

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19.208 BR

Thema

Zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche beim Widerstandspressschweißen durch bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte

Berichtszeitraum

1.10.2016 bis 30.9. 2018

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1: Technische Universität Dresden

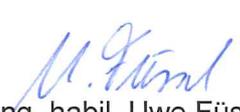
Institut für Fertigungstechnik

Professur für Fügetechnik und Montage

01062 Dresden

Dresden, 15.02.2019

Ort, Datum


Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

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

Gefördert durch:

Abschlussbericht

Titel: Zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche
beim Widerstandspressschweißen durch bildgebende
Analyse der Remanenzflussdichte

IGF-Nr.: 19.208 B

Forschungseinrichtung: Technische Universität Dresden
Institut für Fertigungstechnik
Professur für Fügetechnik und Montage
01062 Dresden

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

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Christian Mathiszik

Zusammenfassung

Die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Widerstandsschweißverbindungen wurde 2015 an der Professur für Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden im Vorhaben IGF17.539BR erstmalig untersucht. Die Prüfmethode beruht auf der Auswertung der Remanenz zuvor magnetisierter Proben, arbeitet berührungslos und ohne Koppelmittel. Sie erlaubt das objektive Bewerten von Punktschweißverbindungen, manuell oder automatisiert.

Im Vorhaben IGF 19.208 BR wurde gezeigt, dass die Qualität der Prüfergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte auf gleichem Niveau, wie die der Ultraschallsysteme, liegt.

An zwölf unterschiedlichsten Materialkombinationen mit Einzelblechdicken bis 3 mm wurden Schweißpunkte zerstörungsfrei durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte und durch Ultraschall sowie zerstörend durch Torsion und am Querschliff vergleichend geprüft. Durch numerische Simulationen, validiert im experimentellen Versuch, wurden die physikalische Wirkungsweise der Prüfmethode nachgewiesen und die Randbedingungen bezüglich Elektrodeneindruck und Randabstand definiert. Die Prüfmethode wurde an Serienbauteilen erfolgreich getestet. Mit Hilfe von Trainings- und Testmengen wurde der Auswertalgorithmus so weit entwickelt, dass automatisierte ZfP-Bewertungen von Schweißpunkten möglich sind. Der Auswertalgorithmus ist für die jeweilige Materialkombination gültig. Bei Kenntnis der materialspezifischen magnetischen Hysteresekurven lassen sich die Ergebnisse auf beliebige Materialkombinationen übertragen.

Der Test der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an Buckelschweißverbindungen erhärtet die These, dass auch Buckelschweißverbindungen zerstörungsfrei geprüft werden können.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 19.208 BR / DVS-Nr. 04.070) der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. 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:

Johannes Vinz	Studienarbeit, Diplomarbeit
Christoph Halisch	Studienarbeit
Stefan Müller	Diplomarbeit
Robert Mencke	Diplomarbeit
Till Reinhardt	Studienarbeit, Diplomarbeit
Fritz Graefe	Studienarbeit
Florian Stelzer	Studienarbeit
Dominik Kutscher	Studienarbeit
Chris Röder	Studienarbeit
Thanh Vu Tuan	Studienarbeit

Außerdem sei an dieser Stelle den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) und weiteren Personen für die Unterstützung, Mitarbeit und die wertvollen fachlichen Hinweise gedankt.

Unser Dank gilt:

Dirk Altnau, Theresa Aumüller	BMW Group
Koen Vervaeke, Stephan Kliché	MagcamNV, Belgien
René Dittrich	IfU Diagnostic Systems GmbH
Sebastian Bartmann	HBS Bolzenschweiss-Systeme GmbH & Co. KG
Michael Rotzsch	Elektro-Schweißtechnik Dresden
Ralf Bothfeld, Hans-Jürgen Rusch	Harms & Wende GmbH & Co. KG
Andre Lienert	Werner Electronics Kreischa
Robert Sierlinger, Sabine Ritsche	voestalpine Stahl GmbH

Michael Nowasz	Voestalpine Automotive Components Schmölln GmbH
Robert Laurenz	ThyssenKrupp Steel Europe AG
Volker Arndt	Bosch Rexroth, Erbach
Michael Huppmann	Audi AG
Lars Wiese, Dr. Matthias Graul, Dr. Eike-Christian Klages, Thomas No- ack	Volkswagen AG
Ralf Albrecht, Marco Krebs	Volkswagen Sachsen GmbH
Klaus-Dieter Czekalla	GLAMATronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
York Oberdörfer	TESSONICS Europe GmbH
Christian Ferber	Automation Technology
Thomas Himmler, Stefan Wid- mann	Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG
Jörg Rönnert, Andrey Gadyuchko	Kendrion Mechatronics Center GmbH
Carsten Köhler	VOGT Ultrasonics GmbH
Peter Radde	Sensitec GmbH
Thomas Woodcock	Leibniz-Institut für Festkörper und Werk- stoffforschung (IFW Dresden)
Dmitry Borin	Professur für Magnetfluidodynamik, Mess- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Danksagung.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	17
Abkürzungsverzeichnis	19
Verzeichnis der Formelzeichen.....	20
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	21
2 Stand der Technik und Forschung.....	23
2.1 ZfP beim Buckelschweißen	23
2.2 ZfP beim Widerstandspunktschweißen	23
3 Verfahrensbeschreibung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte	27
4 Forschungsziel	29
5 Versuchsmethodik	31
6 Eingesetzte Anlagentechnik.....	36
6.1 Versuchsaufbau zum Magnetisieren	36
6.2 Versuchsaufbau zur Messung der Remanenzflussdichte.....	36
6.3 Prüfgeräte für die Ultraschallmessungen.....	39
6.4 Versuchsstände zur zerstörenden Prüfung.....	39
6.4.1 Präparation von Querschliffproben	39
6.4.2 Torsionsprüfstand	40
6.4.3 Pendelschlagwerk.....	41
6.4.4 Zugprüfmaschine.....	41
6.5 Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen	42
6.6 Chromatisch-konfokale Mikroskopie zur Oberflächentopographiemessung	42
7 Versuchsergebnisse und Diskussion	45
7.1 Ermitteln der Schweißparameter	46
7.2 Untersuchung von Einflussgrößen auf die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte	48
7.2.1 Werkstoffkenngrößen und Weiterentwicklung der FE-Modelle.....	48

7.2.1.1	Beschreibung der FE-Modelle.....	48
7.2.1.2	Ermittlung der Werkstoffkenngrößen	50
7.2.2	Oberflächentopographie: Elektrodeneindringtiefe.....	52
7.2.3	Zusammenfassung.....	59
7.3	Weiterentwicklung der Messwertaufnahme und des Auswertalgorithmus	60
7.3.1	1M, 8M	64
7.3.2	Zusammenfassung.....	67
7.4	Untersuchungsergebnisse der einzelnen Materialdickenkombinationen	67
7.4.1	Extreme Materialdickenkombinationen	67
7.4.1.1	1RSW.....	68
7.4.1.2	2RSW.....	71
7.4.1.3	3RSW.....	75
7.4.1.4	2M.....	78
7.4.1.5	3M.....	81
7.4.1.6	4M.....	84
7.4.2	Austenitische Materialdickenkombinationen.....	88
7.4.2.1	4RSW.....	90
7.4.2.2	5RSW.....	93
7.4.3	Unbeschichtete, artgleiche Materialdickenkombinationen	97
7.4.3.1	5M.....	97
7.4.3.2	6M.....	99
7.4.3.3	7M.....	102
7.4.4	Zusammenfassung und Gesamtergebnis aller MDK für das Widerstandspunktschweißen	104
7.5	Funktionsnachweis und Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte	107
7.5.1	Anwendbarkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei Buckelschweißungen	107
7.5.2	Untersuchung des Einflusses von Radien und Randabstand	111
7.5.3	Anwendung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an Serienbauteilen.....	114
7.5.4	Zusammenfassung.....	116

8	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen	117
9	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen	119
10	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen	120
10.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse.....	120
10.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit	120
11	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen	122
11.1	Fachzeitschriften, Fachtagungen, Kolloquien	122
11.2	Studien- und Abschlussarbeiten.....	122
12	Transfermaßnahmen.....	124
12.1	Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen.....	124
12.2	Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende	125
12.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	126
13	Literaturverzeichnis	128
14	Anhang.....	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich zwischen der ZfP durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte mit dem Ergebnis des zerstörend geprüften Schweißpunkts [6].....	24
Abbildung 2: Möglichkeit der separaten Bewertung der Anbindungsflächen bei Dreiblechverbindungen (links) und der Vergleich zwischen einer Fehlschweißung und einem Schweißpunkt mit Soll-Linsendurchmesser (rechts) [6].....	25
Abbildung 3: Vergleich von Prüfsystemen für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen (US-ES: Ultraschall-Einzelschwingersystem, US-MS: Ultraschall-Matrix-Schwingersystem (Array), USM 4.0: Ultraschall-Transmissionssystem, RMZ: Remanenzmessung (entwickelt in IGF-Nr. 17.539 BR), d: Durchmesserbewertung, A: Flächenbewertung) [6]	26
Abbildung 4: Ergebnisse aller untersuchten MDK aus IGF-Nr. 17.539 BR (Erläuterung zu den MDK: zwei Ziffern: Zweiblech-, drei Ziffern: Dreiblechverbindungen) [6].....	26
Abbildung 5: Prüfprozess der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte	27
Abbildung 6: Vergleich und Überlagerung einer zerstörten Probe mit den ZfP-Messergebnissen und dem angewendeten Auswertealgorithmus [20].....	28
Abbildung 7: Versuchsplan für das Forschungsvorhaben IGF 19.208 BR	35
Abbildung 8: Magnetisierungsvorrichtung [21].....	36
Abbildung 9: Messvorrichtung RMV02 mit Messkarte, Motorsteuerung (1), Kreuztisch mit Hallsensor (2) zum Messen der Remanenzflussdichte und Messverstärker (3)	37
Abbildung 10: Aufbau der Hallsensor-Arrays: links: 2D-Array mit fünf Hallsensoren (2+3); rechts: 1D-Array mit vier Hallsensoren.....	37
Abbildung 11: Hallsensor zum Messen der Remanenzflussdichte Variante 2 (links) [21] und Darstellung der Messergebnisse im Intensitätsplot durch Falschfarben (rechts)	38
Abbildung 12: Hallsensoren zur Messung der magnetischen Flussdichte und Vergleich der Sensoren durch gleichartiges Überfahren eines Dauermagneten.....	39
Abbildung 13: Ultraschallsystem RSWA F1-Prüfsystem der Firma Tessonics Inc. (US1) [26] für die Vergleichsuntersuchungen in Abschnitt 7	39

Abbildung 14: Darstellung der Schnittlinie für die Schliffebene der Querschlifffproben	40
Abbildung 15: Versuchsstand zur Torsionsprüfung der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage	41
Abbildung 16: Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen der Professur für Fügetechnik und Montage an der Technischen Universität Dresden.....	42
Abbildung 17: Konfokale Mikroskopie (links) und chromatisch-konfokale Mikroskopie (rechts) - Funktionsprinzip [32, S. 31 ff.].....	43
Abbildung 18: Messkopf (1) des chromatisch-konfokalen Mikroskops der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage zur Messung der Oberflächentopographie von Schweißproben (2) (links) und Messergebnis eines Schweißpunktes (rechts).....	44
Abbildung 19: Schematische Darstellung einer zweischnittigen Schweißverbindung im Querschnitt mit den wichtigsten geometrischen Kenngrößen	46
Abbildung 20: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Punktdurchmessers nach DIN EN ISO 14329 [28] (links) und Beschreibung der verwendeten Box-Plots für die statistischen Auswertungen (rechts, IQR: Interquartilsabstand)	46
Abbildung 21: Zusammenfassung der Wachstumskurven und den jeweiligen untersuchten Bereichen	47
Abbildung 22: Simulierte FE-Modelle beispielhaft einseitige und beidseitige Magnetisierung und für unterschiedliche Linsendurchmesser für Zweiblechverbindungen (1: Schweißlinse; 2: oberes Blech; 3: unteres Blech; 4: obere Magnetisierungsspule; 5: untere Magnetisierungsspule; 6: oberer Spulenkern; 7: unterer Spulenkern; 8: Luft)	49
Abbildung 23: Vergleich der Remanenzprüfung mit Simulation der Remanenzflussdichte B_r (DC04) [36].....	50
Abbildung 24: Vergleich der Remanenzprüfung mit Simulation der Remanenzflussdichte B_r (HX340LAD) [36].....	51
Abbildung 25: Hysteresekurven der Versuchswerkstoffe DC04+Z, S235, 22MnB5+AS, HX340LAD+Z und 1.4301 ermittelt an Ringkernproben.....	52
Abbildung 26: Gemessene Punktdurchmesser bei unterschiedlichen Elektrodeneindringtiefen der MDK 1M [39]	53

Abbildung 27: Visualisierung der einzelnen Messungen für die Untersuchungen und Profilschnitt der Oberflächentopographie und Remanenzprüfung der MDK 1M [39].....	53
Abbildung 28: Gegenüberstellung von ZP und ZfP (links) und Darstellung der Messabweichung zwischen ZP und ZfP der MDK 1M (rechts) [39]	54
Abbildung 29: Numerische Simulationsergebnisse der Untersuchung zum Einfluss des Elektrodeneindrucks auf das Messergebnis der Remanenzmessung für zwei Bleche je 1,5 mm dick	56
Abbildung 30: Experimenteller Ablauf zur Untersuchung des Einflusses der Elektrodeneindringtiefe mit Entkopplung von Schweißparameter und Eindringtiefe [40, vgl. 40]	57
Abbildung 31: Elektrodeneindringtiefe vor und nach dem Senkerodieren der Proben A und B (links) und Vergleich der gemessenen Durchmesser aus ZfP1, ZfP2 und ZP der Proben A (rechts) [vgl.40].....	58
Abbildung 32: ZfP1 und ZfP2 am Beispiel der Probe mit einer Elektrodeneindringtiefe von 0,55 mm [vgl. 40].....	59
Abbildung 33: Ergebnis der zweiten Ableitung nach Gleichung 1 mit ermitteltem Konturring für die Bewertung des Schweißpunkts (links) und Profilverlauf mit eingezeichneter Referenzebene zur Ermittlung des Konturrings (rechts)	61
Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Auswertungsprogramms	61
Abbildung 35: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 1M (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21].....	62
Abbildung 36: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 1RSW (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21].....	63
Abbildung 37: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 2RSW (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21].....	63
Abbildung 38: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 3RSW (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21].....	64
Abbildung 39: 1M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	65
Abbildung 40: Querschliff der Schweißprobe 1M_4,8kA_P0002, $I_w = 4,8$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 240$ ms	65
Abbildung 41: Querschliff der Schweißprobe 1M_5,6kA_P0003, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 240$ ms	65
Abbildung 42: Querschliff der Schweißprobe 1M_8,8kA_P0001, $I_w = 8,8$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 240$ ms	65

Abbildung 43: 1M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	66
Abbildung 44: 1M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP	67
Abbildung 45: Querschliff der Schweißprobe 1RSW_I5,6kA_P0002, $I_w = 5,6$ kA, F_e = 2,0 kN, $t_w = 600$ ms	68
Abbildung 46: Querschliff der Schweißprobe 1RSW_I8,0kA_P0004, $I_w = 8,0$ kA, F_e = 2,0 kN, $t_w = 600$ ms	68
Abbildung 47: Querschliff der Schweißprobe 1RSW_I9,6kA_P0005, $I_w = 9,6$ kA, F_e = 2,0 kN, $t_w = 600$ ms	69
Abbildung 48: 1RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom	70
Abbildung 49: 1RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	71
Abbildung 50: 1RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP	71
Abbildung 51: Querschliff der Schweißprobe 2RSW_I5,6kA_P0010, $I_w = 5,6$ kA, F_e = 3,5 kN, $t_w = 1000$ ms	72
Abbildung 52: Querschliff der Schweißprobe 2RSW_I8,0kA_P0006, $I_w = 8,0$ kA, F_e = 3,5 kN, $t_w = 1000$ ms	73
Abbildung 53: Querschliff der Schweißprobe 2RSW_I9,6kA_P0005, $I_w = 8,0$ kA, F_e = 3,5 kN, $t_w = 1000$ ms	73
Abbildung 54: 2RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom	73
Abbildung 55: 2RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	74
Abbildung 56: 2RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP	74
Abbildung 57: Querschliff der Schweißprobe 3RSW_I6,0kA_P0003, $I_w = 6,0$ kA, $F_e =$ 2,5 kN, $t_w = 400$ ms und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-Anteils Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 3RSW_I6,0kA_P0009	76
Abbildung 58: Querschliff der Schweißprobe 3RSW_I6,8kA_P0006, $I_w = 6,8$ kA, $F_e =$ 2,5 kN, $t_w = 400$ ms und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn- Anteils Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 3RSW_I6,8kA_P0007	76
Abbildung 59: Vergleich der Zinkanteile (Zn) zwischen 3RSW, $I_w = 6,0$ kA und $I_w =$ 6,8 kA	76

Abbildung 60: Querschliff der Schweißprobe 3RSW_I10,0kA_P0004, $I_w = 10,0$ kA, $F_e = 2,5$ kN, $t_w = 400$ ms	77
Abbildung 61: 3RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	77
Abbildung 62: 3RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	78
Abbildung 63: 3RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	78
Abbildung 64: Querschliff der Schweißprobe 2M_I6,4kA_P0002, $I_w = 6,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms	79
Abbildung 65: Querschliff der Schweißprobe 2M_I8,0kA_P0002, $I_w = 8,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms	79
Abbildung 66: Querschliff der Schweißprobe 2M_I10,4kA_P0003, $I_w = 10,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms.....	80
Abbildung 67: 2M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	80
Abbildung 68: 2M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	81
Abbildung 69: 2M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	81
Abbildung 70: Querschliff der Schweißprobe 3M_I7,2kA_P0003, $I_w = 7,2$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 400$ ms	82
Abbildung 71: Querschliff der Schweißprobe 3M_I8,4kA_P0002, $I_w = 8,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 400$ ms	82
Abbildung 72: Querschliff der Schweißprobe 3M_I12,0kA_P0002, $I_w = 12,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 400$ ms.....	83
Abbildung 73: 3M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	83
Abbildung 74: 3M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	84
Abbildung 75: 3M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	84
Abbildung 76: Querschliff der Schweißprobe 4M_I5,6kA_P0002, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 1000$ ms und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 4M_I5,6kA_P0004.....	86
Abbildung 77: Querschliff der Schweißprobe 4M_I6,8kA_P0002, $I_w = 6,8$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 1000$ ms und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-	

Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 4M_I6,8kA_P0009.....	86
Abbildung 78: Vergleich der Zinkanteile (Zn) zwischen 4M, $I_w = 5,6$ kA und $I_w = 6,8$ kA.....	86
Abbildung 79: Querschliff der Schweißprobe 4M_I11,6kA_P0003, $I_w = 11,6$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 1000$ ms.....	87
Abbildung 80: 4M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	87
Abbildung 81: 4M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP.....	88
Abbildung 82: 4M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	88
Abbildung 83: Messergebnis der Remanenzmessung einer unverschweißten (links) und einer verschweißten (rechts) Probe, Linsendurchmesser der verschweißten Probe $dl = 5$ mm [20].....	89
Abbildung 84: Temperaturentwicklung und -verteilung des Schweißprozesses von 4RSW simuliert mit SORPAS 2D R12.5 ($I_w = 7,6$ kA, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 220$ ms), links: Simulierter Schweißprozess mit Temperaturverlauf des FEM-Knotens N320, rechts: Temperaturverteilungsrates am Messpunkt A des Temperaturverlaufs ($t = 520$ ms, $T = 820^\circ\text{C}$) [20].....	90
Abbildung 85: Gefügestruktur einer Schweißverbindung mit zwei 1.4301 (1,5 mm) (Bilder aus [53]).....	90
Abbildung 86: Querschliff der Schweißprobe 4RSW_I3,6kA_P0001, $I_w = 3,6$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 220$ ms.....	91
Abbildung 87: Querschliff der Schweißprobe 4RSW_I5,2kA_P0001, $I_w = 5,2$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 220$ ms.....	91
Abbildung 88: Querschliff der Schweißprobe 4RSW_I7,6kA_P0003, $I_w = 7,6$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 220$ ms.....	91
Abbildung 89: 4RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	92
Abbildung 90: 4RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP.....	93
Abbildung 91: 4RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	93
Abbildung 92: Vergleich der Schweißproben der MDK 5RSW im Querschliff, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 300$ ms.....	95
Abbildung 93: Querschliff der Schweißprobe 5RSW_I5,6kA_P0002, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 300$ ms.....	95

Abbildung 94: 5RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	95
Abbildung 95: 5RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	96
Abbildung 96: 5RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	96
Abbildung 97: Querschliff der Schweißprobe 5M_I4,8kA_P0001, $I_w = 4,8$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms	97
Abbildung 98: Querschliff der Schweißprobe 5M_I7,2kA_P0002, $I_w = 7,2$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms	97
Abbildung 99: Querschliff der Schweißprobe 5M_I8,8kA_P0002, $I_w = 8,8$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms	98
Abbildung 100: 5M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	98
Abbildung 101: 5M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	98
Abbildung 102: 5M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	99
Abbildung 103: Querschliff der Schweißprobe 6M_I4,6kA_P0003, $I_w = 4,6$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms	100
Abbildung 104: Querschliff der Schweißprobe 6M_I7,4kA_P0003, $I_w = 7,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms	100
Abbildung 105: Querschliff der Schweißprobe 6M_I11,6kA_P0003, $I_w = 11,6$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms.....	100
Abbildung 106: 6M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	101
Abbildung 107: 6M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	101
Abbildung 108: 6M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	102
Abbildung 109: Querschliff der Schweißprobe 7M_I6,0kA_P0003, $I_w = 6,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms	103
Abbildung 110: Querschliff der Schweißprobe 7M_I8,4kA_P0002, $I_w = 8,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms	103
Abbildung 111: Querschliff der Schweißprobe 7M_I12,0kA_P0001, $I_w = 12,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms.....	103
Abbildung 112: 7M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom.....	103
Abbildung 113: 7M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP	104

Abbildung 114: 7M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP.....	104
Abbildung 115: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen aller Messergebnisse von ZfP und ZP über alle untersuchten Punktschweißproben	105
Abbildung 116: Gegenüberstellung aller Messergebnisse aus ZP und ZfP der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte für die zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche von Punktschweißverbindungen	106
Abbildung 117: Gegenüberstellung aller Messergebnisse aus ZP und ZfP für das Ultraschallsystem 1	106
Abbildung 118: Gegenüberstellung aller Messergebnisse aus ZP und ZfP für das Ultraschallsystem 2	107
Abbildung 119: 3RPW: M8-Massebolzen: Darstellung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte, links: P07, Qualität i. O., rechts: P25, Qualität n. i. O.....	108
Abbildung 120: M6-Ringbuckel: Darstellung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte, links: 1RPW, P03, problematische Bewertung der Probe verursacht durch die Bohrung im Blech, rechts: 3RPW, P06, gute Bewertung der Probe möglich	109
Abbildung 121: M8-Massebolzen: Ergebnisse der ZP	110
Abbildung 122: M6-Ringbuckel: Ergebnisse der ZP.....	110
Abbildung 123: M6-Segmentbuckel: Ergebnisse der ZP	110
Abbildung 124: Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei unterschiedlichen Abständen s des Schweißpunkts zum Blechrand (links: $s = 4$ mm, rechts: $s = 12$ mm)	112
Abbildung 125: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus ZP und ZfP bei unterschiedlichen Abständen s des Schweißpunkts zum Blechrand	112
Abbildung 126: Darstellung der Herausforderungen beim Messen im Innenradius (links) und Gegenüberstellung der Ergebnisse aus ZP und ZfP für unterschiedliche Profilradien (rechts).....	114
Abbildung 127: Serienbauteile zur Untersuchung der Anwendbarkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte	115
Abbildung 128: Remanenzmessung am Serienbauteil mit der Magnetfeldkamera MiniCube.....	115

Abbildung 129: Gegenüberstellung der ZfP-Messungen durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte mit den Messungen der ZP und die statistische Auswertung der absoluten Abweichungen.....	116
Abbildung 130: Werkstoffabhängige Hystereseschleifen gesamt und im Detail (gemessen am IFW-Dresden) [36]	136
Abbildung 131: Werkstoffabhängige Hystereseschleifen gesamt und im Detail (gemessen an der Professur für Magnetofluidynamik, Mess- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden).....	137
Abbildung 132: Werkstoffabhängige Hystereseschleifen von Schweißpunkten gesamt und im Detail (gemessen an der Professur für Magnetofluidynamik, Mess- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden).....	137
Abbildung 133: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	138
Abbildung 134: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,5 mm – 1,5 mm	139
Abbildung 135: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 3,0 mm	140
Abbildung 136: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	141
Abbildung 137: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,5 mm – 1,5 mm	142
Abbildung 138: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 3,0 mm	143
Abbildung 139: Einfluss des Randabstands bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	144
Abbildung 140: Einfluss des Randabstands bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	145
Abbildung 141: Einfluss des Randabstands des oberen Bleches bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	146
Abbildung 142: Einfluss des Randabstands des unteren Bleches bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	147
Abbildung 143: Einfluss des Randabstands des oberen Bleches bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	148
Abbildung 144: Einfluss des Randabstands des unteren Bleches bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm	149

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgesehene MDK für das Widerstandspunktschweißen	31
Tabelle 2: Vorgesehene Materialkombinationen für das Widerstandsbuckelschweißen	31
Tabelle 3: Vorgesehene MDK für die Modellvalidierung	31
Tabelle 4: Kennwerte des Versuchsstands zur Torsionsprüfung der Technischen Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage	41
Tabelle 5: Kenndaten des Versuchsstands zum Widerstandspunktschweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage	42
Tabelle 6: Schweißparameter für die MDK der Versuchsreihen RSW	47
Tabelle 7: Schweißparameter für die MDK der Versuchsreihen M	47
Tabelle 8: Übersicht der numerischen Simulationen	49
Tabelle 9: Variierende Eingangsparameter für die numerischen Simulationen zum Ermitteln des Einflusses des Elektrodeneindrucks	56
Tabelle 10: Schweißparameter für Proben A	57
Tabelle 11: MDK 1M	64
Tabelle 12: MDK 1RSW	68
Tabelle 13: MDK 2RSW	72
Tabelle 14: MDK 3RSW	75
Tabelle 15: MDK 2M	79
Tabelle 16: MDK 3M	82
Tabelle 17: MDK 4M	85
Tabelle 18: MDK 4RSW	91
Tabelle 19: MDK 5RSW	94
Tabelle 20: MDK 5M	97
Tabelle 21: MDK 6M	100
Tabelle 22: MDK 7M	102
Tabelle 23: Untersuchte Buckelschweißproben	108
Tabelle 24: Tauglichkeitsbewertung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte der neun Versuchskombinationen für das Widerstandsbuckelschweißen	109
Tabelle 25: Proben zur Untersuchung von Flanschradius und Randabstand	111
Tabelle 26: Schweißparameter zur Untersuchung von Radius und Randabstand	111

Tabelle 27: Parameter zum Ermitteln des Einflusses des Randabstands..... 113

Tabelle 28: Einteilung der Schweißpunkte in drei Kategorien 115

Tabelle 29: Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen 124

Tabelle 30: Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende..... 125

Tabelle 31: Übersicht über Trainings- (TR) und Testmengen (TE)..... 135

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspakete
EDM	Senkerodieren
EDX	energie-dispersive Röntgenspektroskopie
FE	Fügeebene, Finite-Elemente
IQR	Interquartilsabstand
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MB	Massebolzen
MDK	Materialdickenkombination
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PM	Personenmonate
RB	Ringbolzen
RMV02	Vorrichtung für die Remanenzmessungen, Version 2
RSW	Widerstandspunktschweißen
SB	Segmentbolzen
US1	Ultraschallsystem 1: Tessonics RSWA F1
US2	Ultraschallsystem 2
VSM	Vibrating Sample Magnetometer
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZP	zerstörende Prüfung
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
B_r, B_z	Remanenzflussdichte, Remanenzflussdichte in z-Richtung	T
d	Durchmesser	mm
d_e	Durchmesser des Elektrodeneindrucks oberes Blech	mm
d_{HAZ}	Durchmesser der Wärmeeinflusszone	mm
d_n, d_l	Linsendurchmesser	mm
$d_{n,min}$	minimaler Linsendurchmesser	mm
d_w	Punktdurchmesser	mm
$d_{w,soll}$	Soll-Punktdurchmesser	mm
F, F_{El}	Kraft, Elektrodenkraft	N
I_{mag}	Magnetisierungsstromstärke	A
I_w	Schweißstromstärke	kA
J	magnetische Polarisierung	T
$M_{B,min}$	Mindest-Bruchdrehmoment	Nm
M_T	Torsionsmoment	Nm
P	Probennummer	
R	Radius	Ω , mm
R_m	Zugfestigkeit	MPa
$R_{p0,2}$	Streckgrenze	MPa
t	Blechdicke, Zeit	mm, s
t_h	Vorhaltezeit	ms
t_s	Nachhaltezeit	ms
t_w	Schweißstromzeit	ms
t_u, t_1	Blechdicke oberes Blech	mm
t_l, t_2	Blechdicke unteres Blech	mm
φ	Winkel	°
ω	Winkelgeschwindigkeit	°/min

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Widerstandspressschweißverfahren gehören seit langem zu den etablierten Fügeverfahren. Insbesondere das Widerstandspunkt- und Buckelschweißen sind im Kraft- und Schienenfahrzeugbau, im Metallbau und in der Gerätetechnik weit verbreitet. Sie zeichnen sich durch eine sehr hohe Wirtschaftlichkeit aus. Beim Widerstandspunktschweißen wird der Strompfad wesentlich durch die Elektrodenform bestimmt [1]. Beim Buckelschweißen wird die für das Schweißen notwendige Stromkonzentration durch die Geometrie der Buckel hervorgerufen. Im Idealfall entsteht eine linsenförmige Schweißverbindung zwischen den zu verbindenden Bauteilen [2 - 4].

Bei beiden Verfahrensvarianten ist die Schweißverbindung von außen nicht sichtbar, was eine große Herausforderung für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) der Verbindungen darstellt. Für das Widerstandspressschweißen stehen drei Methoden für die Qualitätsprüfung zur Verfügung: nach abgeschlossenem Prozess, die Prozessüberwachung und die Prozessregelung. Bei den beiden letztgenannten Methoden werden die Prozessparameter aufgezeichnet und analysiert. Sie geben Hinweise auf Prozessschwankungen bzw. greifen direkt in den Prozess ein. Beide Methoden sind nicht als Prüfmethode anzusehen, da sie keine unmittelbare Bewertung der Fügeverbindung zulassen. Daher erfolgen zusätzlich stichprobenartige ZfP oder zerstörende Prüfungen (ZP) der Schweißverbindungen an Bauteilen. Die ZfP-Methoden sind in [5] ausführlich beschrieben.

Die ZfP von Punktschweißverbindungen mittels Ultraschall durch Impuls-Echo-Technik ist das einzige Verfahren, das industriell in großem Umfang eingesetzt wird. Bei diesem Verfahren werden hohe Anforderungen an das Prüfpersonal gestellt. Nur geschultes Prüfpersonal „mit fundierten Kenntnissen und auf die zu prüfende Verbindung bezogene praktische Erfahrung“ [5, S. 7] kann eine Ultraschallprüfung erfolgreich durchführen. Dies betrifft vor allem die Handhabung der Prüfköpfe. Es werden spezielle Prüfköpfe eingesetzt, die jeweils auf den Linsendurchmesser abgestimmt sein müssen. Eine fehlerhafte Handhabung des Prüfkopfes führt in den meisten Fällen zu falschen Prüfergebnissen. Einschränkungen für den Einsatz der Ultraschalltechnik „können ebenfalls durch das Blechdickenverhältnis bei ungleich dicken Blechen gegeben sein“ [5, S. 7]. Daher werden in solchen Fällen zusätzlich zerstörende Prüfungen durchgeführt. Dies gilt insbesondere für mehrschnittige und extreme Materialdickenkombinationen (MDK), etwa Dreiblechverbindungen, für die es bis heute keine serientaugliche ZfP-Methode gibt. Daraus resultiert, dass entsprechende MDK nicht eingesetzt werden können.

Es ist weiterhin festzustellen, dass das Buckelschweißen in [5] ausdrücklich ausgeschlossen wird. Es sind auch keine Veröffentlichungen bekannt, in denen die industrielle Anwendung der ZfP für Buckelschweißverbindungen beschrieben wird.

Im Forschungsvorhaben „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“ (IGF-Nr. 17.539 BR, DVS-Nr. 04.058) [6], konnte in Stichversuchen gezeigt werden, dass eine ZfP von Widerstandspunktschweißverbindungen mit hoher Aussagekraft sowohl an Zweiblech- als auch an Dreiblechverbindungen vorgenommen werden kann. Dabei wird die Fügestelle nach dem Schweißen magnetisiert. Anschließend wird die Remanenzflussdichte an der Probenoberfläche gemessen und bewertet. Bei Dreiblechverbindungen können beide Schnittebenen separat bewertet werden. Es wurde weiter aufgezeigt, dass hoher Forschungsbedarf bezüglich des Einflusses der Elektrodeneindringtiefe und werkstoffabhängiger Kenngrößen auf das Prüfergebnis besteht. Diese ZfP-Methode konnte im Vorhaben IGF-Nr. 17.539 BR [6] nur im Rahmen von Stichversuchen an einer begrenzten Anzahl von MDK angewandt werden. Jedoch wurde eine sehr hohe Aussagekraft der Prüfmethode durch Vergleichsmessungen mit etablierten Prüfsystemen für die ZfP und durch zerstörende Prüfungen an unterschiedlichsten Punktschweißverbindungen nachgewiesen.

Ausgehend von den Ergebnissen aus IGF-Nr. 17.539 BR soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte an Widerstandspunktschweißverbindungen und erstmalig an Buckelschweißverbindungen wissenschaftlich erforscht werden. Das Verständnis der Wirkungsweise der bisher kaum untersuchten Remanenzmessung wird durch numerische Modellanalysen und experimentelle Versuche vertieft. Die Untersuchungen beinhalten auch die systematische Analyse der Einflüsse werkstoffabhängiger Kenngrößen sowie des Elektrodeneindrucks auf das Prüfergebnis.

2 Stand der Technik und Forschung

Die folgende Darstellung des aktuellen Stands der Forschung und Entwicklung beschränkt sich auf die nachträgliche ZfP beim Widerstandspunkt- und Buckelschweißen.

2.1 ZfP beim Buckelschweißen

Für die ZfP beim Buckelschweißen existieren kaum nationale und internationale Veröffentlichungen. Das DVS-Merkblatt zur ZfP von Widerstandspressschweißverbindungen [5] bezieht sich ausschließlich auf Punktschweißverbindungen. In [7] wird ein Ultraschallminiscanner vorgestellt, der u. a. an Buckelschweißverbindungen getestet wurde. Zudem wird von erfolgreichen Erprobungen in der Serienfertigung berichtet. Allerdings konnten diesbezüglich keine weiteren Veröffentlichungen recherchiert werden.

2.2 ZfP beim Widerstandspunktschweißen

In [5] werden die einzelnen ZfP-Methoden für das Widerstandspunktschweißen beschrieben. Die visuelle Prüfung, die Magnetpulver- und Farbeindringprüfung können lediglich auf äußere Merkmale angewendet werden. Innere Merkmale, wie Linsendimension, Poren, Lunker oder Risse können mit diesen ZfP-Methoden nicht beurteilt werden. In [8] wird eine Prüfmethode vorgestellt, die die Thermographie sowohl während des Schweißens als auch nach dem Schweißen anwendet. Unter Laborbedingungen zeigt sich, dass gute Aussagen zur Fügstellendimension getroffen werden können. Eine Umsetzung in die Serienanwendung ist bisher nicht bekannt. Die konventionelle Durchstrahlungsprüfung und die Echtzeitradiografie mittels Mikrofocus liefern in Bezug zum apparativen Aufwand nicht die gewünschte Aussagequalität zu verschiedenen Punktqualitäten [5]. Die in [5] als letzte beschriebene ZfP-Methode ist die Prüfung mittels Ultraschall durch Impuls-Echo-Technik. Sie ist die einzige Prüfmethode, die sich bisher in der industriellen Serienproduktion durchgesetzt hat [5]. Der Einsatz dieser Prüfmethode mit Einzelschwingerprüfköpfen ist als Stand der Technik anzusehen, was die zahlreichen Veröffentlichungen, darunter [9 - 14], belegen.

In den letzten Jahren wurde die Impuls-Echo-Technik mit Ultraschallgruppenstrahlern, sogenannten Ultraschall-Arrays, intensiv weiterentwickelt. Mehrere Einzelschwinger sind in einem Prüfkopf untergebracht. Zur Auswertung werden C-Bilder und D-Bilder herangezogen. Die Bilder entstehen durch die Auswertung mehrerer A-Bilder, von denen zu einer bestimmten Schalllaufzeit die Amplitude in einem Intensitätsdiagramm durch Falschfarben dargestellt wird. Hierbei zeichnen sich zwei unterschiedliche Entwicklungsrichtungen ab. In [15 - 17] wird die ZfP von Widerstandspunktschweißverbindungen mit Hilfe eines tragbaren Phased-Array-Systems vorgestellt. Bei der Phased-Array-Technologie wird eine gebündelte Ultraschallwelle durch die geregelte Ansteuerung der Einzelschwinger erzeugt. Dadurch ist es möglich, Schallwellen mit einem vordefinierten

Winkel und einer präzisen Fokusslage zu senden [15, 16, 18]. Die zweite Entwicklungsrichtung arbeitet ebenfalls mit Ultraschall-Array-Wandlern. Der Unterschied zu den Phased-Array-Systemen besteht darin, dass alle Wandler einzeln angeregt werden.

Ein Vorteil der Ultraschall-Array-Technik ist die Visualisierung der Anbindungsflächen. Dies stellt eine Erleichterung für das Prüfpersonal dar und verringert zudem deren Einarbeitungszeit [19]. Aus Fachgesprächen mit Industrieanwendern und aus eigenen Erfahrungen ist bekannt, dass im Hinblick auf die Prüfzeiten nur geringfügige Verbesserungen im Vergleich mit Einzelschwingerprüfsystemen erzielt werden können. Zudem gelten auch bei den Ultraschall-Array-Systemen die gleichen Randbedingungen wie bei den oben beschriebenen Einzelschwingerprüfsystemen. Es ist weiterhin schwierig, Punktschweißverbindungen an MDK mit deutlich unterschiedlichen Blechdicken und tiefen Elektrodeneindrücken zerstörungsfrei zu prüfen.

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“ (IGF-Nr. 17.539 BR, DVS-Nr. 04.058) [6] konnten gute Ergebnisse in Stichversuchen durch die Magnetisierung der Fugestelle nach dem Schweißen und anschließender Remanenzmessung erzielt werden. Die Prüfmethode wird als bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte bezeichnet und wird in Abschnitt 3 beschrieben. Die Versuche waren ursprünglich nicht Bestandteil des Vorhabens IGF-Nr. 17.539 BR, wurden aber kurz vor Projektende in Abstimmung mit dem Projektbegleitendem Ausschuss (PA) ins Versuchsprogramm aufgenommen. Es wurde gezeigt, dass die Auswertung der Remanenzmessung mit dem Querschnitt der Fügeverbindung in der Schnittebene korreliert (Abbildung 1).

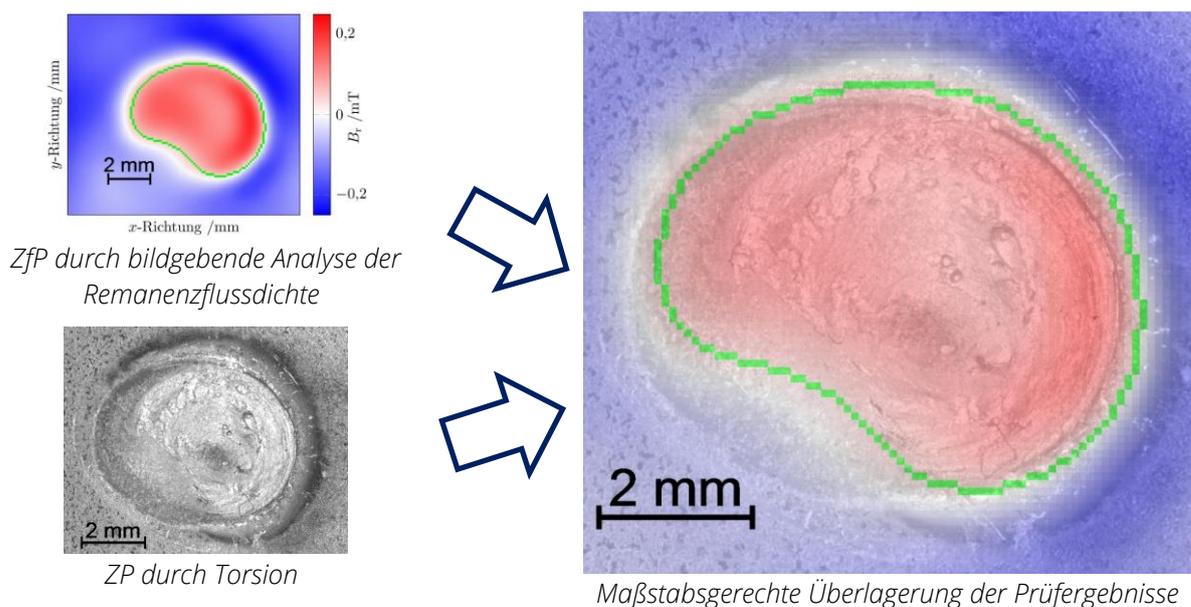


Abbildung 1: Vergleich zwischen der ZfP durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte mit dem Ergebnis des zerstörend geprüften Schweißpunkts [6]

Dies gilt auch für Dreiblechverbindungen (Abbildung 2, links). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Fehlschweißungen und zu kleine Linsendurchmesser sicher erkannt werden können (Abbildung 2, rechts). Für die Prüfung sind kurze Magnetisierungszeiten von unter 100 ms und kurze Prüfzeiten von wenigen Sekunden erforderlich. Ein weiterer Vorteil ist, dass keine Koppelmittel oder andere Vorbehandlungen der Oberfläche notwendig sind. Allerdings beeinflussen große Oberflächenschweißspritzer und der Elektrodeneindruck das Prüfergebnis. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Prüfungen objektiv und reproduzierbar sind und der Einfluss des Prüfpersonals marginal ist, was sich u. a. beim Vergleich mit etablierten Prüfsystemen für die ZfP beim RSW bemerkbar macht (Abbildung 3). Zudem liegt ein dokumentationsfähiges Ergebnis vor. In Abbildung 4 sind alle in [6] untersuchten MDK ersichtlich. Die Ergebnisse sind im Abschlussbericht [6] zusammengefasst.

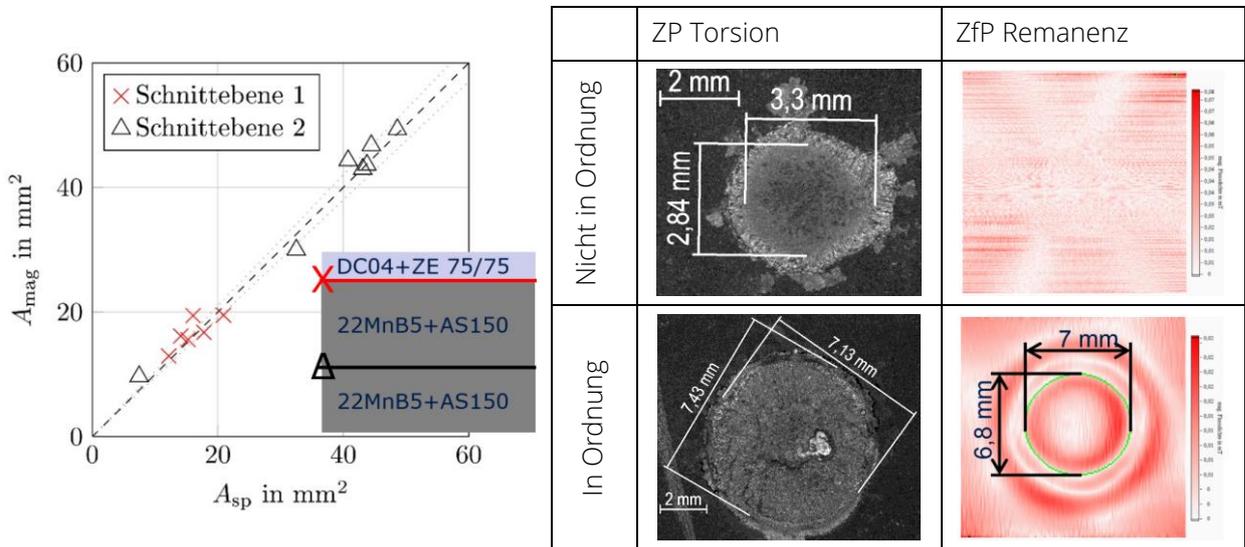


Abbildung 2: Möglichkeit der separaten Bewertung der Anbindungsflächen bei Dreiblechverbindungen (links) und der Vergleich zwischen einer Fehlschweißung und einem Schweißpunkt mit Soll-Linsendurchmesser (rechts) [6]

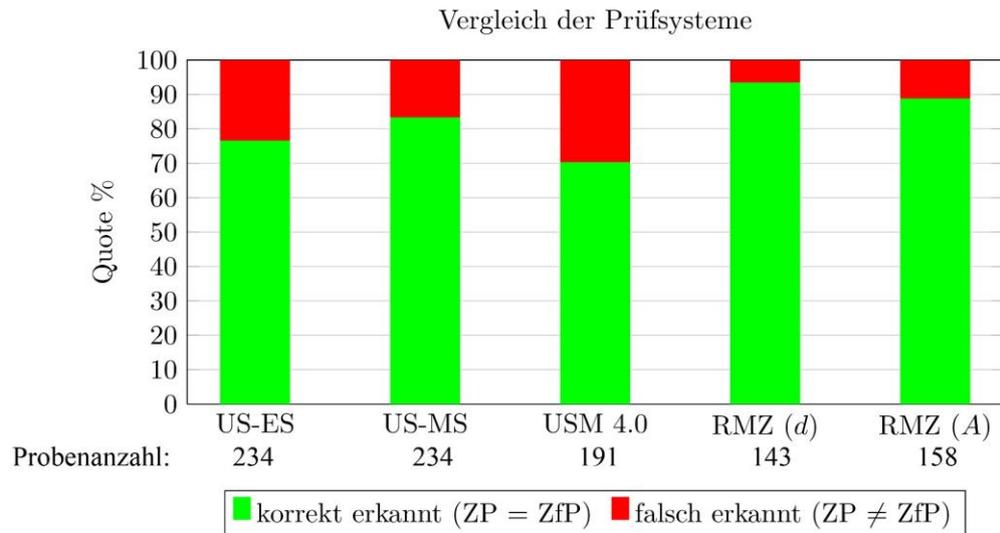


Abbildung 3: Vergleich von Prüfsystemen für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen (US-ES: Ultraschall-Einzelschwingersystem, US-MS: Ultraschall-Matrix-Schwingersystem (Array), USM 4.0: Ultraschall-Transmissionssystem, RMZ: Remanenzmessung (entwickelt in IGF-Nr. 17.539 BR), d: Durchmesserbewertung, A: Flächenbewertung) [6]

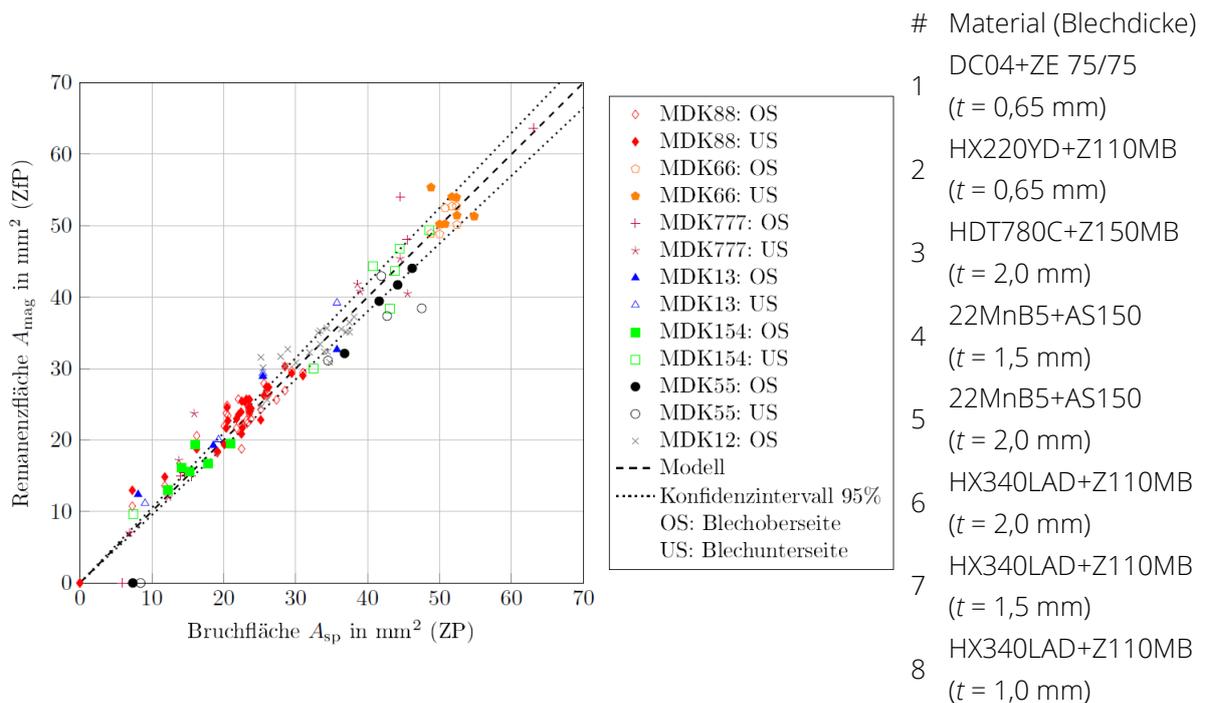


Abbildung 4: Ergebnisse aller untersuchten MDK aus IGF-Nr. 17.539 BR (Erläuterung zu den MDK: zwei Ziffern: Zweiblech-, drei Ziffern: Dreiblechverbindungen) [6]

3 Verfahrensbeschreibung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte

Die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte besteht aus zwei Schritten. Abbildung 5 zeigt beide Schritte schematisch. Im ersten Schritt befindet sich die Probe mit ihrem Schweißpunkt koaxial zwischen zwei gleichgerichteten Spulen und wird magnetisiert. Die magnetische Feldstärke wird so eingestellt, dass das Material seine magnetische Sättigung erreicht. Nach dem Magnetisieren werden die Spulen entfernt. Im zweiten Schritt wird die verbleibende magnetische Flussdichte, Remanenzflussdichte B_r , an der Oberfläche der Probe mit einem Hallsensor flächig gemessen. Das Ergebnis der Messung kann anhand von Intensitätsdiagrammen analysiert werden.

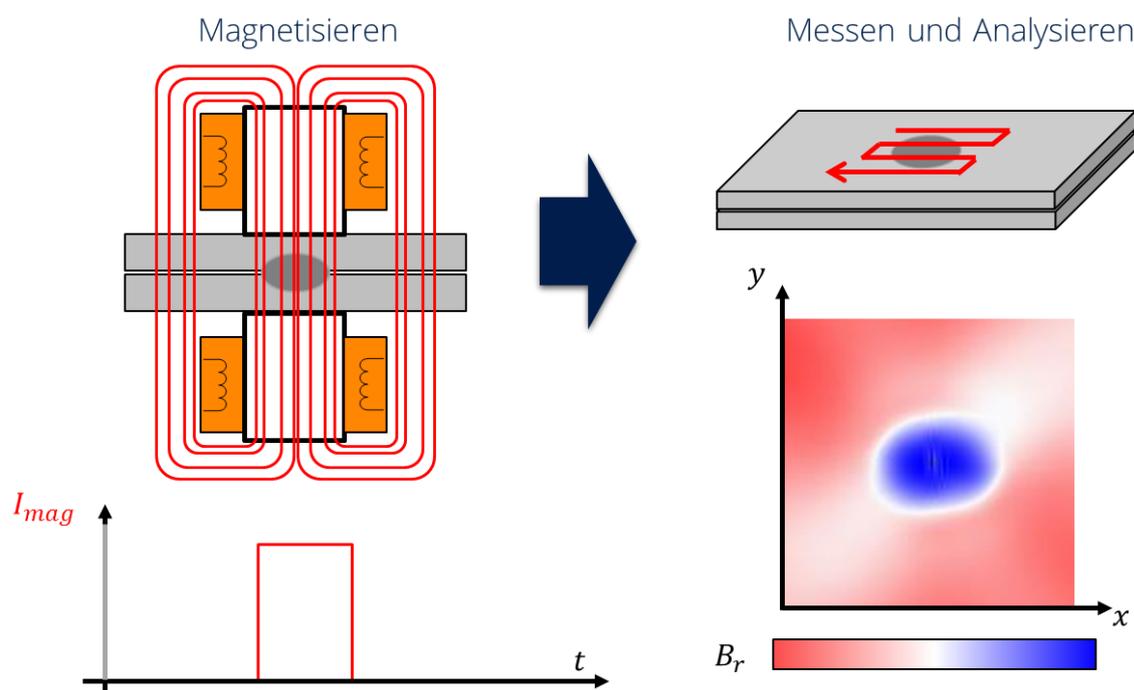
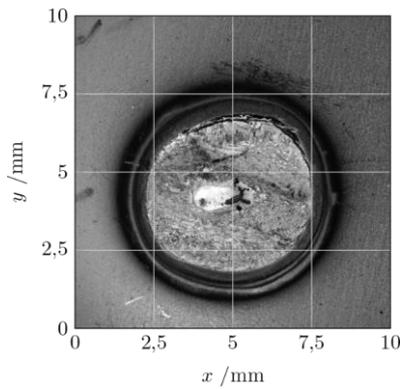
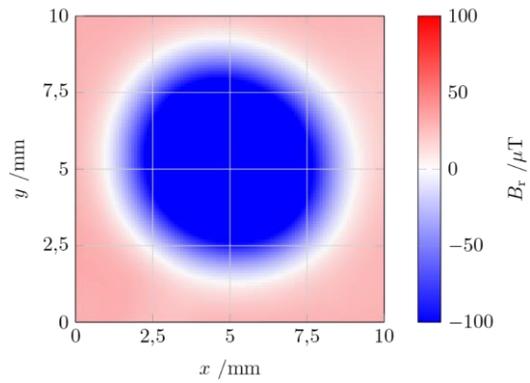


Abbildung 5: Prüfprozess der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte

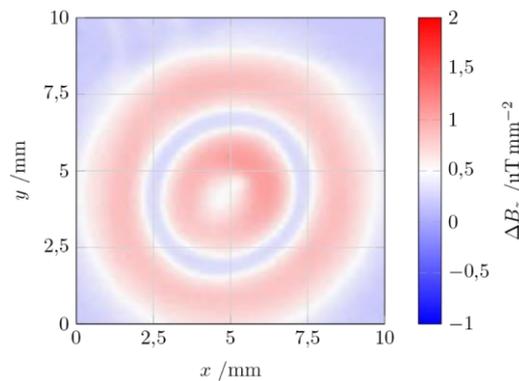
Die Auswertung der Messungen erfolgt über den in Abschnitt 7.3 selbstentwickelten Datenverarbeitungsalgorithmus. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, unterscheidet sich der Betrag der magnetischen Remanenzflussdichte in dem verschweißten und nicht verschweißten Bereich deutlich. Am Rand der Schweißlinse nimmt der Betrag der magnetischen Remanenzflussdichte stark zu. Die erste Ableitung der magnetischen Flussdichte zeigt die Maxima dieser Zunahme. Dort, wo die zweite Ableitung verschwindet, befindet sich der Rand des Schweißpunkts (Gleichung 1, S. 61) (Abbildung 6c, d, hellblauer Ring zwischen den beiden roten Ringen). Als Verbindungsfläche der Schweißverbindung wird der Flächeninhalt des umschlossenen Bereichs angenommen.



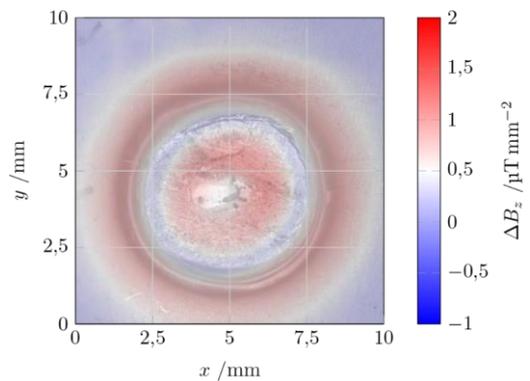
a) Schweißpunkt nach zerstörender Torsionsprüfung



b) ZfP des Schweißpunkts, Rohdaten



c) ZfP der Punktschweißung, 2. Ableitung



d) NDT der Punktschweißung, 2. Ableitung, Überlagerung mit zerstörender Prüfung (maßstabsgetreu)

Abbildung 6: Vergleich und Überlagerung einer zerstörten Probe mit den ZfP-Messergebnissen und dem angewendeten Auswertalgorithmus [20]

4 Forschungsziel

Die Analyse des aktuellen Stands von Technik, Entwicklung und Forschung der ZfP von Widerstandspressschweißverbindungen zeigt, dass es für mehrschnittige Verbindungen und extreme MDK sowie für Buckelschweißverbindungen keine serientaugliche ZfP-Methode gibt, die eine sichere Bewertung des Linsendurchmessers zulässt. Im Vorhaben IGF-Nr. 17.539 BR [6] wurde exemplarisch nachgewiesen, dass die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte dafür geeignet ist. Mit dieser Methode können Verbindungen bewertet werden, die außerhalb der Grenzen der ZfP mit Ultraschall liegen. Dazu zählen MDK, bei denen die Blechdicken deutlich voneinander abweichen, zweischnittige MDK sowie Buckelschweißverbindungen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eine objektive Prüfmethode zu entwickeln, deren Aussagekraft und Einsatzgebiet bei geringerem Aufwand und kürzerer Prüfzeit größer sind, als die der etablierten Ultraschallmethoden. Das betrifft insbesondere extreme und mehrschnittige MDK sowie Buckelschweißungen. Zum Erreichen des Forschungsziels werden folgende Arbeitshypothesen aufgestellt, die mit Hilfe der einzelnen Arbeitspakete (Abschnitt 5) überprüft werden:

1. Die erste Arbeitshypothese ist, dass durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte Widerstandspunktschweißverbindungen extremer MDK geprüft werden können.
2. Eine weitere Hypothese ist, dass auch Verbindungen austenitischer Stähle durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte geprüft werden können. Es wird davon ausgegangen, dass wegen der hohen Abkühlraten beim Widerstandspressschweißen Delta-Ferrit im Schmelzbereich entsteht und deshalb die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte aussagefähige Ergebnisse liefert.
3. Die dritte Arbeitshypothese ist, dass die Elektrodeneindringtiefe, die Blechdicke und der Werkstoff einen Einfluss auf das Prüfergebnis ausüben. Diese Randbedingungen beeinflussen das örtliche Magnetfeld und müssen deshalb genauer untersucht werden.
4. Die vierte Hypothese ist, dass die Methode der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte auch für die Prüfung von Buckelschweißungen geeignet ist.
5. Die fünfte Hypothese betrifft die Zugänglichkeit der Schweißverbindung. Es wird angenommen, dass die Prüfmethode auch bei einseitiger Zugänglichkeit angewendet werden kann.

Die Kenntnisse über die Wirkungsweise und die Einflüsse der Randbedingungen auf das Prüfergebnis sollen dafür genutzt werden, die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte als objektives und zuverlässiges Prüfverfahren für bisher nicht oder nur schwer

prüfbare Widerstandspressschweißverbindungen zu entwickeln. Somit kann das äußerst effiziente Widerstandspressschweißen auch weiterhin eingesetzt sowie für neue Einsatzgebiete angewandt werden. Die Ergebnisse werden durch Veröffentlichungen der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt und fließen in DVS-Merkblätter, wie dem DVS 2916-5 [5], ein. Dies ist durch die bereits bestehende intensive Mitarbeit im Gemeinschaftsausschuss DVS/DIN AG V 3.9 „Prüfen von Widerstandsschweißverbindungen“ gesichert.

5 Versuchsmethodik

Im Rahmen der Untersuchungen werden sowohl numerische als auch experimentelle Methoden eingesetzt. Die numerischen Simulationen dienen zur Visualisierung der physikalischen Effekte und für Sensitivanalysen. Die experimentellen Untersuchungen dienen zur Validierung und zum Funktionsnachweis. So wird ein umfassendes Prozessverständnis erarbeitet. Die experimentellen Untersuchungen werden mit folgenden MDK durchgeführt:

Tabelle 1: Vorgesehene MDK für das Widerstandspunktschweißen

Versuchsreihe	1RSW	2RSW	3RSW	4RSW	5RSW
Blech 1	DC04+ZE, t = 0,65 mm	DC04+ZE, t = 0,65 mm	DC04+ZE, t = 0,65 mm	1.4301 t = 1 mm	1.4301, t = 1 mm
Blech 2	HX340LAD+Z, t = 3 mm	22MnB5+AS, t = 2 mm	HX340LAD+Z, t = 3 mm	1.4301, t = 1 mm	1.4301, t = 2 mm
Blech 3		22MnB5+AS, t = 2 mm	HX340LAD+Z, t = 2 mm		1.4301, t = 2 mm

Tabelle 2: Vorgesehene Materialkombinationen für das Widerstandsbuckelschweißen

Versuchsreihe	1RPW	2RPW	3RPW
Blech	S235, unbeschichtet, t = 1,25 mm	HX340LAD+Z, t = 1,5 mm	HCT600XD, t = 1,4 mm
Buckelgeometrie	M6 Schweißmutter mit Ringbuckel M6 Schweißmutter mit Segmentbuckel M8-Massbolzen mit 3 Buckeln		

Tabelle 3: Vorgesehene MDK für die Modellvalidierung

Versuchsreihe	1M	2M	3M	4M
Blech 1	HX340LAD+Z, t = 1 mm			
Blech 2	HX340LAD+Z, t = 1 mm	HX340LAD+Z, t = 3 mm	HX340LAD+Z, t = 1 mm	HX340LAD+Z, t = 3 mm
Blech 3			HX340LAD+Z, t = 3 mm	HX340LAD+Z, t = 3 mm
Versuchsreihe	5M	6M	7M	8M
Blech 1	S235, t = 1 mm	S235, t = 2 mm	S235, t = 1 mm	HX340LAD+Z, t = 1,5 mm
Blech 2	S235, t = 1 mm	S235, t = 2 mm	S235, t = 2 mm	HX340LAD+Z, t = 1,5 mm

Abweichend von den vorgesehenen Materialkombinationen laut Forschungsantrag wurden die Schweißelemente und Bleche für das Widerstandsbuckelschweißen abgeändert. Die geschweißten Proben wurden vom PA mit einem Probenumfang von 420 Schweißproben zur Verfügung gestellt. Zu den vorgesehenen MDK nach Tabelle 3 wurden 5M, 6M und 7M zum Versuchsumfang hinzugefügt, um auch unbeschichtete Schweißproben der weit verbreiteten Stahllegierung S235 zu berücksichtigen. Zur Untersuchung des Einflusses der Elektrodeindrucktiefe wird die MDK der Versuchsreihe 8M für die experimentellen Versuche genutzt. Für die Magnetisierung und die Remanenzmessung werden neben den entwickelten Systemen der Forschungseinrichtung eine kommerziell verfügbare Magnetfeldkamera und zwei Hall-Sonden genutzt. Für die Validierung der Messergebnisse der Remanenzmessungen werden die Schweißproben mit kommerziell verfügbaren Ultraschallsystemen, die für die ZfP von Punktschweißverbindungen ausgelegt sind, geprüft und die Ergebnisse gegenübergestellt. Anschließend werden die Schweißproben zerstörend geprüft. Der Versuchsplan und die methodische Vorgehensweise ist in Abbildung 7 ersichtlich.

AP1 Vervollständigung und Erweiterung des Versuchsstandes, Werkstoffbeschaffung

Im ersten Arbeitspaket wurden die Versuchsstände zum Magnetisieren und zur Remanenzmessung erweitert, um auch Buckelschweißverbindungen zu prüfen. Weiter wurden die Werkstoffe beschafft und die Leihzeiten für die Impuls-Echo-Ultraschallprüfsysteme, für die Magnetfeldkamera sowie der Messsysteme der Hall-Sonden vereinbart.

AP2 Weiterentwicklung und Anwendung der numerischen Modelle sowie der Algorithmen zur Auswertung der Messdaten

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Weiterentwicklung der in IFG-Nr. 17.539 BR erarbeiteten numerischen Modelle und Algorithmen. Die Entwicklung erfolgte iterativ durch das Ineinandergreifen von experimentellen Versuchen und numerischen Simulationen. Dieses methodische Vorgehen gewährleistete eine rasche Weiterentwicklung und Verbesserung der numerischen Modelle und des Algorithmus zur Auswertung der Messdaten, da der Versuchsumfang durch die Simulation verringert (z. B. Elektrodeindrucktiefe) und die Simulation durch die Experimente (z. B. Remanenzmessung) validiert wurde. Die Methodik führte auch zu einem tieferen Verständnis der physikalischen Wirkungsweise der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte.

Für die Weiterentwicklung wurden die folgenden Eingangsgrößen variiert:

- Werkstoffe (Blechdicke, Beschichtung (beschichtet/unbeschichtet))
- Materialdickenkombinationen
- Zugänglichkeit (einseitig, zweiseitig)
- Schweißverfahren (Widerstandspunkt-, Widerstandsbuckelschweißen)

- Fügestellengeometrie, Änderung von Punkt-, Linsendurchmesser, Elektroden-eindrucktiefe durch Parametervariation
- Bauteilgeometrie (Laborprobe, Realbauteil)

Das Arbeitspaket beinhaltete drei Teilarbeitspakete:

AP2.1 Analyse der für die Magnetfeldausprägung relevanten Werkstoffkenngrößen

Dieses Teilarbeitspaket umfasste die wissenschaftliche Analyse physikalischer Kenngrößen der fünf vorgesehenen Werkstoffe. Zu diesen Größen gehören die Hystereseschleifen, magnetischen Koerzitivfeldstärken und Remanenzflussdichten. Diese sollen mit Hilfe geeigneter Messverfahren, z. B. Vibrating Sample Magnetometer, ermittelt werden. Ziel war es, diese Größen in die numerischen Modelle einzubinden und so ihren Einfluss auf das Prüfergebnis mit Hilfe numerischer Sensitivanalysen zu untersuchen. Zugleich wurden die numerischen Modelle durch die Implementierung der Werkstoffdaten in ihrer Genauigkeit verbessert.

AP2.2 Erforschen des Einflusses der Oberflächentopographie auf das Prüfergebnis

Die Untersuchung des Einflusses der Oberflächentopographie erfolgte durch experimentelle Versuche in Kombination mit numerischen Simulationen. In der Simulation wurden die Elektrodeneindrucktiefen und Linsendurchmesser unabhängig voneinander variiert, was im Versuch nicht ohne weiteres möglich ist. Im Experiment wurden die Eindrucktiefen-Linsendurchmesser-Kombinationen ermittelt und die entsprechenden Ergebnisse der Remanenzmessung mit der zugehörigen Simulation verglichen. Die unterschiedlichen Elektrodeneindrucktiefen wurden durch die gezielte Anpassung der Schweißparameter und der Elektrodengeometrie eingestellt. Alle Schweißproben wurden mit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte geprüft. Zur Erfassung der Oberflächentopographie wurden die Proben mit dem konfokal-chromatischen Messsystem vermessen (Beschreibung siehe Abschnitt 6.6). Die Linsen- bzw. Punktdurchmesser wurden an zerstörten Proben (Querschleiff, Torsion) ermittelt. Die Querschleiffe der Proben liefern zugleich die Elektrodeneindrücke. Ziel war es, Zusammenhänge und Grenzen des Elektrodeneindrucks für die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte abzuleiten.

AP2.3 Weiterentwicklung, Validierung und Anwendung des Algorithmus zur Auswertung der Messdaten

In diesem Teilarbeitspaket wurden die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeitspunkten in den vorhandenen Algorithmus zur Auswertung der Messdaten eingearbeitet und die Aussagekraft der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte experimentell überprüft. Dazu wurden Verbindungen entsprechend Tabelle 1 und Tabelle 3 untersucht. Darin waren sechs extreme MDK (RSW1, RSW2, RSW3, M2, M3, M4), neun

Buckelschweißverbindungen und zwei Verbindungen mit austenitischem Stahl enthalten. Im Vorfeld wurden die Schweißbereiche für alle Versuchsreihen ermittelt. Pro Versuchsreihe wurden sechs Parametersätze mit je zehn Schweißproben analysiert. Besonders wichtig waren die unteren Grenzbereiche in der Nähe des Mindestlinsendurchmessers ($d_{n.min}=3,5\sqrt{t}$ beim Widerstandspunktschweißen). In diesen Grenzbereichen wurden bei Bedarf zusätzlich Proben geschweißt, deren Verbindungsquerschnitt knapp unter- bzw. oberhalb des zulässigen Wertes lag. Alle Proben wurden durch zweimalige Messung der Remanenzflussdichte an Ober- und Unterseite sowie mit den Impuls-Echo Ultraschallprüfsystemen zerstörungsfrei geprüft. Zur Ermittlung der Anbindungsflächen bzw. Punktdurchmesser wurden anschließend alle Proben zerstörend geprüft (von zehn Schweißproben je Parametersatz: sieben durch Torsion und drei durch Querschleiff). Die Weiterentwicklung des Algorithmus zur Auswertung der Messdaten der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte erfolgte an Hand von fünf Parametersätzen je ausgewählter Versuchsreihe (Trainingsmenge). Der sechste Parametersatz wurde zum Test des Algorithmus genutzt (Testmenge). Durch die Unabhängigkeit der Prüfergebnisse von Trainings- und Testmenge wurde eine hohe Qualität der Aussagekraft des Algorithmus zur Auswertung der Messdaten sichergestellt.

AP3 Funktionsnachweis und Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte

Im dritten Arbeitspaket wurde der Funktionsnachweis der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an seriennahen Bauteilen erbracht. Für jeden untersuchten Anwendungsfall (extreme MDK, und Buckelschweißverbindung) wurden Bauteile geschweißt und geprüft, die durch den PA zur Verfügung gestellt wurden. So wurden die fertigungsnahen Randbedingungen, wie z. B. Flanschbreite, Einschränkungen in der Zugänglichkeit (einseitig, zweiseitig), experimentell berücksichtigt. Der Vergleich von bildgebender Analyse der Remanenzflussdichte mit der zerstörenden Prüfung lieferte den Funktionsnachweis. Durch numerische Sensitivanalysen wurden die Einflüsse der einzelnen Randbedingungen untersucht und gewichtet. Ziel war es, die Grenzen der Prüfmethode, die sich durch fertigungsbedingte Randbedingungen ergeben, zu erarbeiten.

AP4 Zusammenfassen der Ergebnisse, Zwischenberichte, Abschlussbericht, Ergebnistransfermaßnahmen

Die Ergebnisse wurden und werden entsprechend des Plans zum Ergebnistransfer laut Abschnitt 12 veröffentlicht.

		Methodik		
Arbeitspakete		Experimente		Simulation
AP1	Vervollständigung und Erweiterung des Versuchsstandes, Werkstoffbeschaffung	Erweiterung der Prüf- und Messvorrichtung auf polare Abtastung		Implementieren geometrischer Randbedingungen
AP2 Weiterentwicklung und Anwendung der numerischen Modelle sowie der Algorithmen zur Auswertung der Messdaten	AP 2.1	Analyse der für die Magnetfeldausprägung relevanten Werkstoffkenngrößen	Analyse (für 5 Werkstoffe) der: - Koerzitivfeldstärken - Hystereseschleifen - Remanenzflussdichten	Messdaten in Simulation einbinden Einflüsse der Werkstoffkenngrößen durch Sensitivanalysen untersuchen
	AP 2.2	Erforschen des Einflusses der Oberflächentopographie auf das Prüfergebnis	ca. 200 Versuche: Elektrodeneindrucktiefe variieren Ergebnisanalyse durch topographische Messungen und Querschliffe	Simulativer Nachweis durch Sensitivanalysen zum vertiefenden Verständnis der Wirkungsweise
	AP 2.3	Weiterentwicklung, Validierung und Anwendung des Algorithmus zur Auswertung der Messdaten	ca. 1500 Versuche Schweißbereiche stichprobenartig überprüfen Analyse von 6 Parametersätzen je Versuchsreihe mit je 10 Proben (inkl. Grenzbereiche) ein-, beidseitige Magnetisierung und Remanenzmessung Systemvergleich mit etabliertem Ultraschallprüfsystem Gegenüberstellung von ZfP und ZP Validierung des Algorithmus zur Auswertung der Remanenzmessungen durch Trainings- und Testmengen	Schweißbereiche ermitteln Numerische Nachbildung Vergleich durch Sensitivanalysen
AP3	Funktionsnachweis und Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte Funktionsnachweis an seriennahen Bauteilen für extreme Materialdickenkombinationen und Buckelschweißverbindungen → Berücksichtigung fertigungsbedingter Randbedingungen (Flanscbreite, Zugänglichkeit (einseitig, beidseitig)) Numerische Sensitivanalysen zum Wichten der einzelnen Randbedingungen Ableiten von Grenzen der Prüfmethode durch diese Randbedingungen			
AP4	Zusammenfassen der Ergebnisse, Zwischen-, Abschlussbericht, Ergebnistransfermaßnahmen Aktuellen Stand und Verlauf des Vorhabens in Zwischenberichten präsentieren Ergebnisse in einem allgemein zugänglichen Abschlussbericht zusammenfassen Ergebnistransfer			

Abbildung 7: Versuchsplan für das Forschungsvorhaben IGF 19.208 BR

6 Eingesetzte Anlagentechnik

6.1 Versuchsaufbau zum Magnetisieren

Zum Magnetisieren der Proben für die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte wird ein Versuchsaufbau mit zwei gleichgerichteten Spulen verwendet (Abbildung 8). Die Spulen besitzen 133 Wicklungen und haben einen Spulenkern aus der Stahllegierung S235 oder Kunststoff mit einem Durchmesser von 16 mm. Die Magnetisierungszeit beträgt weniger als 100 ms.

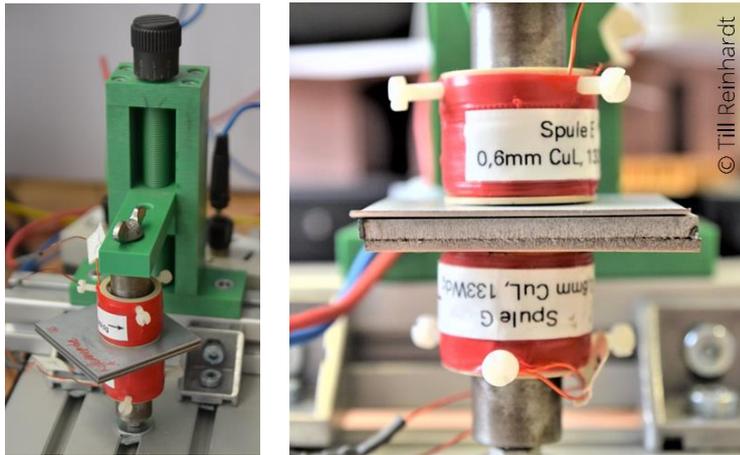


Abbildung 8: Magnetisierungsvorrichtung [21]

6.2 Versuchsaufbau zur Messung der Remanenzflussdichte

Der Versuchsaufbau der Messvorrichtung RMV02 ist in Abbildung 9 zu sehen. Während der Projektlaufzeit wurde das Messsystem kontinuierlich weiterentwickelt. Zum Messen der Flussdichte werden Hallsensoren verwendet. Zu Projektbeginn wurde dafür der in [6] entwickelt Messaufbau mit dem Hallsensor A1324UA der Firma Allegro MicroSystems [22] mit einem Messbereich von ± 50 mT und einer Empfindlichkeit von 50 mV/mT als einzelner Sensor verwendet. Für kürzere Messzeiten wurden im Rahmen der Diplomarbeit [23] zwei unterschiedliche Hallsensor-Arrays aufgebaut. Abbildung 10 zeigt beide Varianten, die mit Hallsensoren vom Typ DRV5053VA (Texas Instruments) [24] mit einer Empfindlichkeit von -90 mV/mT bestückt sind. Das Linien-Array stimmt vor der Messung die Messbereiche der einzelnen Sensoren, die sich z. B. durch Fertigungstoleranzen ergeben, automatisiert aufeinander ab. Die Ergebnisse in [23] bestätigen die angestrebten kürzeren Messzeiten, die nur noch ein Viertel der Messzeit des Einzelsensors betragen. In [21] wurde neben den schon beschriebenen Sensorvarianten mit starren Halterungen eine flexible und leicht federnde Halterung (Variante 2, Abbildung 11 links) entwickelt und erprobt. Diese Variante zeigte in [21] deutliche Vorteile gegenüber der starren Varianten, sodass diese nach ihrer Erprobung für die Messungen der Remanenzflussdichte genutzt wurde. Dies betrifft insbesondere die Messungen der Unterseiten der Proben nach Tabelle 1 und Tabelle 3 (siehe Abschnitt 7.3 für näherer

Erläuterungen). Für die Auswertung der Messergebnisse werden diese in einem Intensitätsdiagramm durch Falschfarben dargestellt (Abbildung 11 rechts).

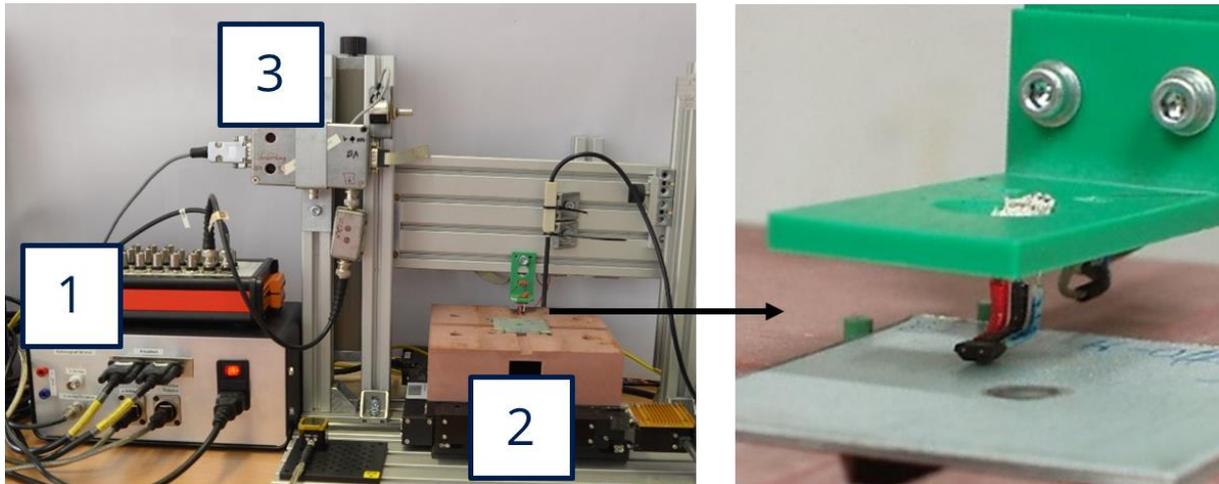


Abbildung 9: Messvorrichtung RMV02 mit Messkarte, Motorsteuerung (1), Kreuztisch mit Hallsensor (2) zum Messen der Remanenzflussdichte und Messverstärker (3)

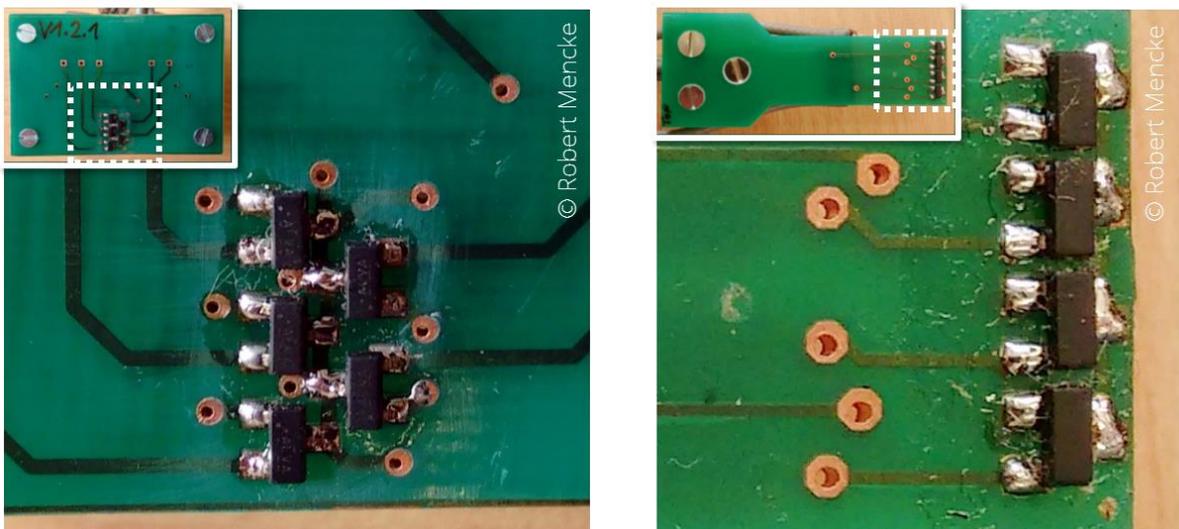


Abbildung 10: Aufbau der Hallsensor-Arrays: links: 2D-Array mit fünf Hallsensoren (2+3); rechts: 1D-Array mit vier Hallsensoren

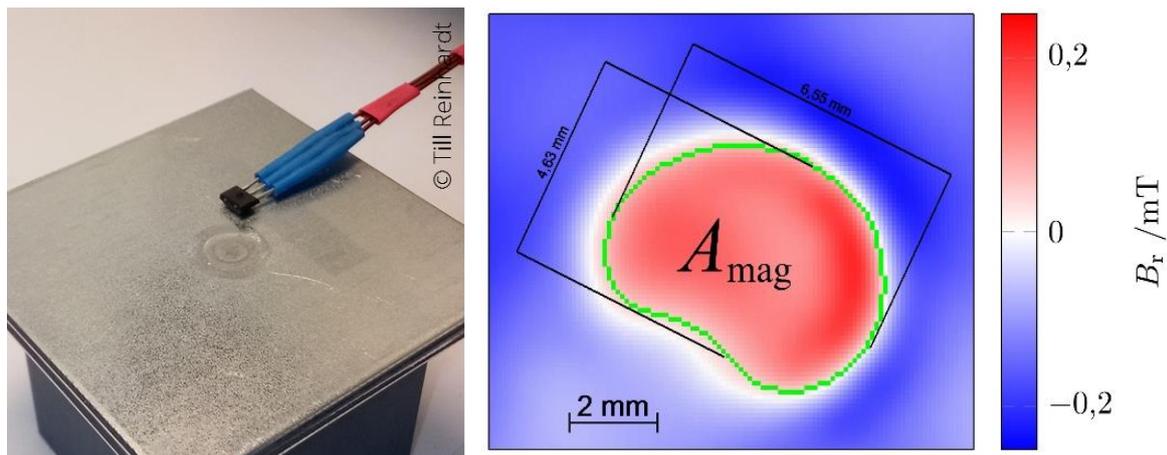


Abbildung 11: Hallsensor zum Messen der Remanenzflussdichte Variante 2 (links) [21] und Darstellung der Messergebnisse im Intensitätsplot durch Falschfarben (rechts)

Als weitere Messsysteme wurden vom PA eine Magnetfeldkamera mit Steuer- und Auswertesoftware und zwei Hallsonden mit zugehörigem Messsystem zur Verfügung gestellt. Die Magnetfeldkamera Minicube1D der Firma Magcam NV verfügt über ein integriertes 2D-Hallsensor-Array mit 128×128 Magnetfeldsensoren auf einem einzigen Chip mit einer Größe von $12,7 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$ [25]. Das Messsystem wurde für die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung gestellt. Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG hat das Messsystem Magnetoscope 1.070 mit axialer und transversaler Hall-Sonde ebenfalls für die gesamte Projektlaufzeit zur Verfügung gestellt.

Bei dem eigenentwickelten Messaufbau RMV02 der Technischen Universität Dresden und den Hall-Sonden der Firma Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG handelt es sich um punktuelle Messsensoren. Aus diesem Grund wird mit diesen Systemen die Flussdichte flächig durch mäanderförmiges Scannen oberhalb der Blechoberfläche gemessen. Je nach Scanauflösung dauert eine Messung i.d.R. vier Minuten. Durch die flächige Sensoranordnung der Magnetfeldkamera Magcam Minicube1D beträgt die Messzeit weniger als 10 Sekunden, dabei wird über zehn Einzelmessungen gemittelt. Die Messzeit der Magnetfeldkamera für eine Messung dauert 0,7 Sekunden.

Abbildung 12 zeigt den Messaufbau zum Vergleich der Sensoren durch gleichartiges Überfahren eines Dauermagneten mit variierendem Abstand und zum Ermitteln der maximal gemessenen Flussdichte während der Messungen.

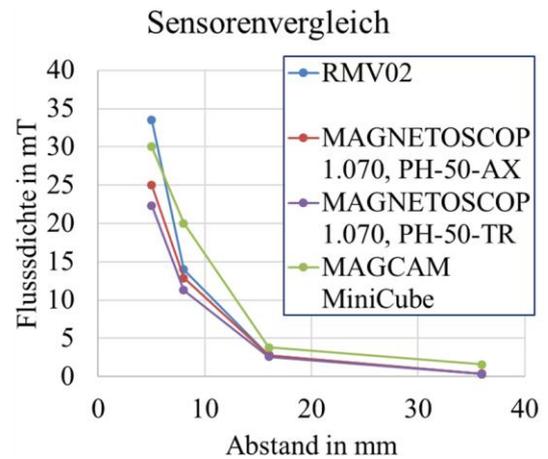
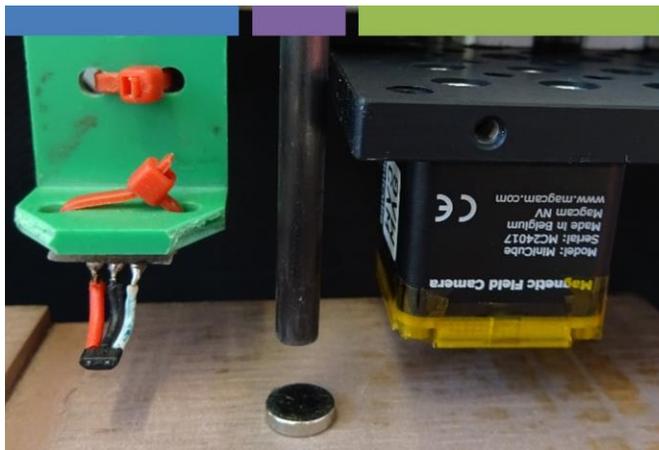


Abbildung 12: Hallensensoren zur Messung der magnetischen Flussdichte und Vergleich der Sensoren durch gleichartiges Überfahren eines Dauermagneten

6.3 Prüfgeräte für die Ultraschallmessungen

Die Ultraschalltechnik ist im Bereich der ZfP weit verbreitet. Für das Widerstandspunktschweißen gibt es am Markt eine große Auswahl an verschiedenen Prüfsystemen. Die IfU Diagnostic Systems GmbH unterstützte das Vorhaben mit dem bildgebenden Ultraschallprüfsystem RSWA F1-Prüfsystem der Firma Tessonics Inc., Kanada (Abbildung 13). Das Gerät wird im Bericht als US1 bezeichnet. Der Prüfkopf ist mit einem US-Wandler-Array mit 52 Einzelschwingern ausgestattet.



Abbildung 13: Ultraschallsystem RSWA F1-Prüfsystem der Firma Tessonics Inc. (US1) [26] für die Vergleichsuntersuchungen in Abschnitt 7

In den Vergleichsuntersuchungen wurde ein weiteres Bildgebendes Ultraschallprüfsystem, im Bericht als US2 bezeichnet, eingesetzt.

6.4 Versuchsstände zur zerstörenden Prüfung

6.4.1 Präparation von Querschliffproben

Für die Bewertung der Schweißverbindungen werden 30% der Punktschweißproben nach Tabelle 1 und Tabelle 3 als Mikroschliff nach den Empfehlungen der Arbeitsgruppe V 3.9 „Prüfen von Widerstandsschweißverbindungen“ des DVS e. V. und dem Entwurf

der Neufassung des DVS-Merkblatts 2916-4 [27] präpariert. Die Schliffebene wurde immer senkrecht zur Ausrichtung der Schweißzange gewählt, wie Abbildung 14 verdeutlicht.

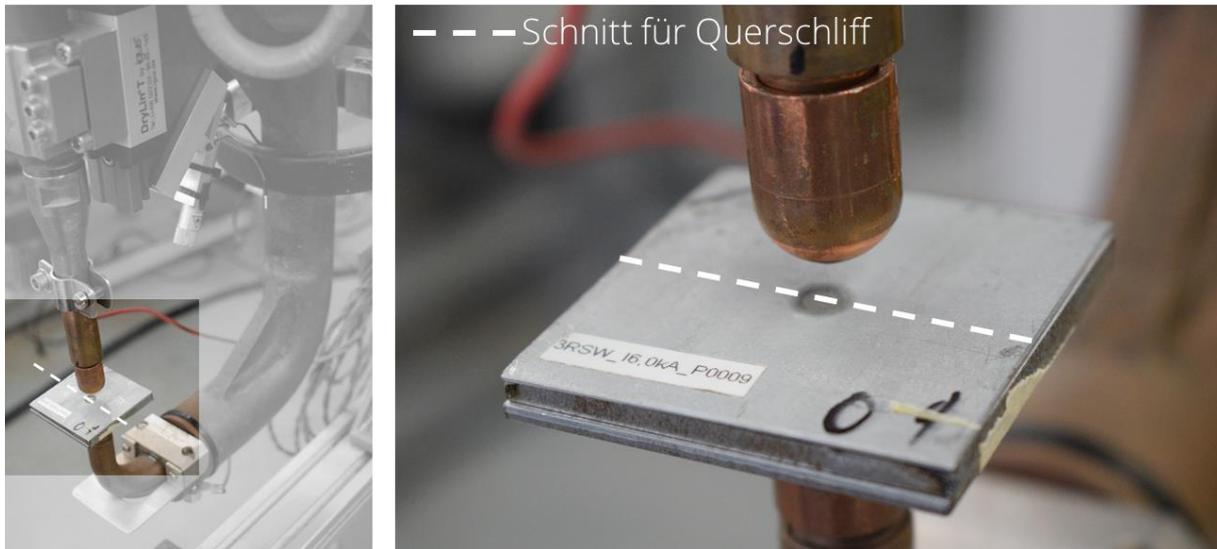


Abbildung 14: Darstellung der Schnittlinie für die Schliffebene der Querschliffproben

6.4.2 Torsionsprüfstand

Die Torsionsprüfung hat gegenüber der Meißelprüfung den Vorteil, dass die Schweißpunkte sehr gut nach DIN EN ISO 14329 [28] zu vermessen sind. Es treten i. d. R. keine Materialreste an den Bruchflächen auf, die eine genaue Messung mit z. B. einem Messschieber verhindern. Für die ZP der Schweißproben kam der instrumentalisierte Torsionsprüfstand der Professur für Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden zum Einsatz (Abbildung 15). Die Eigenentwicklung des Versuchsstands garantiert die automatische Ausrichtung der Rotationsachsen von Antrieb, Schweißpunkt und Probeneinspannung. Die Entwicklung wurde in [29] umgesetzt. Mit dem Versuchsstand ist die automatisierte Zerstörung von Schweißproben mit einer konstanten und geregelten Winkelgeschwindigkeit und kontinuierlicher Messwertaufnahme von Torsionsmoment M_T und Winkel φ möglich. Die Kenndaten des Prüfstands sind in Tabelle 4 zusammengefasst. In DIN EN ISO 17653 [30] wird eine Winkelgeschwindigkeit von $\omega = 1080^\circ/\text{min}$ für Punktschweißverbindungen empfohlen. Im DVS Merkblatt 2916-1 [31] wird ein Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf das Prüfergebnis genannt, ohne Richtwerte zu nennen und den Einfluss näher zu beschreiben. Nach eigenen Vorversuchen im Rahmen der Studienarbeit [29], wurde die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 1080^\circ/\text{min}$ als zu hoch eingeschätzt. Die hohe Prüfgeschwindigkeit birgt zudem die Gefahr, Schweißproben beim Verkanten zu verformen und für eine Wiederholungsmessung unbrauchbar zu machen. Die Proben werden mit einer Winkelgeschwindigkeit

$\omega = 100^\circ/\text{min}$ bis zum Bruch tordiert. Für die Torsionsprüfung wurden 70% alle Punktschweißproben nach Tabelle 1 und Tabelle 3, sowie 30% der Buckelschweißproben nach Tabelle 2 zerstörend geprüft.

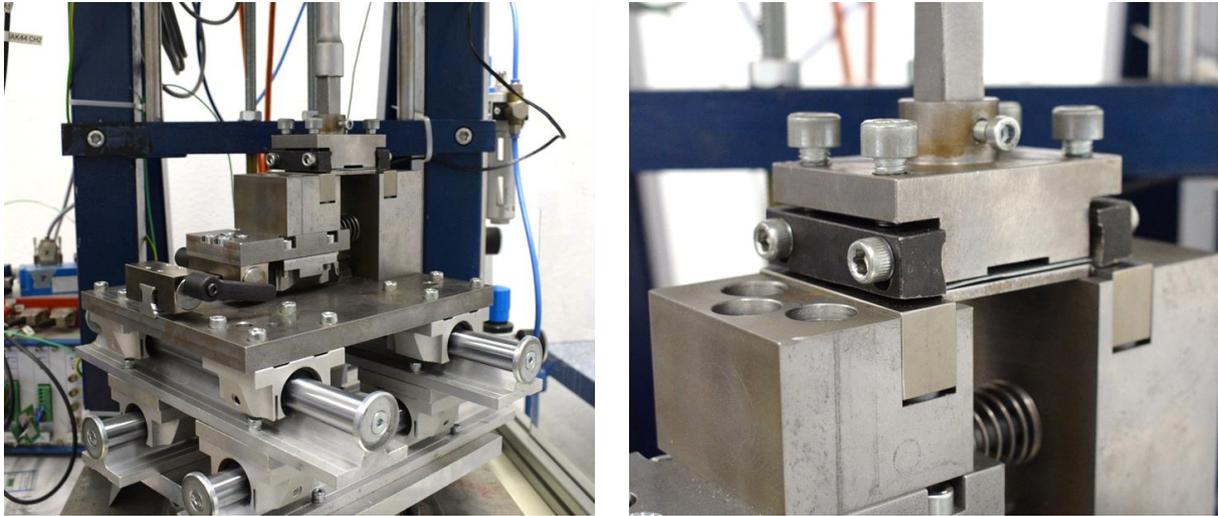


Abbildung 15: Versuchsstand zur Torsionsprüfung der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage

Tabelle 4: Kennwerte des Versuchsstands zur Torsionsprüfung der Technischen Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage

Max. Torsionsmoment M_T	250 Nm
Winkelgeschwindigkeit ω	0 – 25 min ⁻¹ (0 – 9000°/min), konstant, variabel

6.4.3 Pendelschlagwerk

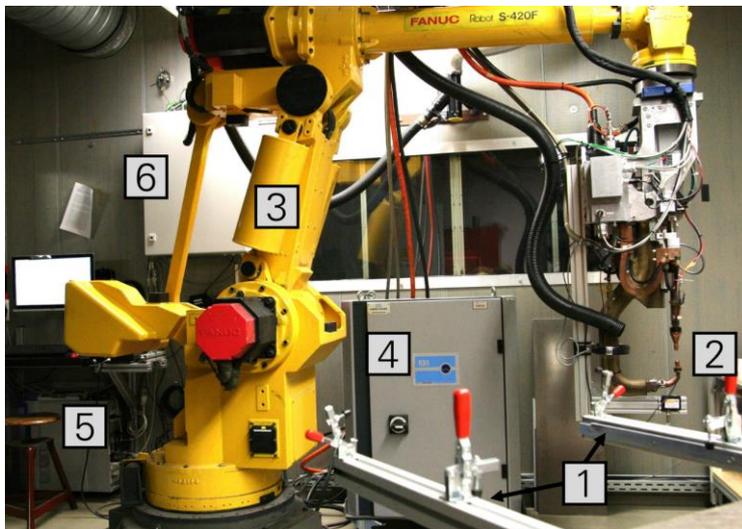
Weitere 30% der Buckelschweißverbindungen nach Tabelle 2 wurden schlagartig mit dem Pendelschlagwerk zerstörend geprüft. Dazu wurde das vorhandene Pendelschlagwerk am Institut für Fertigungstechnik der Technischen Universität Dresden für die Aufnahme der Buckelschweißproben modifiziert. Der Auslenkwinkel des Pendels wurde bei den Versuchen kontinuierlich mit 50 kHz gemessen. Der Pendelhammer hatte ein Gewicht von 30 kg.

6.4.4 Zugprüfmaschine

Für die quasistatischen Kopfzugversuche wurden ebenfalls 30% der Buckelschweißverbindungen geprüft. Die Proben wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von $v = 10 \text{ mm/min}$ bis zum Bruch bzw. bis zum Abfallen der Maximalkraft F_{max} auf $0,3F_{max}$ geprüft.

6.5 Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen

Für die Ermittlung der Schweißbereiche und Durchführung der Schweißversuche wurde der Versuchsstand an der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage eingesetzt (Abbildung 16). Die Kenndaten des Versuchsstands sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



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

Abbildung 16: 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	300 mm
Kraftsystem	servoelektrisch von 500 N – 3,6 kN
Messdatenaufzeichnung	Goldammer GmbH: G0S-1034-4

6.6 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 17 werden die Messprinzipien der konfokalen Mikroskopie gezeigt. Eine Lochblende (Pinhole) mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern wird von einer Weißlichtquelle beleuchtet (s. Abbildung 17 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 17 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 17 rechts). Der Messbereich solcher Sensoren liegt zwischen 100 μm bis hin zum Millimeterbereich bei einer Auflösung von ca. 10 nm – 30 nm vertikal und einem Mikrometer lateral. Bei einem chromatisch-konfokalen Mikroskop wird ein Spektrometer eingesetzt und das fokussierende Objektiv besitzt eine möglichst große chromatische Aberration.

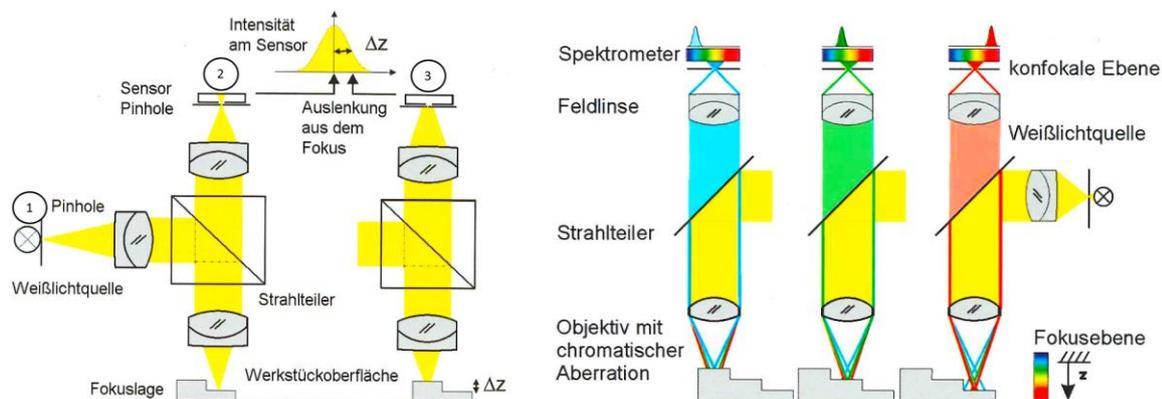


Abbildung 17: Konfokale Mikroskopie (links) und chromatisch-konfokale Mikroskopie (rechts) - Funktionsprinzip [32, S. 31 ff.]

Die Erfassung der Oberflächentopographien der Schweißpunkte erfolgte mit dem chromatisch-konfokalen Präzisionsgerät CHRcodile E der Firma Precitec. Dieses System verfügt über einen Messfleckdurchmesser von 15 μm und einer Tiefenauflösung von 300 nm bei einer absoluten Messunsicherheit von 3 μm (Abbildung 18).

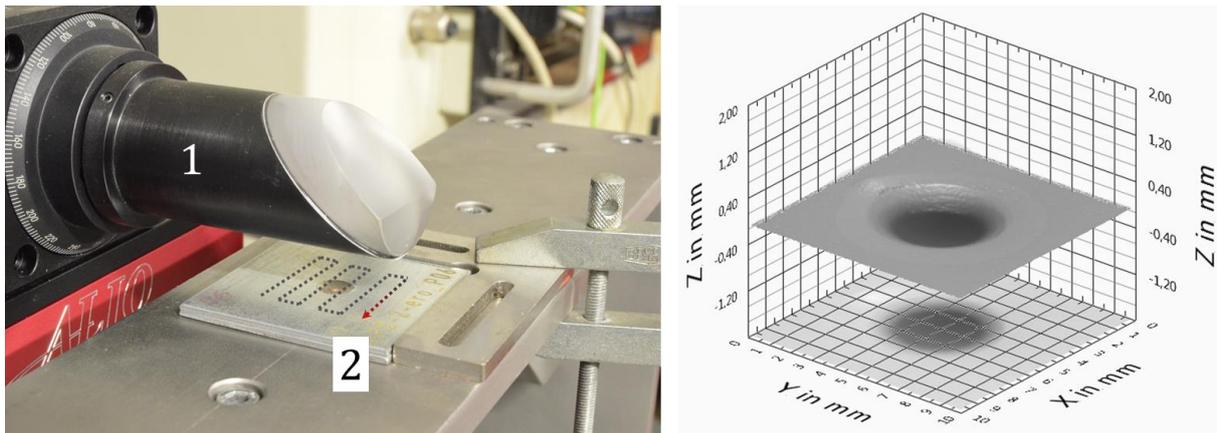


Abbildung 18: Messkopf (1) des chromatisch-konfokalen Mikroskops der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage zur Messung der Oberflächentopographie von Schweißproben (2) (links) und Messergebnis eines Schweißpunktes (rechts)

7 Versuchsergebnisse und Diskussion

In den folgenden Auswertungen werden die Messergebnisse der ZfP von Remanenzmessung und Ultraschallmessung den Messergebnissen der ZP von Torsion und Querschleif miteinander vergleichen und gegenübergestellt. Dabei werden die Linsendurchmesser d_n am Querschleif und die Punktdurchmesser d_w anhand der Torsionsproben nach DIN EN ISO 14329 [28] ermittelt (Abbildung 19, Abbildung 20, links). Bei zweischnittigen Proben werden die Durchmesser je Fügeebene (FE) gemessen. Die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte ist geeignet die Anbindungsfläche A der Schweißverbindung je Fügeebene zu bewerten. Jedes der vergleichenden Verfahren liefert für die Bewertung und Prüfung der Schweißverbindungen einen Durchmesser. Dieser wird in Form eines direkt gemessenen Wertes im Querschleif bzw. als Ausgabewert bei den Ultraschallmessungen oder als Mittelwert aus zwei gemessenen Durchmessern bei der Torsionsprüfung angegeben. Für die bessere Einordnung aller Messergebnisse werden die ermittelten Flächen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte ebenfalls als mittlere Durchmesser der Flächen angegeben, bzw. ist es im Auswerteprogramm möglich, die Durchmesser manuell in Anlehnung an [28] zu ermitteln.

Für die richtige Einordnung der Messergebnisse zu bemerken, dass die Remanenzmessung einen beliebigen Messbereich, i. d. R. 15 mm x 15 mm, scannen kann. Des Weiteren sind noch keine Einschränkungen bezüglich der messbaren Einzelblechdicken innerhalb einer MDK bekannt. Das eingesetzte Ultraschallsystem der Firma Tessonic RSWA F1 (US1) kann konstruktionsbedingt maximale Durchmesser von 8 mm bei einer maximalen Einzelblechdicke von 2,4 mm erfassen. In einem Großteil der untersuchten MDK kommen Bleche mit Einzelblechdicken von 3 mm vor.

Die statistische Auswertung erfolgt mit Hilfe von Box-Plots. Dabei werden die Messabweichungen zwischen ZfP und ZP pro Probenseite und Fügeebene bewertet. Abbildung 20, rechts, zeigt beispielhaft die Beschreibung der verwendeten Box-Plots. Dabei entspricht die Seite der Messung „oben“ immer der Bewertung der Fügeebene 1 (FE1) und die Messseite „unten“ der FE1 bei einschnittigen Schweißproben bzw. Fügeebene 2 (FE2) bei zweischnittigen Proben.

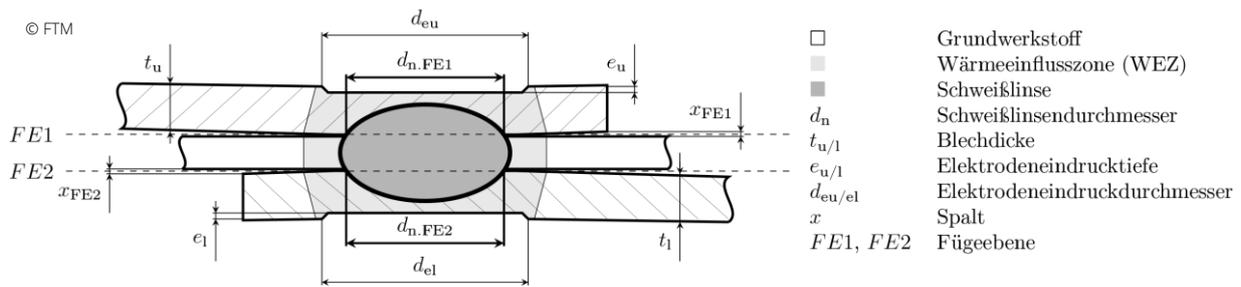


Abbildung 19: Schematische Darstellung einer zweischnittigen Schweißverbindung im Querschnitt mit den wichtigsten geometrischen Kenngrößen

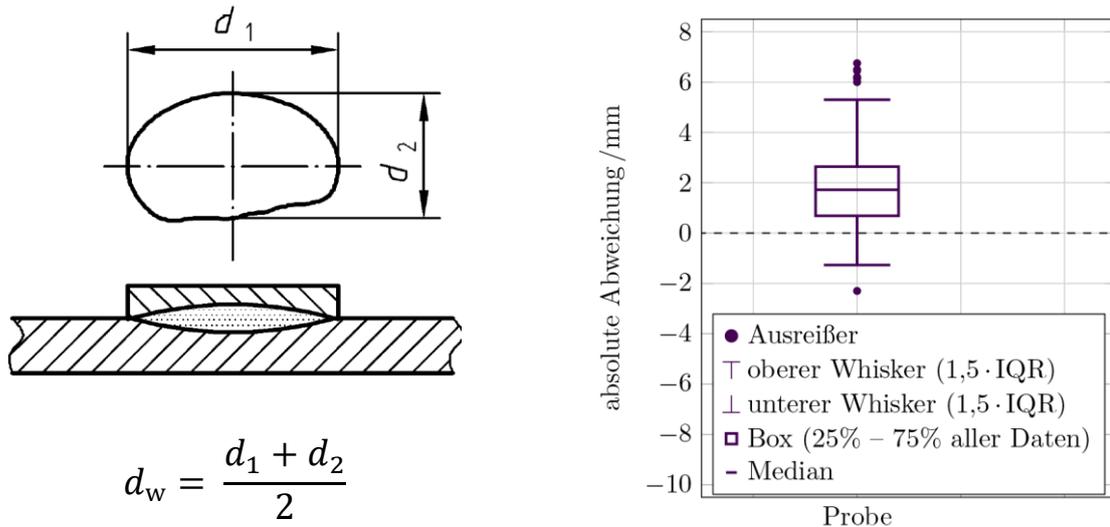


Abbildung 20: Schematische Darstellung zur Ermittlung des Punktdurchmessers nach DIN EN ISO 14329 [28] (links) und Beschreibung der verwendeten Box-Plots für die statistischen Auswertungen (rechts, IQR: Interquartilsabstand)

7.1 Ermitteln der Schweißparameter

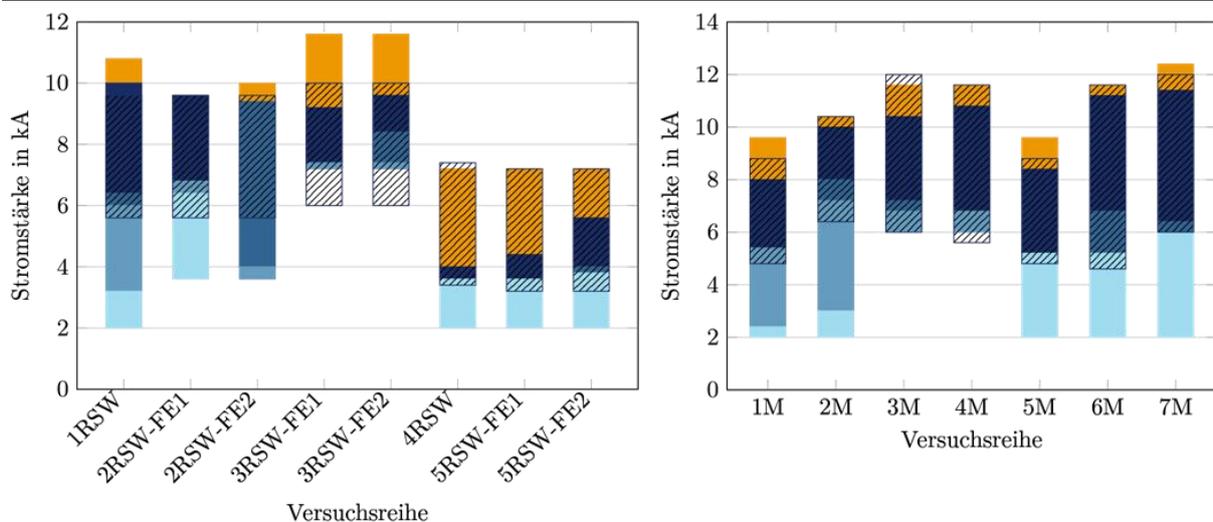
Die Schweißparameter der Versuchsreihen nach Tabelle 1, Tabelle 3 (außer 8M) wurden zunächst simulativ erarbeitet. Dabei stellte sich jedoch schnell heraus, dass die experimentelle Überprüfung zielführender war. Dazu wurden Wachstumskurven mit konstanter Schweißzeit und Elektrodenkraft und variierendem Schweißstrom in Anlehnung an DIN EN ISO 14327 [33] und SEP 1220-2 [34] für jede Versuchsreihe ermittelt. Ausgehend von den jeweiligen Wachstumskurven, wurden sechs Parametersätze je Versuchsreihe zum Schweißen der Versuchsproben abgeleitet. Die Parametersätze umfassen den Bereich von keiner vorhandenen Schweißverbindung bzw. vom Entstehungsbeginn dieser in einer der FE bis hin zu vorhandenen Schweißverbindungen in allen FE (Abbildung 21). Die Wachstumskurven mit den Parametersätzen im Detail sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 zu finden.

Tabelle 6: Schweißparameter für die MDK der Versuchsreihen RSW

MDK	Kraft /kN	Vorhaltezeit /ms	Nachhaltezeit /ms	Schweißstrom /kA	Schweißzeit /ms
1RSW	2,0	400	400	5,6 – 9,6 $\Delta I = 0,8$	600
2RSW	3,5	400	400	5,6 – 9,6, $\Delta I = 0,8$	1000
3RSW	2,5	400	400	6,0 – 10,0, $\Delta I = 0,8$	400
4RSW	2,7	120	120	3,6 – 7,6, $\Delta I = 0,8$	220
5RSW	3,5	400	400	3,2 – 7,2, $\Delta I = 0,8$	300

Tabelle 7: Schweißparameter für die MDK der Versuchsreihen M

MDK	Kraft /kN	Vorhaltezeit /ms	Nachhaltezeit /ms	Schweißstrom /kA	Schweißzeit /ms
1M	2,7	120	120	4,8 – 8,8, $\Delta I = 0,8$	240
2M	3,0	400	400	6,4 – 10,4, $\Delta I = 0,8$	200
3M	3,0	400	400	6,0 – 12,0, $\Delta I = 1,2$	400
4M	3,0	400	400	5,6 – 11,6, $\Delta I = 1,2$	1000
5M	2,7	200	200	4,8 – 8,8, $\Delta I = 0,8$	220
6M	3,0	400	400	4,6 – 11,6, $\Delta I = 1,4$	480
7M	3,0	400	400	6,0 – 12,0, $\Delta I = 1,2$	200



■ Fehlschweißung ■ Lötverbindung ■ Scherbruch ■ Ausknöpfbuch ■ Spritzer ■ untersuchter Bereich

Abbildung 21: Zusammenfassung der Wachstumskurven und den jeweiligen untersuchten Bereichen

7.2 Untersuchung von Einflussgrößen auf die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte

7.2.1 Werkstoffkenngrößen und Weiterentwicklung der FE-Modelle

Für die Weiterentwicklung der Finite-Elemente-Modelle (FE-Modelle) aus [6] ist es notwendig, die Probengeometrien detaillierter abzubilden und Werkstoffkenndaten in die Modelle zu implementieren.

7.2.1.1 Beschreibung der FE-Modelle

Die FE-Modelle basieren auf den Modellen, die in [6] entwickelt wurden. Als Simulationssoftware kommt ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.2 zum Einsatz. Es handelt sich um ein zweidimensionales axialsymmetrisches Modell. Als Elementtypen werden die Elemente Plane53 und Plane233 eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein zweidimensionales Element mit acht Knotenpunkten. Es wurde ein Modell mit zwei Blechen und ein Modell mit drei Blechen bzw. in [35] ein einziges Modell, worin wahlweise die Blechanzahl zwischen zwei und drei eingestellt werden kann, entwickelt. In Abbildung 22 ist die Geometrie des FE-Modells mit den einzelnen Komponenten am Beispiel einer Zweiblechverbindung dargestellt. Die Modelle sind durch einen hohen Grad der Parametrisierung schnell für verschiedene Untersuchungen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte eingestellt. Zu den Parametern gehören:

- Blechdicke (Anzahl)
- Werkstoff, siehe Abschnitt 7.2.1.2
- Linsendurchmesser und Linsenlänge
- Elektrodeneindruck: Tiefe, Durchmesser
- Elektrodengeometrie: Kappenradius
- Blechbreite, Spaltmaß zwischen den Blechen
- Abstand der Spulenkerne zur Blechoberfläche
- Anzahl der Spulenwicklungen, Drahtdurchmesser, Spulenaufbau (Windungszahl in radialer und axialer Richtung)
- Magnetisierungsstrom
- Magnetisierungsart: einseitig, beidseitig

Der Nutzen der FE-Simulation zeigt sich in den folgenden Abschnitten. U. a. ist es durch die Simulationen möglich, den Magnetisierungsprozess besser zu verstehen. Hierfür können geometrische Parameter eines Schweißpunktes entkoppelt voneinander betrachtet und deren jeweiliger Einfluss auf die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte näher untersucht werden. Des Weiteren dauert eine Simulation nur wenige Minuten, wodurch viele mögliche Szenarien nachgebildet werden können. In

Tabelle 8 sind die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten numerischen Simulationen zusammengefasst. Für die Simulationen mit einseitiger Magnetisierung wurden im FE-Modell die untere Spule (5) und der untere Spulenkern (7) mit Materialdaten der Luft definiert. Des Weiteren wurde in der unteren Spule kein Magnetisierungsstrom als Randbedingung vorgegeben.

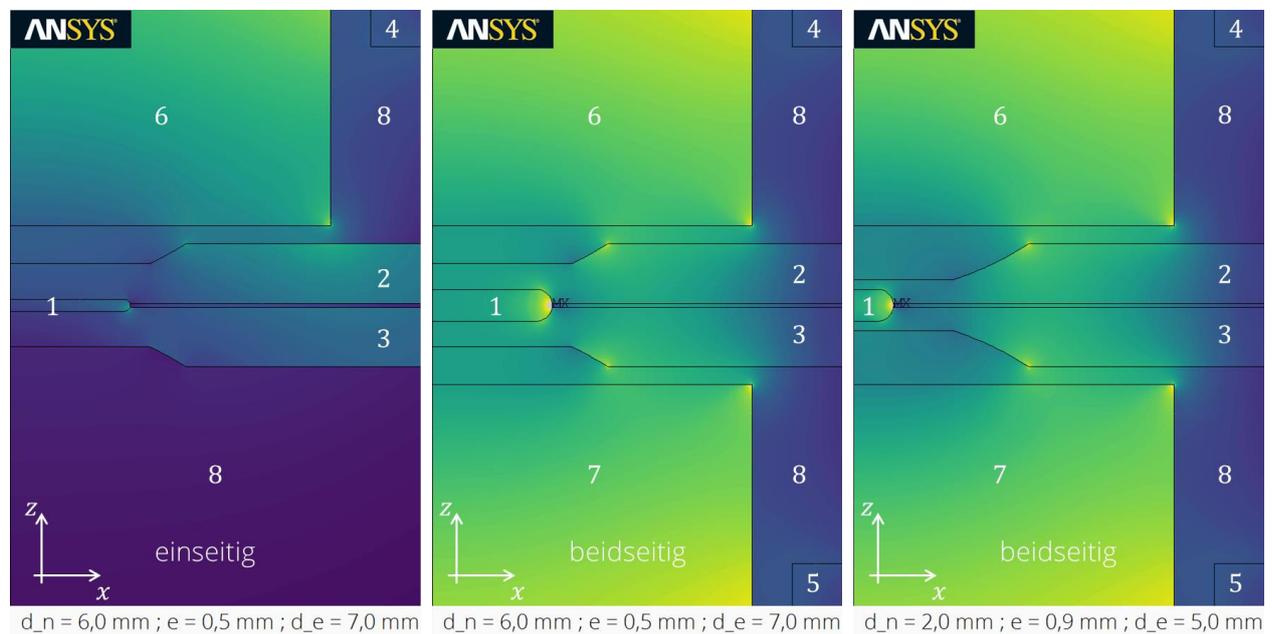


Abbildung 22: Simulierte FE-Modelle beispielhaft einseitige und beidseitige Magnetisierung und für unterschiedliche Linsendurchmesser für Zweiblechverbindungen (1: Schweißlinse; 2: oberes Blech; 3: unteres Blech; 4: obere Magnetisierungsspule; 5: untere Magnetisierungsspule; 6: oberer Spulenkern; 7: unterer Spulenkern; 8: Luft)

Tabelle 8: Übersicht der numerischen Simulationen

untersuchter Einflussparameter					
Elektrodeneindruck					
Randabstand					
variierte geometrische Parameter					
variierte Bereiche	t_u t_l	d_n	e	d_e	$s(t_u)$ $s(t_l)$
unterer Wert	1,0 mm 1,0 mm	2 mm	0,1 mm	2 mm	5 mm 5 mm
oberer Wert	3,0 mm 3,0 mm	9 mm	0,9 mm	10 mm	25 mm 25 mm
Schrittweite	0,5 mm; 1,5 mm 0,5 mm; 1,5 mm	1 mm	0,1 mm	1 mm	2,5 mm 2,5 mm

7.2.1.2 Ermittlung der Werkstoffkenngrößen

Die magnetischen Hystereseschleifen konnten in [35, 36] durch Messungen am Vibrating Sample Magnetometer (VSM) an der Professur für Magnetfluidodynamik, Mess- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden und am Leibniz-Institut für Festkörper und Werkstofforschung (IFW Dresden) ermittelt werden (Anhang B: Abbildung 130, Abbildung 131, Abbildung 132). Als besonders schwierig stellt sich die Ermittlung der magnetischen Eigenschaften der Schweißlinse heraus. Hierfür wurden Probenkörper aus Schweißverbindungen durch Drahterodieren herausgetrennt. Die Messergebnisse (Anhang B: Abbildung 132) zeigen einen anderen Verlauf der Hystereseschleifen als die Grundwerkstoffe. Allerdings handelt es sich bei den Versuchswerkstoffen um weichmagnetische Werkstoffe die nicht zum Messen im VSM geeignet sind [37]. Die Messdaten wurden dennoch in die Modelle implementiert. Durch den Vergleich zwischen Simulation und experimentellen Versuchen konnten die Simulationsergebnisse validiert und auf Plausibilität geprüft werden. Abbildung 23 zeigt die zerstörungsfreie Remanenzprüfung und die FE-Simulation für den Tiefziehstahl DC04. In der Betrachtung ist eine gute Auswertung des Linsendurchmessers durchzuführen. Diese Auswertung korreliert darüber hinaus mit der zerstörenden Prüfung [35, 36]. In Abbildung 24 hingegen korrelieren die Ergebnisse aus Remanenzmessung und zerstörender Prüfung nicht miteinander. Die FEM-Simulation demonstriert, dass sich die Remanenzflussdichte verstärkt in den Blechen ausbreitet und nicht im Schweißpunkt. Dies begründet eine erschwerte Bewertung des Schweißpunktes bei bestimmten Werkstoffen. Da der Hallsensor in diesem Fall einem breiten Streufeld ausgesetzt ist, kommt es somit zu keinem markanten Unterschied der Remanenzflussdichte im Übergangsbereich des Schweißpunktes und der Wärmeeinflusszone [36].

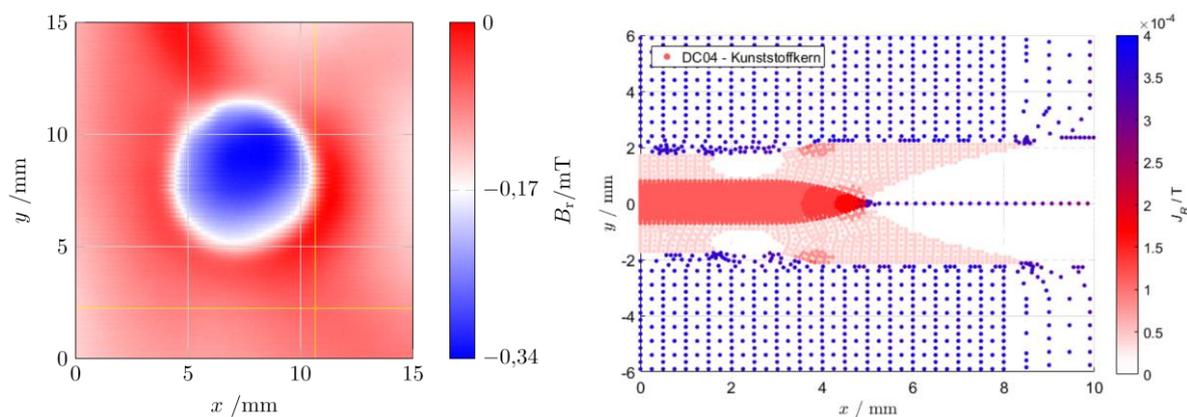


Abbildung 23: Vergleich der Remanenzprüfung mit Simulation der Remanenzflussdichte B_r (DC04) [36]

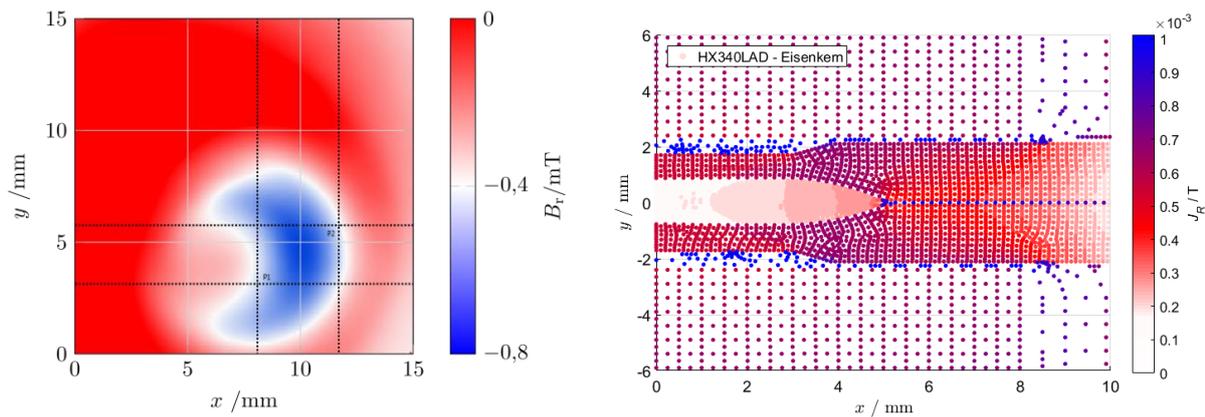


Abbildung 24: Vergleich der Remanenzprüfung mit Simulation der Remanenzflussdichte B_r (HX340LAD) [36]

Die Ergebnisse zeigen, dass der Werkstoff und die Schweißverbindung einen erheblichen Einfluss auf die Remanenzmessung ausüben. Aus diesem Grund wurden weitere Messungen von Hystereseschleifen an Ringkernproben in Zusammenarbeit mit der Firma Kendrion Mechatronics Center GmbH, Ilmenau, durchgeführt. Die Ringkernproben (Innendurchmesser $d_i = 30$ mm, Außendurchmesser $d_a = 40$ mm) bestehen aus Blechen der Versuchswerkstoffe DC04+Z, S235, 22MnB5+AS, HX340LAD+Z und 1.4301. Der Probenquerschnitt wurde durch jeweils zehn Ringe je Ringkernprobe erzielt. Die Ringkernproben besitzen eine Erregerspule (Primärspule) mit 300 Windungen und eine Messspule (Sekundärspule) mit 150 Windungen. Die Versuche wurden mit einem Messstrom von $0 \text{ A} \rightarrow 10 \text{ A} \rightarrow -10 \text{ A} \rightarrow 0 \text{ A}$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Messungen zeigen eine wesentlich stärker ausgeprägte Hystereseschleife mit größeren Remanenzflussdichten $B_r(H = 0) \approx \pm 1 \text{ T}$ für die ferromagnetischen Werkstoffe. Die Legierung 1.4301 zeigt den erwarteten paramagnetischen Kurvenverlauf, da es um einen Werkstoff mit austenitischem Gefüge handelt. Bei den Kurven handelt es sich um sogenannte Grenzhystereseschleifen. Für die vollständige Implementierung der Messdaten in die FE-Modelle und zur Simulation der Remanenzflussdichten, wie in [35], wären Messungen geeigneter innerer Hystereseschleifen (innerhalb der Grenzhystereseschleife) notwendig. Dies konnte jedoch im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden. Die Ringkernproben eignen sich zudem nicht für die Messung der magnetischen Hystereseschleifen des Schweißgefüges, da keine Schweißpunkte in dieser geometrischen Dimension herstellbar sind. Dennoch wurden die Messdaten der Ringkernproben in die FE-Modelle für den Magnetisierungsprozess implementiert. Mit den FE-Modellen wurden die Sensitivanalysen zum Einfluss des Elektrodeneindrucks in Abschnitt 7.2.2 und des Randabstands in Abschnitt 7.5.2 durchgeführt.

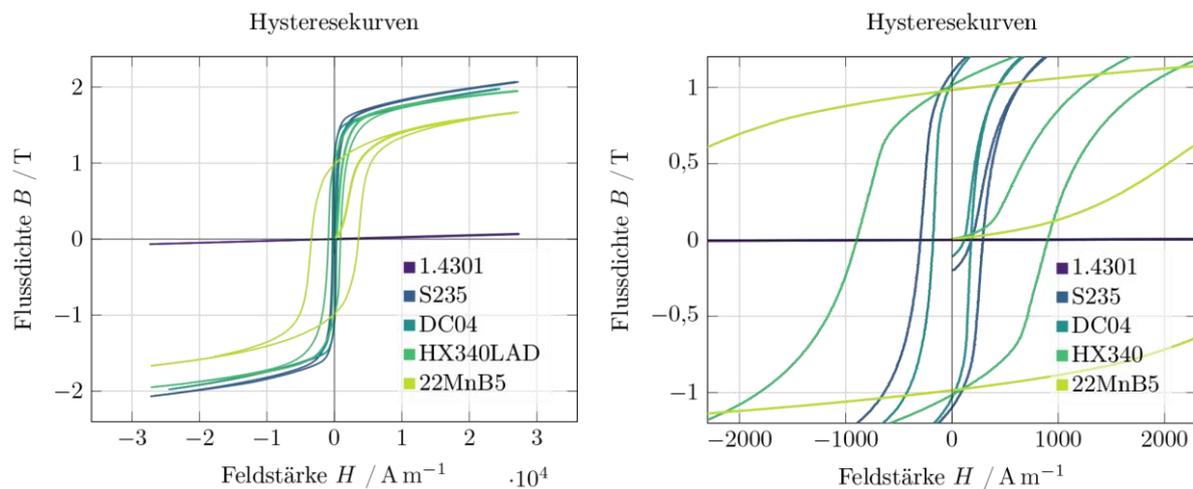


Abbildung 25: Hysteresekurven der Versuchswerkstoffe DC04+Z, S235, 22MnB5+AS, HX340LAD+Z und 1.4301 ermittelt an Ringkernproben

7.2.2 Oberflächentopographie: Elektrodeneindrucktiefe

Die Oberflächentopographie von Widerstandsschweißpunkten weist einen Elektrodeneindruck auf. Dieser kann je nach Auswahl der Schweißparameter mehr oder weniger tief ausgeprägt sein. Da die messbare magnetische Flussdichte mit zunehmenden Abstand abnimmt, hat die Oberflächentopographie einen Einfluss auf das Messergebnis. Ziel der Untersuchung ist es, diesen Einfluss auf die Remanenzprüfung zu analysieren. Ergebnisse hierzu wurden in [38 - 40] veröffentlicht.

In [38, 39] wurden Schweißproben mit gleichen Schweißlinsengrößen, jedoch unterschiedlichen Elektrodeneindrucktiefen am Beispiel der MDK 1M untersucht. Dies wird durch die gezielte Variation der Schweißparameter und die Auswahl unterschiedlicher Elektrodenkappengeometrien realisiert (Abbildung 26). Die Oberflächentopographie wird durch ein chromatisch-konfokales Mikroskop erfasst. Die erfassten Topographien werden anschließend mit der Remanenzprüfung gegenübergestellt. Abbildung 27 zeigt die Zusammenführung der einzelnen Messungen exemplarisch.

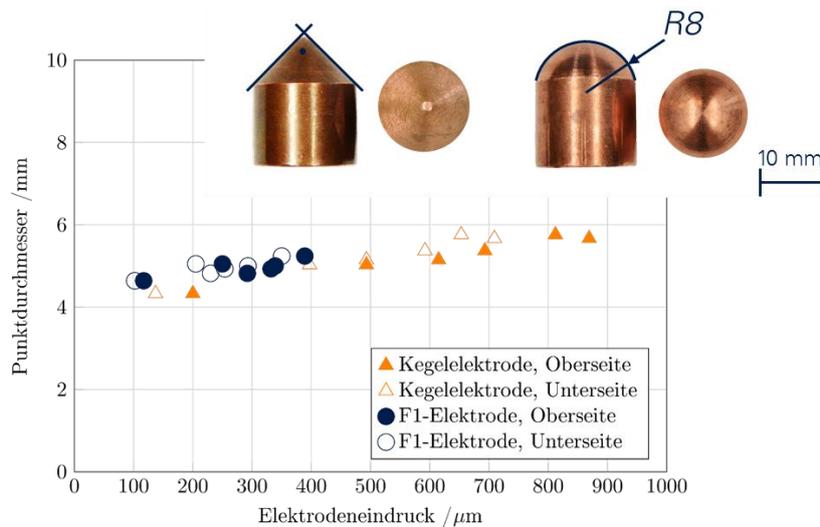


Abbildung 26: Gemessene Punktdurchmesser bei unterschiedlichen Elektrodeneindringtiefen der MDK 1M [39]

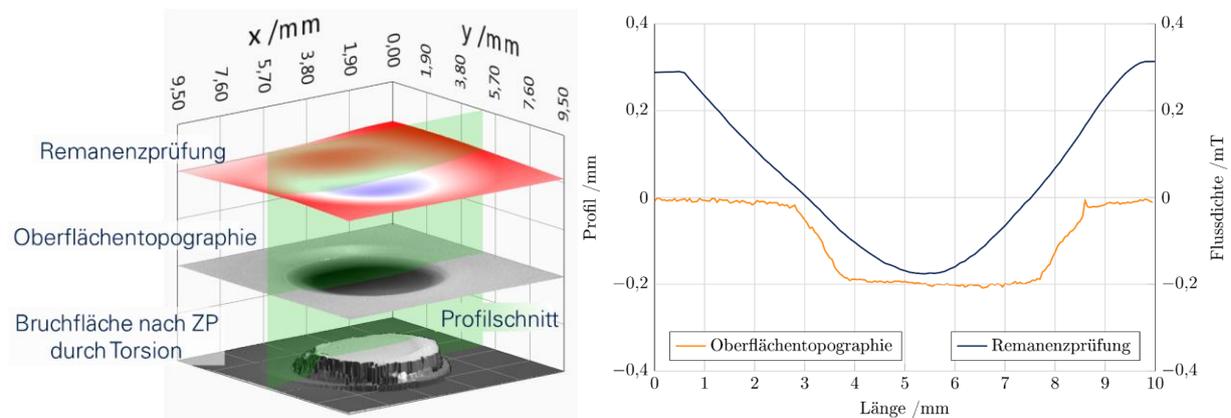


Abbildung 27: Visualisierung der einzelnen Messungen für die Untersuchungen und Profilschnitt der Oberflächentopographie und Remanenzprüfung der MDK 1M [39]

Bei der Remanenzmessung zeichnet sich die Schweißlinse deutlich in Form einer Änderung der gemessenen magnetischen Flussdichte vom nicht verschweißten Bereich ab. Zur Ergebnisvalidierung wurden die Messungen der Remanenzflussdichte mit der ZP durch Torsion der Schweißproben verglichen (Abbildung 28 links). Die Auswertung in Abbildung 28 rechts ergibt eine Messabweichung von weniger als 5% zwischen der ZP und ZfP, wobei sich die Ergebnisse auf alle Variationen der Elektrodeneindringtiefen und -geometrien beziehen. Dieses Ergebnis steht einem erwarteten Anstieg der Messabweichung mit zunehmender Tiefe des Elektrodeneindrucks gegenüber. [39]

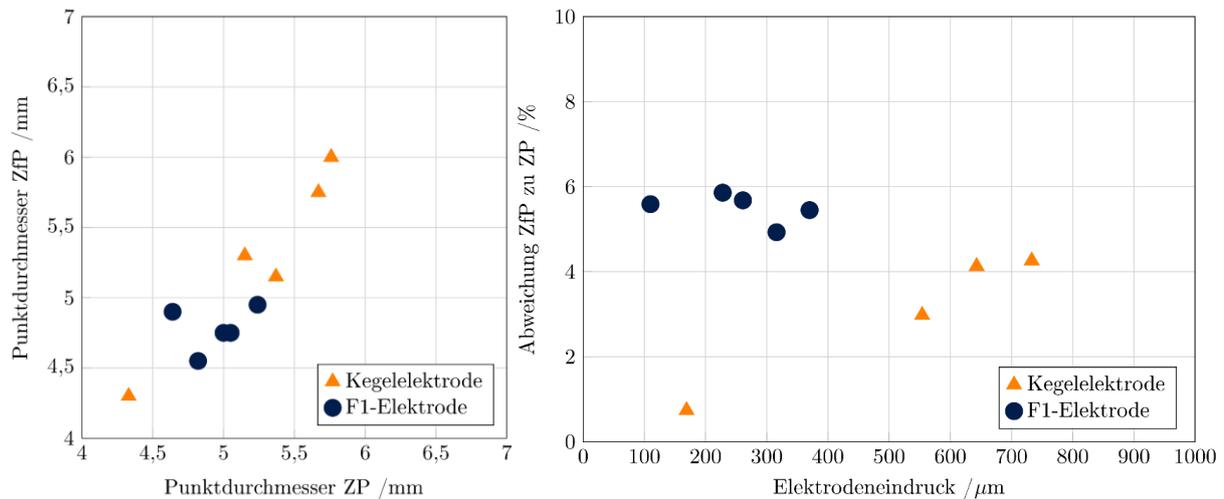


Abbildung 28: Gegenüberstellung von ZP und ZfP (links) und Darstellung der Messabweichung zwischen ZP und ZfP der MDK 1M (rechts) [39]

Durch Änderung der Form des Eindrucks als auch der Elektrodeneindringtiefe können viele industrielle Ausprägungen an Schweißpunkten abgedeckt werden. Allerdings beinhalten die Versuche aus [39] keine direkte Entkopplung des Einflusses der Schweißparameter auf die Oberflächentopographie. Dies wird durch numerische Simulationen und den umfassenden experimentellen Versuchen, veröffentlicht in [40], realisiert.

Die numerischen Simulationen erlauben es, den Linsendurchmesser unabhängig vom Elektrodeneindruck (Tiefe, Durchmesser) zu variieren. Dadurch werden experimenteller Versuchsaufwand und Auswertung erheblich reduziert. In Tabelle 9 sind die variierten Parameter für die numerischen Simulationen zusammengefasst. Es wurde das gleiche FE-Modell, wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben, eingesetzt. Für die Simulationen wurde die MDK nach Versuchsreihe 1M, 2M und 8M, Tabelle 3 verwendet. Der Grund dafür liegt einerseits in der Generierung tieferer Elektrodeneindrücke. Andererseits ist es für die anschließenden experimentellen Versuche möglich, mit den im Projekt vorhandenen 3,0 mm dicken Blechen aus dem gleichen Material (HX340LAD+Z) Vergleichsproben mit vorhandenem Elektrodeneindruck jedoch ohne vorhandener Schweißverbindung herzustellen. Als Geometrie des Elektrodeneindrucks wurde die Elektrodenkappengeometrie ISO 5821-F1-16-6-40 [41] eingesetzt.

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der Simulationen zum Einfluss des Elektrodeneindrucks für die Kombination von zwei Blechen mit jeweils 1,5 mm Blechdicke. Im rechten Abschnitt der Abbildung 29 sind zwei Simulationsergebnisse beispielhaft abgebildet. Darin ist der Ort der maximalen Flussdichte durch die Markierung **MX** dargestellt (oben in der Schweißlinse, unten im Blech). In den Analysen der FE-Simulationen werden der Betrag der maximalen Flussdichte **B** und die Vektorkomponente der maximalen

Flussdichte B_z in z-Richtung in der Schweißlinse und in den Blechen ermittelt und miteinander verglichen. Der jeweils größere Wert wird je nach Randbedingung der Simulation (Elektrodeneindruckdurchmesser d_e , Linsendurchmesser d_n und Elektrodeneindrucktiefe e) in die Diagramme im linken Abschnitt der Abbildung 29 eingetragen. Ist die maximale Flussdichte von B bzw. B_z in der Schweißlinse am größten, wird dies durch einen Punkt ● dargestellt. Ist sie im Blech am größten, wird diese durch ein Quadrat ■ dargestellt. Jeder Punkt oder jedes Quadrat stellt eine numerische Simulation dar. Die Schweißlinse führt durch den verengten Querschnitt zur Konzentration des magnetischen Flusses [6, 42, 43]. Es wird angenommen, dass beim Auftreten der maximalen Flussdichten in der Schweißlinse, der Elektrodeneindruck keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte ausübt. Mit dieser theoretischen Annahme können die Grenzen des Elektrodeneindrucks (Tiefe e , Durchmesser d_e) in Kombination mit dem Linsendurchmesser d_n ermittelt werden, bis dieser die Messergebnisse beeinflusst. Das Messergebnis wird beispielsweise für folgende Szenarien durch den Elektrodeneindruck beeinflusst:

- a) $d_e = 7 \text{ mm}$, $d_n = 3 \text{ mm}$, $e > 0,6 \text{ mm}$
- b) $d_e = 4 \text{ mm}$, $d_n = 4 \text{ mm}$, $e > 0,9 \text{ mm}$
- c) $d_e = 7 \text{ mm}$, $d_n = 7 \text{ mm}$, $e > 0,6 \text{ mm}$
- d) $d_e = 8 \text{ mm}$, $d_n = 6 \text{ mm}$, $e > 0,5 \text{ mm}$

Die Szenarien a) und b) stellen eher unrealistische Situationen dar. Hierbei ist in a) die Elektrodenkraft prozesstechnisch zu hoch gewählt oder in b) eine sehr spitze Elektrodenkappe eingesetzt worden. Die Situationen in c) und d) bilden realistische Bedingungen ab. Hierbei ist zu erkennen, dass der Elektrodeneindruck ab $e = 0,5 \text{ mm}$ über dem maximal zulässigen Wert nach DIN EN ISO 14373 [44] von $e_{max} = 0,2t = 0,3 \text{ mm}$ liegt. Die weiteren Simulationsergebnisse sind im Anhang C zu finden. Zusammenfassend ist darin zu erkennen, dass bei beidseitiger Magnetisierung im Bereich der maximal zulässigen Elektrodeneindrucktiefen nach DIN EN ISO 14373 [44], der Elektrodeneindruck das Prüfergebnis nicht beeinflusst. Des Weiteren zeigt sich, dass die Blechdicke eine untergeordnete Rolle spielt. Bei der einseitigen Magnetisierung hat die Blechdicke einen Einfluss auf die Messergebnisse in Kombination mit dem Elektrodeneindruck und der Linsenausprägung. Es besteht die Gefahr, dass das Prüfergebnis durch einen zu tiefen Elektrodeneindruck beeinflusst wird. Bei der Verwendung unterschiedlicher Blechdicken sollte von der Seite des dünneren Blechs magnetisiert und geprüft werden.

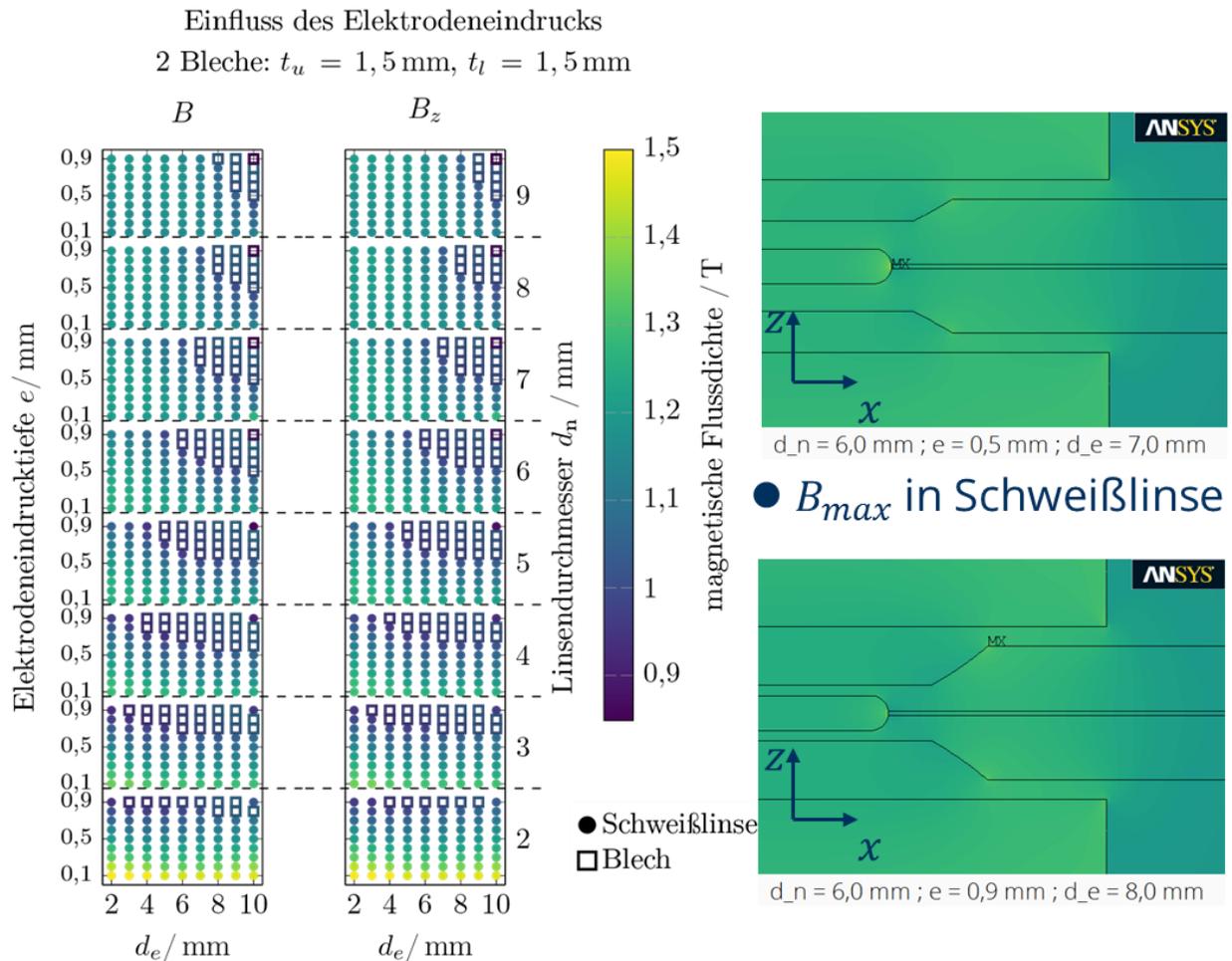


Abbildung 29: Numerische Simulationsergebnisse der Untersuchung zum Einfluss des Elektrodeneindrucks auf das Messergebnis der Remanenzmessung für zwei Bleche je 1,5 mm dick

Tabelle 9: Variierende Eingangsparameter für die numerischen Simulationen zum Ermitteln des Einflusses des Elektrodeneindrucks

Parameter	Linsendurchmesser d_n	Elektrodeneindruck- tiefe e	Elektrodeneindruck- durchmesser d_e
Unterer Wert	2 mm	0,1 mm	2 mm
Oberer Wert	9 mm	0,9 mm	10 mm
Schrittweite	1 mm	0,1 mm	1 mm

Aufbauend auf den Ergebnissen der numerischen Simulationen wurden für die experimentellen Versuche für alle Schweißproben die gleichen Schweißparameter verwendet. Unterschiedliche Elektrodeneindrucktiefen wurden durch Senkerodieren (EDM) realisiert, wodurch Elektrodeneindrücke unabhängig vom Linsendurchmesser erzeugt werden konnten. Der Versuchsablauf für die Untersuchungen wurde in drei Phasen unterteilt, wie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Ergebnisse der ersten beiden Phasen wurden in Phase 3 analysiert, indem die Ergebnisse aller Topographiemessungen und ZfP-Messungen mit den Ergebnissen der ZP verglichen wurden. Für die Untersuchungen

wurden zwei Arten von Proben verwendet: Proben A und Proben B. Die Größe aller Proben betrug 50 mm x 50 mm. Proben A bestehen aus zwei 1,5 mm dicken Blechen der Stahllegierung HX340LAD+Z100 mit beidseitiger Zinkbeschichtung von 100 g/m², die miteinander verschweißt wurden (Versuchsreihe 8M, Tabelle 3). Proben B sind Einblechproben, ebenfalls aus HX340LAD+Z100 mit beidseitiger Zinkbeschichtung von 100 g/m² mit einer Blechdicke von 3,0 mm ohne Schweißverbindungen.

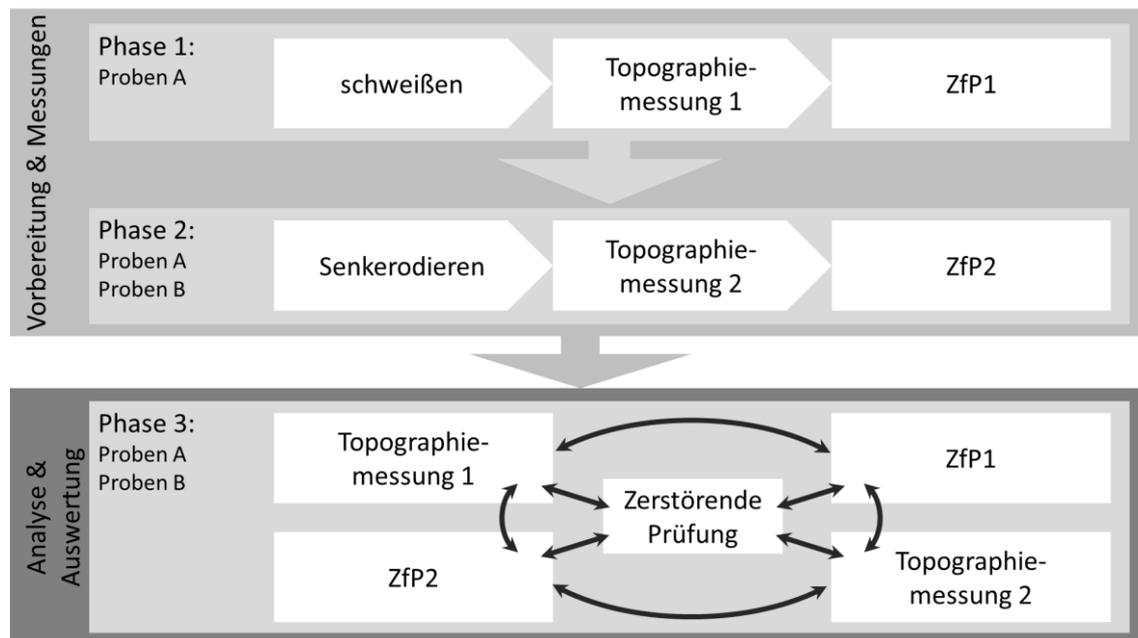


Abbildung 30: Experimenteller Ablauf zur Untersuchung des Einflusses der Elektroden-eindrucktiefe mit Entkopplung von Schweißparameter und Eindrucktiefe [40, vgl. 40]

In Phase 1 wurden alle Proben A mit den gleichen Schweißparametern geschweißt, um gleiche Linsendurchmesser zu erzeugen. Für einen geringen Eindruck der Elektrode wurden Elektrodenkappen Typ A0 nach DIN EN ISO 5821 [41] mit einem Balligkeitsradius von 50 mm verwendet. Die verwendeten Schweißparameter sind in Tabelle 10 zu finden. Nach dem Schweißen wurde die Topographie der Schweißpunkte mittels chromatisch-konfokaler Mikroskopie beidseitig aufgezeichnet. Ebenfalls erfolgt die Remanenzmessung (ZfP1) auf beiden Seiten der Proben.

Tabelle 10: Schweißparameter für Proben A

Parameter	Größe
Schweißstrom I_w	8,0 kA
Elektrodenkraft F_e	3,0 kN
Schweißzeit t_w	300 ms
Vorhaltezeit t_s , Nachhaltezeit t_h	400 ms
Elektrodengeometrie	ISO 5821-A0-16-22-50

Beide Probentypen wurden in Phase 2 verwendet, wobei die Proben A aus Phase 1 stammen. Zuerst wurden durch Senkerodieren auf den Oberseiten der Proben

unterschiedliche Elektrodeneindringtiefen in 0,1 mm Schritten mit den geometrischen Elektrodeneigenschaften nach ISO 5821-F1-16-6-40 [41] erzeugt. Es folgten wieder Topographiemessungen und Remanenzmessungen (ZfP2) aller Proben wie in Phase 1. Alle gemessenen Daten wurden in Phase 3 analysiert. Die Bewertung der Messungen der Proben A erfolgte durch den Vergleich der Ergebnisse der Messungen aus ZfP1 und ZfP2 mit den gemessenen Durchmessern der Schweißpunkte, die durch die ZP aller Schweißproben durch Torsion ermittelt wurden. Abbildung 31 links zeigt die Elektrodeneindringtiefen vor und nach dem Senkerodieren. Es ist zu erkennen, dass mit den gewählten Schweißparametern das Ziel eines gleichmäßigen Elektrodeneindrucks erreicht wurde. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Schrittweite beim Senkerodieren von 0,1 mm im Schnitt auch realisiert werden konnte. Es ist festzustellen, dass ab Probennummer P02 (Proben A) und P03 (Proben B), die nach DIN EN ISO 14373 [44] maximal zulässige Elektrodeneindringtiefe $e = 0,2t$ überschreiten. Die Auswertung der Messergebnisse der ZP der Proben A in Abbildung 31 rechts zeigt, dass gleiche Durchmesser der Schweißpunkte erreicht werden konnten. Der Elektrodeneindruck hat bis zur Probe P06 kaum einen Einfluss auf das Messergebnis der Remanenzmessung. Erst ab P06 nimmt die Abweichung zwischen ZfP1 und ZfP2 deutlich zu, was mit dem verhältnismäßig tiefen Elektrodeneindruck zu erklären ist. Der Vergleich der ZfP mit der ZP zeigt, dass tendenziell zu große Durchmesser mit der Remanenzmessung ermittelt werden. Demnach ist kein signifikanter Einfluss einer Elektrodeneindringtiefe von bis zu 0,6 mm bzw. $e = 0,4t$ der ausgewählten MDK vorhanden. [40]

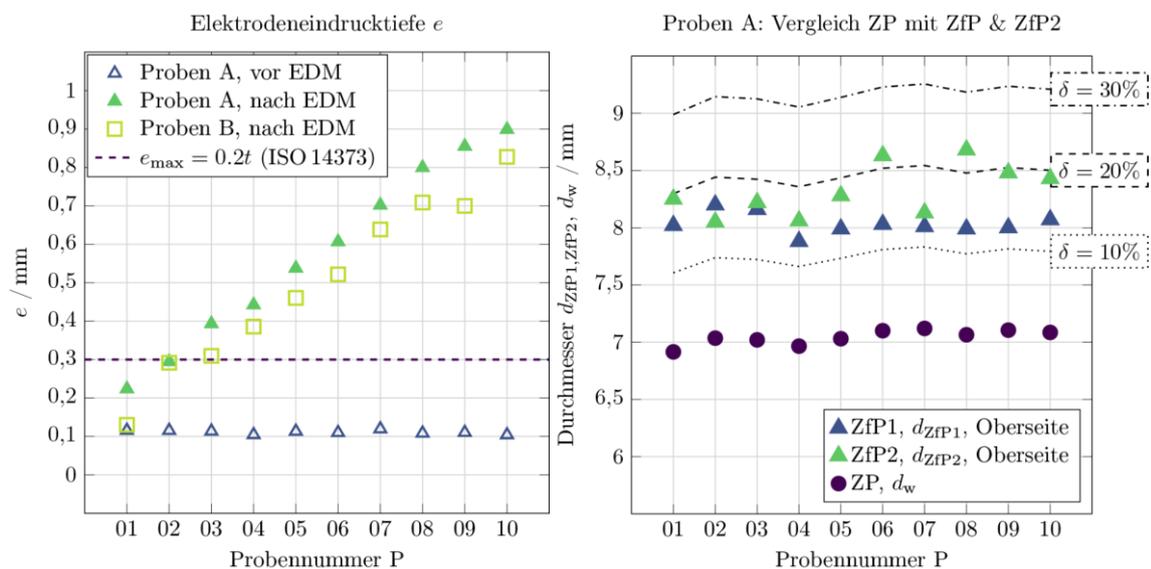


Abbildung 31: Elektrodeneindringtiefe vor und nach dem Senkerodieren der Proben A und B (links) und Vergleich der gemessenen Durchmesser aus ZfP1, ZfP2 und ZP der Proben A (rechts) [vgl.40]

Die Ergebnisse der Untersuchungen beim Vergleich der Proben A und B zeigen, dass sich die gemessene magnetische Flussdichte der Proben A und B unterscheiden. Abbildung 32 zeigt, dass der Elektrodeneindruck das Messergebnis der Remanenzmessung beeinflusst. Allerdings weisen die Ergebnisse der Proben B geringere Anstiege der gemessenen magnetischen Flussdichte auf, die durch den Elektrodeneindruck verursacht werden. Diese geringen Anstiege unterschreiten den für die Bewertung ermittelten Referenzwert zur Bestimmung der Anbindungsfläche des Schweißpunktes (näherer Erläuterungen in Abschnitt 7.4.4). Abbildung 32 zeigt im Vergleich der beiden ZfP-Messungen der Proben A und B.

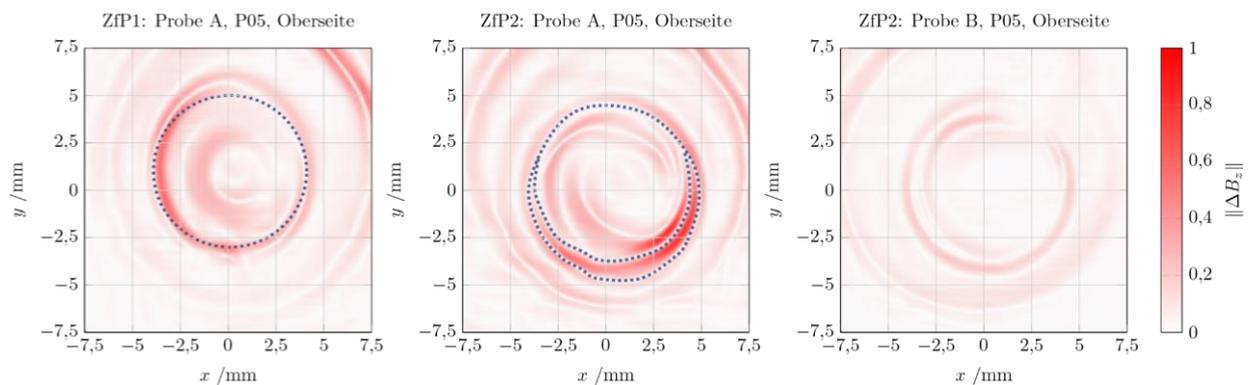


Abbildung 32: ZfP1 und ZfP2 am Beispiel der Probe mit einer Elektrodeneindringtiefe von 0,55 mm [vgl. 40]

7.2.3 Zusammenfassung

Die Messungen mit den unterschiedlichen Systemen zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe zeigen, dass diese voneinander abweichen. Insbesondere ist es schwierig die Eigenschaften der Schweißlinse zuverlässig zu bestimmen. Die implementierten Messdaten in die FE-Modelle für den Magnetisierungsprozess konnten durch experimentelle Versuche validiert und auf Plausibilität überprüft werden. Für eine vertrauenswürdige Erweiterung der FE-Modelle zur Abbildung des Prüfschritts der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte sind genauere Messungen des Schweißgefüges notwendig.

Die Anwendung der FE-Modelle bei der Untersuchung des Einflusses des Elektrodeneindrucks auf das Prüfergebnis bestätigen die Funktionalität der FE-Modelle. Die Ergebnisse der experimentellen Versuche stimmen mit denen der Simulationen überein. So konnten weitere der FE-Simulationen für unterschiedliche Kombinationen aus Linsendurchmesser, Elektrodeneindruck und Blechdicke durchgeführt werden, die den Aufwand der experimentellen Versuche drastisch reduzieren konnten. Die Analysen hinsichtlich des Einflusses des Elektrodeneindrucks zeigen, dass bei der einseitigen Magnetisierung die Blechdicke einen Einfluss auf den Magnetisierungsprozess hat. Des Weiteren zeigt sich, dass im Bereich der maximal zulässigen Elektrodeneindringtiefen

nach DIN EN ISO 14373 [44], der Elektrodeneindruck das Prüfergebnis beeinflussen kann. Bei der beidseitigen Magnetisierung spielt die Blechdicke eine untergeordnete Rolle. Unabhängig von der Blechdicke, wird das Messergebnis bis zu einem Elektrodeneindruck von 0,6 mm nicht signifikant beeinflusst. Hier decken sich die Ergebnisse der experimentellen Versuche mit denen der FE-Simulationen.

Für das Widerstandspunktschweißen mit Einzelblechdicken bis 3,0 mm und unter der Einhaltung der zulässigen Elektrodeneindringtiefen nach DIN EN ISO 14373 [44] stellt der Elektrodeneindruck kein Problem für die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte dar.

7.3 Weiterentwicklung der Messwertaufnahme und des Auswertalgorithmus

Die Weiterentwicklung des gesamten Versuchsstands erstreckte sich über die Projektlaufzeit. Durch einen kontinuierlichen Wissens- und Erfahrungszuwachs bei den mitwirkenden Personen konnte in [21] erhebliche Verbesserungen insbesondere in Form einer besseren Messwertaufnahme und eines neu- und weiterentwickelten Auswertalgorithmus umgesetzt werden. Im Abschnitt 6.2 wurde bereits die Weiterentwicklung der Messsensorapplikation durch einen federnden Hallsensor beschrieben. Dies ermöglicht, schräge Proben mit einem konstanten Abstand zur Probenoberfläche zu vermessen, was der Anwendung der Magnetfeldkamera MiniCube entspricht.

Der Auswertalgorithmus wurde durch Trainings- und Testmengen anhand der MDK 1M, 1RSW, 2RSW und 3RSW weiterentwickelt und in [21, 45] umgesetzt. Die Unterteilung in Trainings- und Testmengen ist in der Übersicht Anhang A, Tabelle 31 zu finden. Als Resultat liegt ein Auswertprogramm mit einem implementierten Auswertalgorithmus vor, der eine automatische Bewertung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte ermöglicht. Somit sind die Bewertungen der Schweißpunkte objektiv und vom Anwender unabhängig. Unverschweißte Proben werden mit einer sehr hohen Zuverlässigkeit von diesem Algorithmus erkannt [45]. Dies gilt sowohl für das Messsystemen RMV02 als auch für den Magcam MiniCube (beschrieben in Abschnitt 6.2). Der schematische Ablauf des Auswertprogramms ist in Abbildung 34 dargestellt. Zur Unterscheidung zwischen einer unverschweißten und verschweißten Probe wird der Mittelwert der zweiten Ableitung der magnetischen Remanenzflussdichte über den Laplace-Operator Δ mit einem Referenzwert verglichen, der für die jeweilige MDK spezifisch ist.

Zur Bestimmung des Linsendurchmessers wird ebenfalls die zweite Ableitung der magnetischen Remanenzflussdichte genutzt. Diese steigt beim Übergang vom unverschweißten zum verschweißten Bereich stark an. Daher wird der Nulldurchgang

der normalisierten zweiten Ableitung der magnetischen Remanenzflussdichte betrachtet, wie in Gleichung 1 beschrieben. Eine Referenzebene wird als Schwelle verwendet, um geringere Anstiege der gemessenen Daten herauszufiltern. Wenn $\Delta B_z = 0$ zwischen den beiden Maxima oberhalb der Bezugsebene ist, kann auf den Ort des maximalen Anstiegs geschlossen werden, wie in Abbildung 33 gezeigt. Dies führt zu einer ringförmigen Fläche, die in Abbildung 33 als Konturring dargestellt ist. Der innere Bereich der Kontur entspricht dem verschweißten Bereich bzw. der Schweißlinse.

$$\Delta B_z = \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} = 0 \tag{1}$$

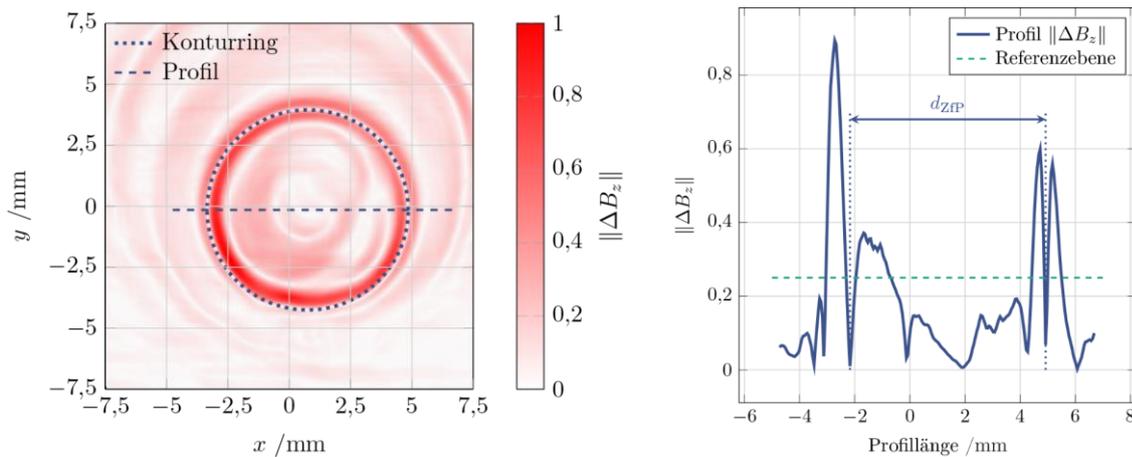


Abbildung 33: Ergebnis der zweiten Ableitung nach Gleichung 1 mit ermitteltem Konturring für die Bewertung des Schweißpunkts (links) und Profilverlauf mit eingezeichneter Referenzebene zur Ermittlung des Konturrings (rechts)

Die für die Auswertung verwendeten Referenzwerte und Referenzebenen wurden in [21, 45] empirisch für jede MDK ermittelt. Die Autoren gehen davon aus, dass diese Größen von den verwendeten Werkstoffen und deren magnetischen Eigenschaften abhängen. Ein Zusammenhang konnte im Vorhaben nicht näher untersucht werden und sollte für zukünftige Weiterentwicklungen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte angestrebt werden.

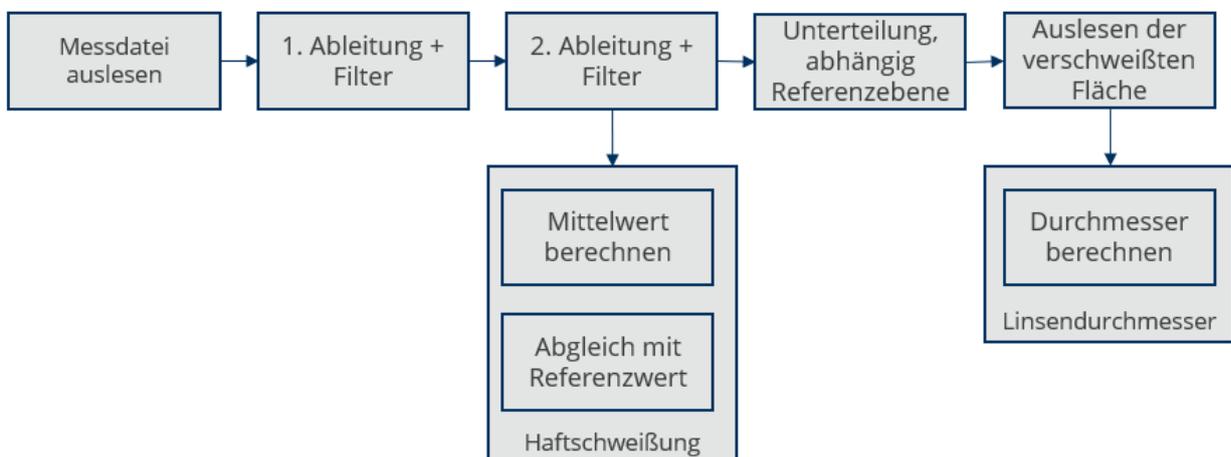


Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Auswertungsprogramms

Die Auswertung der Ergebnisse der Trainingsmengen von MDK 1M sind mit einer Abweichung von $-0,9\% \pm 2,9\%$ an der Oberseite des Blechs bzw. $-1,0\% \pm 6,3\%$ an der Unterseite des Blechs sehr gut einzuschätzen (Abbildung 35). Die ermittelten Linsendurchmesser korrelieren stark mit den zerstörend ermittelten Punktdurchmessern im gesamten Parameterbereich. Die Messabweichung sowie die Korrelation der Testergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig von der Trainingsmenge. Daraus kann für die MDK 1M auf die Funktionalität des Algorithmus geschlossen werden. [21]

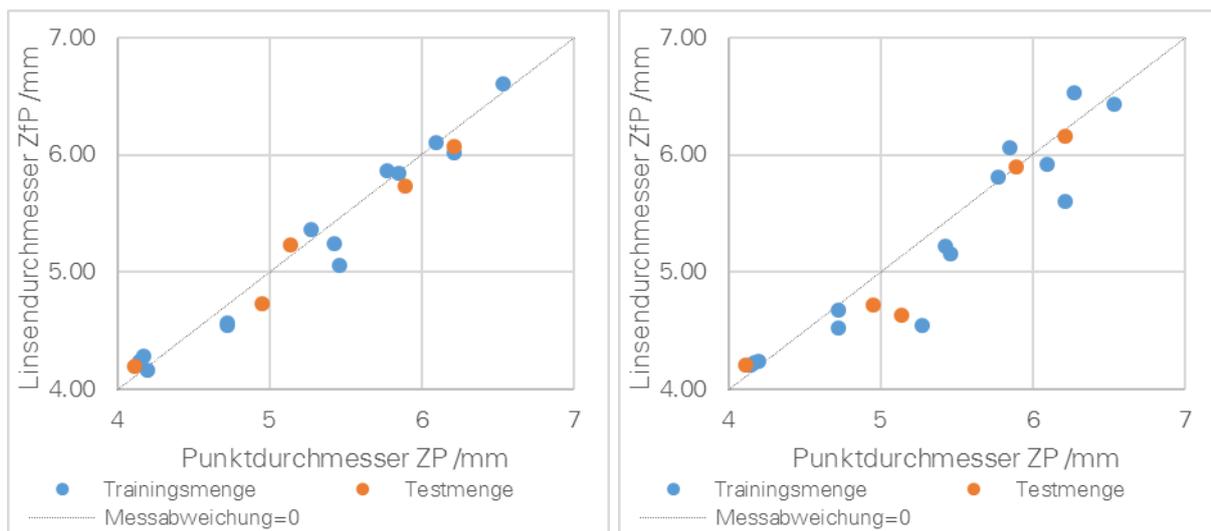


Abbildung 35: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 1M (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21]

Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse der ermittelten Linsendurchmesser mit Hilfe der automatischen Auswertung. Die Messwerte der MDK 1RSW an der Oberseite der Schweißprobe streuen stärker als die der Unterseite. Diese korrelieren mit der ZP sehr gut. Mit einer Messabweichung von $1,5\% \pm 2,8\%$ eignet sich diese MDK auch für die Auswertung durch den Algorithmus. Auch hier liegen die Ergebnisse der Testmenge gegenüber der Trainingsmenge in Bezug auf die Korrelation zwischen Punkt- und Linsendurchmesser nur geringfügig auseinander. [21]

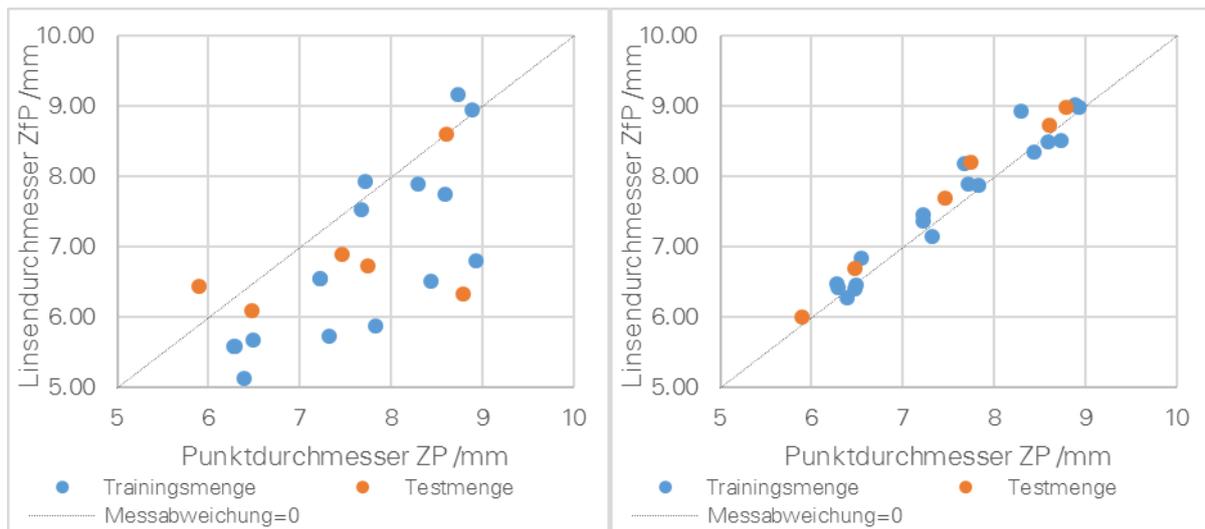


Abbildung 36: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 1RSW (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21]

Bei der MDK 2RSW sind bei einer Messabweichung von $1,0\% \pm 2,6\%$ an der Oberseite der Schweißprobe sehr gering. Bei dieser MDK streuen die Messergebnisse der Unterseite mehr. Die Ergebnisse der Trainings- und Testmengen weisen ähnliche Abweichungen auf, aus denen die Eignung dieser MDK für eine automatisierte Bewertung des Linsendurchmessers durch den Algorithmus abgeleitet werden kann. [21]

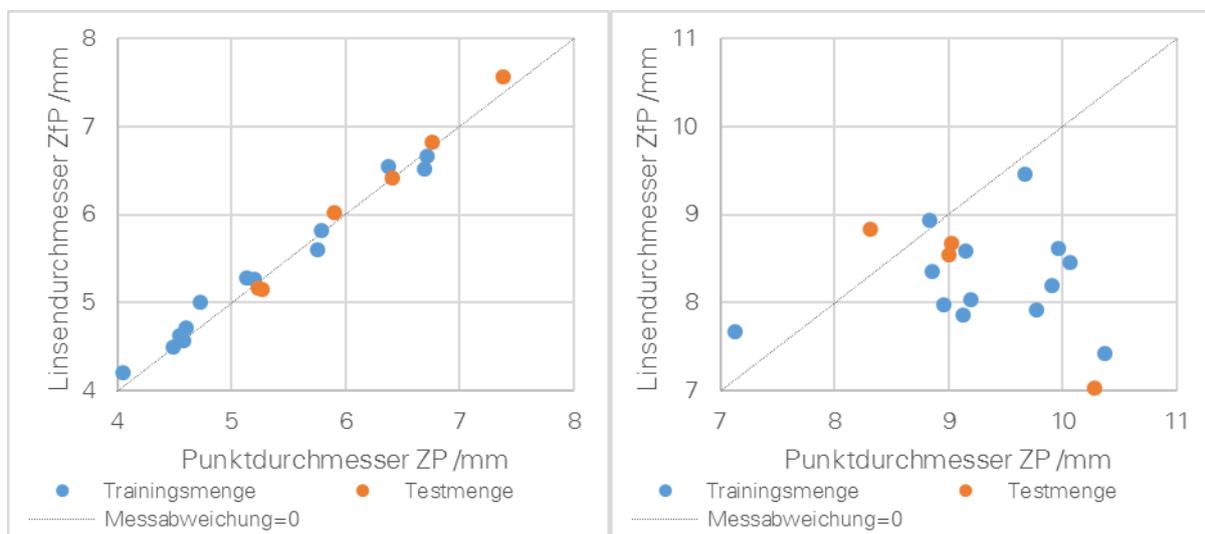


Abbildung 37: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 2RSW (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21]

Aufgrund der geringfügigen Änderung der remanenten Flussdichte im Bereich der Schweißlinse auf der Oberfläche der Schweißproben der MDK 3RSW ist es für eine automatisierte Auswertung schwieriger. Dies zeigt auch die Messabweichung von $-7,0\% \pm 7,0\%$. Im Gegensatz dazu ist die Unterseite der Schweißprobe für eine automatisierte Auswertung besser geeignet. Die Änderung der remanenten Flussdichte im Bereich der Schweißlinse führt zu guten Messergebnissen mit dem RMV02-Messsystem.

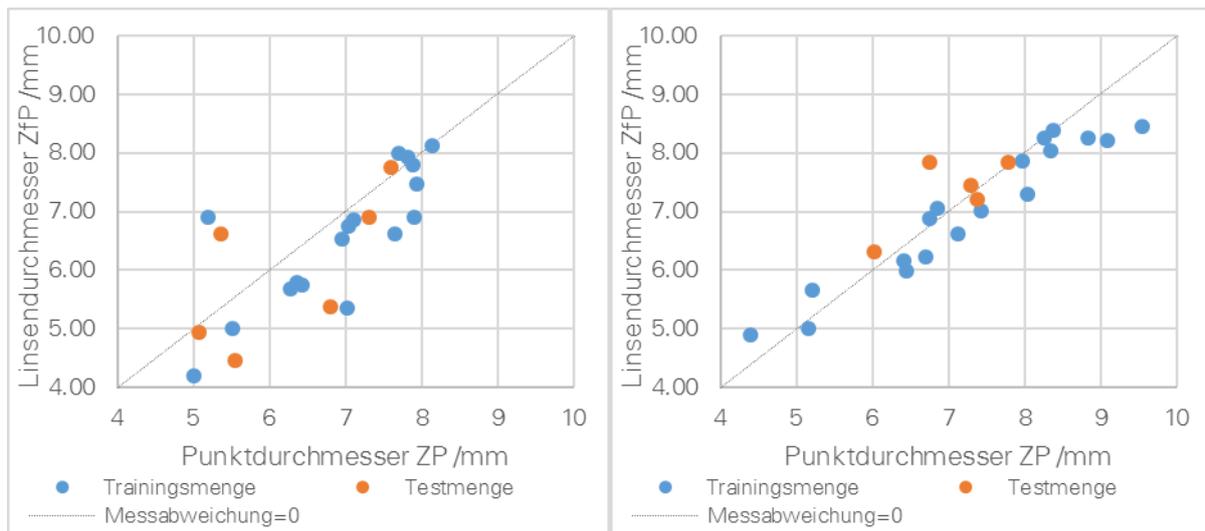


Abbildung 38: Ergebnisse der Trainings- und Testmengen der MDK 3RSW (links: Oberseite, rechts: Unterseite) [21]

Im Folgenden werden die Messergebnisse aller MDK ausgewertet. Hierbei ist zu beachten, dass die Messungen der Oberseite aller Proben im Vorfeld zur Weiterentwicklung des Mess- und Auswertesystems des Versuchstands RMV02 durchgeführt wurden.

7.3.1 1M, 8M

Die MDK 1M wurde im Rahmen des Projekts zusammen mit der MDK 8M sehr intensiv zur Weiterentwicklung der Prüfmethode, deren Auswertelgorithmen und FE-Modelle verwendet. In Tabelle 11 sind beide MDK zusammengefasst. 8M wurde lediglich für die Untersuchung des Einflusses des Elektrodeneindrucks verwendet, wie bereits in Abschnitt 7.2.2 beschrieben.

Tabelle 11: MDK 1M

Versuchsreihe	1M	8M
Blech 1	HX340LAD+Z, $t = 1 \text{ mm}$	HX340LAD+Z, $t = 1,5 \text{ mm}$
Blech 2	HX340LAD+Z, $t = 1 \text{ mm}$	HX340LAD+Z, $t = 1,5 \text{ mm}$

Bei der Auswertung in Abbildung 39 der MDK 1M ist zu beobachten, dass bei geringen Schweißströmen von 4,8 kA und vereinzelt auch bei 5,6 kA Lötverbindungen der Zinkbeschichtungen erzielt werden konnten. Es zeigt sich auch, dass diese Proben von der Oberseite gemessen durch die Remanenzmessung nicht richtig erkannt wurden, von der Unterseite wurden diese erkannt. Grund hierfür ist, wie oben beschrieben, die Weiterentwicklung des Mess- und Auswertelgorithmus, der eine erhöhte Zuverlässigkeit im Auffinden von Fehlschweißungen erlaubt. Die Messergebnisse der Ultraschallmessungen zeigen, dass die Fehlschweißungen bis auf wenige Proben erkannt werden. In Abbildung 40 ist eine typische unverschweißte Probe als Querschleiff zu sehen. Es kam infolge des Schweißstroms zur lokalen Erwärmung des Grundwerkstoffes. Die Erwärmung reichte nicht aus, um eine Schweißverbindung herzustellen. Es wurden lediglich

die Zinkbeschichtungen beider Bleche miteinander verlötet. Somit ist die Schweißung als Lötverbindung einzustufen. Die Querschliffe in Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen einen zunehmenden Linsendurchmesser mit steigendem Schweißstrom. Es ist auch zu sehen, dass sich die Schweißverbindung zunehmend sichelförmig ausprägt. Den Einfluss der Schweißlinsengeometrie auf die Messergebnisse sollte in zukünftige Untersuchungen berücksichtigt werden.

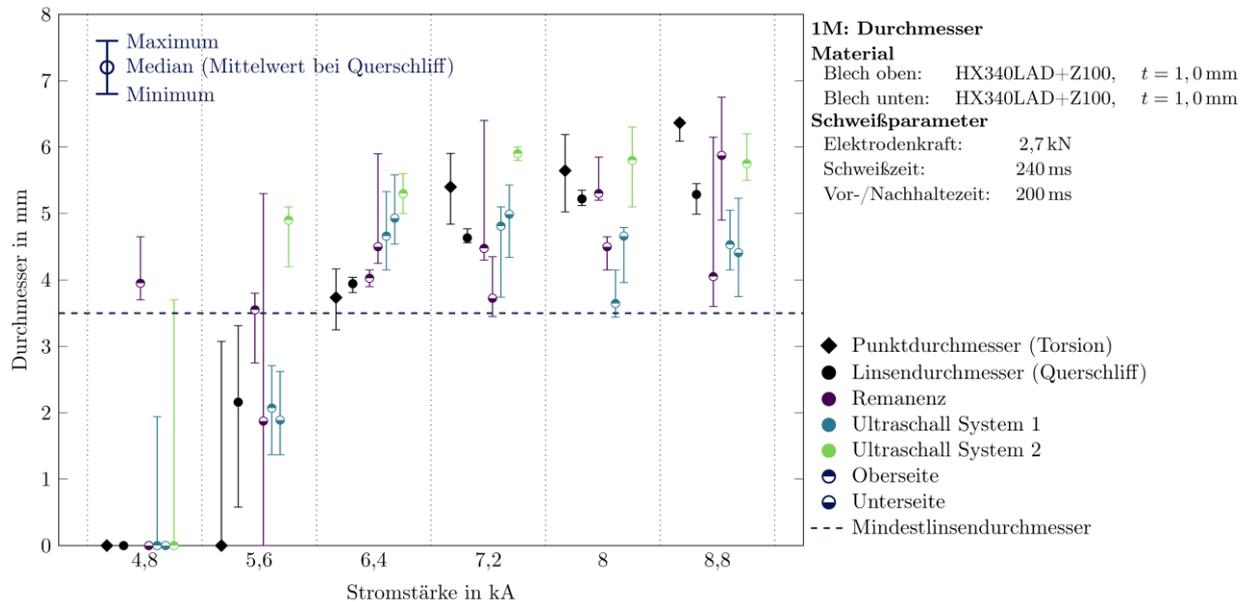


Abbildung 39: 1M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

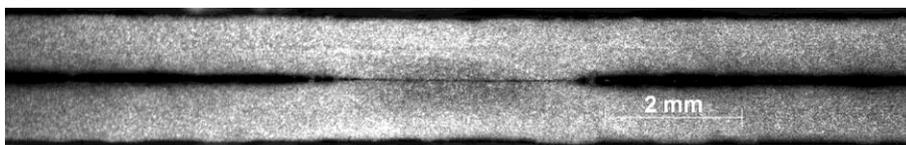


Abbildung 40: Querschliff der Schweißprobe 1M_4,8kA_P0002, $I_w = 4,8$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 240$ ms

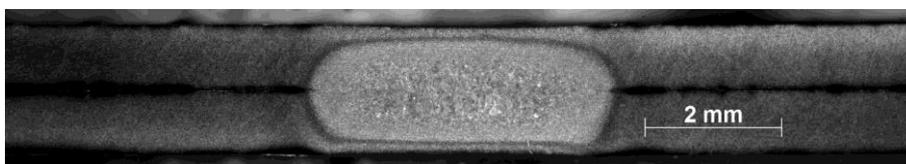


Abbildung 41: Querschliff der Schweißprobe 1M_5,6kA_P0003, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 240$ ms



Abbildung 42: Querschliff der Schweißprobe 1M_8,8kA_P0001, $I_w = 8,8$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 240$ ms

Die Gegenüberstellung aller Messergebnisse von ZfP und ZP ist in Abbildung 43 zu sehen. Die nähere Betrachtung dieser Gegenüberstellungen verdeutlicht, dass die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte kaum Unterschiede zu den Messergebnissen der Ultraschallmessungen aufweist, was auch die statistische Auswertung der absoluten Abweichungen der Messungen in Abbildung 44 bestätigt. Beim Vergleich der Messung RMV02 oben mit den Messungen RMV02 unten bestätigt sich auch, dass die Weiterentwicklung der Remanenzmessung signifikante Verbesserungen liefert. Dies ist insbesondere beim Vergleich mit den Torsionsproben ersichtlich.

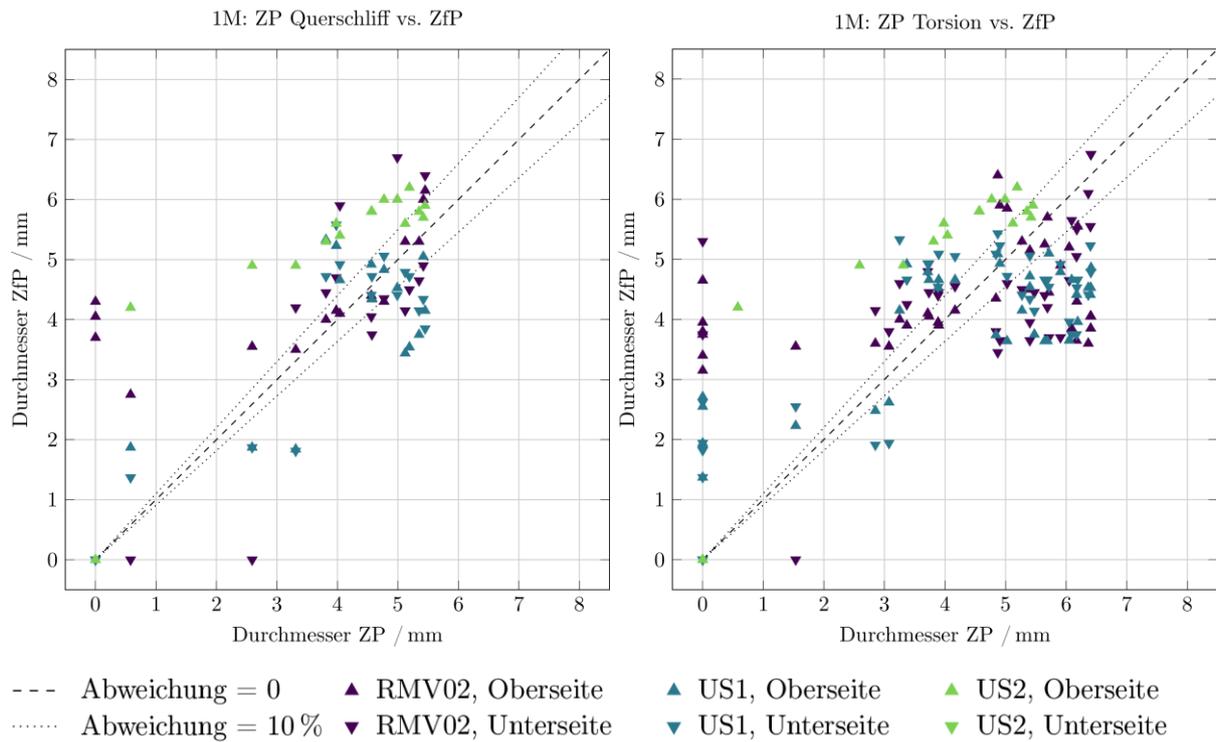


Abbildung 43: 1M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

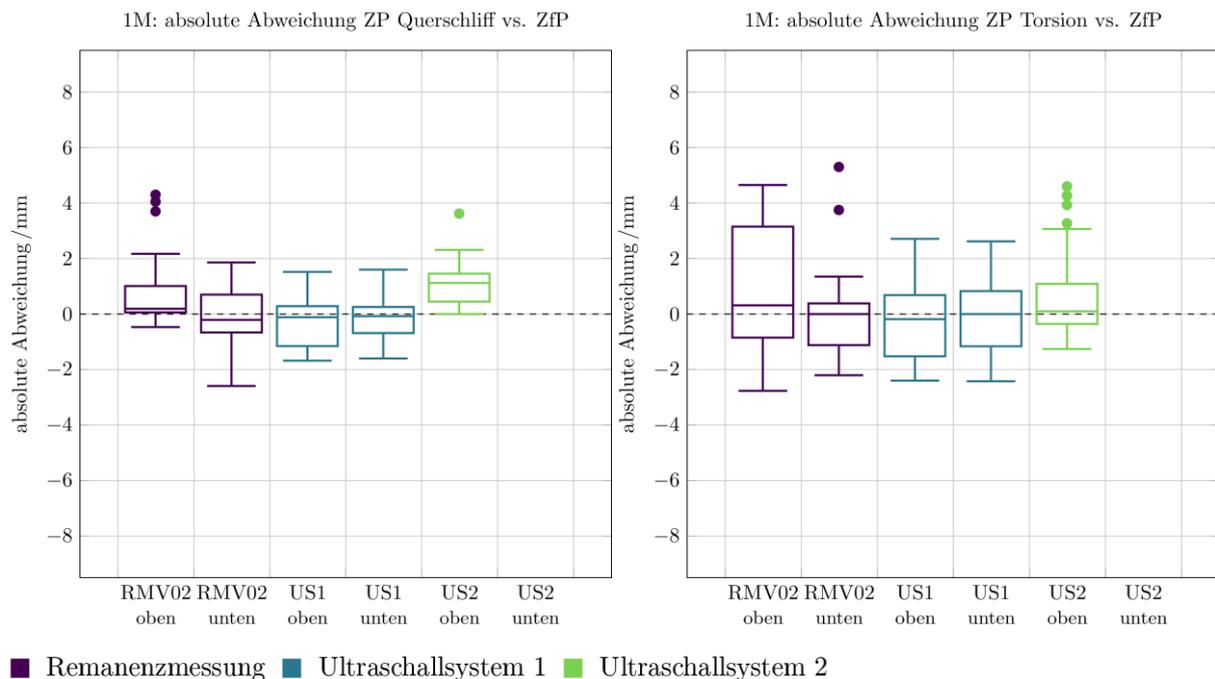


Abbildung 44: 1M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.3.2 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Trainings- und Testmengen konnte der Auswertalgorithmus so weit entwickelt werden, dass eine automatisierte ZfP-Bewertung von Schweißpunkten möglich ist. Dadurch lassen sich objektive Bewertungen von Widerstandspunktschweißverbindungen durchzuführen, ohne vom Prüfpersonal und dessen Erfahrungen abhängig zu sein. Das ist ein entscheidender Aspekt für vollautomatisierte und produktionsbegleitende ZfP von Schweißpunkten. Hinzu kommt, dass die bildende Analyse der Remanenzflussdichte berührungslos arbeitet und kein Koppelmittel notwendig ist, was einen Vorteil gegenüber den Ultraschallprüfsystemen darstellt.

7.4 Untersuchungsergebnisse der einzelnen Materialdickenkombinationen

7.4.1 Extreme Materialdickenkombinationen

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse bei der Anwendung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei extremen MDK vorgestellt. Extreme MDK sind u. a. durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Blechdickenverhältnis $t_1/t_2 > 3/1$ [44]
- deutlich unterschiedliche spezifische elektrische Widerstände
- deutlich unterschiedliche Materialfestigkeit

Die Versuchsreihen 1RSW, 2RSW, 3RSW, 2M, 3M und 4M (Tabelle 1, Tabelle 3) können somit als extreme MDK angesehen werden.

7.4.1.1 1RSW

Die MDK 1RSW ist durch ein Blechdickenverhältnis von $> 3/1$ charakterisiert und die verwendeten Werkstoffe weisen stark voneinander abweichende Festigkeiten auf (Tabelle 12). Die Herausforderung beim Schweißen dieser MDK ist die Anbindung des oberen Bleches, ohne einen zu tiefen Elektrodeneindruck zu erzeugen. Bei den Schweißversuchen hat sich gezeigt, dass keine Lötverbindungen der Zinkbeschichtungen entstehen. D. h., bei der Ausprägung der Schweißverbindung ist in den Querschliffen zu beobachten, dass die Schweißlinse bei geringen Schweißströmen im unteren Grenzbereich nur sehr gering in das obere Blech hineinwächst (Abbildung 45). Bei höheren Schweißströmen wächst die Schweißlinse sehr weit in das obere Blech hinein (Abbildung 46, Abbildung 47). Es war nicht möglich, Lötverbindungen nur zwischen den Zinkschichten zu erzielen. Entweder waren die Bleche nach dem Schweißprozess gar nicht miteinander verbunden oder es kam zur Ausbildung einer Schweißverbindung zwischen den Blechen.

Tabelle 12: MDK 1RSW

Versuchsreihe	1RSW	Festigkeit $R_{p0,2}$ R_m
Blech 1, oben	DC04+ZE, $t = 0,65$ mm	141,1 MPa 284,8 MPa [46]
Blech 2, unten	HX340LAD+Z, $t = 3$ mm	356,5 MPa 434,0 MPa [46]

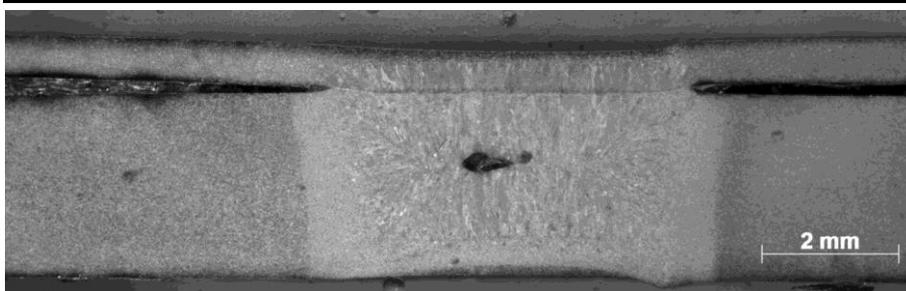


Abbildung 45: Querschliff der Schweißprobe 1RSW_I5,6kA_P0002, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 2,0$ kN, $t_w = 600$ ms



Abbildung 46: Querschliff der Schweißprobe 1RSW_I8,0kA_P0004, $I_w = 8,0$ kA, $F_e = 2,0$ kN, $t_w = 600$ ms

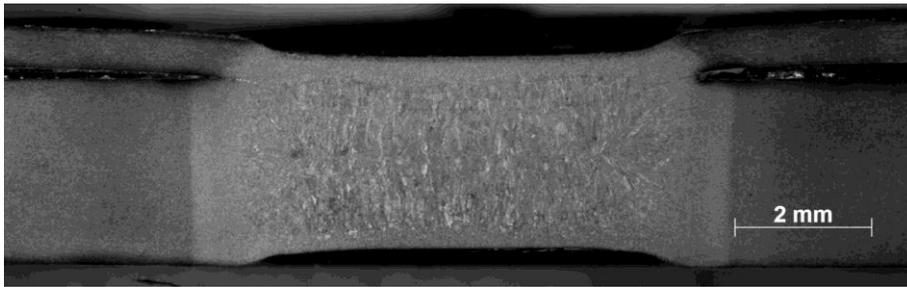


Abbildung 47: Querschliff der Schweißprobe 1RSW_I9,6kA_P0005, $I_w = 9,6$ kA, $F_e = 2,0$ kN, $t_w = 600$ ms

Bei der Betrachtung der Punkt- und Linsendurchmesser mit zunehmenden Schweißstrom in Abbildung 48 fällt auf, dass mit dem Parametersatz des geringsten Schweißstroms von 5,6 kA größere Schweißverbindungen erzielt wurden, als beim nächst größeren Parametersatz. Dies hängt mit der Verwendung neuer Elektroden zusammen, die durch den ersten Parametersatz eingeschweißt wurden und die resultierende größere Kontaktfläche zwischen Elektrode und Blech zu einer geringeren Stromdichte führt. Mit zunehmender Anzahl geschweißter Punkte flacht die Arbeitsfläche der Elektrode ab, es kommt zur Abnahme der Stromdichte und folglich zu einer geringeren Wärmeentwicklung. Dadurch kommt es zu kleineren Punktdurchmessern. Die Messergebnisse zeigen nur sehr geringe Streuungen der ZP über alle Parametersätze hinweg. Es zeigt sich ebenfalls, dass geringere Streuungen bei der Remanenzmessung von der Unterseite gegenüber den Messungen von der Oberseite erreicht werden konnten. Dies kann mit der Verbesserung des Messsystems erklärt werden, es kann aber auch am Einfluss der unterschiedlichen Blechdicken liegen, was aktuell nicht eindeutig voneinander getrennt werden kann. Die Ultraschallmessungen liefern meist kleinere Durchmesser als die gemessenen der ZP. Die große Spannweite der Messungen der Unterseite bei 9,6 kA kann durch tiefe Elektrodeneindrücke oder eine Fehlbedienung beim Messvorgang verursacht worden sein. Dennoch bestätigt der Median dieser Messung eine geringe Abweichung zum Median der ermittelten Linsendurchmesser.

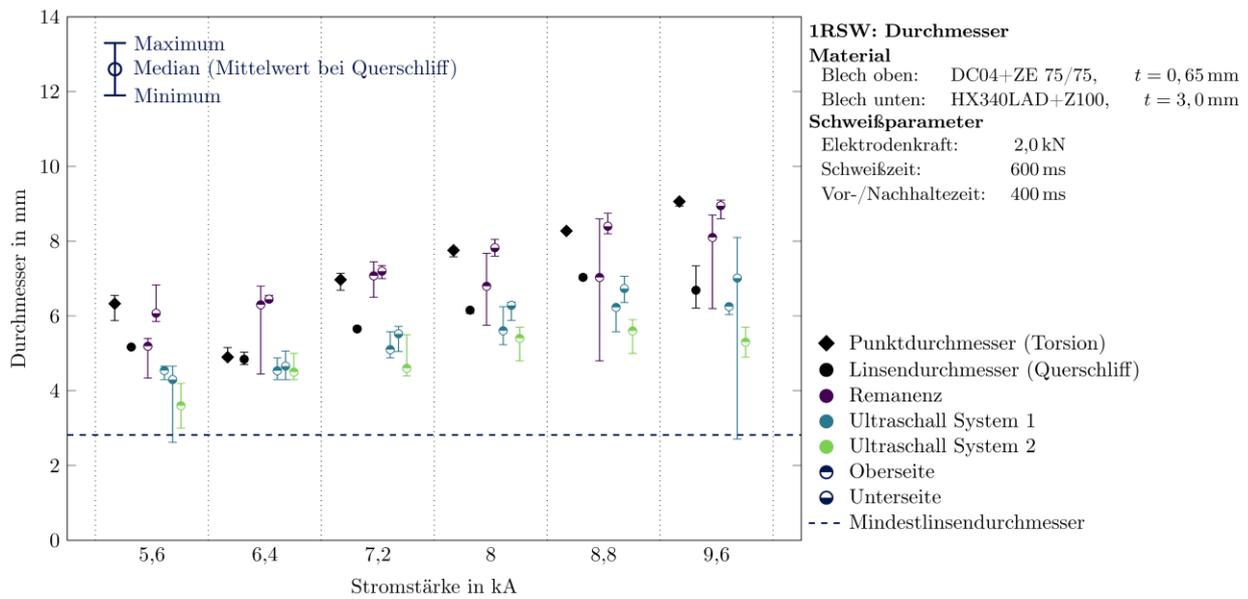


Abbildung 48: 1RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

Die Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP in Abbildung 49 bestätigen die geringen Abweichungen der Messsysteme. Es ist eine sehr gute Korrelation der Messergebnisse der Remanenzmessungen und den Torsionsprüfungen zu erkennen. Eine ähnlich gute Korrelation weisen die Ultraschallmessungen auf. Dabei ist festzustellen, dass die Ultraschallmessungen beim Vergleich mit den Querschiffen genauere Ergebnisse liefern als die Remanenzmessungen. Verglichen mit den Torsionsprüfungen kehren sich die Verhältnisse um. Die statistische Auswertung mit Hilfe der Box-Plots in Abbildung 50 verdeutlicht die geringere Streuung der Remanenzmessungen von der Unterseite der Proben.

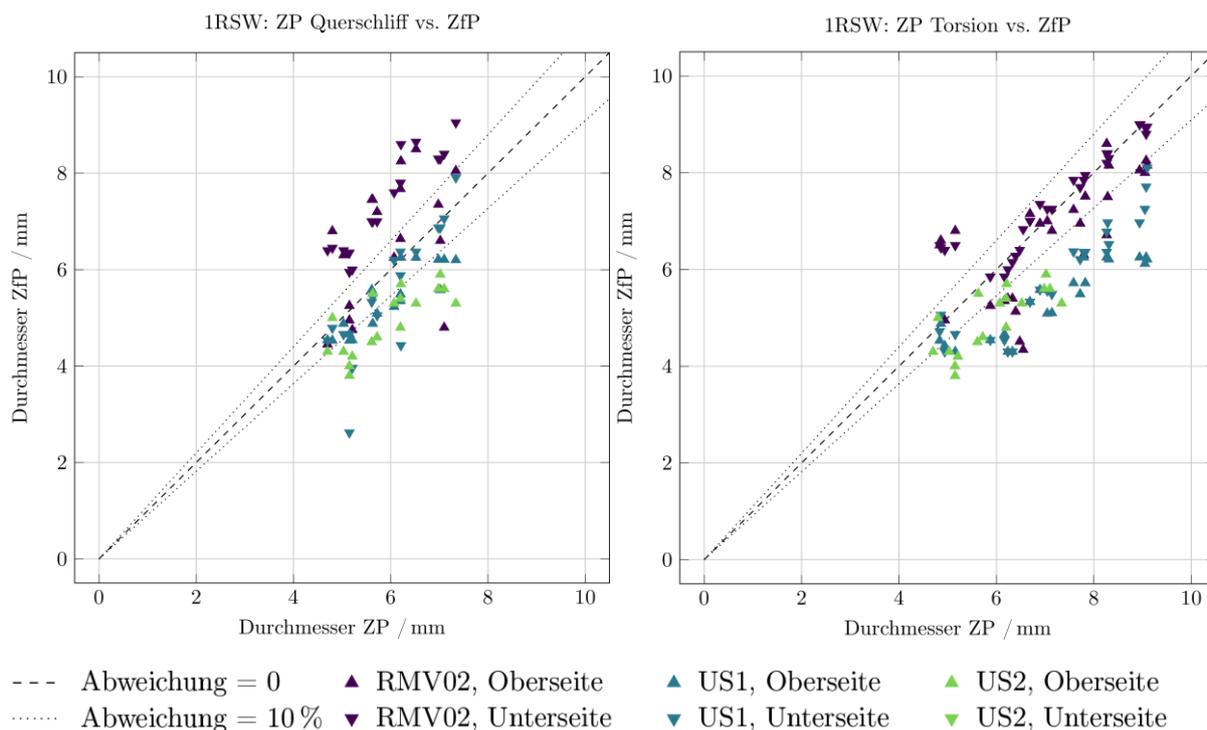


Abbildung 49: 1RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

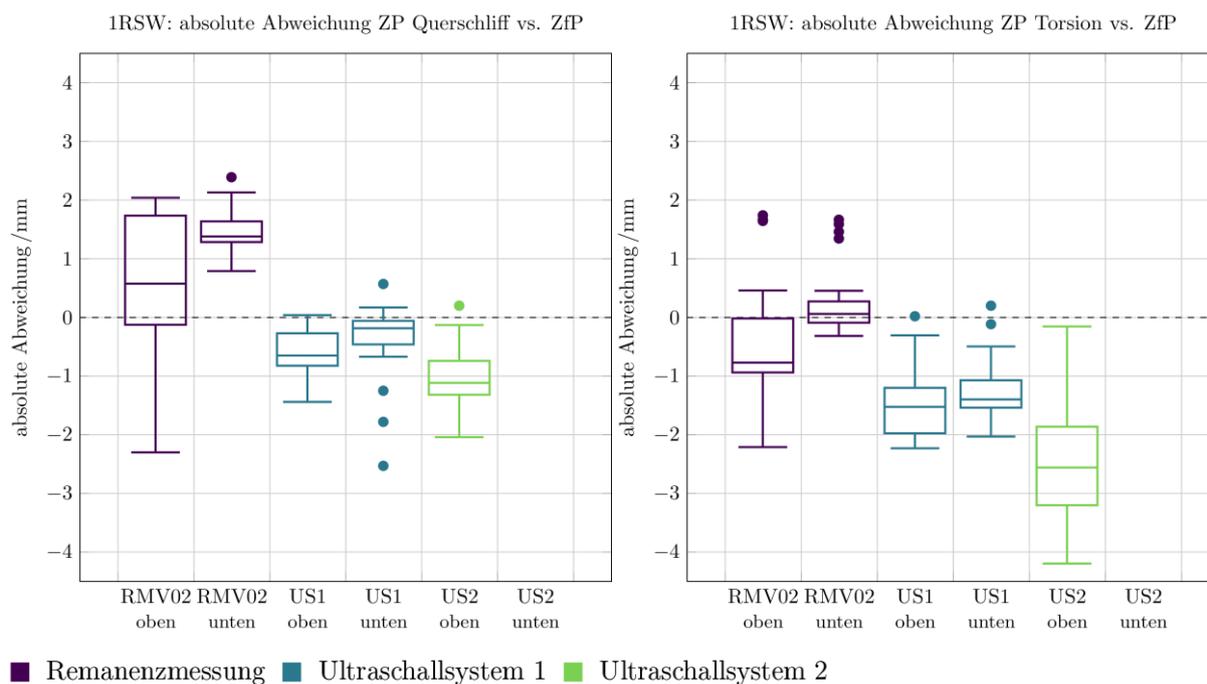


Abbildung 50: 1RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.1.2 2RSW

Die MDK 2RSW ist als extreme MDK einzustufen, da die eingesetzten Bleche DC04 und 22MnB5 stark voneinander abweichende Festigkeiten und spezifische elektrische Widerstände aufweisen (Tabelle 13).

Tabelle 13: MDK 2RSW

Versuchsreihe	2RSW	Festigkeit $R_{p0,2}$ R_m	spez. elektr. Widerstand
Blech 1	DC04+ZE, $t = 0,65$ mm	141,1 MPa 284,8 MPa [46]	0,13 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ [47]
Blech 2	22MnB5+AS, $t = 2$ mm	300 – 550 MPa 500 – 700 MPa [48]	0,214 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ [49] 0,25 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ [50]
Blech 3	22MnB5+AS, $t = 2$ mm		

Die in Abbildung 54 dargestellte Entwicklung der Schweißverbindung mit zunehmenden Schweißstrom verdeutlicht die Herausforderung, diese MDK zuverlässig zu schweißen. Erst ab einem Schweißstrom von 8,8 kA konnte eine Anbindung des oberen Blechs DC04+ZE mit Überschreiten des Mindestlinsendurchmessers für FE1 erreicht werden. Die Linseneindringtiefe in das obere Blech ist sehr gering. Der Querschliff in Abbildung 51 zeigt, dass es im oberen Blech zu einer Gefügeveränderung kam, jedoch hat sich keine Schweißverbindung in FE1 ausgebildet. Mit zunehmenden Schweißstrom kommt es zu sehr tiefen Elektrodeneindrücken auf beiden Seiten der Verbindungen (Abbildung 52). Flüssiges Material wird während des Schweißprozesses aus der Fügezone herausgedrückt (Abbildung 53) und es treten bei höheren Schweißströmen ab 8,8 kA vermehrt Schweißspritzer auf. Es gibt deutliche Unterschiede zwischen den ZP von Querschliff (Linsendurchmesser) und Torsion (Punktdurchmesser). Die ZfP aller Messungen weisen vereinzelt große Schwankungen auf.



Abbildung 51: Querschliff der Schweißprobe 2RSW_I5,6kA_P0010, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 1000$ ms



Abbildung 52: Querschliff der Schweißprobe 2RSW_I8,0kA_P0006, $I_w = 8,0$ kA, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 1000$ ms

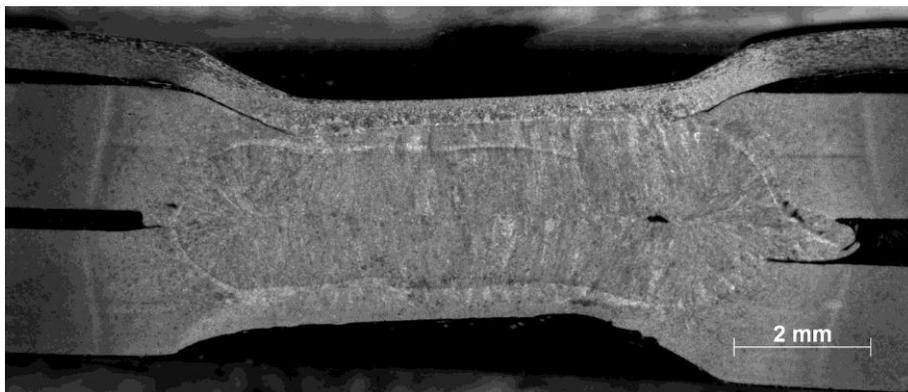


Abbildung 53: Querschliff der Schweißprobe 2RSW_I9,6kA_P0005, $I_w = 8,0$ kA, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 1000$ ms

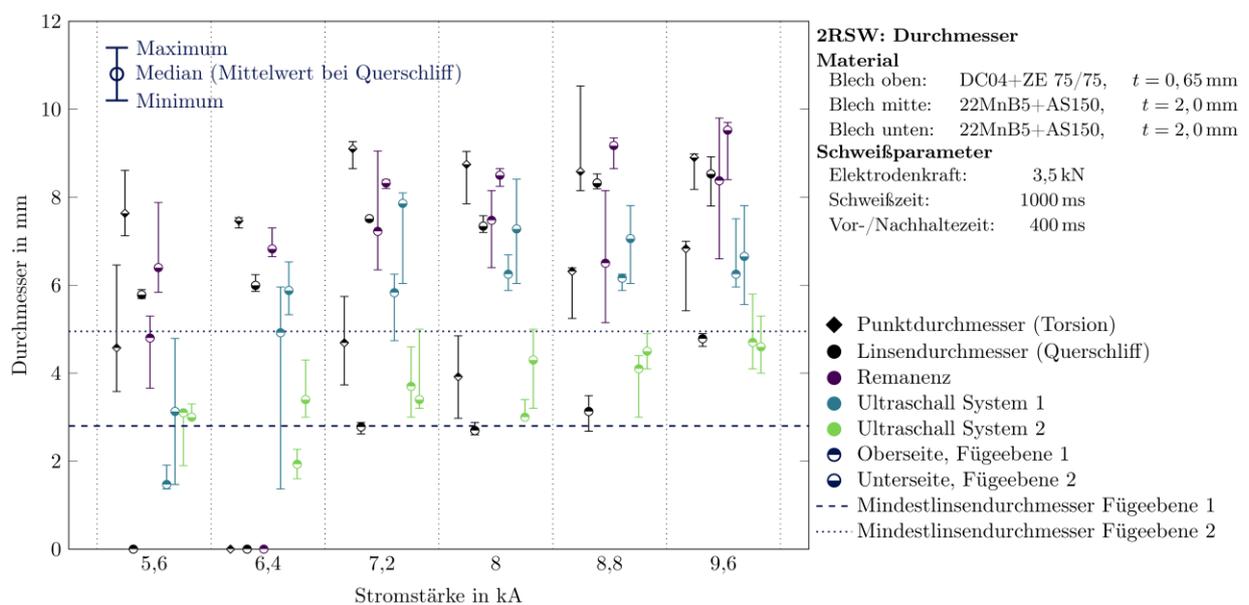


Abbildung 54: 2RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

Die Gegenüberstellung von ZP und ZfP in Abbildung 55 verdeutlicht die Schwierigkeit, die die Messsysteme im Bereich kleinerer Schweißpunkte bei der Messung an der Blechoberseite haben. Mit zunehmenden Linsen- bzw. Punktdurchmessern nehmen die

Abweichungen deutlich ab. Bei den Messungen an der Unterseite der MDK treten kaum Probleme bei den ZfP-Systemen auf. Dies zeigt auch die statistische Auswertung in Abbildung 56. Anzumerken ist in Hinblick auf die Messergebnisse der Remanenzmessungen an der Oberseite, dass im Abschnitt 7.3 nach der Verbesserung des Messsystems wesentlich bessere Messungen erzielt werden konnten.

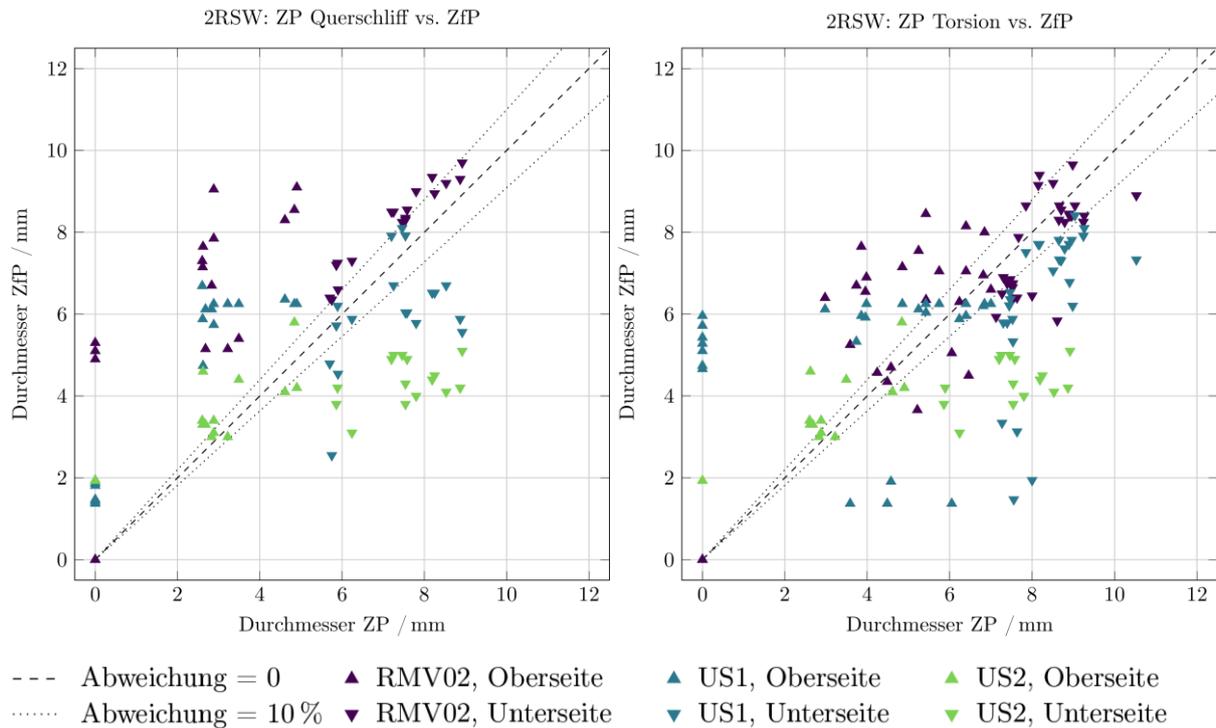


Abbildung 55: 2RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

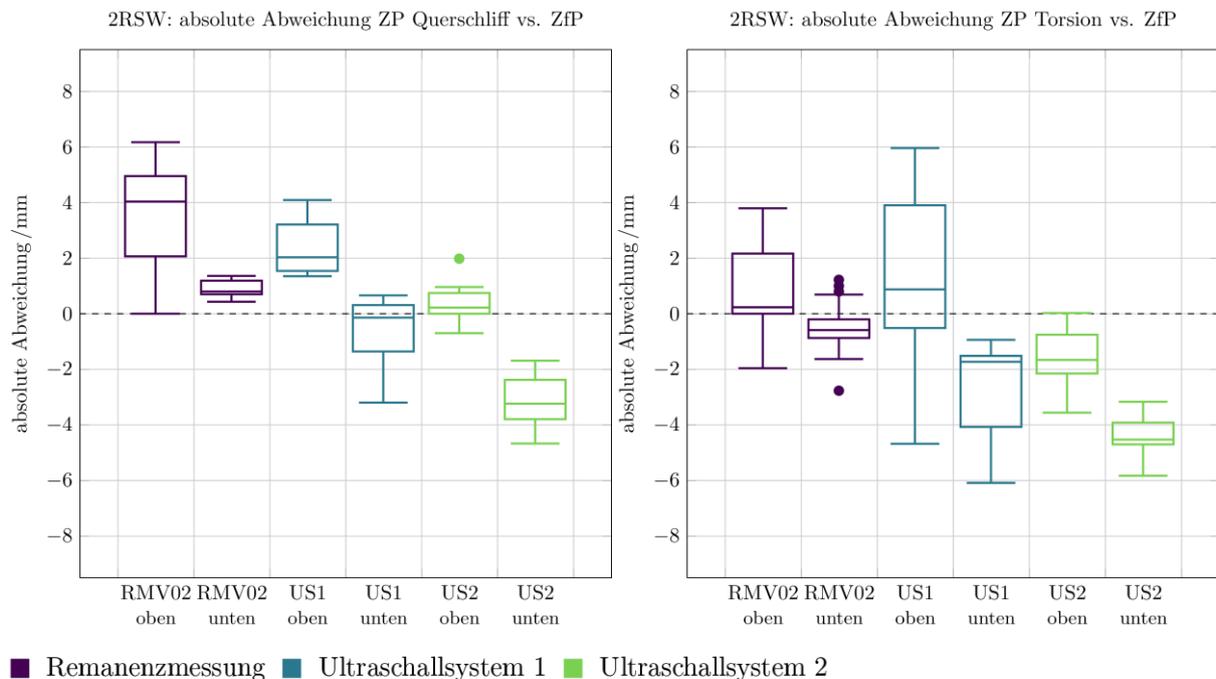


Abbildung 56: 2RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.1.3 3RSW

Die MDK 3RSW ist auf Grund der voneinander abweichenden Festigkeiten und des großen Blechdickenverhältnisses von $> 3/1$ zwischen DC04+ZE und HX340LAD+Z als extreme MDK einzustufen (Tabelle 14).

Tabelle 14: MDK 3RSW

Versuchsreihe	3RSW	Festigkeit $R_{p0,2}$ R_m
Blech 1	DC04+ZE, t = 0,65 mm	141,1 MPa 284,8 MPa [46]
Blech 2	HX340LAD+Z, t = 3 mm	356,5 MPa 434,0 MPa [46]
Blech 3	HX340LAD+Z, t = 2 mm	375,3 MPa 440,2 MPa [46]

Die Querschliffe verdeutlichen die große Herausforderung, diese MDK zuverlässig zu schweißen. Die Schweißlinse beginnt im Zentrum der MDK und wächst zunehmend nach außen. Eine Schweißverbindung in FE2 ist nicht als kritisch einzuschätzen. Das Verschweißen der Bleche 1 und 2 hingegen ist als sehr kritisch zu betrachten. In den Mikroschliffen der Abbildung 57, Abbildung 58 und Abbildung 60 ist jeweils eine deutliche Wärmebeeinflussung der Bleche ausgehend von FE1 zu beobachten. Es kommt lokal zum Verschweißen beider Bleche. Im Kontrast dazu stehen die Prüfergebnisse der Torsionsprüfung, wo es bei keiner Schweißprobe zum Verschweißen der Bleche in FE1 kommt. Diese zerstörten Torsionsproben ließen sich nur schwer bewerten. Zusätzliche Messungen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) der Bruchflächen sollten Aufschluss geben. Der Vergleich des Zinkgehalts in der Torsionsbruchfläche an Blech 1 zwischen einer dieser kritischen Proben und einer gut verschweißten Probe zeigt allerdings keine deutlichen Unterschiede (Abbildung 59).

Die Gegenüberstellung von ZfP und ZP in Abbildung 62 zeigt die Schwierigkeiten, die alle ZfP-Systeme bei dieser MDK haben. Bei der statistischen Auswertung in Abbildung 63 ist zu erkennen, dass diese Schwierigkeiten insbesondere bei der Messung von der Oberseite auftreten. Die Messungen von der Unterseite weisen kleinere Schwankungen auf. Diese Auswertungen sind jedoch unter dem oben beschriebenen Kontext bezüglich der unterschiedlichen Messergebnisse zwischen beiden ZP-Methoden differenziert zu betrachten.

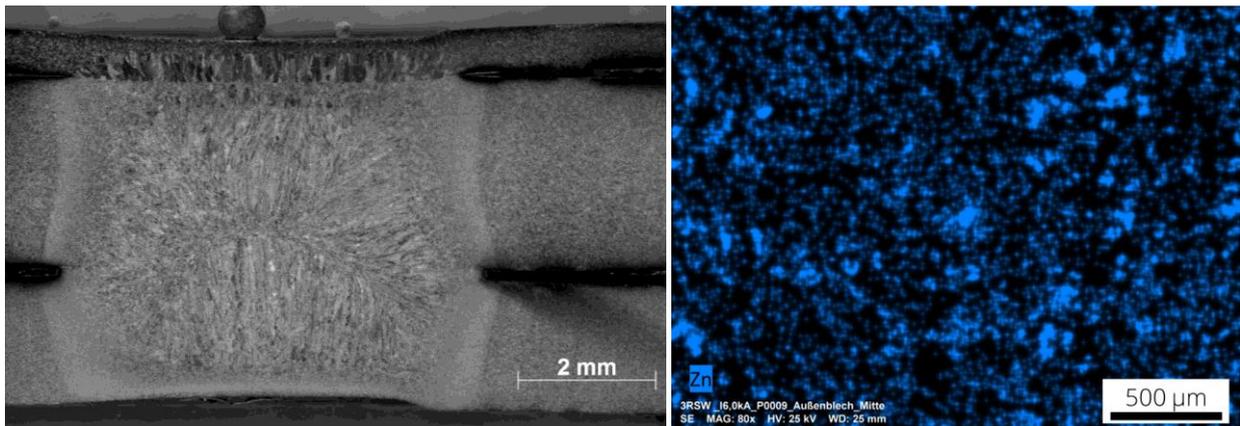


Abbildung 57: Querschliff der Schweißprobe 3RSW_I6,0kA_P0003, $I_w = 6,0$ kA, $F_e = 2,5$ kN, $t_w = 400$ ms und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 3RSW_I6,0kA_P0009

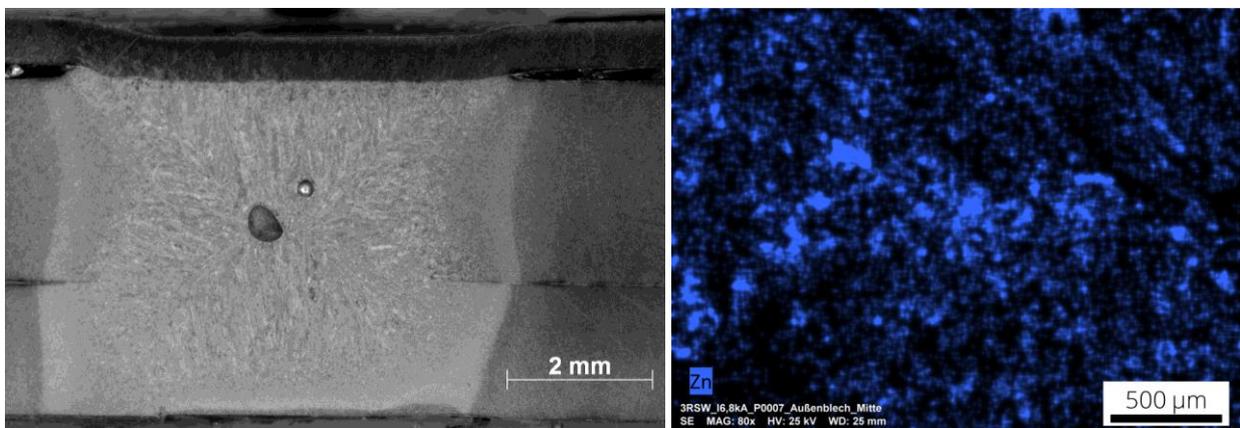


Abbildung 58: Querschliff der Schweißprobe 3RSW_I6,8kA_P0006, $I_w = 6,8$ kA, $F_e = 2,5$ kN, $t_w = 400$ ms und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 3RSW_I6,8kA_P0007

Histogramm Zn-Anteil

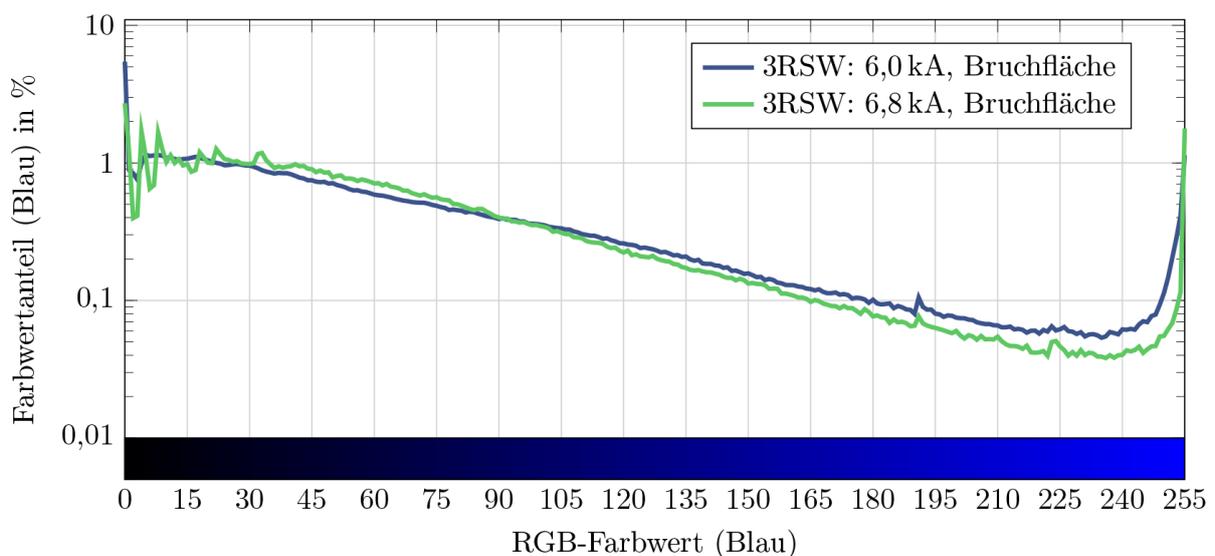


Abbildung 59: Vergleich der Zinkanteile (Zn) zwischen 3RSW, $I_w = 6,0$ kA und $I_w = 6,8$ kA

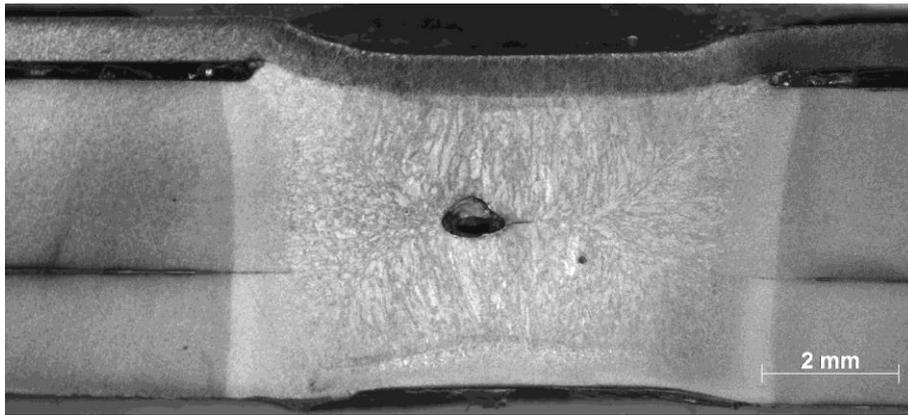


Abbildung 60: Querschliff der Schweißprobe 3RSW_I10,0kA_P0004, $I_w = 10,0$ kA, $F_e = 2,5$ kN, $t_w = 400$ ms

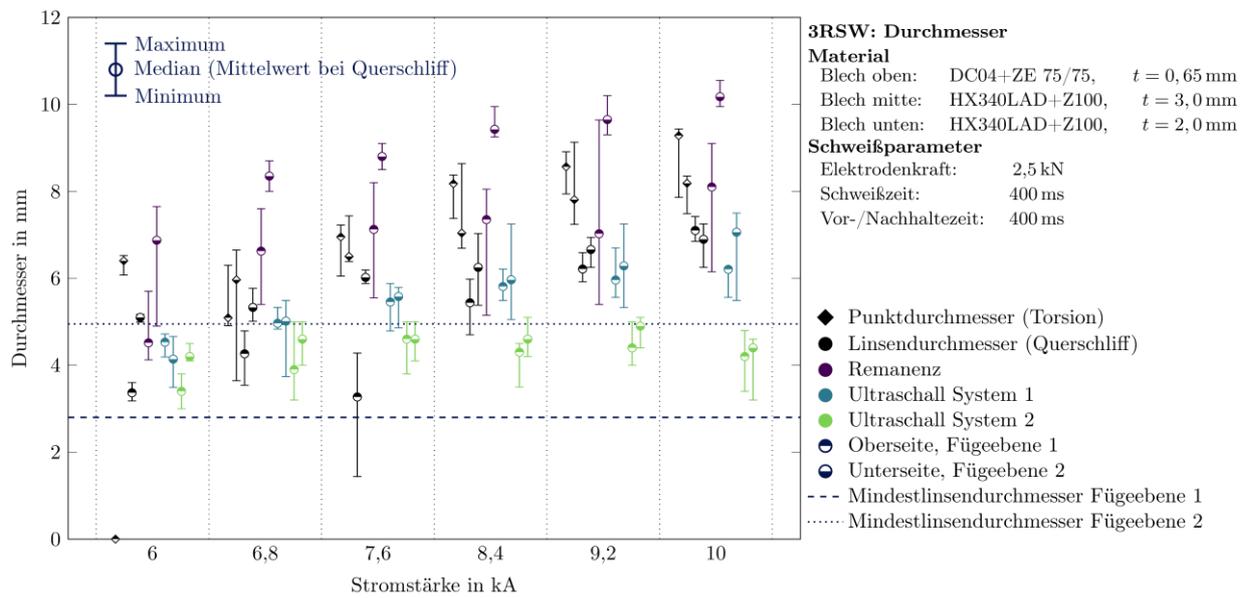


Abbildung 61: 3RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

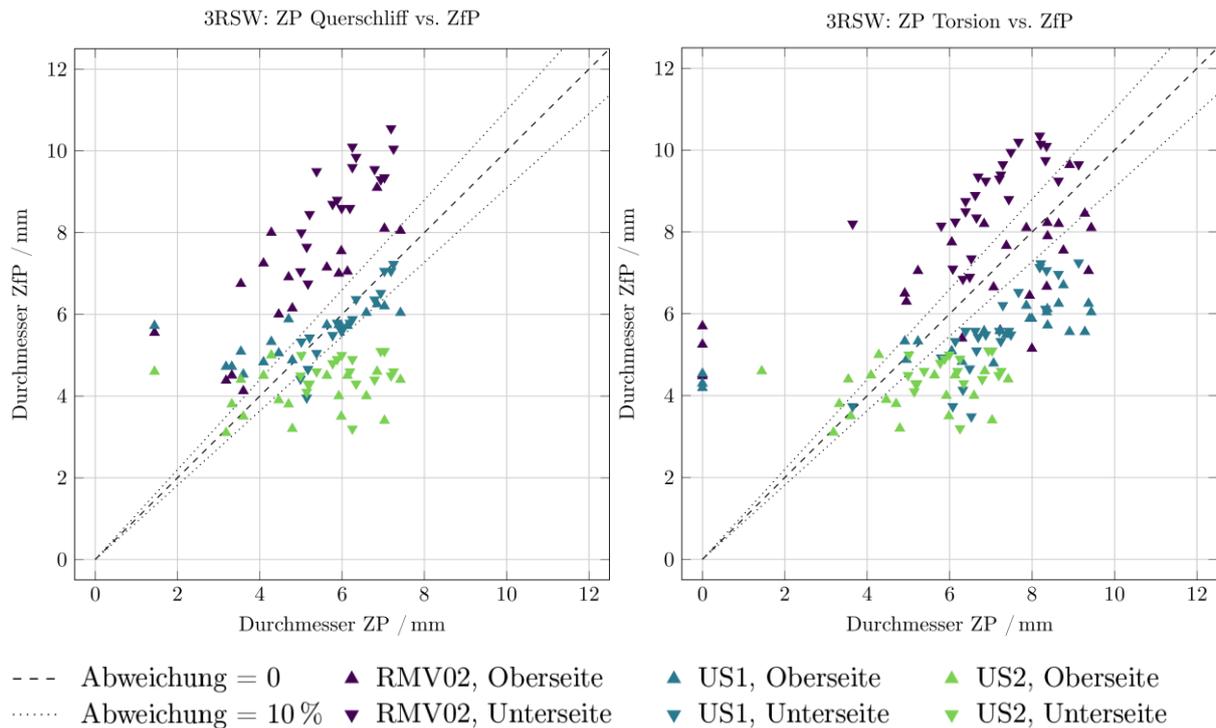


Abbildung 62: 3RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

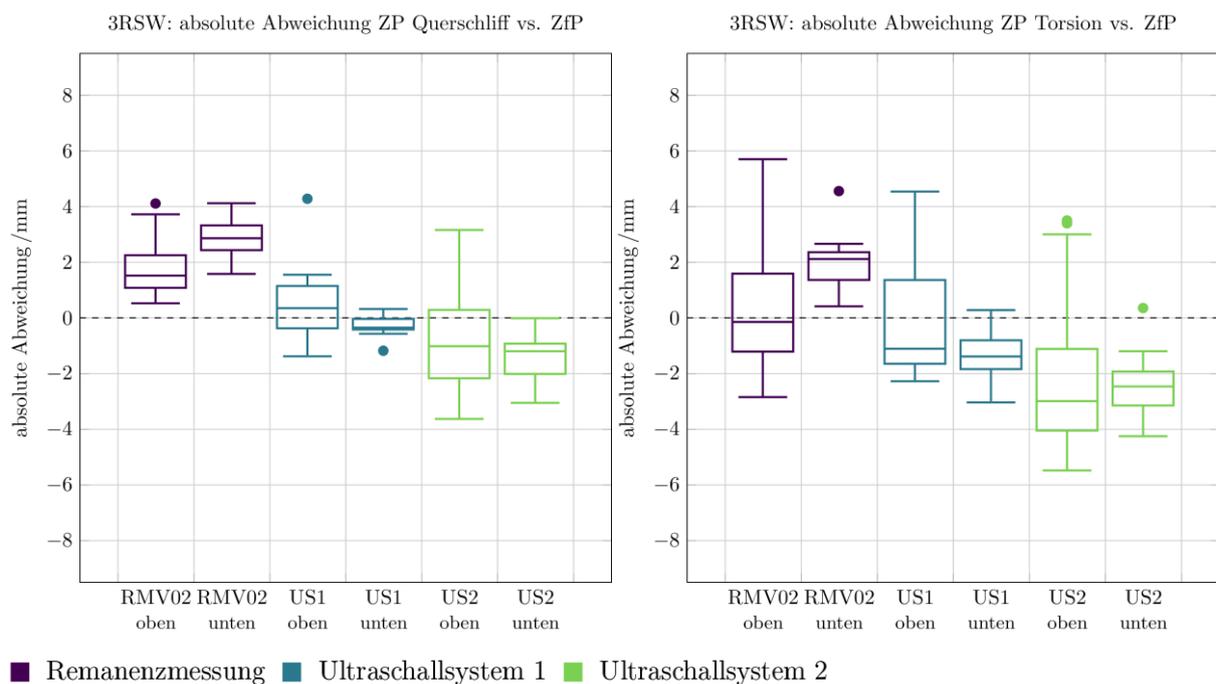


Abbildung 63: 3RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.1.4 2M

Das große Blechdickenverhältnis von 3/1 der MDK 2M birgt die Gefahr von Lötverbindungen zwischen den Zinkbeschichtungen, weshalb diese MDK als extreme MDK eingestuft wird (Tabelle 15).

Tabelle 15: MDK 2M

Versuchsreihe	2M
Blech 1	HX340LAD+Z, $t = 1$ mm
Blech 2	HX340LAD+Z, $t = 3$ mm

Die Abbildung 64 zeigt diesen Zusammenhang sehr deutlich. Die dunkle Linie zwischen den Blechen zeigt die Lötverbindung. Das Grundmaterial wurde nicht aufgeschmolzen. Mit zunehmenden Schweißstrom entsteht die Schweißlinse im Mittelpunkt der MDK, was in Abbildung 65 sehr gut zu erkennen ist. In Abbildung 66 ist zu erkennen, dass die Linse mit zunehmenden Durchmesser nach außen in Richtung des oberen Bleches wächst, bis dieses sprunghaft mit einer großen Anbindungsfläche verschweißt ist (Abbildung 67). Die Auswertung aller ZfP-Messungen zeigt, dass in den unteren Parameterbereichen, in denen laut ZP keine Schweißverbindung vorliegt, große Schwankungen auftreten. Hinzu kommt, dass die ZfP-Messungen fälschlicherweise Schweißverbindungen erkennen. Sobald eine Schweißverbindung vorhanden ist, nehmen diese Streuungen deutlich ab und es kommt zu keinen Falschbewertungen.

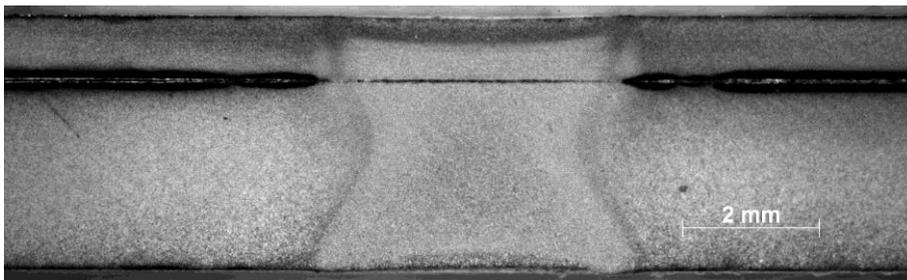


Abbildung 64: Querschliff der Schweißprobe 2M_I6,4kA_P0002, $I_w = 6,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms

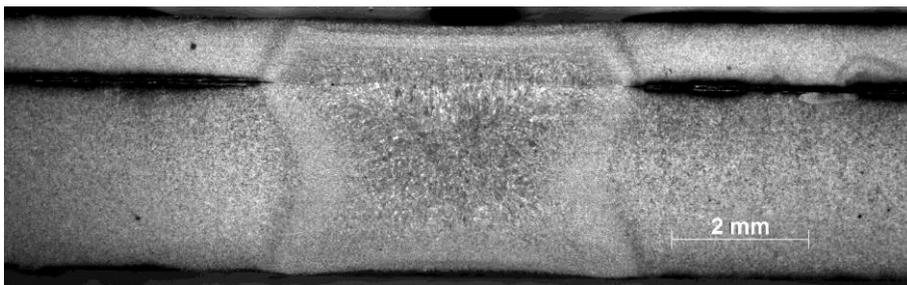


Abbildung 65: Querschliff der Schweißprobe 2M_I8,0kA_P0002, $I_w = 8,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms

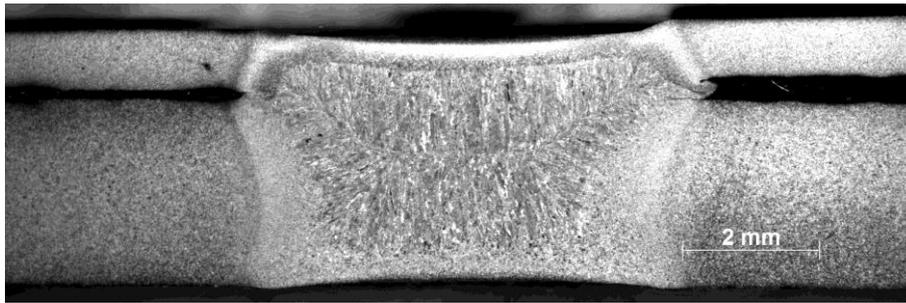


Abbildung 66: Querschliff der Schweißprobe 2M_I10,4kA_P0003, $I_w = 10,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms

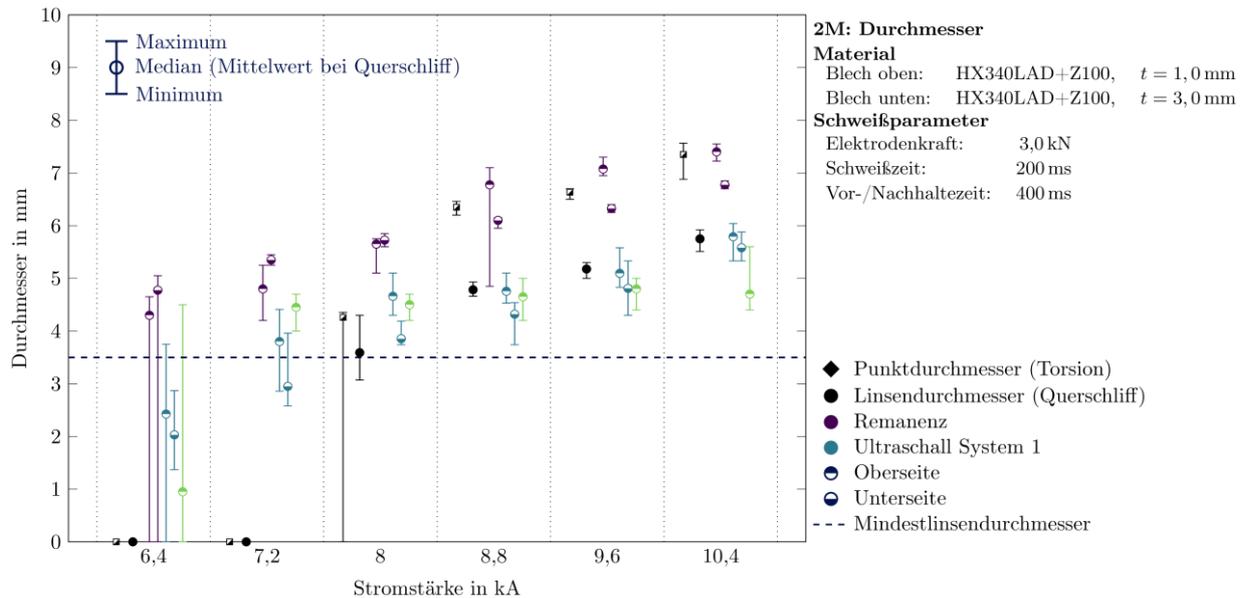


Abbildung 67: 2M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

Die Gegenüberstellung von ZP und ZfP in Abbildung 68 verdeutlicht die oben genannte Problematik. Es ist jedoch anzumerken, dass im Koordinatenursprung ($x = 0, y = 0$) die Messpunkte sich gegenseitig überlagern. Die Schwierigkeiten der einzelnen Messsysteme resultieren in großen Interquartilsabständen (IQR), insbesondere bei den absoluten Abweichungen zwischen ZfP und ZP durch Torsion. Hier gilt es, die Messsysteme in ihrer Bewertungsqualität zu verbessern.

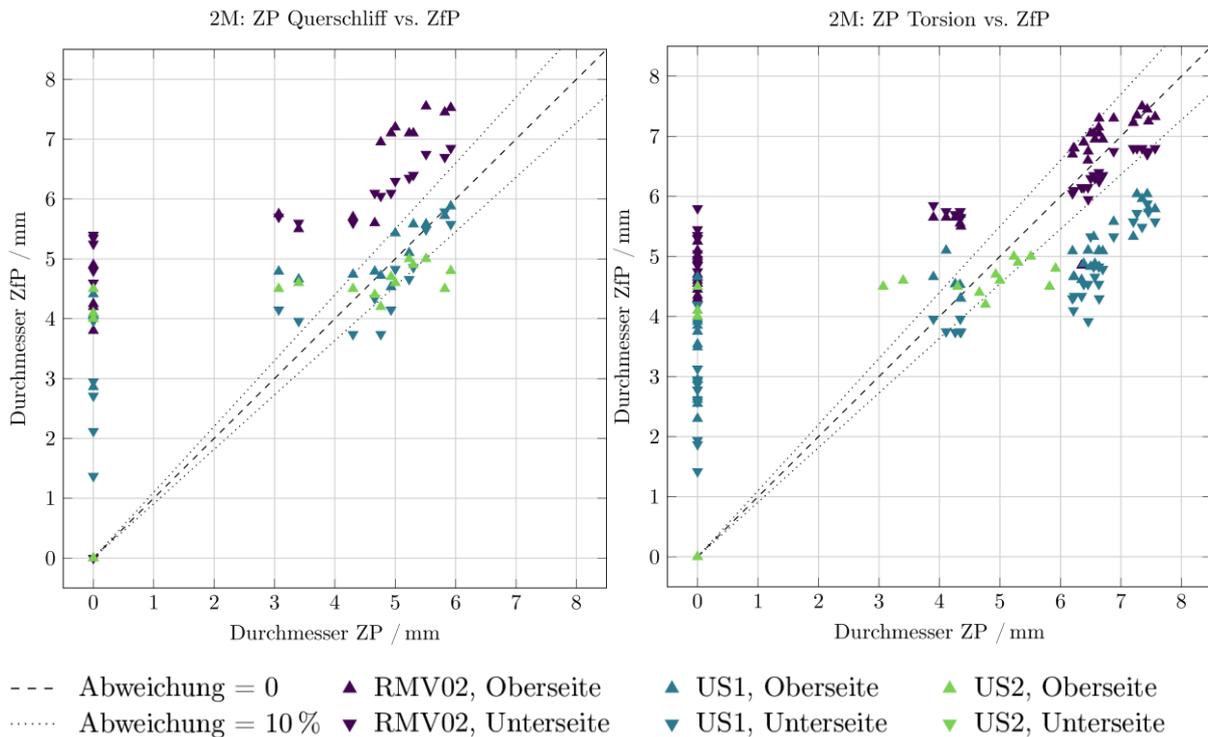
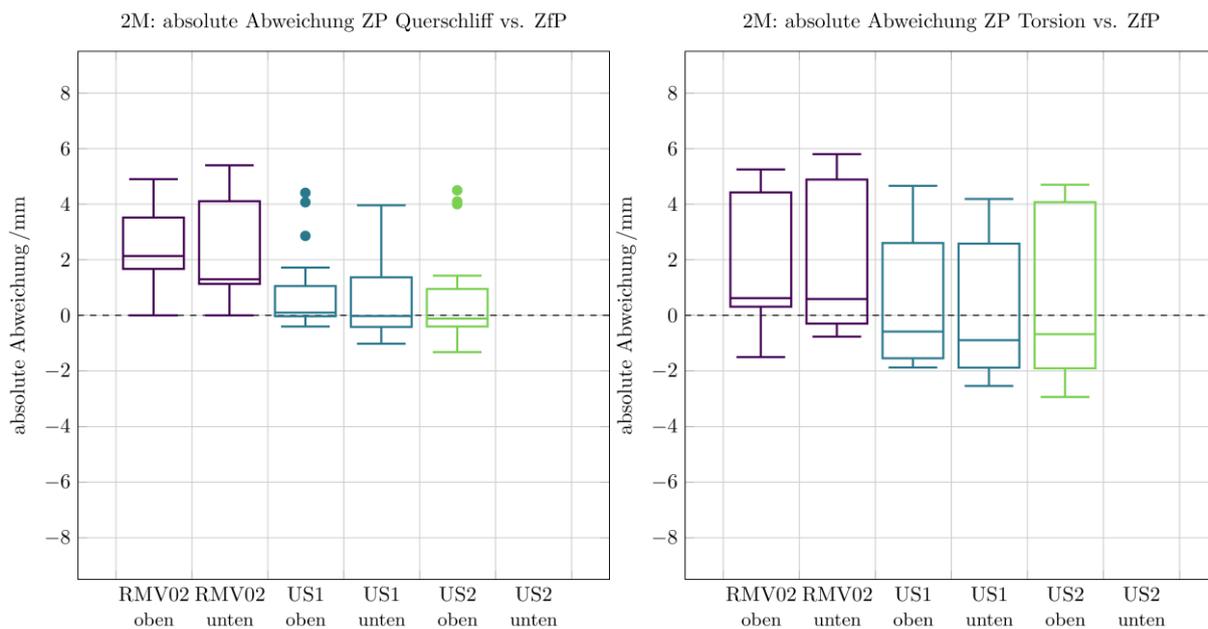


Abbildung 68: 2M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP



■ Remanenzmessung ■ Ultraschallsystem 1 ■ Ultraschallsystem 2

Abbildung 69: 2M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.1.5 3M

Die zweischnittige MDK 3M (Tabelle 16) ist nach den gleichen Kriterien wie die MDK 2M als schwer zu schweißende MDK einzustufen. Die Abbildung 70 zeigt, die gleiche Problematik der Gefahr von Lötverbindungen zwischen den Zinkbeschichtungen. In Abbildung 71 ist der Entstehungsbeginn einer Schweißverbindung zu erkennen. Diese

liegt asymmetrisch in der Fügezone. Der Querschliff in Abbildung 72 zeigt, dass eine zuverlässige Schweißverbindung mit entsprechender Linseneindringtiefe möglich ist. Es ist jedoch zu erkennen, dass es zu Rissen an den Flanken des Elektrodeneindrucks kommt, was die Festigkeit der Schweißverbindung negativ beeinflussen kann.

Tabelle 16: MDK 3M

Versuchsreihe	3M
Blech 1	HX340LAD+Z, t = 1 mm
Blech 2	HX340LAD+Z, t = 1 mm
Blech 3	HX340LAD+Z, t = 3 mm

Die asymmetrische Schweißlinse aus Abbildung 71 stellt für die Ultraschallmessungen eine große Herausforderung dar, da der Schallweg durch die Linsengeometrie erheblich beeinflusst wird, was die großen Messabweichungen in Abbildung 73 bei einer Stromstärke von 8,4 kA erklären würde. Im Vergleich zur MDK 2M sind die Messergebnisse der Remanenzmessung deutlich besser. Dies liegt an den zwei Fügeebenen und der größeren Gesamtlechdicke der MDK. Dadurch schwächt eine Fehlschweißung das Magnetfeld erheblich und die notwendige Konzentration des magnetischen Flusses durch die Schweißverbindung kommt nicht zu Stande.

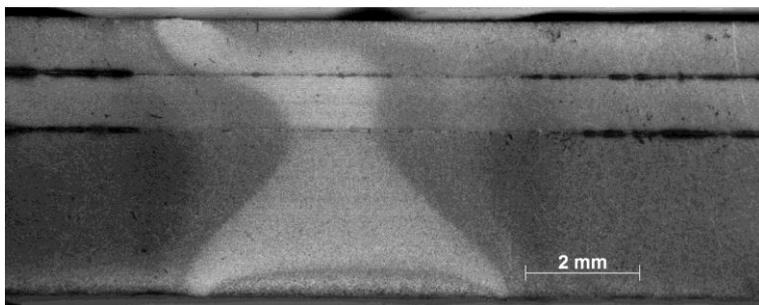


Abbildung 70: Querschliff der Schweißprobe 3M_17,2kA_P0003, $I_w = 7,2$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 400$ ms

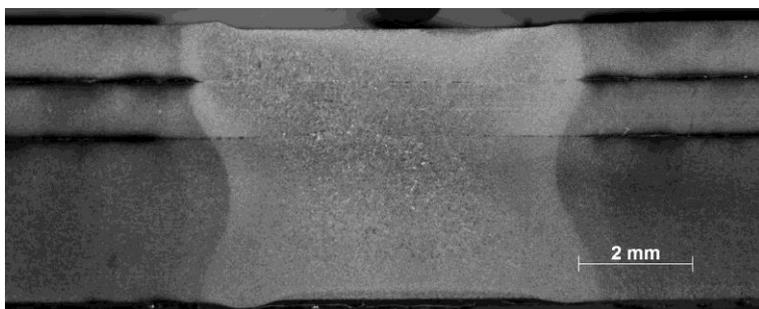


Abbildung 71: Querschliff der Schweißprobe 3M_18,4kA_P0002, $I_w = 8,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 400$ ms

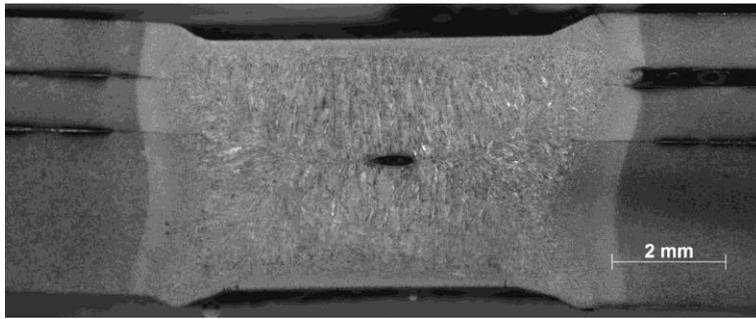


Abbildung 72: Querschliff der Schweißprobe 3M_I12,0kA_P0002, $I_w = 12,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 400$ ms

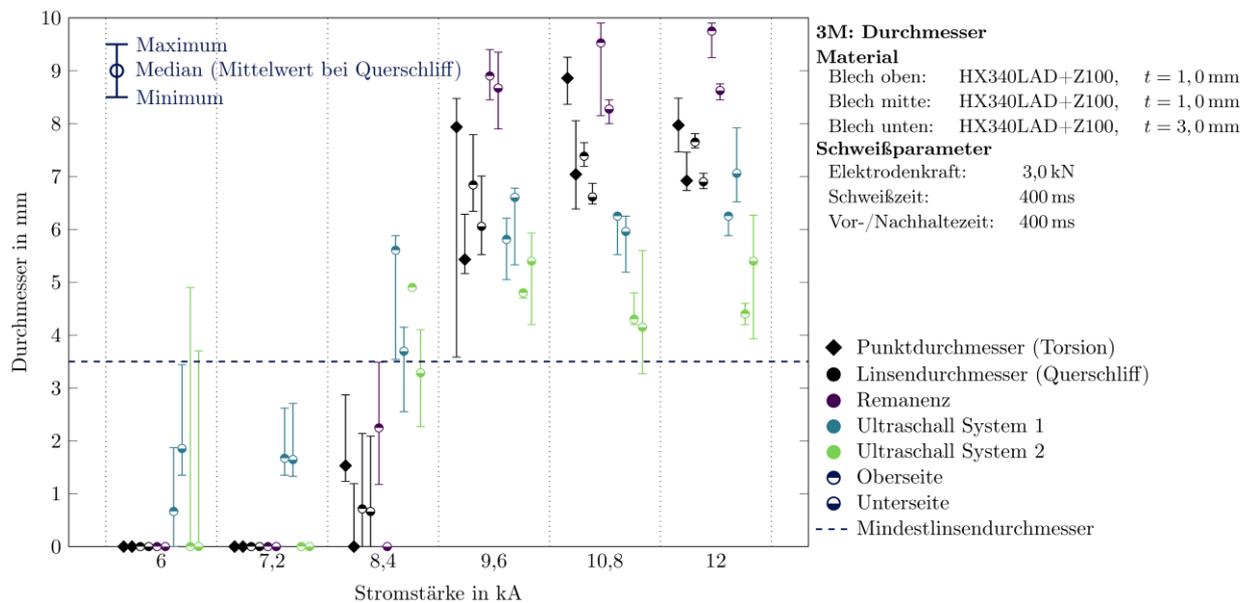


Abbildung 73: 3M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

Abbildung 74 verdeutlicht, dass nur sehr wenige kleine Schweißverbindungen erzielt wurden. Vielmehr kam es entweder zu Fehlschweißungen oder zu zuverlässig geschweißten Punkten. Die Ultraschallmessungen zeigen die gleichen Probleme bei der Bewertung von Fehlschweißungen wie bei MDK 2M. Mit zunehmenden Schweißpunktdurchmessern sinken die Abweichungen erheblich. Die Remanenzmessungen korrelieren besser, was die oben beschriebene Thematik der Magnetfeldschwächung bestätigt. Die statistische Auswertung in Abbildung 75 zeigt geringere absolute Abweichungen bei den Ultraschallmessungen der Unterseite. Bei den Remanenzmessungen ist die Abweichung ähnlich einzuschätzen.

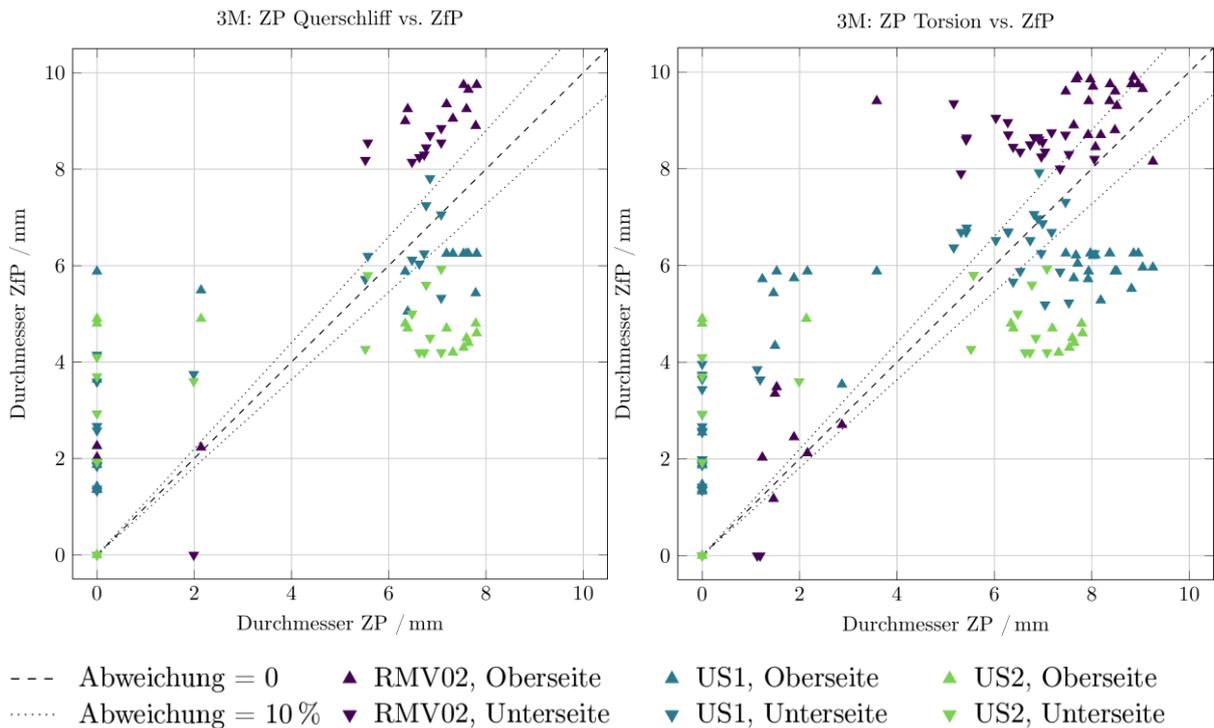


Abbildung 74: 3M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

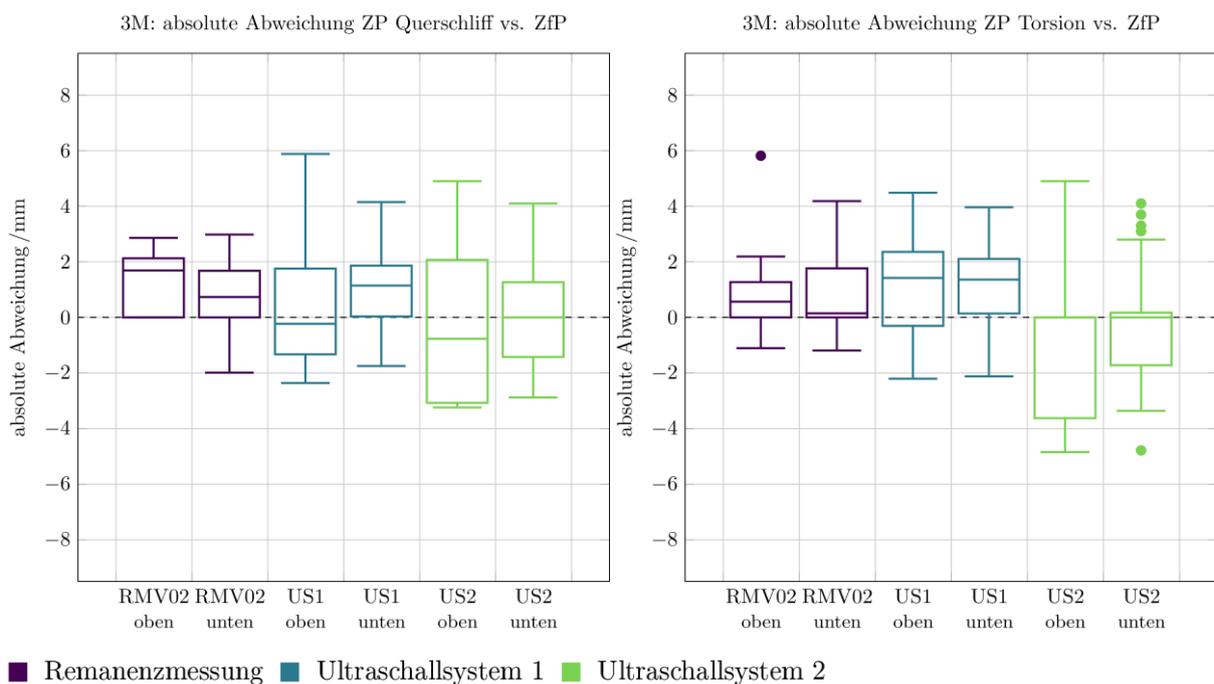


Abbildung 75: 3M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.1.6 4M

Zur Einordnung der MDK 4M (Tabelle 17) gelten die gleichen Randbedingungen wie für 2M und 3M. Das Blechdickenverhältnis von 3/1 zwischen Blech 2 und Blech 1 und die zusätzlich große Gesamtlechdicke stellen eine große Herausforderung für die ZfP dar. So ist es auch bei dieser MDK schwierig, das obere Blech zuverlässig anzuschweißen,

ohne zu tiefe Elektrodeneindrücke zu hinterlassen. Die Querschliffe in Abbildung 76, Abbildung 77 und Abbildung 79 verdeutlichen diesen Zusammenhang. Es ist darin zu erkennen, dass die Schweißverbindung im Zentrum der MDK entsteht und kreisförmig nach außen wächst. Während in der FE2 bei kleinen Schweißströmen bereits eine Schweißlinse vorhanden ist, wird das obere Blech zunächst nur mit einer geringen Linseneindringtiefe angeschweißt. Bei hohen Schweißströmen kommt es zu einem tiefen Elektrodeneindruck, der die ZfP-Messungen beeinflussen kann. Des Weiteren treten Risse in den Flanken des Elektrodeneindrucks am oberen Blech auf. Die Entwicklung der Schweißverbindung mit zunehmenden Schweißstrom in Abbildung 80 zeigt, dass bei Schweißströmen von 5,6 kA Fehlschweißungen in Form einer Lötverbindung der Zinkbeschichtungen auftreten. Anschließend werden zuverlässige Schweißverbindungen in beiden Fügeebenen erzeugt, die bis zu einem Linsendurchmesser $d_n = 8$ mm heranwachsen. Die Ergebnisse der Torsionsprüfung widersprechen denen am Querschliff. Es konnten keine Schweißverbindungen in FE1 bei den Torsionsproben festgestellt werden. Die EDX-Analysen zeigen zudem einen deutlichen Unterschied des Zink-Anteils innerhalb der Bruchflächen der Torsionsproben von $I_w = 5,6$ kA und $I_w = 6,8$ kA. Dies kann ein Hinweis auf Zinkverlötung bei den Proben mit $I_w = 5,6$ kA sein. Die ZfP-Messungen zeigen erneut Schwierigkeiten bei der Bewertung der Fügeverbindung beim Auftreten von Fehlschweißungen. Bei einem Vorhandensein einer Schweißverbindung in beiden Fügeebenen korrelieren Remanenzmessungen mit denen der ZP gut. Es werden tendenziell größere Durchmesser ermittelt. Die Ultraschallmessungen sind in diesem Fall differenziert zu bewerten, da bei US1 systembedingt nur Schweißpunkte bis zu einem maximalen Durchmesser von 8 mm gemessen werden können, wie eingangs erwähnt.

Tabelle 17: MDK 4M

Versuchsreihe	4M
Blech 1	HX340LAD+Z, t = 1 mm
Blech 2	HX340LAD+Z, t = 3 mm
Blech 3	HX340LAD+Z, t = 3 mm

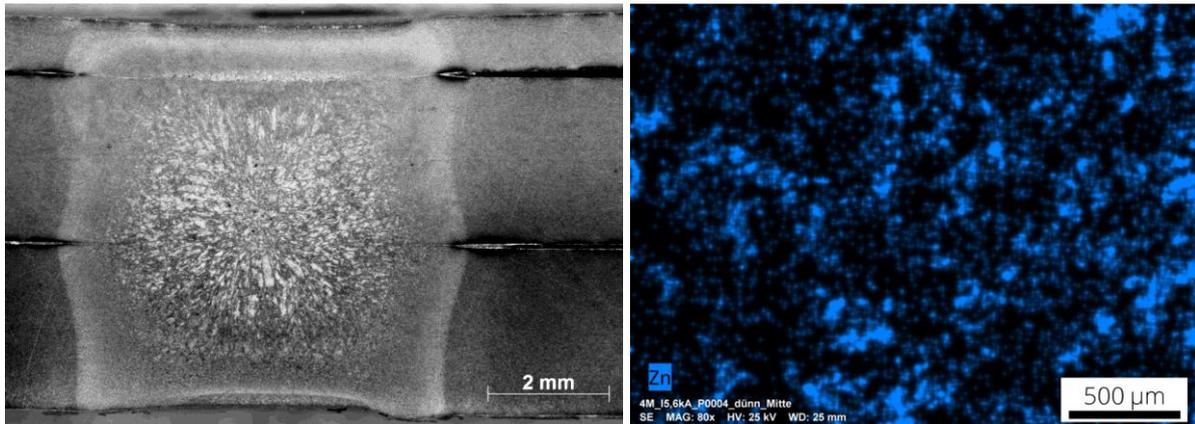


Abbildung 76: Querschliff der Schweißprobe 4M_I5,6kA_P0002, $I_w = 5,6 \text{ kA}$, $F_e = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 1000 \text{ ms}$ und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 4M_I5,6kA_P0004

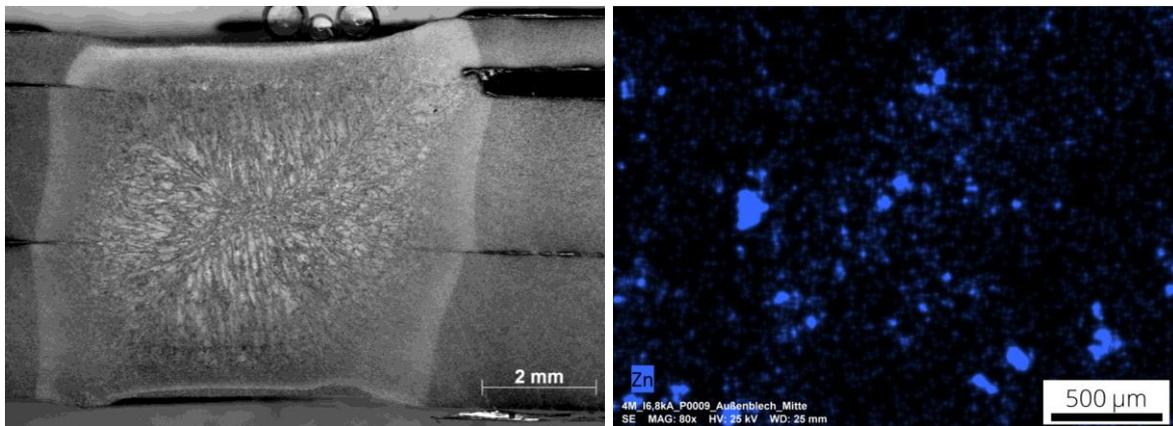


Abbildung 77: Querschliff der Schweißprobe 4M_I6,8kA_P0002, $I_w = 6,8 \text{ kA}$, $F_e = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 1000 \text{ ms}$ und EDX-Analyse mit Darstellung des Zn-Anteils in der Torsionsbruchfläche von Blech 1 der Probe 4M_I6,8kA_P0009

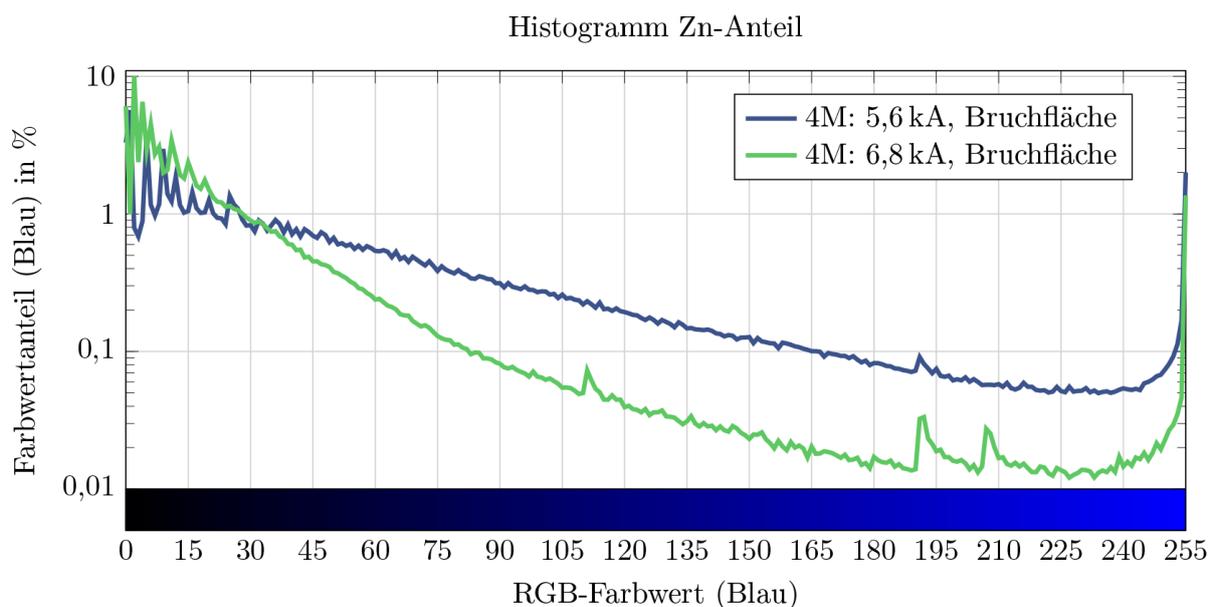


Abbildung 78: Vergleich der Zinkanteile (Zn) zwischen 4M, $I_w = 5,6 \text{ kA}$ und $I_w = 6,8 \text{ kA}$



Abbildung 79: Querschliff der Schweißprobe 4M_I11,6kA_P0003, $I_w = 11,6$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 1000$ ms

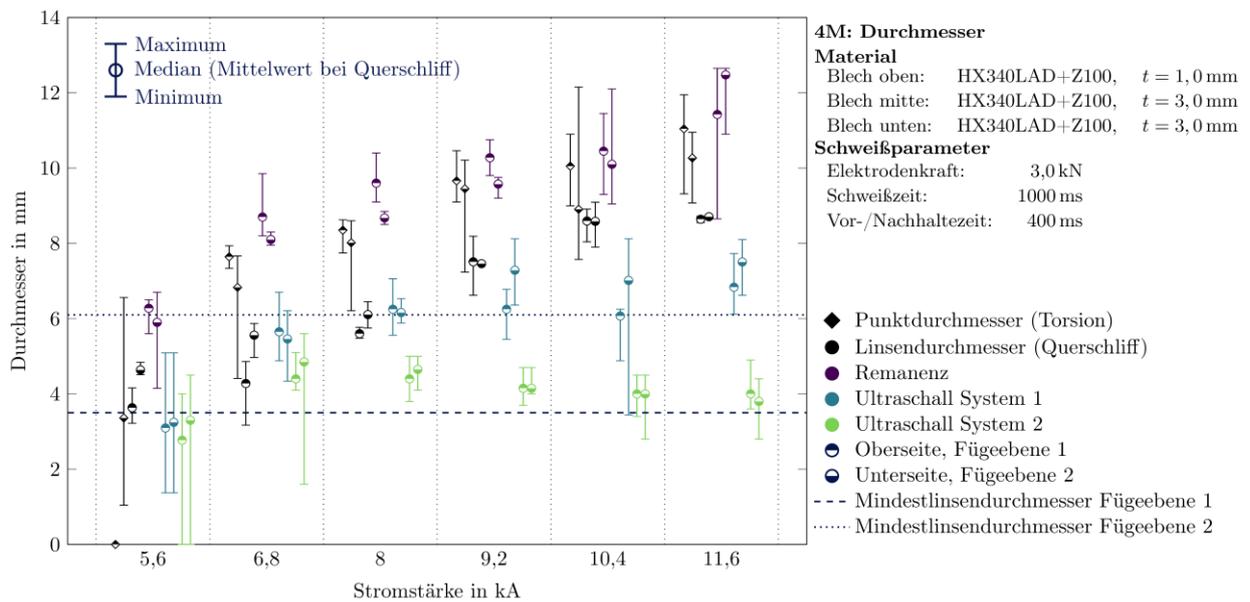


Abbildung 80: 4M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

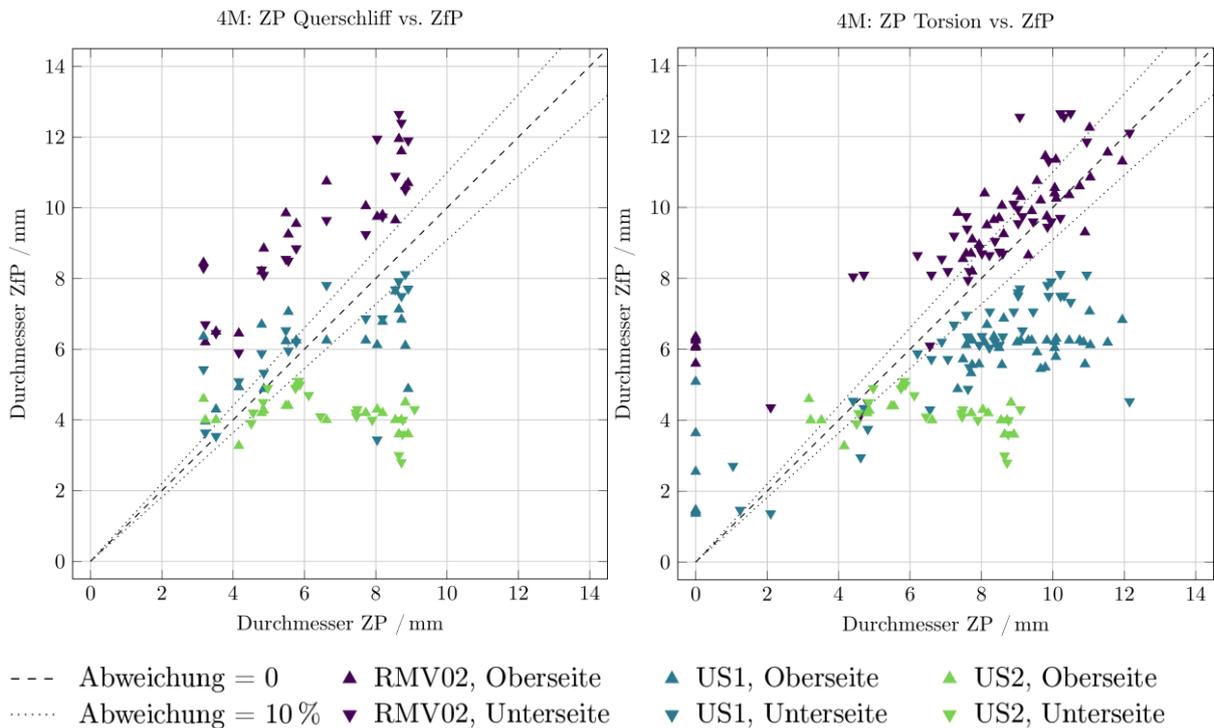


Abbildung 81: 4M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

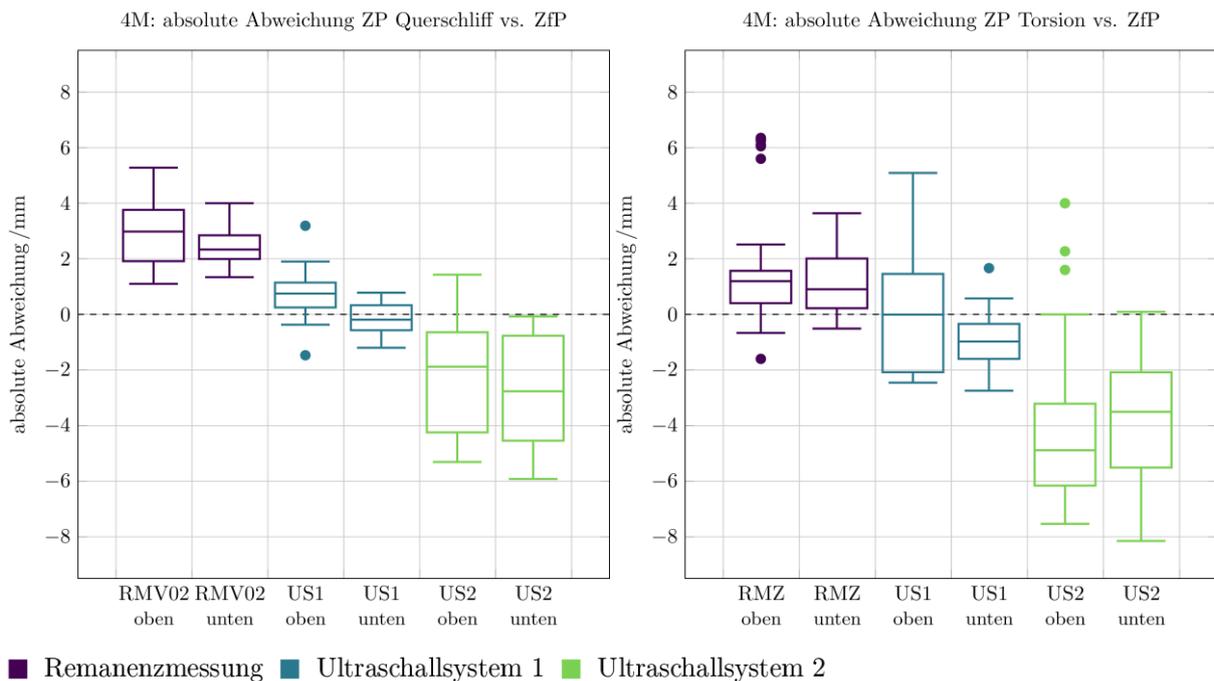


Abbildung 82: 4M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.2 Austenitische Materialdickenkombinationen

Austenitische Gefüge weisen ein paramagnetisches Verhalten auf, was die Messergebnisse der Hystereseschleifen in Abschnitt 7.2.1 bestätigen. Die Untersuchungen wurden an Blechkombinationen des austenitischen Stahls 1.4301 (X5CrNi18-10) durchgeführt. Diese Stahllegierung bietet nicht nur wegen ihrer guten Korrosionsbeständigkeit und

guten Verarbeitungseigenschaften ein sehr breites Anwendungsspektrum, sondern auch das attraktive Erscheinungsbild ist ein Grund für die weite Verbreitung des Stahls. Beispiele für die Verwendung sind in der Lebensmittelproduktion, -verarbeitung und -transport, Herstellung von Küchengeräte, usw. zu finden.

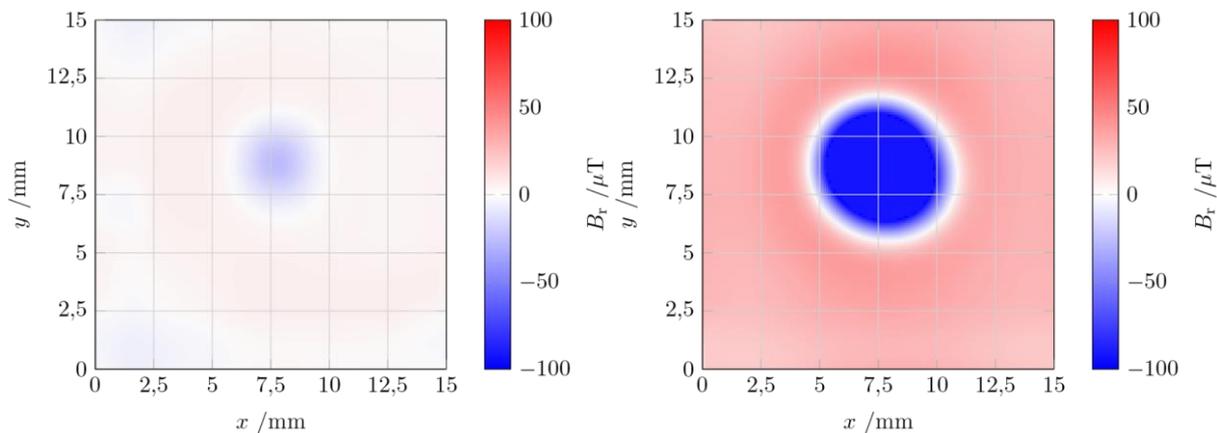


Abbildung 83: Messergebnis der Remanenzmessung einer unverschweißten (links) und einer verschweißten (rechts) Probe, Linsendurchmesser der verschweißten Probe $d_l = 5$ mm [20]

Bei den Untersuchungen können unverschweißte und verschweißte Proben deutlich voneinander unterschieden werden (Abbildung 83). Der Grund für die Anwendbarkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei Schweißpunkten aus dem austenitischen Stahl 1.4301 kann durch die Eigenschaften des Punktschweißprozesses erklärt werden und wurde in [20] veröffentlicht und wird im Folgenden näher beschrieben. Abbildung 84 zeigt einen simulierten Punktschweißprozess der MDK 4RSW mit der Temperaturentwicklung und -verteilung. Für diese Simulation wurde die Software SORPAS 2D R12.5 verwendet. Die Abkühlgeschwindigkeit in der Nachhaltezeit t_h ist sehr hoch. Ein Beispiel für die Temperaturratenverteilung nach 100 ms in der Nachhaltezeit t_h (Punkt A) ist in Abbildung 84 dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation zeigen absolute Abkühlraten von mehr als 1000 K/s innerhalb der Schweißlinse. Diese Temperaturraten sind charakteristisch für Punktschweißprozesse und korrelieren mit früheren Untersuchungen in [51].

Beim Betrachten der Gefügestruktur der Schweißverbindung in Abbildung 85 ist zu erkennen, dass sich der Grundwerkstoff, die Wärmeeinflusszone (WEZ) und die Schweißlinse erheblich voneinander unterscheiden. 1.4301 gehört zu den metastabilen austenitischen Stählen und erstarrt primär zu δ -Ferrit [52]. Während Austenit paramagnetische Eigenschaften hat, zeigt δ -Ferrit ein ferromagnetisches Verhalten. Aufgrund der hohen Abkühlraten des Punktschweißprozesses hat das Gefüge nicht genug Zeit, um vollständig in Austenit umzuwandeln. Es bleibt ein Anteil an δ -Ferrit in der Schweißlinse übrig. Die Schweißlinse hat somit einen signifikant höheren Anteil an δ -Ferrit als der

Grundwerkstoff oder die Wärmeeinflusszone. Nach dem Magnetisieren der Punktschweißung führt die höhere Menge an δ -Ferrit innerhalb der Schweißlinse zu einer höheren Remanenzflussdichte im Vergleich zum umgebenden Material. Dieser messbare Unterschied ermöglicht die Bewertung der Schweißlinsengröße [20].

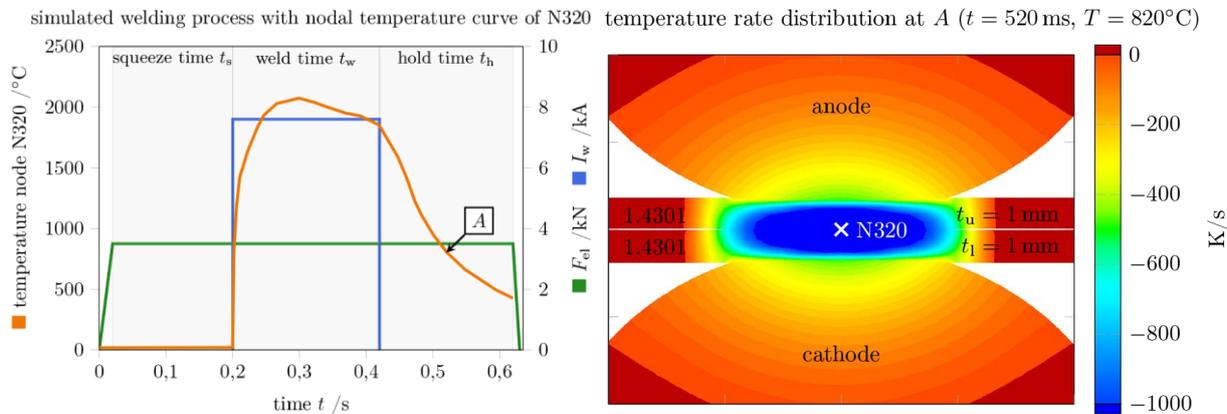


Abbildung 84: Temperaturentwicklung und -verteilung des Schweißprozesses von 4RSW simuliert mit SORPAS 2D R12.5 ($I_w = 7,6 \text{ kA}$, $F_e = 3,5 \text{ kN}$, $t_w = 220 \text{ ms}$), links: Simulierter Schweißprozess mit Temperaturverlauf des FEM-Knotens N320, rechts: Temperaturverteilungsrate am Messpunkt A des Temperaturverlaufs ($t = 520 \text{ ms}$, $T = 820^\circ\text{C}$) [20]

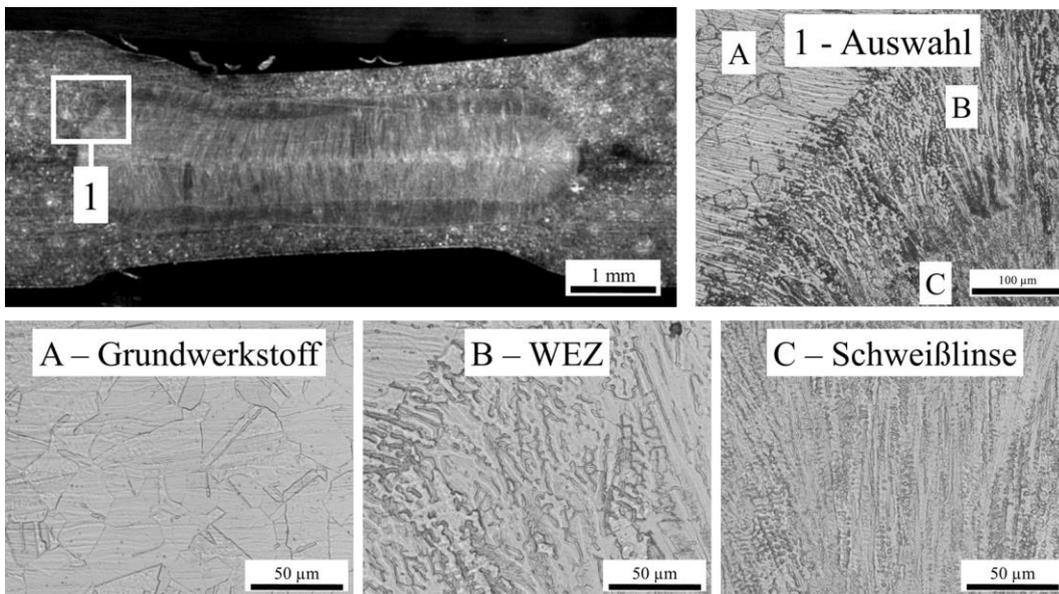


Abbildung 85: Gefügestruktur einer Schweißverbindung mit zwei 1.4301 (1,5 mm) (Bilder aus [53])

7.4.2.1 4RSW

Die Querschliffe der MDK 4RSW (Tabelle 18) in Abbildung 86, Abbildung 87 und Abbildung 88 verdeutlichen, dass bereits bei sehr geringen Schweißströmen eine Schweißverbindung ausgebildet wird. Des Weiteren ist keine Wärmeeinflusszone in den Schliffbildern zu erkennen. Mit zunehmenden Schweißstrom scheint es zudem zu zwei

Erstarrungsfronten zu kommen, was in Abbildung 88 zu erkennen ist. Ab einem Schweißstrom von $I_w = 6,0$ kA wächst die Schweißlinse nicht mehr im Durchmesser an (Abbildung 89).

Tabelle 18: MDK 4RSW

Versuchsreihe	4RSW
Blech 1	1.4301, t = 1 mm
Blech 2	1.4301, t = 1 mm

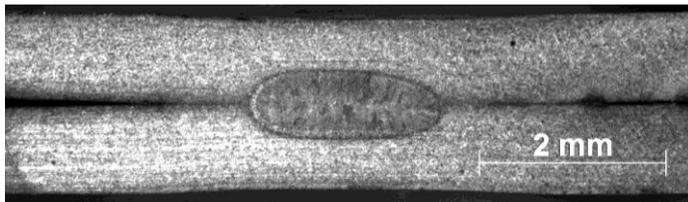


Abbildung 86: Querschliff der Schweißprobe 4RSW_I3,6kA_P0001, $I_w = 3,6$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 220$ ms

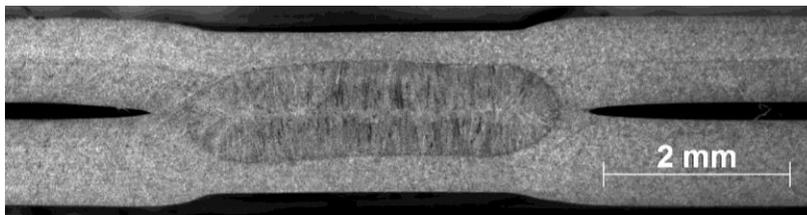


Abbildung 87: Querschliff der Schweißprobe 4RSW_I5,2kA_P0001, $I_w = 5,2$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 220$ ms

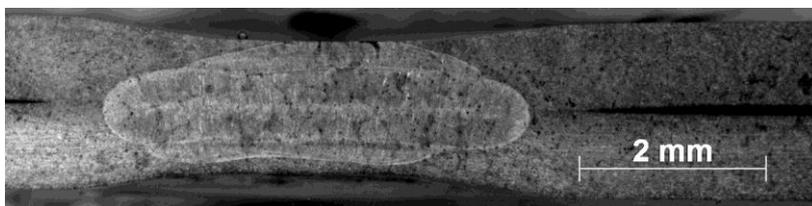


Abbildung 88: Querschliff der Schweißprobe 4RSW_I7,6kA_P0003, $I_w = 7,6$ kA, $F_e = 2,7$ kN, $t_w = 220$ ms

Der Vergleich zwischen den Messungen der Linsendurchmesser am Querschliff und der Bestimmung der Punktdurchmesser an den Torsionsproben, zeigt deutliche Unterschiede beider Messmethoden zueinander. Die Linsendurchmesser schwanken nur sehr gering, während die Messungen der Punktdurchmesser große Variationen ergeben. Unter diesem Kontext sind die Vergleiche mit den ZfP-Messungen differenziert zu bewerten. Die Auswertung der Remanenzmessungen zeigt, dass im Vergleich zu den zerstörenden Prüfungen tendenziell zu große Linsendurchmesser ermittelt werden. Es ist auch zu erkennen, dass eine bessere Übereinstimmung der Messergebnisse zwischen Remanenzmessung und den Messungen am Querschliff auftritt, als bei den Messungen durch die Torsionsprüfung. Die Messungen mit dem Ultraschallsystem sind

als sehr vertrauenswürdig einzustufen. Es werden selten zu große Schweißpunkte gemessen, was dem Anwender mehr Sicherheit gibt. Auch hier ist zu beobachten, dass eine bessere Korrelation der Messergebnisse zum Querschliff existiert als zur Torsionsprüfung. Dabei sind keine Unterschiede zwischen der Messung von der Ober- und Unterseite der Proben zu erkennen. Die statistischen Auswertungen der Remanenzmessungen anhand der Box-Plots in Abbildung 90 verdeutlichen den Fortschritt der Weiterentwicklungen aus Abschnitt 7.3. Insbesondere weichen die Messergebnisse der ZfP von der Unterseite kaum von denen der Querschliffe ab. Dies bestätigt die Untersuchungen zur Eignung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an austenitischen Stählen, da im Gefüge der Schweißlinse ein besonders hoher Anteil an δ -Ferrit vorhanden ist.

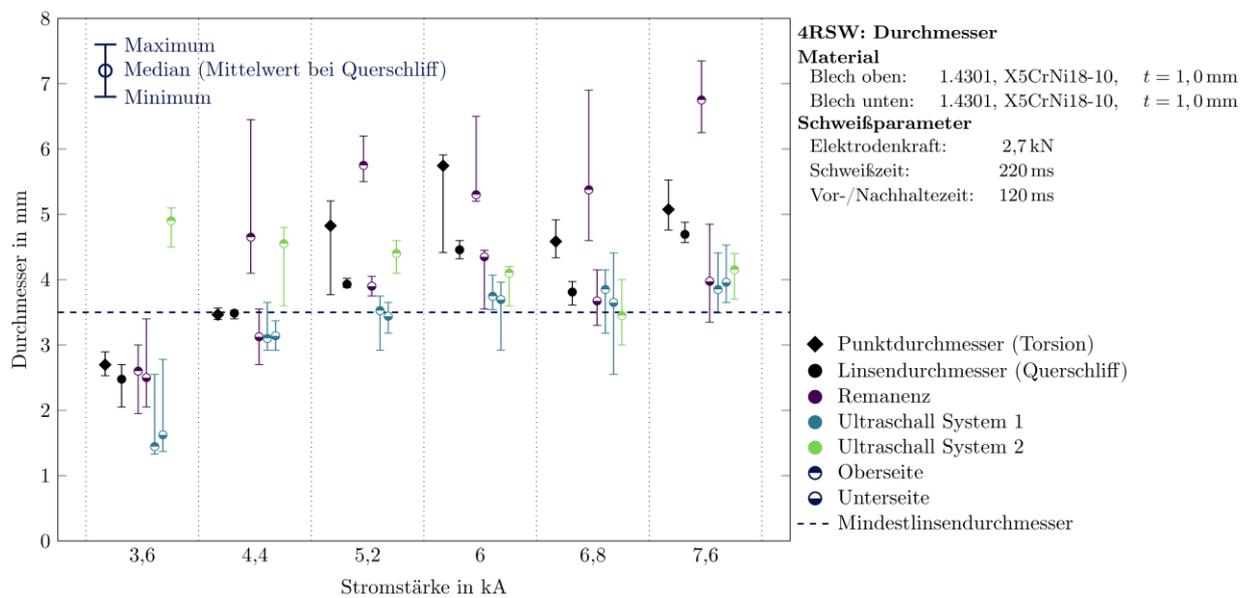


Abbildung 89: 4RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

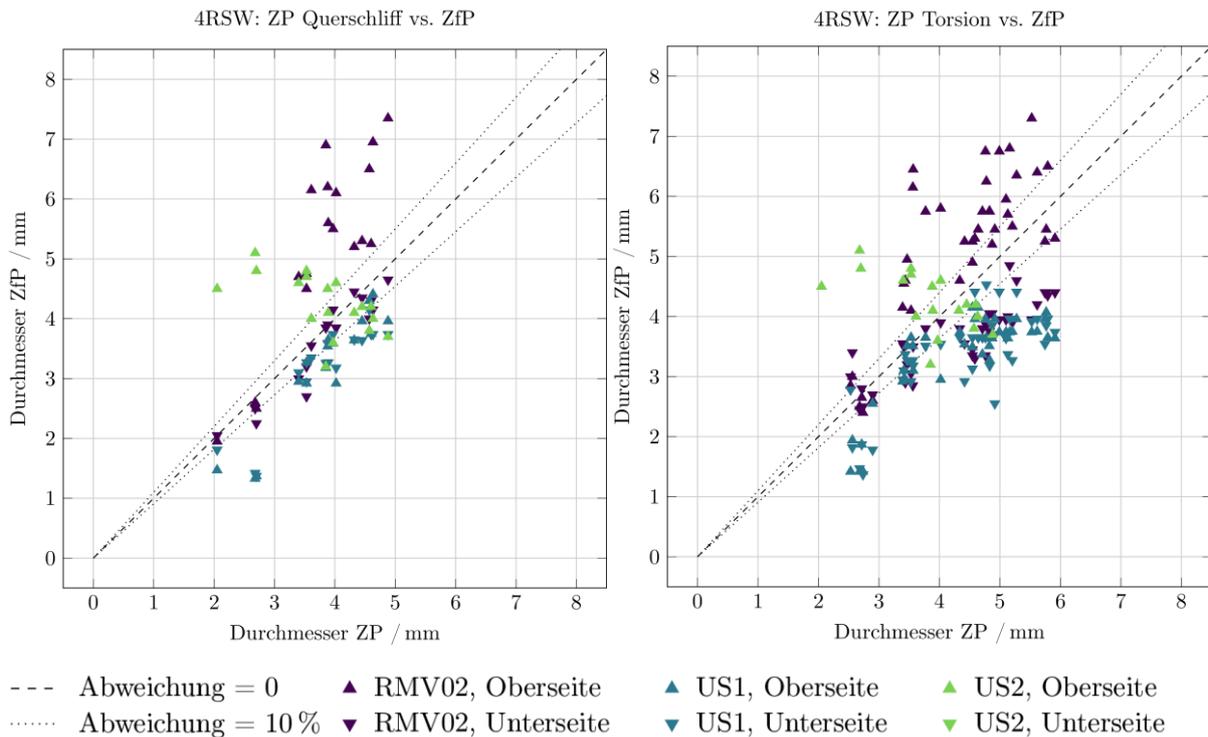
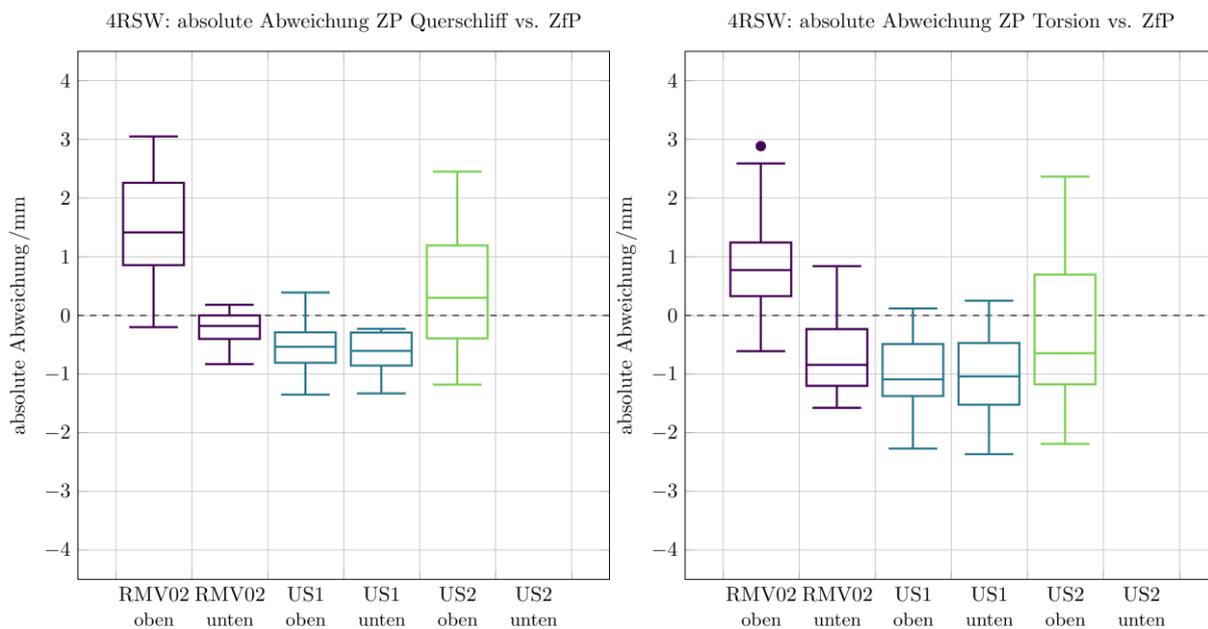


Abbildung 90: 4RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP



■ Remanenzmessung ■ Ultraschallsystem 1 ■ Ultraschallsystem 2

Abbildung 91: 4RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

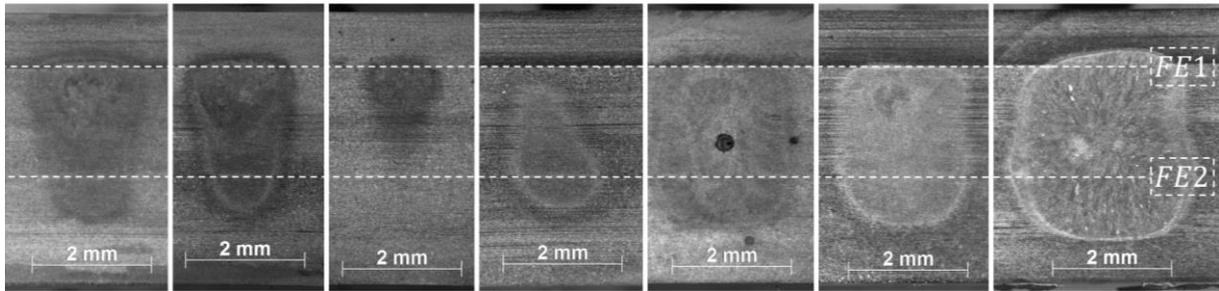
7.4.2.2 5RSW

Die Dreiblechverbindung der MDK 5RSW (Tabelle 19) stellt ebenfalls keine besonderen Herausforderungen an die Schweißprozessführung. Abbildung 92 vergleicht alle Querschleife für die Schweißströme $I_w = 3,2$ kA, $I_w = 4$ kA und die erste Probe mit $I_w = 4,8$ kA.

Dabei wird deutlich, dass es sehr schwierig ist, die Schweißlinse im Querschliff zu bewerten. Es ist in allen Proben ein Wärmeeinfluss zu sehen. Allerdings kann eine Schweißverbindung in den entsprechenden Fügeebenen, wie sie z. B. bei der Probe P0001 $I_w = 4,8$ kA zu erkennen ist, nicht genau bestimmt werden. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten und in Abbildung 94 deshalb ausgegraut dargestellt. Eine weitere Problematik der Querschliffe tritt auf, wenn die Schweißlinse nicht axialsymmetrisch entsteht und die Schnittebene bei der Probenpräparation ungünstig gewählt wird. Diese Fehlerquellen sind i. d. R. schwer vermeidbar und können das Messergebnis erheblich beeinflussen [54]. Die anschließenden Schweißpunkte mit höherer Stromstärke weisen immer eine über beide Fügeebenen ausgeprägte Schweißlinse, wie in Abbildung 93, auf. Die Torsionsproben gibt es für die ersten beiden Parametersätze mit $I_w = 3,2$ kA und $I_w = 4$ kA keine messbaren Schweißpunkte. Erst ab einem Schweißstrom von $I_w = 4,8$ kA konnten Punktdurchmesser gemessen werden, die anschließend kontinuierlich zunahm. Bei der Betrachtung der ZfP-Messungen fällt auf, dass die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte sehr gut mit den Ergebnissen der ZP korreliert. Nur bei den Messungen bei $I_w = 4,8$ kA von der Unterseite treten größere Schwankungen auf, die auch mit den oben beschriebenen Schwierigkeiten bei der ZP zusammenhängen können. Es wird keine zu große Schweißlinse detektiert, was im Sinne des Anwenders Sicherheit bringt. Beim Vergleich der Ultraschallmessungen weichen die Messergebnisse in den unteren Schweißstrombereichen stark von den Ergebnissen der ZP ab. Grund hierfür kann der hinterlegte Auswertalgorithmus sein, der nicht speziell auf das Dämpfungsverhalten austenitischer Gefüge eingestellt wurde. Der Einsatz der Geräte ist hauptsächlich im Karosseriebau mit ferritischen Stählen vorgesehen.

Tabelle 19: MDK 5RSW

Versuchsreihe	5RSW
Blech 1	1.4301, t = 1 mm
Blech 2	1.4301, t = 2 mm
Blech 3	1.4301, t = 2 mm



P0001 $I_w = 3,2$ kA P0002 $I_w = 3,2$ kA P0003 $I_w = 3,2$ kA P0001 $I_w = 4$ kA P0002 $I_w = 4$ kA P0003 $I_w = 4$ kA P0001 $I_w = 4,8$ kA

Abbildung 92: Vergleich der Schweißproben der MDK 5RSW im Querschliff, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 300$ ms

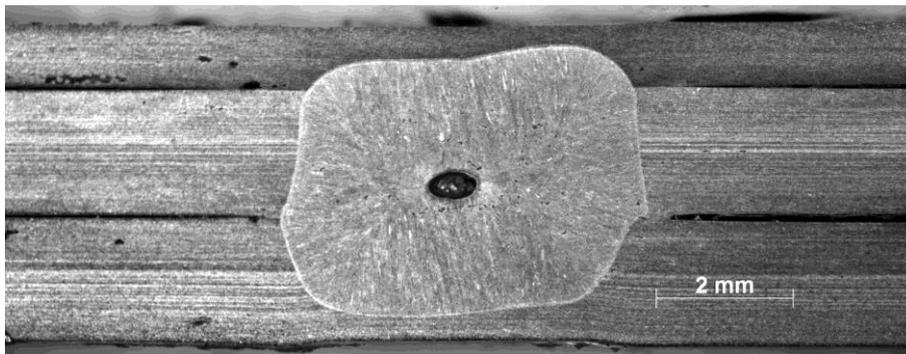


Abbildung 93: Querschliff der Schweißprobe 5RSW_15,6kA_P0002, $I_w = 5,6$ kA, $F_e = 3,5$ kN, $t_w = 300$ ms

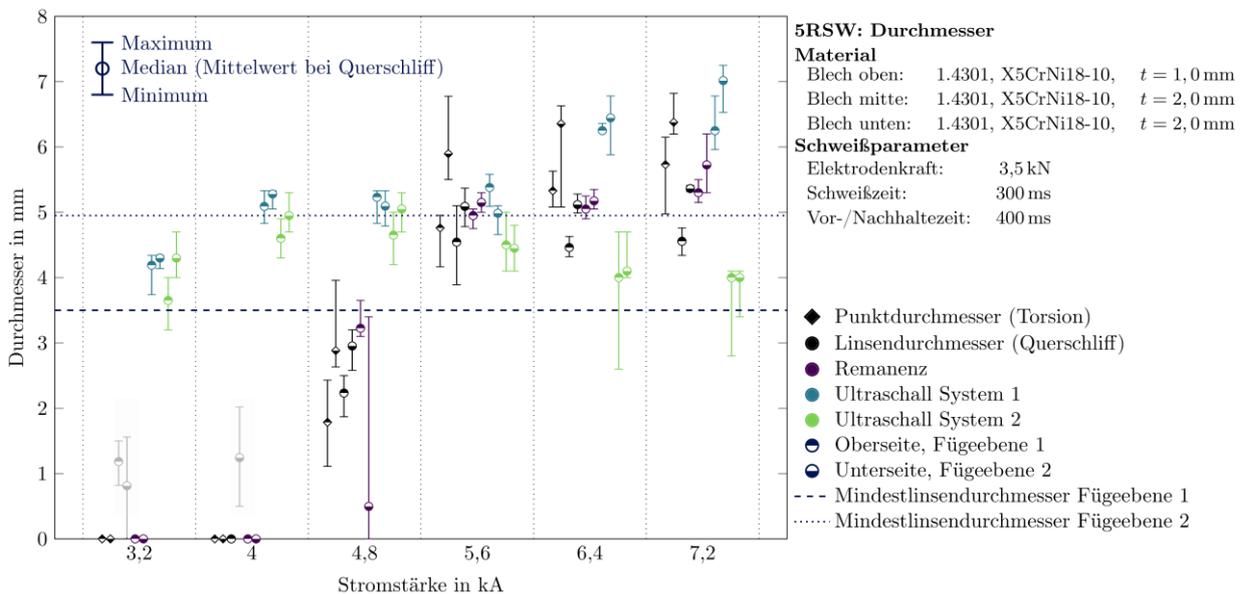


Abbildung 94: 5RSW: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

Die Gegenüberstellung der ZfP-Messungen mit den Ergebnissen der ZP in Abbildung 95 verdeutlicht, die oben beschriebenen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Messsystemen. Bei der statistischen Auswertung zeigt die bildgebende Analyse der

Remanenzflussdichte einen deutlichen Vorteil in der Bewertung dieser Schweißverbindungen. Fehlschweißungen werden zuverlässig erkannt und die absoluten Abweichungen aller Messergebnisse fallen sehr gering aus. Die Ultraschallmessungen lassen sich unter den oben genannten Aspekten nur schwer bewerten.

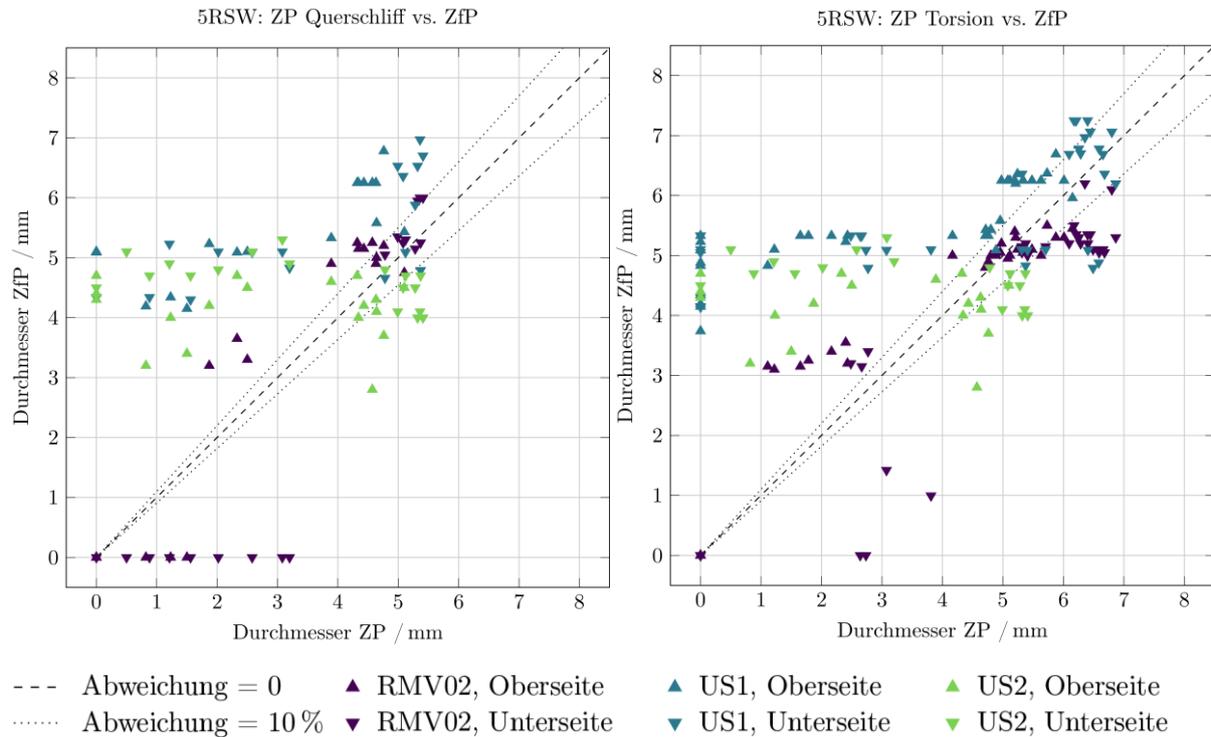
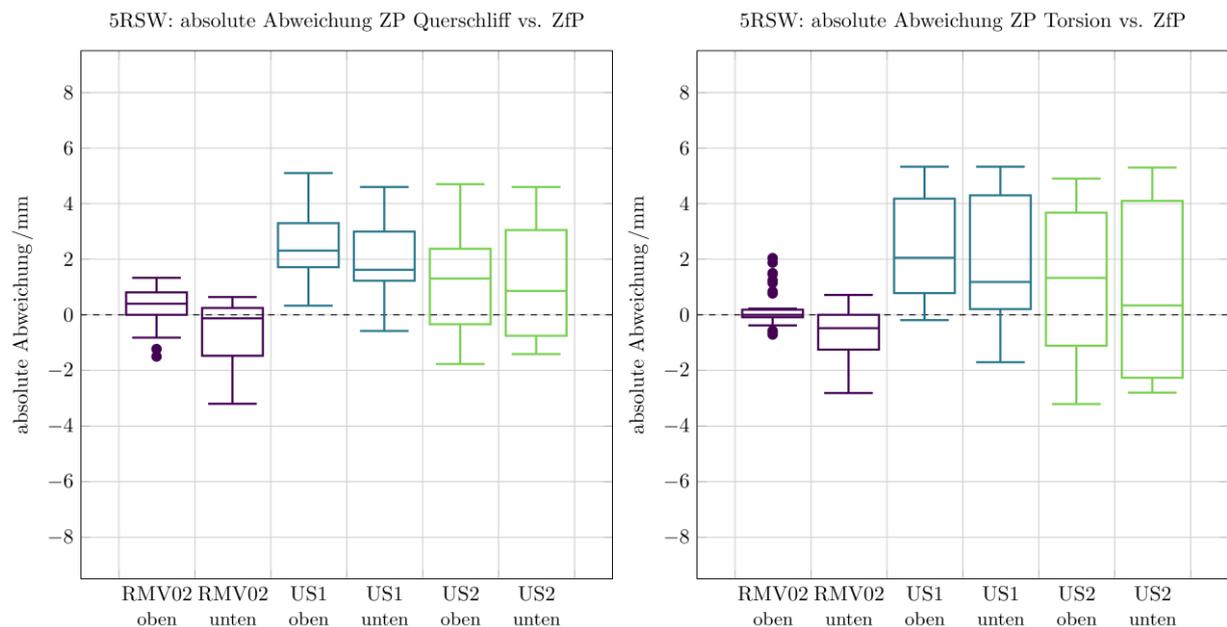


Abbildung 95: 5RSW: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP



■ Remanenzmessung ■ Ultraschallsystem 1 ■ Ultraschallsystem 2

Abbildung 96: 5RSW: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.3 Unbeschichtete, artgleiche Materialdickenkombinationen

Die MDK 5M, 6M und 7M der Stahllegierung S235 wurden zusätzlich ins Versuchsprogramm aufgenommen, um einen unbeschichteten Stahl mit sehr großem Anwendungsspektrum zu berücksichtigen.

7.4.3.1 5M

Die MDK 5M (Tabelle 20) stellt keine großen Herausforderungen für den Schweißprozess dar, was in den Schliffbildern in Abbildung 97, Abbildung 98 und Abbildung 99 zu erkennen ist. Die Querschliffe verdeutlichen zudem, dass die MDK für einen großen Schweißstrombereich zuverlässige Schweißverbindungen liefert. Bei der Betrachtung der Ergebnisse mit steigendem Schweißstrom in Abbildung 100 ist zu erkennen, dass bei der ZfP durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte die Messungen der Oberseite im Schnitt sehr eng mit den Messergebnissen der Torsionsprüfung übereinstimmen. Die Messungen von der Unterseite gleichen eher denen der Linsendurchmesser aus den Querschliffen. Deren geringere Streuung fällt in der statistischen Auswertung in Abbildung 102 auf. Abbildung 101 verdeutlicht, dass die Ultraschallmessungen tendenziell konservativ bewerten und kleinere Messergebnisse liefern als die ZP. Die Ergebnisse weisen keine deutliche Abhängigkeit von der Messseite auf. Mit zunehmenden Schweißstrom streuen die Ergebnisse stärker.

Tabelle 20: MDK 5M

Versuchsreihe	5M
Blech 1	S235, t = 1 mm
Blech 2	S235, t = 1 mm



Abbildung 97: Querschliff der Schweißprobe 5M_I4,8kA_P0001, $I_w = 4,8$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms



Abbildung 98: Querschliff der Schweißprobe 5M_I7,2kA_P0002, $I_w = 7,2$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 480$ ms

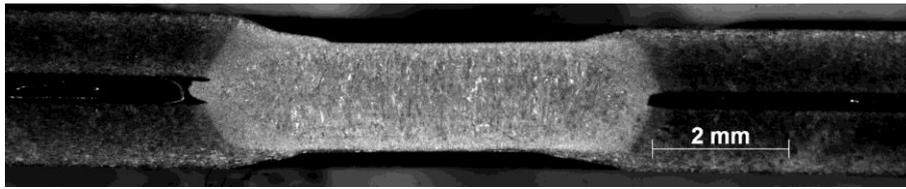


Abbildung 99: Querschliff der Schweißprobe 5M_I8,8kA_P0002, $I_w = 8,8 \text{ kA}$, $F_e = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 480 \text{ ms}$

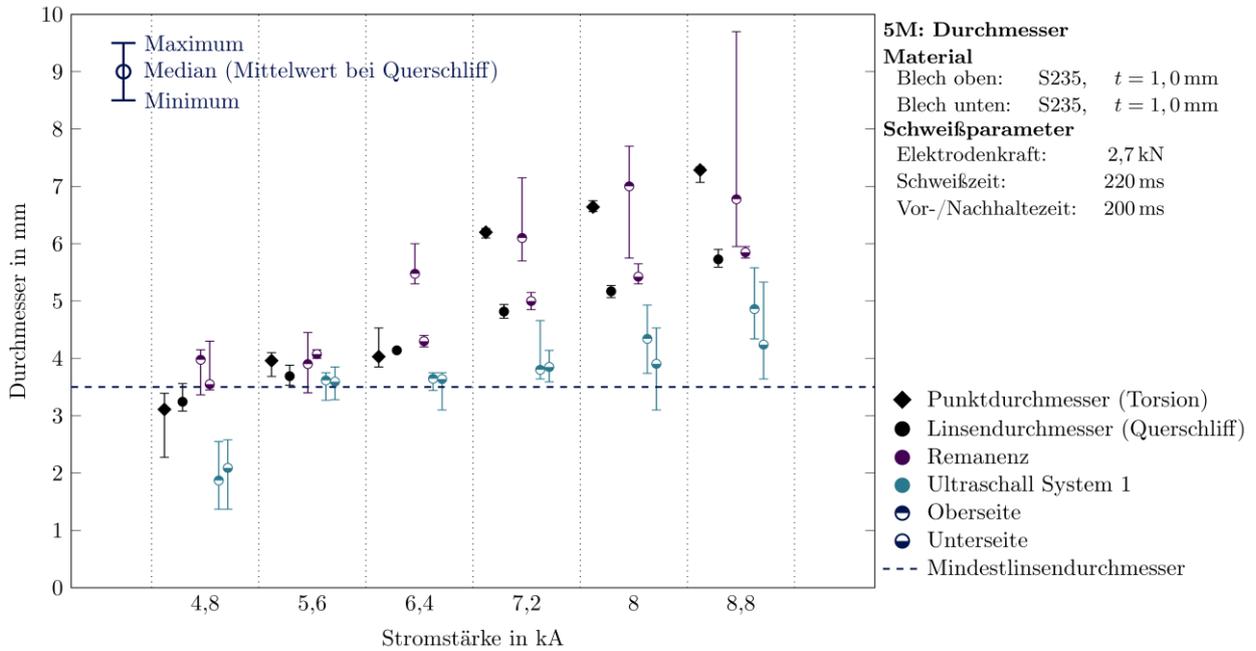


Abbildung 100: 5M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

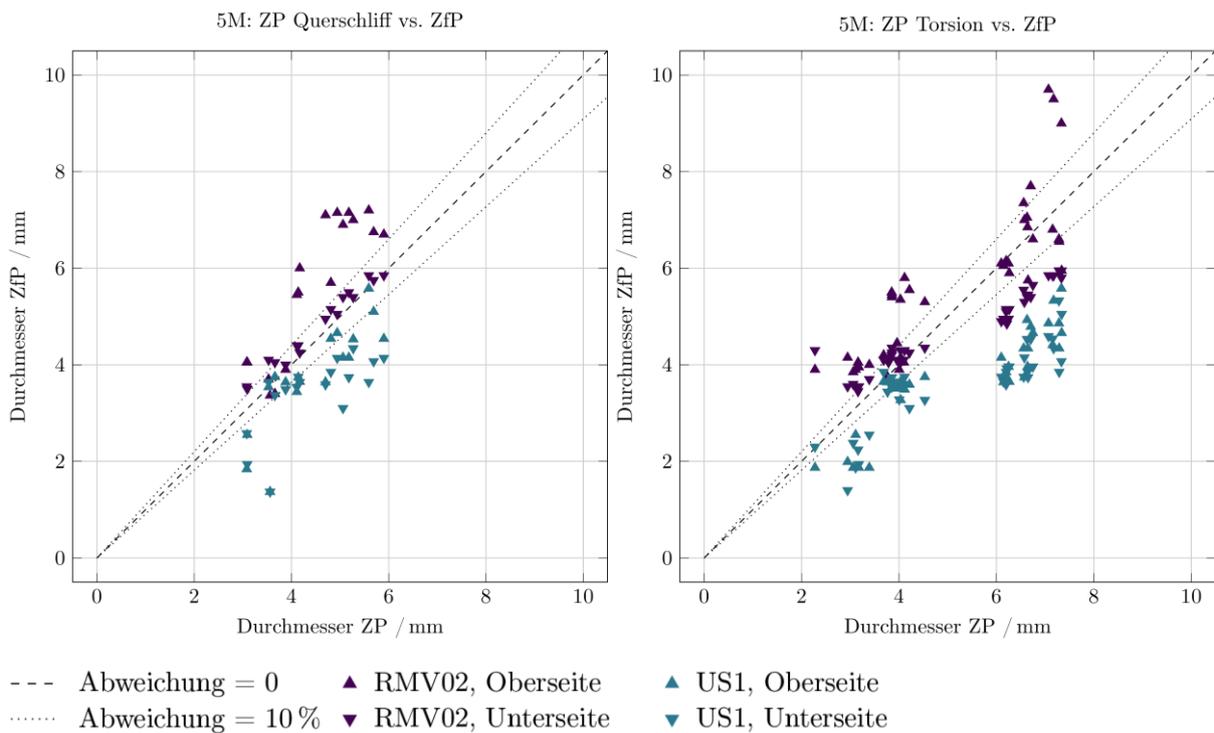


Abbildung 101: 5M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

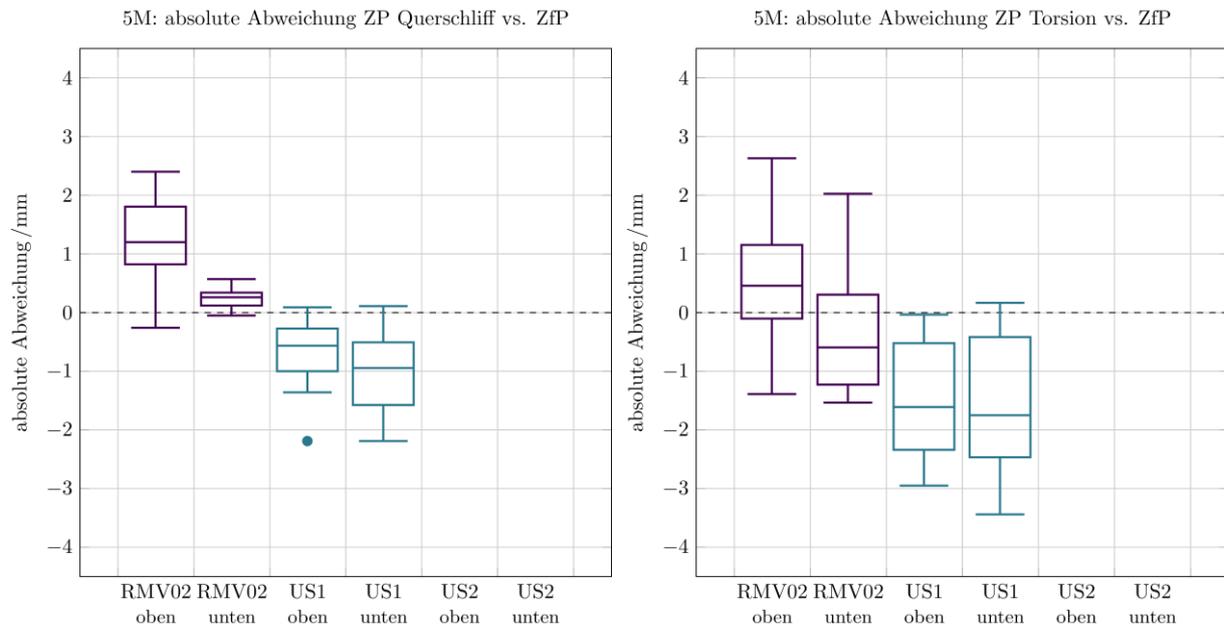


Abbildung 102: 5M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.3.2 6M

Die MDK 6M (Tabelle 21) stellte die gleichen geringen Voraussetzungen an den Schweißprozess wie die MDK 5M. Es wurden die gleichen Schweißzeiten, jedoch Parametersätze mit niedrigeren Schweißströmen, verwendet. Der Grund für die niedrigeren Schweißströme liegt im höheren Gesamtwiderstand der MDK. Die Schliffbilder in Abbildung 103, Abbildung 104 und Abbildung 105 zeigen, dass die Schweißlinse vom Zentrum aus symmetrisch wächst. Mit zunehmenden Schweißstrom nimmt der Linsen- und Punktdurchmesser kontinuierlich zu. Ab einem Schweißstrom $I_w = 10,2$ kA gilt dies jedoch nicht für die Punktdurchmesser. Bei den Proben treten vermehrt Schweißspritzer auf. In Abbildung 105 ist am rechten Rand der Schweißlinse der Rest eines Schweißspritzers zu erkennen. Abbildung 106 verdeutlicht zudem, dass die Streuung der Messungen der Punktdurchmesser ab dieser Stromstärke deutlich zunimmt. Dies kann durch die Schweißspritzer verursacht worden sein. Es ist auch zu erkennen, dass die ZfP-Messungen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte die Ergebnisse der Torsionsprüfung widerspiegelt. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der Ultraschallprüfung eine gute Korrelation mit dem Linsendurchmesser. Zudem schwanken diese Prüfergebnisse nur sehr gering und nehmen ebenfalls ab dem Auftreten von Schweißspritzen ab $I_w = 10,2$ kA deutlich zu.

Tabelle 21: MDK 6M

Versuchsreihe	6M
Blech 1	S235, $t = 2 \text{ mm}$
Blech 2	S235, $t = 2 \text{ mm}$

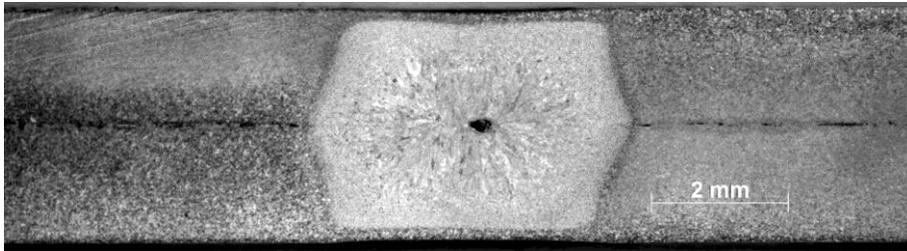


Abbildung 103: Querschliff der Schweißprobe 6M_I4,6kA_P0003, $I_w = 4,6 \text{ kA}$, $F_e = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 480 \text{ ms}$

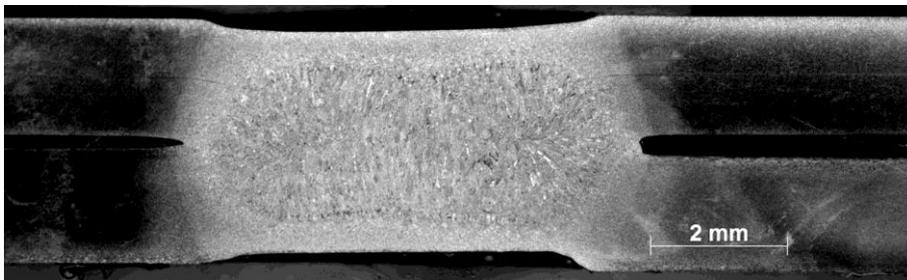


Abbildung 104: Querschliff der Schweißprobe 6M_I7,4kA_P0003, $I_w = 7,4 \text{ kA}$, $F_e = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 480 \text{ ms}$

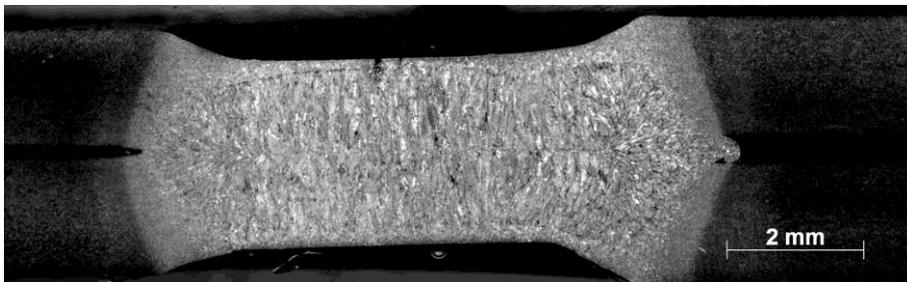


Abbildung 105: Querschliff der Schweißprobe 6M_I11,6kA_P0003, $I_w = 11,6 \text{ kA}$, $F_e = 3,0 \text{ kN}$, $t_w = 480 \text{ ms}$

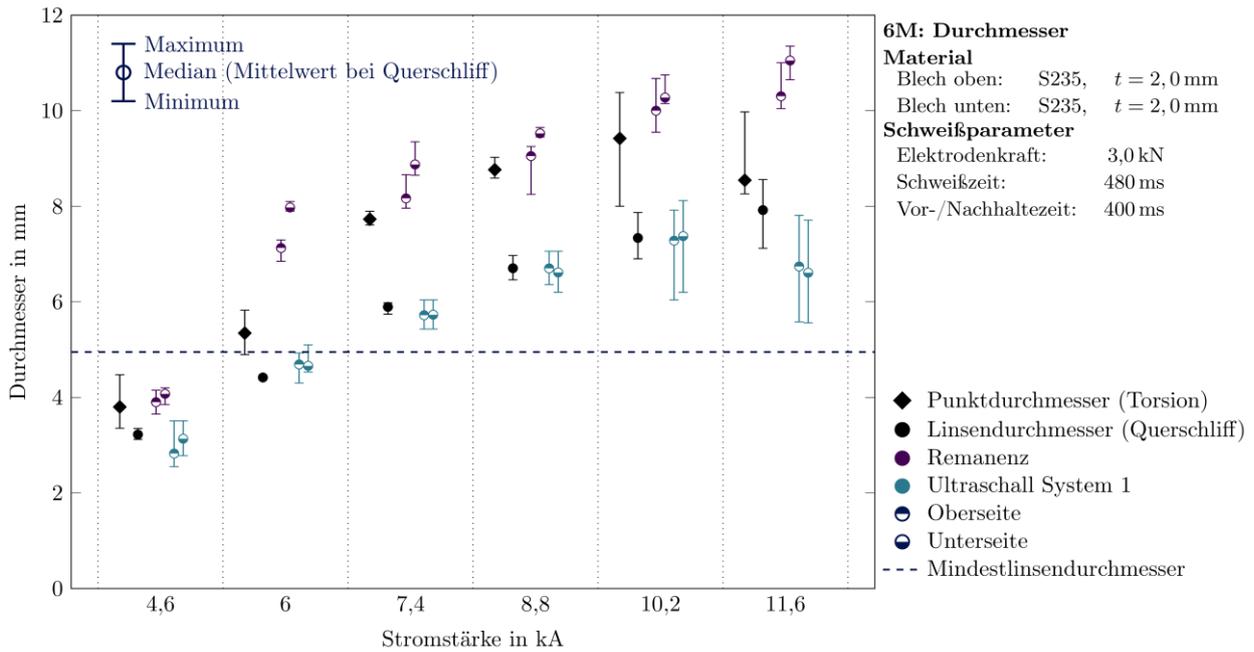


Abbildung 106: 6M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

Die Gegenüberstellungen der Messergebnisse von ZfP mit denen der ZP zeigen die gute Eignung beider ZfP-Systeme bei dieser MDK. Eine Korrelation zwischen ZP und ZfP ist klar erkennbar. Die Auswertung der absoluten Abweichungen hebt hervor, dass die Remanenzmessungen tendenziell zu große Linsendurchmesser ermitteln, was durch zukünftige Materialanalysen bezüglich der magnetischen Eigenschaften verhindert werden kann.

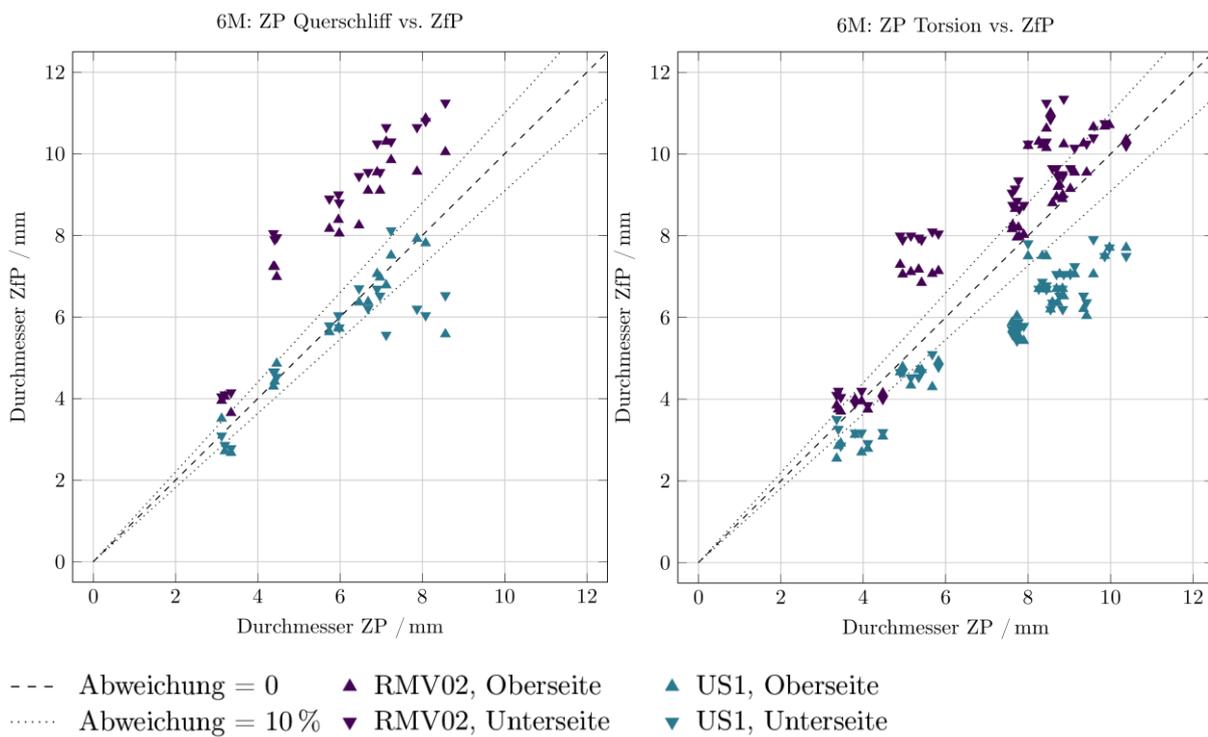


Abbildung 107: 6M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

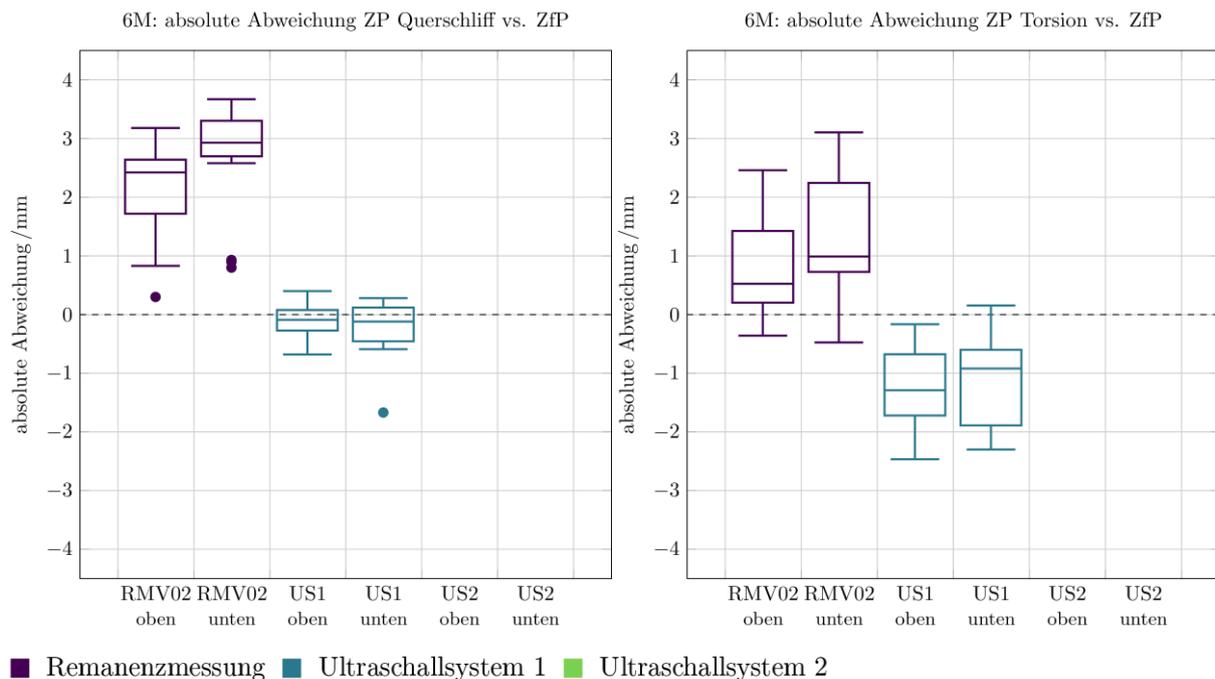


Abbildung 108: 6M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.3.3 7M

Die asymmetrische MDK 7M (Tabelle 22) stellt ebenso keine großen Ansprüche an die Prozessführung beim Widerstandspunktschweißen. In den Querschliffen (Abbildung 109, Abbildung 110, Abbildung 111) ist zu erkennen, dass die Schweißlinse aus dem Zentrum der MDK heraus in die FE1 wächst und die Bleche miteinander verschweißt werden. Bei der Auswertung der Ergebnisse mit steigendem Schweißstrom in Abbildung 112 ist das gleiche Verhalten der ZfP-Messsysteme wie bei der MDK 6M zu beobachten. Ab einer Stromstärke von $I_w = 10,8$ kA kommt es bei den Schweißversuchen immer zu Schweißspritzern, die das Stagnieren des Punktdurchmessers erklären. Die Prüfsysteme für die ZfP zeigen keine deutliche Neigung bezüglich der Prüfseite. Die Ergebnisse zwischen Ober- und Unterseite, Punktdurchmesser und Linsendurchmesser sind bei beiden Messprinzipien innerhalb der Messsysteme sehr ähnlich. Es ist eine geringe Verbesserung bei der Remanenzmessung zu erkennen, was mit den Weiterentwicklungen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte (Abschnitt 7.3) zusammenhängt. Dies ist in der Gegenüberstellung von ZP mit ZfP in Abbildung 113 und der statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen in Abbildung 114 ebenfalls ersichtlich.

Tabelle 22: MDK 7M

Versuchsreihe	7M
Blech 1	S235, t = 1 mm
Blech 2	S235, t = 2 mm

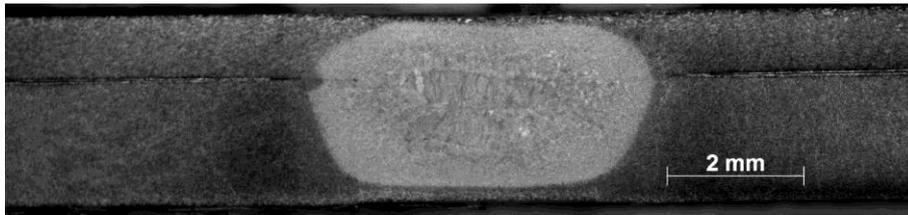


Abbildung 109: Querschliff der Schweißprobe 7M_I6,0kA_P0003, $I_w = 6,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms

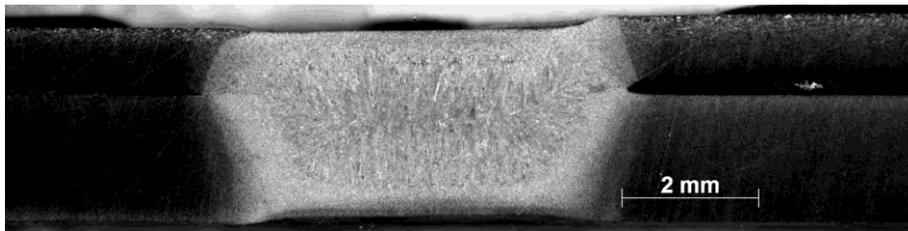


Abbildung 110: Querschliff der Schweißprobe 7M_I8,4kA_P0002, $I_w = 8,4$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms



Abbildung 111: Querschliff der Schweißprobe 7M_I12,0kA_P0001, $I_w = 12,0$ kA, $F_e = 3,0$ kN, $t_w = 200$ ms

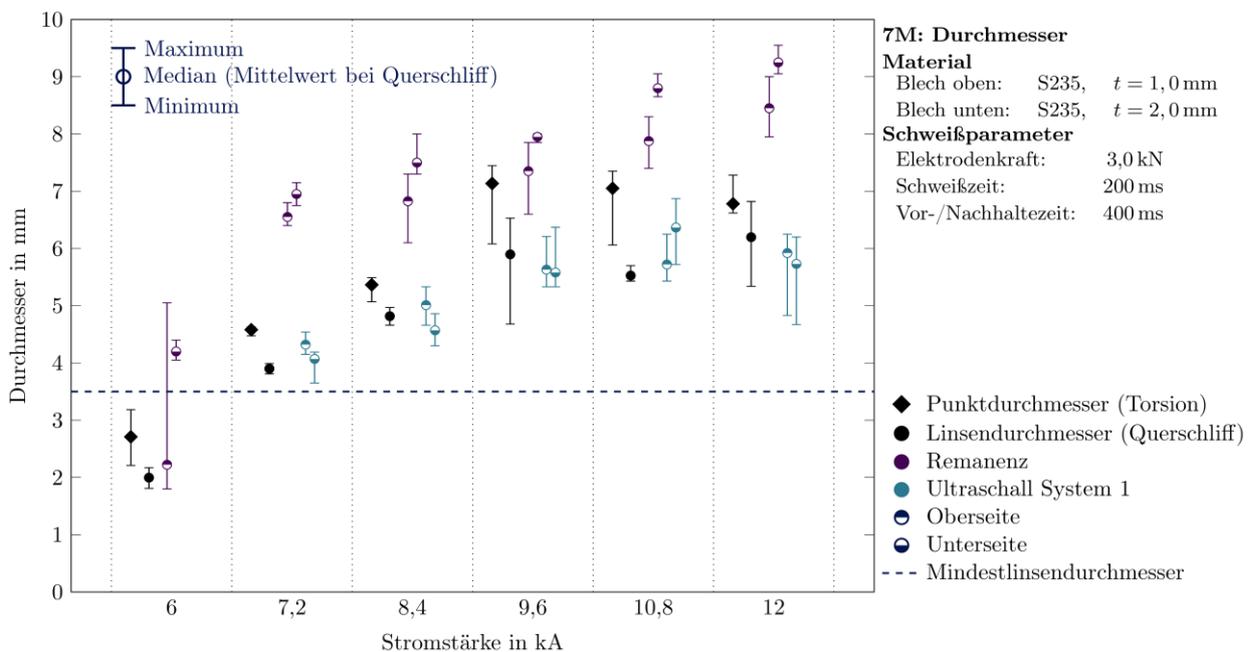


Abbildung 112: 7M: Vergleich der Messergebnisse aus ZP mit ZfP mit zunehmenden Schweißstrom

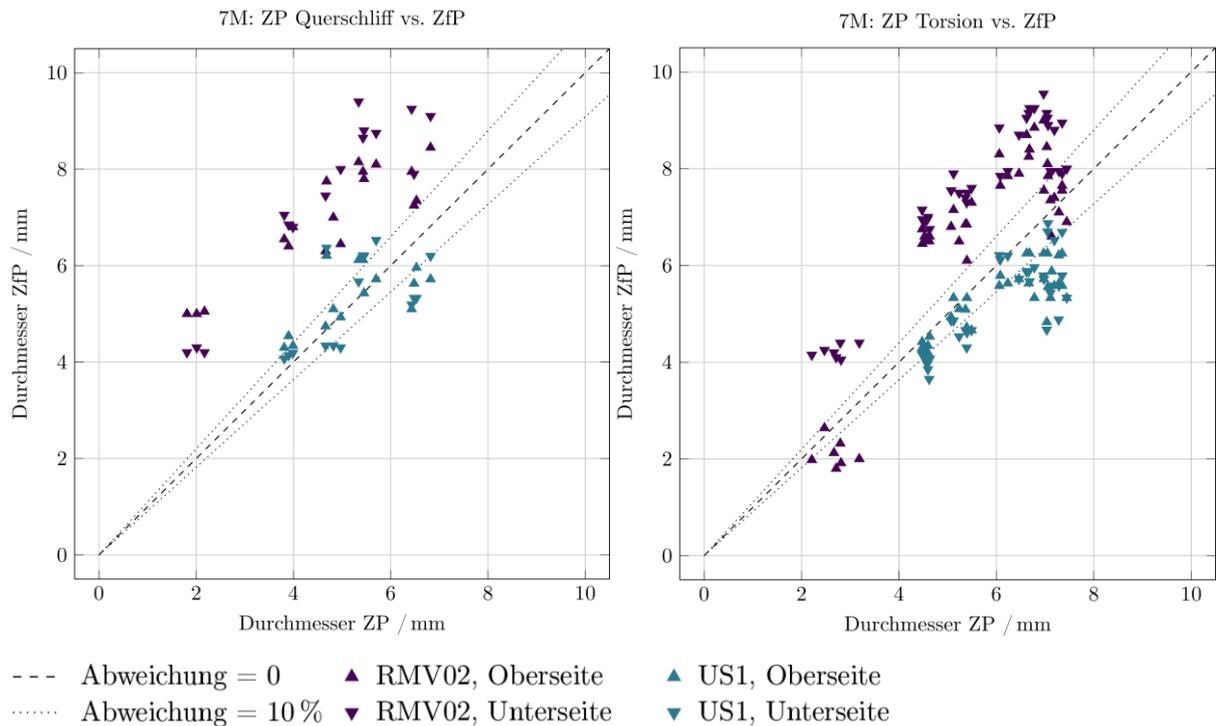


Abbildung 113: 7M: Gegenüberstellung der Messergebnisse aus ZP und ZfP

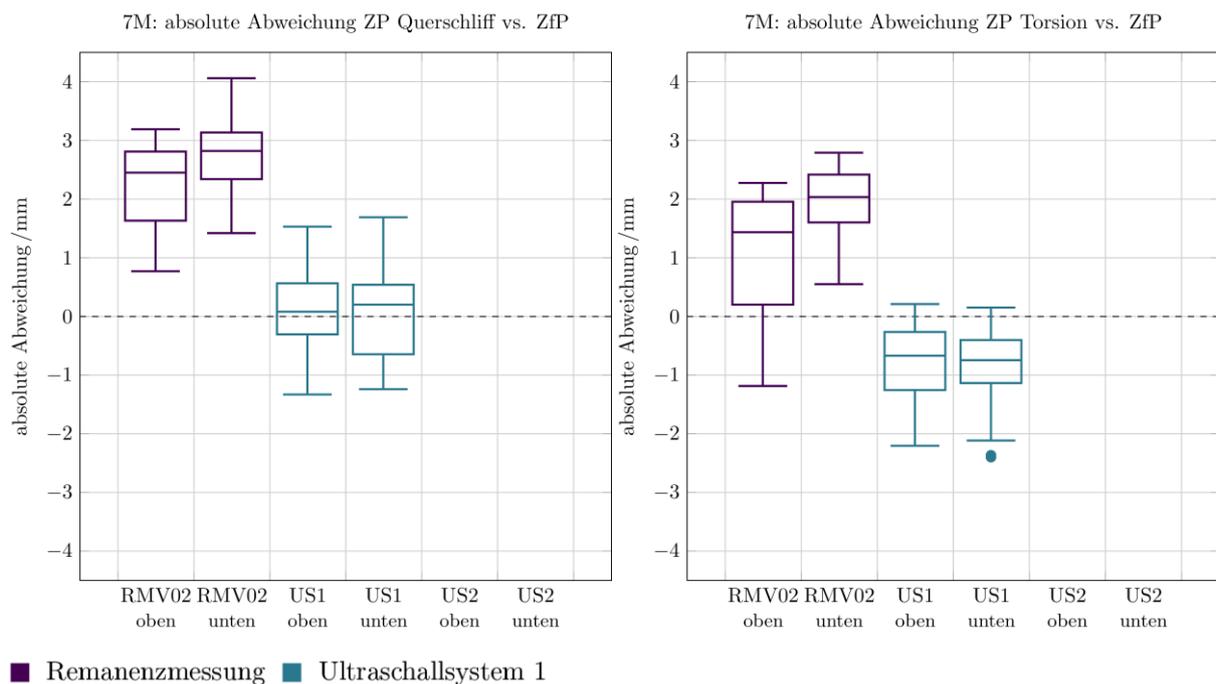


Abbildung 114: 7M: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen der Messergebnisse von ZfP und ZP

7.4.4 Zusammenfassung und Gesamtergebnis aller MDK für das Widerstandspunktschweißen

Die statistische Auswertung aller 720 Punktschweißproben (ca. 3500 Messungen) bezüglich der absoluten Abweichungen zwischen ZfP und ZP ist in Abbildung 115 zu sehen.

Der Vergleich bestätigt das große Potential der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte als weitere ZfP-Methode zu den bereits vorhandenen Ultraschallprüfsystemen. Die derzeitigen Abweichungen liegen auf dem gleichen Niveau wie die der Ultraschallsysteme.

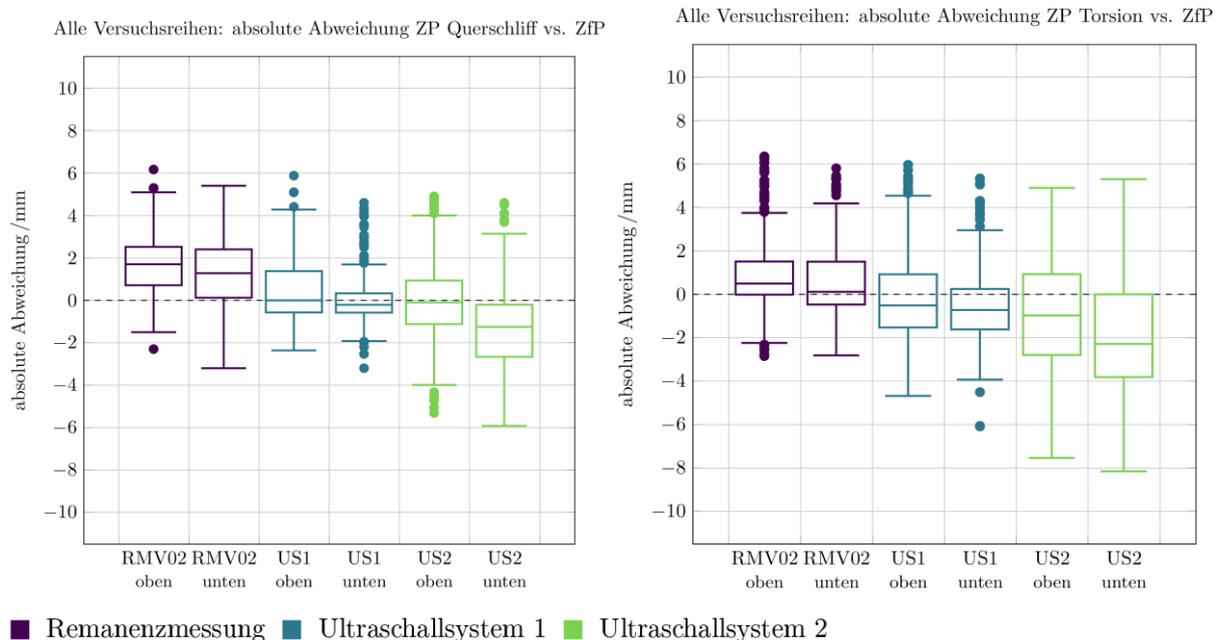


Abbildung 115: Box-Plot zur statistischen Auswertung der absoluten Abweichungen aller Messergebnisse von ZfP und ZP über alle untersuchten Punktschweißproben

Dies bestätigt auch die Gegenüberstellung aller Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte für die zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche von Punktschweißverbindungen mit den Ergebnissen der ZP in Abbildung 116. Sie zeigt sowohl für die Bewertung des Linsen- als auch für die des Punktdurchmessers einen Zusammenhang der Messergebnisse. Es ist zu erkennen, dass meist größere Anbindungsflächen bzw. Durchmesser gegenüber der ZP ermittelt werden. Die Ultraschallsysteme in Abbildung 117 und Abbildung 118 hingegen detektieren eher kleinere Durchmesser. Dies kann durchaus mit konservativen Einstellungen der Messalgorithmen zusammenhängen, um tendenziell auf der „sicheren Seite“ bei der Bewertung zu sein. Fehlschweißungen werden durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte vereinzelt nicht richtig detektiert. Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen zeigen in diesem Punkt keine deutlichen Unterschiede, was in Abbildung 117 und Abbildung 118 zu erkennen ist. Dies muss zukünftig durch eine Weiterentwicklung des Messprinzips im Fokus der Untersuchungen stehen. Die Autoren gehen davon aus, dass weitere Materialanalysen hier zwingend erforderlich sind. Insbesondere die Bestimmung der magnetischen Kennwerte des Gefüges der Schweißlinse ist von großer Wichtigkeit. Unterstützt durch FE-Simulationen, die nicht nur den Magnetisierungsprozess, sondern auch die Prüfsituation numerisch beschreiben können, besteht ein hohes

Anwendungspotential der bildgebenden Analyse für die ZfP von Punkschweißverbindungen, was auch die Technologiebewertung in [55] bereits vor dem Forschungsvorhaben prognostiziert hat.

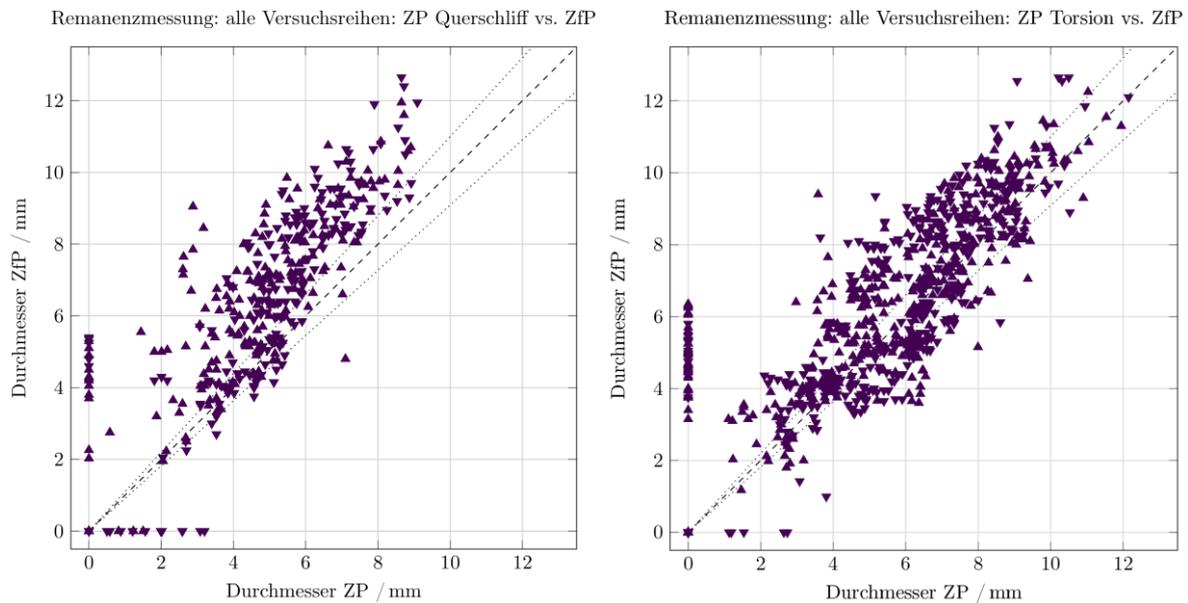


Abbildung 116: Gegenüberstellung aller Messergebnisse aus ZP und ZfP der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte für die zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche von Punkschweißverbindungen

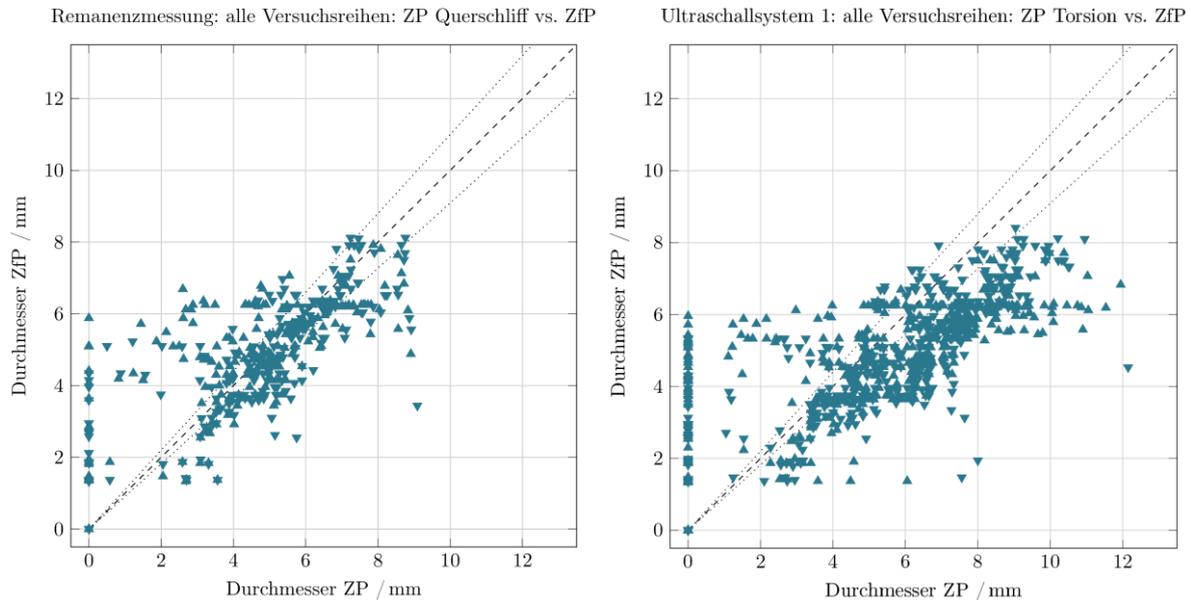


Abbildung 117: Gegenüberstellung aller Messergebnisse aus ZP und ZfP für das Ultraschallsystem 1

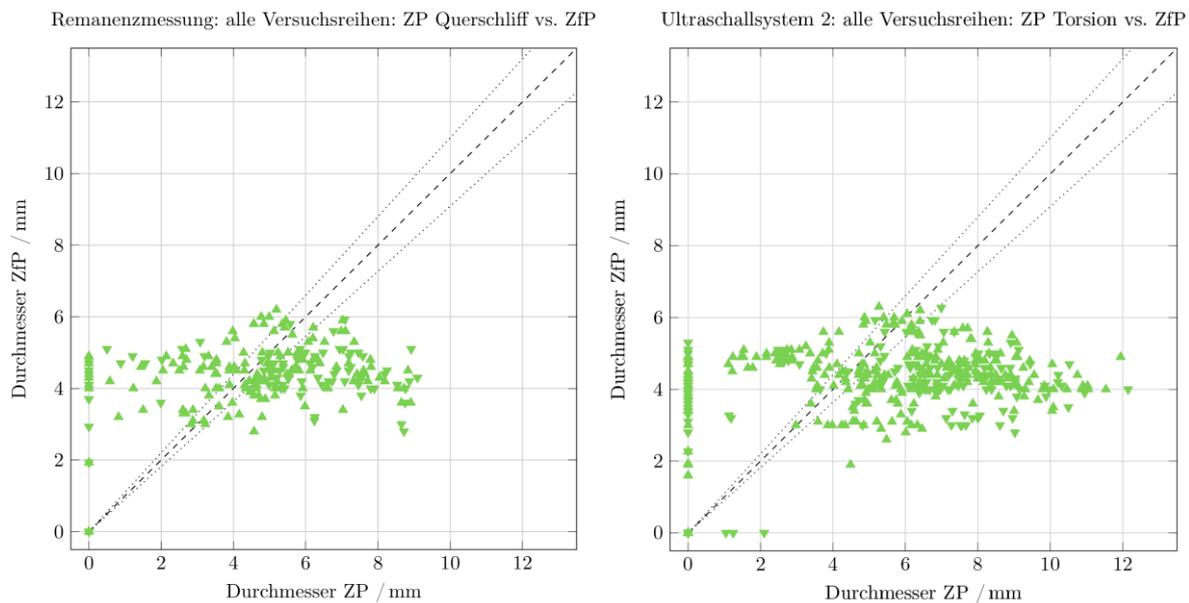


Abbildung 118: Gegenüberstellung aller Messergebnisse aus ZP und ZfP für das Ultraschallsystem 2

7.5 Funktionsnachweis und Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte

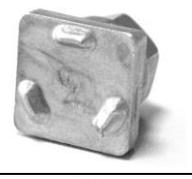
7.5.1 Anwendbarkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei Buckelschweißungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden durch den Projektbegleitenden Ausschuss 480 Buckelschweißungen nach Tabelle 2 zur Verfügung gestellt. Diese wurden vom Projektpartner bereits in die Kategorien in Ordnung (i. O.), grenzwertig und nicht in Ordnung (n. i. O.) eingeteilt, um die Tauglichkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zu analysieren.

Die Auswertung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei den Buckelschweißungen zeigt Unterschiede, die einerseits vom Fügeelement und andererseits vom Fügepartner, dem Blech, abhängen. Die Auswertung erfolgt über die erste Ableitung der Messergebnisse. Abbildung 119 zeigt ein Beispiel, in dem deutlich zwischen einer Probe mit der Qualitätsbewertung i. O. und einer Probe, die n. i. O. ist, unterschieden werden kann. Die i. O.-Probe zeigt eine wesentlich stärkere Intensität in der Änderung der Messergebnisse verglichen mit der n. i. O.-Probe. Die Tabelle 24 zeigt die Auswertung der Tauglichkeitsprüfung bei den unterschiedlichen Kombinationen und Kategorien. Es ist zu erkennen, dass die M8-Massebolzen bei allen Blechwerkstoffen gute Bewertungen zulassen. Im Unterschied dazu zeigen die meisten Proben der M6-Buckelproben eine Abhängigkeit vom Blechwerkstoff. Problematisch bei diesen Proben ist die zum Fügeelement koaxial liegende Durchgangsbohrung im Blech, die die Messwerte stark beeinflusst (Abbildung 120). Der Grund dafür liegt mit großer Wahrscheinlichkeit

beim Magnetisierungsprozess. Die Bohrung stört den magnetischen Fluss, der für eine gute Messbarkeit notwendig wäre.

Tabelle 23: Untersuchte Buckelschweißproben

	M6 Ringbuckel	M6 Segmentbuckel, 3 Buckel	M8 Massebolzen
Oberseite			
Buckelseite			
Verschweißst			

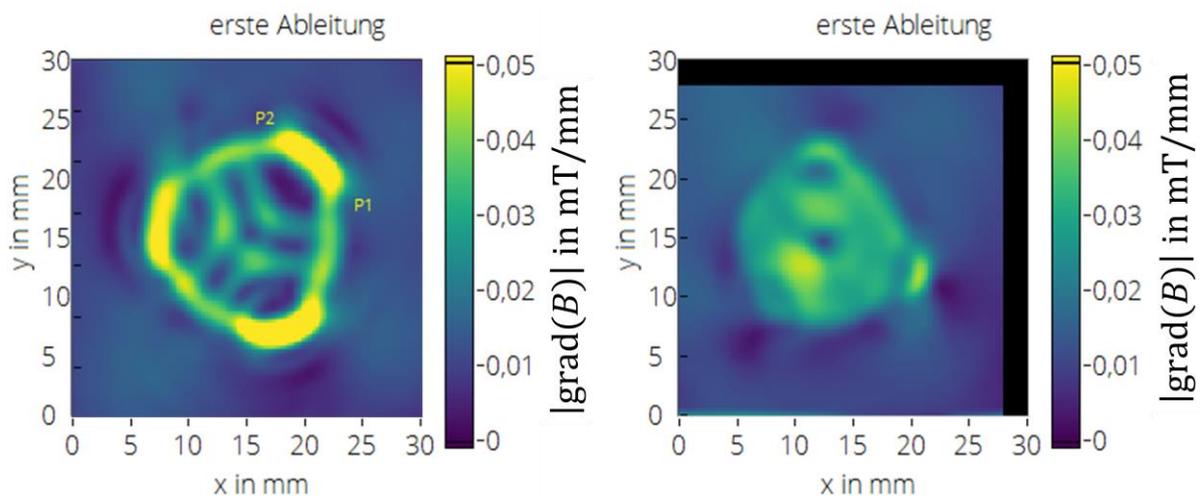


Abbildung 119: 3RPW: M8-Massebolzen: Darstellung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte, links: P07, Qualität i. O., rechts: P25, Qualität n. i. O.

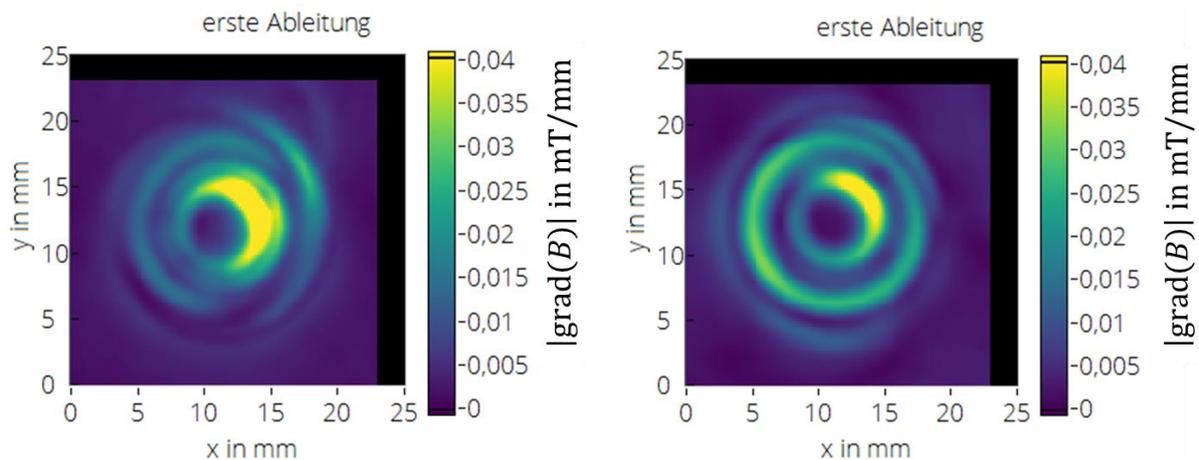


Abbildung 120: M6-Ringbuckel: Darstellung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte, links: 1RPW, P03, problematische Bewertung der Probe verursacht durch die Bohrung im Blech, rechts: 3RPW, P06, gute Bewertung der Probe möglich

Tabelle 24: Tauglichkeitsbewertung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte der neun Versuchskombinationen für das Widerstandsbuckelschweißen

Versuchsreihe	Blech	Fügeelement	Eignung
1RPW	S235, unbeschichtet, t = 1,25 mm	M6 Ringbuckel	-
		M6 Segmentbuckel	-
		M8 Massebolzen	+
2RPW	HX340LAD+Z, t = 1,5 mm	M6 Ringbuckel	+
		M6 Segmentbuckel	+
		M8 Massebolzen	+
3RPW	HCT600XD, t = 1,4 mm	M6 Ringbuckel	+
		M6 Segmentbuckel	-
		M8 Massebolzen	+

+: Qualität der Proben lässt sich sehr gut unterscheiden

-: Qualität der Proben lässt sich schwierig unterscheiden

Die Buckelschweißverbindungen wurden zerstörend durch den Kopf- und Schlagzug sowie dem Torsionsversuch geprüft. Die ZP der Buckelschweißverbindungen zeigen sehr differenzierte Ergebnisse. Beim Vergleich der Prüfmethode fällt auf, dass die Torsionsversuche keine Aussage zur Schweißqualität der Proben liefern. Bei der Torsionsprüfung der M8-Massebolzen wurden Drehmomente von 140 Nm bereits bei den n. i. O.-Proben erreicht, bis die Proben gebrochen sind. Dies entspricht nach EN 20898-7 [56] dem 300%igem des Mindest-Bruchdrehmoments $M_{B.min}$ für M8-Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9. Aus diesem Grund wurden für die weiteren Torsionsversuche die Proben nur bis zu einem Drehmoment von $\approx 130\%$ des Mindest-Bruchdrehmoments für die entsprechende Gewindeklasse nach EN 20898-7 [56] geprüft. Die Proben der M8-Massebolzen konnten am Vierkant im Torsionsprüfstand eingespannt werden. Die M8-

Gewinde wurden nicht belastet. Daher konnte bei diesen Proben die höchste Festigkeitsklasse 12.9 als Prüfkriterium angesetzt werden ($M_{B.min} = 44 \text{ Nm} \rightarrow M_T = 60 \text{ Nm}$). Durch die Zylinderform der M6-Buckelelemente, konnten diese nur mit einer eingeschraubten M6-Schraube der Festigkeitsklasse 12.9 im Torsionsversuchsstand eingespannt werden. Für die M6-Buckelelemente wurde als Prüfmoment $M_T = 17 \text{ Nm}$ gewählt, was 130% von $M_{B.min}$ der Festigkeitsklasse 8.8 entspricht. Höhere Prüfdrehmomente führten stets zum Versagen des Innengewindes der M6-Buckelelemente. Die Kopfzugprüfung liefert die vertrauenswürdigsten Ergebnisse zur Einstufung der Qualität der Schweißproben. Die Energieaufnahmen der Proben unterscheiden sich je Qualitätskategorie deutlich voneinander. Diese Tendenz ist beim Schlagzugversuch auch zu erkennen, jedoch nicht so ausgeprägt.

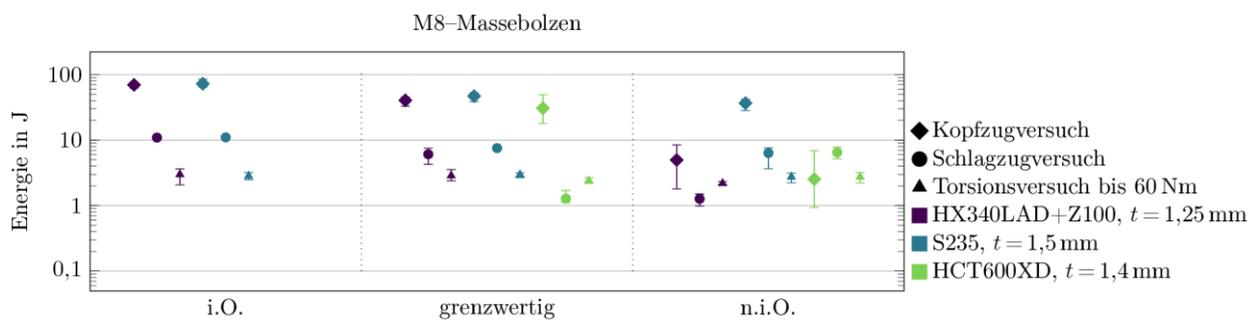


Abbildung 121: M8-Massebolzen: Ergebnisse der ZP

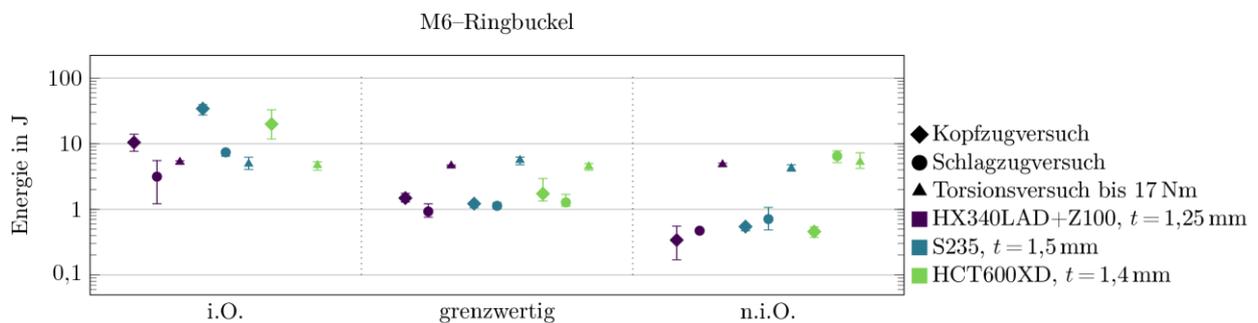


Abbildung 122: M6-Ringbuckel: Ergebnisse der ZP

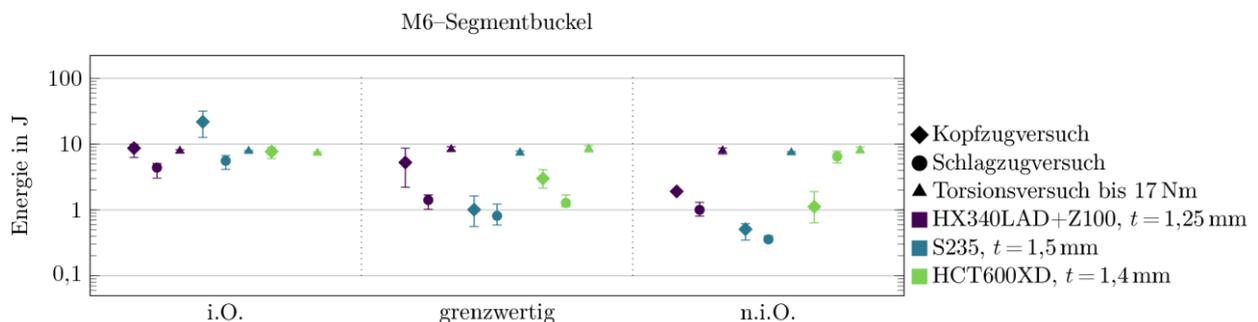


Abbildung 123: M6-Segmentbuckel: Ergebnisse der ZP

7.5.2 Untersuchung des Einflusses von Radien und Randabstand

Für die Untersuchungen bezüglich des Einflusses von Radien und des Randabstands wurden Laborproben der MDK 1RSW, 3RSW, 1M und 3M mit den geometrischen Angaben nach Tabelle 25 mit den Schweißparametern nach Tabelle 26 hergestellt. Die Untersuchungen wurden im Rahmen der Studienarbeit [57] umgesetzt.

Tabelle 25: Proben zur Untersuchung von Flanschradius und Randabstand

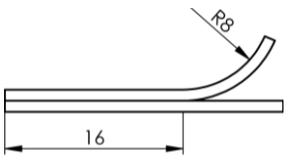
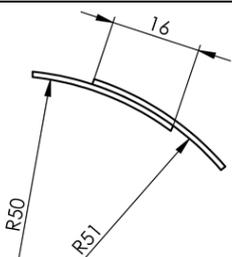
Profilbezeichnung (MDK)	Skizze	Überlappungslänge /mm [Profilbreite /mm]	Radius /mm	Variation von
Profil 1 (1RSW, 3RSW, 1M, 3M)		16 [50]	R8	Randabstand s des Schweißpunktes: 4 mm, 8 mm, 12 mm
Profil 2 (1RSW, 1M)		16 [50]	R25 R50	Profilradius

Tabelle 26: Schweißparameter zur Untersuchung von Radius und Randabstand

Profil, MDK	I_w	F_e	t_w	t_s, t_h
1, 1RSW	7,2 kA	2,0 kN	600 ms	400 ms
1, 3RSW	9,2 kA	2,5 kN	400 ms	400 ms
1, 1M	5,6 kA	2,7 kN	240 ms	200 ms
1, 3M	7,2 kA	3,0 kN	400 ms	400 ms
2, 1RSW	7,2 kA	2,0 kN	600 ms	400 ms
2, 1M	5,6 kA	2,7 kN	400 ms	200 ms

Der Rand des Blechs beeinflusst den Magnetisierungsprozess. Die Blechkante ist in Abbildung 124 links zu sehen. Für die Auswertung muss entweder der Messbereich geometrisch angepasst oder die Messdaten der Remanenzflussdichte in den entsprechenden Messbereich des Schweißpunktes eingeschränkt werden. Mit zunehmenden Abstand von der Blechkante und einem kleineren Abstand der Schweißpunkte zum Profilradius zeigt dieser ebenfalls eine Beeinflussung der Messergebnisse (Abbildung 124 rechts). Der Schweißpunkt ist dennoch zu erkennen und lässt sich problemlos bewerten.

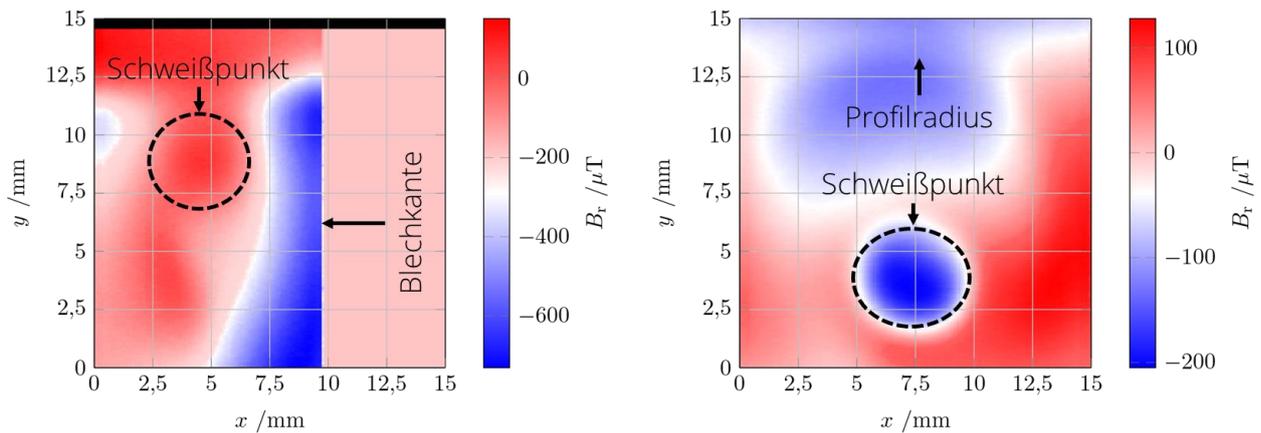


Abbildung 124: Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte bei unterschiedlichen Abständen s des Schweißpunkts zum Blechrand (links: $s = 4$ mm, rechts: $s = 12$ mm)

Die Ergebnisse der ZfP-Messungen mittels bildgebender Analyse der Remanenzflussdichte bei unterschiedlichen Abständen der Schweißpunkte zum Blechrand sind in Abbildung 125 zu sehen. Darin ist zu beobachten, dass mit zunehmenden Abstand s die Bewertung der Schweißpunkte in Richtung größerer Durchmesser tendiert. Die Messergebnisse entsprechen denen der flachen Laborproben aus Abschnitt 7.3 und 7.4.

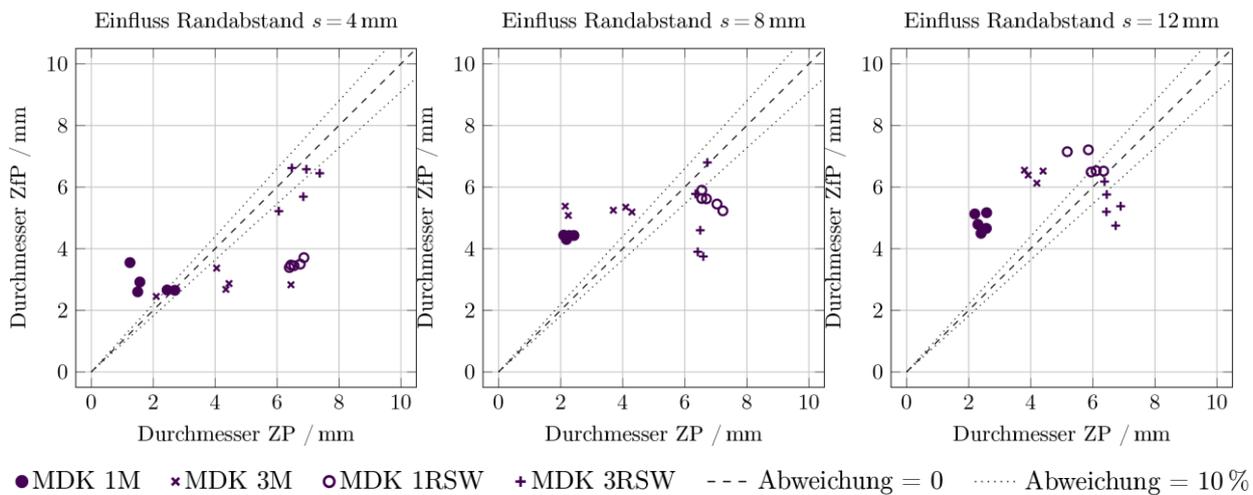


Abbildung 125: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus ZP und ZfP bei unterschiedlichen Abständen s des Schweißpunkts zum Blechrand

Die Auswertungen der Sensitivanalysen zur Untersuchung des Randabstands ist nach dem gleichen Schema, wie in Abschnitt 7.2.2 beschrieben, durchgeführt worden. Als Randbedingungen für die FE-Modelle wurden die Daten nach Tabelle 27 genutzt. Dabei wurde sowohl die einseitige als auch die beidseitige Magnetisierung betrachtet. Für jede Blechpaarung wurde der Linsendurchmesser d_n , der Elektrodeneindruck e sowie der Randabstand s variiert. Der Randabstand wurde dabei für beide Bleche jeweils gleich und unterschiedlich verändert. Bei der Betrachtung unterschiedlicher Randabstände zwischen oberem und unterem Blech wurde jeweils ein Blech konstant bei $s = 25$ mm

gehalten. Beim anderen Blech wurde der Randabstand von $s = 5$ mm bis $s = 25$ mm mit einer Schrittweite $\Delta s = 2,5$ mm variiert. Die Ergebnisse in Anhang D bestätigen die experimentellen Versuche. Der Randabstand kann bei einseitiger Magnetisierung und abhängig von der Blechdicke das Messergebnis beeinflussen. Dies äußert sich insbesondere bei der Kombination von kleinen Linsendurchmessern und Elektrodeneindrücken, die tiefer als die maximal zulässigen nach DIN EN ISO 14373 [44]. Die FEM-Simulationen zeigen auch, dass bei einseitiger Magnetisierung und unterschiedlichen Blechdicken bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn von der Seite des dünneren Blechs geprüft wird. Bei der beidseitigen Magnetisierung spielt die Blechdicke eine untergeordnete Rolle und der Randabstand hat keinen Einfluss auf das Prüfergebnis.

Tabelle 27: Parameter zum Ermitteln des Einflusses des Randabstands

Parameter	Blechdicke t_1/t_2	Linsendurchmesser d_n	Elektrodeneindringtiefe e	Randabstand s
Unterer Wert	1 mm / 1 mm	2 mm	0,2 mm	5 mm
Oberer Wert	1 mm / 3 mm	9 mm	0,7 mm	25 mm
Schrittweite	0 mm / 2 mm	1 mm	0,1 mm	2,5 mm

Schweißpunkte, die in einen Radius geschweißt werden, sind vom Außenradius sehr gut auswertbar. Schwierigkeiten zeigen sich beim Messen im Innenradius, da der Hallsensor einen sehr großen Abstand zum Schweißpunkt hat (Abbildung 126, links). Die Ergebnisse am Innenradius der MDK 1RSW, R25 konnten nicht ausgewertet werden. Abbildung 126, rechts zeigt die auswertbaren Messergebnisse und verdeutlicht, dass insgesamt eine gute Korrelation zwischen ZP und ZfP vorhanden ist. Lediglich eine Fehlschweißung wurde nicht richtig bewertet, was an den Einstellungen der Messwertaufnahme und den erläuterten Schwierigkeiten der Messungen am Innenradius liegt.

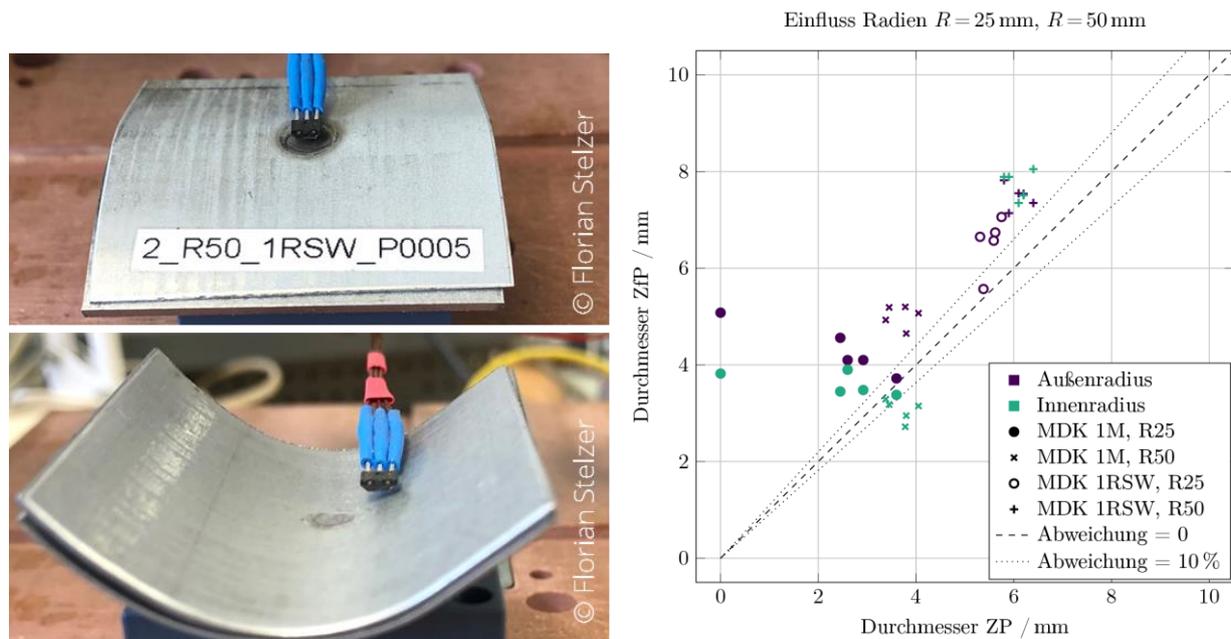


Abbildung 126: Darstellung der Herausforderungen beim Messen im Innenradius (links) und Gegenüberstellung der Ergebnisse aus ZP und ZfP für unterschiedliche Profilradien (rechts)

7.5.3 Anwendung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an Serienbauteilen

Der PA hat für diese Untersuchungen zwei Bauteile zur Verfügung gestellt, die durch das Widerstandspunktschweißen hergestellt wurden. Die Bauteile sind in Abbildung 127 zu sehen. Die Untersuchungen wurden auf Grund der einfacheren Handhabbarkeit ausschließlich mit der Magnetfeldkamera Magcam MiniCube durchgeführt. Zudem stellt die Anwendung der Magnetfeldkamera ein mögliches zukünftiges Szenario dar. Auf Grund der von Laborproben abweichenden Geometrien um die Schweißpunkte herum, wurden diese in drei Kategorien eingeteilt, die sich nach der Zugänglichkeit der Schweißpunkte beim Magnetisieren und beim Prüfen richten. In Tabelle 28 sind die Kategorien gelistet und die Anzahl der jeweiligen Schweißpunkte pro Bauteil und Kategorie. Dabei ist zu sehen, dass ein Großteil der Schweißpunkte uneingeschränkt magnetisiert und geprüft werden kann. Abbildung 128 zeigt die Anwendung der Magnetfeldkamera bei der Remanenzmessung am Serienbauteil. Die ZfP-Messungen wurden den Messergebnissen der ZP durch die Meißelprüfung nach [58] gegenübergestellt (Abbildung 129). Von den insgesamt 134 Schweißpunkten konnten 106 (ca. 80%) durch die Meißelprüfung zerstört und gemessen werden. Die restlichen 20% konnten nach der Meißelprüfung entweder nicht gemessen werden, da die Punkte mit dem Messschieber nicht zugänglich waren, oder deren Zerstörung ein zu großes Verletzungsrisiko darstellten. Es ist zu erkennen, dass keine zu kleinen und grenzwertigen Schweißpunkte an

beiden Bauteilen vorhanden waren. Die ZfP-Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Schweißpunkten nach der ZP. Nur wenige Messungen liegen außerhalb von ± 1 mm Abweichung zu den Messungen der ZP. Insgesamt weisen die Mediane beider Bauteile nahezu keine Abweichungen auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hierbei auch Schweißpunkte nur einseitig magnetisiert und geprüft werden konnten. Dies bestätigt das hohe Einsatzpotential der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte.



Abbildung 127: Serienbauteile zur Untersuchung der Anwendbarkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte

Tabelle 28: Einteilung der Schweißpunkte in drei Kategorien

Kategorie	Bedeutung	Schweißpunkte	Erläuterung
1	beidseitig magnetisierbar/prüfbar	Bauteil 1: 70 Bauteil 2: 34	ebene Oberflächen auf beiden Seiten, uneingeschränkte Zugänglichkeit
2	beidseitig magnetisierbar, bevorzugt einseitig prüfbar	Bauteil 1: 6 Bauteil 2: 10	einseitig prüfbar, bspw. durch starken Innenradius/Wölbung, Kamera kann nicht exakt auf dem Schweißpunkt ohne zu großen Luftspalt platziert werden, zu schmaler Blechflansch für Kamera
3	einseitig magnetisierbar/prüfbar	Bauteil 1: 11 Bauteil 2: 3	einseitiger Zugang, bspw. durch anliegendes Hohlprofil



Abbildung 128: Remanenzmessung am Serienbauteil mit der Magnetfeldkamera Mini-Cube

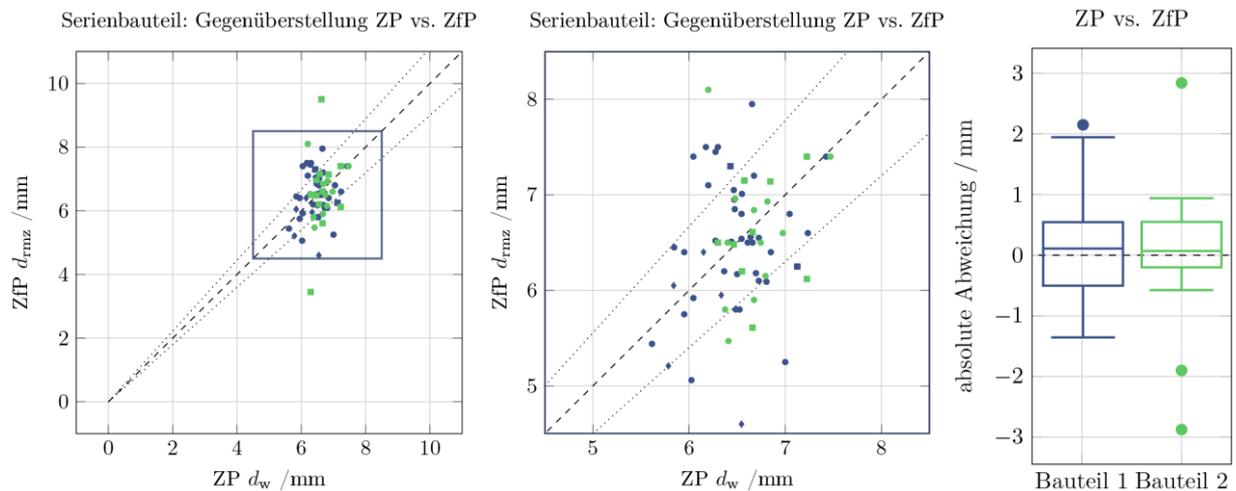


Abbildung 129: Gegenüberstellung der ZfP-Messungen durch die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte mit den Messungen der ZP und die statistische Auswertung der absoluten Abweichungen

7.5.4 Zusammenfassung

Der Funktionsnachweis der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an Buckelschweißverbindungen zeigt, dass sich Schweißbuckel prüfen lassen. Die Buckel bilden sich im Messergebnis ab und können bewertet werden.

Die Grenzen bezüglich der Elektrodeneindringtiefe sind im Abschnitt 7.2.2 dargestellt. Die Untersuchungen hinsichtlich der Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zeigen, dass der Randabstand bei einseitiger Magnetisierung und die Wahl der Blechdicke das Messergebnis beeinflussen können. Dies äußert sich insbesondere bei der Kombination von kleinen Linsendurchmessern und Elektrodeneindrücken, die tiefer als die maximal zulässigen nach DIN EN ISO 14373 [44]. Die FEM-Simulationen zeigen auch, dass bei einseitiger Magnetisierung und unterschiedlichen Blechdicken bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn von der Seite des dünneren Blechs geprüft wird. Bei der beidseitigen Magnetisierung spielt die Blechdicke eine untergeordnete Rolle und der Randabstand hat keinen Einfluss auf das Prüfergebnis. Schweißpunkte, die in Radien geschweißt werden, können vom Außenradius problemlos bewertet werden. Problematisch ist die Bewertung der Schweißpunkte von der Innenseite kleiner als 25 mm, da durch die geometrischen Bedingungen die Messung mit einem vergrößerten Abstand zur Probenoberfläche stattfinden muss.

8 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Das eingangs formulierte Ziel des Forschungsvorhabens, eine objektive Prüfmethode zu entwickeln, deren Aussagekraft und Einsatzgebiet bei geringerem Aufwand und kürzerer Prüfzeit größer sind, als die der etablierten Ultraschallmethoden, wurde erreicht. Die Prüfzeiten der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte liegen bei ca. zehn Sekunden. Die Methode arbeitet berührungslos und es sind keine Koppelmittel, wie bei den etablierten Ultraschallsystemen notwendig. Die Ergebnisse im Allgemeinen zeigen, dass die Prüfaussagekraft der einzelnen Systeme stark von der untersuchten MDK abhängig ist. Das betrifft insbesondere extreme und mehrschnittige MDK sowie Buckelschweißungen.

Es konnte gezeigt werden, dass extreme MDK mit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte geprüft werden können. Viel mehr noch konnte ein automatisch arbeitender Algorithmus erarbeitet werden, mit dem objektive Prüfbewertungen möglich sind. Dieses Ergebnis zeigt das große Potential der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte für die ZfP von Punktschweißverbindungen, ohne von den Erfahrungen des Prüfpersonals abhängig zu sein. Somit kann die erste Arbeitshypothese bestätigt werden. Zum Erreichen des Forschungsziels wurden fünf Arbeitshypothese aufgestellt, die bestätigt wurden.

Die Untersuchungen an Punktschweißverbindungen aus austenitischem Stahl haben gezeigt, dass die in der zweiten Arbeitshypothese angenommenen hohen Abkühlraten zur Anwendbarkeit der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte führen. Es konnten bei diesen Schweißverbindungen sehr gute Korrelationen zwischen ZfP und ZP erzielt werden, wodurch auch diese Arbeitshypothese bestätigt werden kann.

Wie oben bereits beschrieben, haben die MDK einen Einfluss auf die Prüfergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Durch die Messungen der magnetischen Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Materialien konnten die Simulationsmodelle deutlich verbessert werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass insbesondere die Messdatenerfassung des Schweißgefüges problematisch ist. In diesem Punkt sollten zukünftig weitere Untersuchungsmöglichkeiten entwickelt werden. Die Autoren gehen davon aus, dass diese Untersuchungen die Grundlage für eine Verallgemeinerung der Ergebnisse sind. Die Wahl von bisher empirisch ermittelte Referenzwerte für die Bewertung können dadurch physikalisch begründet werden. Die Untersuchungen bezüglich des Elektrodeneindruck haben in dem Forschungsvorhaben einen großen Teil eingenommen. Durch eine iterative Versuchsmethodik zwischen experimentellen Versuchen und numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass erst ab verhältnismäßig tiefen Elektrodeneindrücken jenseits der zulässigen nach

DIN EN ISO 14373 [44] das Messergebnis der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte beeinflusst wird. Die dritte Arbeitshypothese kann somit bestätigt werden und sollte in zukünftigen Untersuchungen stets Berücksichtigung finden.

Die Eignung der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte für Buckelschweißungen kann bestätigt werden. Die Prüfmethode bietet eine Möglichkeit der ZfP von Buckelschweißungen in Verbindung mit dem Schweißen dieser auf Stahlfeinbleche. Dabei sollte blechseitig geprüft werden.

Die Messergebnisse aus den Untersuchungen der Serienbauteile haben gezeigt, dass grundsätzlich die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte auch bei einseitiger Zugänglichkeit angewendet werden kann. Vorzugsweise ist jedoch eine beidseitige Zugänglichkeit zu wählen und evtl. bei der Integration der Prüfmethode in bestehende Produktionen zu beachten.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens erfüllen die Zielsetzungen.

9 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen

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

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungseinrichtung, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes mit 24 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 und die zur Verfügung gestellten Messsysteme verwendet.

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

10 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unter- nehmen

10.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Durch die weite und branchenübergreifende Verbreitung des Widerstandspressschweißens kommen diese hochproduktiven Fügeverfahren bei sehr vielen KMU und OEM zum Einsatz. Allein das Widerstandspunktschweißen hatte in den letzten zehn Jahren beim Fügen einen konstanten Marktanteil von 20% in der Automobilbranche. In [59] wird berichtet, dass allein in der Automobilindustrie der Wertschöpfungsanteil der Zulieferer im Zeitraum von 2002 bis 2015 um 40% von 417 Mrd. Euro auf 700 Mrd. Euro gestiegen ist und die „Zulieferer und Dienstleister [...] große Teile von Entwicklung und Produktion“ [59] übernehmen. Wenn allein in der Automobilbranche neue MDK mit extremen Dickenunterschieden, die außerhalb der Grenzen für die ZfP mittels Ultraschall durch Impuls-Echo-Verfahren liegen, geprüft werden können, entsteht daraus unmittelbar ein hohes Innovationspotential und eine deutliche Erweiterung der Anwendungsfelder für das Widerstandspressschweißen. Baugruppen können materialeffizienter ausgelegt und die Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen in ihrer Gesamtheit effizienter gestaltet werden. Dies führt zu geringeren Taktzeiten, Einsparung von Gewicht und somit zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen das große Potential der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zur Bewertung von Widerstandsschweißverbindungen sowohl an Laborproben, als auch an Serienbauteilen.

10.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Im Jahr 2017 wurden weltweit ca. 85 Millionen PKW, ohne Nutzfahrzeuge, hergestellt, in Deutschland allein 5,6 Millionen PKW [60]. Je nach Modell fallen bei einer Autokarosserie zwischen 2000 und 5000 Schweißpunkte an, d. h. durchschnittlich ca. 3500. KMU dienen zunehmend als Zulieferer für OEM [59], sodass von den KMU sehr hohe Anforderungen an die Qualität der gelieferten Bauteile erfüllt werden müssen. Hinzu kommt, dass der Markt der Zulieferer sehr stark preisgetrieben ist und deshalb die KMU einem starken Konkurrenzdruck unterliegen [61]. Um die Wettbewerbsfähigkeit der mittelständisch geprägten deutschen Zuliefererbranche zu erhalten, müssen besonders KMU sehr wirtschaftlich arbeiten. Im Bereich des Widerstandspunkt- und Buckelschweißens stehen dem die hohen Kosten für die Bauteilprüfungen entgegen. Für KMU sind die hohen Kosten für das Prüfpersonal und der Prüfaufwand zu berücksichtigen. Fast in jeder Fertigung werden Bauteile stichprobenartig entnommen und zerstörend geprüft. Kann die

Qualität durch die stichprobenartige ZP nicht nachgewiesen werden, werden alle gefertigten Bauteile bis zur letzten zurückliegenden positiven Prüfung ausgesondert oder müssen zerstörungsfrei geprüft und u. U. nachbearbeitet werden. Diese Maßnahmen sind mit hohen Kosten verbunden und auf lange Sicht ökonomisch und ökologisch nicht nachhaltig [62]. Besonders KMU können durch ein objektives, kostengünstiges und einfach zu bedienendes ZfP-Verfahren, wie es im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht wurde, direkt profitieren, indem sie erhebliche Kosteneinsparungen durch weniger zerstörende Prüfungen erzielen und mögliche Gutteile nicht verschrotten müssen. Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die rechtliche Absicherung für Fertigungsbetriebe, die sich durch den Einsatz objektiver ZfP-Methoden ergibt, um eventuellen Druck durch Klagen auf Rechtsansprüche entgegenzuwirken. Diese Rechtsansprüche, wie Produkthaftungsansprüche, erfordern einen entsprechenden Ausbau der Qualitätssicherung, der mit dem Einsatz geeigneter ZfP-Methoden verbunden ist. Dies stellt nicht nur für die Fertigungsbetriebe, sondern auch für die Prüfgerätehersteller und die Prüfdienstleister ein enormes Potential zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch den Einsatz innovativer Prüfmethoden, die sichere und objektive Aussagen zu den Eigenschaften der Schweißverbindungen liefern, dar. Die Ergebnisse zeigen, dass eine objektive Bewertung der Prüfergebnisse durch die Anwendung automatisch arbeitender Algorithmen möglich ist. Für die Anwendung auf die Vielzahl an unterschiedlichen MDK sind jedoch noch Untersuchungen notwendig, um die Prüfmethode der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte verallgemeinert einzusetzen und somit deren Robustheit zu steigern.

Wichtige Informationsquellen für KMU sind die Veröffentlichung der Ergebnisse in Berichten und auf Fachtagungen, sowie deren Einarbeitung in einschlägige Literatur, etwa Normen, Merkblätter oder Richtlinien.

11 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

11.1 Fachzeitschriften, Fachtagungen, Kolloquien

Vinz, J., Mathiszik, C., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: Numerische Simulation der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zur Charakterisierung der Anbindungsfläche von Widerstandspressschweißverbindungen. DGZfP-Jahrestagung 2017. Berichtsband: Koblenz, 22. - 24. Mai 2017. Berichtsband / Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 162-USB. Berlin: DGZfP 2017 [36]

Mathiszik, C., Reinhardt, T., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: Einfluss der Oberflächentopographie auf die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Widerstandspressschweißverbindungen. DGZfP-Jahrestagung 2017. Berichtsband: Koblenz, 22. - 24. Mai 2017. Berichtsband / Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 162-USB. Berlin: DGZfP 2017 [39]

Mathiszik, C., Reinhardt, T., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: NDT of austenitic steels - Evaluation of spot weld nugget diameters by imaging analyses of the residual flux density. 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018. 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Sweden, 2018 : proceedings. Gothenburg, Sweden: Sweden MEETX AB 2018 [20]

Reinhardt, T., Mathiszik, C., Vinz, J., Streller, E., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: Erarbeitung eines Algorithmus zur automatisierten Auswertung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. DVS Congress 2018. Große Schweißtechnische Tagung, DVS-Studentenkongress, Vorträge der Veranstaltungen in Friedrichshafen am 17. und 18. September 2018. DVS-Berichte, Band 344. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2018 [45]

Mathiszik, C., Reinhardt, T., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: NDT of spot welds by imaging analysis of the residual magnetic flux density – Investigation on the influence of electrode indentation on the measurement results. Materials Testing 60 , 2018, S. 1179–1183 [40]

11.2 Studien- und Abschlussarbeiten

Müller, S.: Technologiebewertung der zerstörungsfreien Prüfung durch die bildgebende Analyse der magnetischen Flussdichte beim Widerstandspunktschweißen. Masterarbeit, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insbesondere Systementwicklung, Dresden, 2016 [55]

Vinz, J.: Machbarkeitsstudie zur zerstörungsfreien Prüfung mittels bildgebender Analyse der Flussdichte an Bolzen- und Buckelschweißverbindungen. Großer Beleg,

- Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016 [63]
- Halisch, C.: Untersuchung der Veränderung magnetischer Eigenschaften des Werkstoffs während des Widerstandspunktschweißens. Interdisziplinäre Projektarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016 [53]
- Vinz, J.: Visualisierung der Remanenz mittels der numerischen Lösungsmethode der Finiten Elemente. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016 [35]
- Mencke, R.: Entwicklung eines Sensor-Arrays zur bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016 [23]
- Reinhardt, T.: Untersuchung des Einflusses der Oberflächentopographie auf das Messergebnis der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Interdisziplinäre Projektarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2017 [38]
- Reinhardt, T.: Erarbeitung eines Algorithmus zur automatisierten Auswertung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018 [21]
- Röder, C.: Schlagzugprüfung von Schweißmutter: Pendelschlagwerk. Forschungsseminar, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018 [64]
- Kutscher, D.: Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfung von Widerstandsbuckel- und Bolzenschweißverbindungen. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018
- Stelzer, F.: Funktionsnachweis und Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an seriennahen Bauteilen. Projektarbeit zum Forschungspraktikum, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018 [57]
- Vu, T. T.: Evaluierung der Messergebnisse aus zerstörungsfreier und zerstörender Prüfung von Punktschweißverbindungen. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2019 [29]
- Graefe, F.: Untersuchung unterschiedlicher Materialkombinationen mit Hilfe der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Interdisziplinäre Projektarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2019 [65]

12 Transfermaßnahmen

12.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 29: Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
A: Informationen an die Unternehmen des PA	Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU), Einflussnahme auf den Forschungsverlauf durch Industrie	PA: 8.11.2016, Berlin PA: 15.3.2017, Linz, Österreich PA: 7.12.2017, Dresden PA: 24.5.2018, Oyten PA: 20.09.2018, Dresden
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
C: 5 Zwischenpräsentationen auf den Sitzungen des FA 4 jeweils halbjährlich ab 11/2016	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	2.11.2016, Paderborn 4.5.2017, Aachen 29.11.2017, Leipzig 12.6.2018, Düsseldorf 26.11.201, Düsseldorf
AG V 3.9 im Ausschuss für Technik des DVS	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	8.11.2016, Berlin 15.3.2017, Linz, Österreich 7.12.2017, Dresden 24.5.2018, Oyten
D: Projektgespräche mit den PAMitgliedern an der Forschungseinrichtung oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Ergebnissen	7.11.2017, Bad Salzuflen: Informationsaustausch mit KAPKON GmbH; 8.11.2017, Hamburg: Informationsaustausch mit Harms & Wende GmbH & Co. KG; 27.9.2018: Telefonkonferenz BMW AG München; 28.11.2018, Köln: Tessonics Europe GmbH, 1. Kundentag, Präsentation von Ergebnissen; 5.11.2018, Dresden: Informationsaustausch mit Harms & Wende GmbH & Co. KG
F: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, gewinnen von Multiplikatoren	05/2017, Koblenz: DGZfP Jahrestagung 2017 [36, 39] 2016, 2017, 2018: V3/FA4 Kolloquium Widerstandsschweißen und alternative Verfahren;

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
		2017, Shanghai, China: IIW Annual Assembly 2017; 09/2018, Friedrichshafen: DVS CONGRESS 2018, Studentenkongress [45]; 06/2018, Göteborg, Schweden: ECNDT 2018 [20];
G: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Siehe Maßnahme D Fortlaufend während der Projektlaufzeit
L: 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: 29.5.2018, Halle/Saale: Weiterbildung für Schweißfachleute Akademische Arbeiten: Müller, S. [55]; Vinz, J. [35, 63]; Halisch, C. [53]; Mencke, R. [23]; Reinhardt, T. [21, 38]; Graefe, F. [65]; Röder, C. [64]; Kutscher, D. [66]; Stelzer, F. [57]; Vu, T. T. [29]

12.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Tabelle 30: Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
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
D: Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an den Forschungseinrichtungen oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Ergebnissen	21.2.2019, Dresden: Abschluss-sitzung
F: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, gewinnen von Multiplikatoren	ASNT Research Symposium 2019, CA, USA (Einladung) Sondertagung Widerstandsschweißen 2019 IIW Annual Assembly 2020

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
G: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend auf Anfrage
H: Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften	Information von potenziellen Anwendern, vor allem KMU	Schweißen und Schneiden 2. Quartal 2019
I: 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
J: Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes und Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	1. Quartal 2019
K: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	2020
L: 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

12.3 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. Der bereits durchgeführten Transfermaßnahmen in Tabelle 29 zeigen insbesondere bei der Maßnahme D, dass großes

Interesse an der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zur zerstörungsfreien Bewertung von Widerstandsschweißverbindungen besteht und zukünftige Weiterentwicklungen der Prüfmethode das Potential besitzt, diese im industriellen Umfeld zu etablieren.

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.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Merkblatt DVS 2920; Februar 2000. *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlblechen bis 3 mm mit metallischen Überzügen*
- [2] Merkblatt DVS 2911; April 2016. *Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik*
- [3] Merkblatt DVS 2905; Mai 2001. *Buckelschweißen von Stählen*
- [4] Deutsche Norm DIN EN 14610:2005-02; Februar 2005. *Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse; Dreisprachige Fassung EN 14610:2004*
- [5] Merkblatt DVS 2916-5; September 2017. *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen Zerstörungsfreie Prüfung*
- [6] Füssel, U., Mathisizik, C., Zschetzsche, J., Großmann, C. u. Heide, M.: Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren: Schlussbericht IGF-Nr. 17.539 BR/DVS-Nr. 04.058. Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage 2015
- [7] Augner, R., Loth, K., Harsch, K., Krauter, H. u. Maier, G.: Schweißverbindungsprüfung im Automobilbau - Entwicklung, Erprobung und Serienanwendung eines mobilen Ultraschallminiscanners. DACH-Jahrestagung 2008. 2008
- [8] Chen, J. u. Feng, Z.: IR-based spot weld NDT in automotive applications. SPIE Sensing Technology + Applications. SPIE Proceedings. SPIE 2015, S. 948513
- [9] Bösch, L., Pasic, H., Neges, J. u. Linkenbach, M.: Ultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen an hochfesten Stahlverbindungen im Karosseriebau. DACH-Jahrestagung 2004. 2004
- [10] Bösch, L., Gruber, C. u. Neges, J.: Vergleichsuntersuchungen mittels Ultraschallprüfung, Materialographie und mechanisch-technologischer Prüfverfahren an Widerstandspunktschweißungen unterschiedlicher Verbindungsqualität. DACH-Jahrestagung 2008. 2008
- [11] Roye, W.: Ultraschallprüfung von Schweißpunkten im Automobilbau, SD 198, 1999
- [12] Polrolniczak, M.: Ultraschallprüfung als Mittel zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen, Hürth, 1999
- [13] Kaminski, R.: Die Ultraschallprüfung von Punktschweißverbindungen an beschichteten Stahlfeinblechen und Optimierung der Schweißparameter, Hürth, 1999
- [14] Buschke, P. u. Wagner, J.: Schweißpunktprüfung in der Produktion an schwer zugänglichen oder kritischen Punkten in der Produktionslinie. Poster 50. DGZfP-Jahrestagung 2009. 2009
- [15] Na, J. K.: Nondestructive inspection of resistance spot welds using matrix phased array ultrasonic technology. In: *Advanced Materials & Processes*, S. 22–24
- [16] US 2014/0165730 A1

- [17] Vogt, G., Mußmann, J., Vogt, B. u. Stiller, W.-K.: Imaging spot weld inspection using Phased Array technology – new features and correlation to destructive testing. 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018. 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Sweden, 2018 : proceedings. Gothenburg, Sweden: Sweden MEETX AB 2018
- [18] OLYMPUS CORPORATION: Einführung in die Gruppenstrahlertechnik. <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/phased-array/>, abgerufen am: 04.02.2019
- [19] Erlewein, J.: Stand der Ultraschallprüfung an Punktschweißverbindungen. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., 57. Sitzung der AG V 3.9/NA 092-00-12-07 AK: Vortrag; 18.12.2014
- [20] Mathiszik, C., Reinhardt, T., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: NDT of austenitic steels - Evaluation of spot weld nugget diameters by imaging analyses of the residual flux density. 12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018. 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Sweden, 2018 : proceedings. Gothenburg, Sweden: Sweden MEETX AB 2018
- [21] Reinhardt, T.: Erarbeitung eines Algorithmus zur automatisierten Auswertung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018
- [22] Allegro MicroSystems LLC: A1324, A1325, and A1326: Low Noise, Linear Hall Effect Sensor ICs with Analog Output: Datenblatt
- [23] Mencke, R.: Entwicklung eines Sensor-Arrays zur bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016
- [24] Texas Instruments Inc.: DRV5053 2.5 V to 38 V Analog Bipolar Hall Effect Sensor datasheet (Rev. C): Datenblatt
- [25] Magcam NV: Magcam Brochure: advanced magnet inspection, 2017
- [26] Tessonics Inc.: RSWA F1 - Resistance Spot Weld Analyzer. <http://www.tessonics.com/products-rswa.html>, abgerufen am: 19.12.2018
- [27] Merkblatt, Entwurf DVS 2916-4; August 2018. *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen - Metallografische Prüfung*
- [28] Deutsche Norm DIN EN ISO 14329; Dezember 2003. *Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen - Brucharten und geometrische Messgrößen für Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen*
- [29] Vu, T. T.: Evaluierung der Messergebnisse aus zerstörungsfreier und zerstörender Prüfung von Punktschweißverbindungen. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2019

- [30] Deutsche Norm DIN EN ISO 17653; August 2012. *Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Torsionsversuch an Widerstandspunktschweißverbindungen (ISO 17653:2012)*;
- [31] Merkblatt DVS 2916-1; März 2014. *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen – Zerstörende Prüfung, quasistatisch*
- [32] Rahlves, M., Rahlves, M. u. Seewig, J.: *Optisches Messen technischer Oberflächen: Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Pocket. s.l.: Beuth Verlag GmbH 2009
- [33] Norm DIN EN ISO 14327; Juni 2004. *Verfahren für das Bestimmen des Schweißbereichsdiagramms für das Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen*
- [34] Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1220-2; 1.8.2011. *Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die Fügeignung von Feinblechen aus Stahl - Teil 2: Widerstandspunktschweißen*
- [35] Vinz, J.: *Visualisierung der Remanenz mittels der numerischen Lösungsmethode der Finiten Elemente*. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016
- [36] Vinz, J., Mathiszik, C., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: *Numerische Simulation der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte zur Charakterisierung der Anbindungsfläche von Widerstandspressschweißverbindungen*. DGZfP-Jahrestagung 2017. Berichtsband: Koblenz, 22. - 24. Mai 2017. Berichtsband / Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 162-USB. Berlin: DGZfP 2017
- [37] Woodcock, T. u. Vinz, J.: *Dr. Woodcock, Thomas G.: Persönliches Gespräch mit dem wissenschaftlichen Mitarbeiter, Dresden, 2016*
- [38] Reinhardt, T.: *Untersuchung des Einflusses der Oberflächentopographie auf das Messergebnis der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte*. Interdisziplinäre Projektarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2017
- [39] Mathiszik, C., Reinhardt, T., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: *Einfluss der Oberflächentopographie auf die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Widerstandspressschweißverbindungen*. DGZfP-Jahrestagung 2017. Berichtsband: Koblenz, 22. - 24. Mai 2017. Berichtsband / Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 162-USB. Berlin: DGZfP 2017
- [40] Mathiszik, C., Reinhardt, T., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: *NDT of spot welds by imaging analysis of the residual magnetic flux density – Investigation on the influence of electrode indentation on the measurement results*. *Materials Testing* 60 , 2018, S. 1179–1183
- [41] Norm DIN EN ISO 5821; April 2010. *Widerstandsschweißen - Punktschweiß-Elektrodenkappen (ISO 5821:2009)*

- [42] Mathiszik, C., Füssel, U. u. Zschetzsche, J.: Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen durch bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte. Widerstandsschweißen. Vorträge der gleichnamigen 23. Sondertagung in Duisburg am 29. und 30. Juni 2016. DVS-Berichte. 2016, S. 77–85
- [43] Mathiszik, C., Zschetzsche, J., Großmann, C. u. Füssel, U.: Remanent Magnetization for Non-Destructive Testing of Spot Welds. In: 19th WCNDT 2016 in Munich, Germany. Proceedings. DGZfP-Proceedings BB, 158-USB. Munich 2016
- [44] Norm ISO 14373:2015; Juni 2015. *Widerstandsschweißen – Verfahren zum Punktschweißen von niedriglegierten Stählen mit oder ohne metallischem Überzug*
- [45] Reinhardt, T., Mathiszik, C., Vinz, J., Streller, E., Zschetzsche, J. u. Füssel, U.: Erarbeitung eines Algorithmus zur automatisierten Auswertung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. DVS Congress 2018. Große Schweißtechnische Tagung, DVS-Studentenkongress, Vorträge der Veranstaltungen in Friedrichshafen am 17. und 18. September 2018. DVS-Berichte, Band 344. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2018
- [46] voestalpine Stahl GmbH: chemische Analyse und mechanische Kennwerte der gelieferten Versuchswerkstoffe für IGF 19.208, 2017
- [47] Metall Jobst: Unlegierter Stahl DC04 W.-Nr. 1.0338: Techn. Info unleg. Stahl, 2019
- [48] Salzgitter Flachstahl GmbH: 22MnB5 Borlegierte Vergütungsstähle, Salzgitter, 2014
- [49] Kaars, J., Mayr, P. u. Koppe, K.: Determining Material Data for Welding Simulation of Presshardened Steel. Metals 8 , 2018, S. 740
- [50] Wink, H.-J. u. Krätschmer, D.: Charakterisierung und Modellierung des Bruchverhaltens von Punktschweißverbindungen in pressgehärteten Stählen: Teil II - Simulation des Schweißprozesses. In: 11. LS-DYNA Forum
- [51] Han, Z., Orozco, J., Indacochea, J. E. u. Chen, C. H.: Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study: Real and simulated welds were used to develop a model for predicting temperature distribution. Welding journal 1989 , 1989, 363s–371s
- [52] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2010
- [53] Halisch, C.: Untersuchung der Veränderung magnetischer Eigenschaften des Werkstoffs während des Widerstandspunktschweißens. Interdisziplinäre Projektarbeit, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016
- [54] Füssel, U., Jüttner, S., Mathiszik, C., Sherepenko, O., Köberlin, D. u. Zschetzsche, J.: Lebensdauererhöhung von Widerstandspunktschweißelektroden durch Einsatz verschleißabhängiger Fräsintervalle und dispersionsgehärteter Kupferwerkstoffe: Schlussbericht IGF-Nr. 18.456 BR/DVS-Nr. 04.062. 2018

- [55] Müller, S.: Technologiebewertung der zerstörungsfreien Prüfung durch die bildgebende Analyse der magnetischen Flussdichte beim Widerstandspunktschweißen. Masterarbeit, Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insbesondere Systementwicklung, Dresden, 2016
- [56] Norm DIN EN 20898-7:1995-04; 1995-04. *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen - Teil 7: Torsionsversuch und Mindest-Bruchdrehmomente für Schrauben mit Nenndurchmessern 1 mm bis 10 mm (ISO 898-7:1992)*, abgerufen am: 15.02.2019
- [57] Stelzer, F.: Funktionsnachweis und Grenzen der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte an seriennahen Bauteilen. Projektarbeit zum Forschungspraktikum, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018
- [58] Deutsche Norm DIN EN ISO 10447:2015; Mai 2015. *Widerstandsschweißen – Prüfung von Schweißverbindungen – Schäl- und Meißelprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen*
- [59] Mercer-Management-Consulting, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik u. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik: Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015 - die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie. Frankfurt am Main 2004
- [60] Verband der Automobilindustrie e. V.: Automobilproduktion: Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland. <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html>, abgerufen am: 04.02.2019
- [61] Industrie- und Handelskammer Arnsberg Hellweg-Sauerland: Herstellermacht setzt Preisen zu. <http://www.automotive-sw.de/webseite.asp?ID=130>, abgerufen am: 15.02.2019
- [62] Matthes, K. J. u. Seliga, E.: Gerätetechnischer Forschungsbedarf in der Fügetechnik aus Sicht mittelständischer Anlagenhersteller oder Systemanbieter. Studie, Technische Universität Chemnitz, Institut für Fertigungstechnik/Schweißtechnik, Chemnitz, Düsseldorf, 2003
- [63] Vinz, J.: Machbarkeitsstudie zur zerstörungsfreien Prüfung mittels bildgebender Analyse der Flussdichte an Bolzen- und Buckelschweißverbindungen. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2016
- [64] Röder, C.: Schlagzugprüfung von Schweißmutter: Pendelschlagwerk. Forschungseminar, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018
- [65] Graefe, F.: Untersuchung unterschiedlicher Materialkombinationen mit Hilfe der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte. Interdisziplinäre Projektarbeit,

Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2019

- [66] Kutscher, D.: Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfung von Widerstandsbuckel- und Bolzenschweißverbindungen. Großer Beleg, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018

14 Anhang

Anhang A Übersicht über Trainings- und Testmengen

Tabelle 31: Übersicht über Trainings- (TR) und Testmengen (TE)

Schweiß- reihe	Schweißzeit	Schweiß- strom	Elektroden- kraft	Schweißpunkte			
	/ms	/kA	/kN	TR			TE
1M	240	4,00	2,70	P1	P2	P3	P4
1M	240	4,80	2,70	P1	P2	P3	P4
1M	240	5,60	2,70	P1	P2	P3	P4
1M	240	6,40	2,70	P1	P2	P3	P4
1M	240	7,20	2,70	P1	P2	P3	P4
1M	240	8,00	2,70	P1	P2	P3	P4
1M	240	8,80	2,70	P1	P2	P3	P4
1RSW	600	5,60	2,00	P1	P2	P3	P4
1RSW	600	6,40	2,00	P1	P2	P3	P4
1RSW	600	7,20	2,00	P1	P2	P3	P4
1RSW	600	8,00	2,00	P1	P2	P3	P4
1RSW	600	8,80	2,00	P1	P2	P3	P4
1RSW	600	9,60	2,00	P1	P2	P3	P4
2RSW	1000	5,60	3,50	P1	P2	P3	P4
2RSW	1000	6,40	3,50	P1	P2	P3	P4
2RSW	1000	7,20	3,50	P1	P2	P3	P4
2RSW	1000	8,00	3,50	P1	P2	P3	P4
2RSW	1000	8,80	3,50	P1	P2	P3	P4
2RSW	1000	9,60	3,50	P1	P2	P3	P4
3RSW	400	6,00	2,50	P1	P2	P3	P4
3RSW	400	6,80	2,50	P1	P2	P3	P4
3RSW	400	7,60	2,50	P1	P2	P3	P4
3RSW	400	8,40	2,50	P1	P2	P3	P4
3RSW	400	9,20	2,50	P1	P2	P3	P4
3RSW	400	10,00	2,50	P1	P2	P3	P4

Anhang B Werkstoffabhängige Hystereseschleifen

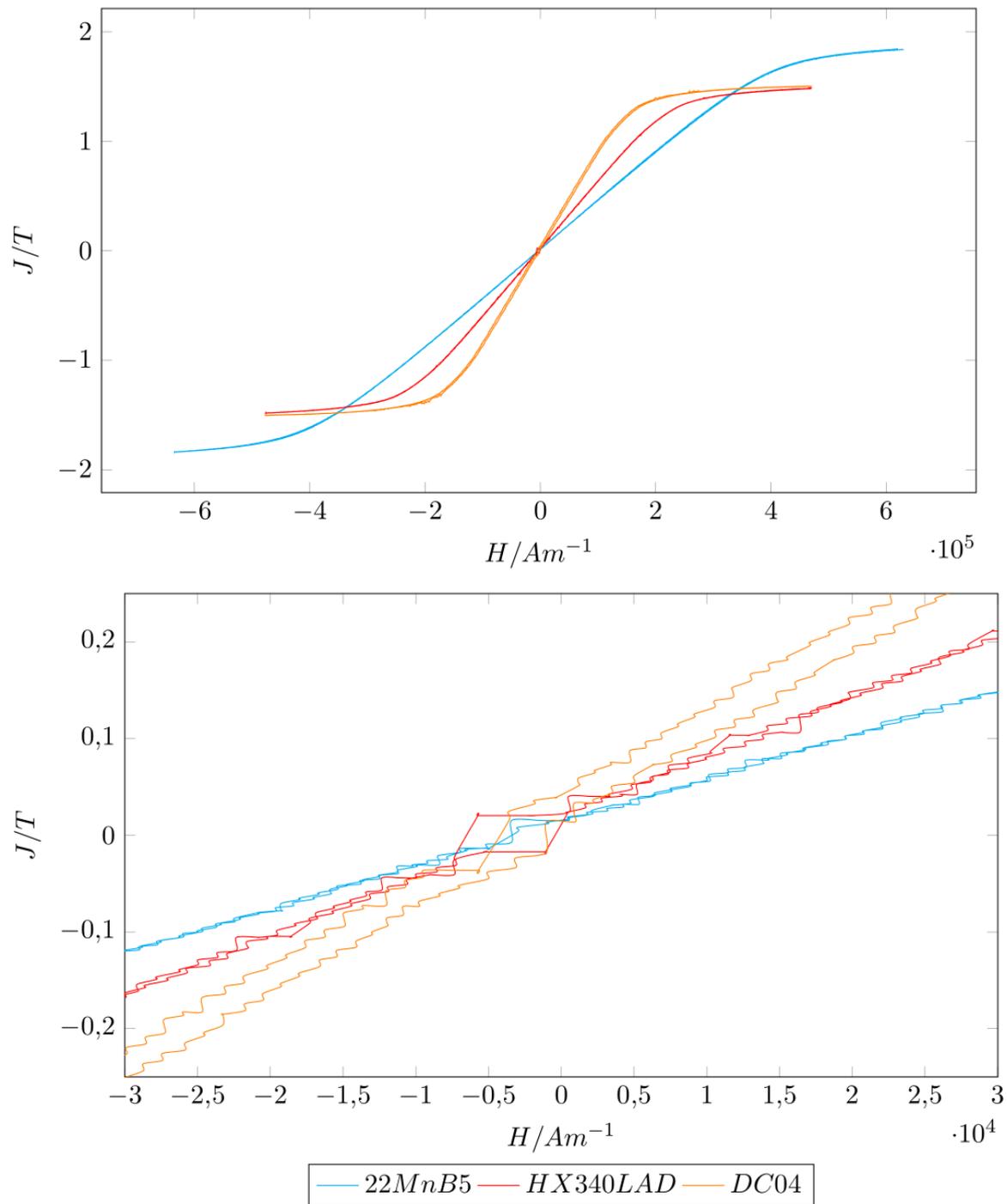


Abbildung 130: Werkstoffabhängige Hystereseschleifen gesamt und im Detail (gemessen am IFW-Dresden) [36]

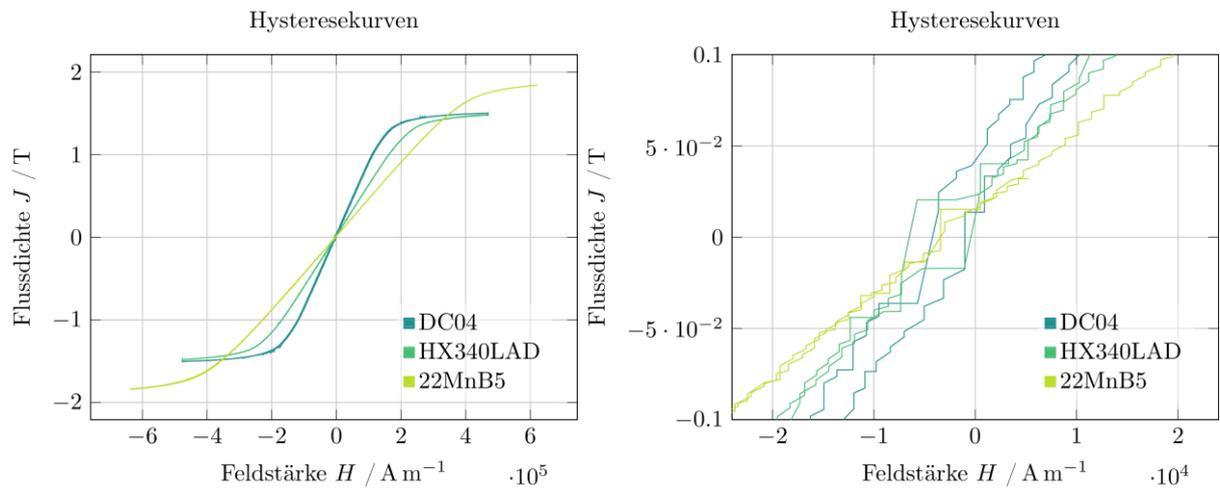


Abbildung 131: Werkstoffabhängige Hystereseschleifen gesamt und im Detail (gemessen an der Professur für Magnetofluidynamik, Mess- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden)

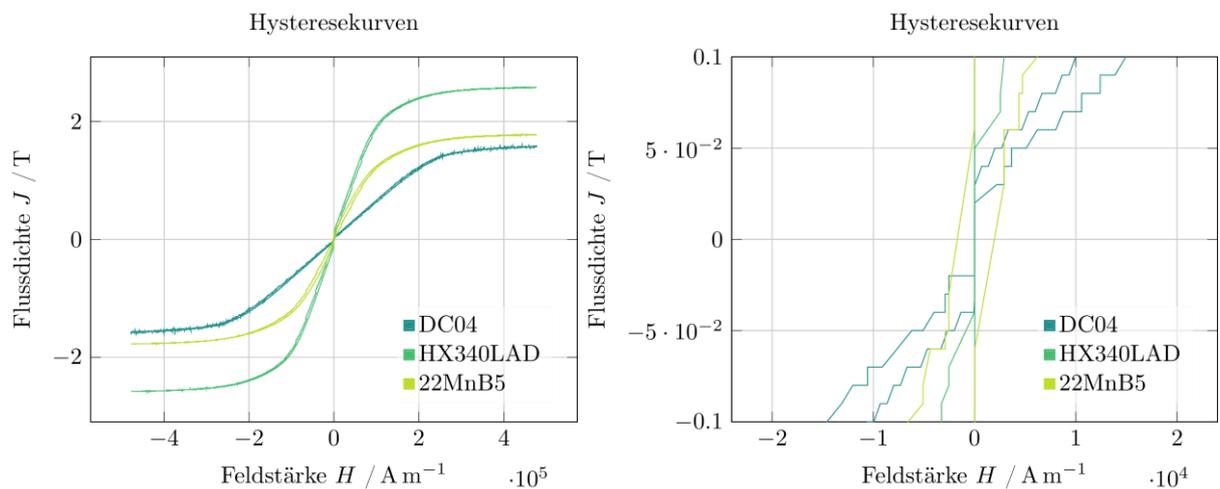


Abbildung 132: Werkstoffabhängige Hystereseschleifen von Schweißpunkten gesamt und im Detail (gemessen an der Professur für Magnetofluidynamik, Mess- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden)

Anhang C Simulationsergebnisse zum Elektrodeneindruck

Einfluss des Elektrodeneindrucks

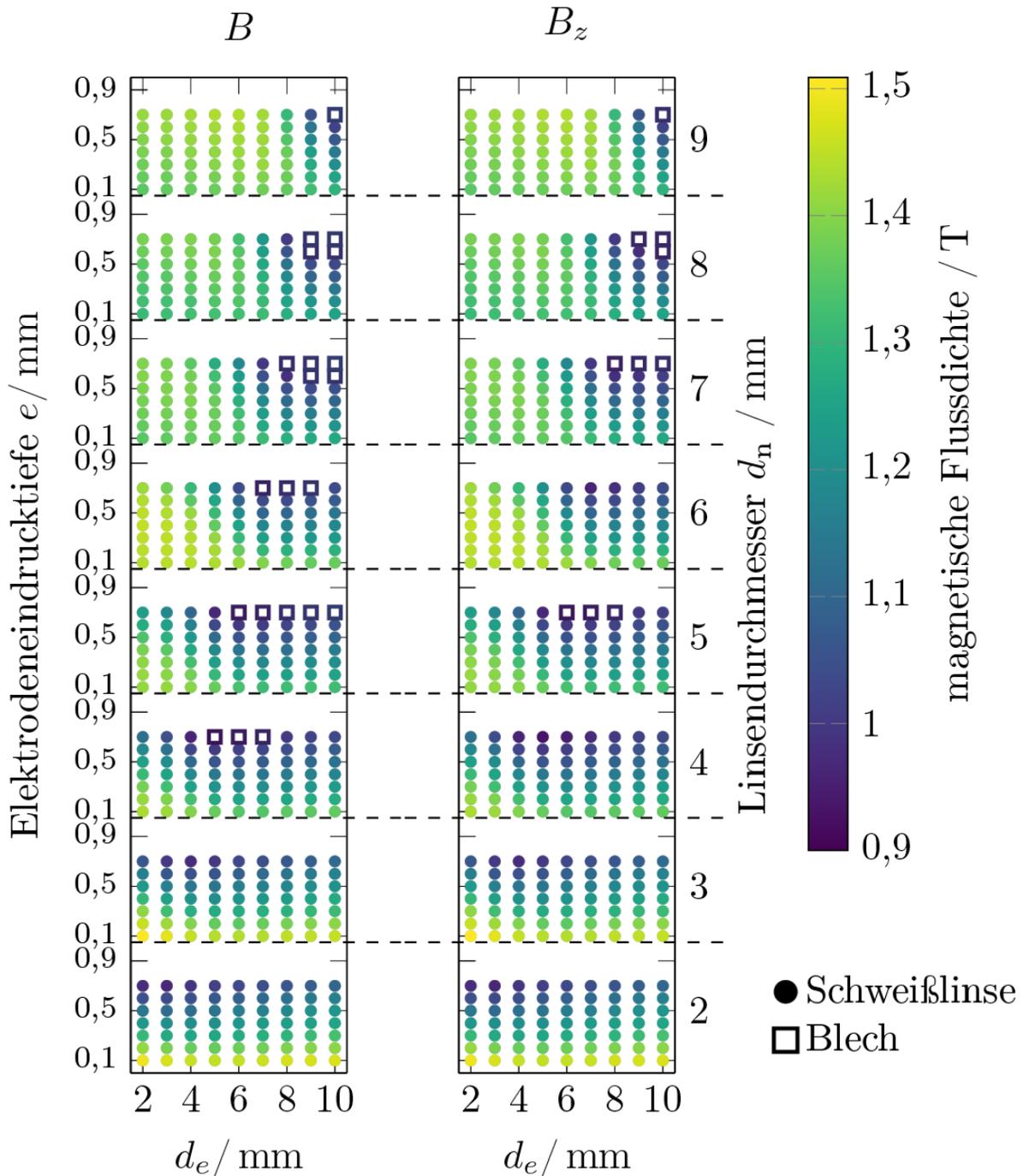
2 Bleche: $t_u = 1,0 \text{ mm}$, $t_l = 1,0 \text{ mm}$ 

Abbildung 133: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

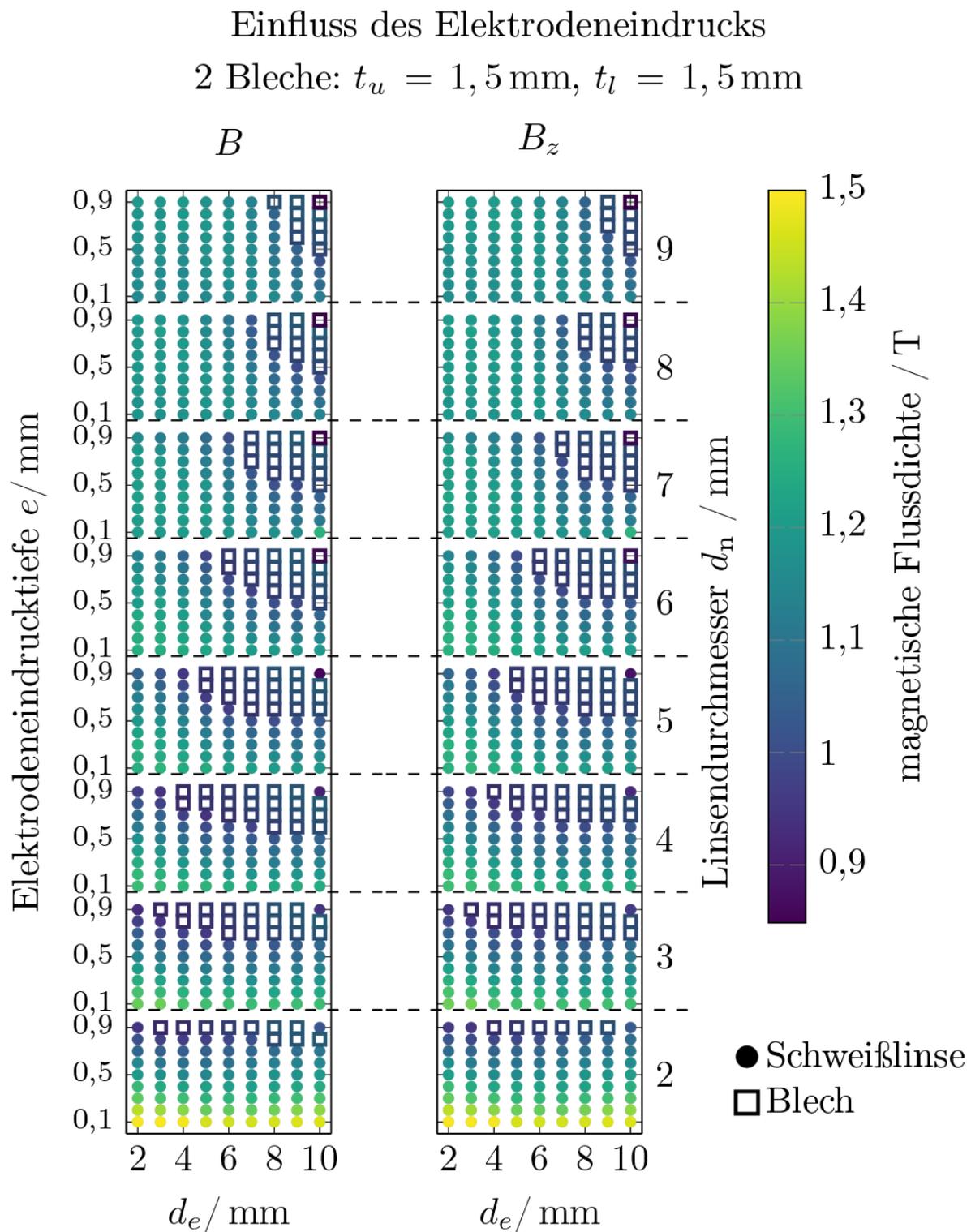


Abbildung 134: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,5 mm – 1,5 mm

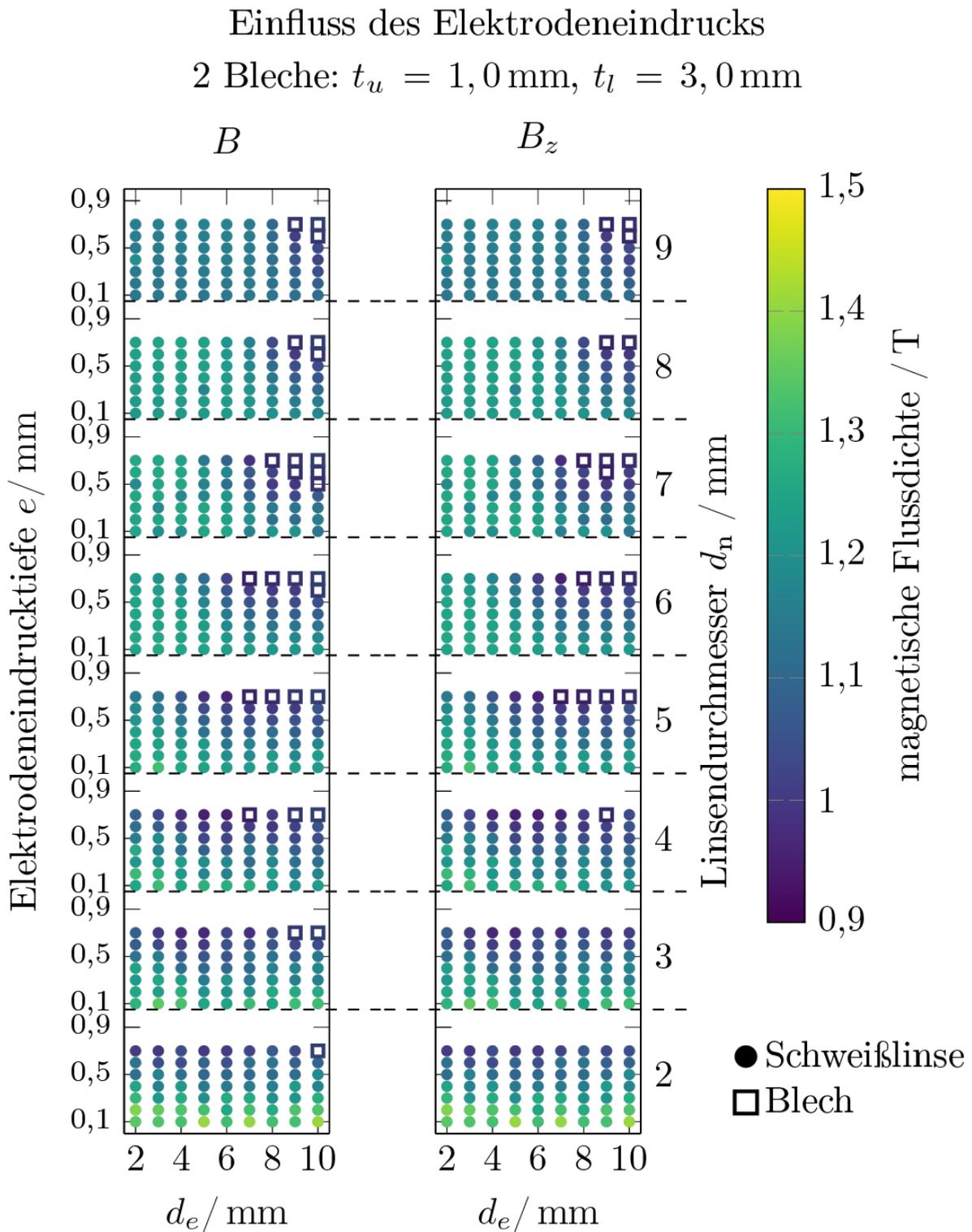


Abbildung 135: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 3,0 mm

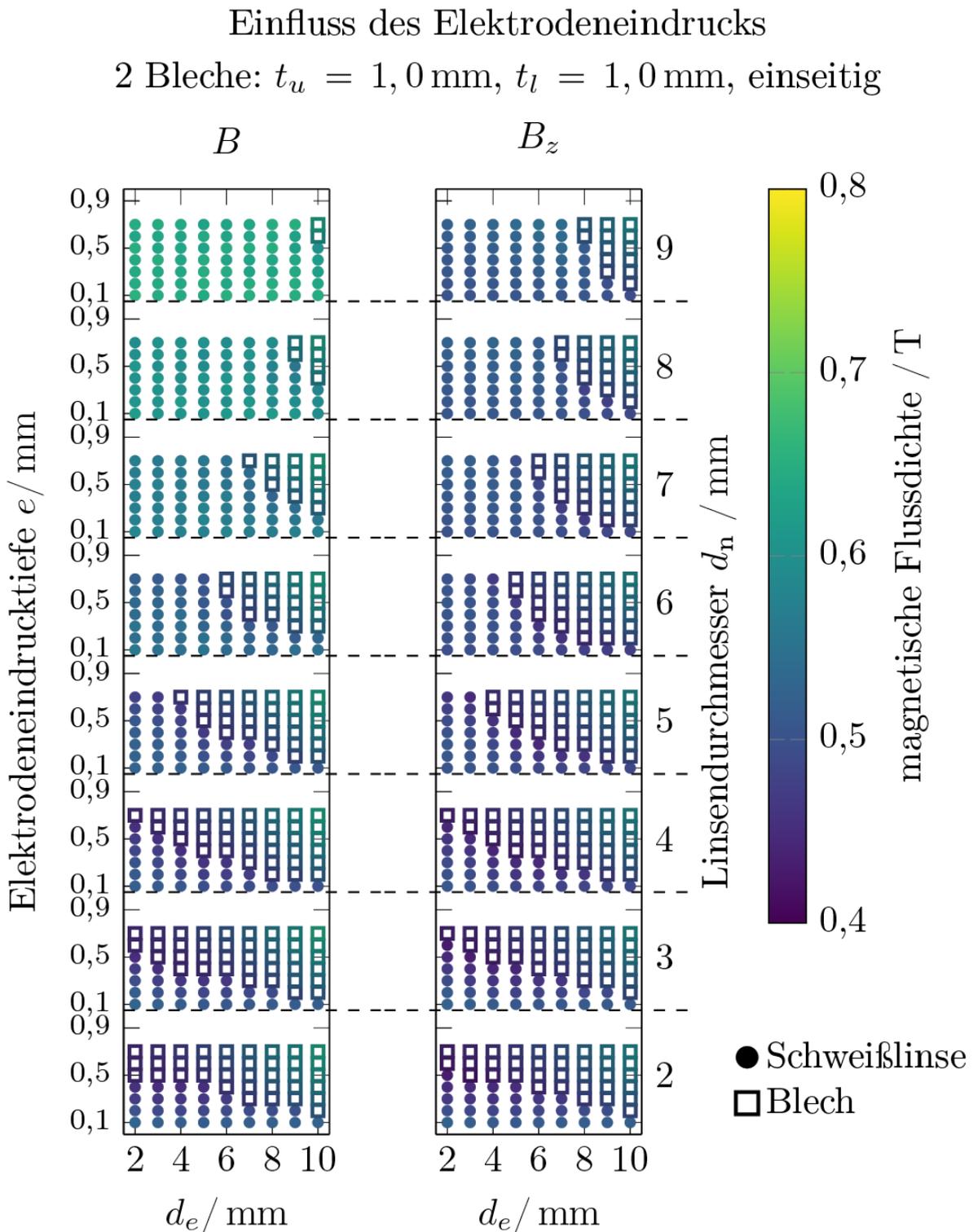


Abbildung 136: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

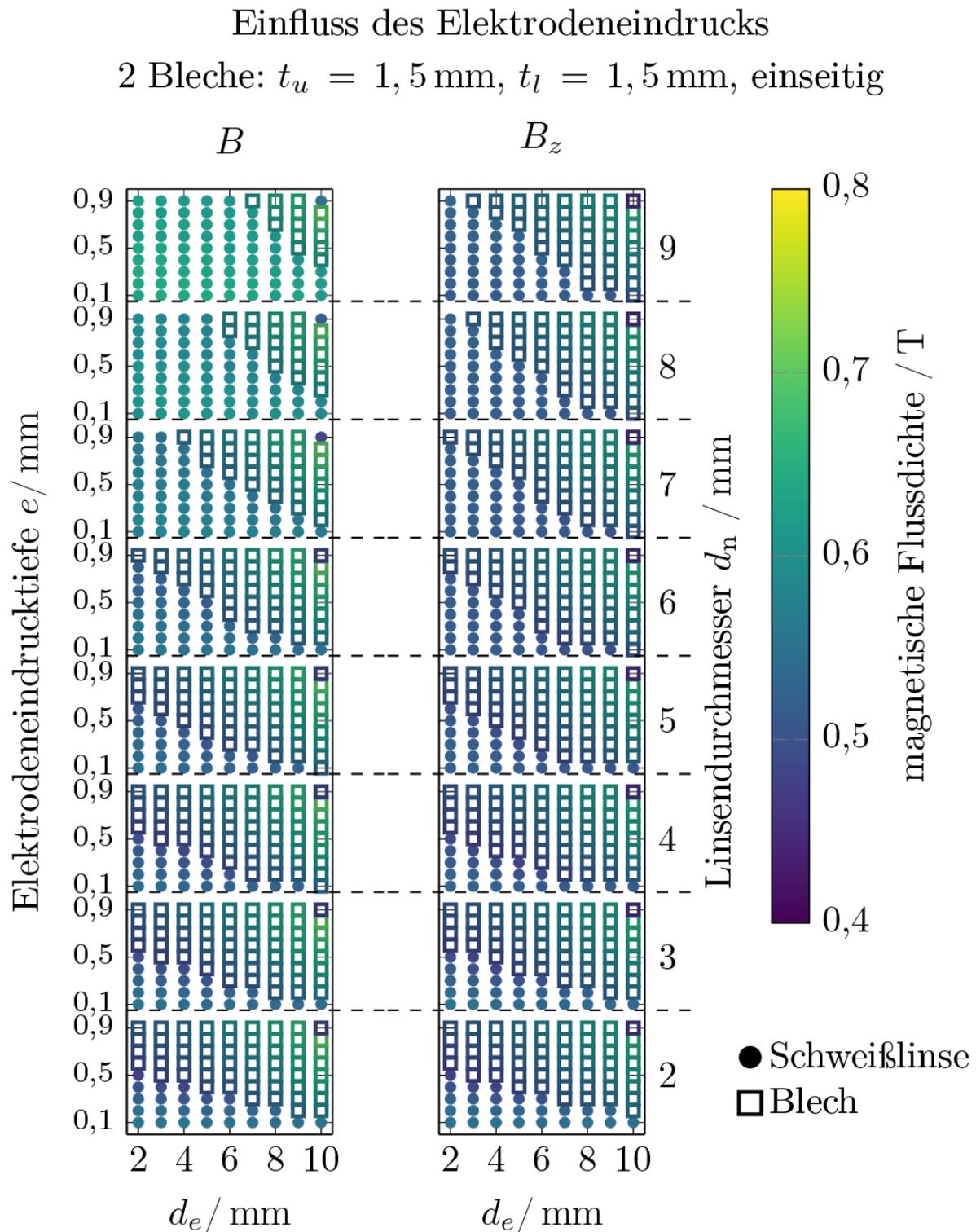


Abbildung 137: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,5 mm – 1,5 mm

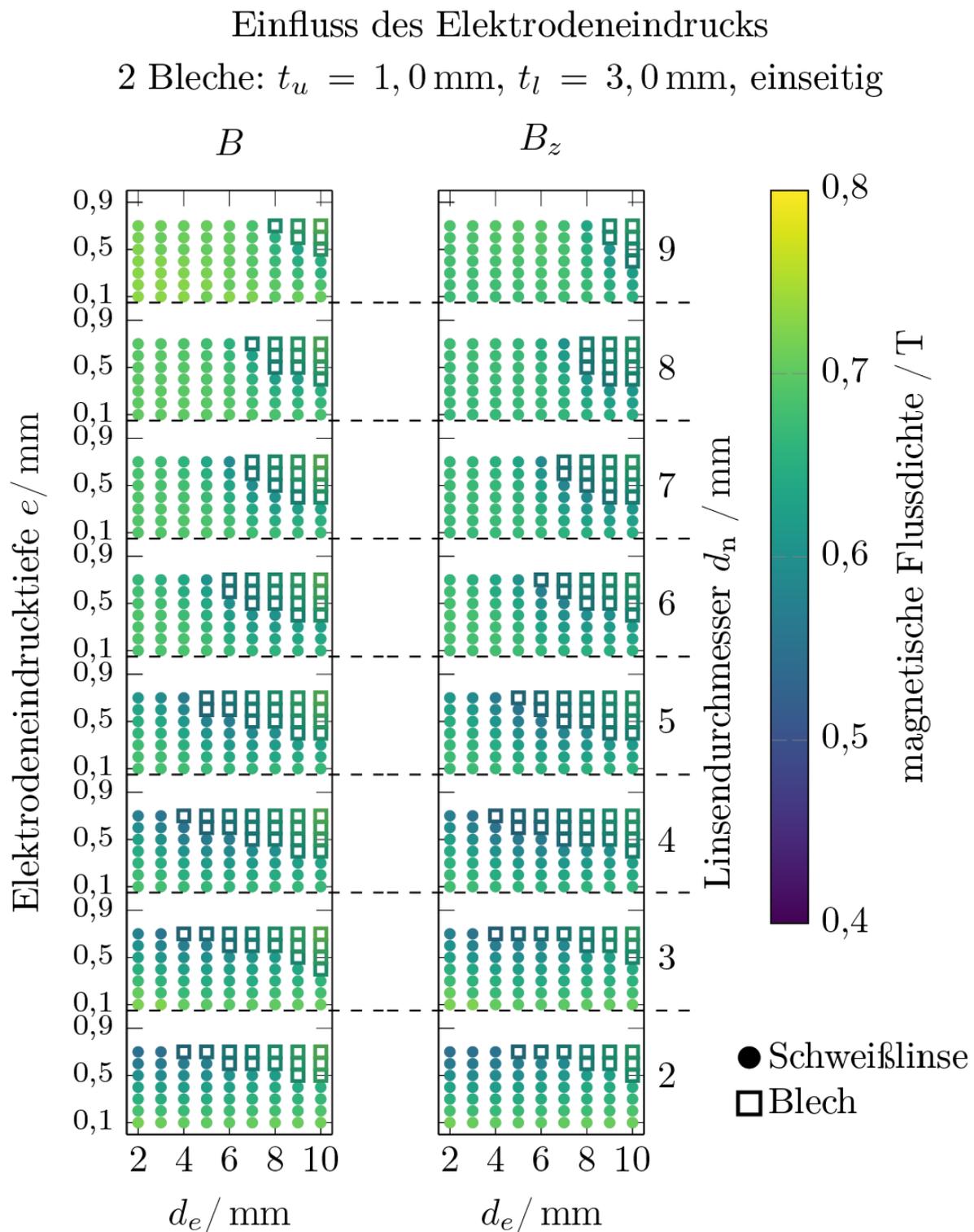


Abbildung 138: Einfluss des Elektrodeneindrucks bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 3,0 mm

Anhang D Simulationsergebnisse zum Einfluss des Randabstands

Einfluss des Randabstands s

2 Bleche: $t_u = 1,0 \text{ mm}$, $t_l = 1,0 \text{ mm}$

$s_u = s_l = 5 \dots 25 \text{ mm}$

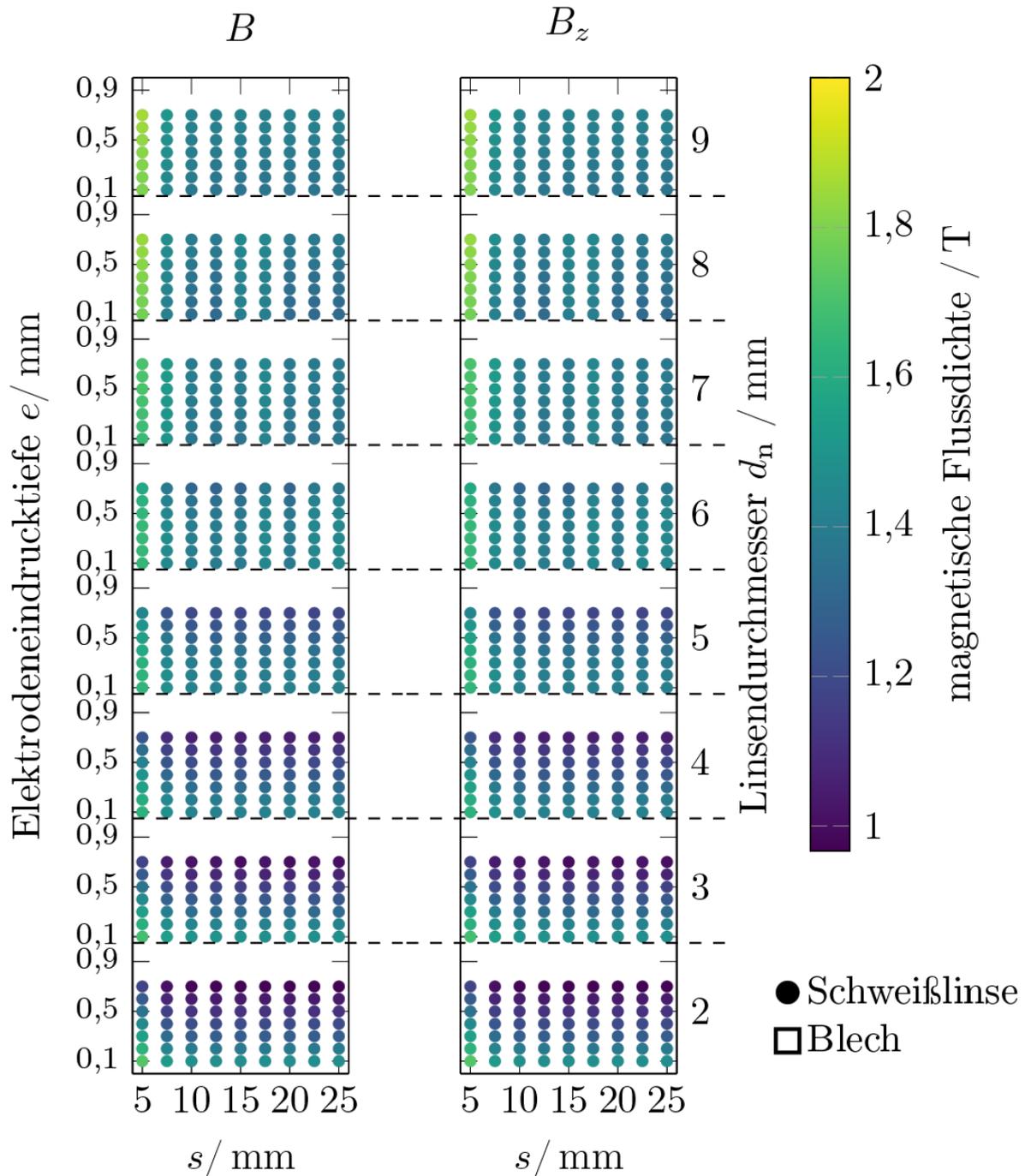


Abbildung 139: Einfluss des Randabstands bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

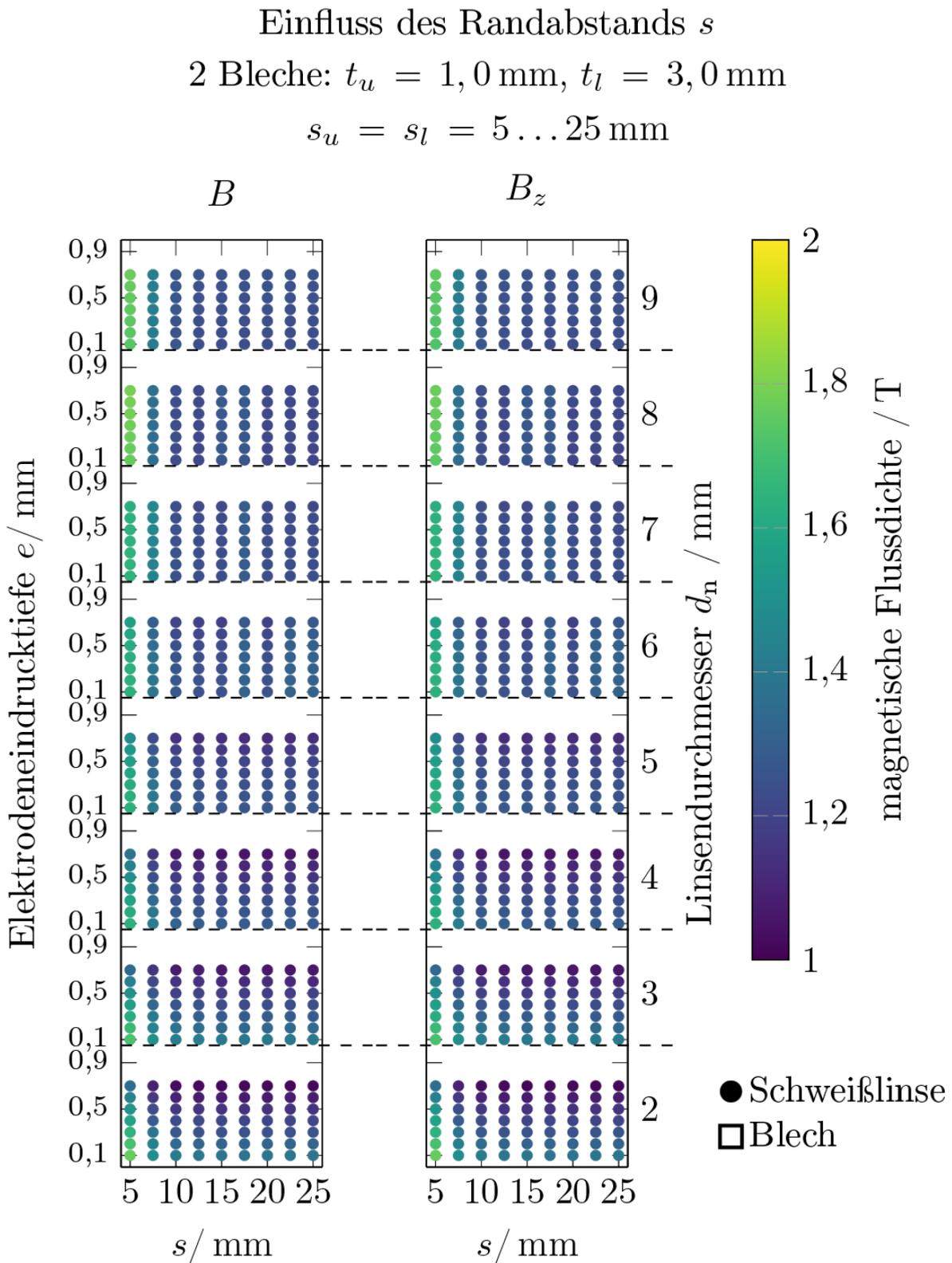


Abbildung 140: Einfluss des Randabstands bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

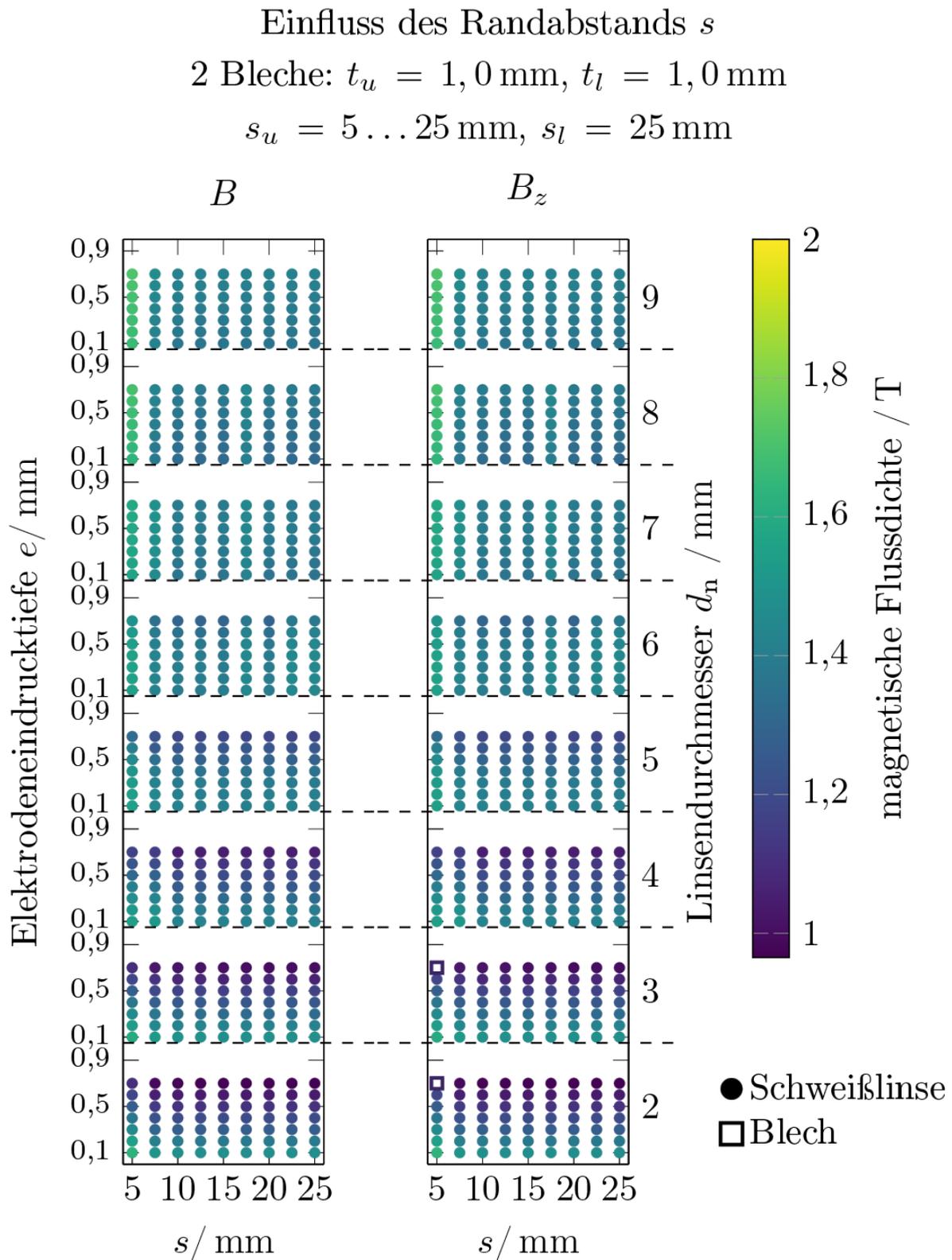


Abbildung 141: Einfluss des Randabstands des oberen Bleches bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

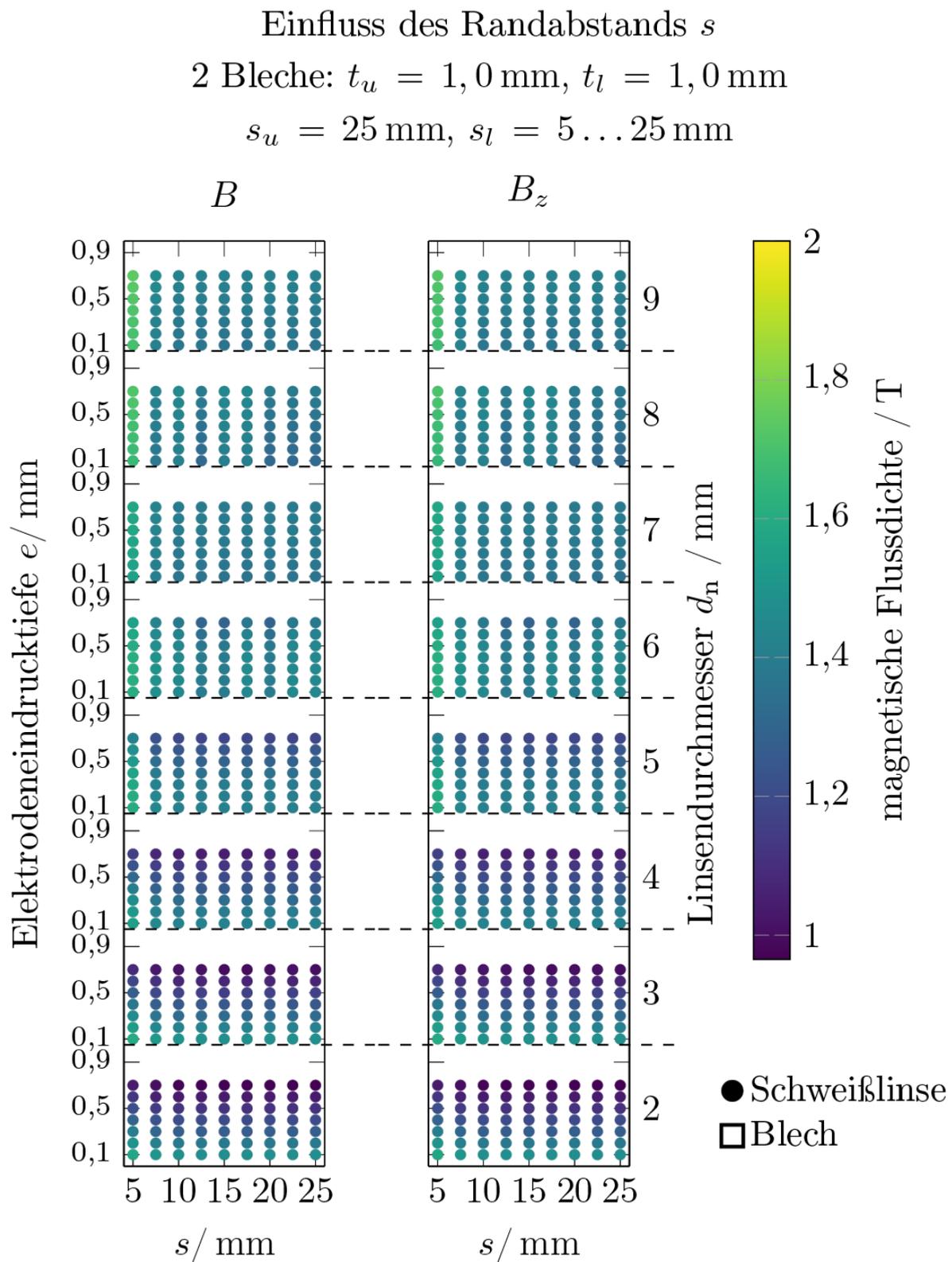


Abbildung 142: Einfluss des Randabstands des unteren Bleches bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

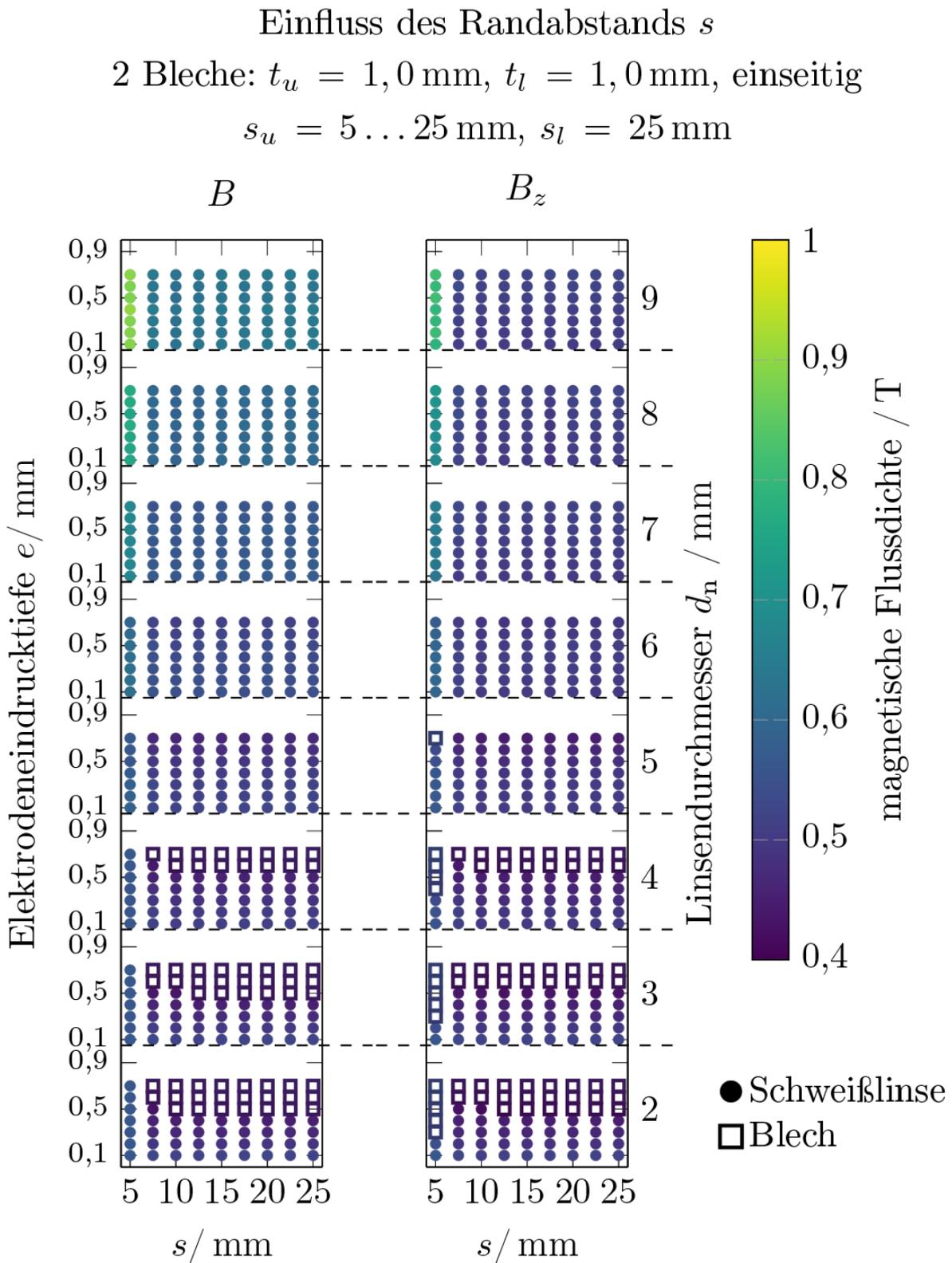


Abbildung 143: Einfluss des Randabstands des oberen Bleches bei zwei Blechen und einseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm

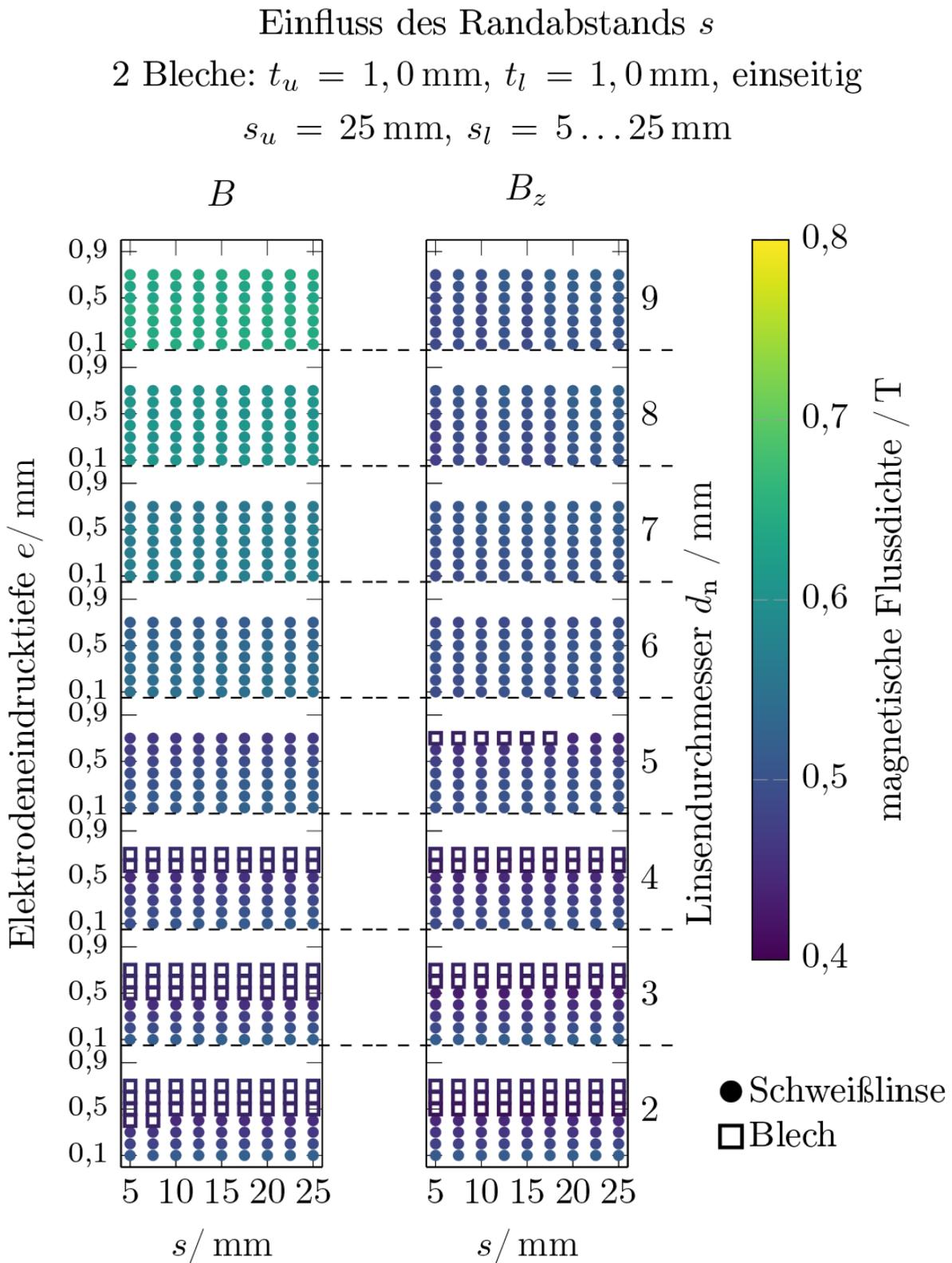


Abbildung 144: Einfluss des Randabstands des unteren Bleches bei zwei Blechen und beidseitiger Magnetisierung: 1,0 mm – 1,0 mm