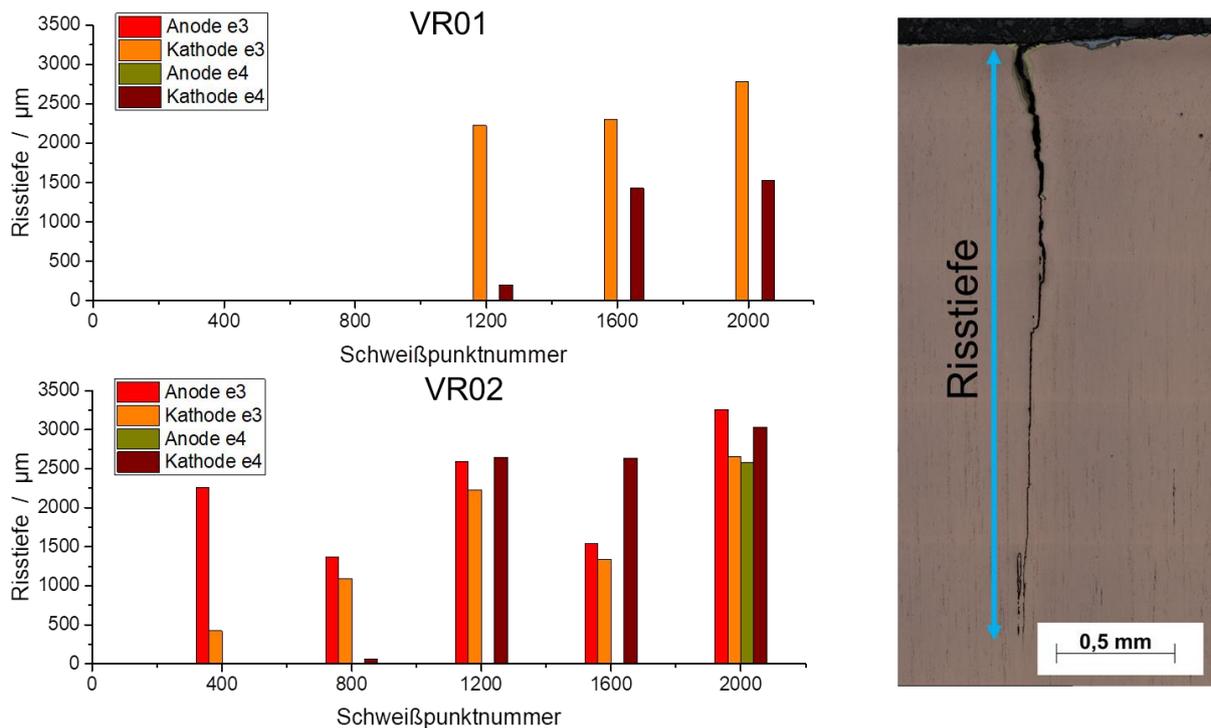


Abbildung 95: Risstiefe der verschlissenen Elektrodenkappen von VR01, VR02, jeweils e3, e4

Tabelle 31: Auftreten von Makrorissen in Anode (A) und Kathode (K)

Versuchsreihe/ Elektrodenwerk- stoff	VR01	e3			K	K	K
		e4			K	K	K
	VR02	e3	A,K	A,K	A,K	A,K	A,K
		e4			K	K	A,K
			400	800	1200	1600	2000
			Punktzahl				
Keine Risse			Riss nur in Kathode			Riss in Anode und Kathode	

### 10.6 Methodik zur Elektrodenwerkstoff- und Schweißparameterauswahl

Die in Abschnitt 10.5 beschriebenen mechanischen und metallurgischen Verschleißzusammenhänge führen zu einer Methodik für die Auswahl des Elektrodenwerkstoffs abhängig vom Grundwerkstoff und dem Beschichtungssystem (Tabelle 32). Die Prozessparameterauswahl kann mit Hilfe der erstellten Schweißbereiche aus Abschnitt 8.4 getroffen werden (Tabelle 33). Hierbei ist insbesondere der schon erwähnte Materialeinfluss auf den notwendigen Schweißstrom von Bedeutung. Das Ergebnis der Standmengenuntersuchungen liefert dem Anwender eine Übersicht über die Wirkzusammenhänge zwischen Elektrodenwerkstoff und Blechmaterial. Die Abbildung 96 gibt Hinweise auf zu erwartende Prozessqualitäten und Beeinträchtigungen der Elektroden und zeigt die Auswirkungen der Kombination von Elektrodenwerkstoff und Blechmaterial auf den Schweißprozess und dessen Ergebnis. Das Schema unterstützt den Anwender, eine prozessoptimierte Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl zu treffen.

Tabelle 32: Elektrodenwerkstoffauswahl für die Versuchsreihen

		Elektrodenwerkstoff							
		e1		e2		e3		e4	
VR01			<b>G</b>		<b>G</b>	Makrorisse ab 1200 Schweißpunkte	<b>B</b>	Makrorisse ab 1200 Schweißpunkte	<b>B</b>
VR02	Schwankungen des Punktdurchmessers		<b>B</b>	Schwankungen des Punktdurchmessers	<b>B</b>	Makrorisse ab 400 Schweißpunkte	<b>N</b>	Makrorisse ab 1200 Schweißpunkte Schwankungen des Punktdurchmessers	<b>B</b>
VR03	tiefer Elektrodenein- druck bedingt durch Plateaubildung		<b>B</b>	tiefer Elektrodenein- druck bedingt durch Plateaubildung	<b>B</b>	tiefer Elektrodenein- druck bedingt durch Plateaubildung	<b>B</b>	tiefer Elektrodenein- druck bedingt durch Plateaubildung	<b>B</b>
VR04	zu kleine Linsenein- dringtiefe in das dünne Blech		<b>B</b>	zu kleine Linsenein- dringtiefe in das dünne Blech	<b>B</b>		<b>G</b>		<b>G</b>

**G**...gut geeignet

**B**...bedingt geeignet

**N**...nicht geeignet

Tabelle 33: Prozessparameterauswahl für die Versuchsreihen und Elektrodenwerkstoffe

	Elektrodenwerkstoff			
	e1	e2	e3	e4
VR01	gleiche Schweißparameter			
VR02	höherer Schweißstrom als e3, e4	höherer Schweißstrom als e3, e4	geringerer Schweißstrom als e1, e2	geringerer Schweißstrom als e1, e2, e3
VR03	gleiche Schweißparameter			
VR04	gleiche Schweißparameter			

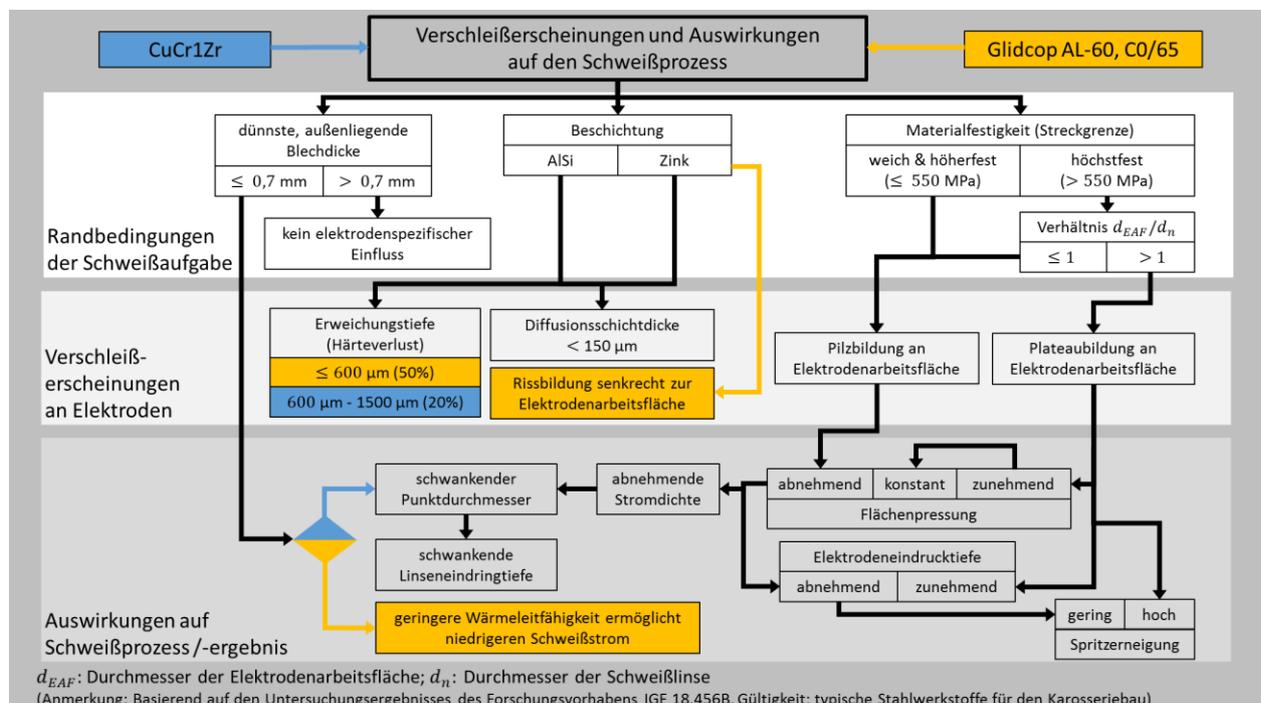


Abbildung 96: Verschleißerscheinungen und Auswirkungen auf den Schweißprozess in Abhängigkeit von der gewählten Kombination von Elektrodenwerkstoff-Blechmaterial

### 10.7 Modelle zur bedarfsgerechten Nachbearbeitung der Elektrodenarbeitsflächen

Die Standmengenuntersuchungen haben gezeigt, dass der Punktdurchmesser nicht als hinreichendes Kriterium für die Bewertung des Verschleißzustandes der Elektrodenkappen dient. Dies führt zu erweiterten Parameteranalysen in Form von Korrelationsmatrizen, wie in Abbildung 97 beispielhaft für VR01-e2-sv5 dargestellt ist. Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  wird durch Falschfarben codiert dargestellt. Dabei werden

über 120 einzelne Parameter pro Schweißpunkt untersucht und auf ihr Potential zur Verschleißidentifikation hin geprüft. Angewendet auf alle Stufenversuche resultiert dies in mehr als 400000 einzelnen Parameterkorrelationen. Daraus können Abhängigkeiten und Unabhängigkeiten diverser Parameter herausgefiltert werden, die mit den physikalischen Zusammenhängen und Bewertungskriterien für das Widerstandspunktschweißen von Stählen ausgewertet werden:

- Elektrodenarbeitsfläche  $A$
- Elektrodeneindrucktiefe  $t_e$
- Gesamtestblechdicke  $l$
- Prozesswiderstand  $R$
- Wärmemenge  $Q$
- Erwärmungsgeschwindigkeit  $\dot{Q}$ .

Das Ergebnis dieser Analysen sind ineinandergreifende Modelle, die eine bedarfsrechte Einleitung der Elektrodennachbearbeitung ermöglichen. Die Modelle bewerten Veränderungen elektrischer und mechanischer Messgrößen (primäre und sekundäre Messgrößen). Dabei müssen die Anforderungen und Vorgaben an den jeweiligen Schweißpunkt den Modellen bekannt sein. Diese können u. a. aus Normen oder Richtlinien, wie z. B. DVS-Merkblatt 2960 [80] stammen.

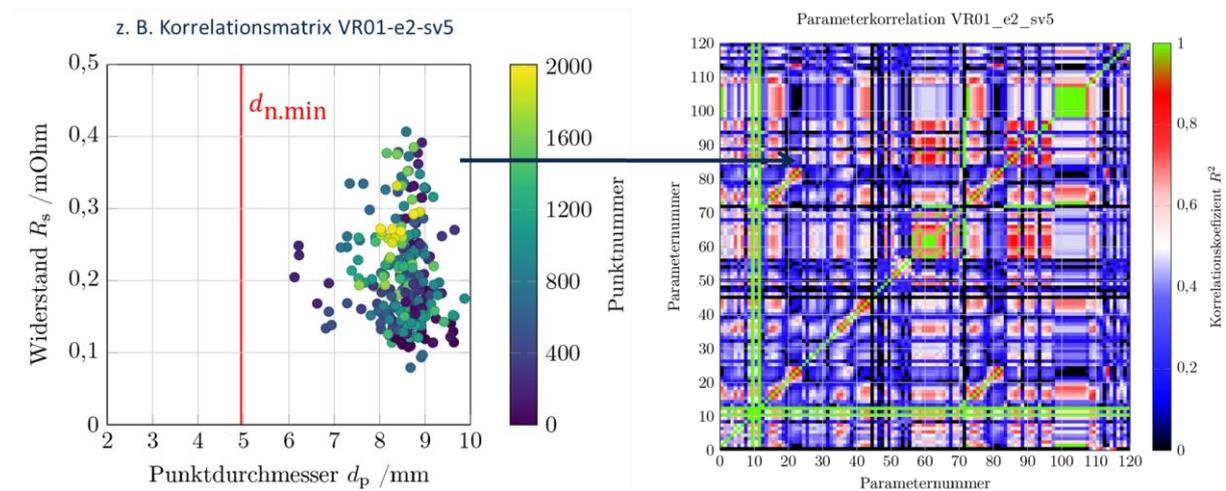


Abbildung 97: Korrelationsmatrix zur erweiterten Parameteranalyse (Beispiel VR01-e2-sv5)

### 10.7.1 Modell t-e: Bewertung der Restgesamtblechdicke

Das Modell t-e erfasst die Restgesamtblechdicke bzw. die Gesamtelektrodeneindrucktiefe. Diese lassen sich mit geeigneten Wegmesssystemen, wie z. B. der Lasertriangulation, erfassen. Wiederholt zu große bzw. zu kleine Elektrodeneindrucktiefen, die außerhalb von definierten Vorgaben liegen, führen zum Einleiten des Zerspanprozesses.

Abbildung 98 zeigt die Elektrodeneindringtiefen  $t_e$  der Anode von VR01 und VR03 der Schweißpunkte für den Stufenversuch 5. Zur Ermittlung der Zeitpunkte  $P_{M17}$  zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsflächen gilt folgendes Kriterium:

$$P_{M17} = 10\text{-mal aufeinanderfolgend } t_e \leq 0, \text{ oder}$$

$$P_{M17} = 10\text{-mal aufeinanderfolgend: } t_e \geq 0,2t, \text{ wobei } t \text{ die Blechdicke des betreffenden Bleches ist.}$$

Die ermittelten Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche sind in Abbildung 99 dargestellt. Für VR01 ergeben sich die Zeitpunkte im Mittel ab 800 Schweißpunkten. Hierbei werden 10-mal aufeinanderfolgend Elektrodeneindringtiefen  $t_e \leq 0$  registriert, woraus das Einleiten der Nachbearbeitung resultieren würde. Bei VR03 entstehen infolge der Plateaubildung an den Elektrodenkappen tiefe Elektrodeneindrücke, die nach wenigen Punkten das Kriterium 10-mal aufeinanderfolgend  $t_e \geq 0,2t$  überschreiten und somit die Nachbearbeitung der Elektroden einleiten würden.

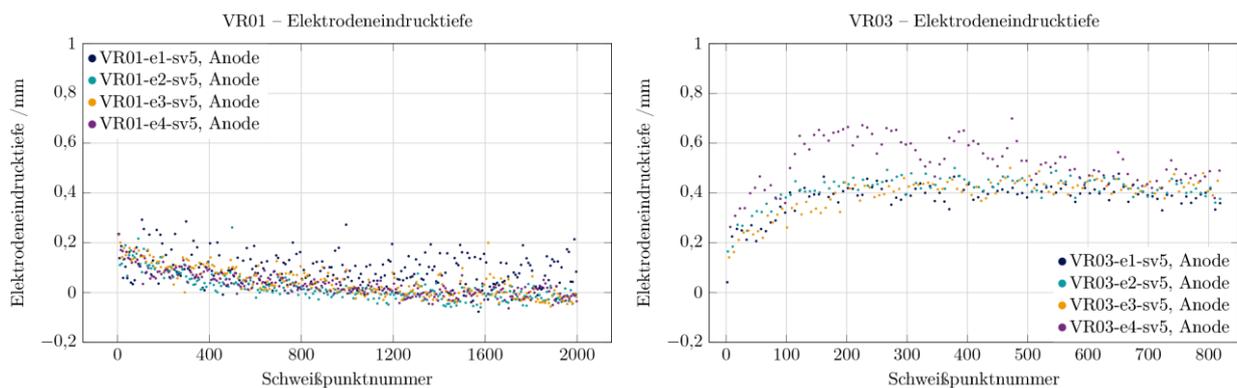


Abbildung 98: anodenseitige Elektrodeneindringtiefen von VR01 und VR03 für Stufenversuch 5

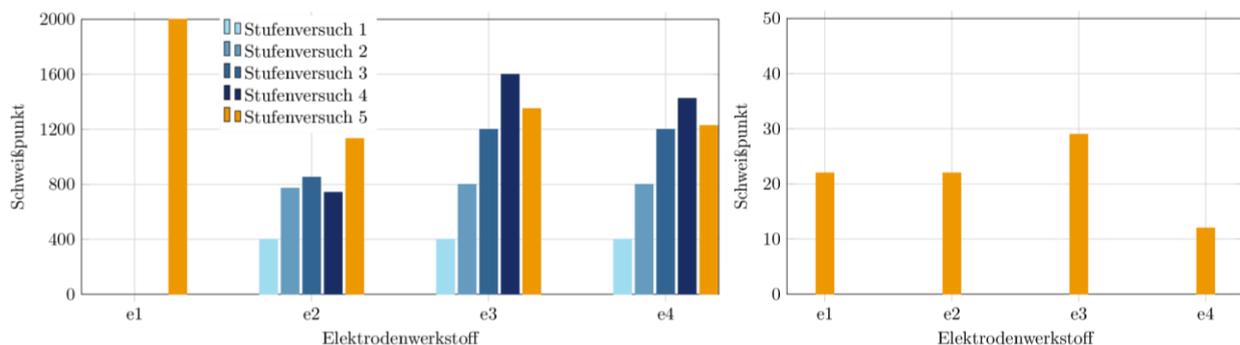


Abbildung 99: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektroden nach Modell t-e für VR01 (links) und VR03 (rechts)

Die Elektrodeneindringtiefen und Zerspanzeitpunkte aller Versuchsreihen der Stufenversuche 5 sind in Anhang C.1 zu finden.

### 10.7.2 Modell rho: Bewertung des spezifischen elektrischen Widerstands

Die Veränderungen der mit den Blechen in Kontakt stehenden Elektrodenarbeitsflächen führen zu einer Veränderung der elektrischen Stromdichte. Folglich kommt es zu Veränderungen in der Wärmeentwicklung während des Schweißprozesses. Gleichzeitig führt dies zu anderen Elektrodeneindringtiefen und Gesamtrestblechdicken, was in Abschnitt 10.5.1 beschrieben ist. Die Auswertung des spezifischen elektrischen Widerstands pro Schweißpunkt  $\rho_i$  zu vordefinierten Zeitpunkten im Schweißprozess verknüpft diese Erscheinungen miteinander.

Modell rho bewertet diese Veränderungen des spezifischen elektrischen Widerstands über die geschweißten Punkte hinweg. Die Bewertung des aktuellen Schweißpunktes  $P_n$  erfolgt durch einen Bezug vordefinierter Grenzbereiche. Die Grenzbereiche ergeben sich durch den Erwartungswert  $\mu_n(\rho)$  für den aktuellen Schweißpunkt. Der Erwartungswert  $\mu_n(\rho)$  ergibt sich nach Formel (20), wobei  $n$  die aktuelle Schweißpunktnummer ist.

$$\mu_n(\rho) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(P_i) \quad (20)$$

In Abbildung 100 wird dieser Zusammenhang am Beispiel von VR04-e4-sv5 gezeigt. Für die Bewertung wurden die Parameter  $R$ ,  $A$  und  $l$  zum Prozessbeginn im Intervall  $[0; 0,1t_w]$  verwendet. Als Kriterium zum Ermitteln des Zeitpunktes zur Nachbearbeitung der Elektrodenarbeitsfläche werden zehn aufeinander folgende Werte von  $\rho_i$  herangezogen, die außerhalb der definierten oberen und unteren Grenze liegen. Im Beispiel ist zu erkennen, dass die ermittelten spezifischen elektrischen Widerstände  $\rho_i$  mit fortlaufender Schweißpunktanzahl zunehmend streuen und vom Erwartungswert  $\mu_n(\rho)$  divergieren. Ab ca. 700 Schweißpunkte nimmt die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen von  $\rho_i$  deutlich zu. Dies würde zum Einleiten des Zerspanprozesses führen.

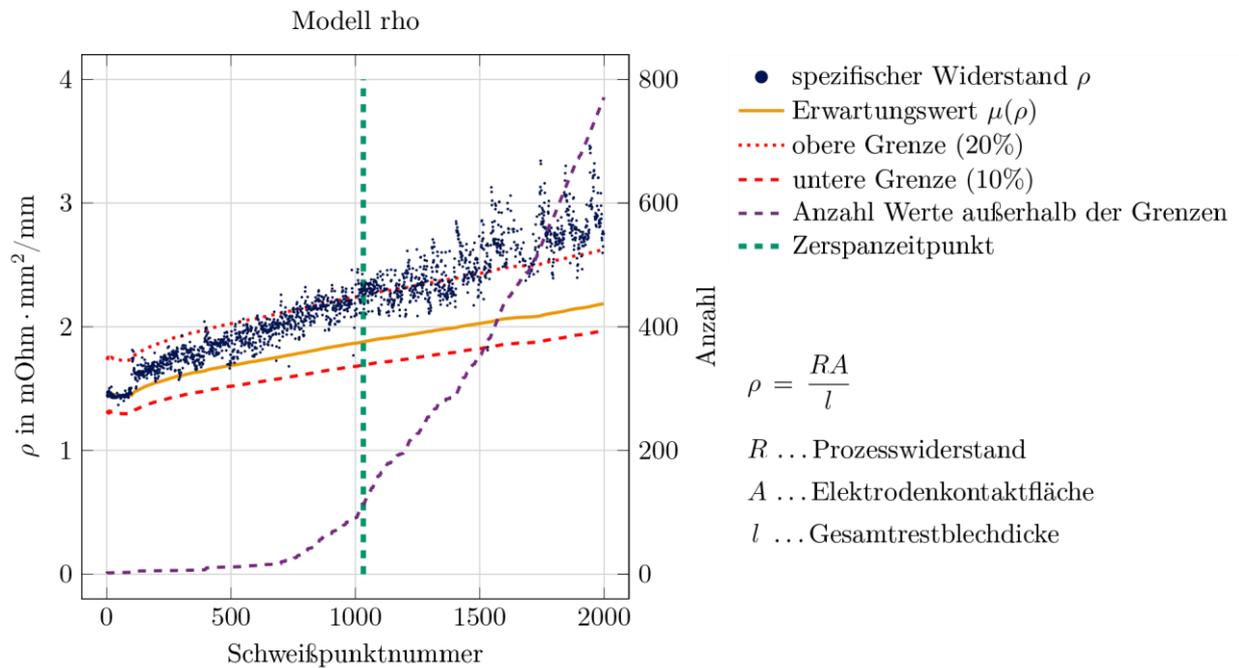


Abbildung 100: Modell rho beispielhaft für VR01-e4-sv5

Bei der Anwendung von Modell rho auf VR02-e2 in Abbildung 101 zeigt sich, dass die Zeitpunkte jeweils vor einem deutlichen Einbrechen des Schweißpunktdurchmessers ermittelt werden konnten.

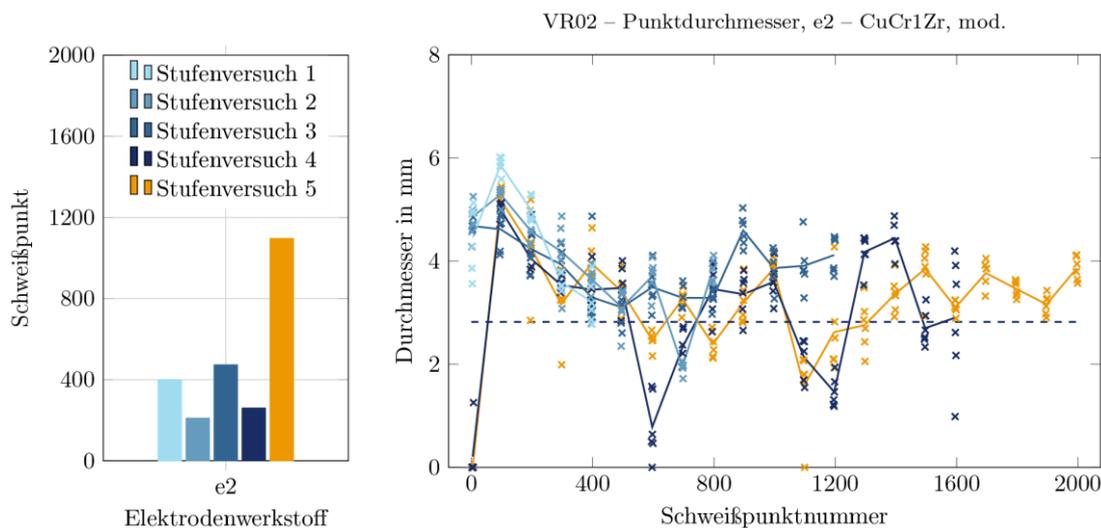


Abbildung 101: ermittelte Zeitpunkte zum Elektrodennachbearbeiten der VR02-e2 mit Modell rho mit dem Verlauf der zugehörigen Punktdurchmesser der Stufenversuche

Die Zerspanzeitpunkte aller Versuchsreihen sind in Anhang C.2 zu finden.

### 10.7.3 Modell Q: Vergleich der theoretisch notwendigen mit der tatsächlichen Wärmemenge

Für jeden Schweißpunkt muss eine bestimmte, theoretisch notwendige Energie in Wärmemenge umgesetzt werden. Bei der Betrachtung der partiellen Wärmemenge pro Schweißpunkt anhand von Falschfarben- bzw. Intensitätsdiagrammen können Tendenzen anschaulich dargestellt werden. In Abbildung 102 ist zu erkennen, dass die erzeugte Wärmemenge während der Schweißzeit über die Schweißpunktanzahl unterschiedlich ist. Im Vergleich kann die gesamte Wärmemenge  $Q_{ges}$  eine differenzierte Aussage liefern, die unzureichend für die Bewertung des Verschleißzustandes der Elektrodenkappen ist (Abbildung 103). Mit Hilfe der Intensitätsdiagramme können Aussagen zum Verlauf der Wärmemengenerzeugung getroffen werden.

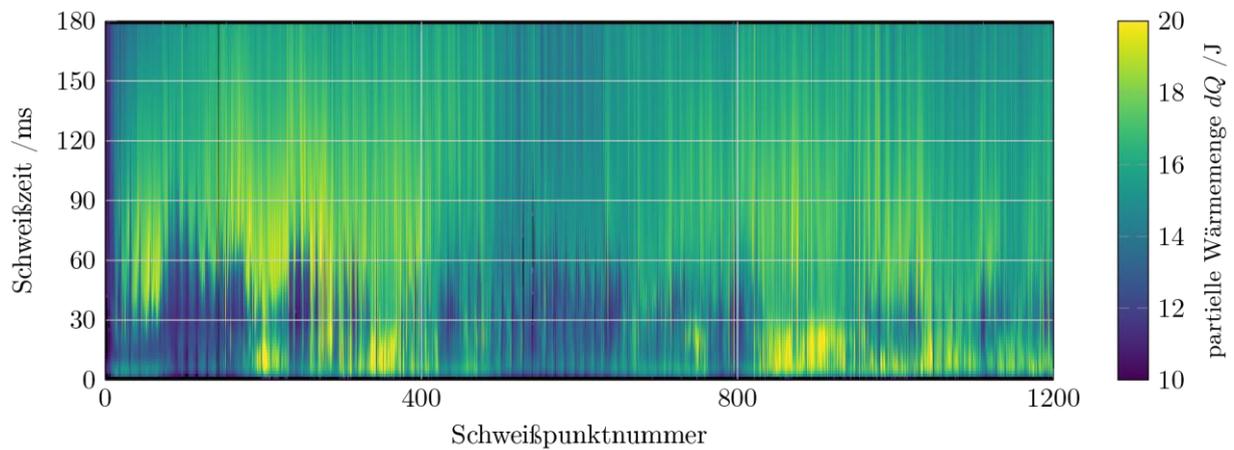


Abbildung 102: Falschfarbendiagramm der partiellen Wärmemenge über der Schweißzeit für alle Schweißpunkte von VR02-e2-sv3

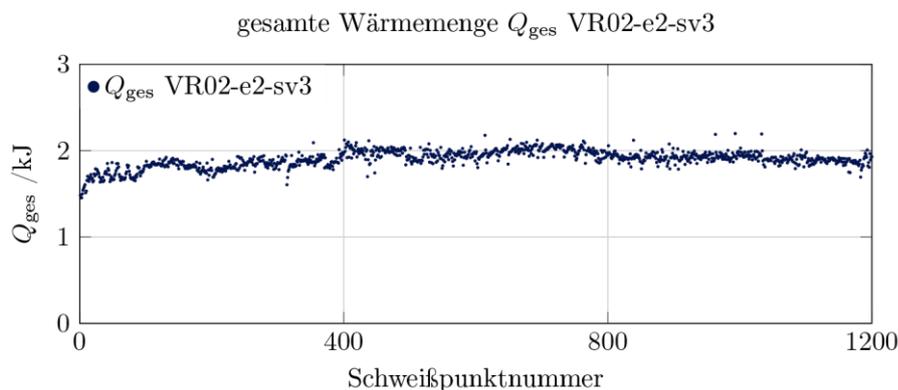


Abbildung 103: gesamte Wärmemenge für alle Schweißpunkte von VR02-e2-sv3

Modell Q greift diesen Sachverhalt auf und vergleicht die theoretisch notwendige mit der tatsächlich erzeugten Wärmemenge. Bei einem „Gut-Schweißpunkt“ wird mehr Wärmemenge, als theoretisch notwendig ist, erzeugt. D. h., es kann davon ausgegangen

werden, dass genügend Wärmemenge für einen Schweißpunkt mit dem geforderten Punktdurchmesser entstanden ist. Im Vergleich entsteht bei einem „Schlecht-Schweißpunkt“ weniger Wärmemenge als theoretisch notwendig ist. Somit besteht die Gefahr, dass zu wenig Material aufgeschmolzen wird und der Schweißpunkt zu klein ist.

Abbildung 104 soll den Sachverhalt beispielhaft für zwei Schweißpunkte (P0035, P1220) von VR01-e4-sv5 darstellen. Dabei wird die kumulierte Wärmemenge  $Q$  über der Prozess- bzw. Schweißzeit aufgetragen. Es wird angenommen, dass die theoretische Wärmemenge linear während des Schweißprozesses zunimmt. Für den Vergleich zwischen theoretisch und tatsächlich erzeugter Wärmemenge wird eine bestimmte Wärmemenge  $Q_{t,\%}$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t_{t,\%}$  vorgegeben. Im vorgestellten Beispiel  $Q_{t,\%} = 50\%$ . Das Modell bewertet den Zeitpunkt  $t_{p,\%}$ , an dem die theoretisch notwendige Wärmemenge tatsächlich im Schweißprozess erreicht wird. Liegt dieser Zeitpunkt vor  $t_{t,\%}$  wird von einem „Gut-Schweißpunkt“ ausgegangen. Liegt  $t_{p,\%}$  nach  $t_{t,\%}$  wird von einem „Schlecht-Schweißpunkt“ ausgegangen. Gehäuftes Auftreten von  $\Delta t < 0$  kann als Kriterium zum Einleiten des Nachbearbeitungsprozesses dienen.

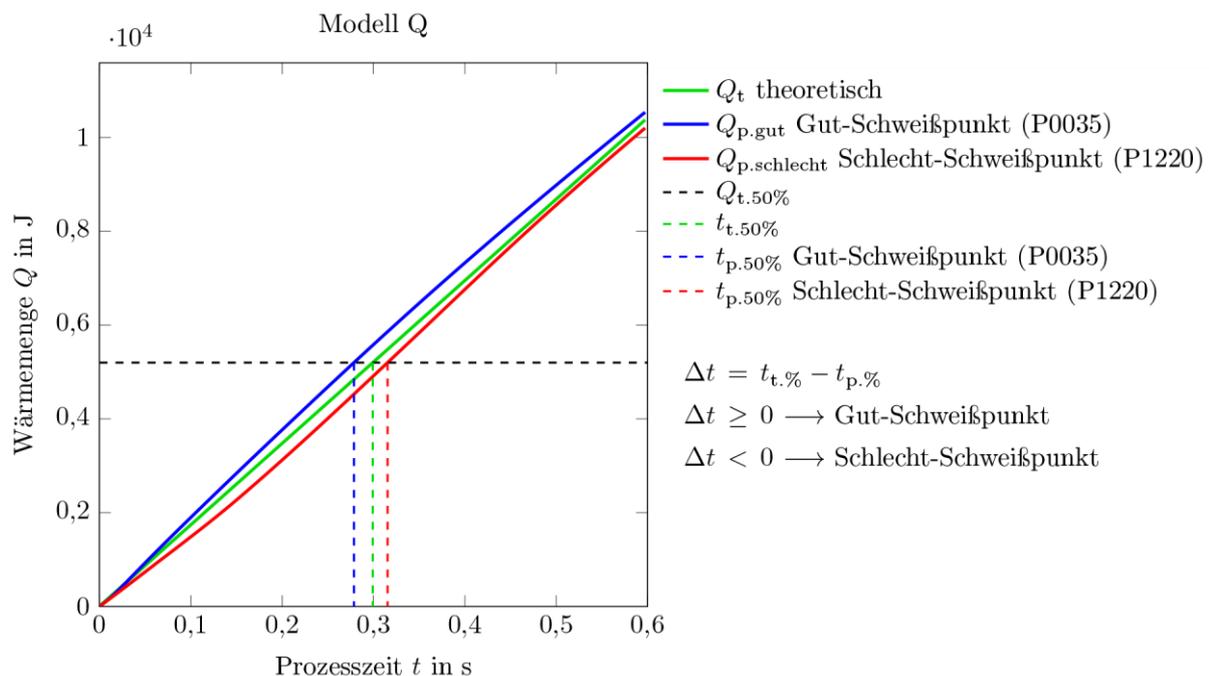


Abbildung 104: Beispiel zur Beschreibung von Modell Q

Die von Modell Q ermittelten Zeitpunkte zur Nachbearbeitung der VR01 sind in Abbildung 105 dargestellt. Als Kriterium wurden zehn aufeinander folgende „Schlecht-Schweißpunkte“ ( $\Delta t < 0$ ) angesetzt. Es ist zu erkennen, dass bei VR01-e3 für die Stufenversuche (sv) 1 – 4 und VR01-e4-sv1 kein Zeitpunkt vor dem Erreichen des Versuchsendes ermittelt wurde. Bei allen anderen Versuchen wurde das Kriterium erfüllt und es konnten Zeitpunkte bestimmt werden. Zwischen VR01-e2-sv2 und VR01-e3-sv2 sind deutliche

Unterschiede der Zeitpunkte zu erkennen. Während bei VR01-e3-sv2 800 Punkte geschweißt werden können, ohne dass ein Zeitpunkt ermittelt wurde, greift das Kriterium bei VR01-e2-sv2 bereits bei 400 Schweißpunkten. Die Ursache darin liegt im Verlauf der erzeugten Wärmemenge über der Schweißzeit während der Standmengenuntersuchung (Abbildung 106). Bei VR01-e2-sv2 wird zu Beginn der Standmengenuntersuchung viel Wärmemenge insbesondere in den ersten 100 ms des Schweißprozesses erzeugt. Mit zunehmender Punktanzahl verlagert sich dieses Maximum je Schweißpunkt hin zu späteren Zeiten und nimmt gleichzeitig ab. VR01-e3-sv2 hingegen zeigt ein konstantes Verhalten über die gesamte Stufe von 800 Schweißpunkten.

Die Zeitpunkte aller Versuchsreihen sind in Anhang C.3 zu finden.

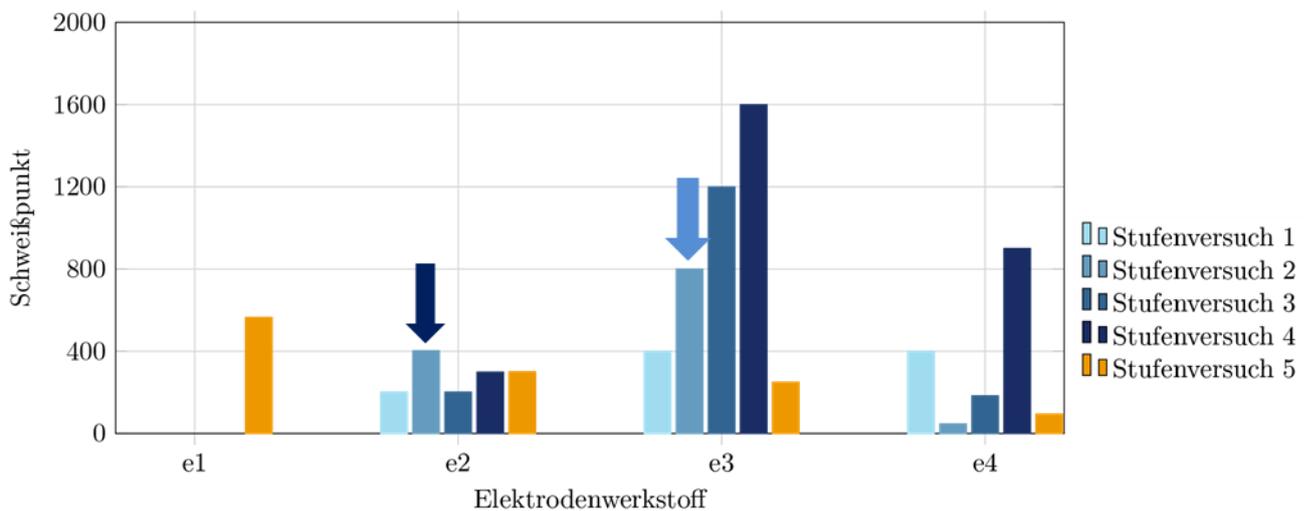


Abbildung 105: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01

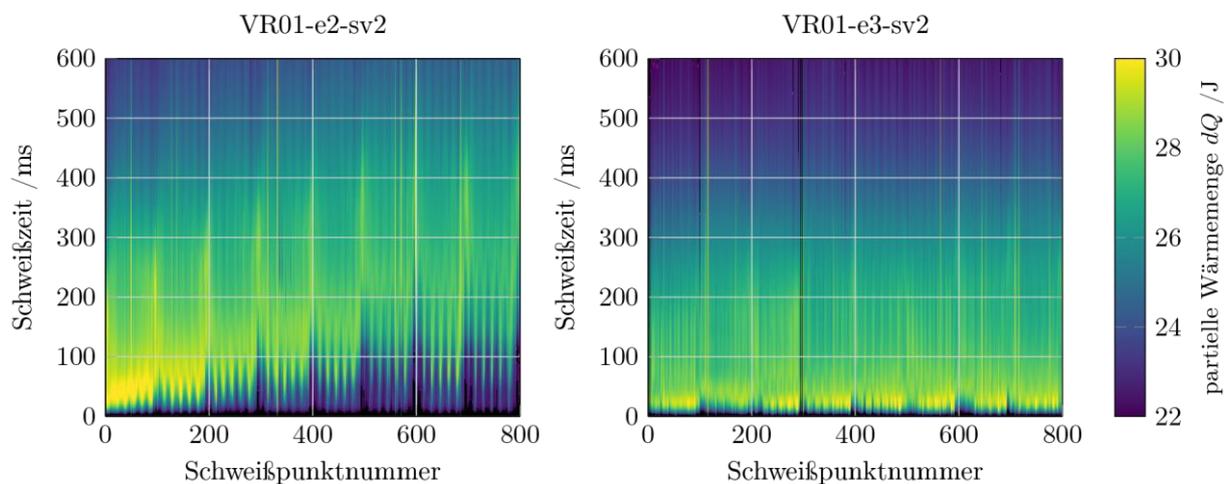


Abbildung 106: Verlauf der erzeugten Wärmemenge über der Schweißzeit während der Standmengenuntersuchung bei VR01-e2-sv2 und VR01-e3-sv2

### 10.7.4 Modell Q-Punkt: Bewertung der Erwärmungsgeschwindigkeit

Modell Q-Punkt analysiert die Erwärmungsgeschwindigkeit während des Schweißprozesses. Eine zu geringe Erwärmungsgeschwindigkeit oder eine zu hohe Erwärmungsgeschwindigkeit führen zum Einleiten des Nachbearbeitungsprozesses. Bei zu hohen Erwärmungsgeschwindigkeiten kommt es zur Überhitzung der Fugestelle, was häufig zu Schweißspritzern führt. Bei einer zu geringen Erwärmungsgeschwindigkeit setzt die Wärmeableitung in die Elektroden und Bleche ein, wodurch zu wenig Wärmemenge zum Aufschmelzen der Fugestelle zur Verfügung steht. Das Resultat kann z. B. ein zu kleiner Punktdurchmesser sein.

Abbildung 107 zeigt den Vergleich der Erwärmungsgeschwindigkeiten  $\dot{Q}$  von VR01-e2-sv5 und VR01-e3-sv5. Es ist zu erkennen, dass bei VR01-e3-sv5 die Erwärmungsgeschwindigkeiten der Schweißpunkte mit zunehmender Anzahl konstant bleiben. Bei VR01-e2-sv5 fällt diese bei einzelnen Schweißpunkten bereits nach ca. 150 Schweißpunkten um 10%. Eine Abhängigkeit vom gewählten Blech (Verschleiß oder Prüfblech) ist nicht zu erkennen. Somit ergeben sich unterschiedliche Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche, wie in Abbildung 108 für VR01 dargestellt ist. Das folgende Kriterium  $P_{M12}$  gilt zum Einleiten des Nachbearbeitungsprozesses:

$$P_{M12} = 10\text{-mal aufeinanderfolgend: } \dot{Q}(P_i) \notin [(\mu(\dot{Q}) - 0,1\mu(\dot{Q})); \mu(\dot{Q}) + 0,2\mu(\dot{Q})]$$

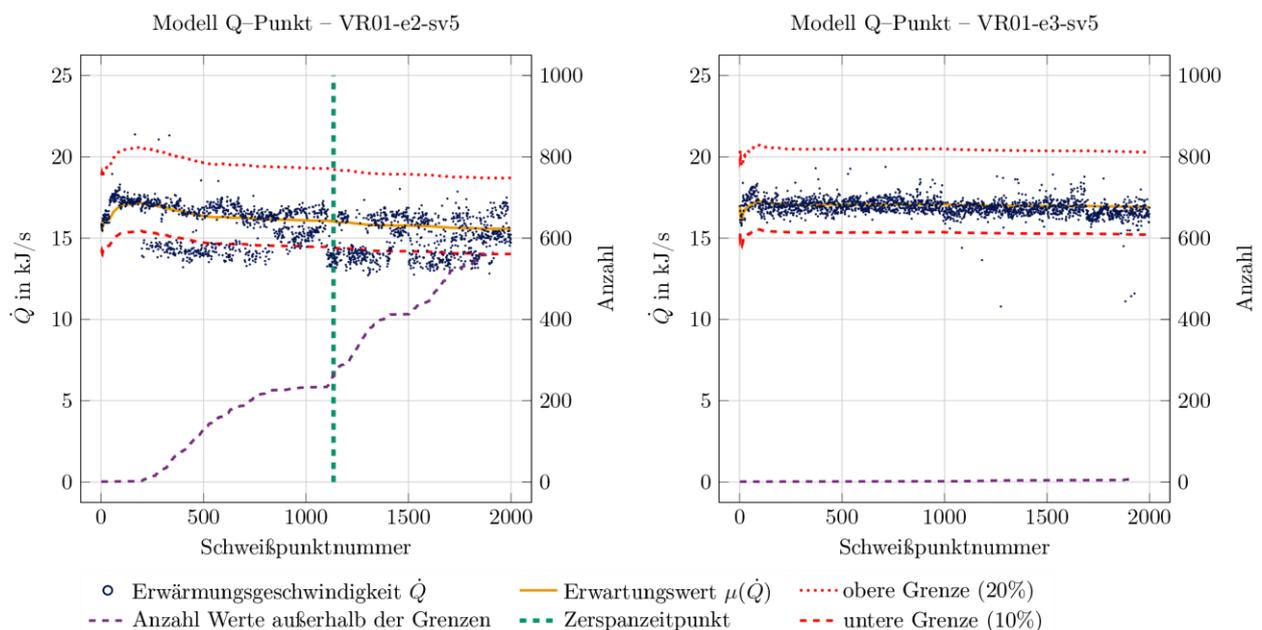


Abbildung 107: Modell Q-Punkt: Vergleich der Erwärmungsgeschwindigkeiten zwischen VR01-e2-sv5 und VR01-e3-sv5

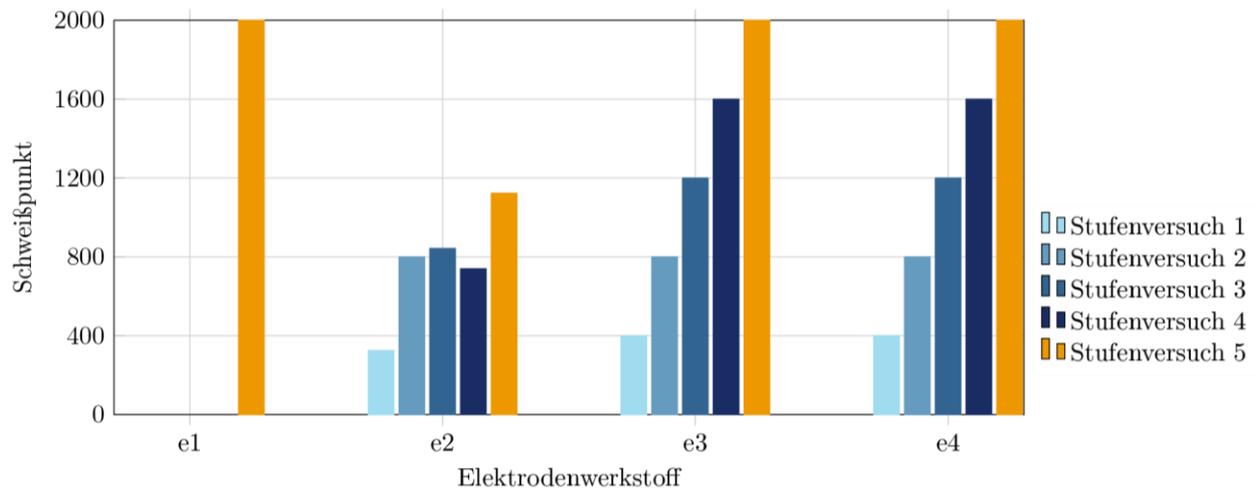


Abbildung 108: Modell Q-Punkt: Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01

## 11 Ergebnisse der Simulationen

### 11.1 Sensitivitätsanalysen

Durch eine stärkere Wärmeableitung über die Elektrodenkappen mit höherer Wärmeleitfähigkeit (Referenzwert + 40 W/(m·K)) kommt es zur Verringerung des Punktdurchmessers um ca. 1,3%. Eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit (Referenzwert - 40 W/(m·K)) führt zur Vergrößerung des Punktdurchmessers um 3% im Vergleich zum Referenzwert (Abbildung 109). Der Einfluss des spezifischen elektrischen Widerstands und der Wärmekapazität auf den resultierenden Punktdurchmessern ist geringer ausgeprägt. Die Abweichung des Punktdurchmessers vom Referenzwert beträgt in diesen Fällen weniger als 1%.

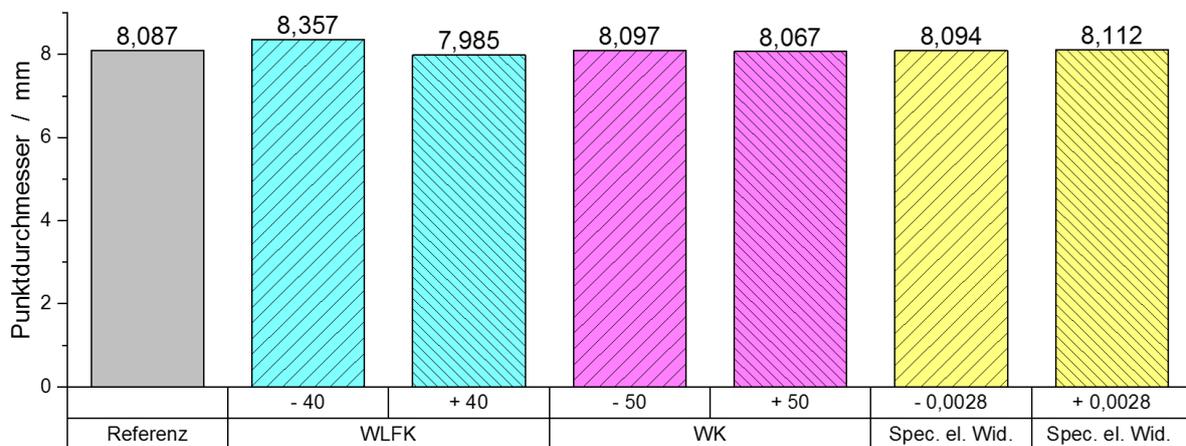


Abbildung 109: Einfluss der Werkstoffparameter auf Punktdurchmesser (WLFK: Wärmeleitfähigkeit, WK: Wärmekapazität)

Die Wärmeleitfähigkeit zeigt den größten Einfluss auf die Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe. Die um 12% (40 W/(m·K)) niedrigere Wärmeleitfähigkeit resultiert in eine um 9,28% gesunkene maximale Temperatur an der Arbeitsfläche der Elektrodenkappe. In dem Knoten 2 beträgt die Absenkung der Maximaltemperatur 5,42%. Um annähernd den gleichen Betrag stieg die Maximaltemperatur mit der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit an, wie Abbildung 110 veranschaulicht.

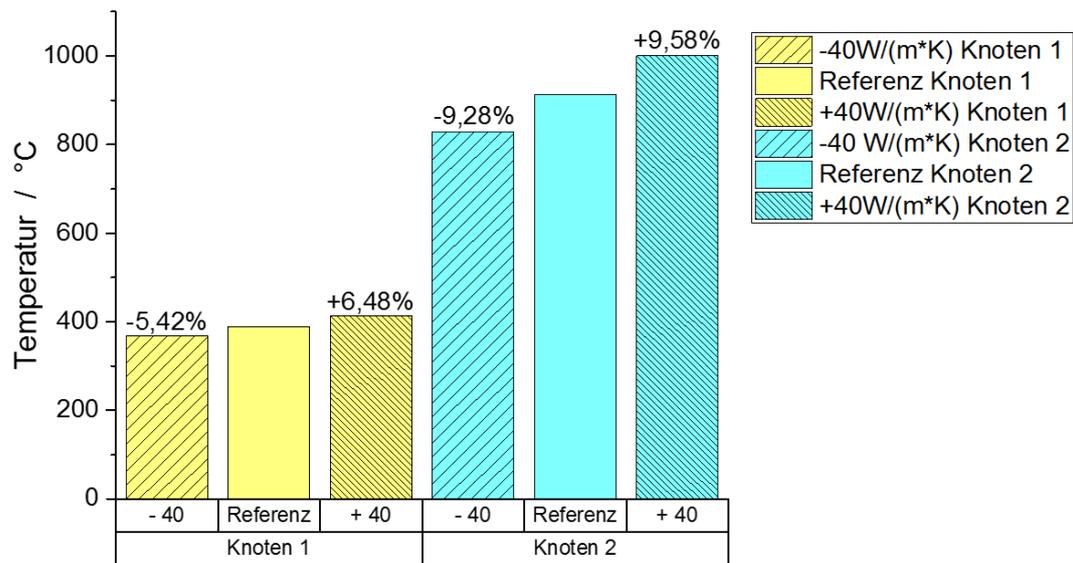


Abbildung 110: Einfluss der Variation von Wärmeleitfähigkeit auf Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe

Die Variationen des spezifischen elektrischen Widerstands und der Wärmekapazität zeigen kaum einen Einfluss auf die maximalen Temperaturen in der Elektrodenkappe. Die Änderungen der letzteren liegen unter 2%. Die Ergebnisse der Simulation sind im Anhang C.12 zusammengefasst.

Unter sonst gleichen Bedingungen werden der Punktdurchmesser im Schweißprozess und die Temperaturverteilung in einer Elektrodenkappe größtenteils durch die Wärmeleitfähigkeit des Elektrodenkappenwerkstoffs beeinflusst. Der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit und Wärmekapazität ist untergeordnet. Es ist nicht möglich, die Wärmeleitfähigkeit des metallischen Werkstoffes zu beeinflussen, ohne seinen elektrischen Widerstand zu ändern. Es kann jedoch empfohlen werden, den Fokus auf eine genaue Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit für den Elektrodenwerkstoff zu legen.

## 11.2 Simulationen und Vergleich der Schweißbereiche

Die Ergebnisse der Simulationen haben eine bedingt gute Korrelation zum Experiment. Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation, welcher für VR01 in Abbildung 111 dargestellt ist, zeigt eine gute Übereinstimmung des Punktdurchmessers. Die untere Qualitätsgrenze kann gut abgebildet werden. Eine derartige Übereinstimmung der experimentell und simulativ ermittelten oberen Qualitätsgrenze ist für VR01 nicht gegeben.

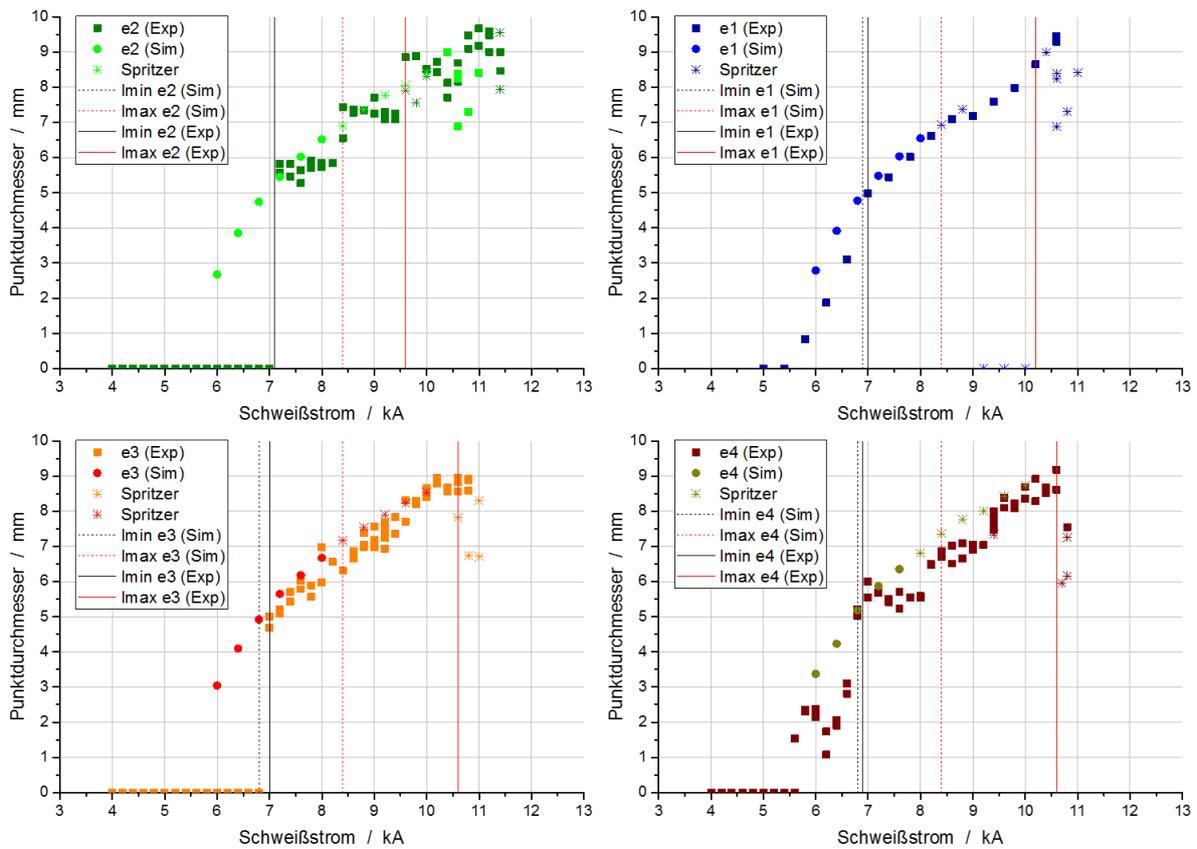


Abbildung 111: VR01 Vergleich der Wachstumskurven aus Experiment und Simulation

Für VR02 wird eine schlechtere Übereinstimmung zwischen dem experimentell und simulativ ermittelten Punktdurchmessern beobachtet (vgl. Abbildung 112). Die Neigung der experimentell ermittelten Wachstumskurven ist steiler, wodurch die untere Qualitätsgrenze in Richtung niedrigerer Schweißströme verschoben wird. Die obere Qualitätsgrenze kann gut abgebildet werden.

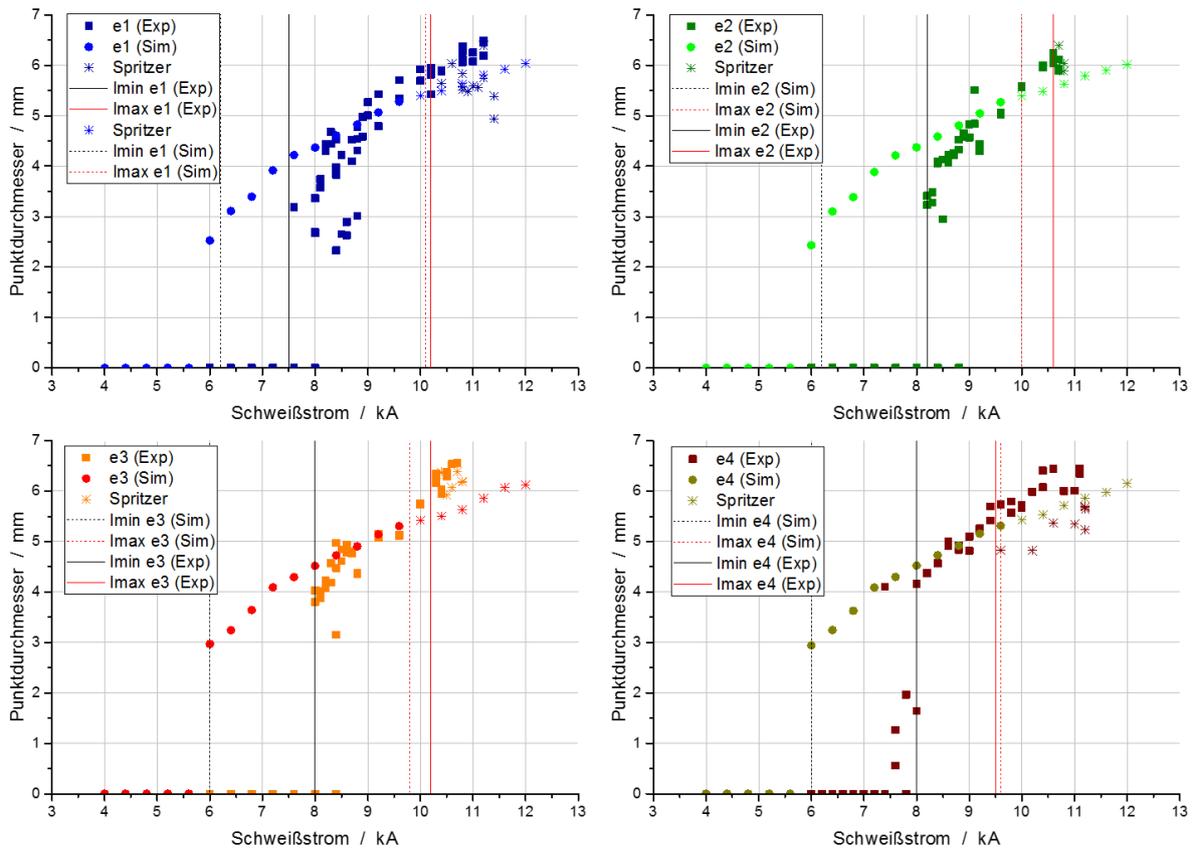


Abbildung 112: VR02 Vergleich der Wachstumskurven aus Experiment und Simulation

## 12 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „*Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe*“ (IGF-Nr.: 18.456 BR, DVS-Nr.: 04.062) mit einem Bewilligungszeitraum vom 01.07.2016 – 31.09.2017 wurden schmelz- und pulvermetallurgisch hergestellte Elektrodenkappen wissenschaftlich untersucht. Die Untersuchungen beinhalteten chemische und physikalische Analysen der einzelnen Werkstoffe, deren individuelles Zerspanverhalten beim Widerstandspunktschweißen, sowie umfangreiche Standmengenuntersuchungen an ausgewählten Materialdickenkombinationen. Die erforschten Erkenntnisse zum Zerspan- und Verschleißverhalten sollen dem Anwender helfen, eine prozessoptimierte Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl zu treffen.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden durch die festgelegten Schritte des Arbeitsplans und die Zusammenarbeit der beiden Forschungseinrichtungen erreicht.

Das erste Forschungsziel zur Zerspanbarkeit der unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffe in Abschnitt 7 zeigt, dass mit angepassten Zerspanparametern gleiche Oberflächenqualitäten zwischen schmelz- und pulvermetallurgisch hergestellten Elektrodenkappen möglich sind. Dadurch können gleiche Startbedingungen für die verschiedenen Schweißaufgaben angesetzt werden. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass bei verschlissenen Elektrodenkappen die Anlegierungsschicht eine maximale Schichtdicke erreicht, die im Bereich von wenigen zehntel Millimetern liegt. Beim Nachbearbeiten der Elektroden müsste demzufolge nur diese Abtragtiefe erreicht werden. In Kombination mit den in Abschnitt 0 beschriebenen Modellen zur bedarfsgerechten Einleitung der Nachbearbeitung der Elektroden sind die Voraussetzungen zur optimalen Ausnutzung der Elektrodenlebensdauer bei allen Elektrodenkappentypen gegeben.

Das zweite und dritte Forschungsziel konnte durch umfangreiche Standmengenuntersuchungen erfüllt werden. Es stellte sich heraus, dass der Punktdurchmesser nicht als hinreichendes Kriterium für die Bewertung des Verschleißzustandes der Elektrodenkappen dient. Dies führte zu erweiterten Parameteranalysen, die in Form von ineinandergreifenden Bewertungsmodellen aus Abschnitt 0 den Verschleißzustand erfassen lassen. Die Auswertungen der Untersuchungen münden in einem besseren Verständnis über die Verschleißvorgänge schmelzmetallurgisch und pulvermetallurgisch hergestellter Elektrodenkappenwerkstoffe. Als Ergebnis liegt dem Anwender eine prozessoptimierte Elektrodenwerkstoff-Prozessparameter-Auswahl vor.

## **13 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen**

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag. Bedingt durch den Ausfall des Schweißroboters (2016, KM35 – KW37), dem Ausfalls des konfokal-chromatischen Mikroskops (2016, KW38 – KW47) und des Rasterelektronenmikroskops (2016, KW45 – KW52) kam es zu Verzögerungen in der Projektbearbeitung. Einem Antrag auf kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um 3 Monate wurde stattgegeben. Alle durchgeführten Arbeiten erfolgten zielgerichtet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die Auswahl und Koordinierung sowie zur Bearbeitung der durchzuführenden Aufgaben notwendig und vom Zeitumfang her angemessen.

### **13.1 Forschungseinrichtung 1**

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungseinrichtung 1, Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes mit 19,2 PM in Vollzeit. Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet.

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet. Dies ist auch zukünftig nicht geplant.

### **13.2 Forschungseinrichtung 2**

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungseinrichtung 2, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes mit 13 PM in Vollzeit. Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet.

Es wurden keine gewerblichen Schutzrechte erworben oder angemeldet. Dies ist auch zukünftig nicht geplant.

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

### **14.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse**

Die Erkenntnisse zum Verschleißverhalten der einzelnen Elektrodenwerkstoffe und die Methodik zur Elektrodenwerkstoff- und Prozessparameterauswahl stehen potentiellen Nutzern durch die Veröffentlichungen zur Verfügung. Aufgabe der Hersteller ist es, die Erkenntnisse in ihre Fertigung zu übertragen.

Mit den im Projekt zu erarbeitenden Kenngrößen (praktikable bedarfsgerechte Zerspanstrategien, Schweißbereichsdiagramme und Prozessfenster, Verschleißcharakteristika sowie temperaturabhängige Materialeigenschaften) konnte grundlegend gezeigt werden, dass die unmittelbaren Verschleißteile (Elektroden) und deren Regenerierung durch die Nachbearbeitung der Elektrodenarbeitsfläche Optimierungspotential besitzen.

### **14.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit**

Die Ermittlung verschleißabhängiger Zerspanintervalle durch Auswertung von Prozessparametern kann kurzfristig industriell genutzt werden. Es ist vorstellbar, dass die im Projekt erforschten Abhängigkeiten der Prozessparameterverläufe vom Verschleißzustand der Elektroden in die Regelalgorithmen der Schweißsteuerungen implementiert werden. Mittelfrequenzschweißanlagen sind bereits mit umfassender Parametererfassung (Stromstärke, Spannung, Kraft) ausgestattet. Bei entsprechender Programmierung der Steuerungen ist es ebenso möglich, vorhandene Anlagen durch Softwareupdates bzw. neue Anlagen mit dem entsprechenden Feature auszurüsten.

Die am Markt verfügbaren dispersionsgehärteten Elektrodenkappenwerkstoffe können aufgrund gleicher Geometrie ohne Änderung an jeder konventionellen Anlage eingesetzt werden. Diese Ausgangslage ermöglicht es, die Anwendungsbereiche des Widerstandspunktschweißens ohne Umwege auf bisher nicht mögliche Schweißverbindungen zu erweitern. Die umfassende und anwenderbezogene Dokumentation zu Prozessfenstern für die zunehmend gefragten hoch anspruchsvollen Blechdickenkombinationen und Beschichtungen ermöglicht kleinen und mittelständischen Unternehmen eine optimale Elektrodenauswahl bei geringem Entwicklungsaufwand. Die Möglichkeiten und Grenzen der dispersionsgehärteten Elektrodenwerkstoffe sind denen der konventionellen CuCr1Zr-Elektroden direkt gegenübergestellt. Fügeverbindungen, die nicht durch das Vorhaben experimentell untersucht wurden, können mit Hilfe des erarbeiteten Verschleißmodells und der Methodik zur geeigneten Werkstoffauswahl überprüft werden.

## 15 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

### 15.1 Fachtagungen, Kolloquien

- Sherepenko, O., Jüttner, S., Betke, U., Mathiszik, C., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.:  
Partikelverstärkte Kupferlegierungen. Physikalische Eigenschaften und Einsatzpotential als Elektrodenkappenwerkstoffe zum Widerstandsschweißen.  
Widerstandsschweißen Sondertagung in Duisburg. DVS Berichte, Bd. 326. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2016, S. 151–158
- Köberlin, D., Mathiszik, C., Sherepenko, O., Zschetzsche, J., Jüttner, S. u. Füssel, U.:  
Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe“ in  
DVS Berichte, Bd. 342, 38. Assistentenseminar Fügetechnik: DVS Berichte, Band: 342, DVS Media GmbH, Hg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2018.
- Köberlin, D., Mathiszik, C., Sherepenko, O., Zschetzsche, J., Jüttner, S. u. Füssel, U.:  
Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe. DVS Congress 2017. Große Schweißtechnische Tagung : DVS-Studentenkongress : Vorträge der Veranstaltungen in Düsseldorf vom 26. bis 29. September 2017. DVS Berichte, Band 337, CD-ROM. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2017, S. 350–355
- Mathiszik, C., Sherepenko, O., S. Heilmann, Köberlin, D., Zschetzsche, J., Jüttner, S. u. Füssel, U.:  
Life-time increase of resistance spot welding electrodes by using wear dependent milling intervals and dispersion hardened copper materials. IIW Annual Assembly 2017. Shanghai, 2017
- Mathiszik, C., Sherepenko, O., Zschetzsche, J., Jüttner, S. u. Füssel, U.:  
Vorstellung des Vorhabens: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe. Gemeinschaftskolloquium AG V 3/FA 4 „Widerstandsschweißen“ des DVS e.V. Halle, 24.11.2015
- Mathiszik, C., Sherepenko, D., Zschetzsche, J., Jüttner, S. u. Füssel, U.:  
Vorstellung des Vorhabens: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe. Gemeinschaftskolloquium AG V 3/FA 4 „Widerstandsschweißen“ des DVS e.V. Paderborn, 2.11.2016
- Mathiszik, C., Sherepenko, O., Köberlin, D., Zschetzsche, J., Jüttner, S. u. Füssel, U.:  
Vorstellung des Vorhabens: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersions-

---

gehärteter Kupferwerkstoffe. Gemeinschaftskolloquium AG V 3/FA 4 „Widerstandsschweißen“ des DVS e.V. Leipzig, 29.11.2017

## **15.2 Studien- und Abschlussarbeiten**

Ketzel, M.-M.: Integration einer Übergangswiderstandsmesseinrichtung in Widerstandsschweißanlagen, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2015

Gröger, T.: Fräsbarkeitsuntersuchungen von Elektrodenkappen zum Widerstandspunktschweißen, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2016

Präkelt, P.: Durchführen von Standmengen- und Verschleißuntersuchungen beim Widerstandspunktschweißen mit unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffen, Großer Beleg, Technische Universität Dresden, 2016

Zapf, H.: Bestimmung mechanischer und elektrischer Eigenschaften neuartiger Elektrodenkappenwerkstoffe auf Kupferbasis, Masterarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016

Otto, C.: Fräsbarkeitsuntersuchungen von Elektrodenkappen zum Widerstandspunktschweißen, Großer Beleg, Technische Universität Dresden, 2016

Längericht, S.: Bewertung des Elektrodenverschleißes durch Datenanalyse, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 2017

Schilde, T.: Bewerten der Verschleißzustände von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen, Großer Beleg, Technische Universität Dresden, 2017

Erdmann, M.: Datenanalyse beim Widerstandspunktschweißen, Forschungsseminar, Technische Universität Dresden, 2017

Schreiber, V.: Beurteilung der Verschleißprozesse von Elektrodenkappen aus schmelzmetallurgisch und pulvermetallurgisch hergestellten Kupferlegierungen beim Widerstandspunktschweißen von zinkbeschichteten Blechen, Masterprojektarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2017

## 16 Transfermaßnahmen

### 16.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>A:</b> Informationen an die Unternehmen des PA	Fachliche Betreuung, Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU); gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	1. PA: 29.09.2015 2. PA: 7.4.2016 3. PA: 27.9.2016 4. PA: 28.3.2017 5. PA: 17.10.2017
<b>B:</b> Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während und nach der Projektlaufzeit
<b>C:</b> 4 geplante Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie 2 Zwischenberichte / 3 Zwischenpräsentationen vor dem FA 4 jeweils 1. und 2. HJ ab 10/2015	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	PA: siehe Maßnahme A FA4: 24.11.2015, 26.4.2016, 2.11.2016, 4.5.2017 29.11.2017
<b>D:</b> Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungseinrichtung oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
<b>E:</b> Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.8 „Widerstandsschweißen“ im Ausschuss für Technik des DVS	Übernahme der Ergebnisse in Merkblätter, Arbeitsblätter und Normen	Jährlich (06/ 2016, 11/2016, 06/2017)
<b>F:</b> Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen (z. B. Große Schweißtechnische Tagung, regionale Schweißtechnische Fachtagungen,	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	Sondertagung Widerstandsschweißen 2016 [56] Kolloquium Widerstandsschweißen und alternative Verfahren 2015, 2016, 2017

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Zeitraum</b>
Sondertagungen (Schweißern)		Große Schweißtechnische Tagung 2017 [84] IIW Annual Assembly 2017 38. Assistentensiminar Fügetechnik 2017 [85]
<b>G:</b> Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
<b>L:</b> Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-/Diplom- bzw. Bachelor-/Masterarbeiten	Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium an der TU Dresden, Beitrag bei der jährlichen SFI Ausbildung in Dresden)	Für die Lehre und Weiterbildung ab 10/2017 Akademische Arbeiten: Forschungseinrichtung 1: Ketzel, M.-M. [71], Gröger, T. [86], Präkelt, P. [87], Otto, Ch. [62], Längericht, S. [72], Schilde, T. [73], Erdmann, M. [88] Forschungseinrichtung 2: Schreiber, V., Maaß, C. [89] Zapf, H. [90]

## 16.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Zeitraum</b>
<b>B:</b> Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend
<b>D:</b> Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an den Forschungseinrichtungen oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Zeitraum</b>
<b>F:</b> Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen (z. B. Große Schweißtechnische Tagung, regionale Schweißtechnische Fachtagungen, Sondertagungen Schweißen)	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	IIW Annual Assembly 2018, Sondertagung Widerstandsschweißen 2019
<b>G:</b> Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend auf Anfrage
<b>H:</b> Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften	Information von potenziellen Anwendern, vor allem KMU, national	Schweißen und Schneiden 2. Quartal 2018, Welding in the World 2018
<b>I:</b> Vorstellung der Ergebnisse auf Weiterbildungsveranstaltungen der DVS-Bezirksverbände (Magdeburg und Dresden)	Ergebnistransfer an die persönlichen und industriellen (KMU) Mitglieder des DVS, bereits schon im Arbeitskreis	Fortlaufend auf Anfrage
<b>J:</b> Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes und Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	1. Quartal 2018
<b>K:</b> Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	2018
<b>L:</b> Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-/Diplom- bzw. Bachelor-/Masterarbeiten	Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium an der TU Dresden, Beitrag bei der jährlichen SFI Ausbildung in Dresden)	Für die Lehre und Weiterbildung ab 10/2017

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

Im fortgeschriebenen Plan zum Ergebnistransfer werden verschiedene bisherige und geplante Maßnahmen dargestellt.

Eine weite Verbreitung der Forschungsergebnisse an KMU ist über die schon getätigten bzw. noch beabsichtigten Konferenzvorträge, Fachbeiträge in Zeitschriften und Tagungsbände sowie die Einbindung in die akademische Ausbildung an den Universitäten gegeben. Die Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (sowohl KMU als auch Großunternehmen) und auch weitere Firmen haben durch die Veröffentlichungen Zugriff auf die Forschungsergebnisse. Auch die Online-Veröffentlichungen auf den Internetseiten der Forschungseinrichtungen lassen erwarten, dass sich weitere KMU bei den Forschungseinrichtungen melden, um Forschungsergebnisse abzurufen und in die Praxis zu überführen. Eine Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter/Technische Regelwerke/Normen durch Zuarbeit bei der Überarbeitung von DVS-Merkblättern ist auf Anfrage vorstellbar und wird gerne unterstützt.

Die vorgeschlagenen und aktualisierten Transfermaßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen sind in sich schlüssig, so dass von einer erfolgreichen Realisierung der noch geplanten Maßnahmen ausgegangen wird.

## 17 Literaturverzeichnis

- [1] Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre: Standmengenerhöhung beim Widerstandsschweißen durch Elektrodenfräsen: AiF-Nr. 13.134 N / DVS-Nr. 4.031, Universität Stuttgart, 2004.
- [2] B. Christoph: Die Versorgungslücke droht: Ressourcen: Unternehmen fürchten bei vielen Industrierohstoffen Engpässe, *VDI nachrichten*, 17 Nov., S. 7, 2017.
- [3] R. Laurenz und P. Ohse: Einfluss der Ofenverweilzeit von metallisch überzogenem Warmumformstahl auf die Eignung zum Widerstandspunkt-, Buckel- und Lichtbogenbolzenschweißen, *Schweißen und Schneiden*, Jg. 64, Nr. 10, S. 654–661, 2012.
- [4] Beuth Verlag: DIN EN ISO 8166: Verfahren für das Bewerten der Standmenge von Punktschweißelektroden bei konstanter Maschinen-Einstellung, September 2003.
- [5] F. Dello: Ermittlung der Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen beschichteter hochfester Bleche. Großer Beleg, Technische Universität Dresden Professur Fügetechnik und Montage, Dresden, 2008.
- [6] C. Großmann, J. Zschetzsche, U. Füssel, H.-J. Ullrich, S. Jütter und M. Graul: Methoden zur Diagnose des Elektodenschleißes beim Widerstandspunktschweißen: Große Schweißtechnische Tagung in *DVS-Berichte*, Bd. 267, S. 122–127, *DVS Congress: Große Schweißtechnische Tagung*, Düsseldorf: DVS Media, 2010.
- [7] N.N.: Produktinformation C3/60. Datenblatt, Mühlheim an der Ruhr, 2004.
- [8] Beuth Verlag: DIN EN ISO 5182: Widerstandspunktschweißen - Werkstoffe für Elektroden und Hilfseinrichtungen, 2009.
- [9] M. Hofmockel: ECKA Discup tech data sheets. Datenblatt, Velden, 2005.
- [10] N.N.: Nitrode. Datenblatt, Herdfordshire, 2007.
- [11] U. Marek: Beitrag zur Klärung der Legierungsschichtbildungs- und Verschleißvorgänge an Widerstandspunktschweißelektroden beim Schweißen feuerverzinkter Stahlbelche. Dissertation, 1996.
- [12] DVS Media: Merkblatt DVS 2920: Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollnahtschweißen von Stahlblechen bis 3 mm mit metallischen Überzügen, Februar 2000.
- [13] U. Dilthey und U. Marek: Legierungsschichten und Elektodenschleiß beim Widerstandspunktschweißen, *Blech, Rohr, Profile*, Jg. 43, Nr. 10, S. 527–534, 1996.
- [14] S. Giering: Einfluss der Kaltverfestigung auf die Standmenge von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen. Großer Beleg, Technische Universität Dresden Professur Fügetechnik und Montage, Dresden, Sep. 2009.

- 
- [15] U. Füssel, C. Großmann, J. Zschetzsche, E.-C. Klages und A. Voigt: New ways to improve resistance spot welding. Tailored Joining 2012 - Proceedings of the International Symposium Tailored Joining, Fraunhofer IWS Dresden; Technische Universität Dresden, Dresden, 2012.
- [16] M. de Boni: Untersuchungen zur Elektrodennacharbeit an unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffen sowie Feinblechbeschichtungen beim Widerstandspunktschweißen. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2009.
- [17] U. Dilthey: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: *Schweiß- und Schneidtechnologien*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [18] H. J. Fahrenwaldt, V. Schuler und J. Twrdek: Praxiswissen Schweißtechnik: *Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*, 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [19] A. H. Fritz und G. Schulze: Fertigungstechnik, 10. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [20] Beuth Verlag: DIN EN ISO 5821: Resistance welding - Spot welding electrode caps, 2009.
- [21] K.-J. Matthes und E. Richter, Hg. *Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen ; mit 130 Tafeln*, 3. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2006.
- [22] G. Jangg: Verfahren zum Herstellen von dispersionsverfestigten Werkstoffen aus Metall- bzw. Legierungspulver DE2436588 C3, 1975.
- [23] G. Jangg: Dispersionsgehärtete Cu-Werkstoffe und Verfahren zur Herstellung derselben DE2711071 A1 DE19772711071, 1977.
- [24] O. Moll: Herstellung und Bewertung von Nanopartikel-verstärkten Kupfer-Schweißkappen. Diplomarbeit., Technische Universität Clausthal, 2006.
- [25] K. Shimamura, K. Amano, T. Aisaka, S. Hanai und K. Nagata: Dispersionsgehärtete Kupferlegierungen und Verfahren zur Herstellung dieser Legierungen DE6815678 T2, 1995.
- [26] C. Peuker und F. Hauner: Verfahren zum Herstellen von dispersionsgehärtetem Kupfer durch mechanische Legieren DE19532629 C1, 1996.
- [27] L. Dorn, O. P. Gupta, A. De und I.-S. Chang: Vergrößerte Elektrodenstandmenge beim Punktschweißen verzinkter Stahlbleche mittels neuartiger Verbundelektroden in *DVS-Berichte*, Bd. 189, S. 44–48, *Widerstandsschweißen: Eine bewährte Technik für die Zukunft ; Vorträge der gleichnamigen Sondertagung in Duisburg am 7. und 8. Mai 1998*, Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl., 1998.

- [28] T. Horita, M. Oka, T. Kanamaru, K. Yamazaki und T. Fujiwara: Study of nugget formation in spot welding of galvanised steel sheet, *Welding International*, Jg. 10, Nr. 12, S. 937–942, 1996.
- [29] H. Mustafa: Investigation on the welding behaviour of tungsten and molybdenum inserted electrodes during spot welding of electrogalvanised steels. PhD thesis, Technische Universität München, 1982.
- [30] A. De, L. Dorn und O. P. Gupta: Analysis and optimisation of electrode life for conventional and compound tip electrodes during resistance spot welding of electrogalvanised steels, *Science and Technology of Welding and Joining*, Jg. 5, Nr. 1, S. 49–57, 2013.
- [31] W. Schatt, K.-P. Wieters und B. Kieback: Pulvermetallurgie: *Technologien und Werkstoffe*, 1. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2007.
- [32] C. Großmann, J. Zschetzsche, H.-J. Ullrich, S. Jütter, M. Graul und U. Füssel: Methoden zur Diagnose des Elektrodenverschleißes beim Widerstandspunktschweißen in *DVS-Berichte*, Bd. 267, S. 122–127, *DVS Congress: Große Schweißtechnische Tagung*, Düsseldorf: DVS Media, 2010.
- [33] F. Dello: Ermittlung der Elektrodenstandmenge beim Widerstandspunktschweißen beschichteter hochfester Bleche. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage, Dresden, 2008.
- [34] M. Heide: Konzeption einer Elektronikerweiterung für das automatisierte Einprägen von Magnetfeldern für ein zerstörungsfreies Prüfverfahren beim Widerstandspunktschweißen. Oberseminar, Professur Fügetechnik und Montage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2013.
- [35] M. Rahlves, M. Rahlves und J. Seewig: Optisches Messen technischer Oberflächen: *Messprinzipien und Begriffe*, 1. Aufl. s.l.: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- [36] Dynamic Systems Inc.: *2014 Gleeble Solutions Guide: Thermal-Mechanical Simulator Solutions Guide*.
- [37] Beuth Verlag GmbH: DIN EN ISO 5182: Widerstandsschweißen - Werkstoffe für Elektroden und Hilfseinrichtungen; Deutsche Fassung prEN 5182:2014, 13 Feb.
- [38] ASTM E 1004: Standard Practice for Determining Electrical Conductivity Using the Electromagnetic (Eddy-Current) Method, 1999.
- [39] M. Weigel: Berührungslose Wegsensoren im Vergleich, *Sensor Magazin*, Jg. 2008, S. 6–10, 2008.
- [40] H.-J. Gevatter und U. Grünhaupt, Hg. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [41] J. H. Dellinger: The temperature coefficient of resistance of copper, *Bulletin of the Bureau of Standards*, Jg. 7, Nr. 1, S. 72–101, 1911.

- 
- [42] Y. Li, Z. Wei, Y. Li, Q. Shen und Z. Lin: Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Jg. 65, S. 400–408, 2013.
- [43] Y. He: Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor, *Thermo-chimica Acta*, Jg. 436, 1-2, S. 122–129, 2005.
- [44] T. Log und S. E. Gustafsson: Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials, *Fire Mater.*, Jg. 19, Nr. 1, S. 43–49, 1995.
- [45] Beuth Verlag: DIN EN ISO 22007-2: Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit -.
- [46] Hot Disk AB 2004: *Hot Disk Application note Nr. 5: Measurements on Highly Conductive Alloys (Copper and Copper + Zink Alloy) and commercial PMMA*. [Online] Verfügbar unter: [http://www.hotdiskinstruments.com/images/stories/pdf/Nr\\_5\\_Application\\_note\\_-\\_METALS\\_A4.PDF](http://www.hotdiskinstruments.com/images/stories/pdf/Nr_5_Application_note_-_METALS_A4.PDF). Zugriff am: Jul. 10 2015.
- [47] E. A. Brandes, G. B. Brook und C. J. Smithells: Smithells metals reference book, 7. Aufl. Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [48] Lars Kristensen: Projection welding of complex geometries. Lyngby, Denmark, 2000.
- [49] Beuth Verlag GmbH: DIN 50106: Druckversuch bei Raumtemperatur, 2016-03-00.
- [50] B. Roebuck, J. D. Lord, M. Brooks, M. S. Loveday, C. M. Sellars, R. W. Evans: Measuring Flow Stress in Hot Axisymmetric Compression Tests, 2002.
- [51] J. D. Lord und M. S. Loveday: Tools and Lubricants for High Temperature Metalworking Laboratory-Scale Tests, *Centre for Materials Measurement and Technology, National Physical Laboratory, Queens Road, Teddington, Middlesex, UK TW110LW, CMMT (MN)*, Jg. 50, 2001.
- [52] B. Roebuck, J. D. Lord, M. Brooks, M. S. Loveday, C. M. Sellars und R. W. Evans: Measurement of flow stress in hot axisymmetric compression tests, *Materials at High Temperatures*, Jg. 23, Nr. 2, S. 59–83, 2014.
- [53] C. J. Bennett, S. B. Leen, E. J. Williams, P. H. Shipway und T. H. Hyde: A critical analysis of plastic flow behaviour in axisymmetric isothermal and Gleeble compression testing, *Computational Materials Science*, Jg. 50, Nr. 1, S. 125–137, 2010.
- [54] G.-f. XU, X.-y. PENG, X.-p. LIANG, X. LI und Z.-m. YIN: Constitutive relationship for high temperature deformation of Al-3Cu-0.5Sc alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Jg. 23, Nr. 6, S. 1549–1555, 2013.
- [55] R. Ebrahimi und A. Najafzadeh: A new method for evaluation of friction in bulk metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Jg. 152, Nr. 2, S. 136–143, 2004.

- 
- [56] O. Sherepenko, S. Jüttner, U. Betke, C. Mathiszik, J. Zschetzsche und U. Füssel: Partikelverstärkte Kupferlegierungen: Physikalische Eigenschaften und Einsatzpotential als Elektrodenkappenwerkstoffe zum Widerstandsschweißen in *Widerstandsschweißen Sondertagung in Duisburg*, S. 151–158, 2016.
- [57] Deutsches Kupferinstitut, Hg. Recommended machining parameteres for copper and copper alloys: DKI Monograph I.18, 2010.
- [58] J. R. Davis, Hg. *Copper and copper alloys*, 1. Aufl. Materials Park, Ohio: ASM International, 2001.
- [59] E. Paucksch, S. Holsten, M. Linß und F. Tikal: Zerspantechnik: *Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen*, 12. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [60] Beuth Verlag: DIN 8589-3: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 3: Fräsen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, September 2003.
- [61] Beuth Verlag: DIN 8589-2: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2: Bohren, Senken, Reiben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, September 2003.
- [62] C. Otto: Fräsbarkeitsuntersuchungen von Elektrodenkappen zum Widerstandspunktschweißen. Großer Beleg, Professur für Fügetechnik und Montage, Technische Universität Dresden, 2016.
- [63] U. Heisel: Handbuch Spanen, 2. Aufl. München: Hanser, 2014.
- [64] J. Maldaner: Verbesserung des Zerspanverhaltens von Werkzeugen mit Hartmetall-Schneidelementen durch Variation der Schleifbearbeitung. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2008. Kassel: Kassel Univ. Press, 2008.
- [65] Spotwelding Consultants NC., Hg. GLIDCOP Dispersion Strengthened Copper. [Online] Verfügbar unter: [http://www.spotweldingconsultants.com/GlidCop\\_AL\\_60.pdf](http://www.spotweldingconsultants.com/GlidCop_AL_60.pdf). Zugriff am: Dez. 13 2017.
- [66] Verlag Stahleisen: SEP 1220-2: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die Fügeeignung von Feinblechen aus Stahl - Teil 2: Widerstandspunktschweißen, August 2011.
- [67] Beuth Verlag: DIN EN ISO 10447: Widerstandsschweißen – Prüfung von Schweißverbindungen – Schäl- und Meißelprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen, Mai 2015.
- [68] E. C. Klages: Beurteilung der Beanspruchung von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen von höher- und hochfestem Stahl, Hannover, 2014.
- [69] Elektro-Automatik GmbH & Co. KG: Bedienungsanleitung Labornetzgerät Serie PSI 8000 DT. Datenblatt, Viersen, Mrz. 2009.
- [70] DVS Media: Merkblatt DVS 2929-3: Messung des Übergangswiderstandes – Anwendung bei Stählen, April 2010.

- [71] M.-M. Ketzler: Integration einer Übergangswiderstandsmesseinrichtung in Widerstandsschweißanlagen. Diplomarbeit, Professur Füge-technik und Montage, Technische Universität Dresden, 2015.
- [72] S. Längericht: Bewertung des Elektrodenverschleißes durch Datenanalyse. Diplomarbeit, Professur Füge-technik und Montage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2017.
- [73] T. Schilde: Bewerten der Verschleißzustände von Elektrodenkappen beim Widerstandspunktschweißen. Großer Beleg, Professur Füge-technik und Montage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2017.
- [74] DVS Media: Merkblatt DVS 2916-4: Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen - Metallografische Prüfung, Dezember 2006.
- [75] DVS Media: Merkblatt DVS 2690: Unregelmäßigkeiten bei Widerstandspunktschweißverbindungen an Stahlwerkstoffen, August 2015.
- [76] Beuth Verlag: DIN EN ISO 6507: Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren, 2006.
- [77] X. Q. Zhang, G. L. Chen und Y. S. Zhang: Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels, *Materials & Design*, Jg. 29, Nr. 1, S. 279–283, 2008.
- [78] X. Q. Zhang, G. L. Chen und Y. S. Zhang: On-line evaluation of electrode wear by servo gun in resistance spot welding, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 36, 7-8, S. 681–688, 2008.
- [79] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song und Y. Liu: Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel, *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 83, 9-12, S. 1917–1926, 2016.
- [80] DVS Media: DVS Merkblatt 2960: Unregelmäßigkeiten bei Widerstandspunktschweißverbindungen an Stahlwerkstoffen, 2015.
- [81] H. Matsuda, Y. Matsuda und M. Kabasawa: Study of electrode wear mechanism in consecutive spot welding: Spot weldability of Zn-Ni electrogalvanised steel sheet and organic-silicate composite steel sheet (1st Report), *Welding International*, Jg. 11, Nr. 11, S. 860–867, 1997.
- [82] C. Röhr: *Vorlesung Intermetallische Phasen: 4.4 Beispiele: Messing, Bronze*. [Online] Verfügbar unter: [http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif\\_bilder/Intermetallische/cu\\_zn.png](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/Gif_bilder/Intermetallische/cu_zn.png). Zugriff am: Jan. 15 2018.
- [83] V. Läßle: Einführung in die Festigkeitslehre: *Lehr- und Übungsbuch*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

- 
- [84] D. Köberlin, C. Mathiszik, O. Sherepenko, J. Zschetzsche, S. Jüttner und U. Füssel: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe in *DVS Congress 2017: Große Schweißtechnische Tagung : DVS-Studentenkongress : Vorträge der Veranstaltungen in Düsseldorf vom 26. bis 29. September 2017*, S. 350–355, 2017.
- [85] D. Köberlin, C. Mathiszik, O. Sherepenko, J. Zschetzsche, S. Jüttner und U. Füssel: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe in *DVS Berichte*, Bd. 342, 38. Assistentenseminar Fügetechnik: *DVS Berichte*, Band: 342, DVS Media GmbH, Hg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2018.
- [86] T. Gröger: Fräsbarkeitsuntersuchungen von Elektrodenkappen zum Widerstandspunktschweißen. Diplomarbeit, Professur für Fügetechnik und Montage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [87] P. Präkelt: Durchführen von Standmengen- und Verschleißuntersuchungen beim Widerstandspunktschweißen mit unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffen. Großer Beleg, Professur für Fügetechnik und Montage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [88] M. Erdmann: Datenanalyse beim Widerstandspunktschweißen. Forschungsseminar, Professur Fügetechnik und Montage, Technische Universität Dresden, Dresden, 2017.
- [89] V. Schreiber und C. Maaß: Beurteilung der Verschleißprozesse von Elektrodenkappen aus schmelzmetallurgisch und pulvermetallurgisch hergestellten Kupferlegierungen beim Widerstandspunktschweißen von zinkbeschichteten Blechen. Masterprojektarbeit, IWF, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2017.
- [90] H. Zapf: Bestimmung mechanischer und elektrischer Eigenschaften neuartiger Elektrodenkappenwerkstoffe auf Kupferbasis. Masterarbeit, Institut für Werkstoff- und Fügetechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2016.

## 18 **Anhang**

## Anhang A Zerspanbarkeit der Elektrodenwerkstoffe, Ergebnisse

### Anhang A.1 Gemittelte Rautiefen der Elektrodenkappen

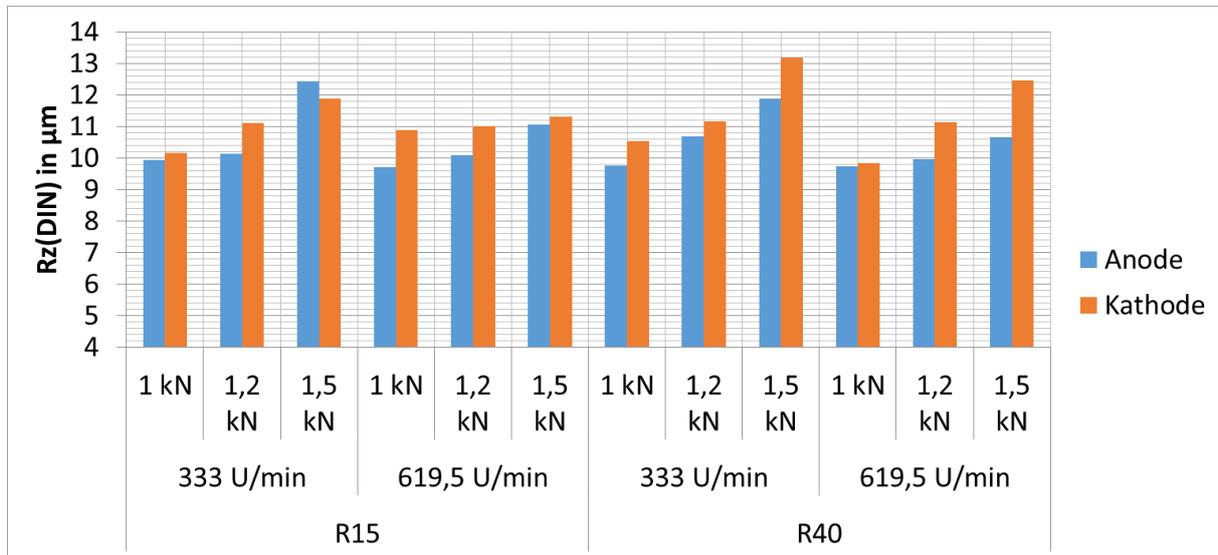


Abbildung 113: Gemittelte Rautiefe der e2 unter Einfluss verschiedener Zerspanparameter

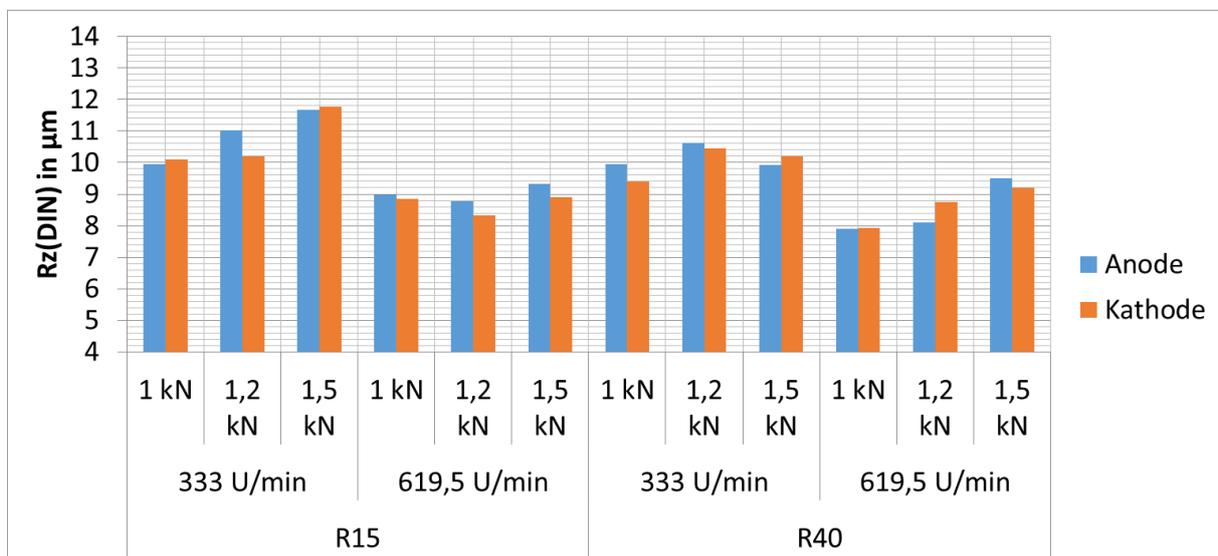


Abbildung 114: Gemittelte Rautiefe der e3 unter Einfluss verschiedener Zerspanparameter

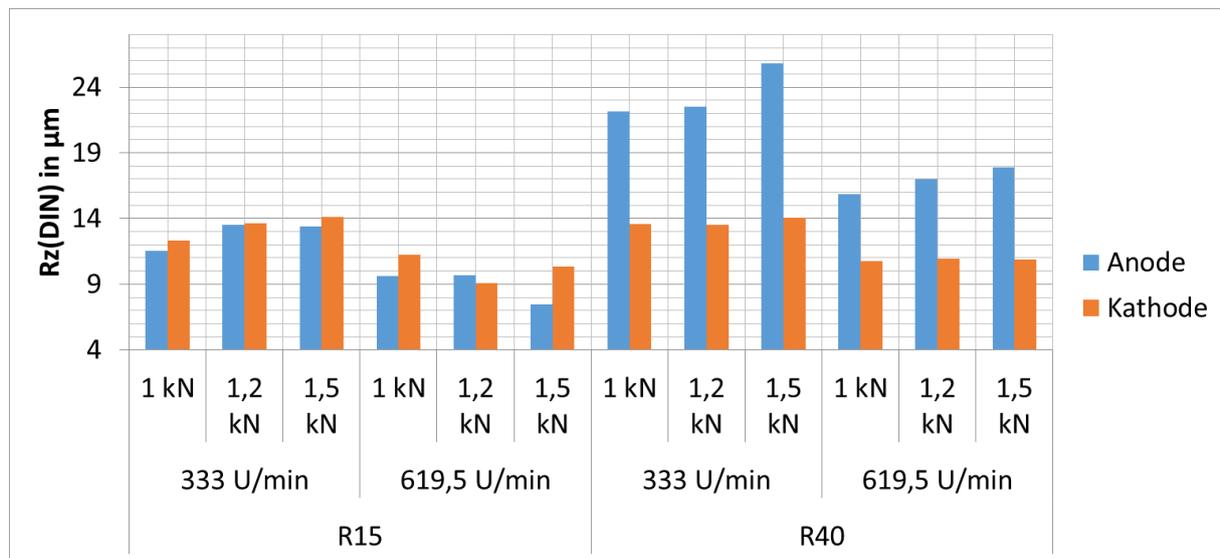


Abbildung 115: Gemittelte Rautiefe der e4 unter Einfluss verschiedener Zerspanparameter

## Anhang B Taktzeiten der Schweißversuche

Tabelle 34: Taktzeiten der Schweißversuche (Median), nicht berücksichtigt sind die Messzeiten der Topographiemessungen

Versuchsreihe	Stufe	Elektrodenwerkstoff			
		e1	e2	e3	e4
		Taktzeit in s	Taktzeit in s	Taktzeit in s	Taktzeit in s
VR01	1	3	4,44	4,44	4,44
	2	3	4,44	4,44	4,44
	3	3	4,44	4,44	4,44
	4	3	4,44	4,44	4,44
	5	3	4,47	4,44	4,44
VR02	1	3	3	3	3
	2	3	3	3	3
	3	3	3	3	3
	4	3	3	5	3
	5	4	5	4	3
VR03	5	4,49	4,85	4,25	4,28
VR04	1	5,16	5,16	5,16	5,14
	3	5,14	5,14	5,14	5,14
	5	5,14	5,14	5,14	5,14

## Anhang C Forschungsergebnisse

### Anhang C.1 Modell t-e

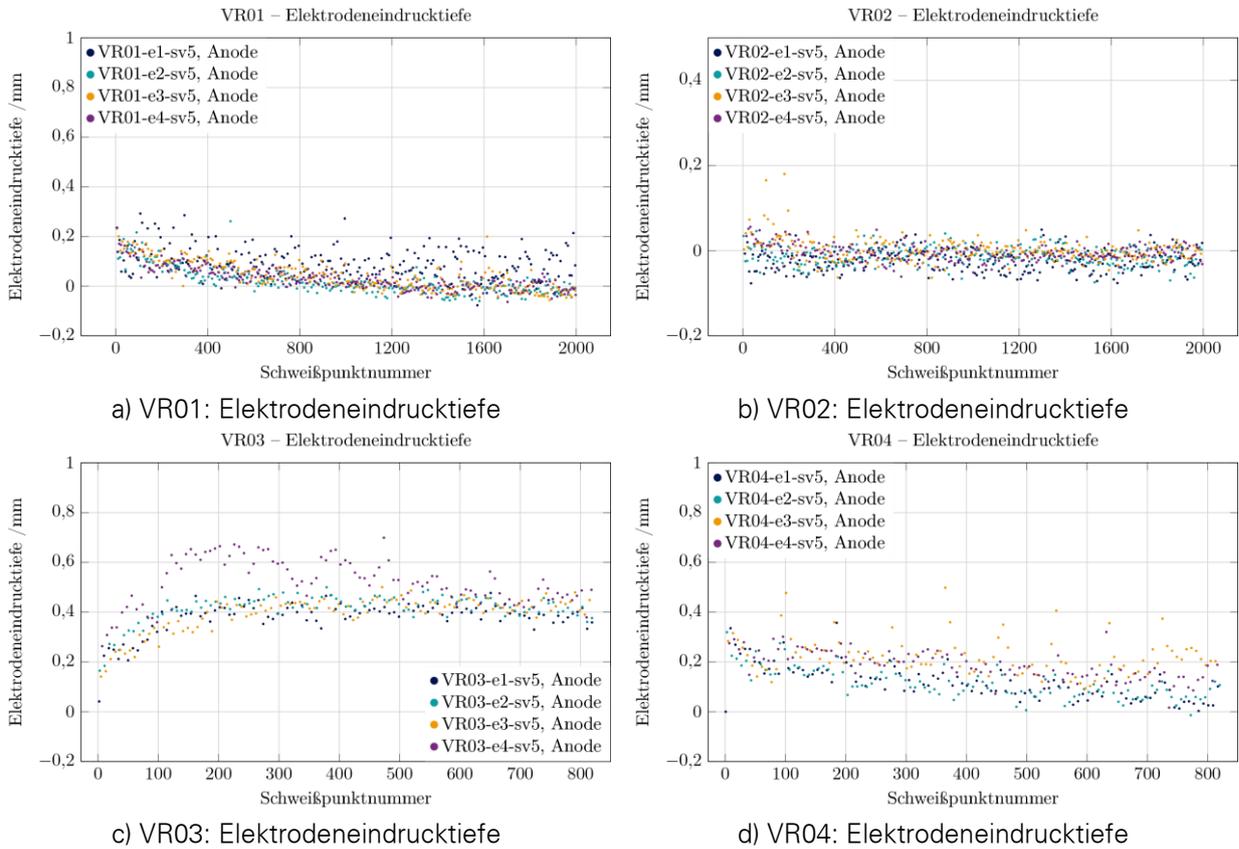


Abbildung 116: anodenseitige Elektroden eindringtiefen der Versuchsreihen von Stufenversuch 5

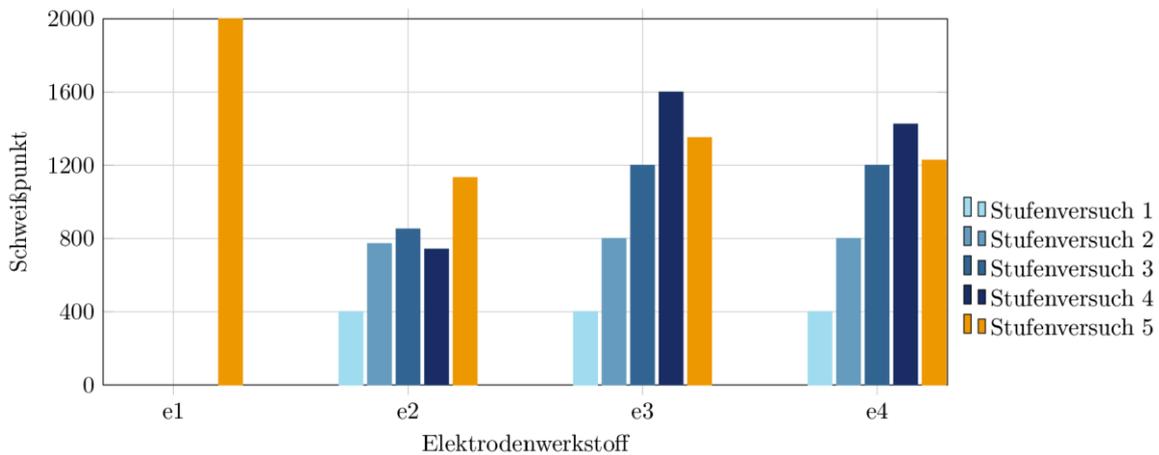


Abbildung 117: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01

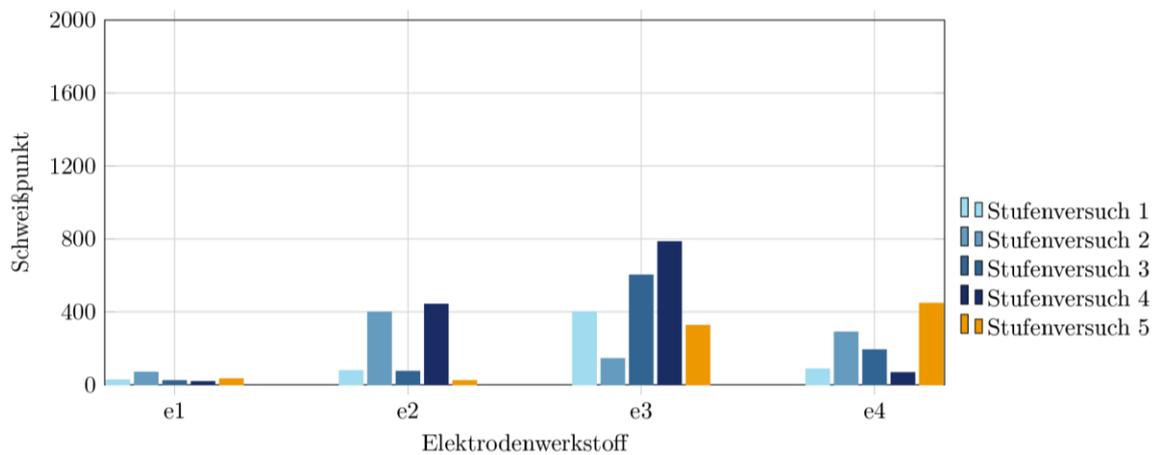


Abbildung 118: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02

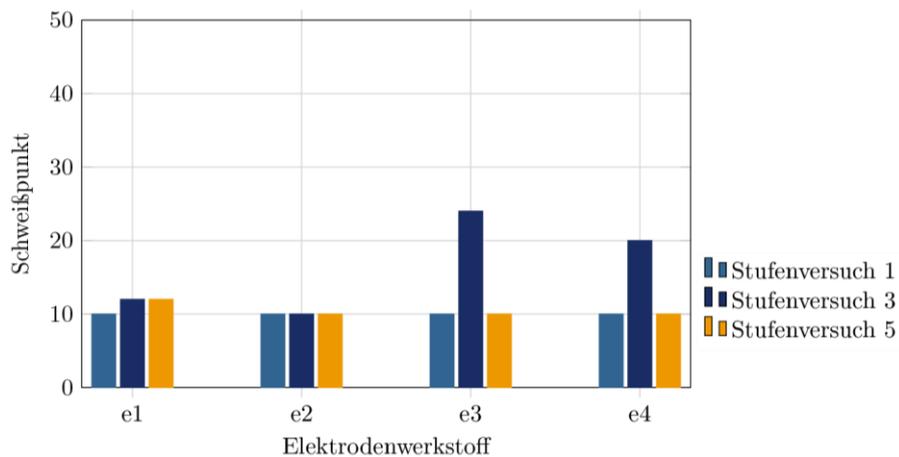


Abbildung 119: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03

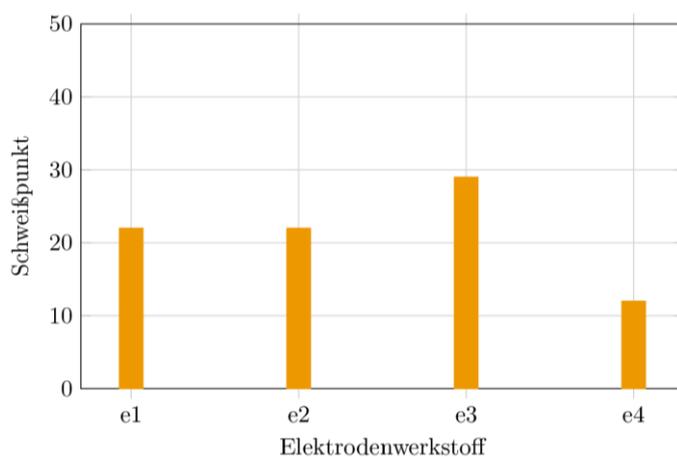


Abbildung 120: Modell t-e: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04

## Anhang C.2 Modell rho

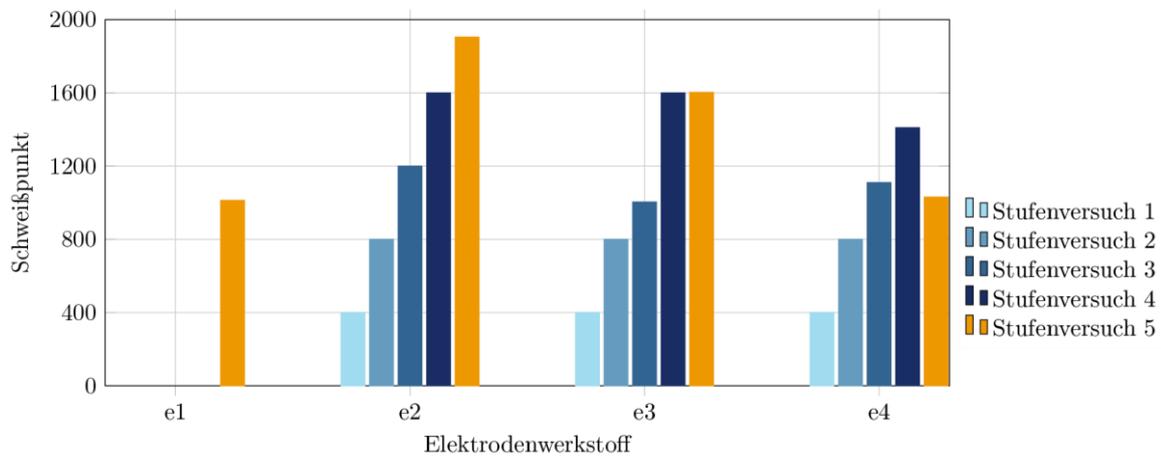


Abbildung 121: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01

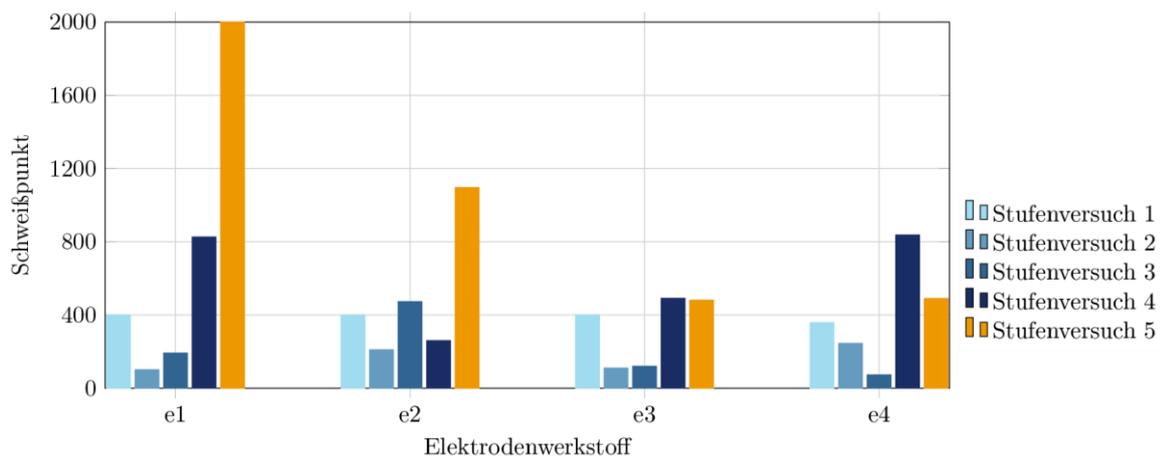


Abbildung 122: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02

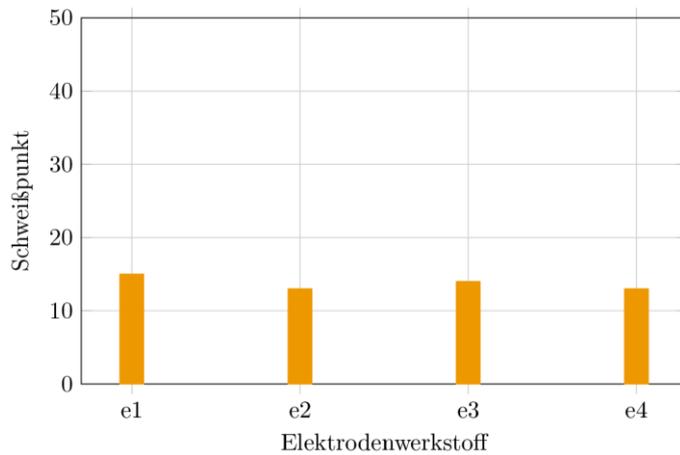


Abbildung 123: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03

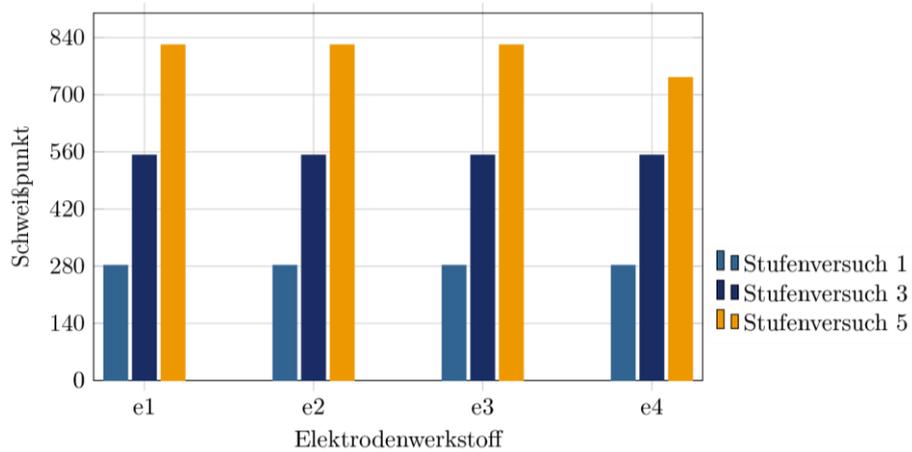


Abbildung 124: Modell rho: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04

### Anhang C.3 Modell Q

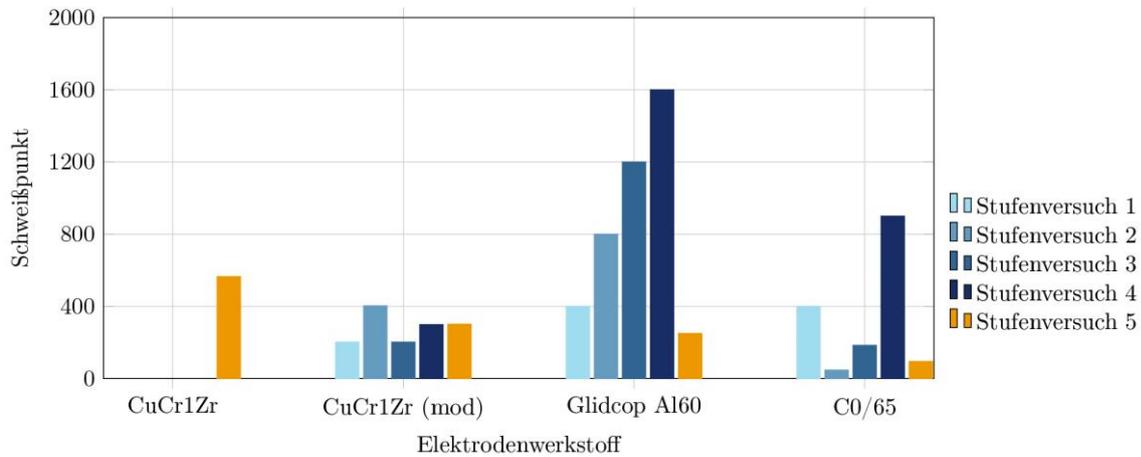


Abbildung 125: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01

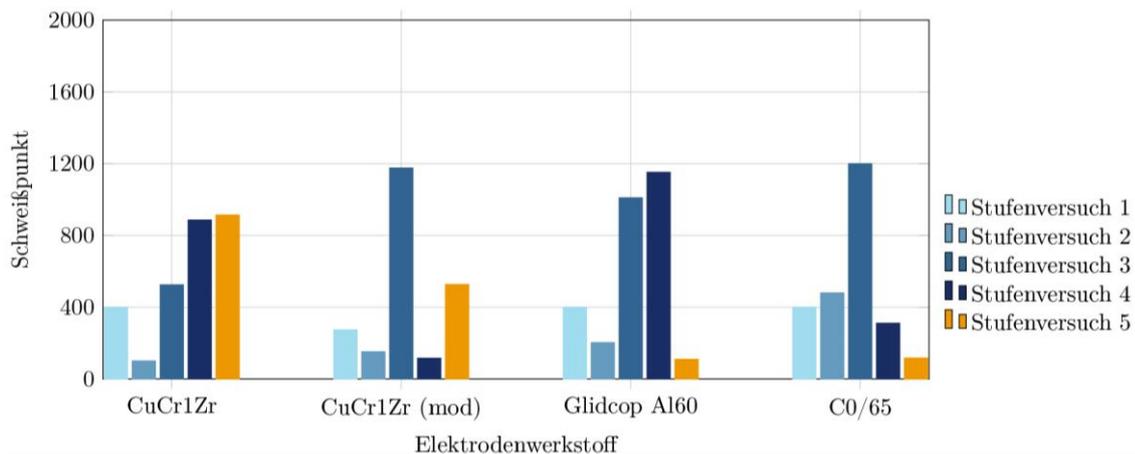


Abbildung 126: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02

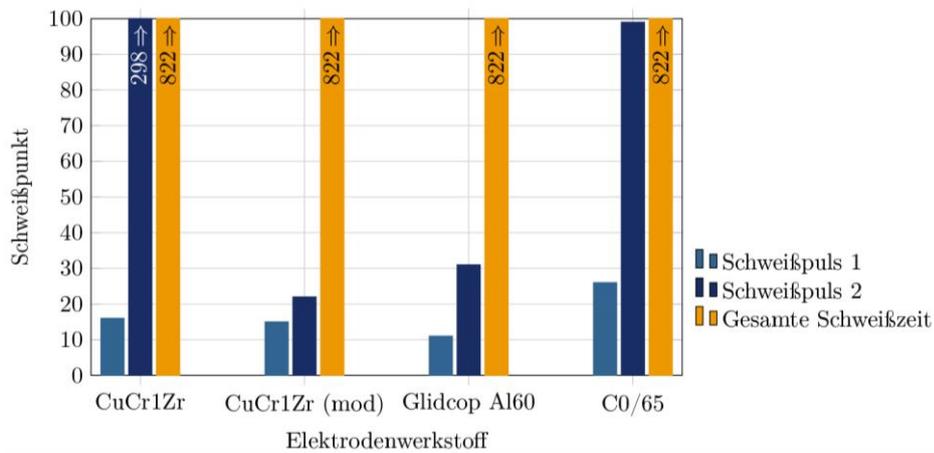


Abbildung 127: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03

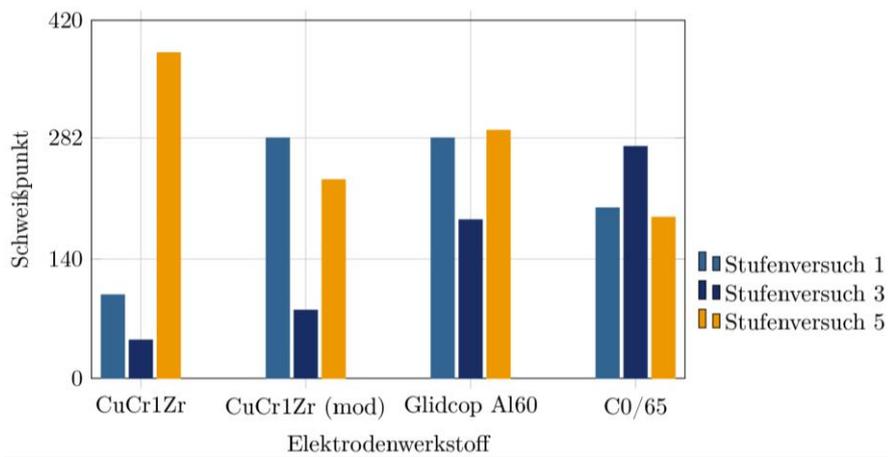


Abbildung 128: Modell Q: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04

### Anhang C.4 Modell Q-Punkt

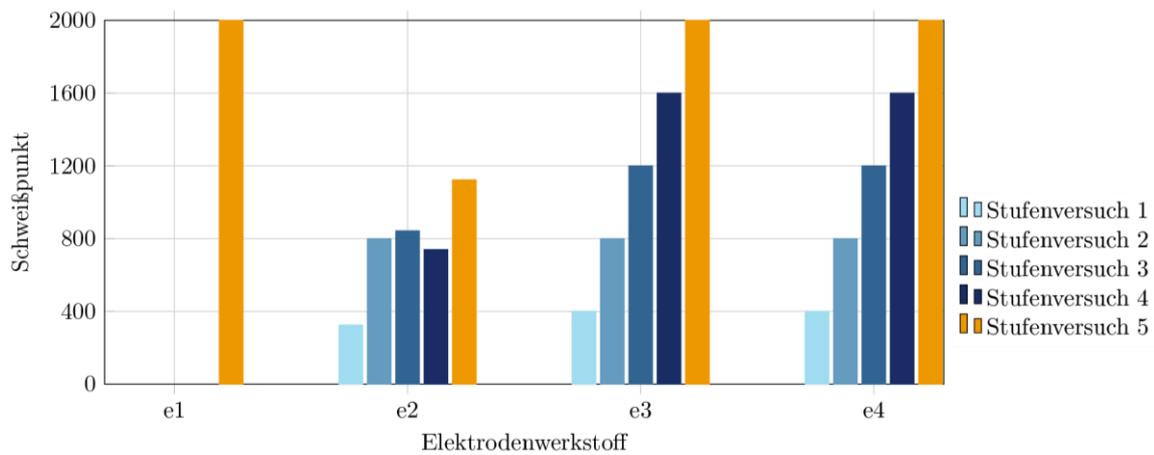


Abbildung 129: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR01

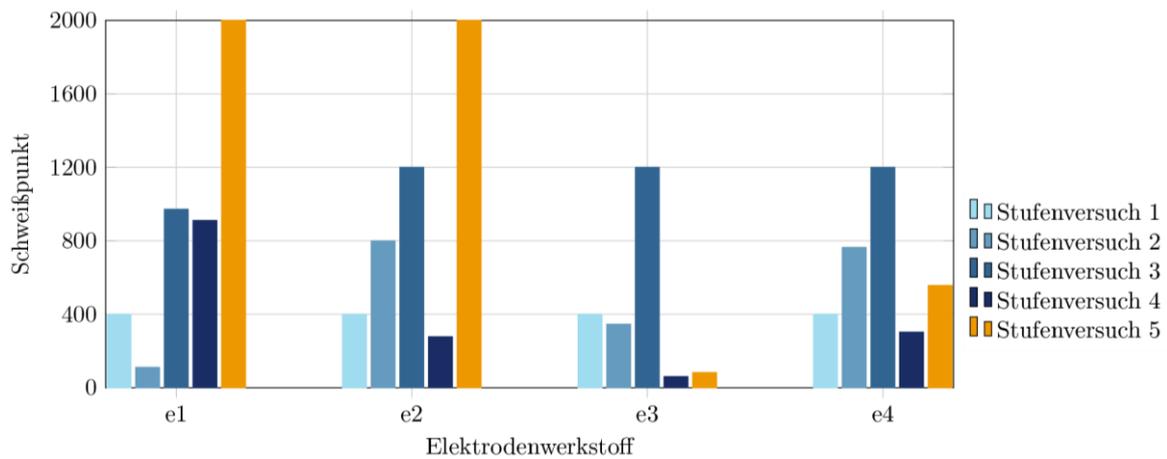


Abbildung 130: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR02

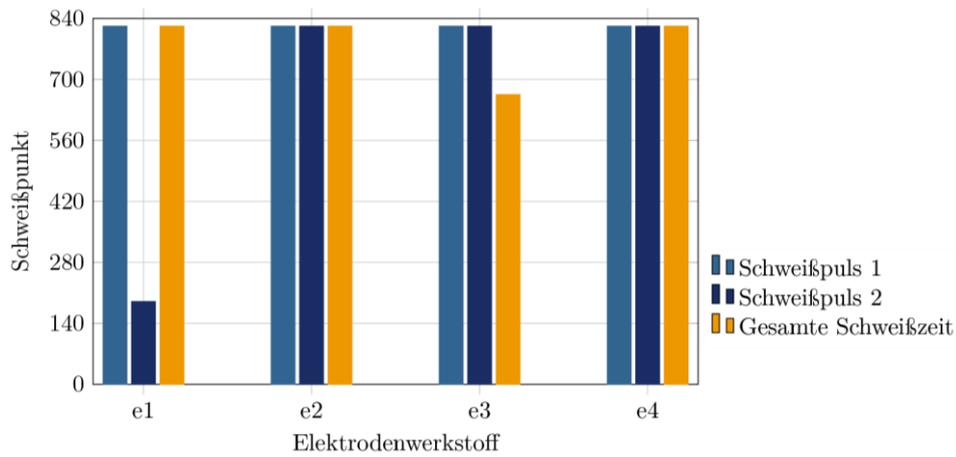


Abbildung 131: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR03

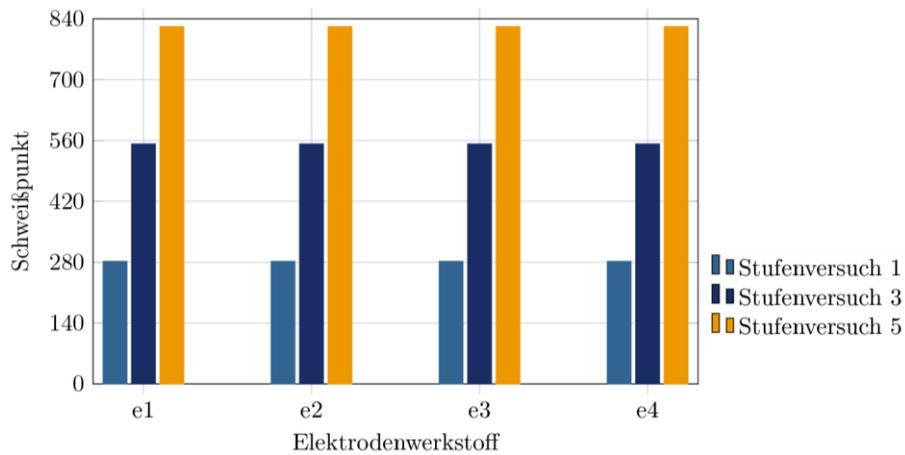


Abbildung 132: Modell Q-Punkt: ermittelte Zeitpunkte zum Nachbearbeiten der Elektrodenarbeitsfläche für VR04

## Anhang C.5 Programm zur Steuerung der Gleeble 3500

#	L	Time	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Comment
1		System	Setup	Limits: Compression=-3.5mm, Force=50000kgf, Heat=50%		
2		Stress/Strain	Diametral strain using CGauge, d = 10.01mm			
3		Acquire	CGauge Force Force.line PowAngle PRam PTemp Strain Stress Stress.line Stroke TC2			
4		*				
5		*				
6		*				
7		Start	<input checked="" type="checkbox"/> Mechanical	<input checked="" type="checkbox"/> High	<input checked="" type="checkbox"/> Thermal	
8		Mode	Force(kN) ▾	Torsion(rev) ▾	TC2(C) ▾	
9		Sample	1000.0Hz			
10		00:01.0000	-1.0	0	0	
11		Zero	CGauge Stroke			
12		00:01.0000	-1.0	0	0	
13		01:40.0000	-1.0	0	500	
14		00:10.0000	-1.0	0	500	
15		Zero	CGauge Stroke			
16		00:00.1000	-1.0	0	500	
17		GSL>	sync			
18		Mode	Stroke(mm) ▾	Torsion(rev) ▾	TC2(C) ▾	
19		00:00.1000	0.00	0	500	
20		Zero	Force			
21		00:05.2244	-7.50	0	500	
22		00:00.0010	-7.50	0	0	
23		Mode	Force(kN) ▾	Torsion(rev) ▾	TC2(C) ▾	
24		00:50.0000	-1.0	0	0	
25		GSL>	sync			
26		01:00.0000	-1.0	0	0	
27		End	<input type="checkbox"/> Mechanical	<input type="checkbox"/> High	<input type="checkbox"/> Thermal	

Abbildung 133: Beispiel eines Programms zur Durchführung der Druckversuche mittels Gleeble 3500. Zieltemperatur 500°C

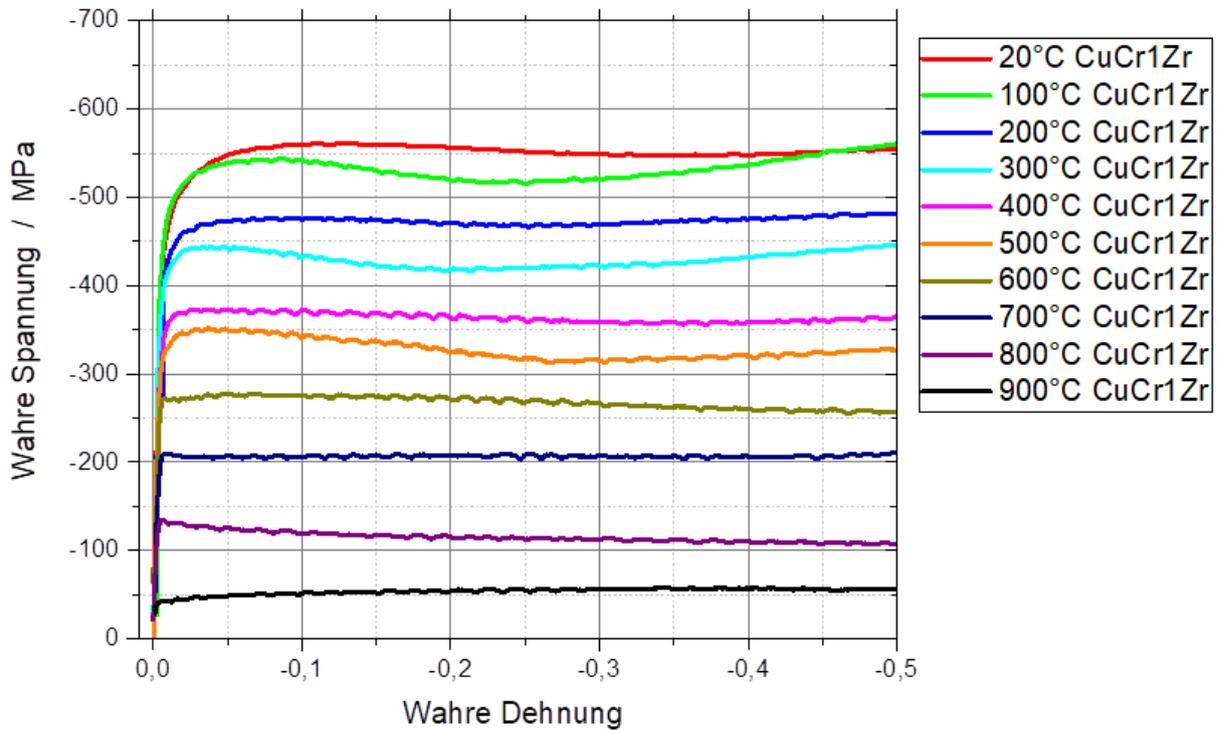
**Anhang C.6 Fließkurven der 4 Versuchswerkstoffe**

Abbildung 134: Temperaturabhängige Fließkurven von CuCr1Zr (e1)

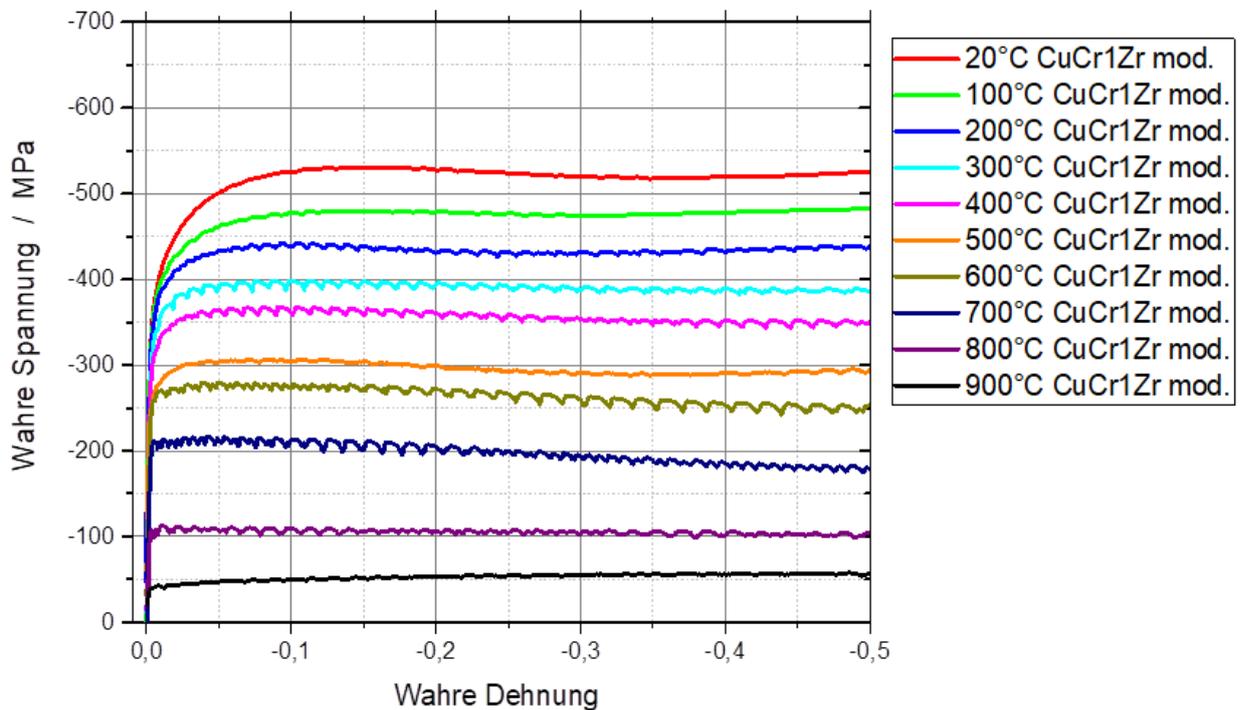


Abbildung 135: Temperaturabhängige Fließkurven von CuCr1Zr, mod. (e2)

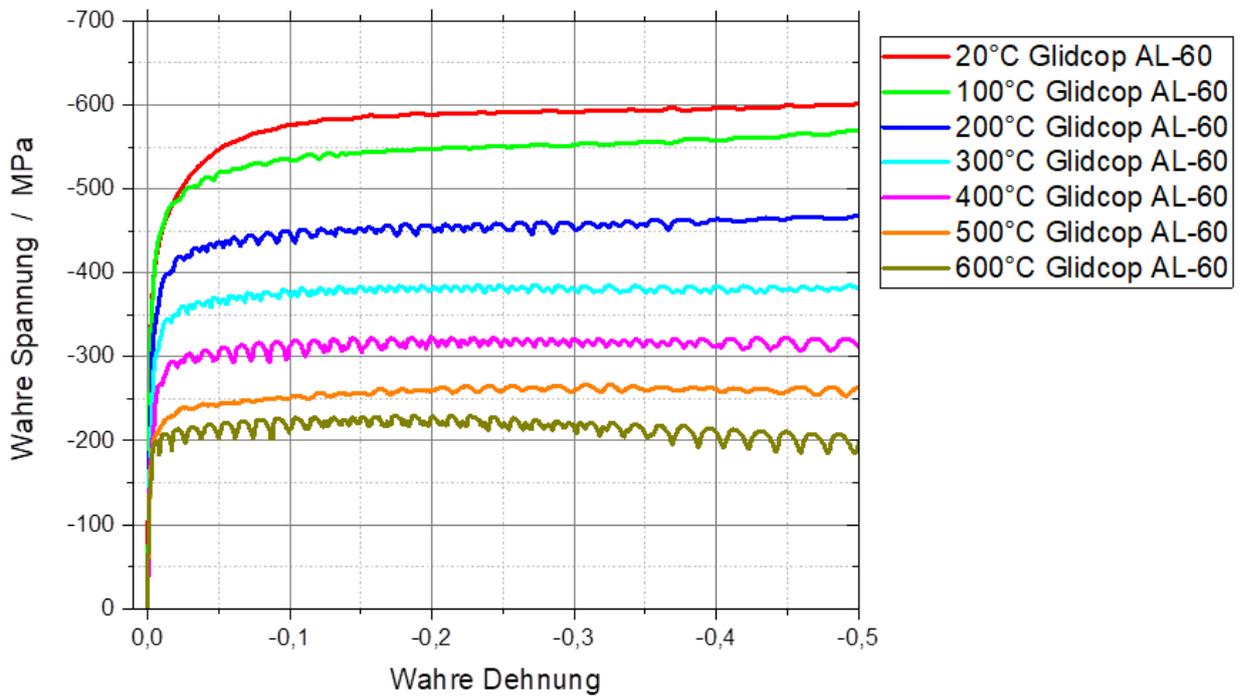


Abbildung 136: Temperaturabhängige Fließkurven von Glidcop AL-60 (e3)

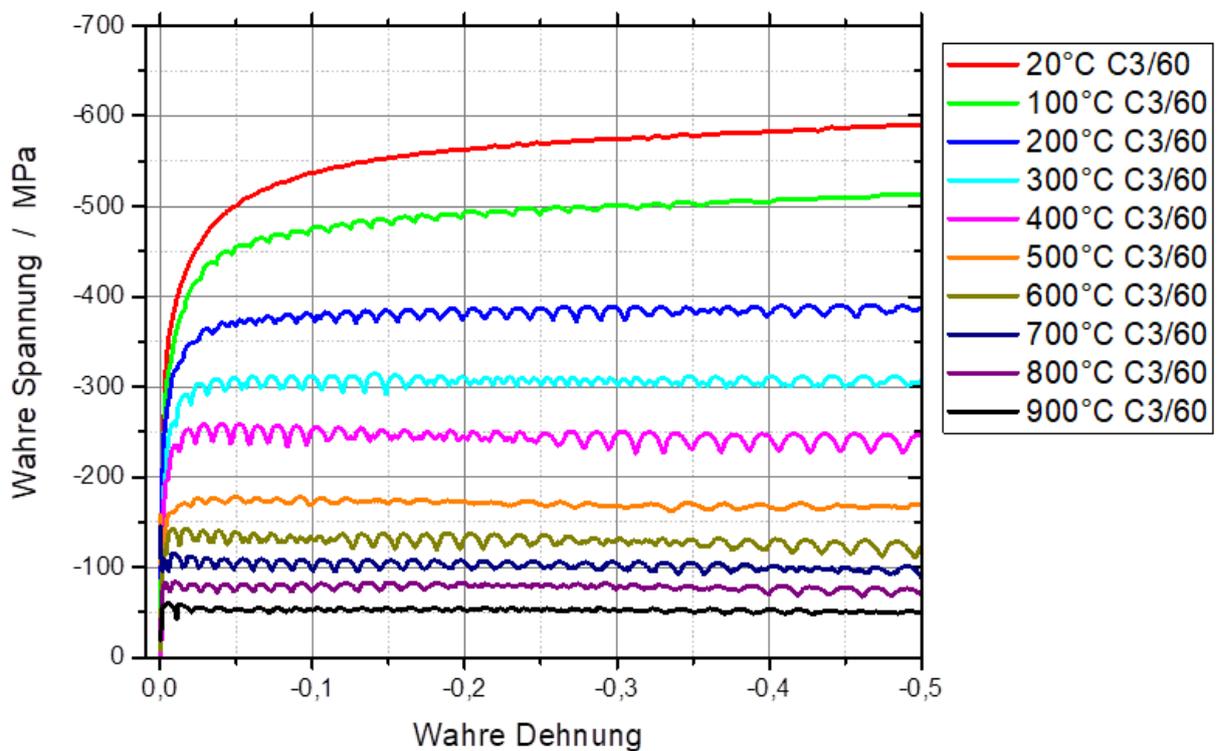


Abbildung 137: Temperaturabhängige Fließkurven von Discup C3/60 (e4)

### Anhang C.7 Proben nach dem Druckversuch

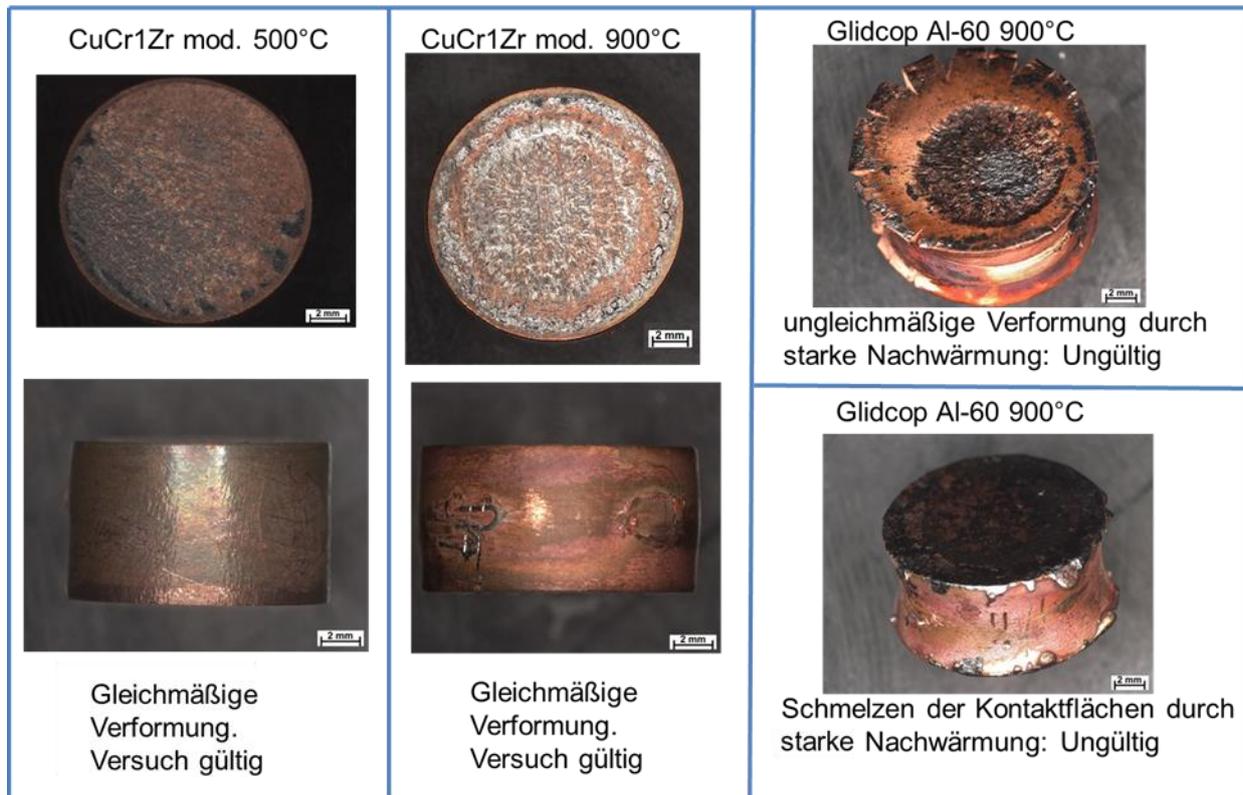


Abbildung 138: Proben nach dem Druckversuch: links e1 T=500°C; Mitte e1 T=900°C; rechts e3 T=900°C

## Anhang C.8 Finite-Elementen Simulation

**SORPAS**® SORPAS (R) Version 12.80 Enterprise Edition  
(C)1995-2017 by SWANTEC Software and Engineering ApS. All rights reserved.

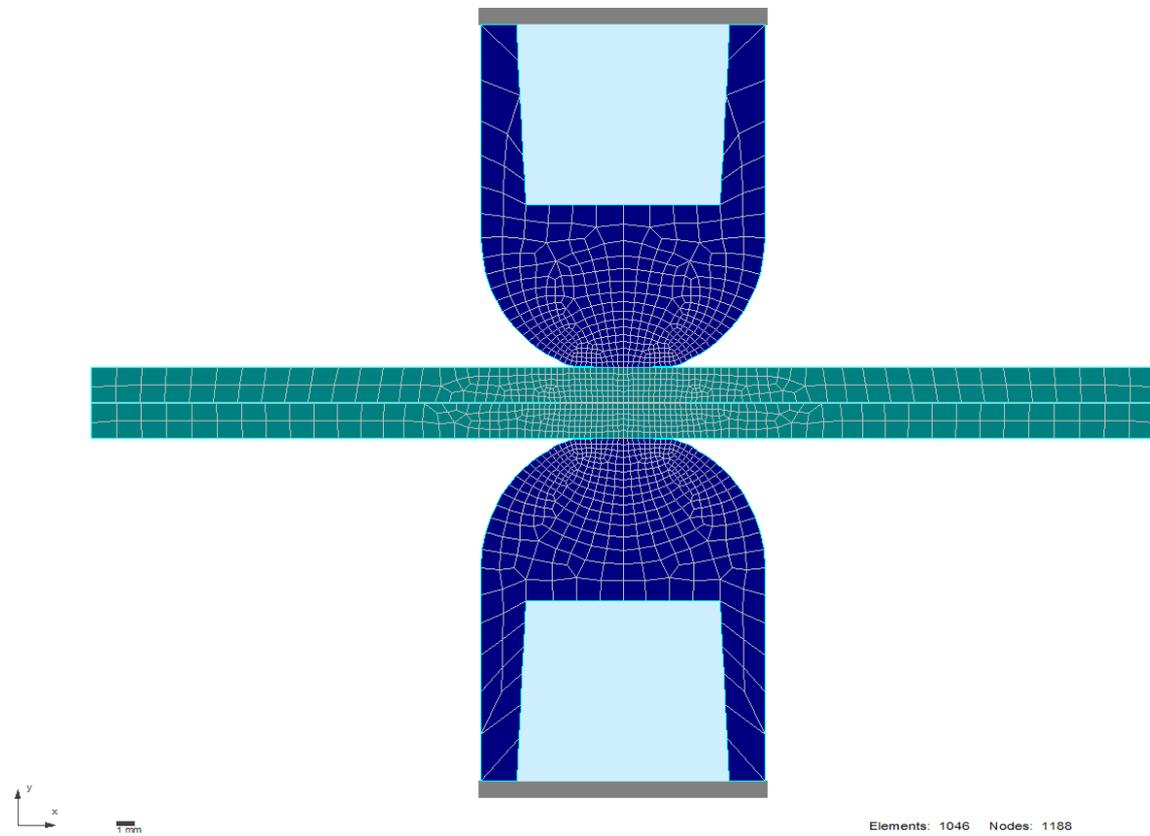


Abbildung 139: Abbildung eines Modells in SORPAS 2D mit FE-Netz.

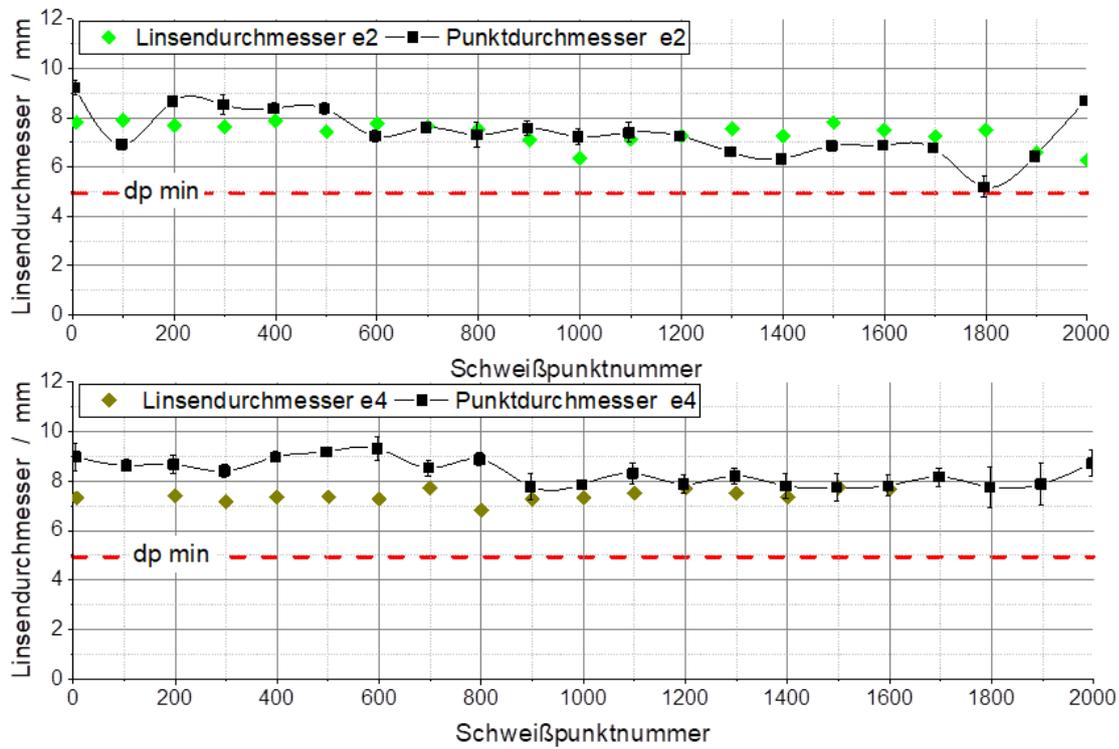
**Anhang C.9 Ergebnisse der Standmengenuntersuchungen VR01**

Abbildung 140 : VR01 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunkt-  
nummer mit zusätzlich dargestellten prozentuellen Porenanteil: oben für  
Elektrodenkappen aus CuCr1Zr, mod. (e2); unten für C0/65 (e4)

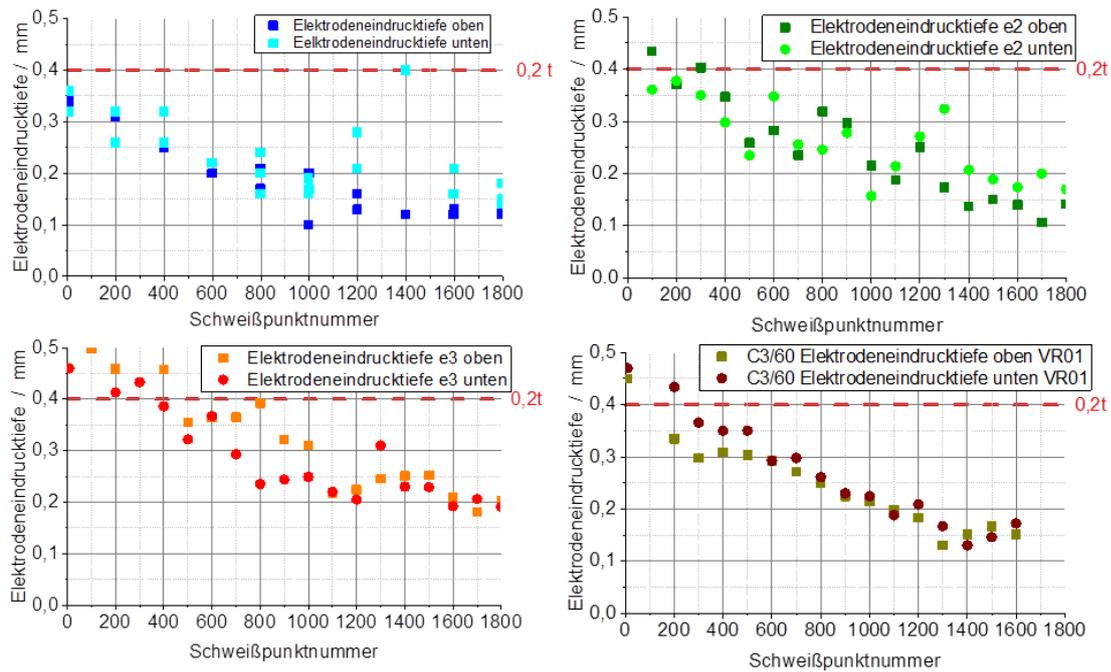


Abbildung 141: VR01 Abhängigkeit der Elektrodeneindringtiefe von der Schweißpunkt-  
nummer: oben links – für e1; oben rechts – für e2; unten links – für e3; unten rechts –  
für e4.

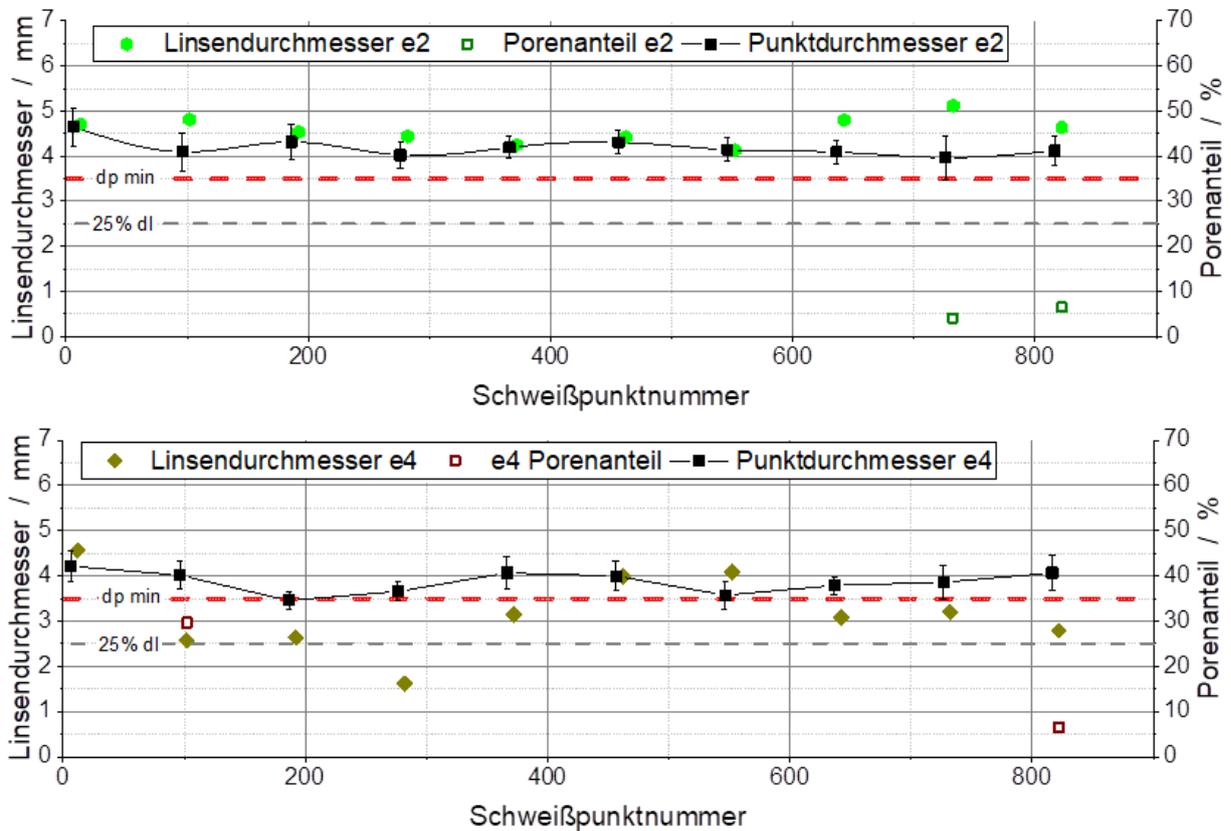
**Anhang C.10 Ergebnisse der Standmengenuntersuchungen VR03**

Abbildung 142: VR03 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer mit zusätzlich dargestellten prozentuellen Porenanteil: oben für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr, mod. (e2); unten für C0/65 (e4)

### Anhang C.11 Ergebnisse der Standmengenuntersuchungen VR04

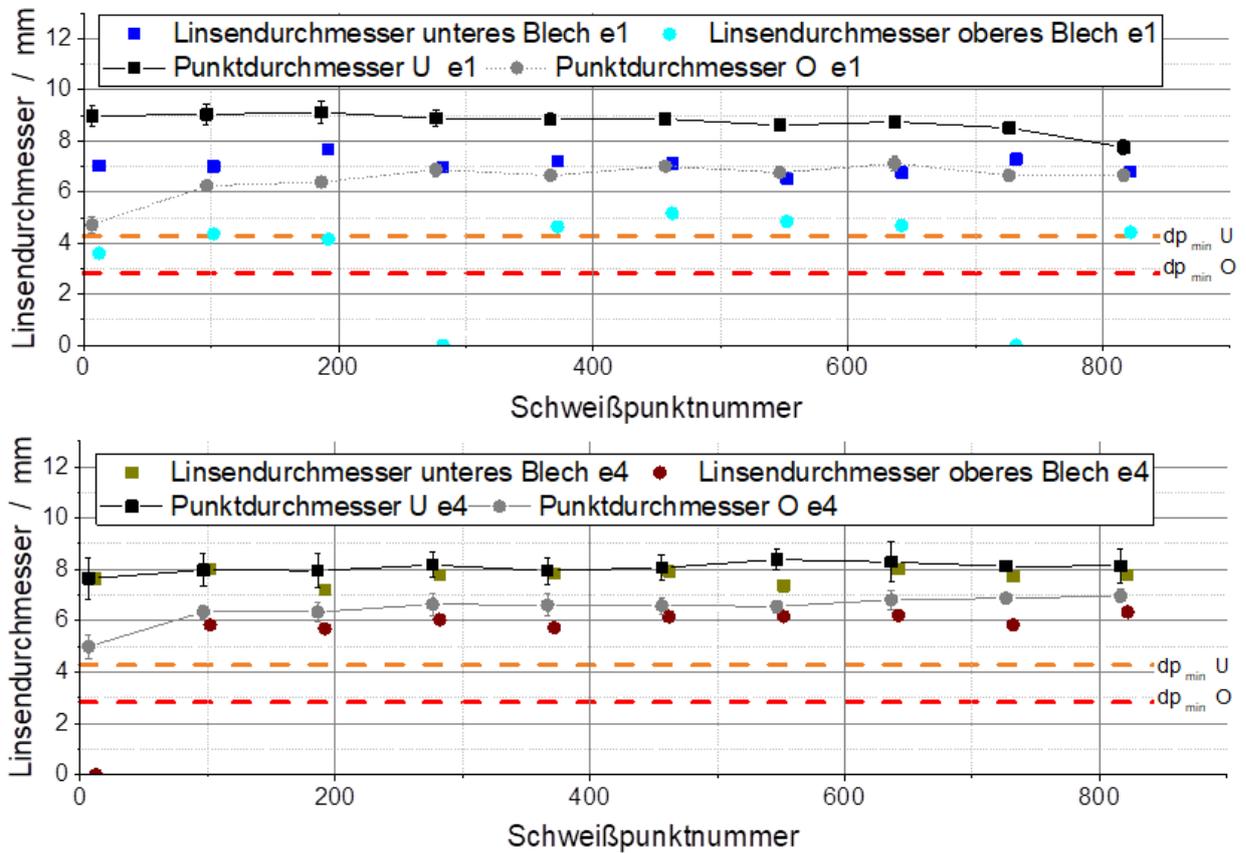


Abbildung 143: VR03 Abhängigkeit des Linsendurchmessers von der Schweißpunktnummer: oben für Elektrodenkappen aus CuCr1Zr (e1); unten für C0/65 (e4)

## Anhang C.12 Härteverluste der Elektrodenkappen

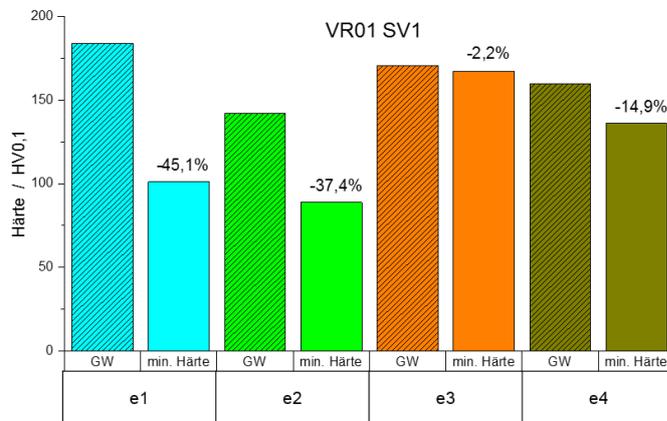


Abbildung 144: VR01-sv1: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

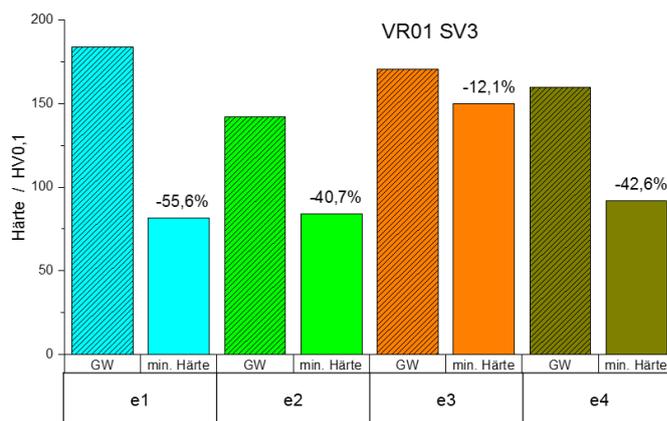


Abbildung 145: VR01-sv3: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

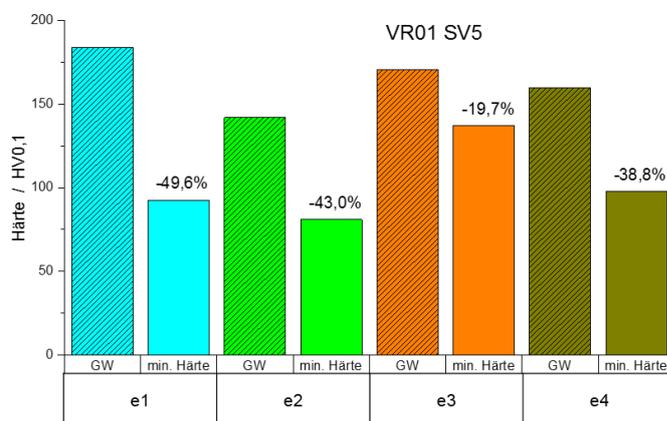


Abbildung 146: VR01-sv5: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

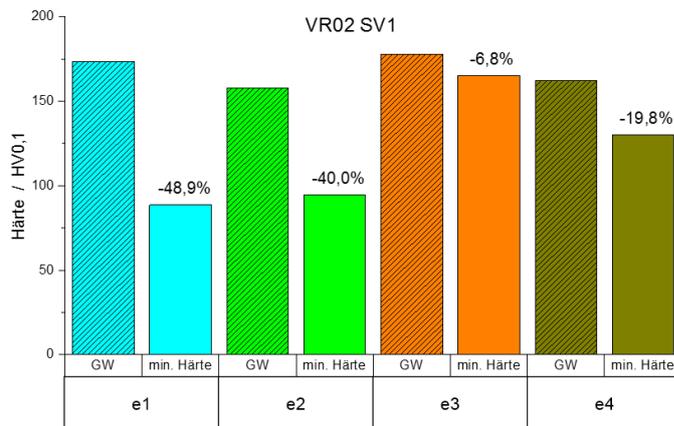


Abbildung 147: VR02-sv1: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

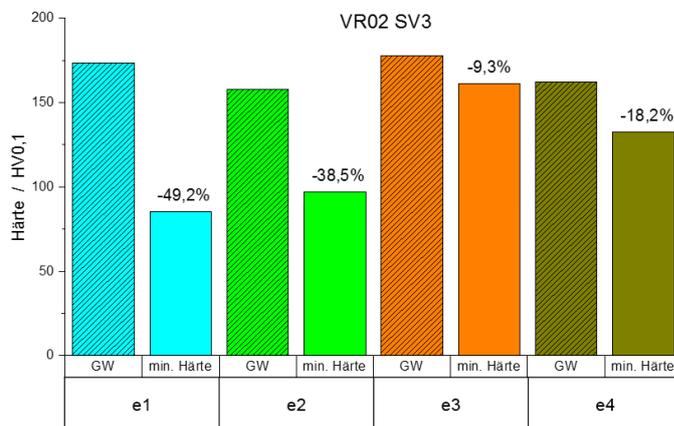


Abbildung 148: VR02-sv3: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

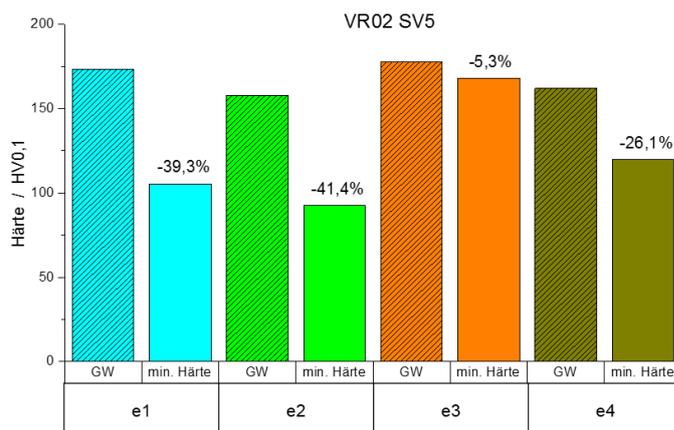


Abbildung 149: VR02-sv5: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

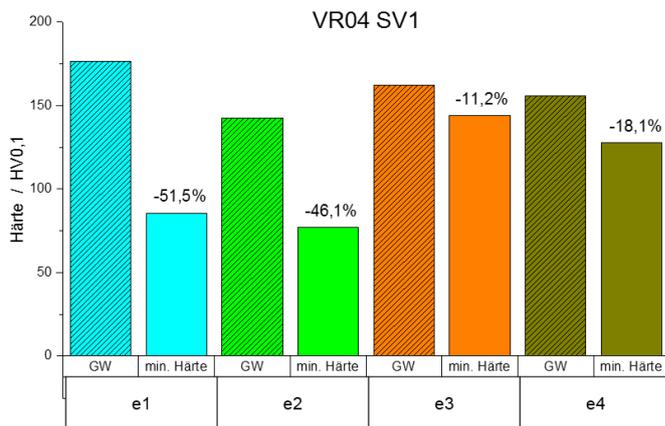


Abbildung 150: VR04-sv1: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

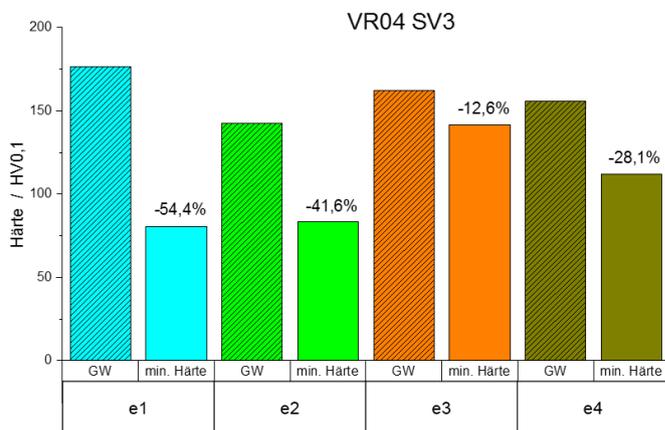


Abbildung 151: VR04-sv3: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

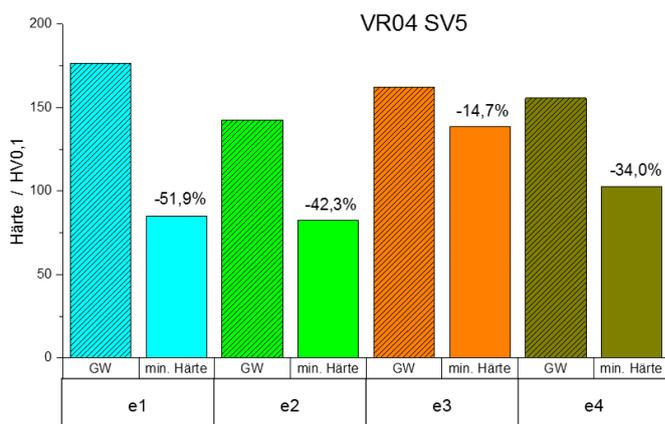
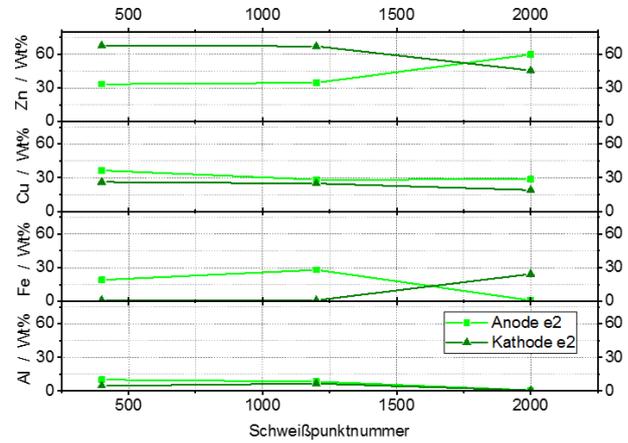
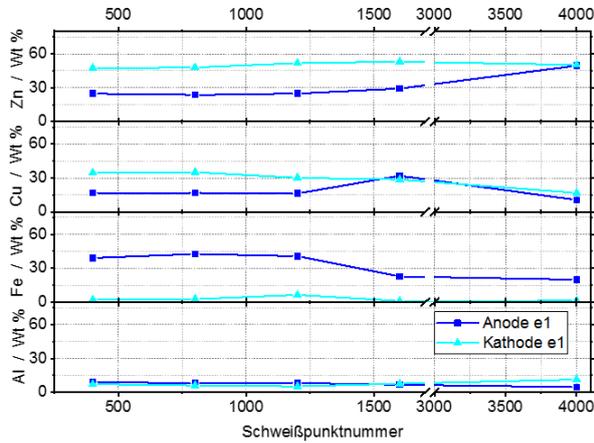


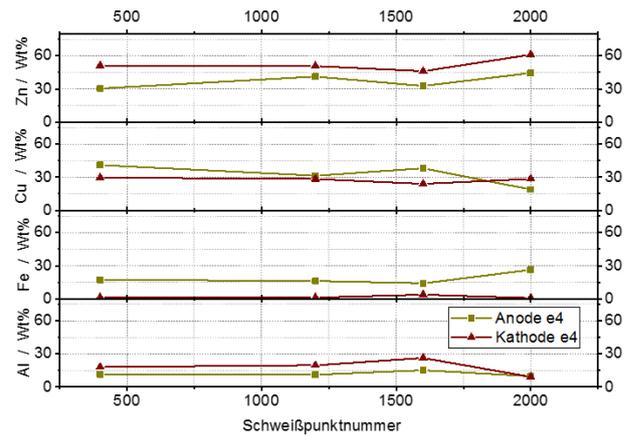
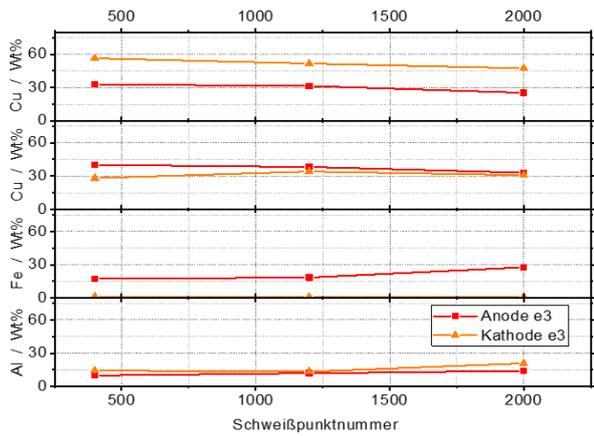
Abbildung 152: VR04-sv5: Härteverlust der Elektroden bezogen auf Grundwerkstoff (GW)

### Anhang C.13 EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen



a) VR01-e1-sv5

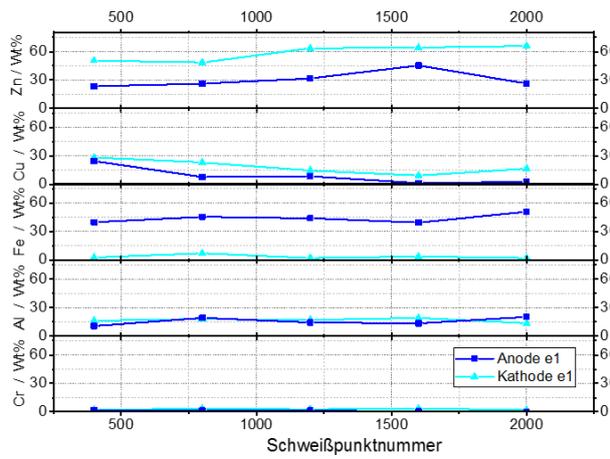
b) VR01-e2-sv5



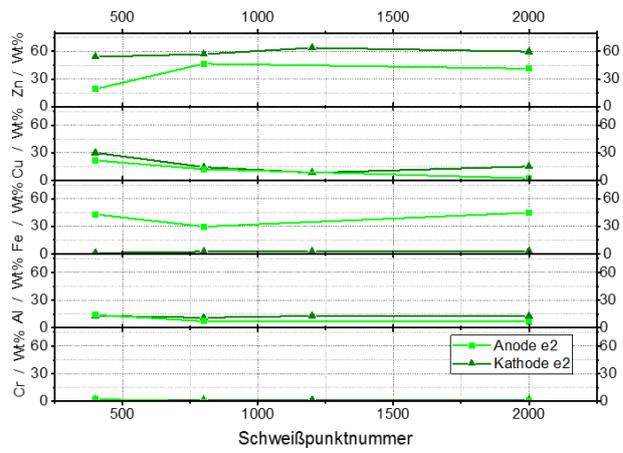
c) VR01-e2-sv5

d) VR01-e4-sv5

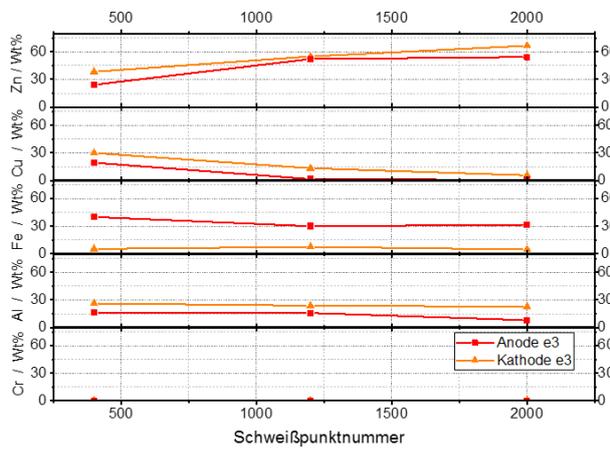
Abbildung 153: VR01-sv5: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen



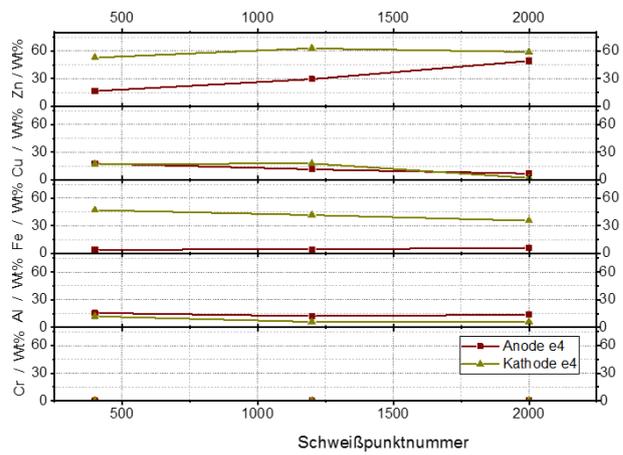
a) VR01-e1-sv5



b) VR01-e2-sv5

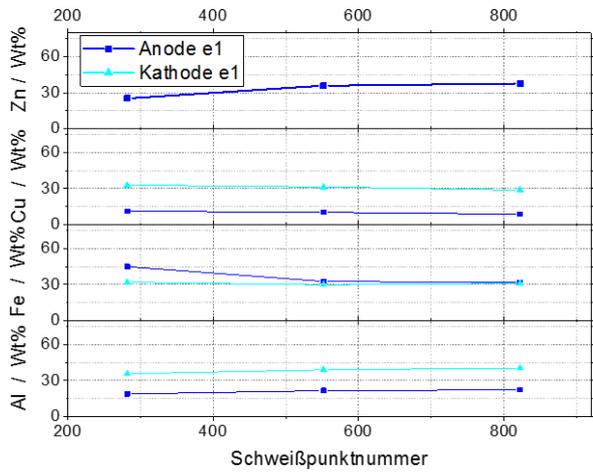


c) VR01-e2-sv5

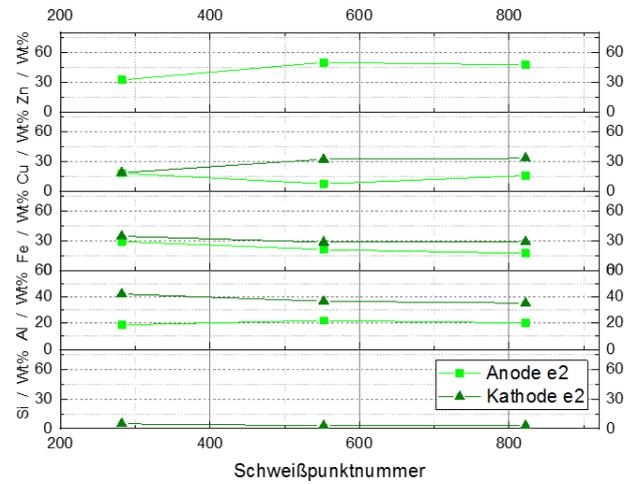


d) VR01-e4-sv5

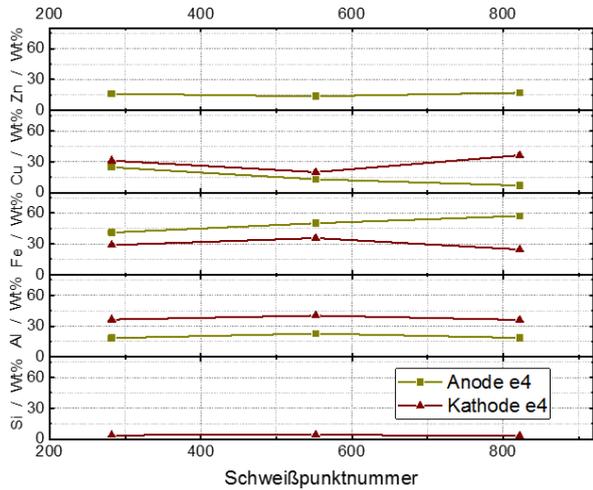
Abbildung 154: VR02-sv5: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen



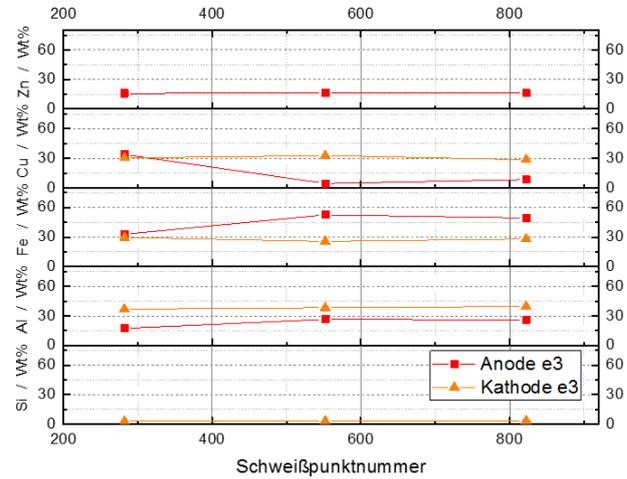
a) VR01-e1-sv5



b) VR01-e2-sv5



c) VR01-e2-sv5



d) VR01-e4-sv5

Abbildung 155: VR04-sv5: EDX-Messungen auf den Oberflächen der verschlissenen Elektrodenkappen

### Anhang C.14 Sensitivitätsanalysen

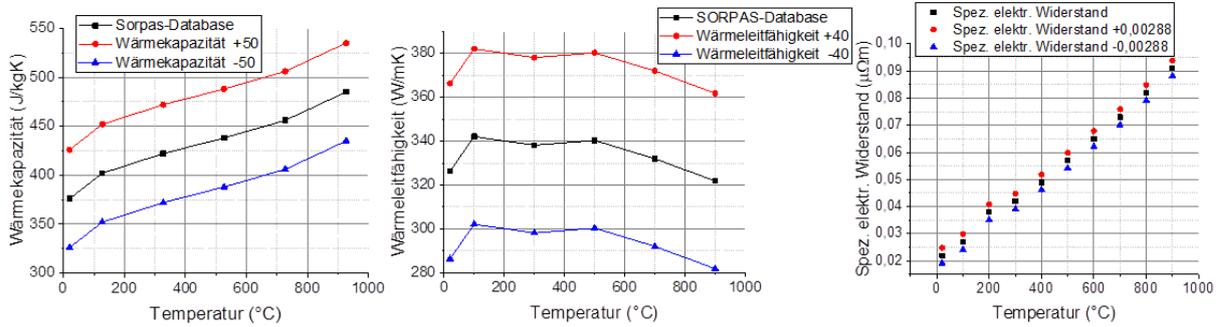


Abbildung 156: Variation der wärmephysikalischen Werkstoffeigenschaften für die Sensitivitätsanalysen. Links: Variation der Wärmekapazität, mittig: Variation der Wärmeleitfähigkeit, rechts: Variation des spezifischen elektrischen Widerstands

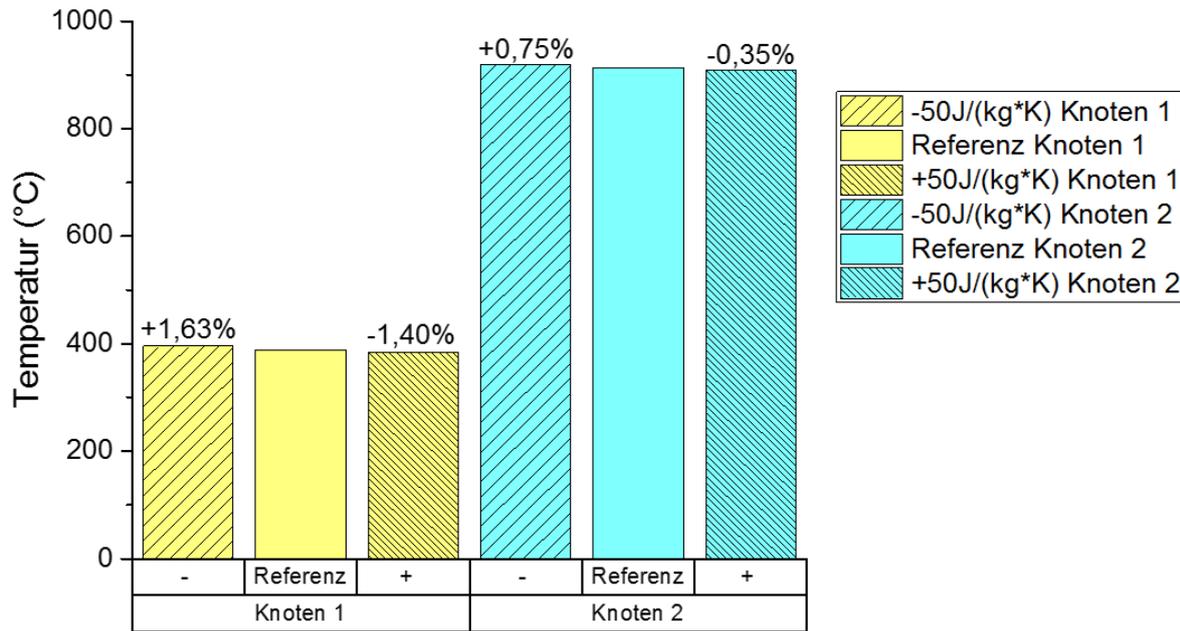


Abbildung 157: Einfluss der Variation der Wärmekapazität auf Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe

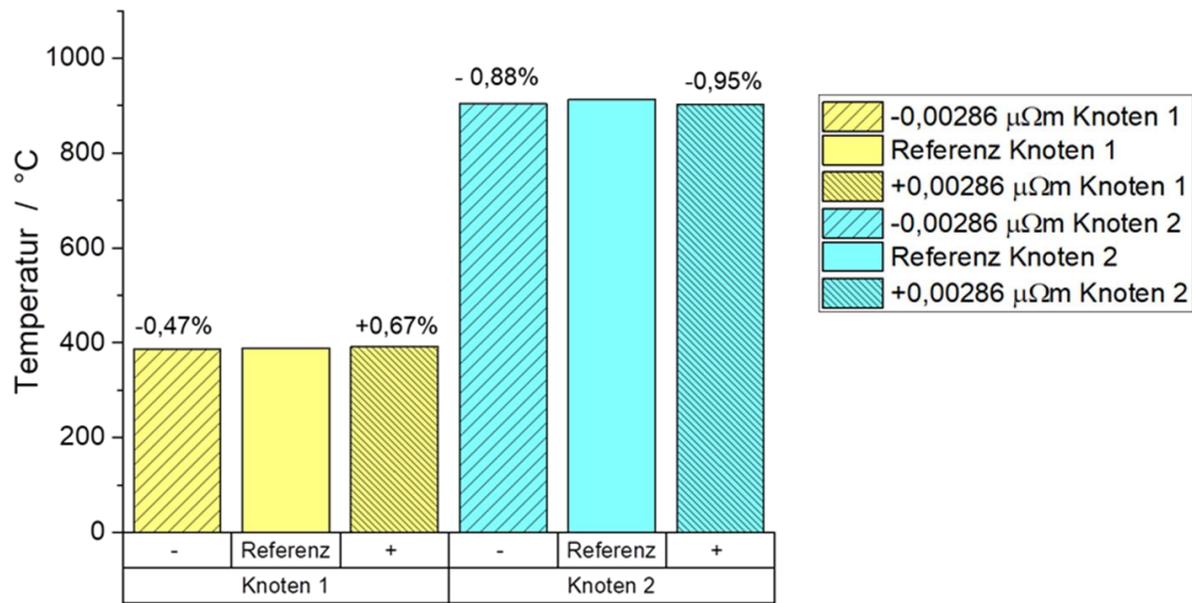


Abbildung 158: Einfluss der Variation des spezifischen elektrischen Widerstands auf Maximaltemperatur in der Elektrodenkappe

### Anhang C.15 Simulierte Schweißbereiche VR01

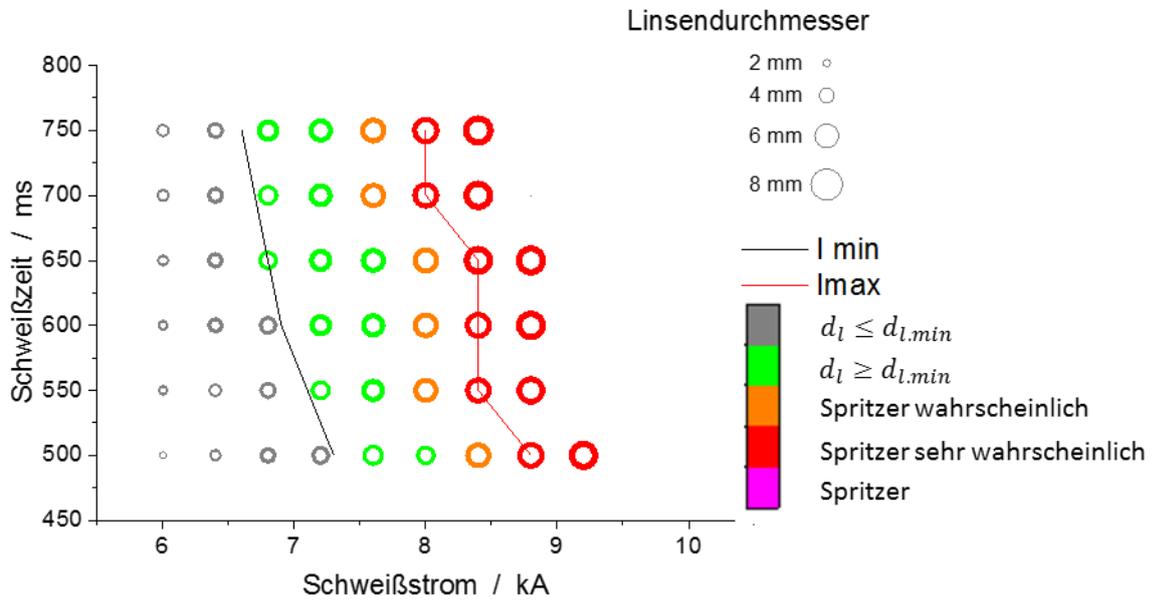


Abbildung 159: VR01-e1: Simulierter Schweißbereich

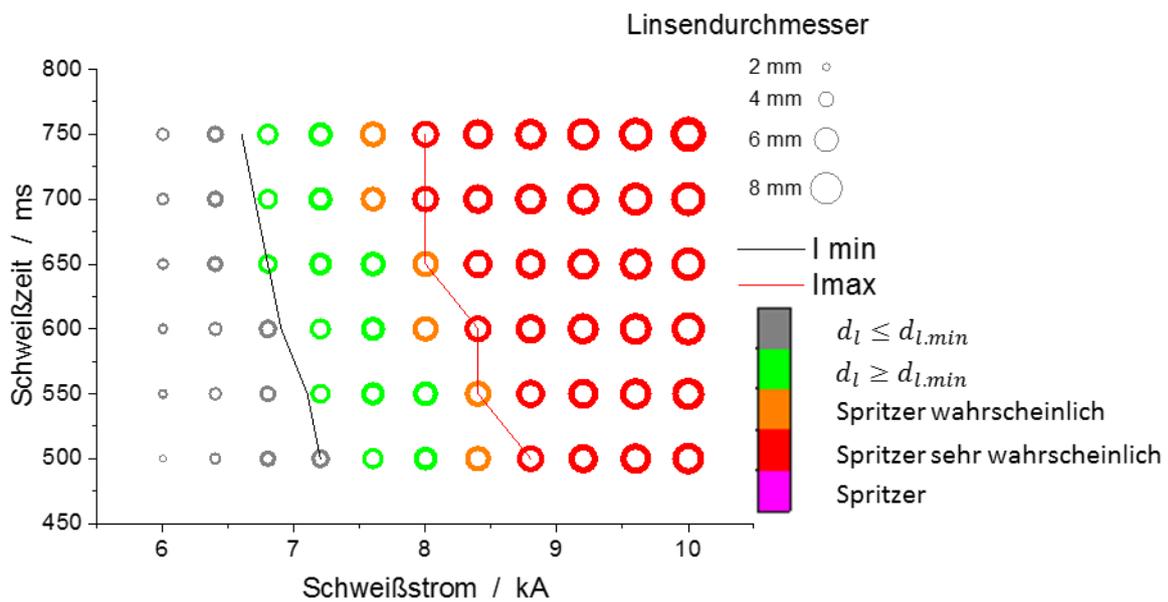


Abbildung 160: VR01-e2: Simulierter Schweißbereich

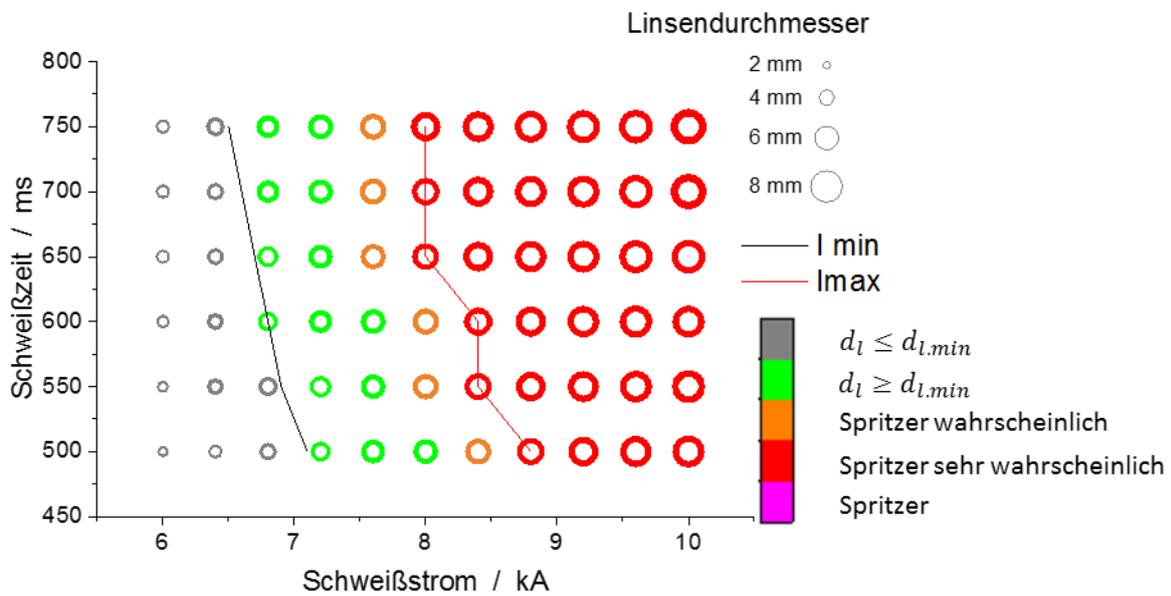


Abbildung 161: VR01-e3: Simulierter Schweißbereich

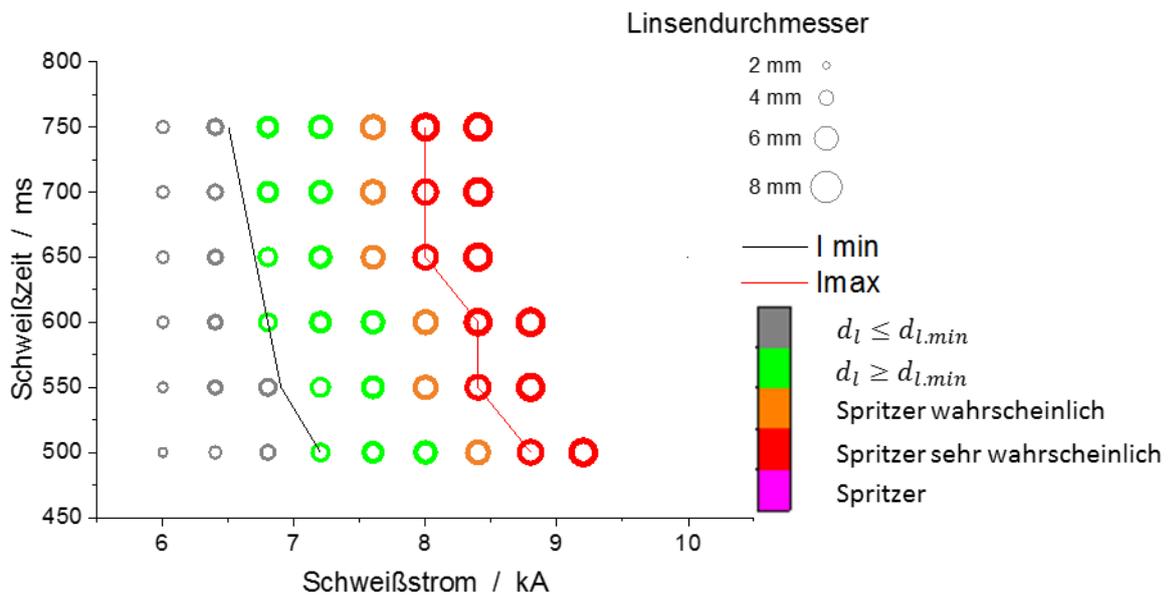


Abbildung 162: VR01-e4: Simulierter Schweißbereich

### Anhang C.16 Simulierte Schweißbereiche VR02

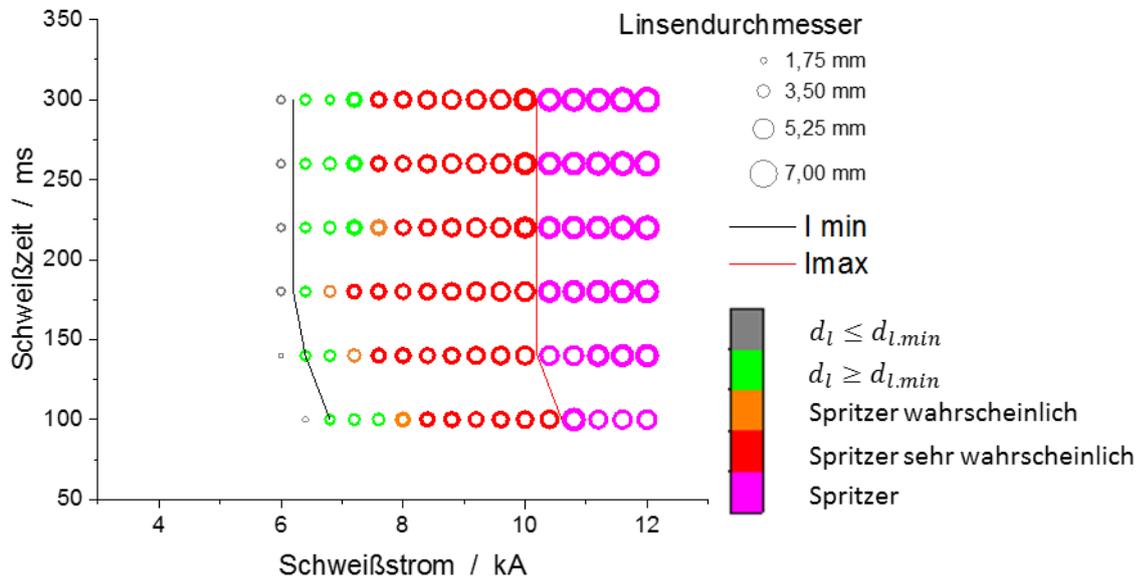


Abbildung 163: VR02-e1: Simulierter Schweißbereich

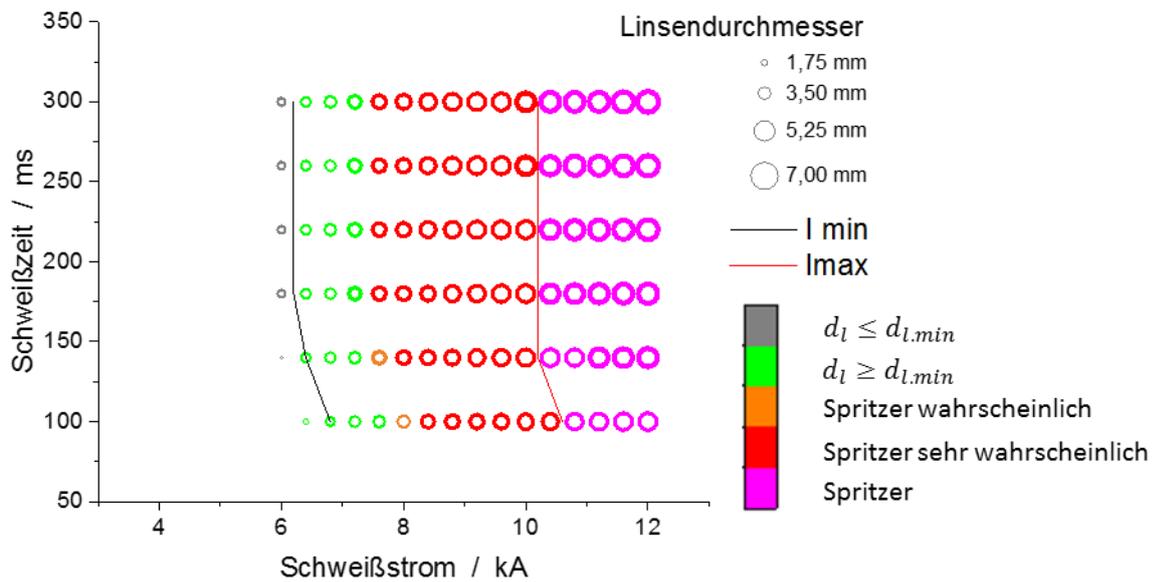


Abbildung 164: VR02-e2: Simulierter Schweißbereich

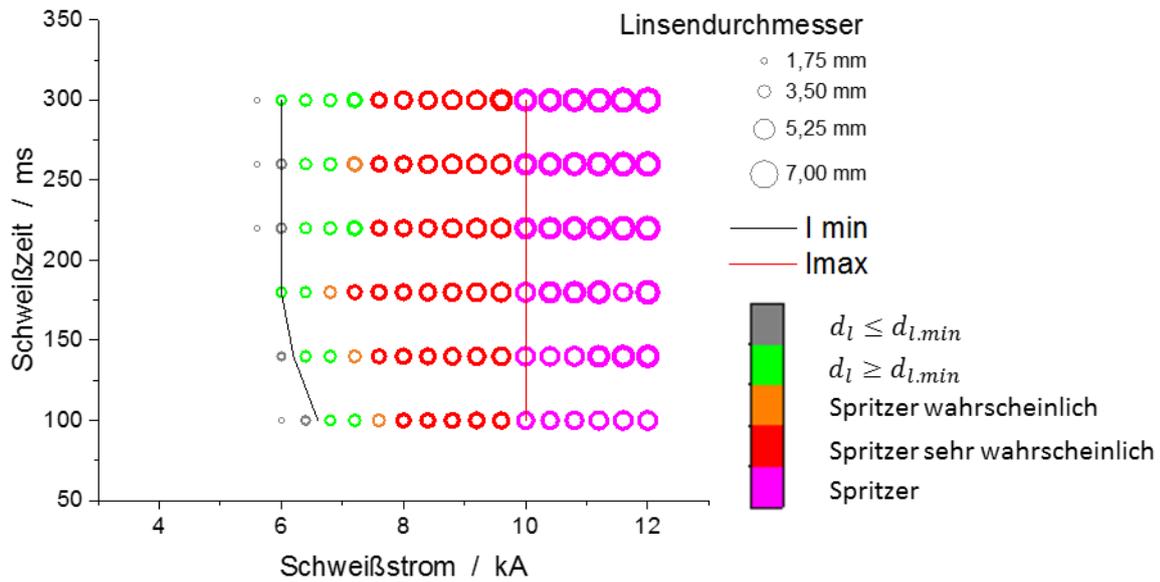


Abbildung 165: VR02-e3: Simulierter Schweißbereich

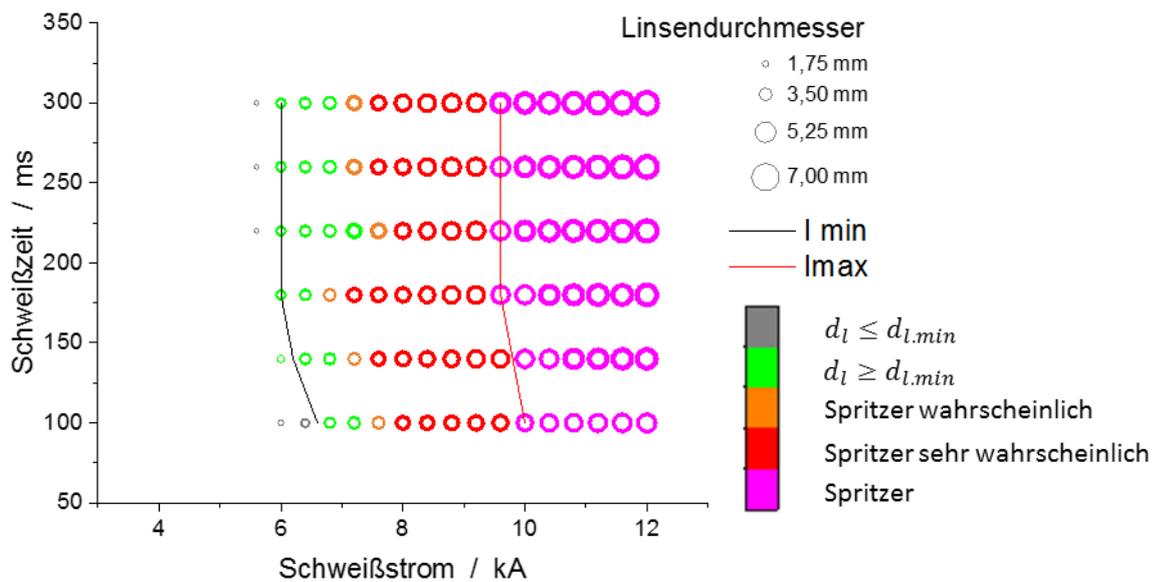


Abbildung 166: VR02-e4: Simulierter Schweißbereich