

# Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren***

der Forschungsstelle(n)

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

Das IGF-Vorhaben 17539 BR der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dresden, 20.03.2015

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung</b>	<b>3</b>
<b>3 Stand der Technik und Forschung</b>	<b>5</b>
3.1 Stand der Technik zur zerstörungsfreien Bewertung des Linsendurchmessers . . . . .	5
3.1.1 Prüfen während des Schweißens . . . . .	5
3.1.2 Prüfen nach dem Schweißen . . . . .	7
3.2 Stand der Forschung zur zerstörungsfreien Bewertung des Linsendurchmessers . . . . .	8
<b>4 Methodischer Ansatz und Zielsetzung</b>	<b>10</b>
<b>5 Versuchsplanung</b>	<b>13</b>
<b>6 Numerische Vorbetrachtungen</b>	<b>17</b>
6.1 Magnetisieren während des Schweißens . . . . .	17
6.1.1 Modellbeschreibung . . . . .	17
6.1.2 Validierung der Simulationsmodelle . . . . .	21
6.2 Magnetisieren nach dem Schweißen . . . . .	24
6.2.1 Modellbeschreibung . . . . .	24

---

6.2.2	Validierung der Simulationsmodelle . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Versuchsstände</b>	<b>29</b>
7.1	Magnetisieren während des Schweißens . . . . .	29
7.2	Magnetisieren nach dem Schweißen . . . . .	29
7.3	Messvorrichtungen . . . . .	30
7.4	Darstellung der Messergebnisse . . . . .	33
<b>8</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen des Magnetisierens während des Schweißens</b>	<b>35</b>
8.1	Ergebnisse . . . . .	35
8.1.1	Einfluss des Nebenschlusses . . . . .	36
8.1.2	Einfluss der Magnetisierungszeit . . . . .	36
8.1.3	Einfluss der Magnetisierungsstärke . . . . .	39
8.2	Zusammenfassung . . . . .	42
<b>9</b>	<b>Untersuchungen des Magnetisierens nach dem Schweißen</b>	<b>44</b>
9.1	Modellbeschreibung für die Auswertung . . . . .	44
9.2	Ergebnisse . . . . .	46
9.2.1	Einfluss des Elektrodeneindrucks . . . . .	46
9.2.2	Nachträgliches Magnetisieren von Zweiblechverbindungen . .	49
9.2.3	Nachträgliches Magnetisieren von Dreiblechverbindungen . .	57
9.3	Zusammenfassung . . . . .	59
<b>10</b>	<b>Evaluierungsmessungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>61</b>
10.1	Visualisierung von Magnetfeldern . . . . .	61
10.2	Evaluierungsmessung . . . . .	63
10.2.1	Prüfsysteme für die Evaluierungsmessungen . . . . .	63
10.2.2	Vergleich der Systeme . . . . .	64
10.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	70
<b>11</b>	<b>Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung</b>	<b>71</b>
<b>12</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)</b>	<b>72</b>
12.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse . . . . .	72
12.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit . . . . .	72

---

<b>13 Verwendung der Zuwendung und Erläuterungen zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b>	<b>74</b>
13.1 Erläuterungen zum Personaleinsatz . . . . .	74
13.2 Erläuterungen zur Geräteanschaffung . . . . .	75
13.3 Erläuterungen zu Leistungen Dritter . . . . .	75
<b>14 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen</b>	<b>76</b>
14.1 Transferkonzept der Forschungsergebnisse . . . . .	76
14.2 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts . . . . .	79
<b>15 Projektbegleitender Ausschuss</b>	<b>81</b>
15.1 Zusammensetzung des PA . . . . .	82
15.2 Kommentare des PA zu den Ergebnissen des Forschungsvorhabens .	82
<b>A Versuchsergebnisse</b>	<b>84</b>
A.1 Magnetisieren während des Schweißens . . . . .	84
A.1.1 Einfluss der Magnetisierungszeit . . . . .	84
A.1.2 Einfluss des Elektrodeneindrucks . . . . .	92
<b>B Ultraschallmodul 4.0 (USM 4.0)</b>	<b>94</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>

# Abbildungsverzeichnis

4.1	Prozessablauf beim Magnetisieren während des Schweißens . . . . .	11
4.2	Prozessablauf beim Magnetisieren nach dem Schweißen . . . . .	11
5.1	Konzept für die Versuchsdurchführung . . . . .	14
6.1	Vorgehensweise für die Optimierung der Simulationsmodelle . . . . .	17
6.2	Elementtyp <i>PLANE53</i> für die numerischen Berechnungen [1] . . . . .	18
6.3	Geometrien der FE-Modelle zum Magnetisieren während des Schweißens (1: Magnetisierungsspulen, 2: Elektrodenkappen und Schaft, 3: Bleche mit Schweißlinse(n)) . . . . .	19
6.4	Gegenüberstellung von ein- und beidseitiger Magnetisierung . . . . .	20
6.5	Gegenüberstellung von gegen- und gleichsinnig stromdurchflossenen Spulen . . . . .	21
6.6	Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Versuche	22
6.7	Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Versuche	24
6.8	Temperaturabhängige Magnetisierungskurven aller untersuchten Werkstoffe bis zu einer Temperatur von 500°C [37] . . . . .	25
6.9	Geometrien der FE-Modelle zum Magnetisieren nach dem Schweißen	26
6.10	Gegenüberstellung der Simulationen von Kunststoff- und Eisenkern, sowie Zwei- und Dreiblechverbindungen für das nachträgliche Magnetisieren von Schweißpunkten . . . . .	27
6.11	Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Versuche	28
7.1	Schematischer Aufbau zum Magnetisieren während des Schweißens .	30
7.2	Vorrichtung MagNaS zum Magnetisieren nach dem Schweißen und Programmoberfläche zur Steuerung und Datenerfassung des Prozesses	31
7.3	Messvorrichtung <i>RMV01</i> zur Messung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche . . . . .	31
7.4	Messvorrichtung <i>RMV02</i> zur flächigen Messung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche . . . . .	32

---

7.5	Messprogramm zur Steuerung und Datenerfassung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche . . . . .	33
7.6	Programmoberfläche zum Auswerten der flächigen Remanenzmessung	34
8.1	Prozessablauf beim Magnetisieren während des Schweißens . . . . .	36
8.2	Gemessene Remanenzflussdichte unter dem Einfluss des Nebenschlussstroms . . . . .	37
8.3	Profilschnitt der Intensitätsplots der magnetischen Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit . . . . .	38
8.4	Intensitätsplots der magnetischen Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit . . . . .	39
8.5	Optimierung der Magnetisierungsspulen . . . . .	40
8.6	Vergleich der Magnetfeldmessungen zwischen kleinstem und größtem Schweißpunkt der Versuchsreihe ER66 . . . . .	41
8.7	Gegenüberstellung zwischen dem Oberflächenprofil und dem Profilschnitt der Remanenzmessung . . . . .	42
8.8	Zusammenhänge zwischen dem Elektrodeneindruck $e$ , dem Linsendurchmesser $d_1$ , der Bruchfläche der Schweißproben $A_{sp}$ , der Fläche der Innenkontur der Magnetfeldmessung $A_{mag}$ und dem Durchmesser der Magnetfeldmessung $d_{mag}$ . . . . .	43
9.1	Vergleich zwischen zerstörungsfreier Remanenzmessung und zerstörend geprüfem Schweißpunkt . . . . .	45
9.2	Gemessene Remanenzflussdichten $B_r$ an der Blechoberfläche der einzelnen Versuchswerkstoffe . . . . .	46
9.3	Ergebnisse zum Einfluss des Elektrodeneindrucks für das Magnetisieren nach dem Schweißen . . . . .	48
9.4	ERN88: Vergleich zwischen zerstörter Probe und gemessenem Remanenzfeld . . . . .	49
9.5	ERN88: Vergleich zwischen Ober- und Unterseite der Remanenzmessung (EK) . . . . .	50
9.6	ERN88: Detektion von Haftschweißungen . . . . .	50
9.7	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN88 . . . . .	51
9.8	Ergebnisvergleich zwischen den unterschiedlichen Farbskalen . . . . .	52
9.9	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN66 . . . . .	52
9.10	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN12 . . . . .	53

---

9.11	Gegenüberstellung zwischen Haftschweißung und Messdaten der Remanenzmessung (MDK55-P5) . . . . .	54
9.12	Berechnung der Beträge der partiellen Ableitungen in $x$ - und $y$ -Richtung aus den Messdaten der flächigen Remanenzmessung . . . .	55
9.13	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN55 . . . .	55
9.14	Vergleich der flächigen Remanenzmessung von Ober- mit Unterseite der MDK13 . . . . .	56
9.15	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN13 . . . .	56
9.16	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN777 . . . .	57
9.17	Vergleich der flächigen Remanenzmessung von Ober- mit Unterseite der MDK154 . . . . .	58
9.18	Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für ERN154 . . . .	58
9.19	Ergebnisse der Flächengegenüberstellung aller untersuchten MDK .	60
10.1	Zur Verfügung gestellte Magnetfeldkamera der Firma <i>MagCam NV</i>	62
10.2	Vergleich der Messergebnisse zwischen <i>RMV02</i> und Magnetfeldkamera . . . . .	62
10.3	Messgerät und Messergebnis mit magnetooptischen Sensoren . . . .	63
10.4	Anzeigen der Prüfsysteme für die Evaluierungsmessungen . . . . .	64
10.5	Versuchsstand der Professur für Fügetechnik und Montage mit Punktschweißroboter und integriertem USM 4.0 . . . . .	65
10.6	Vergleich der Prüfsysteme für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) beim Widerstandspunktschweißen durch Evaluierungsmessungen . .	68
10.7	Vergleich der Prüfsysteme für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen durch Evaluierungsmessungen für jede einzelne MDK . . . . .	69
A.1	ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.1) . . . . .	85
A.2	ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.2) . . . . .	86
A.3	ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.3) . . . . .	87
A.4	ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.4) . . . . .	88
A.5	ER88: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.1) . . . . .	89

---

A.6	ER88: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.2) . . . . .	90
A.7	ER88: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.3) . . . . .	91
A.8	ER66: Einfluss des Elektrodeneindrucks: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variablem Schweißstrom . . . . .	93
B.1	Einteilung der Durchlässigkeits- bzw. Transmissionskurve (TM-Kurve) in die einzelnen Prozessabschnitte . . . . .	96

# Tabellenverzeichnis

5.1	Untersuchte Einflussgrößen . . . . .	14
5.2	Zuordnung der Materialnummern zu den Versuchswerkstoffen . . . . .	15
5.3	Materialdickenkombinationen für die Verfahrensvergleiche . . . . .	15
5.4	Materialdickenkombinationen für die Modellvalidierungen . . . . .	15
5.5	Gesamte Versuchsmatrix . . . . .	16
6.1	Parameter für die numerische Berechnung der Magnetisierung während des Schweißens für das erste Simulationsmodell . . . . .	19
8.1	Parameter der Magnetisierungsspulen mit 133 Windungen . . . . .	40
9.1	Ergebnisse zum Einfluss des Elektrodeneindrucks für das Magnetisieren nach dem Schweißen . . . . .	47
10.1	Kontingenztafel für den Vergleich der Systeme . . . . .	65
10.2	Prüfgrößen nach <i>McNemar</i> für den Vergleich der Systeme . . . . .	66
10.3	Vergleich der Systeme mit unterschiedlichen Kriterien für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung . . . . .	70
15.1	Unternehmen des PA . . . . .	82
A.1	Versuchsparameter für die Untersuchung der Magnetisierungszeit $t_{\text{mag}}$ der Versuchsreihe ER66 . . . . .	84
A.2	Versuchsparameter für die Untersuchung der Magnetisierungszeit $t_{\text{mag}}$ der Versuchsreihe ER88 . . . . .	88
A.3	Versuchsparameter für die Untersuchung des Elektrodeneindrucks $e$ der Versuchsreihe ER66 . . . . .	92

# Abkürzungsverzeichnis

## Materialdickenkombinationen (MDK)

MDK12	DC04+ZE75/75	$t=0,65$ mm
	HX220YD+Z110MB	$t=0,65$ mm
MDK13	DC04+ZE75/75	$t=0,65$ mm
	HDT780C+Z150MB	$t=2,0$ mm
MDK154	DC04+ZE75/75	$t=0,65$ mm
	22MnB5+AS150	$t=2,0$ mm
	22MnB5+AS150	$t=1,5$ mm
MDK55	22MnB5+AS150	$t=2,0$ mm
	22MnB5+AS150	$t=2,0$ mm
MDK66	HX340LAD+Z100MB	$t=2,0$ mm
	HX340LAD+Z100MB	$t=2,0$ mm
MDK777	HX340LAD+Z100MB	$t=1,5$ mm
	HX340LAD+Z100MB	$t=1,5$ mm
	HX340LAD+Z100MB	$t=1,5$ mm
MDK88	HX340LAD+Z110MB	$t=1,0$ mm
	HX340LAD+Z110MB	$t=1,0$ mm

## Abkürzungen

<b>MDK</b>	Materialdickenkombination
<b>EK</b>	Stahlkern, Eisenkern
<b>OS</b>	Oberseite

<b>US</b>	Ultraschall, Unterseite
<b>USM</b>	Ultraschallmodul
<b>KK</b>	Kunststoffkern
<b>TM-Kurve</b>	Durchlässigkeits- bzw. Transmissionskurve
<b>ZfP</b>	zerstörungsfreie Prüfung

## Formelzeichen

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$a, b$	Ellipsenhalbachsen	mm
$A_{\text{mag}}$	Fläche der Innenkontur der Magnetfeldmessung	mm <sup>2</sup>
$A_{\text{sp}}$	Bruchfläche der Schweißproben	mm <sup>2</sup>
$B$	magnetische Flussdichte	T
$B_r$	Remanenzflussdichte	T
$D$	Durchlässigkeits- bzw. Transmissionsgrad	%
$d_l$	Schweißlinsendurchmesser	mm
$d_{\text{mag}}$	Durchmesser der Magnetfeldmessung	mm
$d_{\text{sp}}$	Spulendrahtdurchmesser	mm
$e$	Elektrodeneindruck	mm
$f$	Freiheitsgrad	
$F_{\text{EL}}$	Elektrodenkraft	kN
$J$	magnetische Polarisation	T
$M$	Magnetisierung	A/m
$N$	Spulenwindungen	
$n$	Entmagnetisierungsfaktor	
$H_{\text{mag}}$	Magnetisierungsfeldstärke	A/m
$H_{\text{int}}$	internes Magnetfeld	A/m
$I_{\text{mag}}$	Magnetisierungsstrom	A
$I_w$	Schweißstrom	kA
$T_c$	Curie-Temperatur	°C
$t$	Zeit	s

---

Zeichen	Bezeichnung	Einheit
$t_{\text{mag}}$	Magnetisierungszeit	ms
$t_{\text{mag.o}}$	Magnetisierungszeitpunkt (-offset)	ms
$t_{\text{n}}$	Nachhaltezeit	ms
$t_{\text{v}}$	Vorhaltezeit	ms
$t_{\text{w}}$	Schweißzeit	ms
$s$	Länge, Abstand zwischen Blechoberfläche und Magnetisierungsspule	mm
$\kappa$	Korrekturwert für die Modellannahme	mm, mm <sup>2</sup>
$\mu$	Permeabilität	VsA <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	= $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A <sup>2</sup>
$\mu_r$	relative Permeabilität	
$\Theta$	Konfidenzintervall	%

# 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“ (IGF-Nr. 17.539 BR, DVS-Nr. 04.058) wurde eine bisher nicht industriell genutzte Methode zur zerstörungsfreien Bewertung von Widerstandspunktschweißungen untersucht. Sie beruht darauf, die Fügestelle durch Magnetisierungsspulen zu magnetisieren und das eingeprägte Magnetfeld (Remanenz) anschließend flächig zu vermessen. Die Magnetisierung kann während des Schweißens oder später erfolgen. Gute Ergebnisse konnten durch Magnetisieren der Fügestelle nach dem Schweißen erzielt werden. Zur Validierung der Messergebnisse wird die Fläche des zerstörten Schweißpunktes der Konturinnenfläche der Remanenzmessung gegenübergestellt. Die Untersuchungen an Materialdickenkombinationen, die typischerweise im Automobilbau eingesetzt werden, zeigen gute Korrelationen zwischen den verglichenen Flächen. Dies gilt sowohl für Zweiblech- als auch für Dreiblechverbindungen. Bei Dreiblechverbindungen wird jeweils an der Oberfläche der entsprechenden Schnittebene gemessen. Somit können beide Anbindungsflächen separat bewertet werden.

Durch den Vergleich mit Ergebnissen der zerstörenden Prüfung und Evaluierungsmessungen mit etablierten Systemen für die zerstörungsfreie Prüfung wurde die hohe Qualität der Ergebnisse des Forschungsvorhabens nachgewiesen.

Weiterhin wurde im Rahmen des Vorhabens durch den konsequenten und iterativen Einsatz numerischer Simulationen und experimenteller Versuche ein Versuchsstand zur automatischen Bewertung des Linsendurchmessers entwickelt. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bestätigen das hohe Potential, das der Ansatz der zerstörungsfreien Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen durch magnetische Methoden aufweist.

Ausblickend zeigen die Ergebnisse und das hohe Potential der im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten zerstörungsfreien Prüfmethode mit magnetischen Verfahren nach dem Schweißen, dass weiterer Forschungsbedarf besteht. Dies wird auch durch den Projektbegleitenden Ausschuss bestätigt. Es bleiben offene

---

Fragen bezüglich der Eignung der Prüfmethode an dreischnittigen Punktschweißverbindungen und weiteren Werkstoffen, wie z. B. austenitische Stahllegierungen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass werkstoffabhängige Kenngrößen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht erforscht werden konnten, eine Steigerung der Prüfgenaugigkeit durch die Verbesserung des Prüfmodells erbringen können. Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Untersuchung von Einflussgrößen, wie z. B. der Oberflächentopographie, um diese besser aus dem Prüfergebnis herauszufiltern.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

## 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Das Widerstandspunktschweißen gehört insbesondere im Kraft- und Schienenfahrzeugbau, dem Metallbau und der Gerätetechnik zu den am häufigsten genutzten Fügeverfahren. Es zeichnet sich durch eine hohe Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit aus.

Prozessbedingt entsteht die Fügeverbindung bzw. Schweißlinse innerhalb des Überlappungsbereichs der miteinander zu verschweißenden Bleche. Für die zerstörungsfreie Qualitätssicherung ist die verdeckte Lage der Fügeverbindung problematisch. Erschwert wird dies durch den zunehmenden Einsatz unterschiedlicher Materialdickenkombinationen (MDK) und Beschichtungssysteme. Generell wird neben der Festigkeit auch der Punkt- oder Linsendurchmesser der Fügeverbindung als Qualitätskriterium herangezogen. Dieser kann sowohl zerstörend als auch zerstörungsfrei ermittelt werden. Zerstörende Prüfverfahren sind im Hinblick auf Ressourcenschonung, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im geringen Umfang anzuwenden. Bisher gibt es jedoch kein ZfP-Verfahren, das eine sichere Erkennung und Bewertung charakteristischer Eigenschaften der Schweißverbindung, wie den Linsendurchmesser, möglich macht. Daher werden zerstörende Prüfungen (zP) immer zur Validierung der Ergebnisse der ZfP eingesetzt. Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt für den Einsatz der ZfP ist die rechtliche Absicherung für Fertigungsbetriebe. Durch eine 100%-ige ZfP des Linsendurchmessers könnte jede Punktschweißverbindung präzise bewertet werden. Folglich wäre es einem solchen Fertigungsbetrieb möglich, die Anzahl der Punktschweißverbindungen zu minimieren, weil jede Verbindung hoch belastbar wäre [16]. Die Minimierung von Punktschweißverbindungen würde zu geringeren Taktzeiten führen und könnte materialeffizientere Konstruktionen, die Gewicht und somit auch Rohstoffe einsparen, ermöglichen [5]. Aus diesem Grund rücken ZfP-Verfahren immer mehr in den Fokus der Anwender.

Das am weitesten verbreitete ZfP-Verfahren im Bereich des Widerstandspunktschweißens ist die manuelle Ultraschallprüfung nach dem Schweißen. Vergangene und aktuelle Bestrebungen zeigen auch hohes Potential, eine vollautomatisierte Ultraschallprüfung prozessintegriert im In-Line Verfahren während des Schweißens einzusetzen. Allerdings konnte sich diese Methode in der Großserienfertigung bisher nicht durchsetzen. Gründe dafür sind meist äußere Randbedingungen, wie z.B. Einschränkungen in der Zugänglichkeit. ZfP mittels magnetischen Verfahren wurde bisher nur anfänglich untersucht und bietet auf Grund der physikalischen Wirkungsweisen großes Potential Punktschweißverbindungen geometrisch zu charakterisieren.

Im Rahmen dieses Forschungsberichts werden Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Bewertung von Punktschweißverbindungen mittels magnetischer Verfahren untersucht. Die Untersuchungen gliedern sich in Prüfverfahren, die während und nach dem Schweißen eingesetzt werden. Jede Methode wird durch numerische Simulationen und experimentelle Schweißversuche untersucht. Im Kapitel 3 wird der aktuelle Stand von Forschung und Technik erläutert. In Kapitel 4 werden der methodische Ansatz und die Zielsetzung für das Forschungsvorhaben dargelegt. Anschließend erfolgt in Kapitel 5 die Planung der Versuche. In Kapitel 7 werden die numerischen Modelle und die entwickelten Versuchsstände beschrieben. Daran knüpfen in den Kapiteln 8 und 9 die Versuchsdurchführungen und die Diskussionen der Ergebnisse an. Abschließend erfolgt ein Vergleich unterschiedlicher Systeme zur ZfP beim Widerstandspunktschweißen und eine daraus abgeleitete Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 10.

## 3 Stand der Technik und Forschung

Widerstandspunktschweißverbindungen werden sowohl zerstörend als auch zerstörungsfrei geprüft. Zu den zerstörenden Verfahren zählen u. a. die Meißel- und Abrollprüfung, sowie die Scherzugprüfung. Diese sind in [8], [9], [10] und [13] sehr ausführlich erläutert und entsprechen dem aktuellen Stand der Technik, weshalb an dieser Stelle nicht weiter auf die zerstörenden Prüfmethode eingegangen wird. Vorrangig dienen sie der Validierung von Prüfergebnissen der ZfP.

### 3.1 Stand der Technik zur zerstörungsfreien Bewertung des Linsendurchmessers

Die Methoden zur zerstörungsfreien Bewertung von Widerstandspunktschweißverbindungen können in Prüfverfahren während und nach dem Schweißen eingeteilt werden. Prüfverfahren nach dem Schweißen zeichnen Daten des Schweißprozesses zur Qualitätssicherung der Fügeverbindung auf. Sie können unmittelbar in die Prozessregelung eingreifen. Bei Prüfverfahren nach dem Schweißen werden die geschweißten Produkte der Produktionslinie nach dem Schweißen entnommen und meist manuell geprüft. Zur Validierung der Ergebnisse kommt die zP zum Einsatz. Eine unmittelbare Prozessregelung ist nicht möglich.

#### 3.1.1 Prüfen während des Schweißens

Zu den nach aktuellem Stand der Technik am häufigsten eingesetzten Prüfmethode zur zerstörungsfreien Bewertung von Widerstandspunktschweißverbindungen während des Schweißens gehört die Parameterüberwachung bzw. -analyse und die Prozessanalyse mittels Ultraschall (US).

##### Parameteranalyse

Die Parameteranalyse zählt nicht zur ZfP, wird aber beim Widerstandspunktschweißen häufig als Maßnahme zur Qualitätssicherung in Verbindung mit der

vollautomatischen Prozessregelung eingesetzt. Entsprechende Module werden von den Widerstandsschweißgeräteherstellern angeboten. Die Aktualität dieses Themas wird auch in der Literatur [7], [11], [23], [24] u.a. bestätigt. Die Prozessparameter sind jedoch immer Größen, die die Eigenschaften des Gesamtsystems widerspiegeln, und somit nur begrenzt Informationen zum Linsendurchmesser liefern können. Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Prozessparameter nehmen neben den Werkstoffen und den Oberflächen auch Störgrößen aus dem Fertigungsumfeld, wie Bauteilabweichungen, Randabstände sowie Nebenschlüsse und ebenso Störgrößen aus der Schweißanlage. Weil die Prozessrandbedingungen nicht konstant gehalten werden können, ist die Ableitung der Qualität der Punktschweißverbindung aus den Prozessparametern Stromstärke und Spannung als unscharf zu bewerten.

### Ultraschall (US)

Zur Prozessanalyse mittels US werden die Aktoren und Sensoren direkt im Schaft der Punktschweißzange integriert. Sie erfordert einen erhöhten Aufwand der sicheren Kabelführung, was zu Einschränkungen der Zugänglichkeit der Schweißzange führen kann. Unterschieden werden die Systeme nach den US-Wellenarten und dem daraus resultierenden Wirkprinzip.

Das in [2], [32] und [34] vorgestellte System basiert auf dem Transmissionsverfahren mit horizontal polarisierten Transversalwellen. Die Ultraschallwellen breiten sich von der einen Elektrodenseite zur anderen aus und durchlaufen dabei den entstehenden Schweißpunkt. Die US-Pulse erfolgen in kurzen Zeitabständen während des gesamten Schweißprozesses. Transversalwellen werden in Flüssigkeiten oder Gasen sehr stark gedämpft. Während der Schweißzeit  $t_w$  entsteht durch die Widerstandserwärmung flüssiges Material, das später die Schweißlinse bildet. In dieser Zeit sinkt die Intensität der Ultraschallsignale deutlich. Aus den empfangenen Signalen wird eine charakteristische Kurve berechnet, die Aufschluss über den Prozessverlauf und die Qualität der Schweißung gibt. Das System konnte sich in der industriellen Serienproduktion von Automobilen nicht durchsetzen. Als maßgeblicher Grund wird der größere Platzbedarf, der für die Ultraschallsensorik erforderlich ist, genannt. Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus dem zunehmenden Einsatz hochfester Stähle, wie z. B. borlegierte Vergütungsstähle mit einer AlSi-Beschichtung (z. B. 22MnB5+AS150). Die hohe Festigkeit der Bleche verhindert über einen langen Zeitbereich des Schweißprozesses ein hinreichend gutes Einkoppeln der Ultraschallsignale, was das Auswerten deutlich erschwert. [22]

In [31] wird ein System vorgestellt, welches den Schweißprozess im Impuls-Echo- und im Transmissions-Betrieb überwacht. Die Daten werden mittels Fuzzylogik und neuronalen Netztechniken ausgewertet. Das System arbeitet mit einem Einzelschwinger-US-Aktor und -Sensor.

### 3.1.2 Prüfen nach dem Schweißen

#### Keilprüfung

Die Keilprüfung wird zwar zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren gezählt, die Aufweitung der Bereiche zwischen benachbarten Punktschweißverbindungen führt jedoch zu plastischen Verformungen, welche nach EN 1330 für die Deklaration als zerstörungsfrei unzulässig sind. Für hochfeste Stahlbleche ist diese Prüfung grundsätzlich nicht anwendbar.

#### Potentialmessverfahren

Das Potentialmessverfahren ist eine Vierpunktmessung mit gefederten Kontakten, welche den Spannungsabfall über den Querschnitt der Schweißlinse abbildet. Der Einsatz des Verfahrens in der Industrie ist nicht bekannt, was auf die stark streuenden Messwerte zurückzuführen ist [12].

#### Thermographie

Die Thermographie basiert auf der Betrachtung des Wärmeflusses über die punktförmige Verbindung. Der Wärmeeintrag erfolgt auf der der Betrachtungsebene gegenüberliegenden Seite in Form eines Lichtblitzes, eines Laserstrahls, durch Ultraschall oder durch Wirbelstrom [6], [12].

#### Durchstrahlungsprüfung

In konventioneller Form erlaubt die Durchstrahlungsprüfung Unregelmäßigkeiten parallel zur Strahlenrichtung nachzuweisen. Der Nachweis von Bindefehlern und die Bestimmung der Schweißlinsengröße ist kaum möglich [12]. Die exakte Detektion der Schweißlinse wird durch die variierende Durchstrahlungsdicke am Elektrodeneindruck verhindert. Mit der Echtzeitradiographie mittels „Mikrofocus“ ist es möglich, Erstarrungsbilder der Schweißlinse hochauflösend darzustellen. Aus diesen

kann unmittelbar auf den Linsendurchmesser geschlossen werden [12]. Der apparative und zeitliche Aufwand zur Prüfung von Baugruppen ist sehr hoch und die Auflösung sinkt mit steigendem Abstand zwischen Strahlquelle, Bauteil und Detektor, sowie mit steigendem zu durchstrahlendem Materialvolumen. Als produktionsbegleitendes Verfahren hat die radiologische Prüfung wegen des apparativen und zeitlichen Aufwandes keine Bedeutung [12].

### **Ultraschallprüfung**

Die Ultraschallprüfung wird im Merkblatt [12] in Form der Impuls-Echo-Methode nach dem Schweißen aufgeführt. Sie erlaubt durch Auswertung der Laufzeit und der Amplitude eines Ultraschallimpulses Rückschlüsse auf die Kontaktzone. Industriell ist dieses Verfahren am weitesten verbreitet [16], [27], [33], [35]. Allerdings beschränkt sich das in [12] erläuterte Ultraschallprüfverfahren auf einem Prüfkopf mit einem Einzelschwinger als Aktor und Sensor. Als Grundlage für die Auswertung wird ein eingefrorenes *A*-Bild herangezogen, welches nur mit geschultem, erfahrenem und am Anwendungsfall erprobtem Personal eine ausreichend sichere Prüfung ermöglicht [12]. Seit einigen Jahren tendiert die Entwicklung in Richtung Mehrschwingersysteme. Dabei werden die US-Prüfköpfe ähnlich wie in [18] mit mehreren Schwingern ausgestattet. Diese ergeben in zweidimensionaler Anordnung ein Wandlerfeld (US-Array). Aus den Messungen der einzelnen Wandler werden *C*-Bilder erzeugt, die ausgewertet werden. Die vergleichsweise einfache Handhabung und schnelle Einarbeitung des Prüfpersonals an diesen Systemen bietet einen großen Vorteil gegenüber den bereits erwähnten Einzelschwingersystemen.

## **3.2 Stand der Forschung zur zerstörungsfreien Bewertung des Linsendurchmessers**

Von den bekannten ZfP-Verfahren werden aktuell vor allem akustische und magnetische Verfahren intensiv erforscht.

### **Akustische Prüfung**

In [18] wird ein Ultraschallsystem vorgestellt, das sowohl die Impuls-Echo- als auch die Transmissions-Methode nutzt. Neuartig ist der eingesetzte Prüfkopf. Dieser ist in Form eines Arrays aus 52 einzelnen Ultraschallwandlern zusammengesetzt. Dieses Array befindet sich innerhalb der Schweißelektrode und sendet Longitudinal-

wellen. Über das Kühlwasser werden die Schallwellen in die Elektrodenkappe und schließlich in die zu schweißenden Bauteile übertragen. Im Impuls-Echo-Verfahren wirkt dieses Array als Sender und Empfänger. Im Transmissionsverfahren dient ein einzelner Sender als Ultraschallwandler und das Array als Empfänger. Veröffentlichungen über Ergebnisse in der Fertigung sind nicht bekannt.

Gegenwärtig ist an der Technischen Universität Dresden das *Ultraschallmodul (USM) 4.0* im Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen integriert. Es ist mit eigenen Ansteuerungs- und Auswertesystemen ausgestattet, die in [15], [22] entwickelt und ausführlich beschrieben sind. Das System beruht auf dem Bosch Rexroth Ultraschallsystem *PSQ 6000*, das in [34] vorgestellt wird. Das *USM 4.0* nutzt dessen Ultraschallsender und -empfänger. Während des Schweißprozesses wird die Fügestelle mit transversalen Ultraschallwellen, die eine Frequenz um 50 kHz aufweisen, durchschallt. Der Ultraschallsender (Aktormodul) ist an der oberen und der Ultraschallempfänger (Sensormodul) an der unteren Schweißelektrode im Kraftfluss installiert.

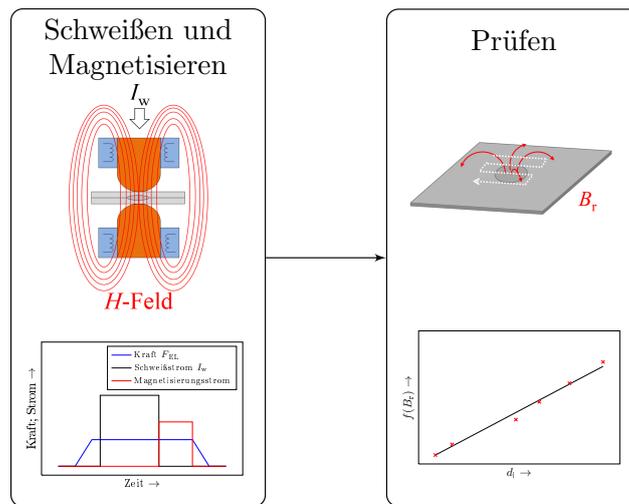
### **Magnetische Prüfung**

Methoden zur Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen durch Magnetfelder werden in [3], [29], [30] beschrieben. In [29], [30] werden die Proben in der Blechebene magnetisiert. Die Magnetisierung erfolgt nach dem Schweißen. [3] zeigt Ergebnisse, bei denen die Schweißpunktproben noch im Schweißprozess direkt nach dem Abschalten des Schweißstroms senkrecht zur Blechebene magnetisiert werden. Bei allen Verfahrensvarianten erfolgt die Messung der magnetischen Streufelder mittels Magnetfeldsensoren nach dem Schweißprozess.

## 4 Methodischer Ansatz und Zielsetzung

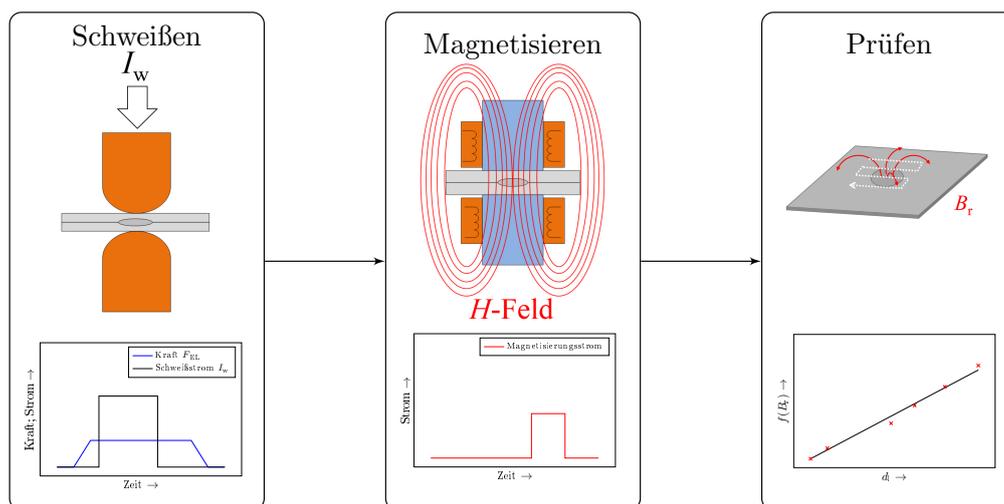
Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“ (IGF-Nr. 17.539 BR, DVS-Nr. 04.058) wurde eine neuartige Methode zur zerstörungsfreien Bewertung von Widerstandspunktschweißungen untersucht. Dazu wird die Fügestelle durch Magnetisierungsspulen aufmagnetisiert und das eingeprägte Magnetfeld (Remanenz) anschließend flächig vermessen. Die Magnetisierung kann während des Schweißens oder später erfolgen.

Bei der Magnetisierung während des Schweißens werden Magnetisierungsspulen direkt oder unmittelbar in der Nähe der Elektrodenkappen befestigt. Diese Verfahrensvariante basiert auf dem in [3] beschriebenen Ansatz. Dabei wird die Fügestelle in der Nachhaltezeit durch ein elektromagnetisches Feld ( $H$ -Feld), welches durch die Magnetisierungsspulen erzeugt wird, magnetisiert. Die Magnetisierung kann ein- und beidseitig erfolgen. Während der Nachhaltezeit kühlt das Material im Bereich der Fügestelle ab und durchläuft dabei die Curie-Temperatur  $T_c$ , die bei Stahl  $768^\circ\text{C}$  beträgt. Die Abkühlung ist orts- und zeitabhängig. Oberhalb von  $T_c$  verhält sich Stahl paramagnetisch und kann nicht magnetisiert werden. Unterhalb von  $T_c$  weist Stahl ferromagnetische Eigenschaften auf. Bei ferromagnetischen Materialien bleibt nach dem Entfernen des äußeren  $H$ -Feldes die Remanenzflussdichte  $B_r$  im Material erhalten. Je größer die Schweißlinse ist, desto mehr Material befindet sich während der Magnetisierungszeit über  $T_c$ . Folglich wird weniger Material magnetisiert und die gemessene Remanenzflussdichte  $B_r$  ist geringer als bei kleineren Linsendurchmessern bzw. Haftschweißungen. Abbildung 4.1 zeigt den Prozessablauf schematisch.



**Abbildung 4.1:** Prozessablauf beim Magnetisieren während des Schweißens

Eine weitere Möglichkeit zur ZfP von Widerstandspunktschweißverbindungen durch magnetische Verfahren beruht auf der Magnetisierung nach dem Schweißen (Abbildung 4.2). Dabei kann die Probe sowohl ein- als auch beidseitig magnetisiert werden. Anschließend erfolgt die Vermessung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche. Die Bewertung der Linsendurchmesser erfolgt durch die unterschiedliche Magnetisierung der Bleche infolge der jeweiligen Ausprägungen der Schweißverbindungen.



**Abbildung 4.2:** Prozessablauf beim Magnetisieren nach dem Schweißen

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Eignung mindestens eines der vorausgewählten ZfP-Verfahren für den Einsatz zur Qualitätssicherung beim Widerstands-

punktschweißen nachzuweisen. Insbesondere werden die Analytik, die Gerätetechnik und die Prüfparametrierung auf Grundlage der physikalischen Wirkungsweise weiterentwickelt. Die Funktion der Prüfverfahren wird an typischen Punktschweißverbindungen nachgewiesen. Die angestrebten Ergebnisse ermöglichen eine sichere manuelle oder automatisierte 100%-ige Prüfung von Punktschweißverbindungen. Dadurch ist es möglich, Prozesszeiten zu minimieren und materialeffizienter zu konstruieren. Das gesamte Produkt wird verbessert und somit neues Potential für die Anwendung des Punktschweißens erschlossen.

## 5 Versuchsplanung

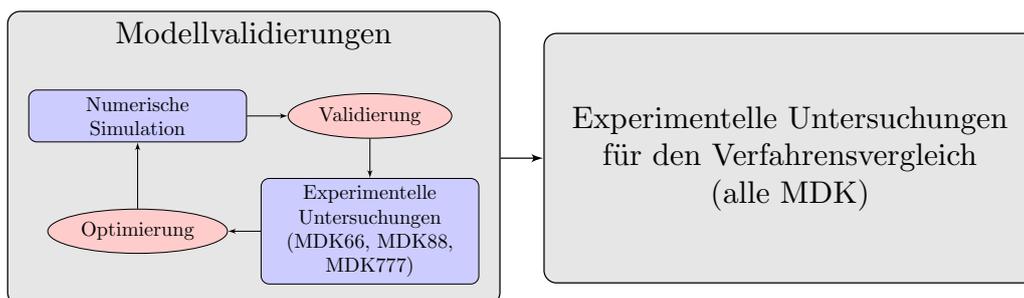
Die numerischen und experimentellen Untersuchungen unterteilen sich grundlegend in die Versuche zur Magnetisierung während des Schweißens und die Versuche zur Magnetisierung nach dem Schweißen. Dabei werden Analysen bezüglich unterschiedlicher Einflussgrößen durchgeführt. Die einzelnen Einflussgrößen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Für beide Verfahrensvarianten ist es wichtig, den Einfluss geometrischer Unstetigkeiten der Blechoberfläche, wie z. B. durch die Elektrodeneindrücke, auf die Messergebnisse zu untersuchen, da die messbare Remanenz mit dem Abstand zwischen der Blechoberfläche und dem Sensor kubisch abnimmt (*Biot-Savart-Gesetz*) [19]. Beim Magnetisieren während des Schweißens können weitere Einflussgrößen, wie der Zeitpunkt, die Dauer und die Stärke der Magnetisierung eine entscheidende Rolle bezüglich des Prüfergebnisses spielen, da diese Verfahrensvariante als zeit- und ortskritisch zu betrachten ist. Weiterhin ist es wichtig, den Einfluss des Nebenschlusses auf die bereits magnetisierten Schweißpunkte zu untersuchen, da ein stromdurchflossener Leiter stets ein sich umgebendes Magnetfeld erzeugt. Dies geschieht an Mehrpunktproben. Da beim Magnetisieren nach dem Schweißen der Zeitpunkt und die Dauer keine Einflüsse auf die Prüfergebnisse haben, werden diese nicht weiter betrachtet. Der Einfluss der Magnetisierungsstärke wird durch den Einsatz von Eisen- und Kunststoffkernen untersucht. Bei beiden Prüfvarianten werden auch die Einflüsse unterschiedlicher Blechdicken und Materialdickenkombinationen (MDK) näher betrachtet.

Die erste Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses am 23.01.2013 fand in der Technischen Universität Dresden (Forschungsstelle) statt. Wesentliche Punkte waren die Festlegung der Versuchswerkstoffe. Seitens der Stahlhersteller konnten nicht alle festgelegten Werkstoffe bereitgestellt werden, sodass Ersatzwerkstoffe ausgewählt wurden. Diese weisen nur sehr geringe Abweichungen auf, die auf den Ablauf des Forschungsvorhabens keine Auswirkungen haben. Die endgültig beschafften Werkstoffe sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Dabei werden den einzelnen Werkstoffen Materialnummern gegeben, die im Folgenden für die Versuchsreihenbezeichnungen verwendet werden. Durch die ausgewählten Versuchswerkstoffe kön-

**Tabelle 5.1:** Untersuchte Einflussgrößen

Einflussgröße	Magnetisieren während des Schweißens	Magnetisieren nach dem Schweißen
Nebenschluss	X	
Magnetisierungsdauer	X	
Magnetisierungszeitpunkt	X	
Magnetisierungsstärke	X	X
Elektrodeneindruck	X	X
Blechdicke(n)	X	X
MDK	X	X

nen Untersuchungen an unterschiedlichen Materialdickenkombination (MDK) und deren Einflüsse durchgeführt werden. Die MDK unterteilen sich dabei in typische Kombinationen des Karosserierohbaus der Automobilindustrie (Tabelle 5.3) und in Kombinationen mit gleichen Werkstoffen für die Modellvalidierungen der numerischen Simulationen (Tabelle 5.4). Die experimentellen Versuche werden stets zuerst mit den MDK nach Tabelle 5.4 durchgeführt, um die Simulationsmodelle zu validieren. Anschließend werden die MDK nach Tabelle 5.3 geschweißt und geprüft. Diese Versuche sind als praxisnah zu betrachten und dienen auch dem Verfahrensvergleich durch Evaluierungsmessungen mit unterschiedlichen Prüfsystemen für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen. Das Konzept für die Versuchsdurchführung ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt.

**Abbildung 5.1:** Konzept für die Versuchsdurchführung

Bezüglich der zu untersuchenden Verfahrensvarianten für die zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers ergibt sich aus den MDK nach den Tabellen 5.3 und 5.4 die Versuchsmatrix nach Tabelle 5.5. Die Abkürzungen (Abk.) stehen wiederum für Versuchsbezeichnungen.

Die Probenmaße für Einzelbleche (E) betragen 50 mm × 50 mm. Mehrpunktproben sind doppelt so groß mit den Kantenlängen 50 mm × 100 mm.

**Tabelle 5.2:** Zuordnung der Materialnummern zu den Versuchswerkstoffen

Material-Nr.	Werkstoffbezeichnung	Blechdicke
1	DC04+ZE75/75	0,65 mm
2	HX220YD+Z110MB	0,65 mm
3	HDT780C+Z150MB	2,0 mm
4	22MnB5+AS150	1,5 mm
5	22MnB5+AS150	2,0 mm
6	HX340LAD+Z100MB	2,0 mm
7	HX340LAD+Z100MB	1,5 mm
8	HX340LAD+Z110MB	1,0 mm

**Tabelle 5.3:** Materialdickenkombinationen für die Verfahrensvergleiche

Blech	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3	Versuchsreihe 4
1	DC04+ZE75/75 $t=0,65$ mm	DC04+ZE75/75 $t=0,65$ mm	DC04+ZE75/75 $t=0,65$ mm	22MnB5+AS150 $t=2,0$ mm
2	HX220YD+Z110MB $t=0,65$ mm	HDT780C+Z150MB $t=2,0$ mm	22MnB5+AS150 $t=2,0$ mm	22MnB5+AS150 $t=2,0$ mm
3			22MnB5+AS150 $t=1,5$ mm	
MDK-Nr.	12	13	154	55

**Tabelle 5.4:** Materialdickenkombinationen für die Modellvalidierungen

Blech	Versuchsreihe 1M	Versuchsreihe 2M	Versuchsreihe 3M
1	HX340LAD+Z110MB $t=1,0$ mm	HX340LAD+Z100MB $t=2,0$ mm	HX340LAD+Z100MB $t=1,5$ mm
2	HX340LAD+Z110MB $t=1,0$ mm	HX340LAD+Z100MB $t=2,0$ mm	HX340LAD+Z100MB $t=1,5$ mm
3			HX340LAD+Z100MB $t=1,5$ mm
MDK-Nr.	88	66	777

**Tabelle 5.5:** Gesamte Versuchsmatrix

Abk.	VR 1	VR 2	VR 3	VR 4	VR 1M	VR 2M	VR 3M
E	E12	E13	E154	E55	E88	E66	E777
M	M12	M13	M154	M55	M88	M66	M777
ER	ER12	ER13	ER154	ER55	ER88	ER66	ER777
MR	MR12	MR13	MR154	MR55	MR88	MR66	MR777
ERN	ERN12	ERN13	ERN154	ERN55	ERN88	ERN66	ERN777
EM	EM12	EM13	EM154	EM55	EM88	EM66	EM777

E: Einzelpunktprobe ohne Magnetisierung

M: Mehrpunktprobe ohne Magnetisierung

ER: Einzelpunktprobe mit Magnetisierung während des Schweißens

MR: Mehrpunktprobe mit Magnetisierung

ERN: Einzelpunktprobe mit nachträglicher Magnetisierung

EM: Evaluierungsmessungen

## 6 Numerische Vorbetrachtungen

Für die numerischen Vorbetrachtungen und Untersuchungen wird das Simulationsprogramm *Ansys Mechanical APDL* genutzt. Das Programm nutzt die Finite-Elemente-Methode (FEM). Nach den FEM-Berechnungen werden die Versuchsstände ausgelegt. Anschließend werden die Ergebnisse aus den Versuchen mit den entsprechenden FE-Modellen verglichen und die Modelle verbessert. Dadurch ist eine fortlaufende Optimierung der Simulationsmodelle auf Basis experimenteller Versuche gegeben. In Abbildung 6.1 ist diese iterative Vorgehensweise schematisch dargestellt.

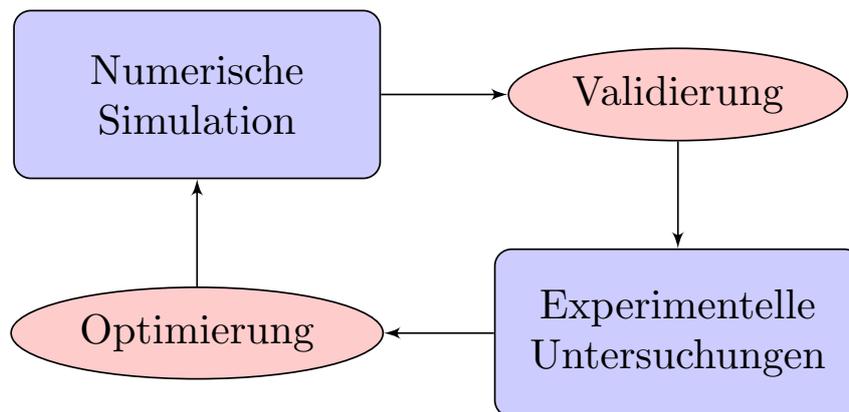
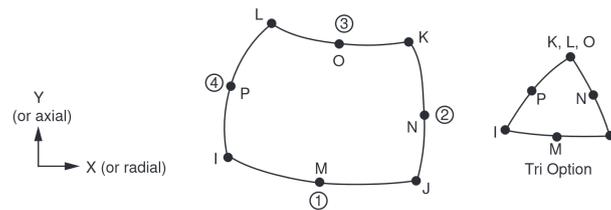


Abbildung 6.1: Vorgehensweise für die Optimierung der Simulationsmodelle

### 6.1 Magnetisieren während des Schweißens

#### 6.1.1 Modellbeschreibung

Für die Magnetisierung während des Schweißens wird ein FE-Modell mit Elektrodenkappen, Elektrodenschäften und Blechen mit Schweißlinse in einem Luftraum modelliert. Als Elementtyp wird *PLANE53* verwendet (Abbildung 6.2). Es handelt sich dabei um ein zweidimensionales Element mit acht Knotenpunkten. Jeder Knotenpunkt besitzt vier Freiheitsgrade (magnetisches Vektorpotential (AZ), elektri-

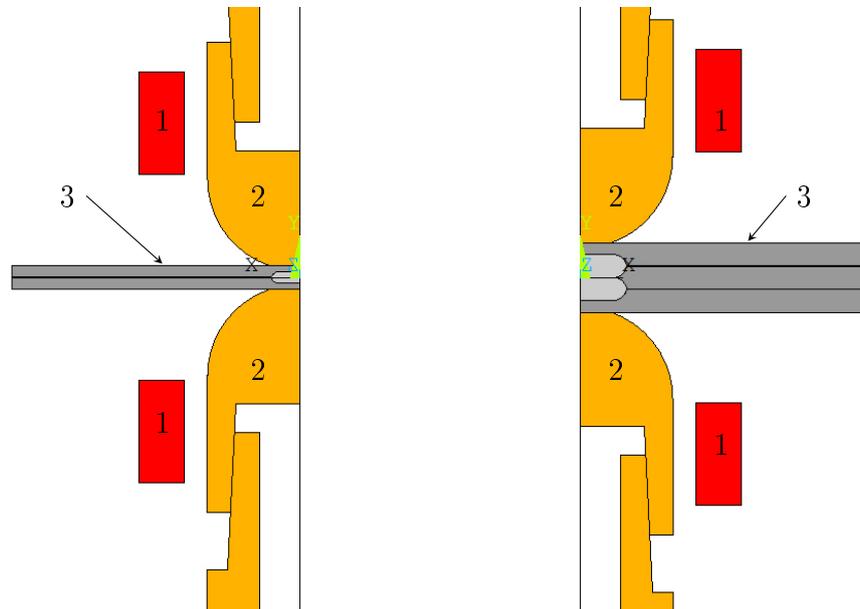


**Abbildung 6.2:** Elementtyp *PLANE53* für die numerischen Berechnungen [1]

ches Potential (VOLT), elektrischer Strom (CURR) und elektromotorische Kraft (EMF)). Die Grundform ist ein Viereck, es kann aber auch als Dreieck verwendet werden, wobei die Knotenpunkte  $K$ ,  $L$ , und  $O$  zu einem Knoten zusammengefasst werden. *PLANE53* ist für die numerische Berechnung von statischen und niederfrequenten Magnetfeldern geeignet. Dem Element können Magnetisierungskurven ( $B$ - $H$ -Kurven) hinterlegt werden. In Abschnitt 6.1.2 sind dazu weitere Erläuterungen zu finden. [1]

Das Modell ist zweidimensional und axialsymmetrisch aufgebaut. Wahlweise kann zwischen zwei und drei Blechen variiert werden. Die jeweiligen Blechdicken sind parametrisiert und können schnell geändert werden. Die Größe der Schweißlinse kann frei eingestellt werden. Die Parameter für die Magnetisierungsspulen werden nach den Erkenntnissen aus [3] und [17] gewählt. Die Spule ist so zu dimensionieren, dass die magnetische Flussdichte den Bereich der magnetischen Sättigung des Werkstoffes erreicht. In [4] wird gezeigt, dass dazu eine magnetische Feldstärke von 5 A/mm unmittelbar an der Oberfläche der Stahlbleche erreicht werden muss. Mit Hilfe der FEM wird ein erstes Simulationsmodell erstellt. Auf Basis dieses Modells erfolgt eine erste Auslegung der Magnetisierungsspulen. Die Parameter sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Den Blechen werden ferromagnetische Eigenschaften zugeordnet. Alle weiteren Geometrien weisen paramagnetische bzw. diamagnetische Eigenschaften auf. Die beiden FE-Modelle für Zwei- bzw. Dreiblechverbindungen sind in Abbildung 6.3 dargestellt.

Das Diagramm in Abbildung 6.4 zeigt die Verteilung der magnetischen Feldstärke unmittelbar an der Blechoberfläche für  $I_{\text{mag}}=10$  A. Es werden die einseitige und die beidseitige Magnetisierung verglichen. Es ist zu erkennen, dass bei beidseitiger Magnetisierung eine höhere magnetische Feldstärke unmittelbar an der Blechoberfläche vorliegt. Die Gegenüberstellung zeigt auch, dass bei der beidseitigen Magnetisierung das  $H$ -Feld um die Schweißprobe gleichmäßiger ausgeprägt und somit eine größere magnetische Durchflutung im Inneren der Probe möglich ist. Die nach [3] geforderten 5 A/mm werden unmittelbar an der Blechoberfläche bis zu einem



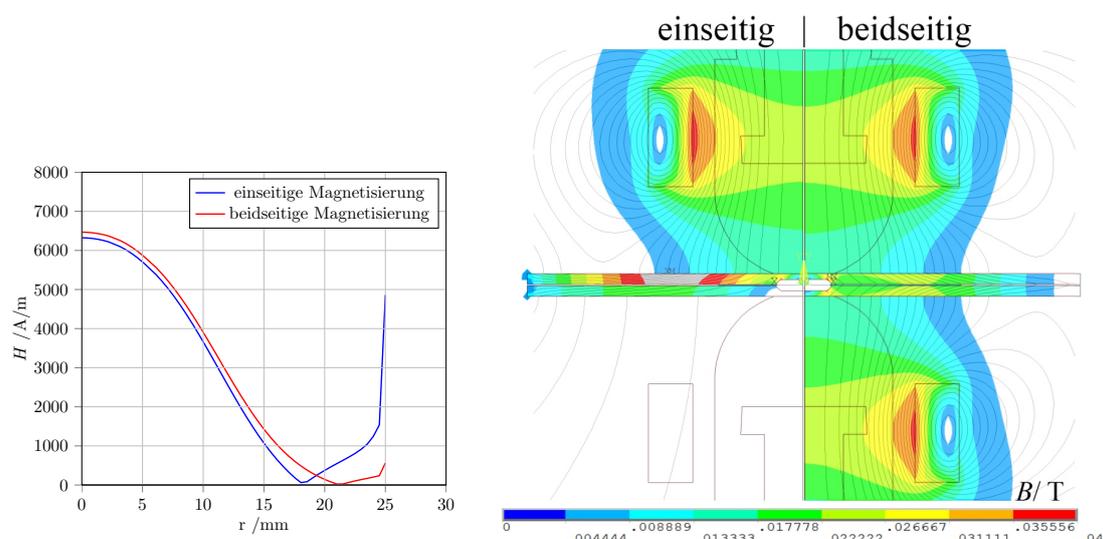
(a) Geometrien des FE-Modells mit zwei Blechen

(b) Geometrien des FE-Modells mit drei Blechen

**Abbildung 6.3:** Geometrien der FE-Modelle zum Magnetisieren während des Schweißens (1: Magnetisierungsspulen, 2: Elektrodenkappen und Schaft, 3: Bleche mit Schweißlinse(n))

**Tabelle 6.1:** Parameter für die numerische Berechnung der Magnetisierung während des Schweißens

Parameter	Symbol	Größe
Magnetisierungsstrom	$I_{\text{mag}}$	variabel
min. Feldstärke an Blechoberfläche	$H_{\text{mag}}$	5 A/mm
Drahtdurchmesser der Spule	$d_{\text{sp}}$	1 mm
Spulenwindungen	$N$	36
Abstand Blechoberfläche Spule	$s$	8 mm
Blechdicke	$t_1, t_2$	1 mm, 1 mm
Linsendurchmesser	$d_l$	5 mm



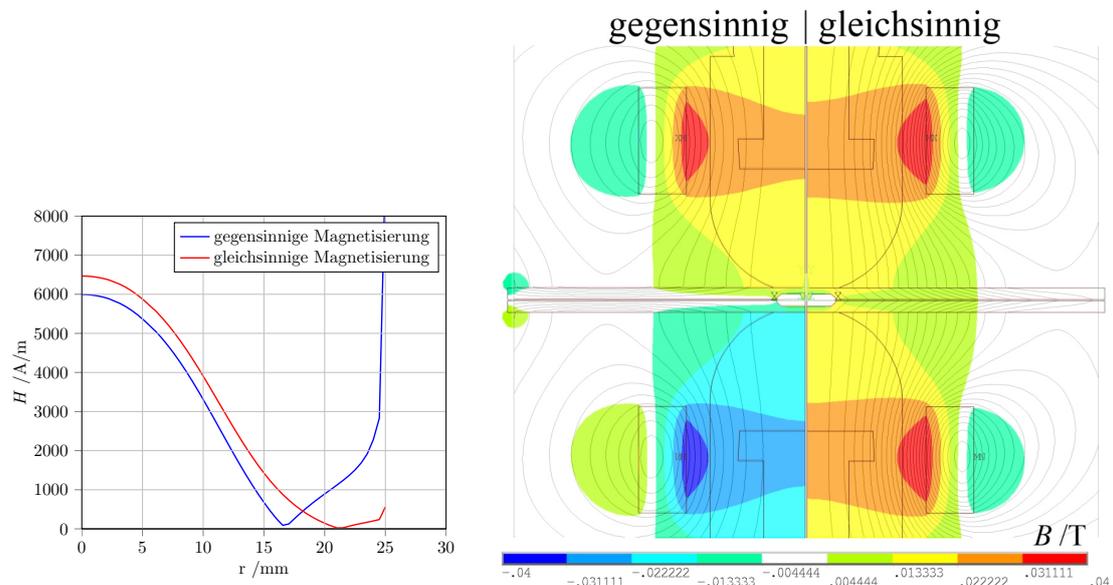
(a) Simulierte magnetische Feldstärke  $H$  unmittelbar über der Blechoberfläche

(b) Vergleich der magnetischen Flussdichte  $B$

**Abbildung 6.4:** Gegenüberstellung von ein- und beidseitiger Magnetisierung ( $N = 36$ ,  $I_{\text{mag}} = 10 \text{ A}$ )

Radius von 7,5 mm erreicht. Dies gilt bei der beidseitigen Magnetisierung sowohl an der Ober- als auch an der Unterseite der Probe. Bei einseitiger Magnetisierung wird die Maßgabe nur auf der Spule zugewandten Seite gewährleistet.

Der Vergleich zwischen gleich- und gegensinnig stromdurchflossenen Spulen ist in Abbildung 6.5 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Maßgabe von 5 A/mm an der Blechoberfläche bei beiden Spulenkonfigurationen beidseitig erreicht wird. Bei gegensinniger Anordnung verringert sich der Bereich jedoch auf einen Radius von 6 mm. Die gleichsinnige Anordnung ähnelt einer Helmholtz-Spule. Die gegensinnige Anordnung kann mit einer Maxwell-Spule verglichen werden. Bei gegensinniger Anordnung hebt sich die magnetische Flussdichte mittig zwischen den Spulen auf. Bei gleicher Blechdicke und einschnittiger Probenanordnung betrifft dies genau die Fügeebene. Dieser Bereich unterliegt daher einer nur sehr geringen Magnetisierung. Die Flusslinien verlaufen innerhalb der Probe größtenteils parallel zur Blechoberfläche. Anders verhält es sich bei der gleichsinnigen Anordnung, bei der die Flusslinien die Probe von einer Seite zur anderen durchlaufen. Die Helmholtz-Spule erzeugt in ihrem Mittelpunkt ein nahezu homogenes Magnetfeld. Die magnetische Flussdichte ist wesentlich stärker im Bereich der Fügeebene. Es ist daher mit einer stärker ausgeprägten Remanenzflussdichte bei der gleichsinnigen Spulenordnung zu rechnen.

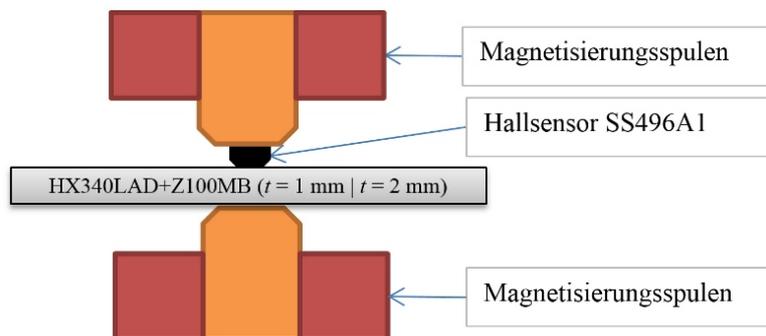


(a) Simulierte magnetische Feldstärke  $H$  unmittelbar über der Blechoberfläche  
 (b) Vergleich der magnetischen Flussdichte  $B$  mit magnetischen Flusslinien

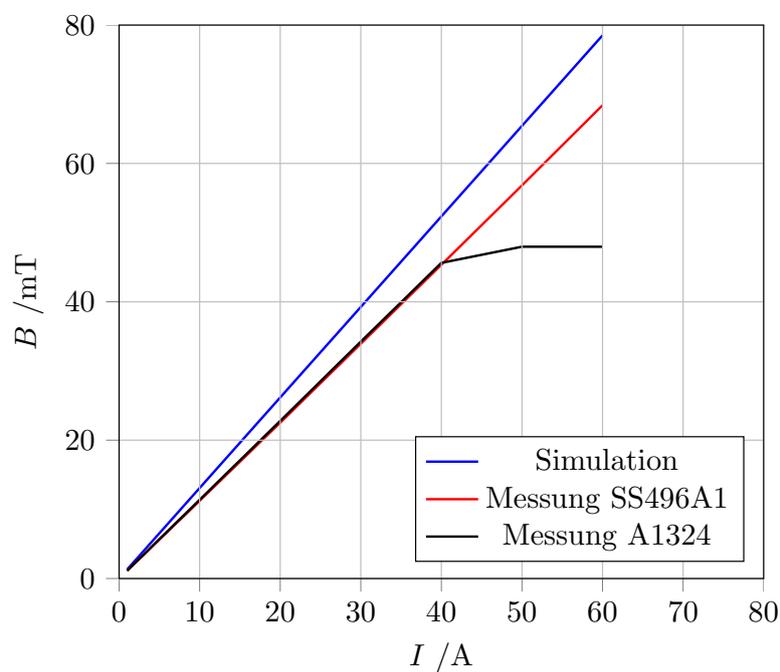
**Abbildung 6.5:** Gegenüberstellung von gegen- und gleichsinnig stromdurchflossenen Spulen ( $N = 36$ ,  $I_{\text{mag}} = 10 \text{ A}$ )

### 6.1.2 Validierung der Simulationsmodelle

Für die Validierung der Simulationsergebnisse werden die Hallsensoren *SS496A1* (Honeywell) und *A1324* (Allegro MicroSystems, Inc.) genutzt. Sie werden zwischen den Elektrodenkappen angeordnet, was in Abbildung 6.6 (a) schematisch dargestellt ist. Die Spulen werden von steigenden Strömen durchflossen. Die Ergebnisse des ersten Simulationsmodells sind in 6.6 (b) zu sehen. Den Blechen wird zunächst  $\mu_r = 1000$  als relative Permeabilität zugewiesen. Die Hallsensoren weisen nahezu gleiche Messergebnisse auf. Bei ca. 45 mT ist das Ende des Messbereichs des Sensors *A1324* erreicht. Die Vergleiche zwischen Simulation und Experimenten weisen systematische Abweichungen auf (Abbildung 6.6). Beide Sensoren betreffend liegen diese bei ca. 15%. Diese Abweichungen können auf Grund von geschätzten und idealisierten Annahmen bei der Simulation, auf Toleranzen bei der Fertigung der Spulen und Abweichungen beim Versuchsaufbau zurückgeführt werden.



(a) Schematischer Versuchsaufbau für die Validierung der Simulationsergebnisse



(b) Vergleich zwischen Simulation und experimentellen Versuchen für das erste Simulationsmodell

**Abbildung 6.6:** Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Versuche ( $N = 36$ )

Im Zuge der Modelloptimierungen werden in Zusammenarbeit mit dem *Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung* in Dresden (*IFW-Dresden*) temperaturabhängige Magnetisierungskurven aller untersuchten Werkstoffe bis zu einer Temperatur von  $500^{\circ}\text{C}$  ermittelt. Somit können Magnetisierungskurven ( $B$ - $H$ -Kurven) den Elementen der ferromagnetischen Baugruppen hinterlegt werden. Im ersten Simulationsmodell wurde ein konstanter Wert für die relative Permeabilität  $\mu_r = 1000$  angenommen. Da dieser Wert bei ferromagnetischen Materialien jedoch keine konstante Größe ist und sich nach Gleichung 6.1 berechnen lässt, ist es wich-

tig diesen Wert in Form der  $B$ - $H$ -Kurven im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Dabei ist  $B$  die magnetische Flussdichte,  $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante,  $H$  die magnetische Feldstärke und  $M$  die Magnetisierung.

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (H + M) \quad (6.1)$$

Die Untersuchungen liefern Werte für das interne Magnetfeld  $H_{\text{int}}$  und die magnetische Polarisation  $J$  der Proben. Die Ergebnisse beinhalten auch das magnetische Feld  $\mu_0 H$ . Die  $B$ - $H$ -Kurven ergeben sich aus den Messungen der temperaturabhängigen Magnetisierungskurven nach den folgenden Gleichungen, wobei  $n$  der Entmagnetisierungsfaktor ist: [19], [25], [36]

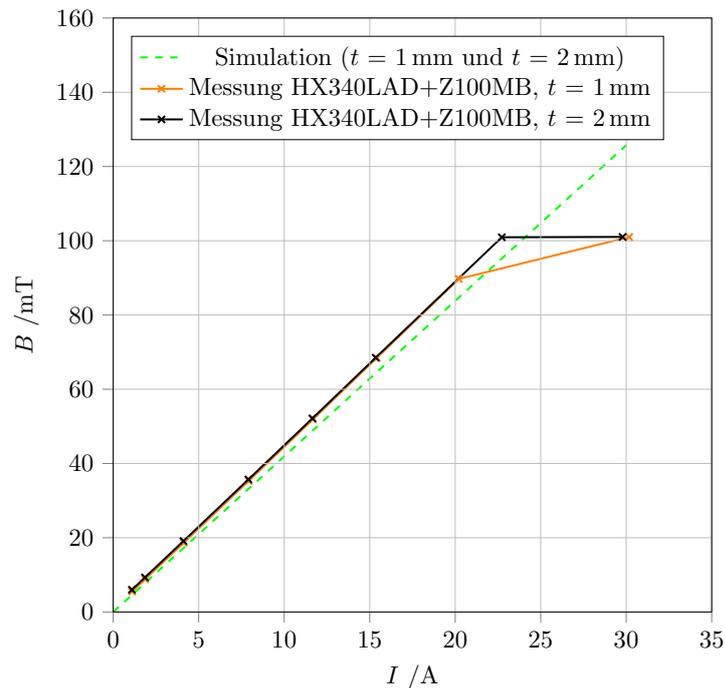
$$J = \mu_0 M \quad (6.2)$$

$$\mu_0 H_{\text{int}} = \mu_0 H - nJ \quad (6.3)$$

Gleichungen 6.2 und 6.3 in Gleichung 6.1 eingesetzt:

$$B = J + \mu_0 H \quad (6.4)$$

Mit dieser Berechnungsgrundlage können die  $B$ - $H$ -Kurven definiert und das zweite Simulationsmodell erstellt werden. Dabei werden die im Zuge der Weiterentwicklung der Versuchsstände optimierten Magnetisierungsspulen mit 133 Windungen aus Abschnitt 8.1.3 in das FE-Modell integriert. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist der gleiche, wie beim ersten Simulationsmodell (Abbildung 6.6 (a)). Die Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Versuche in Abbildung 6.7 zeigt, dass die Berücksichtigung der werkstoffabhängigen  $B$ - $H$ -Kurven eine deutliche Verbesserung des Modells mit sich bringt. Die Abweichung zwischen numerischer Simulationsberechnung und experimentellen Versuchen ist von 15% auf unter 4% gesunken. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Blechdicke keinen Einfluss auf die Messergebnisse für die Validierungsversuche hat.



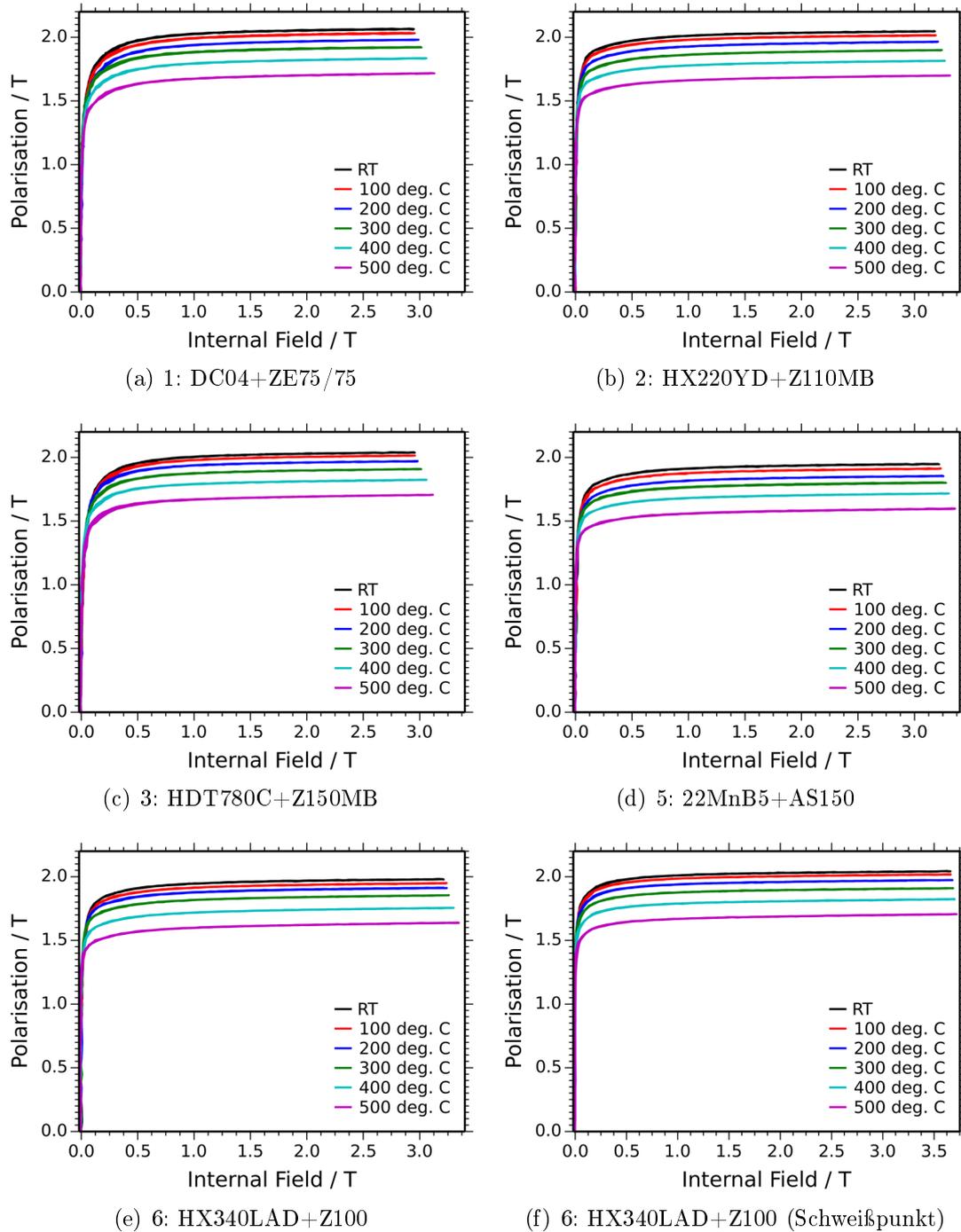
**Abbildung 6.7:** Vergleich zwischen Simulation und experimentellen Versuchen für das zweite Simulationsmodell ( $N = 133$ )

Die Ergebnisse aller temperaturabhängigen Magnetisierungskurven sind in Abbildung 6.8 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass bis zu einer Temperatur von  $500^{\circ}\text{C}$  alle Werkstoffe ähnliche ferromagnetische Eigenschaften besitzen. Die Magnetisierbarkeit und die Sättigungsflussdichte nehmen mit zunehmender Temperatur nur geringfügig ab. Für die Simulationsmodelle kann daher die Annahme getroffen werden, dass allen Elementen der Schweißlinse nicht magnetisierbare Eigenschaften zugewiesen werden. Den Elementen der restlichen Blechstrukturen werden magnetisierbare Eigenschaften zugeordnet.

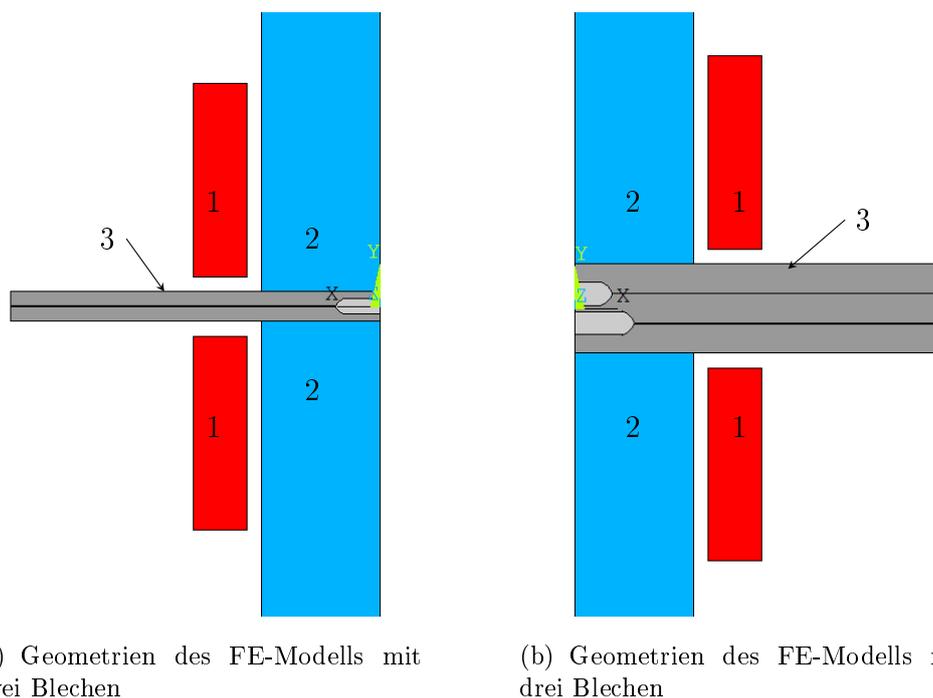
## 6.2 Magnetisieren nach dem Schweißen

### 6.2.1 Modellbeschreibung

Das Simulationsmodell für die nachträgliche Magnetisierung basiert auf dem Modell der Magnetisierung während des Schweißens aus Abschnitt 6.1. Als Elementtyp wird *PLANE53* verwendet. Das Modell ist zweidimensional und axialsymmetrisch aufgebaut. Die Elektrodenkappen werden durch massive Spulenkerns ersetzt. Diesen werden ferro- oder paramagnetische Eigenschaften zugewiesen. Die Simula-



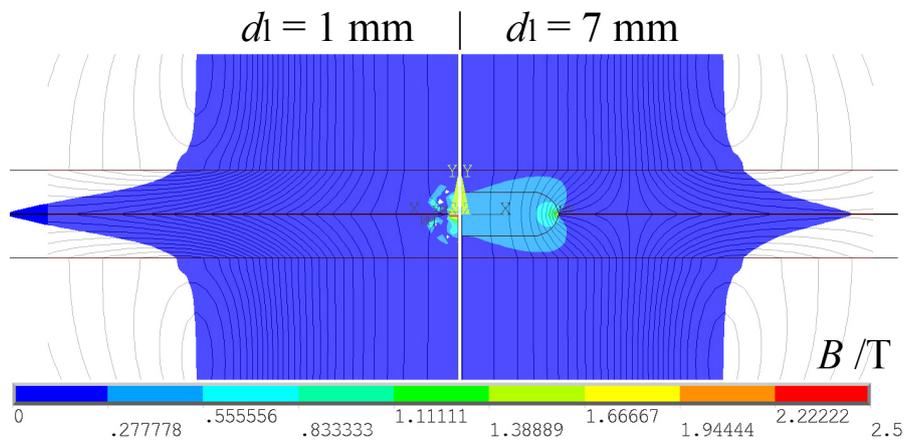
**Abbildung 6.8:** Temperaturabhängige Magnetisierungskurven aller untersuchten Werkstoffe bis zu einer Temperatur von 500°C [37]



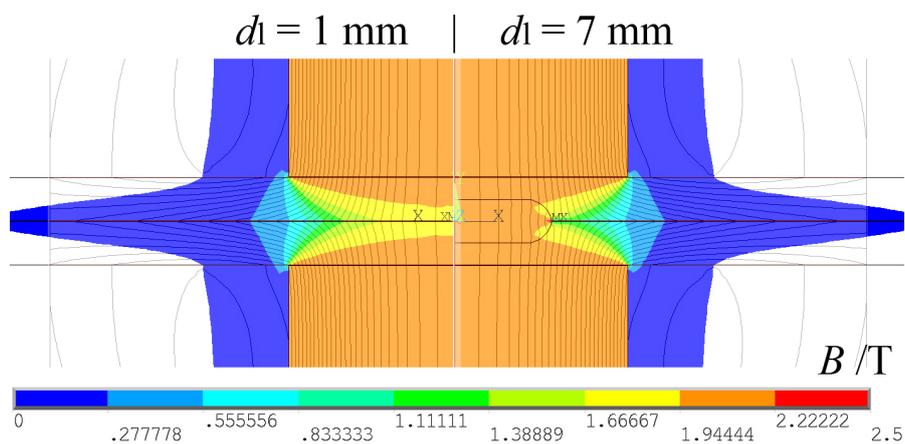
**Abbildung 6.9:** Geometrien der FE-Modelle zum Magnetisieren nach dem Schweißen (1: Magnetisierungsspulen, 2: Spulenkern, 3: Bleche mit Schweißlinse(n))

tionsmodelle sind in Abbildung 6.9 zu sehen. Die Magnetisierungsspulen haben 133 Windungen. Die Parameter entsprechen denen aus Tabelle 8.1. Der Magnetisierungsstrom  $I_{\text{mag}}$ , die einzelnen Blechdicken und Linsengrößen können variabel eingestellt werden.

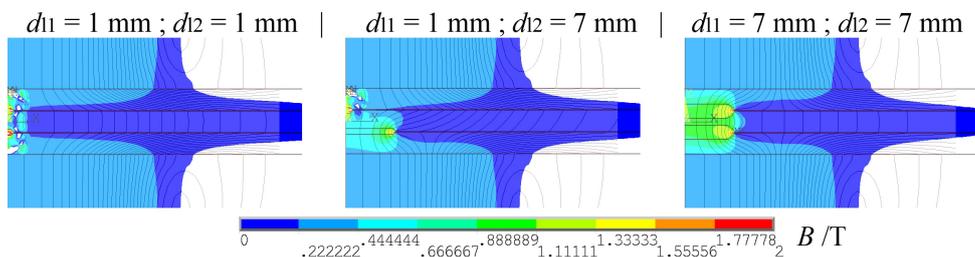
In Abbildung 6.11 sind die Verteilungen der Flussdichte in  $y$ -Richtung mit den magnetischen Flusslinien aus den Simulationen für die nachträgliche Magnetisierung von Schweißproben dargestellt. Die numerischen Berechnungen beziehen sich auf die beidseitige Magnetisierung. Dabei sind in den oberen beiden Abbildungen 6.10 (a) und 6.10 (b) die Ergebnisse für Kunststoff- (KK) und Stahlkern (EK) mit unterschiedlichen Linsendurchmessern bei Zweiblechverbindungen gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass im Inneren der Bleche eine höhere magnetische Flussdichte mit dem Stahlkern erzielt werden kann, was zu einer stärkeren Magnetisierung der Proben führt. In Abbildung 6.10 (c) sind die Ergebnisse für eine Dreiblechverbindung mit Stahlkernen und variierenden Linsendurchmessern zu sehen. Bei allen Konfigurationen hat die Schweißlinse einen erheblichen Einfluss auf die Remanenz. Demzufolge werden für die experimentellen Versuche ähnliche Randbedingungen gewählt.



(a) Zweiblechverbindung, Kunststoffkern (KK), beidseitig (BS) (links:  $d_{1,2}=1 \text{ mm}$ , rechts:  $d_{1,2}=7 \text{ mm}$ )

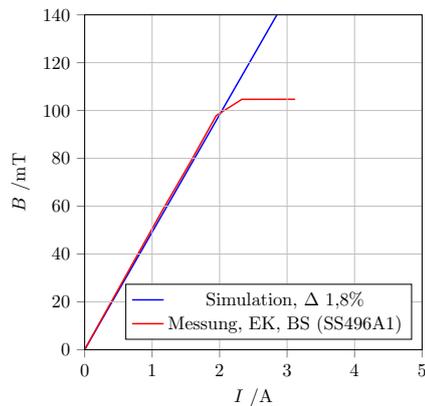


(b) Zweiblechverbindung, Stahlkern (EK), beidseitig (BS) (links:  $d_{1,2}=1 \text{ mm}$ , rechts:  $d_{1,2}=7 \text{ mm}$ )

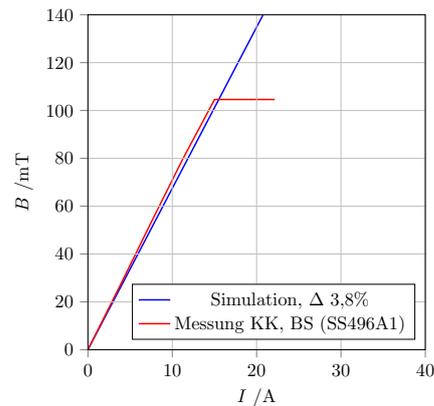


(c) Dreiblechverbindung, Stahlkern (EK), beidseitig (BS) (links:  $d_{1,2}=1 \text{ mm}$ , Mitte:  $d_{11}=1 \text{ mm}$ ,  $d_{12}=7 \text{ mm}$ , rechts:  $d_{11,2}=7 \text{ mm}$ )

**Abbildung 6.10:** Gegenüberstellung der Simulationen von Kunststoff- und Eisenkern, sowie Zwei- und Dreiblechverbindungen für das nachträgliche Magnetisieren von Schweißpunkten ( $I_{\text{mag}}=30 \text{ A}$ )



(a) Stahlkern (EK), beidseitig (BS)



(b) Kunststoffkern (KK), beidseitig (BS)

**Abbildung 6.11:** Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Versuche ( $N = 133$ )

## 6.2.2 Validierung der Simulationsmodelle

Mit Hilfe des FE-Modells kann der Magnetisierungsprozess für Schweißpunktproben nach dem Schweißen für unterschiedliche Linsendurchmesser simuliert werden. Für die Validierung des Modells wird zwischen den Spulen der Magnetisierungsvorrichtung der Hallsensor vom Typ *SS496A1* (Honeywell) platziert. Im FE-Modell wird ein Spalt in Höhe des Hallsensors angenommen und genau im Mittelpunkt zwischen den Spulenkernen die magnetische Flussdichte in  $y$ -Richtung ausgelesen. Als Werkstoff werden Kunststoff- (KK) und Stahlkerne (EK) eingesetzt. Die Validierung erfolgt mit beidseitiger und gleichsinniger Magnetisierung. Die Ergebnisse der Simulationen und Messungen sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Unterschiede zwischen Simulation und Versuch sind sehr gering, was auf eine gute Qualität des FE-Modells schließen lässt.

## 7 Versuchsstände

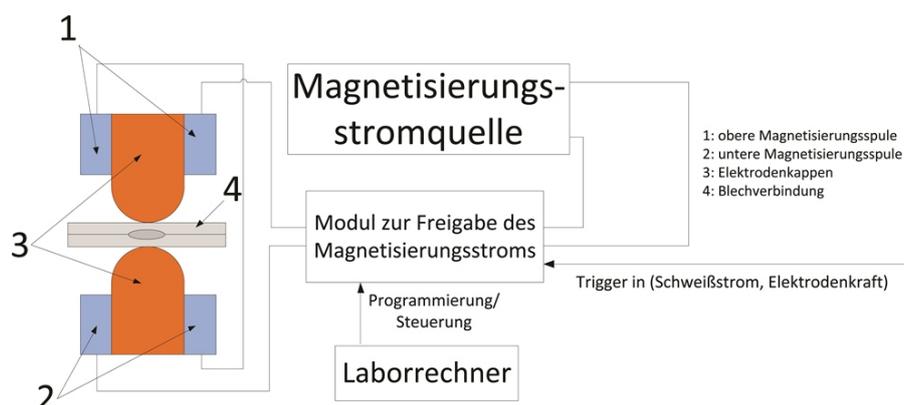
Allgemein erfolgen die Auslegungen der Versuchsstände und die experimentellen Untersuchungen der Kapitel 8 und 9 auf der Basis numerischer Vorbetrachtungen aus Kapitel 6.

### 7.1 Magnetisieren während des Schweißens

Aufbauend auf den numerischen Vorbetrachtungen aus Abschnitt 6.1 erfolgt die Auslegung der ersten Spulen zum Magnetisieren. Es werden Zylinderspulen mit 36 Windungen verwendet. Diese werden direkt auf den Elektrodenkappen befestigt und können gleich- oder gegensinnig vom Magnetisierungsstrom durchflossen werden. Der Magnetisierungsstrom wird von einer Stromquelle (PS 8080-60 DT, Elektro-Automatik) bereitgestellt. Der Magnetisierungsstrom kann variabel bis 60 A eingestellt werden. Limitiert wird der Magnetisierungsstrom durch die Leistungsparameter der Stromquelle, die eine maximale Spannung von 80 V oder eine maximale Leistung von 1500 W zulassen. Die Freigabe des Magnetisierungsstroms erfolgt über ein Schnittstellenmodul durch ein frei wählbares Trigger-Signal. Für die Versuche wird die fallende Flanke des Schweißstroms als Auslösetrigger genutzt. Das Modul wird durch einen programmierbaren Mikrocontroller gesteuert. Dies ermöglicht die direkte und einfache Integration der Magnetisierungsspulen in den Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen. Über das Freigabemodul können der Zeitpunkt und die Dauer zum Magnetisieren auf wenige Millisekunden genau variiert werden. Zusätzlich wird der Magnetisierungsstrom gemessen. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 7.1 zu sehen.

### 7.2 Magnetisieren nach dem Schweißen

Die Vorrichtung zum nachträglichen Magnetisieren der Schweißproben ist durch einen einfachen Aufbau gekennzeichnet. Unter- und oberhalb der Bleche befinden sich Magnetisierungsspulen mit den Kennwerten nach Tabelle 8.1. Das Material



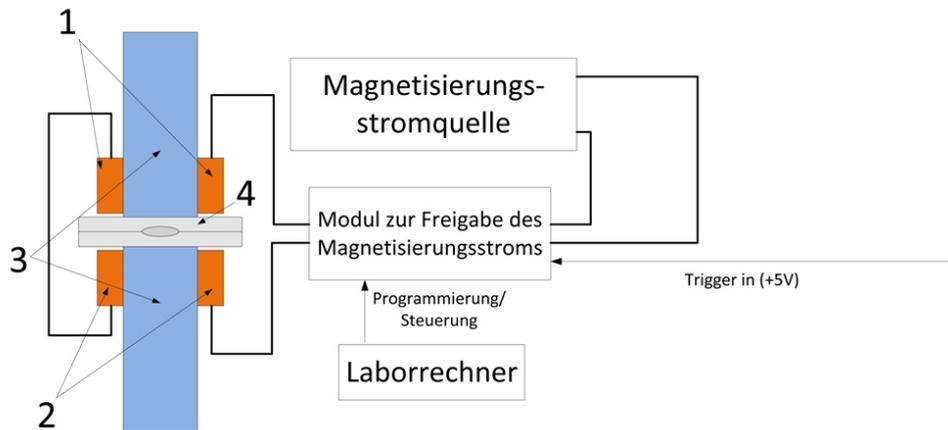
**Abbildung 7.1:** Schematischer Aufbau zum Magnetisieren während des Schweißens (1, 2: Magnetisierungsspulen, 3: Elektrodenkappen, 4: Blechprobe)

der Spulenkern ist frei wählbar. Für die Untersuchungen werden Kunststoff- (KK) und Stahlkerne (EK) eingesetzt. Die Spulen sind gleichsinnig in Reihe geschaltet. Der Magnetisierungsstrom wird über die Stromquelle PS 8080-60 DT und über das im Abschnitt 7.1 beschriebene Freigabemodul bereitgestellt. Die Vorrichtung ist in Abbildung 7.2 (a) zu sehen. Über ein Programm werden die Einstellungen zum Magnetisieren gewählt, und es erfolgt die Datenerfassung von Magnetisierungsstrom und einem weiteren frei wählbaren Kanal. Die Programmoberfläche ist in 7.2 (b) dargestellt.

### 7.3 Messvorrichtungen

Zunächst wird eine einachsige Messvorrichtung *RMV01* aufgebaut. Die Vorrichtung soll primär der Festlegung von Randbedingungen zur flächigen Probenmessung dienen. Zum Messen wird ein Hallsensor vom Typ SS496A1 (Honeywell) genutzt. Das Messsignal wird durch einen Verstärker bis 330-fach verstärkt. Die Probe wird manuell und schrittweise über dem Sensor verfahren. In Abbildung 7.3 ist die Messvorrichtung zu sehen.

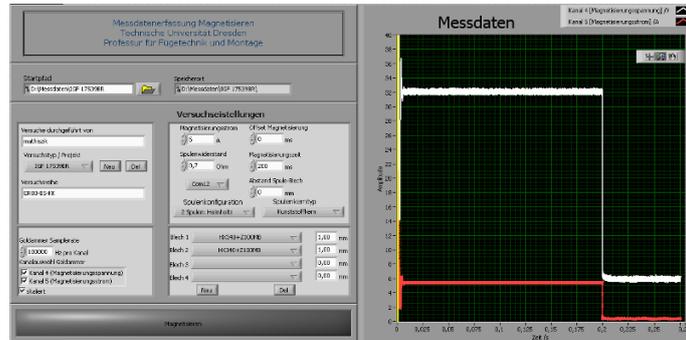
Nach ersten Versuchen erfolgt die Auslegung der Vorrichtung zur flächigen Probenvermessung *RMV02*. Dazu wird ein Kreuztisch mit einem darüber angeordneten Hallsensor verwendet. Mit Hilfe des Kreuztisches kann die Probe automatisiert unter dem Hallsensor positioniert werden. Der Sensor A1324 (Allegro MicroSystems, Inc.) hat einen Messbereich von  $\pm 50$  mT und eine Empfindlichkeit von 50 mV/mT. Um den Messbereich der Messkarte von  $\pm 10$  V voll auszuschöpfen, kann das Signal des Hallsensors wahlweise um Faktor 1, 3,3 oder 330 verstärkt werden. Vor jeder Messung wird der Sensor neu auf ein Nullpotential eingestellt,



(a) Schematischer Aufbau der MagNaS (1,2: Magnetisierungsspulen, 3: Spulenkern (wahlweise Kunststoffkern (KK) oder Stahlkern (EK)), 4: Probe)

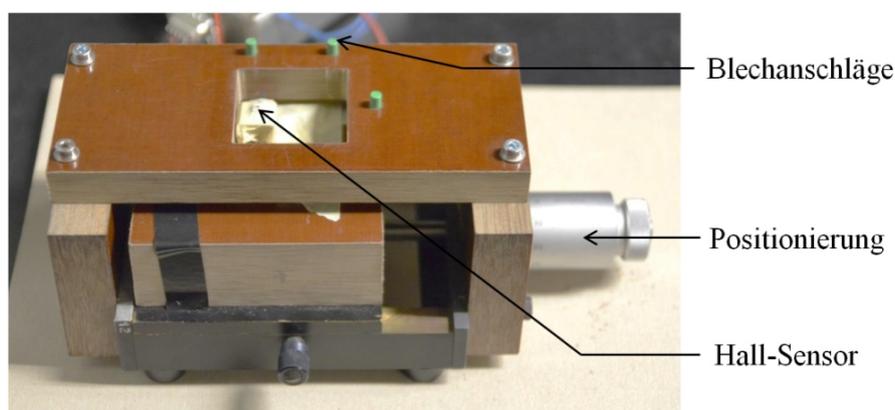


(b) Vorrichtung MagNaS

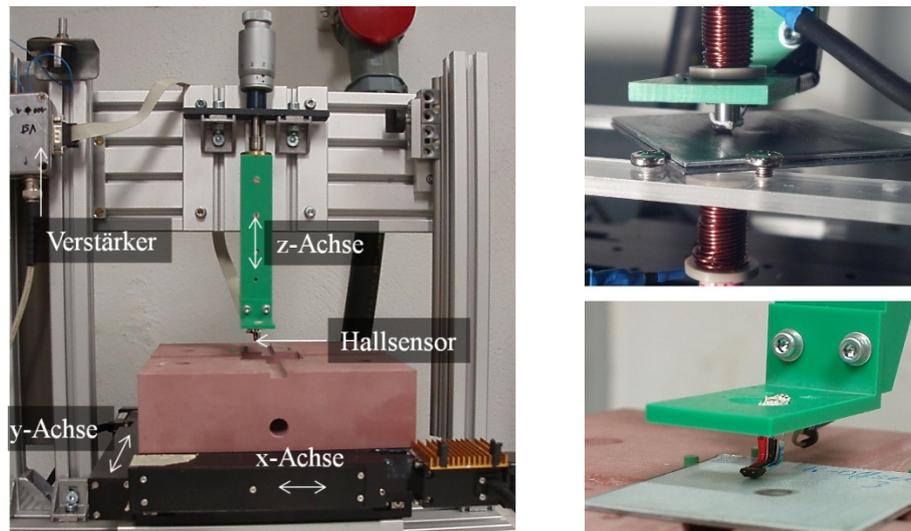


(c) Programmoberfläche der Datenerfassung

**Abbildung 7.2:** Vorrichtung MagNaS zum Magnetisieren nach dem Schweißen und Programmoberfläche zur Steuerung und Datenerfassung des Prozesses



**Abbildung 7.3:** Messvorrichtung *RMV01* zur Messung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche

(a) Messvorrichtung *RMV02*

(b) Hallsensor über Blechprobe (oben: Aufbau zur Messung mit aktivem Magnetfeld, unten: Remanenzmessung)

**Abbildung 7.4:** Messvorrichtung *RMV02* zur flächigen Messung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche

um umliegende und störende Magnetfelder auszublenden. Neben der reinen Remanenzmessung können alternativ ober- und unterhalb der Proben Spulen angebracht werden. So können Messungen unter dem Einfluss eines aktiven Magnetfeldes durchgeführt werden. Für die Messungen wird der Messbereich so eingestellt, dass der Schweißpunkt zentral liegt. Die Messvorrichtung ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Messvorrichtung für die Messung der Remanenzflussdichte *RMV02* wird für beide Varianten der Magnetisierung genutzt.

Die Steuerung des Kreuztisches und die Datenerfassung erfolgt über ein eigens entwickeltes Datenerfassungsprogramm. Der Messbereich, die Messfrequenz und die Verfahrensgeschwindigkeit können vom Benutzer festgelegt werden. Der Messbereich ist auf  $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$  in  $x$ - und  $y$ -Richtung limitiert. Über die  $z$ -Achse erfolgt die Höhenanpassung des Sensors. Die Schrittweite zwischen zwei Messpunkten kann auf  $2,5 \mu\text{m}$  genau eingestellt werden. Das Messprogramm ist in Abbildung 7.5 zu sehen. Im linken Bereich der Benutzereingabe können die Messeinstellungen vorgenommen werden. Die Steuerung des Kreuztisches erfolgt im mittleren unteren Bereich. Die Daten werden während der Messung im Intensitätsplot visualisiert. Dies ermöglicht bereits eine kritische Beurteilung und Auswertung der Messergebnisse. Für die Messung mit aktivem Magnetfeld sind Statusdiagramme einsehbar,

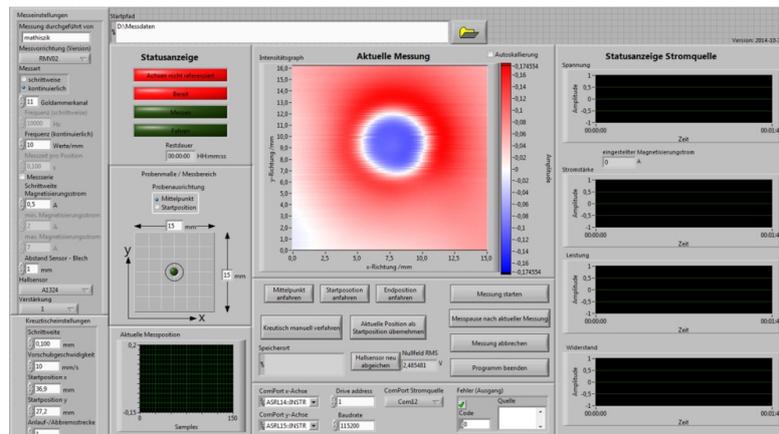
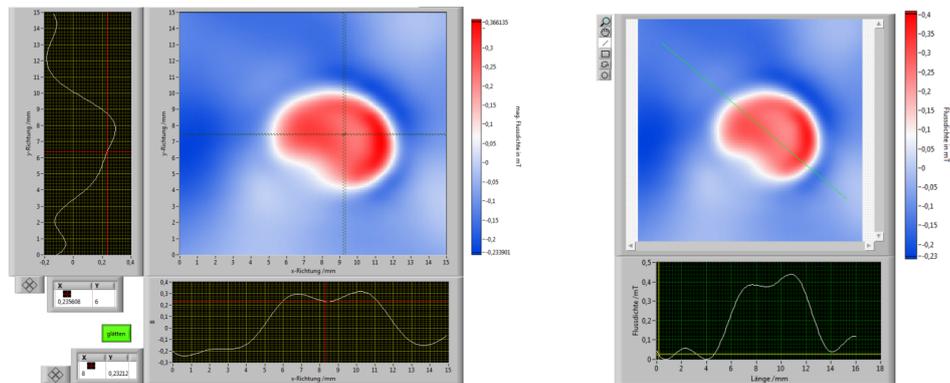


Abbildung 7.5: Messprogramm zur Steuerung und Datenerfassung der Remanenzflussdichte an der Blechoberfläche

die den Zustand der Magnetisierungsstromquelle über die Zeit abbilden.

## 7.4 Darstellung der Messergebnisse

Die Schweißproben werden mit der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Vorrichtung flächig vermessen. Für die Visualisierung und Auswertung wurde ein entsprechendes Programm in *LabVIEW* entwickelt. Die Ergebnisse werden in Falschfarben dargestellt. Dies ermöglicht die schnelle Darstellung der flächigen Remanenzflussdichte in zweidimensionalen Intensitätsdiagrammen mit benutzerdefinierten Farbtabelle. Weiterhin können die partiellen Ableitungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung der magnetischen Flussdichte visualisiert werden. Dies hebt besonders starke Veränderungen in den Messdaten hervor. Richtungsunabhängig können Profilschnitte der Datensätze erzeugt werden (Abbildung 7.6).



(a) Intensitätsplot mit Datenverarbeitung  
(z. B.  $\partial B_r / (\partial x \partial y)$ )

(b) Darstellen richtungsunabhängiger Profilschnitte

**Abbildung 7.6:** Programmoberfläche zum Auswerten der flächigen Remanenzmessung

# 8 Experimentelle Untersuchungen des Magnetisierens während des Schweißens

In diesem Kapitel werden die experimentellen Untersuchungen des Magnetisierens während des Schweißens diskutiert.

## 8.1 Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen der Magnetisierung während des Schweißens konzentrieren sich auf die Materialdickenkombination (MDK) 66, 88, 777. Dabei wird zunächst der Einfluss des Nebenflusstroms an Mehrpunktproben untersucht. Anschließend erfolgen Betrachtungen bezüglich der Magnetisierungsstärken, der Dauer  $t_{\text{mag}}$  und dem Zeitpunkt  $t_{\text{mag,o}}$  der Magnetisierung. Weiterhin wird der Einfluss des Elektrodeneindrucks untersucht. Für die Variation des Linsendurchmessers wurde mit unterschiedliche Schweißstromstärken geschweißt. Für die Validierung der Ergebnisse werden die Proben durch Torsion zerstörend geprüft. In Abbildung 8.1 ist der Prozess mit den relevanten einstellbaren Größen beispielhaft dargestellt.

Für die Auswertung der flächigen Remanenzmessungen wird das in Abschnitt 7.3 beschriebene Programm verwendet. Aus den Messdaten werden Bilder erzeugt und in Falschfarben dargestellt. Blau-weiß-rote und schwarz-weiße Farbtabellen haben sich als günstig erwiesen. Weiterhin werden Profilschnitte herangezogen. Im Zuge der Auswertungen für das nachträgliche Magnetisieren zeigt sich, dass für die Bewertung der Remanenzmessungen die Fläche  $A_{\text{mag}}$  der Bruchfläche  $A_{\text{sp}}$  der Schweißproben gegenübergestellt werden kann. Das gleiche betrifft die Durchmesser  $d_{\text{mag}}$  und  $d_1$ . (Abschnitt 9.2)

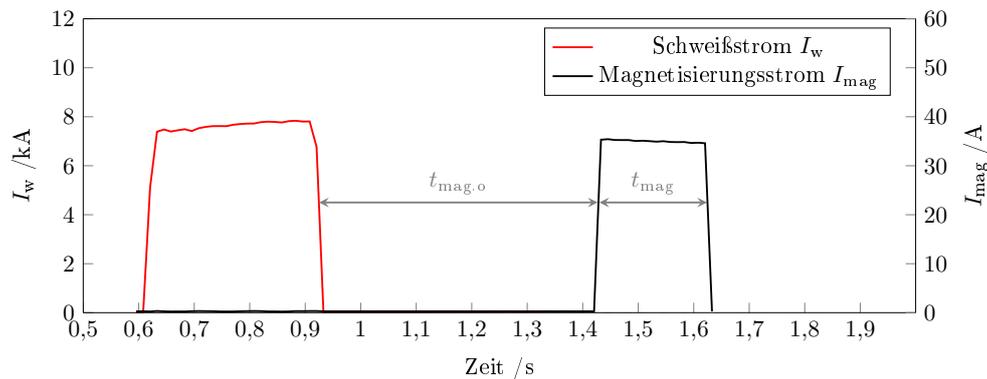


Abbildung 8.1: Prozessablauf beim Magnetisieren während des Schweißens

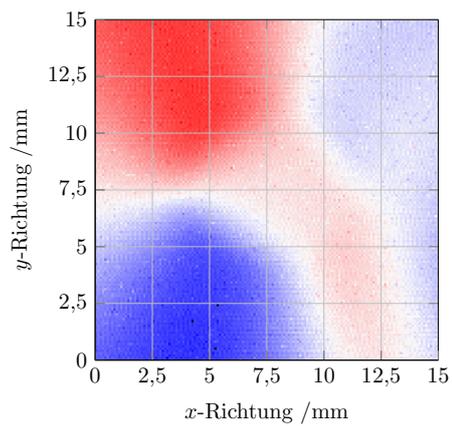
### 8.1.1 Einfluss des Nebenschlusses

In einer ersten Versuchsreihe wird an Mehrpunktproben (MR) der Einfluss des Nebenschlussstroms auf das remanente Magnetfeld untersucht. Der Punktabstand beträgt 50 mm. Die Schweißpunkte werden mit gleichbleibenden Parametern geschweißt und magnetisiert. Für den Vergleich wird direkt nach dem Schweißen des ersten Punktes, dessen Remanenzfeld an der Blechoberfläche vermessen. Anschließend wird der zweite Punkt geschweißt. Es folgt die Remanenzmessung beider Schweißpunkte. In Abbildung 8.2 sind die Messergebnisse zu sehen. Es ist zu erkennen, dass durch den Nebenschlussstrom das vorher eingeprägte Remanenzfeld komplett verändert wird. Schlussfolgernd muss beim Magnetisieren während des Schweißens die Bewertung des Linsendurchmessers erfolgen, bevor der nächste Punkt geschweißt wird. Für die Untersuchungen der eingepprägten Remanenzflussdichte beim Magnetisieren während des Schweißens ist es daher sinnvoll, Einzelpunktproben zu verwenden.

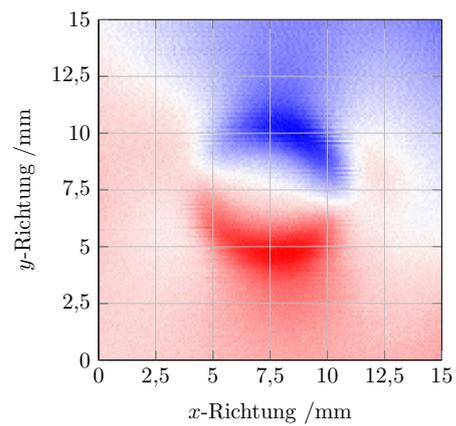
### 8.1.2 Einfluss der Magnetisierungszeit

Der Einfluss der Magnetisierungszeit  $t_{\text{mag}}$  wird zunächst in den Versuchsreihen ER66 und ER88 untersucht. Mit dem Abschalten des Schweißstroms werden die Magnetisierungsspulen für die Dauer von  $t_{\text{mag}}$  eingeschaltet.

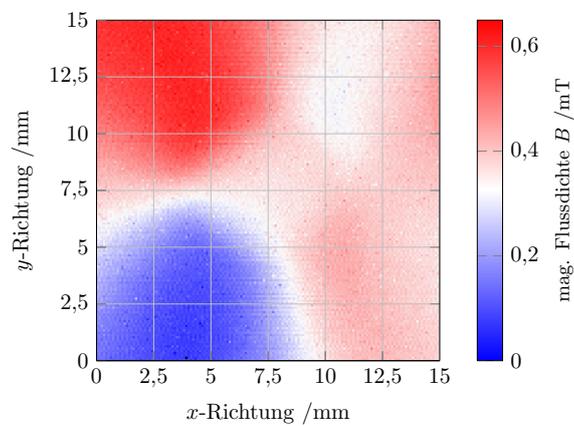
Bei der Versuchsreihe ER66 sind lange Magnetisierungszeiten ( $t_{\text{mag}} \geq 600$  ms) notwendig, bis ein erster Einfluss der Magnetisierung zu messen ist. Die Auswertung mittels Profilschnitt durch markante Bereiche der flächigen Remanenzmessung ist in Abbildung 8.3 zu sehen. Die Kurvenverläufe sind von ihrer Charak-



(a) Schweißpunkt P1 bevor P2 geschweißt wurde (Probe: MR88-P7a)

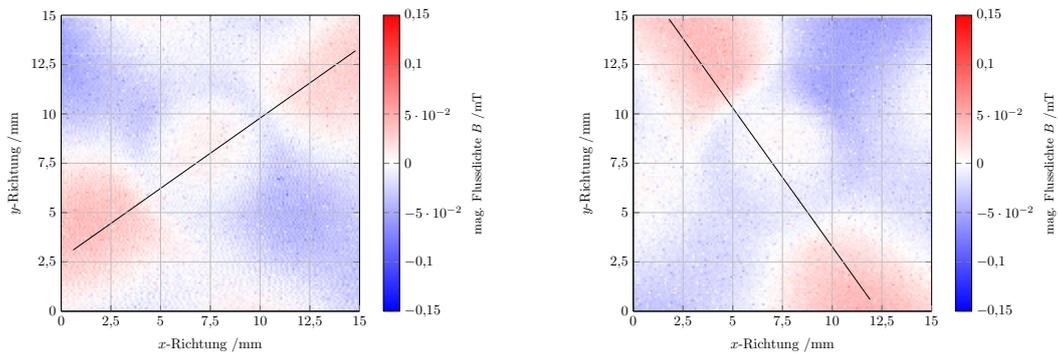


(b) Schweißpunkt P1 nachdem P2 geschweißt wurde (Probe: MR88-P7b)

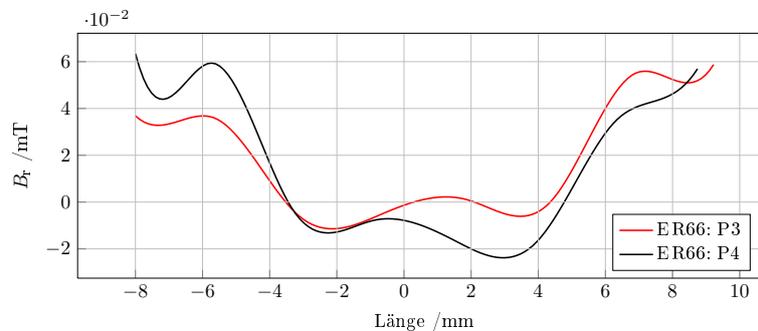


(c) Schweißpunkt P2 (Probe: MR88-P8a)

**Abbildung 8.2:** Gemessene Remanenzflussdichte unter dem Einfluss des Nebenschlussstroms



(a) ER66: P3,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=900$  ms,  $d_1=8,475$  mm  
 (b) ER66: P4,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=900$  ms,  $d_1=8,125$  mm

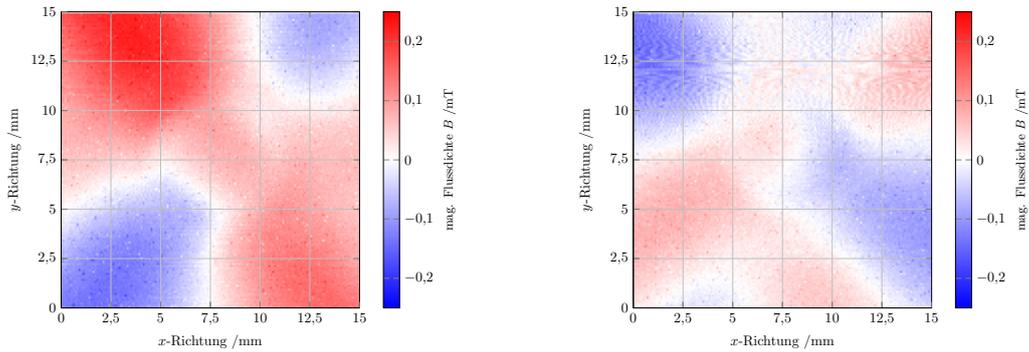


(c) ER66: Profilschnitt P3, P4

**Abbildung 8.3:** Profilschnitt der Intensitätsplots der magnetischen Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit

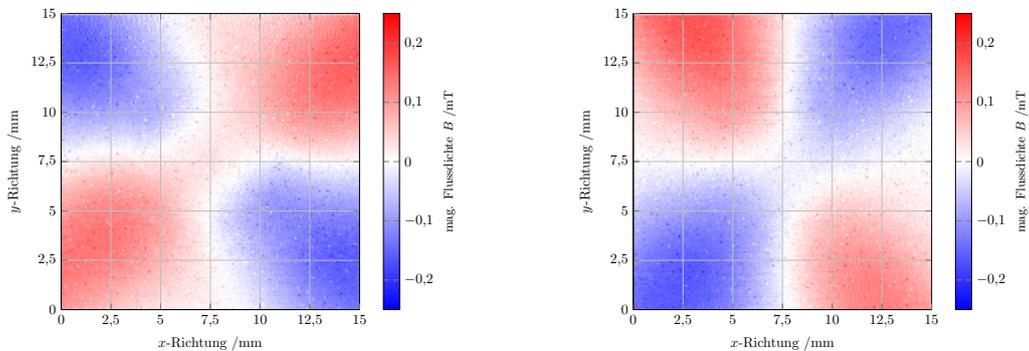
teristik ähnlich. Der größere Schweißpunkt P3 besitzt eine etwas geringere Remanenzflussdichte im Bereich der Fügezone als P4. Allerdings kann der Einfluss des Elektrodeneindrucks nicht gänzlich ausgeschlossen werden, was in Abschnitt 8.1.3 näher betrachtet wird. Eine eindeutige Bewertung des Linsendurchmessers ist nicht möglich.

Die Intensitätsdiagramme für die Versuchsreihe ER88 in den Abbildungen A.5, A.6, A.7 zeigen, dass erst ab einer Magnetisierungszeit von  $t_{\text{mag}}=200$  ms erkennbare Einflüsse der Magnetisierung festzustellen sind. In Abbildung 8.4 sind die Intensitätsdiagramme für  $t_{\text{mag}}=0$  ms, 200 ms und 500 ms abgebildet. Bei  $t_{\text{mag}}=500$  ms ist der Vergleich zwischen den Schweißströmen  $I_w=8$  kA und  $I_w=7$  kA zu sehen. Ein höherer Schweißstrom führt bei gleichbleibenden Randbedingungen in der Regel zu einer größeren Erwärmung im Inneren der Schweißprobe. Das Resultat ist eine größere Schweißlinse. Die Differenz von  $\Delta I_w=1$  kA spiegelt sich im Bruchverhalten und Linsendurchmesser der Proben wieder. Die Remanenzfelder mit kleineren



(a) ER88: P1,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=500$  ms,  $d_1=5,95$  mm, Ausknöpfbuch

(b) ER88: P2,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=500$  ms,  $d_1=4,73$  mm, Scherbruch



(c) ER88: P3,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=200$  ms

(d) ER88: P4,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=0$  ms

**Abbildung 8.4:** Intensitätsplots der magnetischen Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit

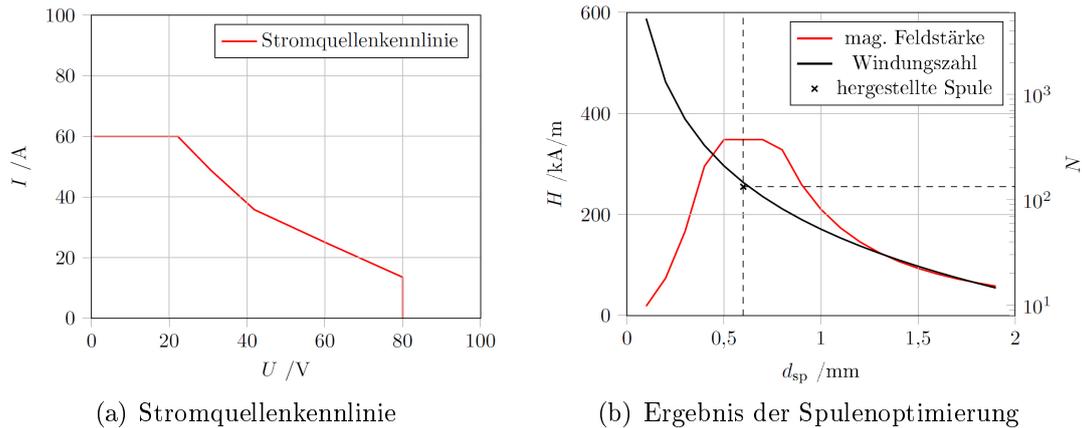
Schweißströmen müssten nach den theoretischen Vorbetrachtungen aus Abschnitt 4 und aus den Literaturquellen [3], [4] eine stärkere Magnetisierung im Bereich der Fügezone aufweisen. Die Auswertung der Gegenüberstellung zeigt jedoch, dass die theoretischen Vorbetrachtungen nicht bestätigt werden konnten. In den flächigen Messungen der Remanenzflussdichte über der Blechoberfläche ist deutlich zu sehen, dass bei der Probe P1 mit  $I_w=8$  kA über dem Schweißpunkt eine höhere Flussdichte detektiert werden kann als bei der Probe P2 mit  $I_w=7$  kA. Die gesamten Versuchsparameter und Ergebnisse sind im Anhang A.1 dargestellt.

### 8.1.3 Einfluss der Magnetisierungsstärke

Unabhängig von den eingestellten Schweiß- und Magnetisierungsparametern zeigt sich bei allen Proben ein wiederholendes Muster der gemessenen Remanenzflussdichten auf den Blechoberflächen um den Schweißpunkt. Zusammenhänge zwischen

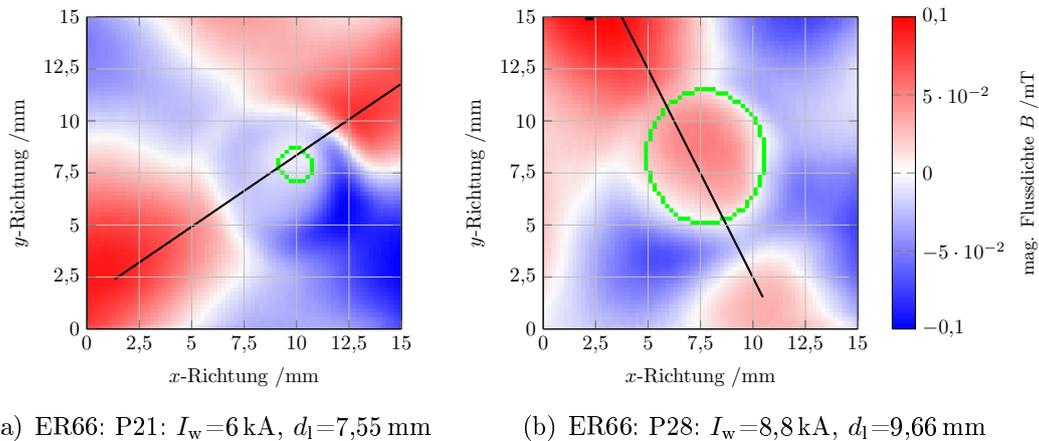
**Tabelle 8.1:** Parameter der Magnetisierungsspulen mit 133 Windungen

Parameter	Symbol	Größe
Drahtdurchmesser der Spule	$d_{sp}$	1 mm
Spulenwindungen	$N$	133
Spulenwiderstand	$R_{sp}$	0,7 $\Omega$

**Abbildung 8.5:** Optimierung der Magnetisierungsspulen

den Mustern und den erzielten Linsendurchmessern können nicht festgestellt werden, was keine vertrauenswürdige Bewertung des Linsendurchmessers ermöglicht. Grundsätzlich werden die Muster durch den Schweißstrom erzeugt, da sie bei Proben ohne und mit Magnetisierung in ähnlicher Weise auftreten. Für die folgenden Versuche werden neue Magnetisierungsspulen mit den Eigenschaften nach Tabelle 8.1 verwendet. Die Parameter stellen das Optimum bezogen auf die Leistungsparameter der Magnetisierungsstromquelle PS 8080-60 DT dar. Die Stromquellenkennlinie und den sich daraus ergebenden Randbedingungen sind in Abbildung 8.5 zu sehen. Als maximalen Magnetisierungsstrom  $I_{mag}$  kann in Reihenschaltung zweier Spulen (beidseitige Magnetisierung) ein maximaler Magnetisierungsstrom von  $I_{mag} \approx 32$  A und  $I_{mag} \approx 46$  A bei Verwendung von nur einer Spule erzielt werden. Mit Hilfe dieser Spulen kann ein wesentlich höheres  $H$ -Feld erzeugt werden.

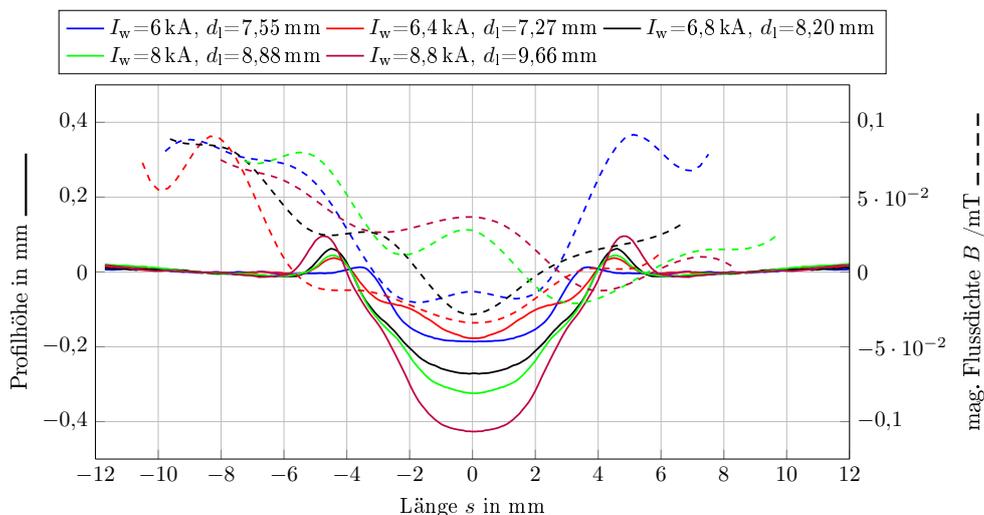
Nach dem *Biot-Savart-Gesetz* nimmt die magnetische Flussdichte kubisch mit dem Abstand ab [19]. Daher soll in den folgenden Untersuchungen der Einfluss des Elektrodeneindrucks auf die Magnetfeldmessung eingeschlossen werden. Die Oberflächenprofile werden durch Lasertriangulation linear über dem Schweißpunkt erfasst. Für die Magnetisierung wird der maximale Magnetisierungsstrom von  $t_{mag}=35$  A eingestellt. Die Magnetisierungszeit beträgt  $t_{mag}=400$  ms mit einem Off-



**Abbildung 8.6:** Vergleich der Magnetfeldmessungen zwischen kleinstem und größtem Schweißpunkt der Versuchsreihe ER66

set von  $t_{\text{mag,o}}=400\text{ ms}$ . Für die Untersuchungen wird die MDK66 gewählt. Um unterschiedliche Schweißlinsengrößen zu erzielen, wird der Schweißstrom variiert. In Abbildung 8.6 sind der kleinste und der größte Schweißpunkt nebeneinander dargestellt. Die schwarzen Linien zeigen den Verlauf der Profilschnitte. Die grünen Kreise sind die erfassten Konturen im Schweißpunkt für die Bestimmung der Fläche der Remanenzmessung  $A_{\text{mag}}$ . Die Gegenüberstellung zeigt, dass mit der stärkeren Magnetisierung die oben benannten Muster kaum noch auftreten bzw. nicht mehr so deutlich in den Vordergrund rücken. Weiterhin ist zu erkennen, dass unabhängig vom Schweißstrom alle Proben im gleichen Messbereich zwischen  $\pm 0,1\text{ mT}$  liegen. Die Konturfläche  $A_{\text{mag}}$  nimmt mit steigendem Schweißstrom zu.

In Abbildung 8.7 sind die Oberflächenprofile den Profilschnitten der Remanenzmessung gegenübergestellt. Länge  $s=0\text{ mm}$  ist der Mittelpunkt des Elektrodeneindrucks. Der Profilvergleich zeigt, dass mit zunehmendem Elektrodeneindruck die gemessene Flussdichte sukzessiv von negativen zu positiven Werten wechselt. Dabei kann nicht eindeutig entschieden werden, ob dieser Zusammenhang auf den zunehmenden Abstand oder die zunehmend größere Schweißlinse zurückzuführen ist. Der Vergleich zwischen den gemessenen Linsendurchmessern  $d_l$  und den Durchmessern der Kontur aus der Remanenzmessung  $d_{\text{mag}}$  zeigt einen deutlichen Zusammenhang dieser Größen (Abbildung 8.8 (a)). Auch die Ergebnisse der Messung von  $A_{\text{mag}}$  korrelieren mit den Bruchflächen der Schweißproben  $A_{\text{sp}}$  (Abbildung 8.8 (b)). Allerdings lassen die guten Korrelationen keine eindeutigen Aussagen bezüglich eines direkten Zusammenhangs zwischen ausgewerteter Remanenzmessung und erzielttem Linsendurchmesser zu, da sowohl  $d_{\text{mag}}$  als auch  $A_{\text{mag}}$  mit dem Elektrodenein-

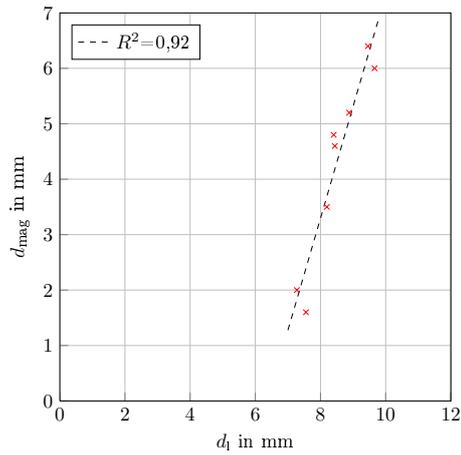


**Abbildung 8.7:** Gegenüberstellung zwischen dem Oberflächenprofil und dem Profilschnitt der Remanenzmessung

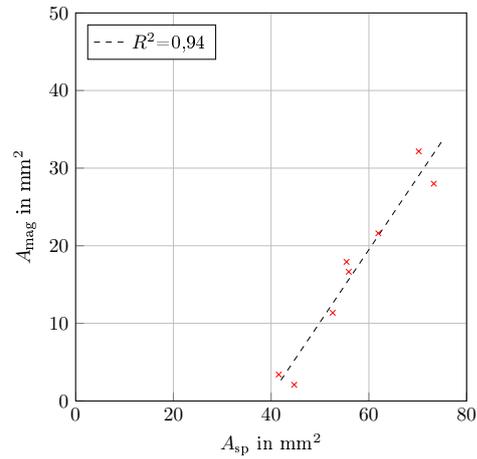
druck im gleichen Maße in Korrelation stehen, was in Abbildung 8.8 (c, d) zu sehen ist. Eine Zusammenstellung aller Proben mit Ergebnissen ist im Anhang A.1.2 zu finden.

## 8.2 Zusammenfassung

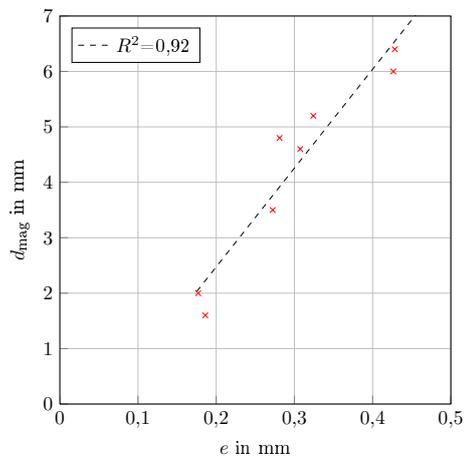
Die erzielten Ergebnisse beim Magnetisieren während des Schweißens lassen unter den Randbedingungen der Untersuchungen keine vertrauenswürdigen Bewertungen des Linsendurchmessers zu. Es zeigt sich, dass der Nebenschlussstrom das zuvor eingeprägte Remanenzfeld vollständig verändert. Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass Zusammenhänge zwischen dem eingepägten Remanenzfeld und dem Linsendurchmesser vorhanden sind. Allerdings ist es nicht möglich aus den Zusammenhängen, die Einflüsse geometrischer Unstetigkeiten der Oberfläche, z. B. Elektrodeneindruck, eindeutig herauszufiltern. Die Versuche zur Magnetisierungszeit lassen erkennen, dass der Zeitpunkt der Magnetisierung von großer Bedeutung ist. Erste Veränderungen in der Struktur der Magnetfelder an der Blechoberfläche treten erst nach mehreren 100 ms auf. Dies erfordert lange Nachhaltezeiten, wodurch die Bewertung des Linsendurchmessers unter realen Fertigungsbedingungen mit kurzen Taktzeiten erschwert wird. Daher konzentrieren sich die weiteren Untersuchungen auf das Magnetisieren nach dem Schweißen.



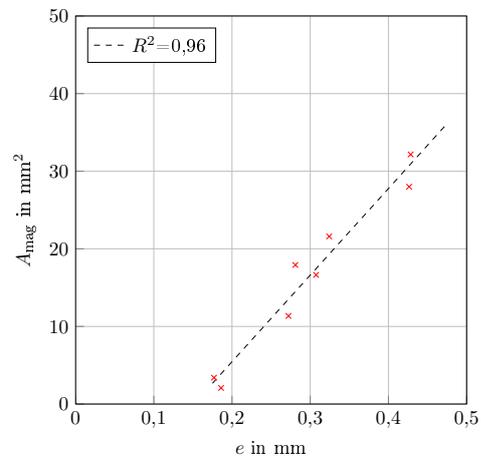
(a)  $d_l$  zu  $d_{\text{mag}}$



(b)  $A_{\text{sp}}$  zu  $A_{\text{mag}}$



(c)  $e$  zu  $d_{\text{mag}}$



(d)  $e$  zu  $A_{\text{mag}}$

**Abbildung 8.8:** Zusammenhänge zwischen dem Elektrodeneindruck  $e$ , dem Linsendurchmesser  $d_l$ , der Bruchfläche der Schweißproben  $A_{\text{sp}}$ , der Fläche der Innenkontur der Magnetfeldmessung  $A_{\text{mag}}$  und dem Durchmesser der Magnetfeldmessung  $d_{\text{mag}}$

# 9 Untersuchungen des Magnetisierens nach dem Schweißen

In diesem Kapitel werden die experimentellen Untersuchungen des Magnetisierens nach dem Schweißen diskutiert.

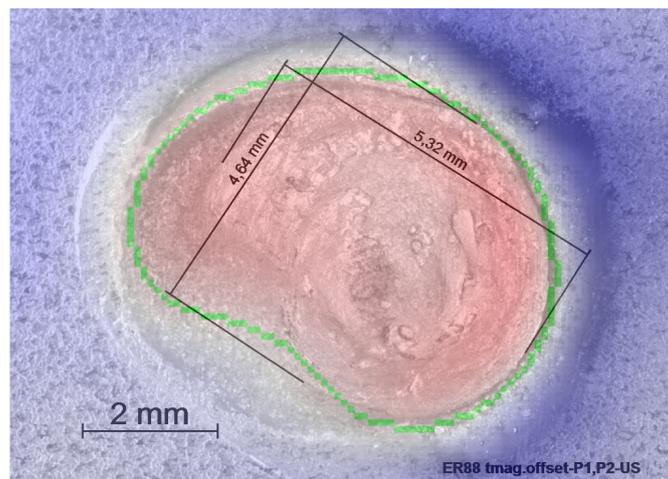
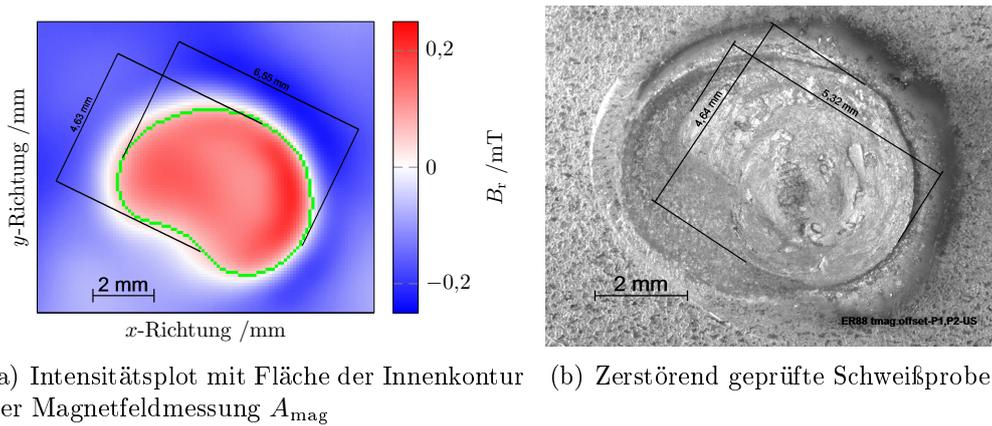
## 9.1 Modellbeschreibung für die Auswertung

Die Auswertung der Messdaten für das Magnetisieren nach dem Schweißen zeigt, dass es geometrische Zusammenhänge zwischen den Bruchflächen der Schweißproben  $A_{sp}$  und einer in den Messdaten detektierbaren charakteristischen Kontur (grün) gibt, was in Abbildung 9.1 zu sehen ist. Die charakteristische Kontur umschließt eine Fläche, die der Bruchfläche der Schweißproben gegenübergestellt werden kann. Die Fläche wird im Folgenden als  $A_{mag}$  bezeichnet. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsmodulen können diese Konturen, je nach Qualität der Messdaten, manuell oder auch vollautomatisiert detektiert werden. Dafür werden aus den Messdaten Falschfarbenbilder erzeugt. Blau-weiß-rote und schwarz-weiße Farbtabelle haben sich für die Auswertung als günstig erwiesen. Die Detektion von  $A_{mag}$  basiert auf Kontrastunterschieden in den Bildern. Ein Großteil der Daten kann so automatisiert ausgewertet werden. Zur Auswertung wird daher ein Modell angenommen. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen den Durchmessern und zwischen den Flächen. Die Annahme für das Prüfmodell lautet:

$$d_{mag} = d_1 \quad \text{und} \quad A_{mag} = A_{sp}. \quad (9.1)$$

Für die Auswertung der flächigen Remanenzmessungen wird das in Abschnitt 7.3 beschriebene Programm verwendet. Für die Validierung der Messdaten werden die Schweißproben durch Torsion zerstört. Die Bruchfläche  $A_{sp}$  wird nach

der Berechnungsformel für den Flächeninhalt von Ellipsen ermittelt (Gleichung 9.2), wobei  $a$  und  $b$  die Halbachsen der Ellipse sind und nach den Gleichungen 9.3 und 9.4 ermittelt werden. Die Linsendurchmesser  $d_{l1}$  und  $d_{l2}$  werden an den durch Torsion zerstörten Proben gemessen. Die Messung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 14329 [9].



**Abbildung 9.1:** Vergleich zwischen zerstörungsfreier Remanenzmessung und zerstörend geprüfem Schweißpunkt

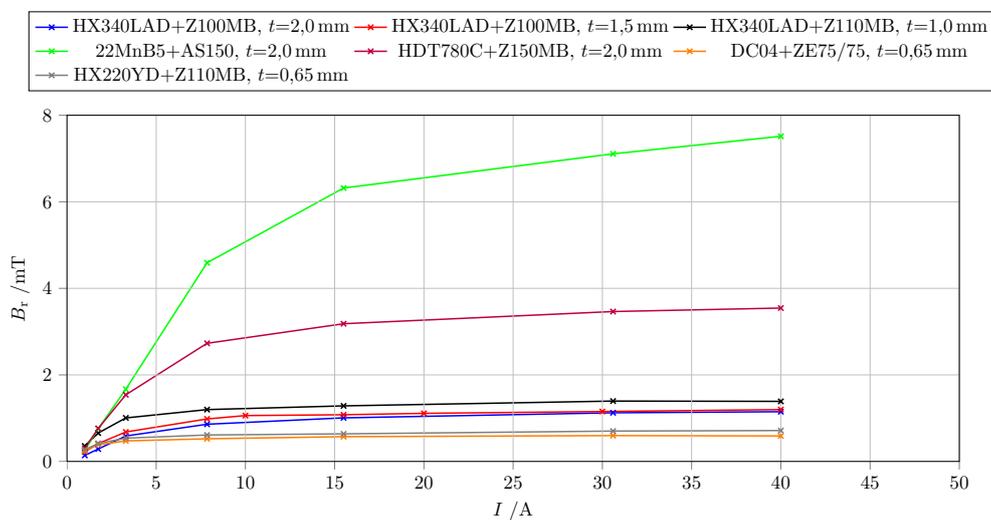
$$A_{\text{sp}} = \Pi ab \quad (9.2)$$

$$a = \frac{d_{l1}}{2} \quad (9.3)$$

$$b = \frac{d_{l2}}{2} \quad (9.4)$$

## 9.2 Ergebnisse

Für die Auswertung und die Einschätzung der Ergebnisse werden zunächst Remanenzmesskurven der Versuchswerkstoffe bei Raumtemperatur aufgezeichnet. Dazu werden einzelne und unverschweißte Probenbleche einseitig im Versuchsstand zum nachträglichen Magnetisieren magnetisiert. Anschließend werden die Proben in der *RMV02*-Messvorrichtung vermessen, ohne dass ein äußeres Magnetfeld anliegt, was es ermöglicht, die Remanenzflussdichte der Werkstoffe zu ermitteln. Zum Messen unterschiedlicher Remanenzflussdichten  $B_r$  wird von Messung zu Messung der Magnetisierungsstrom  $I_{\text{mag}}$  erhöht. Vor jeder Messung werden die Blechproben entmagnetisiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.2 dargestellt. Zwischen den einzelnen Werkstoffen sind deutliche Unterschiede in den messbaren Remanenzflussdichten nachweisbar. 22MnB5+AS150 lässt sich am stärksten aufmagnetisieren. Zudem ist für diesen Werkstoff die maximale Remanenzflussdichte mit einem maximalem Strom von  $I_{\text{mag}}=40$  A noch nicht erreicht. Für HDT780C+Z150MB kommt es zu einer maximalen Remanenzflussdichte ab ca.  $I_{\text{mag}}=15$  A und für die restlichen Werkstoff ab ca.  $I_{\text{mag}}=7,5$  A ein. Beim Vergleich der einzelnen HX340LAD+Z-Güten untereinander sind Einflüsse der Blechdicke kaum messbar.



**Abbildung 9.2:** Gemessene Remanenzflussdichten  $B_r$  an der Blechoberfläche der einzelnen Versuchswerkstoffe

### 9.2.1 Einfluss des Elektrodeneindrucks

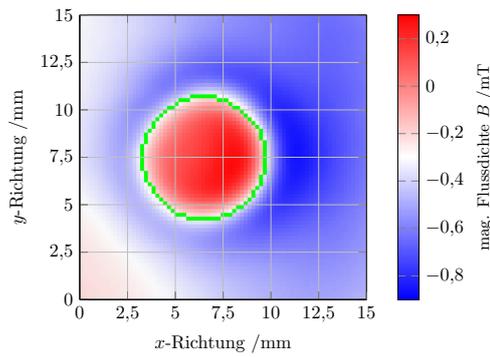
Bei der Magnetisierung nach dem Schweißen ist es unerheblich, wann die Probe untersucht wird. Um Störeinflüsse möglichst gering zu halten, sollte die Probe direkt

nach dem Magnetisieren vermessen werden. Um den Einfluss des Elektrodeneindrucks auf das Messergebnis abzuschätzen, werden Proben der Serie ERN66 und ERN88 im Zustand nach dem Schweißen magnetisiert und vermessen. Anschließend wird diese Probe im Bereich des Schweißpunktes plangefräst und erneut magnetisiert und vermessen. In Abbildung 9.3 sind die Messergebnisse der Proben zu sehen. Die gemessenen und ermittelten Linsendurchmesser und Flächen sind in Tabelle 9.1 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass der Elektrodeneindruck einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Allerdings kann  $A_{\text{mag}}$  trotz tiefer Elektrodeneindrücke eindeutig ermittelt werden. Festzuhalten ist, dass die Messungen an den Randbereichen unschärfer werden, was sich in den prozentualen Unterschieden sowohl für die Durchmesser als auch für die Flächen zwischen Remanenzauswertung und Messung an der zerstörten Schweißprobe widerspiegelt. Die Intensität der Magnetfelder  $B_r$  verdoppelt sich im Betrag vom Ausgangszustand zum plangefrästen Zustand. Dies ist auf den größeren Abstand zwischen Sensor und Blechoberfläche bei vorhandenem Elektrodeneindruck zurückzuführen.

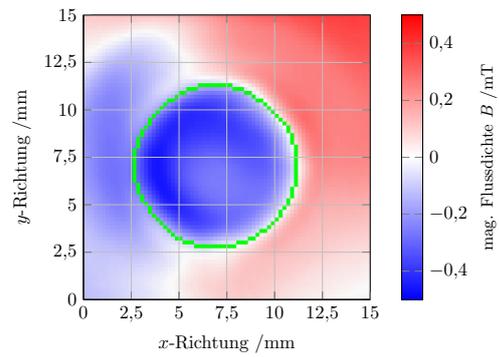
**Tabelle 9.1:** Ergebnisse zum Einfluss des Elektrodeneindrucks für das Magnetisieren nach dem Schweißen

Probenzustand	MDK	$d$ /mm	$A$ /mm <sup>2</sup>	$\Delta d$ /% <sup>1</sup>	$\Delta A$ /% <sup>1</sup>
Ausgangszustand	ERN88	6,4	32,16	10,2	19,44
	ERN66	8,4	55,52	2,2	4,16
plangefräst	ERN88	7,0	38,25	1,8	4,37
	ERN66	8,6	59,08	0,1	1,2
gemessen	ERN88	7,13	39,92	–	–
	ERN66	8,59	57,93	–	–

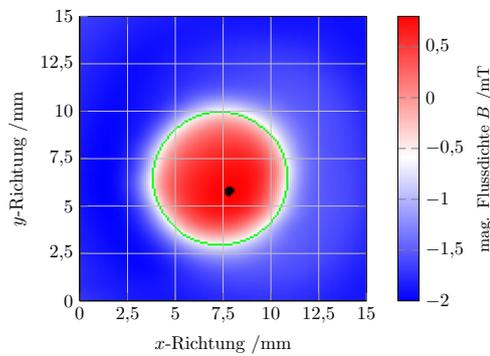
<sup>1</sup> bezogen auf Messwerte der zerstörten Proben



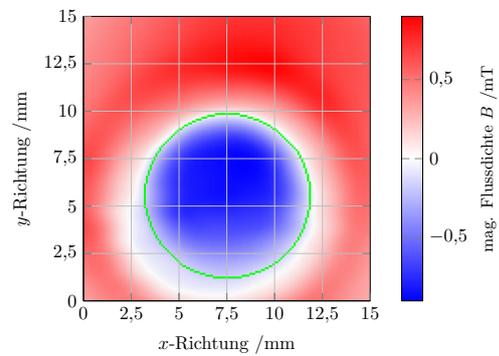
(a) ERN88 Ausgangszustand



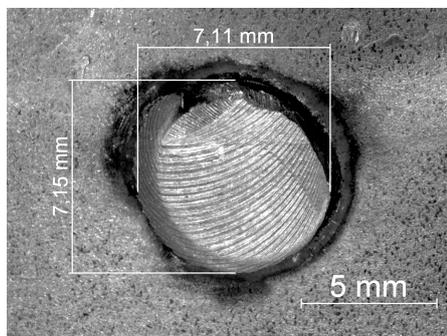
(b) ERN66 Ausgangszustand



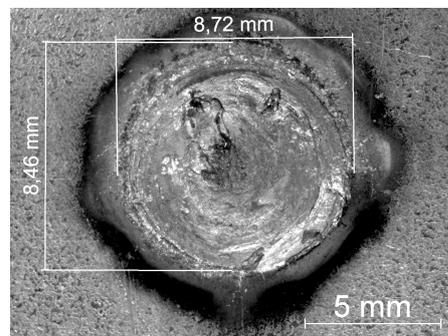
(c) ERN88 plangefräst



(d) ERN66 plangefräst



(e) ERN88 zerstörte Schweißprobe (Ausknöpfbruch)



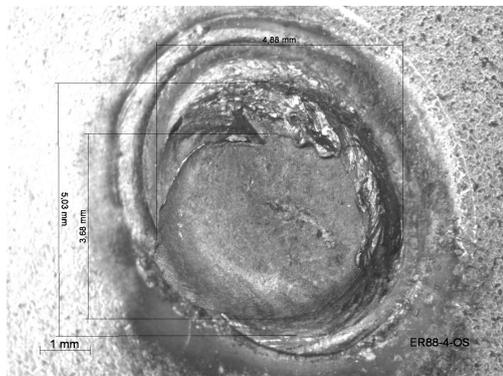
(f) ERN66 zerstörte Schweißprobe (Scherbruch)

**Abbildung 9.3:** Ergebnisse zum Einfluss des Elektrodeneindrucks für das Magnetisieren nach dem Schweißen

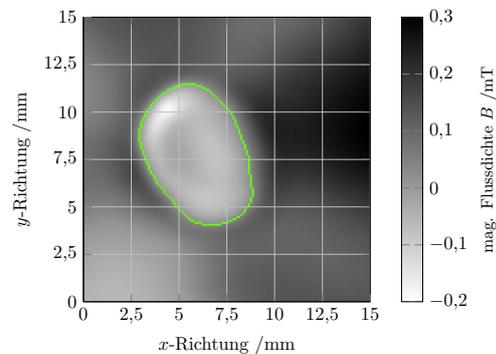
## 9.2.2 Nachträgliches Magnetisieren von Zweiblechverbindungen

**ERN88: HX340LAD+Z110MB ( $t = 1,0$  mm) + HX340LAD+Z110MB ( $t = 1,0$  mm)**

Die Untersuchungen der MKD88 (ERN88) werden mit Kunststoff- (KK) und Stahlkernen (EK) durchgeführt. Für die Magnetisierung wird ein Strom von  $I_{\text{mag}}=32$  A eingestellt. Die Magnetisierungszeit beträgt  $t_{\text{mag}}=200$  ms. Anschließend werden die Proben flächig vermessen. Der Vergleich zwischen zerstörter Probe und Remanenzmessung zeigt Übereinstimmungen zwischen den Durchmessern und Flächen, was in Abbildung 9.4 dargestellt ist.



(a) ERN88: P4: Maße der zerstörten Probe ( $A_{\text{sp}}=24,03$  mm<sup>2</sup>,  $d_1=5,54$  mm)

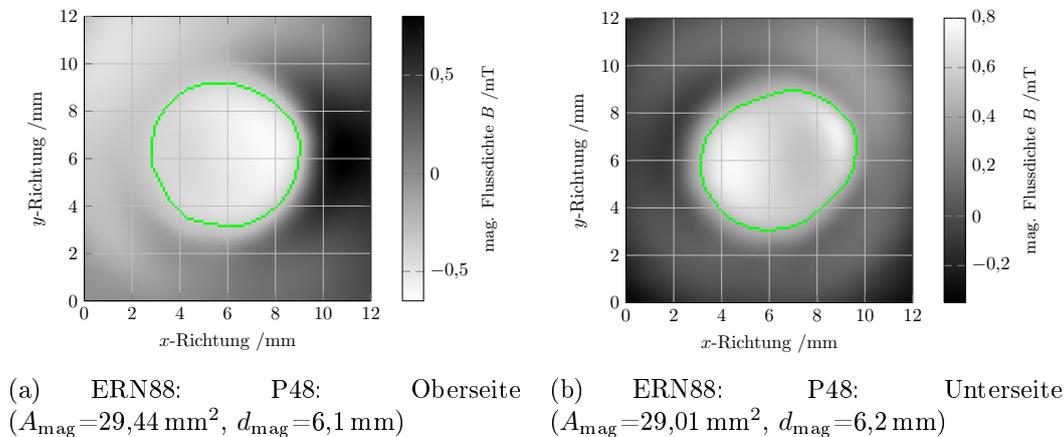


(b) ERN88: P4: Oberseite der flächigen Magnetfeldmessung (KK) ( $A_{\text{mag}}=31,59$  mm<sup>2</sup>,  $d_{\text{mag}}=6,65$  mm)

**Abbildung 9.4:** ERN88: Vergleich zwischen zerstörter Probe und gemessenem Remanenzfeld

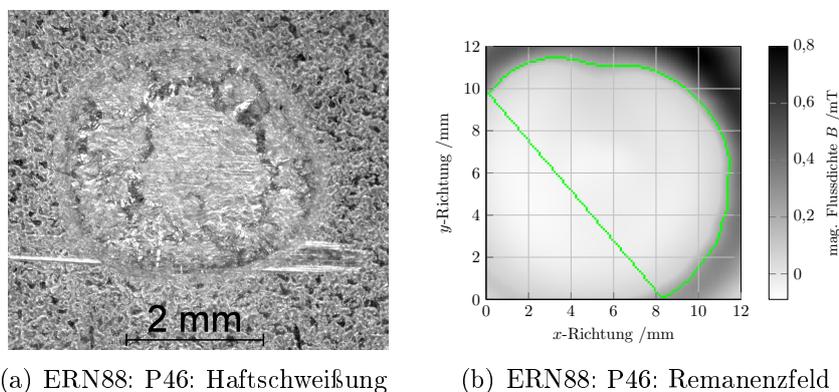
Zur Auswertung und Validierung der Ergebnisse werden die Proben an der Ober- und Unterseite vermessen. Beispielhaft sind Messungen der Remanenzfelder der Probe ERN88-P48 in Abbildung 9.5 zu sehen. Die Unterschiede beider Seiten sind gering. Sie treten hauptsächlich durch variierende Abstände zwischen Blechoberfläche und Hallsensor auf. Die Abstände müssen je nach der Topographie der Blechoberfläche für jede Messung neu eingestellt werden. Dennoch kann zuverlässig  $A_{\text{mag}}$  erfasst werden. Die Gegenüberstellung zeigt auch, dass das Magnetfeld über dem Schweißpunkt an der Oberseite negativ und an der Unterseite positiv ausgerichtet ist, was für eine gute magnetische Durchflutung der Proben spricht. Der Grund für die verdrehten Farbskalen liegt im Suchalgorithmus für  $A_{\text{mag}}$ . Ausgehend von hellen Stellen im Bild sucht dieser den einstellbaren Kontrastunterschied zu dunklen

Stellen im Bild. Der Suchbereich kann vorher definiert werden.



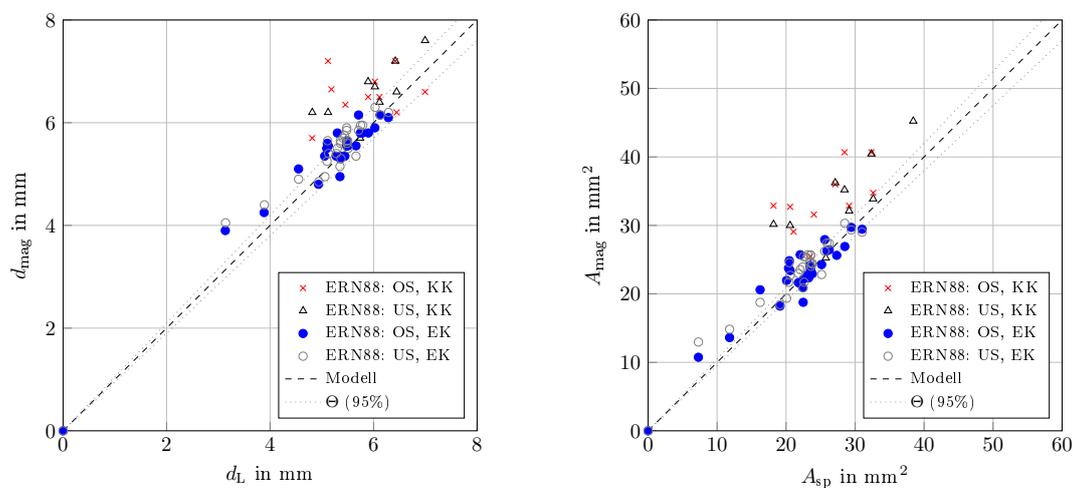
**Abbildung 9.5:** ERN88: Vergleich zwischen Ober- und Unterseite der Remanenzmessung (EK)

Unzureichend verschweißte Proben und auch Haftscheidungen („Zinkkleber“), wie in Abbildung 9.6 zu sehen ist, können eindeutig festgestellt werden. Die Remanenzmessungen weisen sowohl für die Ober- als auch für die Unterseite der Proben keine klaren Strukturen auf. Dadurch werden der Durchmesser  $d_{\text{mag}}$  und die Konturinnenfläche  $A_{\text{mag}}$  zu groß ausgegeben ( $d_{\text{mag}}=11,45 \text{ mm}$ ,  $A_{\text{mag}}=115 \text{ mm}^2$ ). Des Weiteren befinden sich die gemessenen Flussdichten fast vollständig im positiven Bereich für die Oberseite und im negativen Bereich für die Unterseite. Diese Proben weisen kein oder ein sehr geringes Volumen auf, an denen die Bleche über eine Stahl-Stahl-Verbindung miteinander verschweißt sind. Aus diesem Grund kommt es nicht zur Konzentration der Flusslinien, wie bei einem gut ausgeprägten Schweißpunkt.



**Abbildung 9.6:** ERN88: Detektion von Haftscheidungen

Die Auswertung der Messdaten bezüglich  $d_{\text{mag}}$  und  $A_{\text{mag}}$  und die Gegenüberstellung dieser mit den Linsendurchmessern  $d_l$  und Bruchflächen  $A_{\text{sp}}$  ist in Abbildung 9.7 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass durch den Einsatz von Stahlkernen die Ergebnisse weniger streuen und ein Großteil der Proben im Bereich des Konfidenzintervalls  $\Theta=95\%$  liegen. Der Vergleich von Blechober- (OS) mit Blechunterseite (US) zeigt auch, dass die jeweiligen Messergebnisse mit Stahlkernen weniger voneinander abweichen als bei Kunststoffkernen. Die Ergebnisse bestätigen die theoretischen Annahmen und die numerische Simulation aus Abschnitt 6.2.



(a) Gegenüberstellung von Linsendurchmesser  $d_l$  und Durchmesser der Magnetfeldmessung  $d_{\text{mag}}$

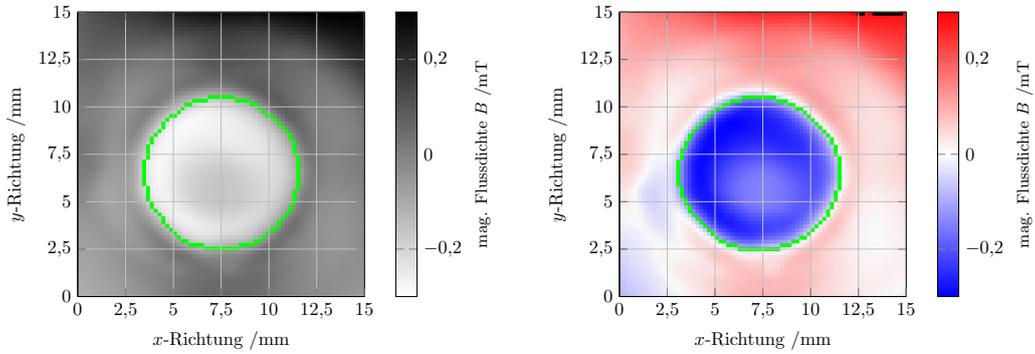
(b) Gegenüberstellung von Bruchfläche  $A_{\text{sp}}$  und Fläche der Magnetfeldmessung  $A_{\text{mag}}$

**Abbildung 9.7:** Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK88

### ERN66: HX340LAD+Z100MB ( $t = 2,0 \text{ mm}$ ) + HX340LAD+Z100MB ( $t = 2,0 \text{ mm}$ )

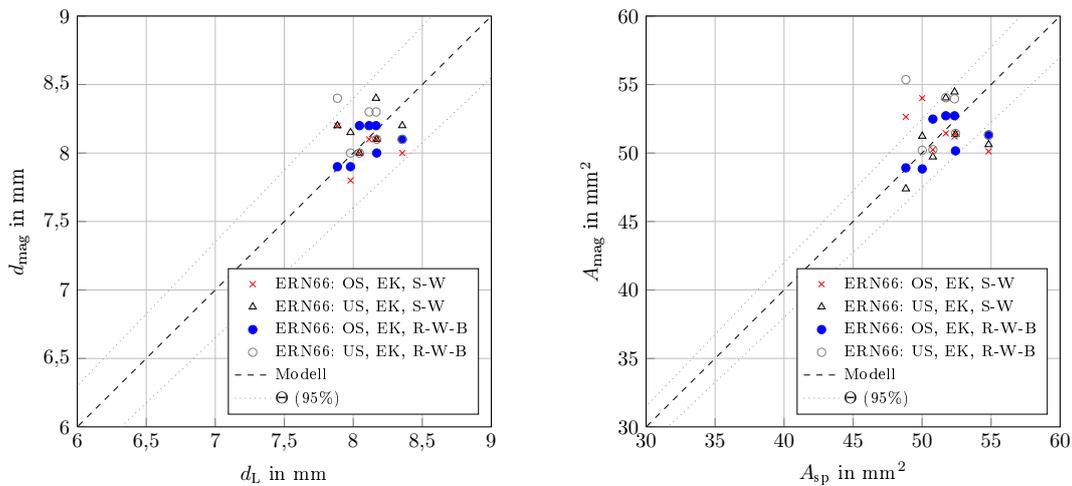
Auf Grund der Erkenntnisse aus der Serie ERN88 kommt bei den Untersuchungen nur der Eisenkern zum Einsatz, um eine möglichst starke Durchflutung der Schweißpunkte zu erreichen. Die Auswertung erfolgt zum Vergleich mit schwarz-weißer (S-W) und rot-weiß-blauer (R-W-B) Farbskala. Exemplarisch ist in Abbildung 9.8 der Ergebnisvergleich zwischen beiden Farbskalen dargestellt. Die Auswertung der MDK66 (ERN66) ist in Abbildung 9.9 zu sehen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Durchmesser und die Flächen nur im kleinen Maße streuen. Bei der Auswertung der Durchmesser liegt nur eine Probe außerhalb des Konfidenzintervalls  $\Theta$ . Ähnlich gut sind die Ergebnisse bezüglich der Flächenauswertung. Dies gilt so-

wohl für die Auswertung mit schwarz-weißer (S-W) und rot-weiß-blauer (R-W-B) Farbskala.



(a) ERN66: Schwarz-Weiß-Farbskala (S-W) ( $A_{\text{mag}}=50,24 \text{ mm}^2$ ,  $d_{\text{mag}}=8 \text{ mm}$ ) (b) ERN66: Rot-Weiß-Blau-Farbskala (R-W-B) ( $A_{\text{mag}}=52,48 \text{ mm}^2$ ,  $d_{\text{mag}}=8,4 \text{ mm}$ )

Abbildung 9.8: Ergebnisvergleich zwischen den unterschiedlichen Farbskalen



(a) Gegenüberstellung von Linsendurchmesser  $d_L$  und Durchmesser der Magnetfeldmessung  $d_{\text{mag}}$

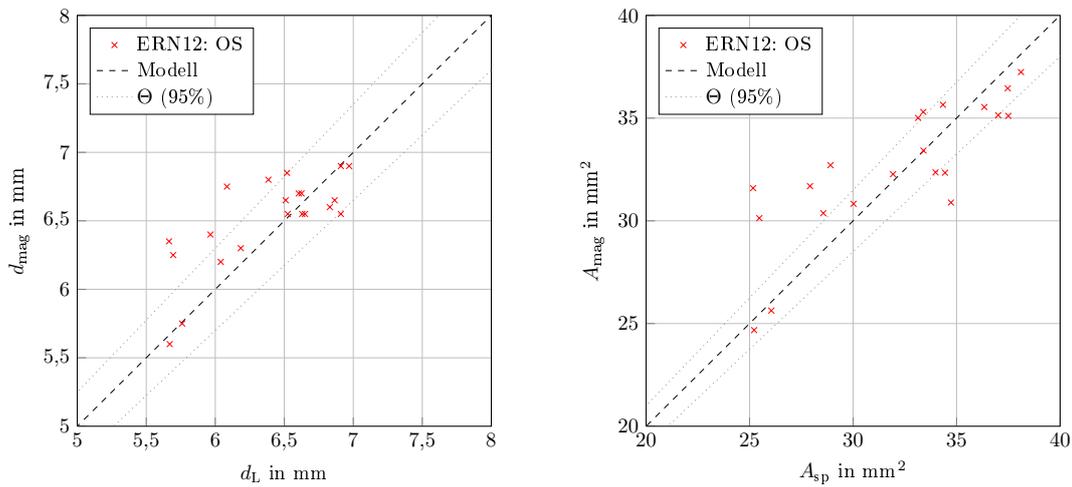
(b) Gegenüberstellung von Bruchfläche  $A_{\text{sp}}$  und Fläche der Magnetfeldmessung

Abbildung 9.9: Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK66

**ERN12: DC04+ZE 75/75 ( $t = 0,65 \text{ mm}$ ) + HX220YD+Z110MB ( $t = 0,65 \text{ mm}$ )**

Die Ergebnisse der Versuchsreihe ERN12 sind in Abbildung 9.10 zu sehen. Die Proben wurden mit Kunststoffkernen magnetisiert. Die Untersuchung zeigt, dass

auch bei unterschiedliche Werkstoffgüten gute Zusammenhänge zwischen  $d_l$  und  $d_{\text{mag}}$  sowie  $A_{\text{sp}}$  und  $A_{\text{mag}}$  vorliegen. Der überwiegende Teil der Messergebnisse liegt innerhalb des Konfidenzintervalls  $\Theta$  sowohl für die Durchmesser- als auch für die Flächenbewertung.



(a) Gegenüberstellung von Linsendurchmesser  $d_l$  und Durchmesser der Magnetfeldmessung  $d_{\text{mag}}$

(b) Gegenüberstellung von Bruchfläche  $A_{\text{sp}}$  und Fläche der Magnetfeldmessung  $A_{\text{mag}}$

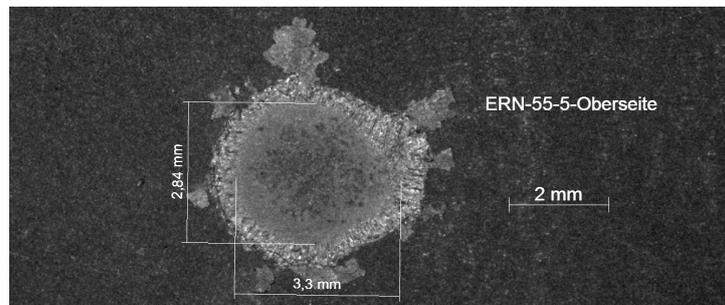
**Abbildung 9.10:** Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK12

### ERN55: 22MnB5+AS150 ( $t = 2,0 \text{ mm}$ ) + 22MnB5+AS150 ( $t = 2,0 \text{ mm}$ )

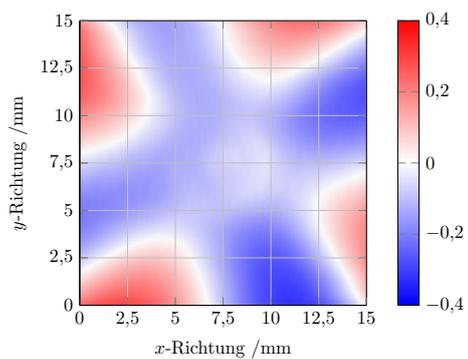
Die Intensitätsdiagramme der MDK55 sind nicht so deutlich in ihrer Struktur wie die bisher betrachteten Versuchsreihen. Für die Auswertung der MDK55 ist es hilfreich, die Beträge der partiellen Ableitungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung zu berechnen. In Abbildung 9.11 sind die Messdaten und auch deren partielle Ableitungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung einer Haftschiweißung zu sehen. Die Ergebnisse zeigen mit dem Vergleich der gebrochenen Probe P5, dass auch bei der MDK55 nicht verschweißte bzw. Haftschiweißungen zuverlässig detektiert werden können. Eine Gegenüberstellung zwischen Rohdaten und den daraus ermittelten Beträgen der partiellen Ableitungen sind in Abbildung 9.12 zu sehen. Die Kombination beider Plots vereinfacht die Auswertung der Messdaten. Die Ergebnisse in Abbildung 9.13 zeigen, dass die Modellannahme aus Abschnitt 9.1 für diese MDK nicht zutreffen. Durch die Einführung eines Korrekturwerts  $\kappa$  liegen die Messungen mit hoher Wahrscheinlichkeit

im Konfidenzintervall  $\Theta$ .  $\kappa$  ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine werkstoffabhängige Größe. Dies konnte jedoch im Rahmen des Projektes nicht verifiziert werden.

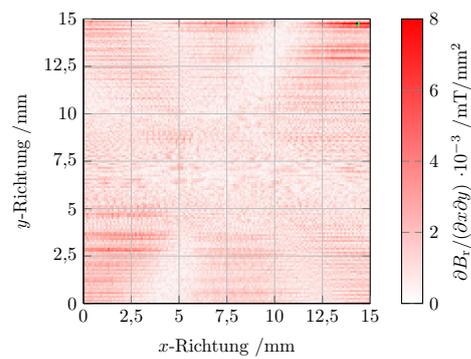
$$d_{\text{mag}} = d_l + \kappa_d \quad \text{und} \quad A_{\text{mag}} = A_{\text{sp}} + \kappa_A. \quad (9.5)$$



(a) ERN55: P5: Zerstörte Schweißprobe (Haftschweißung)

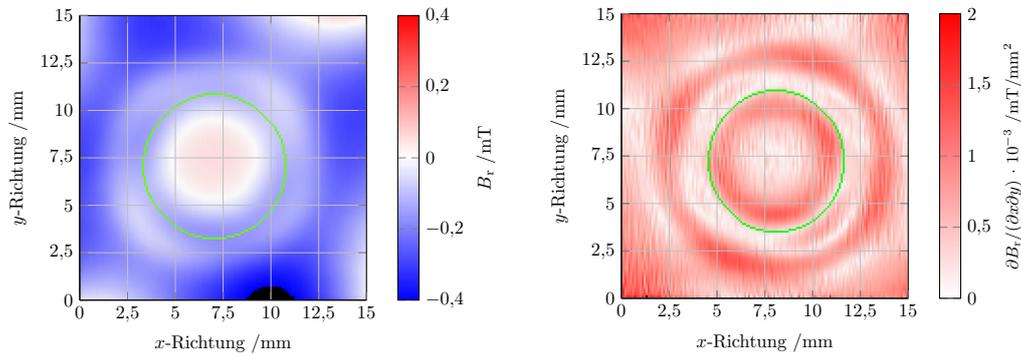


(b) ERN55: P5: Intensitätsdiagramm der flächigen Remanenzmessung



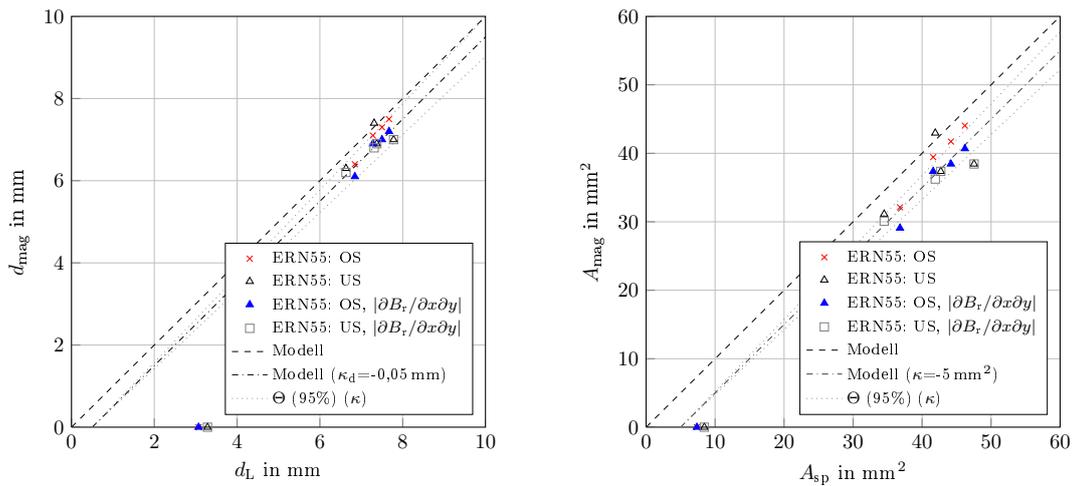
(c) ERN55: P5: Intensitätsdiagramm der berechneten Beträge der partiellen Ableitungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung

**Abbildung 9.11:** Gegenüberstellung zwischen Haftschweißung und Messdaten der Remanenzmessung (MDK55-P5)



(a) ERN55: P8: Intensitätsdiagramm der flächigen Remanenzmessung (b) ERN55: P8: Intensitätsdiagramm der berechneten Beträge der partiellen Ableitungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung

**Abbildung 9.12:** Berechnung der Beträge der partiellen Ableitungen in  $x$ - und  $y$ -Richtung aus den Messdaten der flächigen Remanenzmessung



(a) Gegenüberstellung von Linsendurchmesser  $d_l$  und Durchmesser der Magnetfeldmessung  $d_{\text{mag}}$  (b) Gegenüberstellung von Bruchfläche  $A_{\text{sp}}$  und Fläche der Magnetfeldmessung  $A_{\text{mag}}$

**Abbildung 9.13:** Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK55

**ERN13: DC04+ZE 75/75 ( $t = 0,65 \text{ mm}$ ) + HDT780C+Z150MB ( $t = 2,0 \text{ mm}$ )**

Bei den bisher untersuchten MDK haben beide Bleche die gleiche Blechdicke. Die MDK13 ist durch einen deutlichen Unterschied in den Blechdicken gekennzeichnet. Das Verhältnis der Blechdicken ist 1:3. Für die Untersuchungen werden die Bleche

mit Kunststoff- und Stahlkernen magnetisiert und jeweils die Ober- und Unterseite vermessen. In Abbildung 9.14 ist der Vergleich für die Probe ERN13-P3 abgebildet. Die ermittelten Konturen sind sehr ähnlich, was auch an den Messungen von  $d_{\text{mag}}$  und  $A_{\text{mag}}$  zu erkennen ist. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.15 zu sehen. Die Messwerte streuen etwas stärker um den Bereich der Modellannahme.

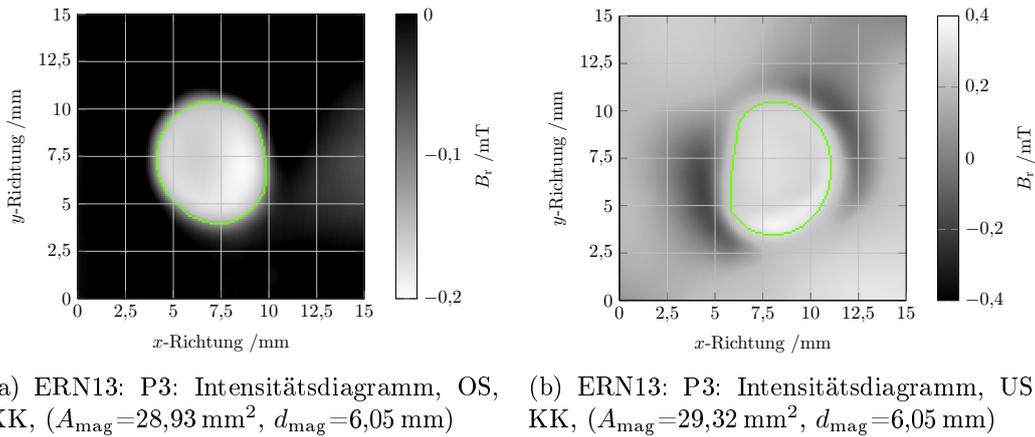


Abbildung 9.14: Vergleich der flächigen Remanenzmessung von Ober- mit Unterseite der MDK13

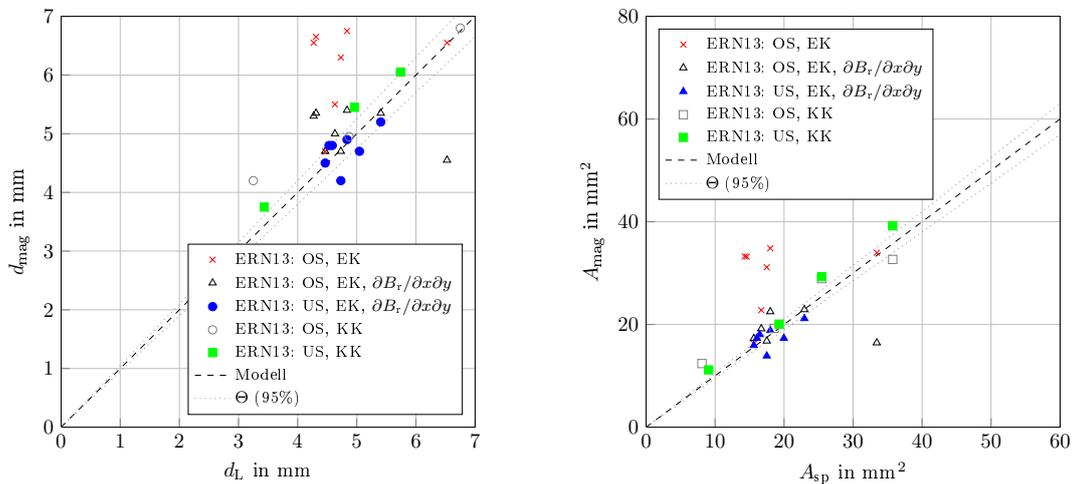


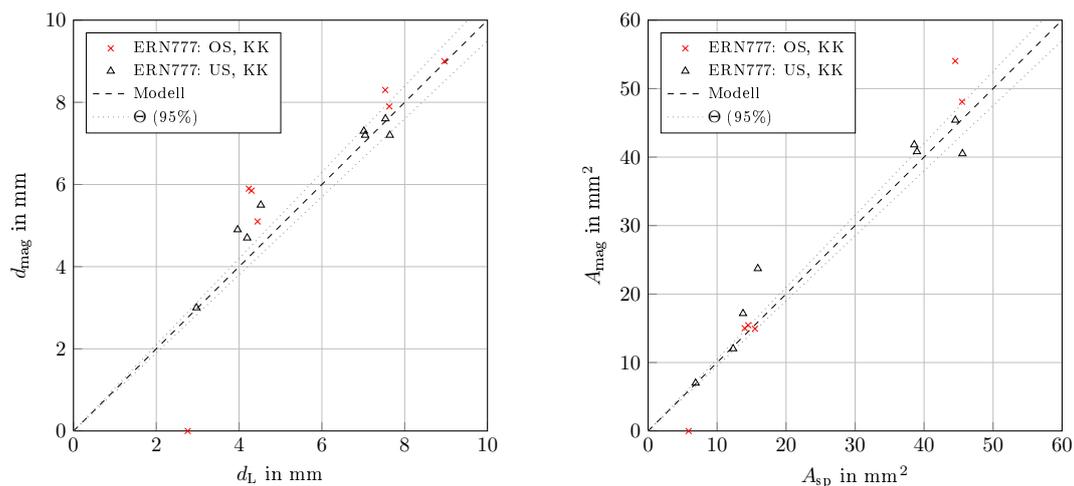
Abbildung 9.15: Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK13

### 9.2.3 Nachträgliches Magnetisieren von Dreiblechverbindungen

Die MDK777 und MDK154 werden mit Kunststoffkernen magnetisiert. Dies erlaubt den Vergleich beider Versuchsreihen.

**ERN777: HX340LAD+Z100MB ( $t = 1,5$  mm) + HX340LAD+Z100MB ( $t = 1,5$  mm) + HX340LAD+Z100MB ( $t = 1,5$  mm)**

Die Ergebnisse der ERN777 zeigen die Zusammenhänge aus den bisher untersuchten MDK beim nachträglichem Magnetisieren. Bei der MDK kommen Bleche gleicher Güte und Dicke zum Einsatz. Demzufolge entstehen in den beiden Fügebenen nahezu gleich große Verbindungen. Dies ist auch in den Ergebnissen der Remanenzmessung zu sehen (Abbildung 9.16).



(a) Gegenüberstellung von Linsendurchmesser  $d_L$  und Durchmesser der Magnetfeldmessung  $d_{mag}$

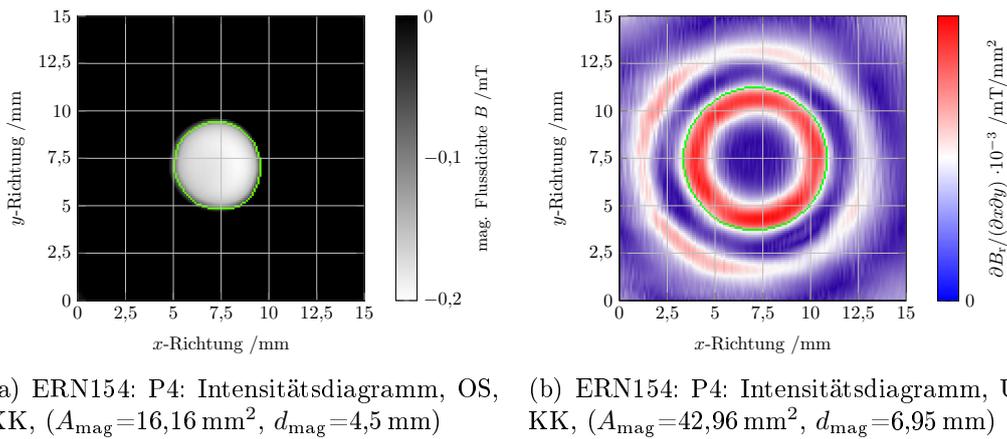
(b) Gegenüberstellung von Bruchfläche  $A_{sp}$  und Fläche der Magnetfeldmessung  $A_{mag}$

**Abbildung 9.16:** Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK777

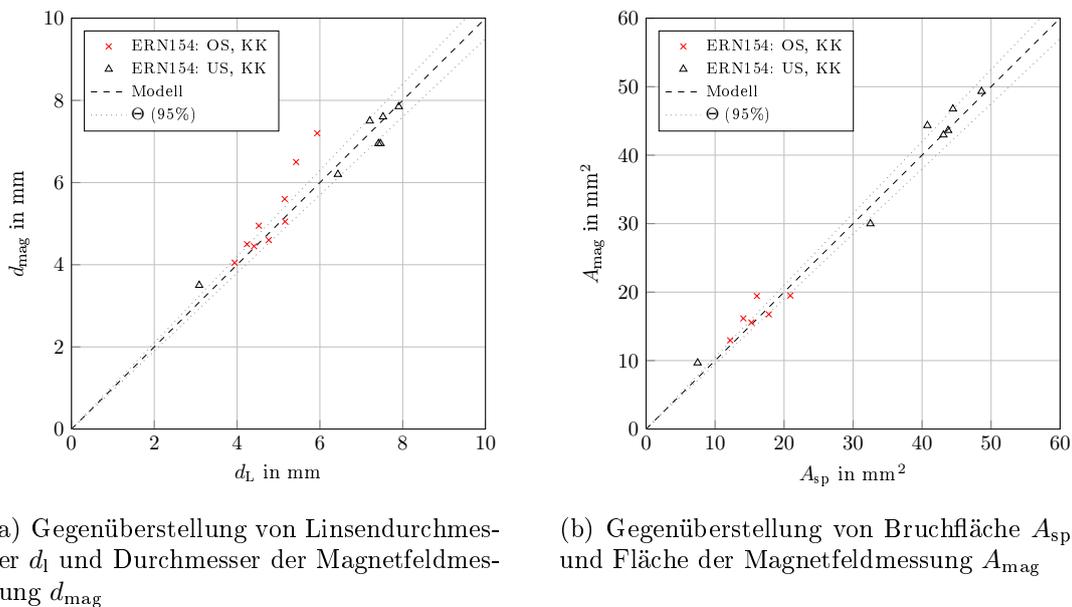
**ERN154: DC04+ZE 75/75 ( $t = 0,65$  mm) + 22MnB5+AS150 ( $t = 2,0$  mm) + 22MnB2+AS150 ( $t = 1,5$  mm)**

Die MDK154 ist eine Zusammensetzung aus zwei martensitischen höchstfesten und einem Dualphasenstahl, die sich in ihren werkstofftechnischen Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden. Dies bestätigen auch die Remanenzkurven

in Abbildung 9.2. Die Auswertung zeigt, dass die Oberseite (DC04+ZE 75/75 ( $t = 0,65 \text{ mm}$ )) mit Hilfe der Schwarz-Weiß-Farbskala eine gute Bewertung des Linsendurchmessers zulässt. Bei den Unterseiten können mittels partieller Ableitung in  $x$ - und  $y$ -Richtung, wie bei ERN55, gute Übereinstimmungen zwischen den Durchmessern und Flächen ermittelt werden. Die Ergebnisse in Abbildung 9.17 und 9.18 zeigen, dass eine separate Bewertung der Schnittebenen möglich ist.



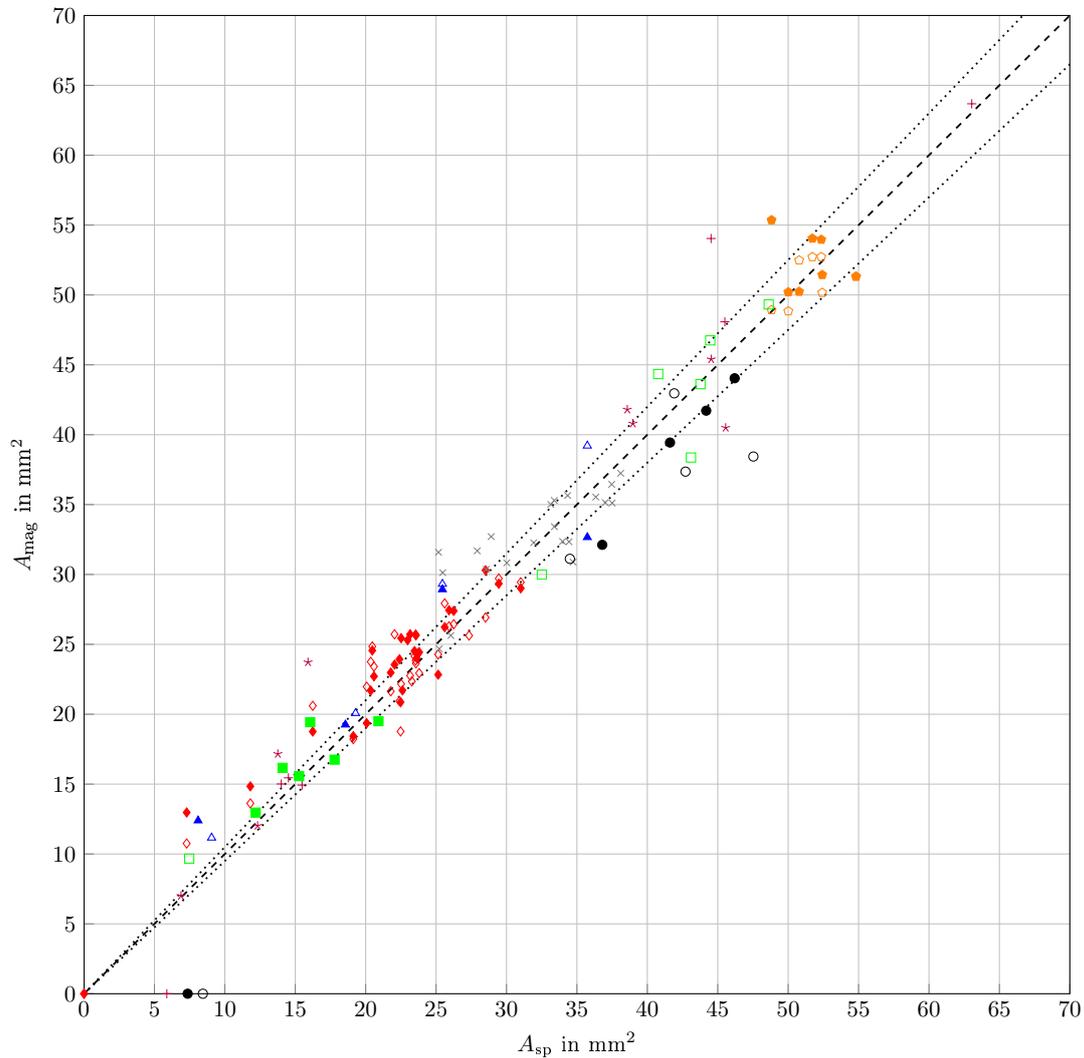
**Abbildung 9.17:** Vergleich der flächigen Remanenzmessung von Ober- mit Unterseite der MDK154



**Abbildung 9.18:** Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse der Magnetfeldmessung für MDK154

### 9.3 Zusammenfassung

Die erzielten Ergebnisse für die Magnetisierung nach dem Schweißen bestätigen die theoretischen Annahmen und die numerischen Vorbetrachtungen aus Kapitel 6. Die Auswertungen zeigen gute Korrelationen zwischen  $d_l$  und  $d_{\text{mag}}$  sowie zwischen  $A_{\text{sp}}$  und  $A_{\text{mag}}$ . Dies gilt sowohl für Zweiblech- als auch für Dreiblechverbindungen. Bei Dreiblechverbindungen wird jeweils an der Oberfläche der entsprechenden Schnittebene gemessen. Somit können beide Schnittebenen separat bewertet werden. Schlecht verschweißte Proben bzw. Haftschweißungen sind eindeutig detektierbar. Dies gilt auch für Proben, bei denen sich nur die Zinkbeschichtungen miteinander verbunden haben. Abbildung 9.19 zeigt die Ergebnisse aller MDK zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass mit Hilfe der entwickelten Algorithmen zur Auswertung der flächigen Remanenzfelder eine zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers möglich ist. Die Bewertung kann automatisiert erfolgen.



◇	MDK88: HX340LAD+Z110MB (1,0 mm) + HX340LAD+Z110MB (1,0 mm), OS
◆	MDK88: HX340LAD+Z110MB (1,0 mm) + HX340LAD+Z110MB (1,0 mm), US
○	MDK66: HX340LAD+Z100MB (2,0 mm) + HX340LAD+Z100MB (2,0 mm), OS
◊	MDK66: HX340LAD+Z100MB (2,0 mm) + HX340LAD+Z100MB (2,0 mm), US
+	MDK777: HX340LAD+Z100MB (1,5 mm) + HX340LAD+Z100MB (1,5 mm) + HX340LAD+Z100MB (1,5 mm), OS
*	MDK777: HX340LAD+Z100MB (1,5 mm) + HX340LAD+Z100MB (1,5 mm) + HX340LAD+Z100MB (1,5 mm), US
×	MDK12: DC04+ZE 75/75 (0,65 mm) + HX220YD+Z110MB (0,65 mm), OS
▲	MDK13: DC04+ZE 75/75 (0,65 mm) + HDT780C+Z150MB (2,0 mm), OS
△	MDK13: DC04+ZE 75/75 (0,65 mm) + HDT780C+Z150MB (2,0 mm), US
■	MDK154: DC04+ZE 75/75 (0,65 mm) + 22MnB5+AS150 (2,0 mm) 22MnB5+AS150 (1,5 mm), OS
□	MDK154: DC04+ZE 75/75 (0,65 mm) + 22MnB5+AS150 (2,0 mm) 22MnB5+AS150 (1,5 mm), US
●	MDK55: 22MnB5+AS150 (0,65 mm) +22MnB5+AS150 (0,65 mm), OS
○	MDK55: 22MnB5+AS150 (0,65 mm) +22MnB5+AS150 (2,0 mm), US
---	Modell
.....	Konfidenzintervall $\Theta$ (95%)

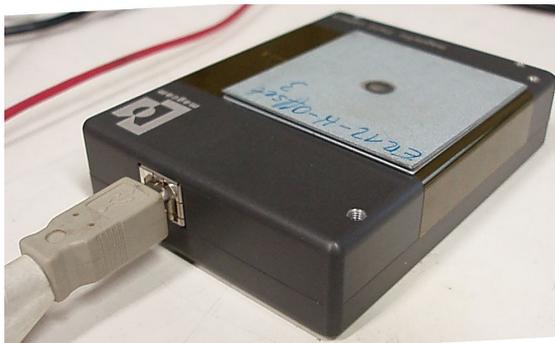
Abbildung 9.19: Ergebnisse der Flächegegenüberstellung aller untersuchten MDK

# 10 Evaluierungsmessungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

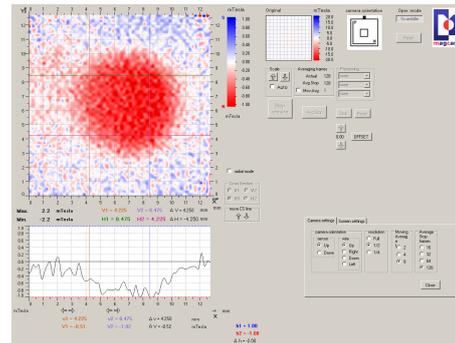
Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden Evaluierungsmessungen durchgeführt. Die Messungen sollen der Einschätzung der Ergebnisse zur Bewertung des Linsendurchmessers durch magnetische Verfahren dienen. Dafür werden durch Vertreter des Projektbegleitenden Ausschusses Prüfgeräte zur Verfügung gestellt. Zunächst soll gezeigt werden, dass mit sog. Magnetfeldkameras eine schnelle Erfassung von Magnetfeldern an Oberflächen möglich ist. Anschließend werden mit Hilfe von Ultraschallprüfgeräten Vergleichsmessungen durchgeführt.

## 10.1 Visualisierung von Magnetfeldern

Die im Projektbegleitendem Ausschuss vertretene Firma *MagCam NV* aus den Niederlanden stellte für die Untersuchungen der Magnetfelder eine Magnetfeldkamera zur Verfügung. Es handelt sich um ein handliches Gerät, welches mit einem 2D-Hallsensor-Array ( $128 \times 128$  Hallsensoren) auf einer Fläche von  $13 \times 13 \text{ mm}^2$  ausgestattet ist [20]. Dies ermöglicht eine sehr hohe Auflösung der gemessenen Magnetfeldstrukturen. Diese können innerhalb weniger Millisekunden erfasst werden. Zum Vergleich: der im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Versuchsstand *RMV03* benötigt für die gleiche Fläche ca.  $200 \text{ s} = 3,3 \text{ min}$ . Abbildung 10.1 zeigt links die Magnetfeldkamera und rechts das zugehörige Messprogramm.



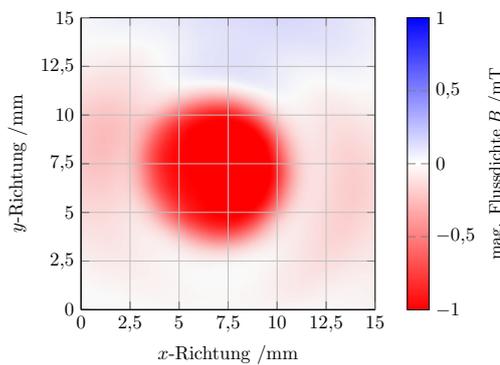
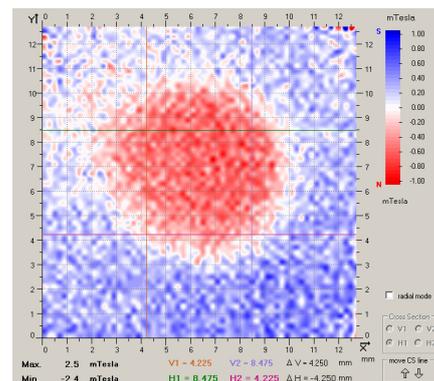
(a) Magnetfeldkamera MagCam



(b) Messprogramm der MagCam

**Abbildung 10.1:** Zur Verfügung gestellte Magnetfeldkamera der Firma *MagCam NV*

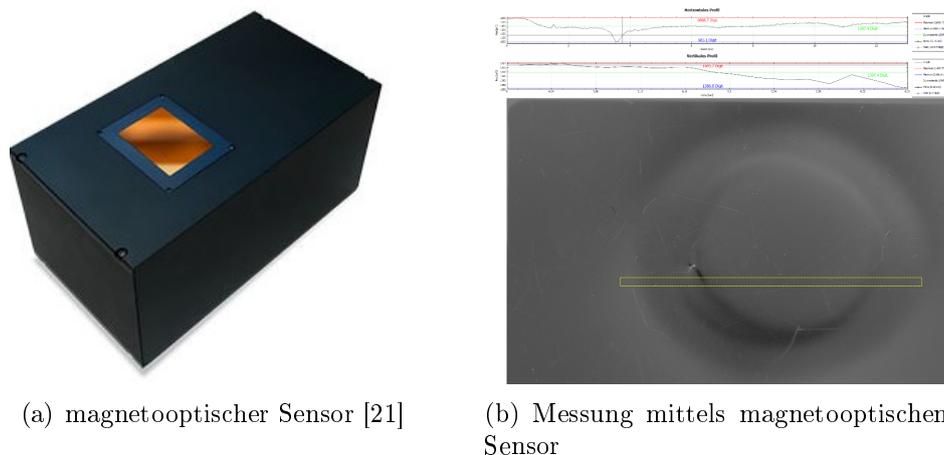
Der Vergleich in Abbildung 10.2 zwischen den Messdaten des im Vorhaben entwickelten Versuchsstands *RMV02* und der Magnetfeldkamera zeigt Übereinstimmungen in den Messergebnissen. Bei dem Vergleich handelt es sich um den nachträglich mit Eisenkern magnetisierten Schweißpunkt ERN13-P3.

(a) *RMV03*

(b) Magnetfeldkamera

**Abbildung 10.2:** Vergleich der Messergebnisse zwischen *RMV02* und Magnetfeldkamera

Eine weitere Möglichkeit der bildgebenden Visualisierung von Magnetfeldern sind magneto-optische Sensoren. Hierbei wird der Faraday-Effekt genutzt, der eine magnetfeldabhängige Drehung der Polarisationssebene von linear polarisiertem Licht bewirkt. Das Licht wird mit Hilfe einer Digitalkamera erfasst [21]. Im Rahmen des Projekts konnten Testmessungen in Zusammenarbeit mit der *Matesy GmbH* aus Jena durchgeführt werden. In Abbildung 10.3 ist das Gerät zur Messung *CMOS-MagView* und die Darstellung einer Testmessung zu sehen.



(a) magnetooptischer Sensor [21]

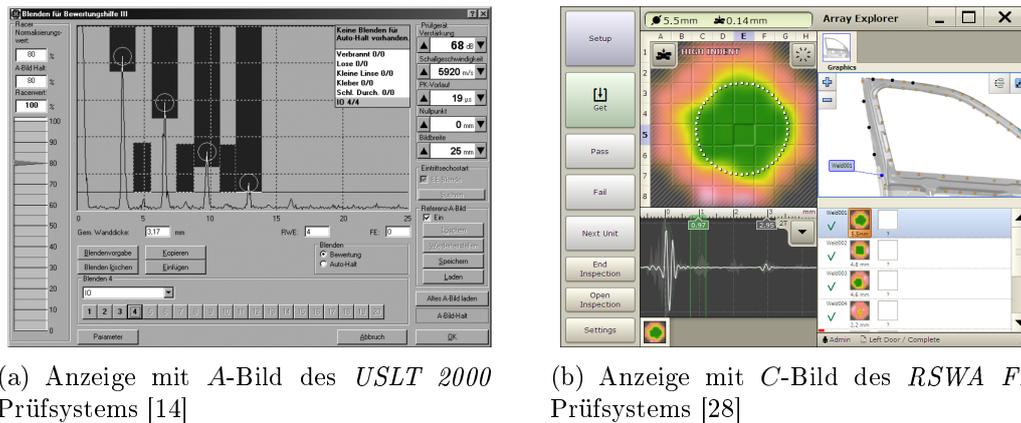
(b) Messung mittels magnetooptischem Sensor

**Abbildung 10.3:** Messgerät und Messergebnis mit magnetooptischen Sensoren

## 10.2 Evaluierungsmessung

### 10.2.1 Prüfsysteme für die Evaluierungsmessungen

Die Ultraschalltechnik ist im Bereich der ZfP sehr verbreitet. Für das Widerstandspunktschweißen gibt es am Markt eine große Auswahl an verschiedenen Prüfsystemen. Die *TCP Prüftechnik GmbH* konnte ein EMAT-Prüfsystem nicht zur Verfügung stellen, da die Firma dieses System nicht mehr in ihrem Portfolio führt. Die *GE Sensing & Inspection Technologies GmbH* stellt das *USLT 2000* mit der Software *UltraLOG* zur Verfügung. Die *IfU Diagnostic Systems GmbH* unterstützt das Vorhaben mit dem *RSWA F1* Prüfsystem der Firma *Tessonics*. Bei beiden Geräten handelt es sich um Ultraschallprüfgeräte, die speziell für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen entwickelt worden sind. Beim *USLT 2000* sind die Prüfköpfe mit jeweils einem Einzelwandler ausgestattet. Die Bewertung der Punktschweißlinse erfolgt durch die Analyse von *A*-Bildern. Dafür werden für die zu erwartenden Linsendurchmesser Prüfköpfe mit entsprechenden Durchmessern der Einzelwandler ausgewählt. Für die Untersuchungen stehen Prüfköpfe mit Durchmessern von 3,15 mm, 3,6 mm, 4 mm und 4,5 mm zur Verfügung. Beim *RSWA F1* System werden aus *A*-Bildern *C*-Bilder erzeugt, die die Linsenkontur wiedergeben. Der Prüfkopf ist mit einem US-Wandler-Array mit 52 Einzelschwingern ausgestattet. In Abbildung 10.4 sind die Anzeigen für die Auswertung beider Geräte abgebildet. Beide Geräte sind Stand der Technik und käuflich zu erwerben.



**Abbildung 10.4:** Anzeigen der Prüfsysteme für die Evaluierungsmessungen

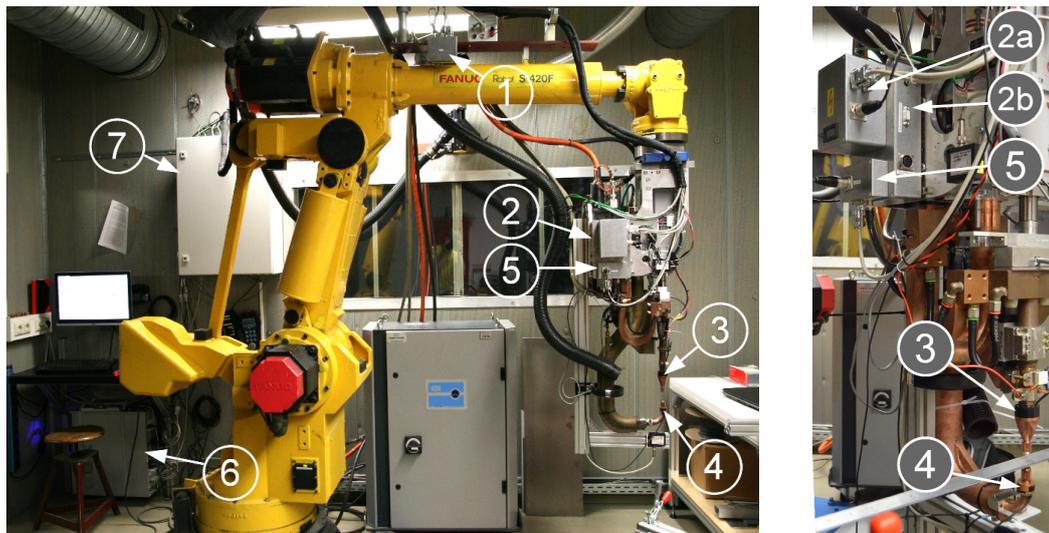
Ein weiteres Prüfsystem für die Evaluierungsmessungen ist das an der Technischen Universität Dresden entwickelte *USM 4.0*, welches auf dem Bosch Rexroth Ultraschallsystem *PSQ 6000* beruht. Es nutzt dessen Ultraschallsender und -empfänger. Das System ist vollständig in den Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen integriert. Jeder Schweißpunkt kann mit diesem System geprüft werden. Als Kenngröße für die Prüfung wird das absolute Maximum der Transmissionskurve herangezogen. Eine detaillierte Erläuterung zum Prüfsystem ist im Anhang B und in [15], [22] zu finden. Abbildung 10.5 zeigt den kompletten Versuchsstand mit integriertem Ultraschallprüfsystem.

### 10.2.2 Vergleich der Systeme

Die Algorithmen zur Bewertung des Linsendurchmessers der einzelnen Prüfsysteme sind sehr unterschiedlich. Der Vergleich der Systeme erfolgt mit dem statistischen Test nach *McNemar* [26]. Die entsprechende Kontingenztafel für den Test ist in Tabelle 10.1 dargestellt. Messung 1 ist die zerstörende Prüfung der Schweißpunkte, Messung 2 ist die ZfP mit den Prüfsystemen. Der Test vergleicht die Veränderungen zwischen Messung 1 und Messung 2. Die Nullhypothese  $H_0$  lautet: keine Veränderung. Die Gegenhypothese  $H_1$  lautet: es gibt eine Veränderung zwischen den Messungen. Dementsprechend gilt:

$$H_0 : B = C \quad (10.1)$$

$$H_1 : B \neq C \quad (10.2)$$



(a) Gesamter Versuchsstand

(b) Schweißzange mit angebrachter Messtechnik

**Abbildung 10.5:** Versuchsstand der Professur für Fügetechnik und Montage mit Punktschweißroboter und integriertem USM 4.0 mit den Komponenten: Pulsler (1), Ansteuerungen (2), US-Sender (3), US-Empfänger (4), Empfänger (5), Messrechner (6), Schaltschrank (7) [22]

Die Prüfgrößen werden mit einem Konfidenzniveau von 95% mit dem Tabellenwert des  $\chi^2$ -Tests für einen Freiheitsgrad ( $f=1$ ) verglichen ( $\chi_{1;0,95;\text{einseitig}}^2=2,706$ ). Ist die Prüfgröße kleiner als 2,706 gibt es kaum Veränderungen und die Nullhypothese kann nicht abgelehnt werden. Ist die Prüfgröße größer als 3,84 gibt es signifikante Veränderungen und die Nullhypothese wird verworfen. D.h., Messung 2 weicht deutlich von Messung 1 ab. Mit der Korrektur nach Edwards ( $=-1$ ) ergibt sich die Prüfgröße nach [26]:

$$P = \frac{(|B - C| - 1)^2}{B + C} \quad (10.3)$$

**Tabelle 10.1:** Kontingenztafel für den Vergleich der Systeme

		Messung 2	
		SP i.O.	SP n.i.O.
Messung 1	SP i.O.	$A$	$B$
	SP n.i.O.	$C$	$D$

SP: Schweißpunkt, i.O.: in Ordnung, n.i.O.: in Ordnung

Die Entscheidungen werden für jeden einzelnen Schweißpunkt getroffen:

- A:** Der Schweißpunkt ist nach Messung 1 und 2 i.O. und nicht größer als 10% aus Messung 1, kann jedoch kleiner sein, solange sich kein n.i.O Schweißpunkt ergibt. Das *USLT 2000* Prüfgerät gibt keinen Wert für einen geschätzten Durchmesser aus. *A* wird vergeben, wenn die Schweißung mit einer Prüfkopfgröße im Bereich von  $3,5\sqrt{t}$  als i.O. angezeigt wird.
- B:** Der Schweißpunkt ist nach Messung 1 n.i.O. und nach Messung 2 i.O. Dies könnte z. B. eine Gefahr für den Kunden darstellen. (Fehler 1. Art)
- C:** Der Schweißpunkt ist nach Messung 1 i.O. und nach Messung 2 n.i.O. Dies könnte z. B. unnötige Kontrollarbeit bzw. Ausschuss darstellen, was als unproduktiv gilt. (Fehler 2. Art)
- D:** Der Schweißpunkt ist nach Messung 1 und Messung 2 n.i.O. Der fehlerhafte Schweißpunkt wird erkannt.

Die einzelnen Prüfgrößen der Prüfsysteme sind in Tabelle 10.2 gelistet. Zum Teil gibt es signifikante Veränderungen zwischen Messung 1 und Messung 2, die im Folgenden erläutert werden.

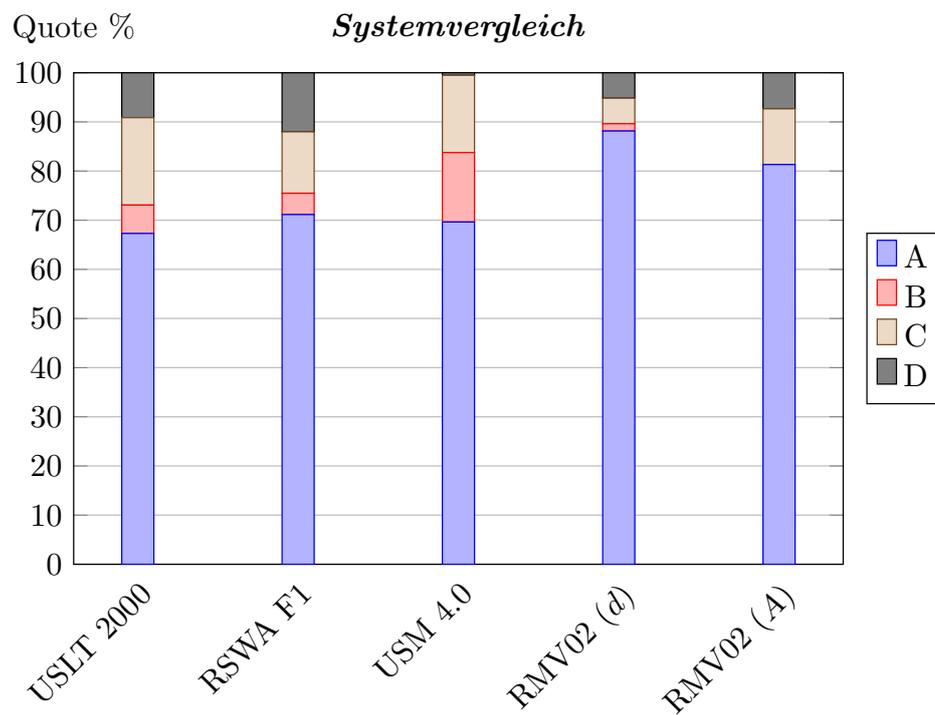
**Tabelle 10.2:** Prüfgrößen nach *McNemar* für den Vergleich der Systeme

MDK	Seite	USLT 2000	RSWA F1	USM 4.0	RMV02 (d)	RMV02 (A)
12	OS	4,17	0,00	1,33	0,00	0,50
13	OS	4,27	5,14	2,50	1,33	2,25
55	OS	4,17	9,09	3,13	0,00	0,00
88	OS	4,00	9,09	0,80	0,00	2,25
66	OS	3,20	0,50	0,00		0,00
777	OS	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00
777	US	0,00	0,00			1,33
154	OS	6,13	0,50	18,38	0,00	1,33
154	US	4,90	11,53		0,00	0,00

In Abbildung 10.6 sind die relativen Häufigkeiten der auftretenden Merkmale *A*, *B*, *C* und *D* über alle MDK für jedes Prüfsystem abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die etablierten Prüfsysteme *USLT 2000* und *RSWA F1* sehr ähnliche Verteilungen aufweisen. Für das *USLT 2000* sind im Allgemeinen sehr gute Erfahrungen und Fähigkeiten des Prüfpersonals notwendig. Anders ist es bei dem *RSWA*

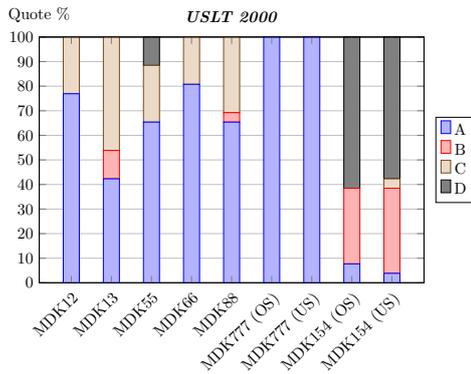
*F1*-Prüfsystem. Eigene Erfahrungen und auch die der industriellen Anwender bestätigen die Beobachtungen, dass weniger Erfahrung des Prüfpersonals notwendig ist. Dies äußert sich im größeren Anteil des *C*- Merkmals, wonach ein Schweißpunkt als unzureichend bewertet wird, er aber eigentlich i.O. ist (Fehler 2. Art). Deutliche Unterschiede treten bei den Systemen hauptsächlich bei den MDK13 und MDK154 auf. Diese Verbindungen weisen in ihrer Dickenkombination sehr große Differenzen auf. Speziell bei der MDK154 kam es bei den Schweißversuchen durchweg zu schlechten und unzureichenden Anbindungen zwischen dem dünnsten (1:  $t=0,65$  mm) und dem mittleren Blech (5:  $t=2,0$  mm). Systeme mit integralen Messwerten (*USLT 2000*, *USM 4.0*) haben Schwierigkeiten, dies als fehlerhafte Verbindung zuverlässig zu detektieren. Es treten vermehrt Fehler 1. Art auf. Das *RSWA F1* weist auch bei der MDK154 deutliche Unterschiede im Vergleich zu den anderen MDK auf. Die sichere Detektion der fehlerhaften Verbindung ist von der Prüfseite abhängig. Wird der Prüfkopf auf das dünne Blech aufgesetzt (OS: Oberseite), ist das Prüfergebnis wesentlich zuverlässiger als wenn von der gegenüberliegenden Seite geprüft wird (US: Unterseite). Für das *USM 4.0* liegen keine Ergebnisse für die Unterseite vor, da im Prozess gemessen wird.

Die Ergebnisse der nachträglichen Magnetisierung zeigen, dass das in dem Forschungsvorhaben entwickelte Prüfsystem *RMV02* sowohl für die Auswertung über den Durchmesser  $d_{\text{mag}}$  als auch über die Fläche  $A_{\text{mag}}$  eine hohe Zuverlässigkeit in der Bewertung des Linsendurchmessers liefert. Die Ergebnisse zeigen einen großen Vorteil des *RMVE02*-Prüfsystems. Es treten selten Fehler 2. Art auf, die zum großen Teil auf das Prüfpersonal zurückgehen. Es reagiert unempfindlicher bezüglich der Erfahrungen des Prüfpersonals und dessen Übung im Umgang mit dem System. Es ist zu bemerken, dass aus Gründen des Projektverlaufes die Auswertung nicht auf die gleichen Schweißproben wie bei den anderen Systemen angewendet werden konnten. Die Ergebnisse wurden dennoch durch die zerstörende Prüfung erzielt, was einen Vergleich zulässt.

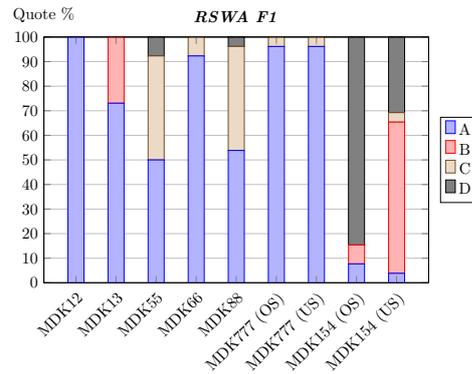


**Abbildung 10.6:** Vergleich der Prüfsysteme für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen durch Evaluierungsmessungen

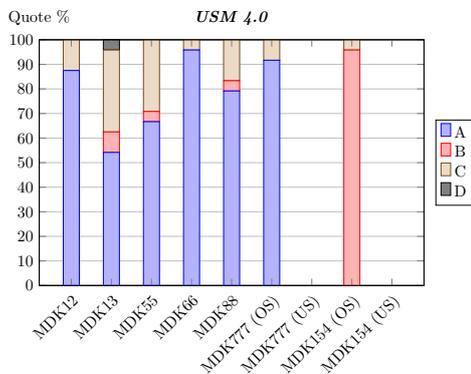
In Abbildung 10.7 sind die relativen Häufigkeiten der auftretenden Merkmale *A*, *B*, *C* und *D* (Tabelle 10.1) jeden Prüfsystems für jede MDK abgebildet.



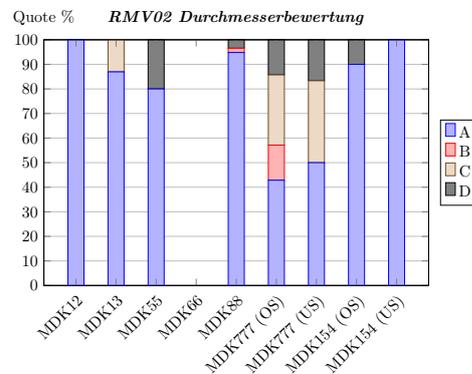
(a) Prüfsystem *USLT 2000*



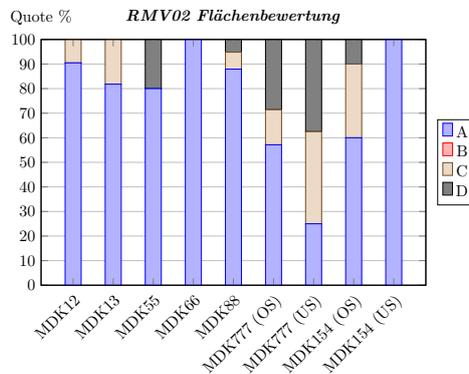
(b) Prüfsystem *RSWA F1*



(c) Prüfsystem *USM 4.0*



(d) Prüfsystem *RMV02,  $d_{mag}$*



(e) Prüfsystem *RMV02,  $A_{mag}$*

**Abbildung 10.7:** Vergleich der Prüfsysteme für die ZfP beim Widerstandspunktschweißen durch Evaluierungsmessungen für jede einzelne MDK

### 10.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung findet für das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte System zur ZfP beim Widerstandspunktschweißen *RMV02* statt. Für den Vergleich werden die Systeme der Anbieter herangezogen, die auch für die Evaluierungsmessungen bereitstanden. Die Evaluierungsmessungen zeigen, dass die Ergebnistreue der *RMV02*-Prüfvorrichtung auf gleichem Niveau liegen, wie die der etablierten Ultraschallprüfsysteme. Die Investitionskosten für das *RMV02* lassen sich nur abschätzen. Sie hängen sehr stark von der eingesetzten Sensorik ab. Ein großer Vorteil ist die unkritische Positionierung der Messsensorik. Die Versuche haben gezeigt, dass die Prüfung weniger von den Erfahrungen in der Handhabung des Prüfpersonals abhängen. Es ist vorstellbar, das *RMV02*-Prüfsystem als tragbares und handliches Gerät für den mobilen Einsatz zu konzipieren, ähnlich wie das *USLT 2000* und *RSWA F1*. Die Erfassung und die bildgebende Darstellung der Messdaten kann ähnlich schnell erfolgen, wie bei den etablierten Ultraschallsystemen. Somit entsteht kein Nachteil in der Produktivität des *RMV02*-Prüfsystems. Der Vergleich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Tabelle 10.3 zeigt, dass die unterschiedlichen Systeme nach den Anforderungen und den Randbedingungen, wie z. B. vorhandenes und qualifiziertes Prüfpersonal, des Unternehmens und des Kunden ausgewählt werden sollten. Die Systeme werden nach einzelnen Kriterien mit Zahlen von 1 bis 5 bewertet, wobei niedrigere Zahlen besser sind.

**Tabelle 10.3:** Vergleich der Systeme mit unterschiedlichen Kriterien für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Kriterium	USLT 2000	RSWA F1	USM 4.0	RMV02
Ergebnistreue	2	2	3	2
Investitionskosten	2	4	5	2-4
Erfahrung des Prüfpersonals	4	2	1	2
Handhabung	3	2	1	2
Mobilität	1	1	5	1
Zeit zw. Schweißung und Prüfergebnis	5	5	1	5
<b>Summe</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>14-16</b>

# 11 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“ (IGF-Nr. 17.539 BR, DVS-Nr. 04.058) wurde ein bisher nicht industriell genutzter Ansatz zur zerstörungsfreien Bewertung von Widerstandspunktschweißungen untersucht. Dieser Ansatz basiert auf der Magnetisierung des Schweißpunktes. Dabei wurden die beiden Varianten der Magnetisierung während und nach dem Schweißen betrachtet. Das Ziel der Forschungsvorhabens war es, mindestens eines dieser Varianten für den Einsatz zur 100% Kontrolle beim Widerstandspunktschweißen zu qualifizieren. Dafür sollten die mathematisch-physikalische Modelle dazu beitragen, die Ansätze zu verstehen, um diese gezielt weiterentwickeln zu können. Weiterhin sollten Vergleiche mit anderen Prüfsystemen durch Evaluierungsmessungen und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen. Die Prüfsysteme wurden durch Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt.

Durch die im Arbeitsplan festgelegten Schritte konnte das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die nachträgliche Magnetisierung sich sehr gut eignet, den Linsendurchmesser beim Widerstandspunktschweißen zu bewerten. Die Bewertung kann dabei unter Einhalten der beschriebenen Randbedingungen automatisch erfolgen. Durch die Nutzung von FE-Simulationen konnten die Zusammenhänge der Messergebnisse beschrieben werden. Die Simulationsergebnisse dienten zugleich der stetigen Weiterentwicklung der Versuchsstände. Die hohe Qualität der erzielten Messergebnisse beim Magnetisieren nach dem Schweißen konnten durch Evaluierungsmessungen bestätigt werden. Dabei wurden insgesamt vier unterschiedlich arbeitende Systeme zur ZfP beim Widerstandspunktschweißen miteinander verglichen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat gezeigt, dass die Systeme nach den Anforderungen des Unternehmens und des Kunden ausgewählt werden sollten.

# 12 Voraussichtlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

## 12.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass durch den neuen Ansatz zur ZfP beim Widerstandspunktschweißen durch magnetische Verfahren eine zuverlässige Bewertung des Linsendurchmessers erfolgen kann. Insbesondere haben die Forschungsergebnisse für das nachträgliche Magnetisieren gezeigt, dass im Bereich der ZfP mit magnetischen Verfahren beim Widerstandspunktschweißen ein neuer und bisher unzureichend untersuchter Beitrag geleistet wurde. Die Ergebnisse unterstreichen das hohe Potential des Verfahrens. Die Ergebnisse des Vorhabens sind öffentlich zugänglich und können daher von kmU ohne weiteres betrachtet werden.

## 12.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Das Widerstandspunktschweißen ist in der Serienfertigung von Metallstrukturen bis 3 mm Einzelblechdicke weit verbreitet. Es ist damit vorrangig im Kraft- und Schienenfahrzeugbau, im Metallbau und in der Gerätetechnik anzutreffen. Durch die hohe Produktivität und Wirtschaftlichkeit ist dieses Schweißverfahren im Bereich der kmU sehr stark vertreten. Die steigenden Anforderungen an die kmU durch die Auftraggeber und die zunehmende Vielfalt an Materialkombinationen machen es zwingend erforderlich, kosteneffizient zu produzieren, um am Markt

standhalten zu können. Einen großen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit kann der Einsatz der ZfP bringen. In der Serienfertigung hat sich zur zerstörungsfreien Kontrolle die Ultraschallprüfung als Impuls-Echo-Verfahren etabliert. Für diese Verfahren sind gut geschultes und erfahrenes Prüfpersonal erforderlich. Auch die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass Oberflächenunregelmäßigkeiten, sehr dünne oder sehr dicke Bleche, verzinkte Bleche und Linsendurchmesser im Bereich des Mindestmaßes Schwierigkeiten bei diesen Systemen bereiten. Es kann daher zu Fehlbewertungen kommen, die rechtliche Schritte nach sich ziehen können. Daher ist es umso wichtiger, zuverlässige Prüfsysteme einsetzen zu können. Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Prüfsystem hat gezeigt, dass es weniger vom Prüfpersonal abhängig ist und auch vollautomatisch eingesetzt werden kann. Dadurch kommt es zu weniger Fehlbewertungen, was schließlich zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit führt. Eine weitere Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im Bereich kmU ergibt sich für Hersteller von Prüfanlagen. Denn der beachtliche Anteil der Widerstandspunktschweißtechnik in den bereits genannten Industriezweigen kann erstmalig in vollem Umfang für Prüfmittelhersteller erschlossen werden.

# 13 Verwendung der Zuwendung und Erläuterungen zur Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

## 13.1 Erläuterungen zum Personaleinsatz

Die numerischen Untersuchungen zu den Vorgängen beim Magnetisieren von Punktschweißverbindungen wurden durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter konzipiert und validiert. Die Umsetzung der Ergebnisse in Versuchsstände und deren Integration in den vorhandenen Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen der Technischen Universität Dresden wurden ebenfalls durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter entwickelt, koordiniert und durchgeführt. Die experimentellen Versuche wurden durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter geplant, durchgeführt ausgewertet und mit den numerischen Berechnungen validiert. Bei den Arbeiten wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter durch studentische Hilfskräfte unterstützt. Der wissenschaftliche Mitarbeiter betreute die daraus entstandenen Studienarbeiten im vollen Umfang. Für die Präsentation des Forschungsvorhabens, sowohl intern als auch extern, war der wissenschaftliche Mitarbeiter verantwortlich. Er war auch für die Darstellung des Projektverlaufs und der Ergebnisse bei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses, Vorträgen und Veröffentlichungen zuständig. Die Realisierung einzelner Komponenten und der Aufbau des Prüfstandes, die zerstörenden und metallographischen Prüfungen wurden durch das technische Personal durchgeführt.

Für die erläuterten Arbeiten wurde entsprechend und bestimmungsgemäß des Forschungsantrags, Zuwendungsbescheids und des zahlenmäßigen Nachweises die Zuwendung für wiss.-techn. Personal mit 24 Mannmonaten verwendet.

Hiermit bestätigt die Forschungsstelle, dass die Arbeiten notwendig und angemessen waren.

## **13.2 Erläuterungen zur Geräteanschaffung**

Es wurden keine Geräte beschafft.

## **13.3 Erläuterungen zu Leistungen Dritter**

Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

# 14 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

## 14.1 Transferkonzept der Forschungsergebnisse

Im Zeitraum des Forschungsvorhabens wurden vier Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Es wurden aktuelle Zeitpläne und die Zwischenergebnisse präsentiert. Weiterhin wurden auf den Sitzungen des Fachausschuss 4 (FA4) des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik und verwandte Verfahren (DVS), auf deren jährlich stattfindenden FA 4-Gemeinschaftskolloquien, sowie auf den halbjährlich stattfindenden Treffen der AG V 3.9 „Prüfen von Widerstandsschweißverbindungen“ im Ausschusses für Technik des DVS die erzielten Zwischenergebnisse vor Fachpublikum vorgetragen. Darüber hinaus wurde das Forschungsprojekt im Rahmen von Vorträgen auf verschiedenen Tagungen und Kongressen vorgestellt. Die einzelnen Maßnahmen zum durchgeführten und geplanten Ergebnistransfer im Folgenden einzusehen.

### **Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum**

#### **Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss**

Ziel: Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen

1. PA-Sitzung: 22./23.01.2013, TU Dresden
2. PA-Sitzung: 25.09.2013 TU Dresden
3. PA-Sitzung: 29.04.2014, Dortmund
4. PA-Sitzung: 12.11.2014, TU Dresden

#### **Maßnahme B: Fachausschuss 4 des DVS**

Ziel: Informationen an die Unternehmen des PA über den FA 4, Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional

FA 4 Frühjahressitzung 2013: 14.05.2013, Düsseldorf

FA 4 Gemeinschaftskolloquium 2013: 28.10.2013, Düsseldorf

FA 4 Herbstsitzung 2013: 29.10.2013, Düsseldorf

FA 4 Frühjahressitzung 2014: 06.05.2014, Düsseldorf

FA 4 Gemeinschaftskolloquium 2014: 4.11.2014, Duisburg

FA 4 Herbstsitzung 2014: 5.11.2014, Duisburg

**Maßnahme C:** Präsentationen in der Arbeitsgruppe AG V 3.9 im Ausschuss für Technik des DVS

Ziel: Übernahme der Ergebnisse in das Merkblatt DVS 2916-5 und weitere, sowie in Arbeitsblätter und Normen

Frühjahressitzung 2013 der AG V 3.9: 23.04.2014, Erbach

Herbstsitzung 2013 der AG V 3.9: 5.11.2013, Dortmund

Frühjahressitzung 2014 der AG V 3.9: 28./29.04.2014, Dortmund

Herbstsitzung 2014 der AG V 3.9: 11./12.11.2014, TU Dresden

**Maßnahme D:** Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen

Ziel: Informieren potenzieller Anwender, vor allem kmU, national und regional

DVS Bezirksverband Dresden, Jahresmitgliederversammlung: 04.04.2013, TU Dresden

DVS Sondertagung Widerstandsschweißen 2013: 11./12.06.2013, Duisburg

60 Jahre Fertigungstechnik in Dresden: 20./21.11.2014, Dresden

**Maßnahme E:** Beratung von Herstellern prüftechnischer Ausrüstungen

Ziel: Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen

Zeitraum: fortlaufend

**Maßnahme F:** Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungsstelle oder bei den Unternehmen

Ziel: Transfer und Diskussion von Ergebnissen, Beratung

Zeitraum: fortlaufend

**Maßnahme H:** Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-, Diplomarbeiten

Ziel: Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium an der TU Dresden, Beitrag bei der jährlichen SFI Ausbildung in Dresden)

Zeitraum: fortlaufend

**Maßnahme I:** Bereitstellung von Information über das CIMTT, ebenso auf der Universitätsseite [www.tu-dresden.de/mw/if/ftm](http://www.tu-dresden.de/mw/if/ftm)

Ziel: Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen

Zeitraum: fortlaufend

### **Transfermaßnahmen über den Bearbeitungszeitraum hinaus**

**Maßnahme B:** Fachausschuss 4 des DVS

Ziel: Informationen an die Unternehmen des PA über den FA 4, Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional

FA 4 Frühjahressitzung 2015: 05.05.2015, Magdeburg

Geschäftsbericht der Forschungsvereinigung des DVS 2014: eingereicht

FA 4 Gemeinschaftskolloquium 2015

**Maßnahme C:** Präsentationen in der Arbeitsgruppe AG V 3.9 im Ausschuss für Technik des DVS

Ziel: Übernahme der Ergebnisse in das Merkblatt DVS 2916-5 und weitere, sowie in Arbeitsblätter und Normen

Frühjahressitzung 2015 der AG V 3.9: 21./22.04.2015, Leipzig

**Maßnahme D:** Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen

Ziel: Informieren potenzieller Anwender, vor allem kmU, national und regional

DGZfP Jahrestagung 2016, DVS Congress 2016

**Maßnahme H:** Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften

Ziel: Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft

Schweißen und Schneiden, NDT & E International und weitere

**Maßnahme I:** Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation

Ziel: Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse

### **Bereits erfolgt Veröffentlichungen**

- [A ] Mathiszik, C., Großmann, C., Zschetzsche, J, Füssel, U.: *Zerstörungsfreie Verbindungsbewertung beim Widerstandspunktschweißen mit elektromagnetischen Feldern und Ultraschall*. 22. Sondertagung Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, Diusburg, 2013.
- [B ] Mathiszik, C., Großmann, C., Zschetzsche, J, Füssel, U.: *Neue Ansätze in der zerstörungsfreien Prüfung beim Widerstandspunktschweißen*. DVS Media GmbH, DVS-Berichte Band 304, Düsseldorf. 2014
- [C ] Mathiszik, C., Großmann, C., Zschetzsche, J, Füssel, U.: *Neue Ansätze in der Messtechnik für die zerstörungsfreie Prüfung beim Widerstandspunktschweißen*. Fachsymposium 60 Jahre Fertigungstechnik in Dresden, 2014

## **14.2 Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts**

Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse in Form von Präsentationen, Vorträgen und Veröffentlichungen auf diversen Veranstaltungen präsentiert. Zu den Veranstaltungen zählen fachspezifische, etwa Sitzungen der AG V3.9 „Prüfen von Widerstandsschweißverbindungen“ im Ausschusses für Technik des DVS, sowie Sitzungen und Kolloquien des Fachausschuss 4 (FA4) „Widerstandsschweißen“ und fachübergreifende Symposien und Tagungen. Da die Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses ab der Hälfte der Projektlaufzeit im Rahmen der Sitzungen der AG V3.9 stattgefunden haben, war es auf diese Weise möglich, über den aktuellen Stand und den weiteren Verlauf des Vorhabens ausführlich zu diskutieren. Weitere Zusammenkünfte mit Unternehmen und Vertretern der Industrie ermöglichten es, die Ergebnisse zu präsentieren und über den aktuellen Stand zu diskutieren. Durch die bereits erfolgten Veröffentlichungen haben bereits während der Projektlaufzeit Unternehmen Kontakt mit der Forschungsstelle aufgenommen, um weitere

---

Informationen über die Ergebnisse zu erfahren. Dies mündete in Treffen in der Forschungsstelle und der Präsentation der Versuchsstände und Ergebnisse vor Ort.

Zukünftig ist die Zusammenarbeit mit der AG V3.9 „Prüfen von Widerstandsschweißverbindungen“ im Ausschusses für Technik des DVS im gleichen Umfang geplant. Weiterhin soll an den Sitzungen und Kolloquien des FA4 teilgenommen werden. Somit ergeben sich Präsentationsmöglichkeiten vor Fachleuten und potentiellen Anwendern. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden im Internetauftritt der Forschungsstelle ([www.tu-dresden.de/mw/if/ftm](http://www.tu-dresden.de/mw/if/ftm)) und über das CIMTT bereit gestellt. Weitere Tagungen und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und im Internet werden als vielversprechend für den Erfolg zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts eingeschätzt.

## 15 Projektbegleitender Ausschuss

Wir danken den mitarbeitenden Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die interessanten Diskussionen und Anregungen zur Projektdurchführung. Des Weiteren möchten wir uns bei allen Firmen bedanken, die das Projekt durch Sach- oder Dienstleistungen unterstützt und so zum Gelingen beigetragen haben. Besonderer Dank geht auch an Dr. T. Woodcock und den Mitarbeitern des *Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung* in Dresden (*IFW-Dresden*), die das Projekt durch die Erfassung der temperaturabhängigen Magnetisierungskurven unterstützt haben.

## 15.1 Zusammensetzung des PA

**Tabelle 15.1:** Unternehmen des PA

Unternehmen	KMU	Unternehmen	KMU
Harms & Wende GmbH & Co. KG Großmoorkehre 9 21079 Hamburg	X	voestalpine Stahl GmbH voestalpine-Straße 3 4020 Linz, Österreich	
Volkswagen Aktiengesellschaft 38436 Wolfsburg		Bosch Rexroth AG Berliner Straße 25 64711 Erbach	
Magcam NV Research Park Haasrode Romeinse Straat 18 B-3001 Leuven, Belgium	X	ELEKTRO-SCHWEISSTECHNIK- DRESDEN GmbH Tübinger Str. 7 01189 Dresden	X
Alia Technik GmbH Desmastraße 3/5 28832 Achim	X	ThyssenKrupp Steel Europe AG Eberhardtstraße 12 44145 Dortmund	
TCP Prüftechnik GmbH Harkortstraße 3 48163 Münster	X	IfU Diagnostic Systems GmbH Gottfried-Schenker-Str. 18 HRB Chemnitz 16529	X
GE Sensing & Inspection Technologies GmbH Robert-Bosch-Straße 3 50354 Hürth			

## 15.2 Kommentare des PA zu den Ergebnissen des Forschungsvorhabens

**René Dittrich**, *IfU Diagnostic Systems GmbH*, Mess- und Prüftechnik:

„Im Rahmen des genannten Projektes stellte die IfU Diagnostic Systems GmbH ein Ultraschallprüfgerät RSWA für Referenzmessungen zur Verfügung. Die Teilnahme an diesem Vorhaben ermöglichte es uns weitere zerstörungsfreie Prüfmethoden im Vergleich zum bildgebenden Ultraschall kennenzulernen. Die Zusammenarbeit war dabei vorbildlich und die erzielten Ergebnisse zeigen das Potential der ZfP von Schweißpunkten mittels magnetischer Prüfverfahren. Für die Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Industrie sind allerdings noch weitere Forschungsarbeiten notwendig, für die wir gerne wieder

als Partner zur Verfügung stehen.“

**Volker Arndt**, *Bosch Rexroth. The Drive & Control Company*, Development Resistance Welding:

„Die zerstörungsfreie Prüfung von Punktschweißverbindungen erfolgt industriell üblicherweise durch eine manuelle Ultraschallprüfung nach der Impuls-Echo-Methode. Das Ergebnis der Bewertung ist jedoch von den Fähigkeiten des Prüfers abhängig. Zur erfolgreichen Anwendung ist ein gut geschultes Personal mit ausreichend großer praktischer Erfahrung erforderlich.

Die Bewertungsergebnisse einer neuen zerstörungsfreien Prüfmethode sollte eine gute Korrelation zur zerstörenden Prüfung aufweisen und das Prüfverfahren praxisgerecht automatisiert für jeden Schweißpunkt angewendet werden können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren“ (IGF-Nr. 17.539 BR, DVS-Nr. 04.058) konnte ein neuer Ansatz verfolgt werden, der Aussagen über den Schweißpunkt ähnlich der etablierten Ultraschallprüfung liefert und darüber hinaus voraussichtlich auch automatisiert erfolgen kann. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen erste erfolgreiche Schritte zu den o.g. Zielen. Die Prüfaussagen müssen an weiteren, schwierig zu schweißenden Materialkombinationen auch unter Störgrößeneinfluss verifiziert und die Verfahrensgrenzen aufgezeigt werden. Für eine große Akzeptanz der neuen Prüfmethode im industriellen Umfeld ist die Umsetzung in eine praxisgerechte Anwendung des Verfahrens zwingend erforderlich.“

**Sabine Ritsche**, *voestalpine Stahl GmbH*, Schweißen und Kleben Kaltband / Forschung & Entwicklung:

„Das Forschungsvorhaben liefert einen interessanten Ansatz zur zerstörungsfreien Ermittlung des Linsendurchmessers. Die bisherigen Arbeiten haben gezeigt, dass diese Methode prinzipiell anwendbar ist. Bei weiteren Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet sollte die praxistaugliche Anwendbarkeit im Blick behalten werden.“

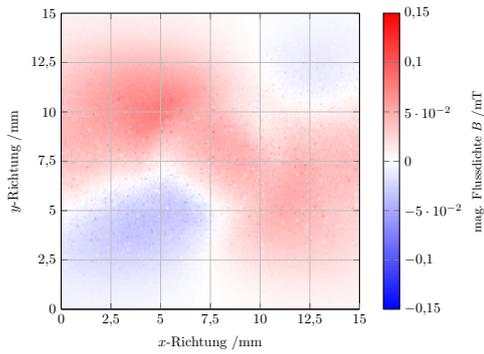
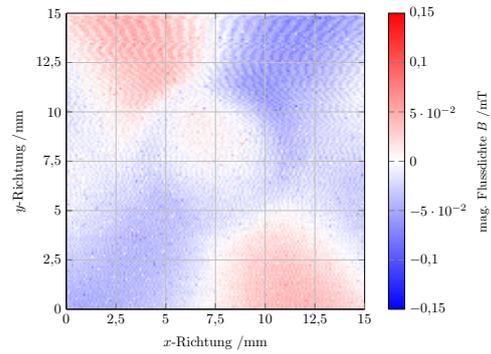
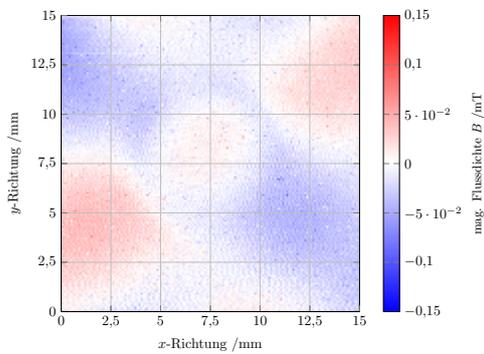
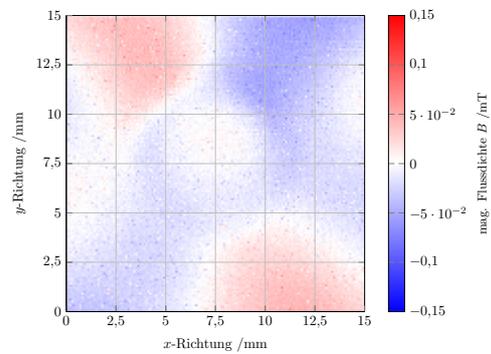
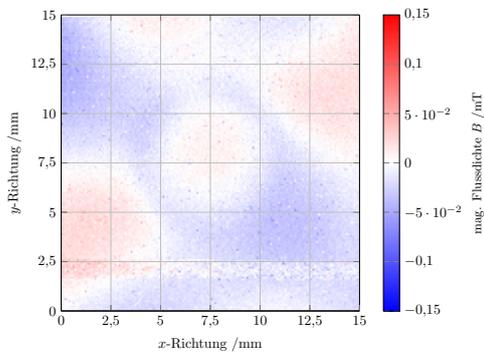
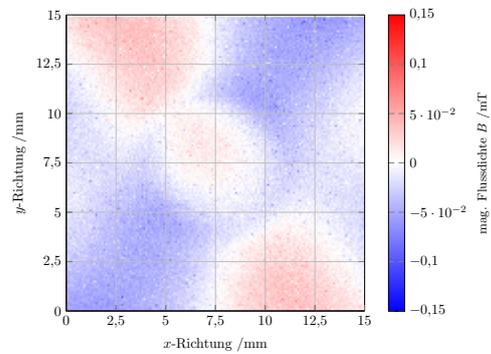
# A Versuchsergebnisse

## A.1 Magnetisieren während des Schweißens

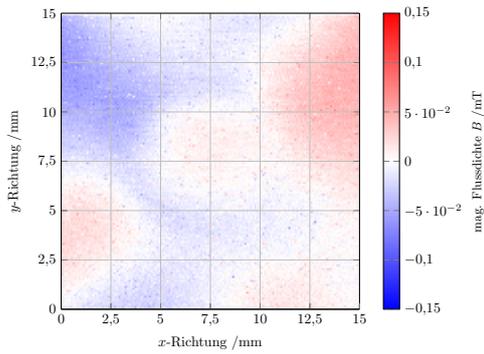
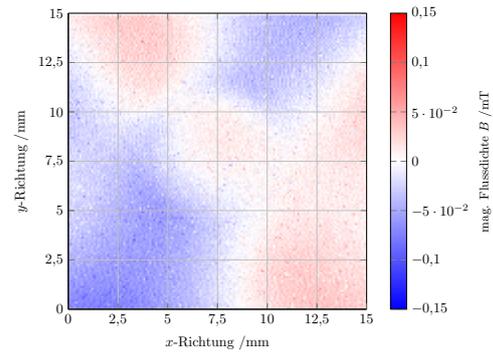
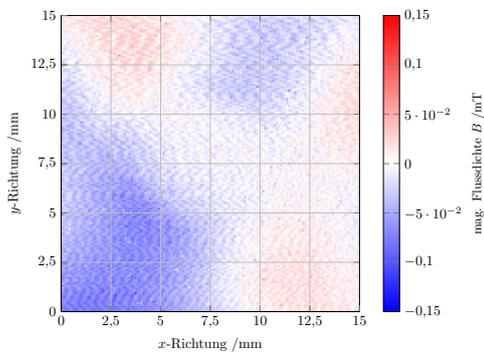
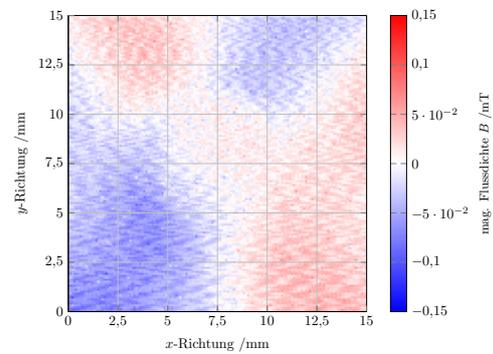
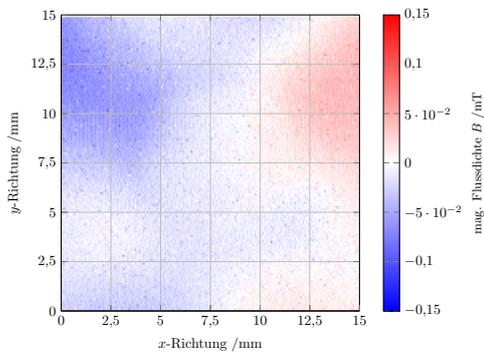
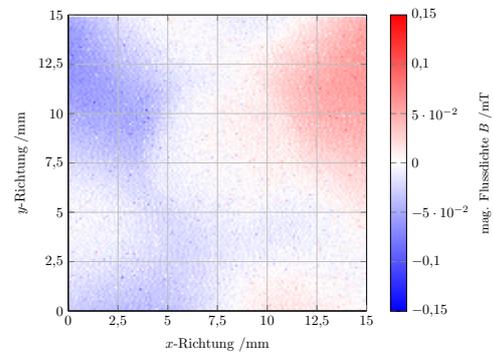
### A.1.1 Einfluss der Magnetisierungszeit

**Tabelle A.1:** Versuchsparameter für die Untersuchung der Magnetisierungszeit  $t_{\text{mag}}$  der Versuchsreihe ER66

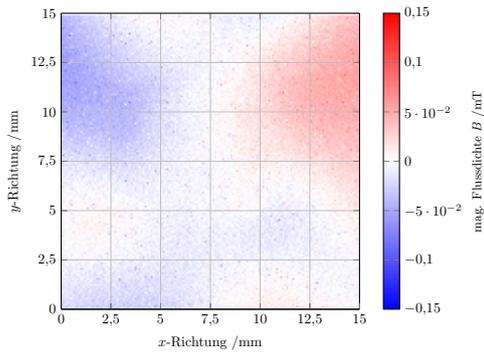
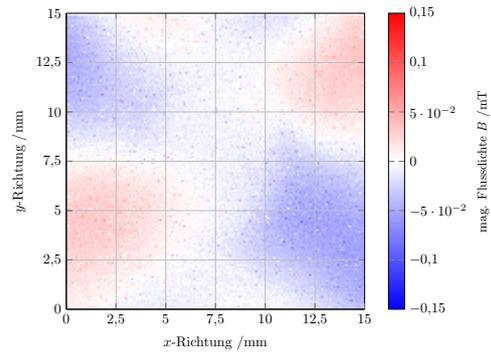
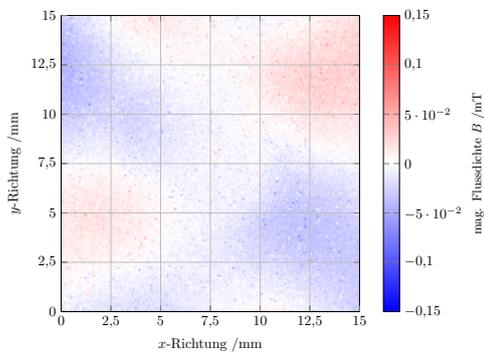
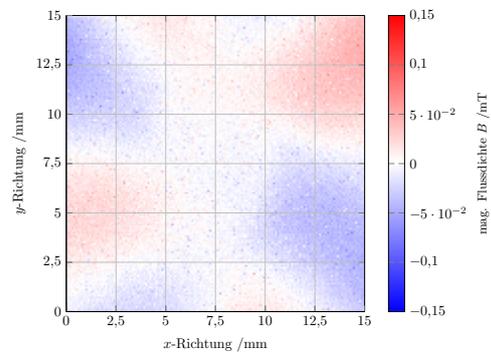
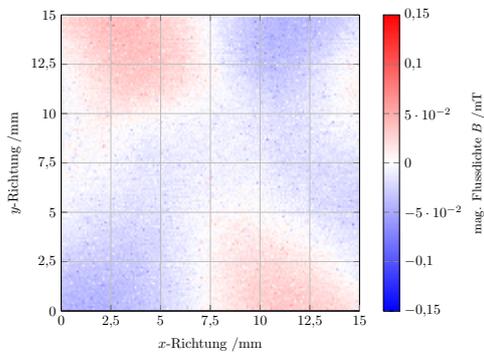
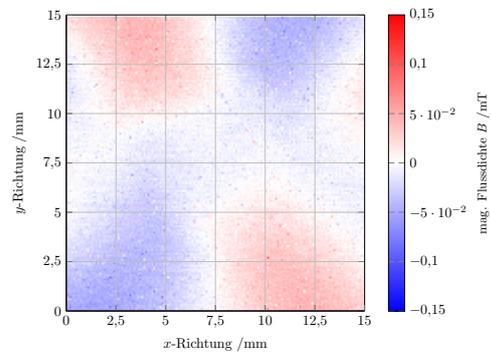
konst. Parameter	$t_s =$ 200 ms	$t_w =$ 700 ms	$t_h =$ 1200 ms	$F_E =$ 3,5 kN	$I_{\text{mag}} =$ 60 A		
var. Parameter	$I_w$	$t_{\text{mag}}$					
Nummer #	$I_w$ /kA	$t_{\text{mag}}$ /ms	$d_1$ /mm	Nummer #	$I_w$ /kA	$t_{\text{mag}}$ /ms	$d_1$ /mm
P1	8	1000	8,525	P2	7	1000	8,145
P3	8	900	8,475	P4	7	900	8,125
P5	8	800	8,59	P6	7	800	8,015
P7	8	700	8,42	P8	7	700	8,205
P9	8	600	8,59	P10	7	600	8,315
P11	8	500	8,43	P12	7	500	8,35
P13	8	400	8,405	P14	7	400	8,28
P15	8	300	8,215	P16	7	300	8,125
P17	8	200	8,02	P18	7	200	8,645
P19	8	100	8,215	P20	7	100	7,985

(a) ER66: P1,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=1000$  ms(b) ER66: P2,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=1000$  ms(c) ER66: P3,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=900$  ms(d) ER66: P4,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=900$  ms(e) ER66: P5,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=800$  ms(f) ER66: P6,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=800$  ms

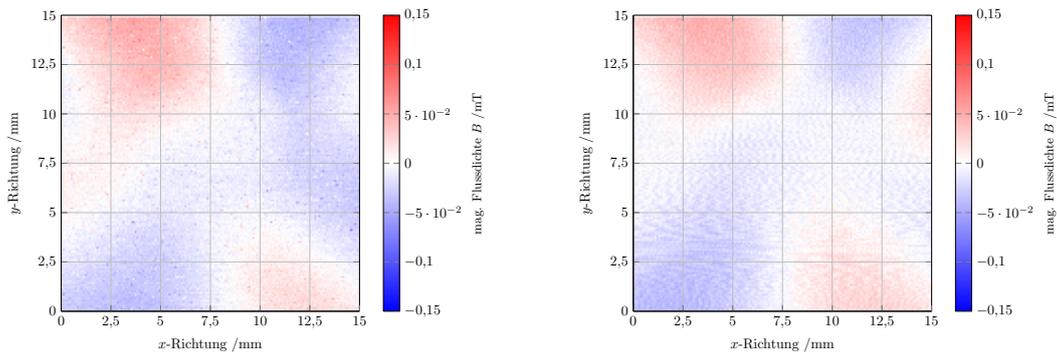
**Abbildung A.1:** ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.1)

(a) ER66: P7,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=700$  ms(b) ER66: P8,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=700$  ms(c) ER66: P9,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=600$  ms(d) ER66: P10,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=600$  ms(e) ER66: P11,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=500$  ms(f) ER66: P12,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=500$  ms

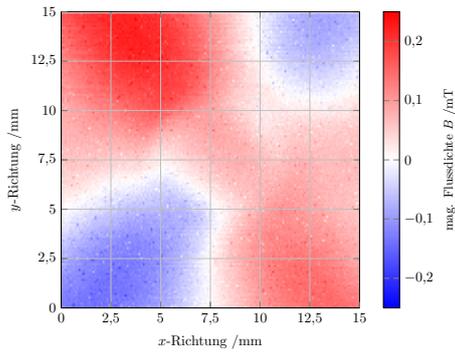
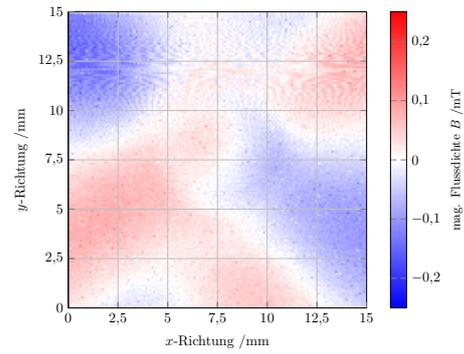
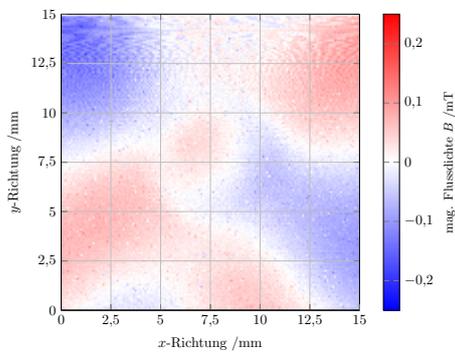
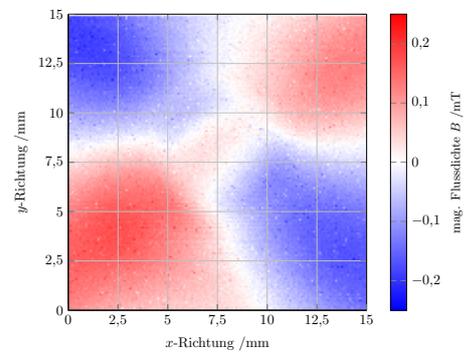
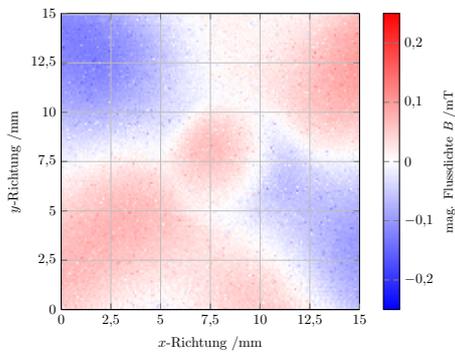
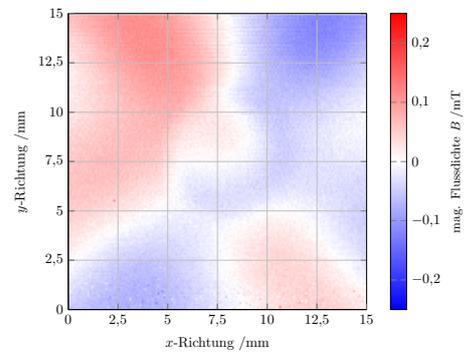
**Abbildung A.2:** ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.2)

(a) ER66: P13,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=400$  ms(b) ER66: P14,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=400$  ms(c) ER66: P15,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=300$  ms(d) ER66: P16,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=300$  ms(e) ER66: P17,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=200$  ms(f) ER66: P18,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=200$  ms

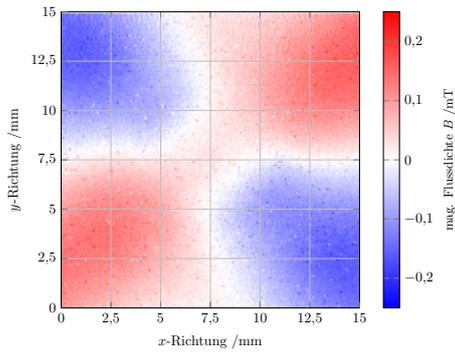
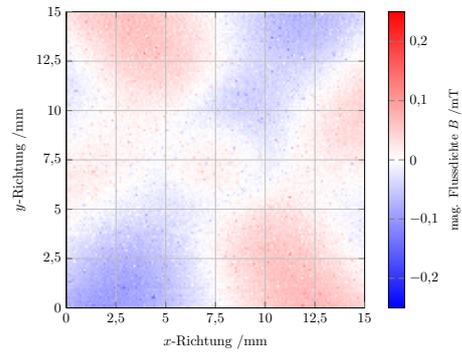
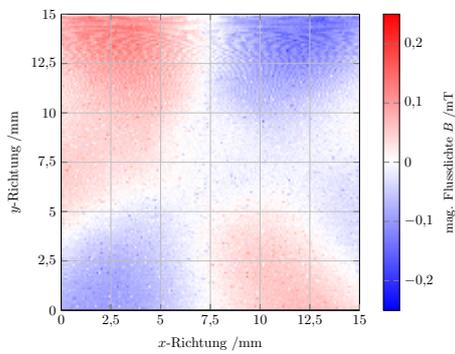
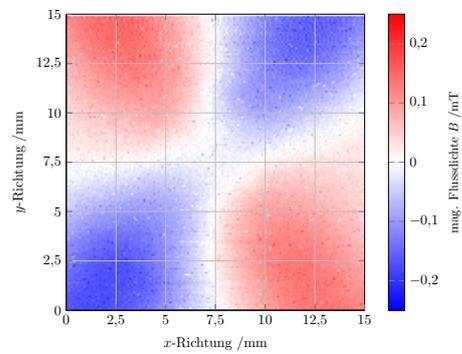
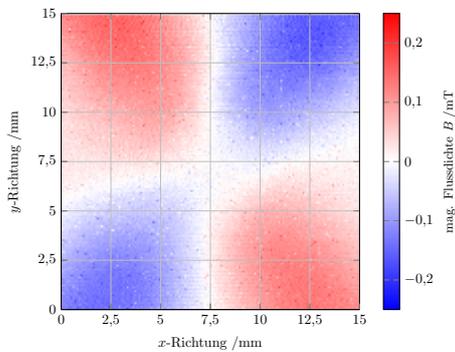
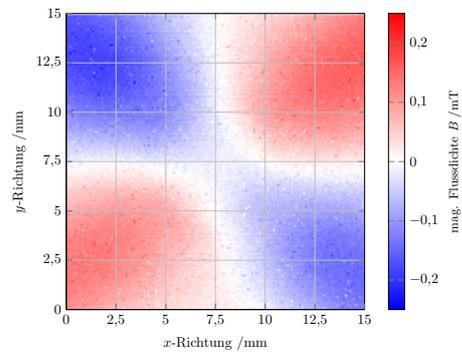
**Abbildung A.3:** ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.3)

(a) ER66: P19,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=100$  ms(b) ER66: P20,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=100$  ms**Abbildung A.4:** ER66: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.4)**Tabelle A.2:** Versuchsparameter für die Untersuchung der Magnetisierungszeit  $t_{\text{mag}}$  der Versuchsreihe ER88

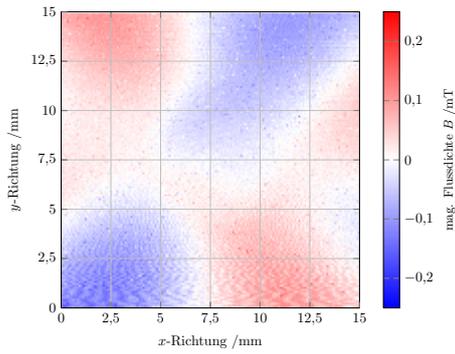
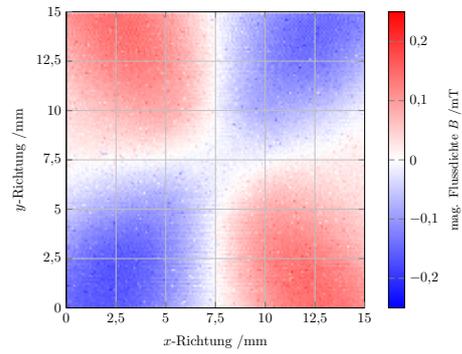
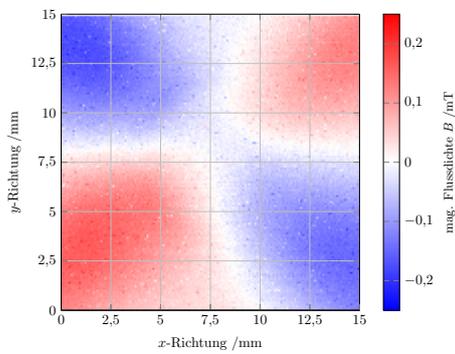
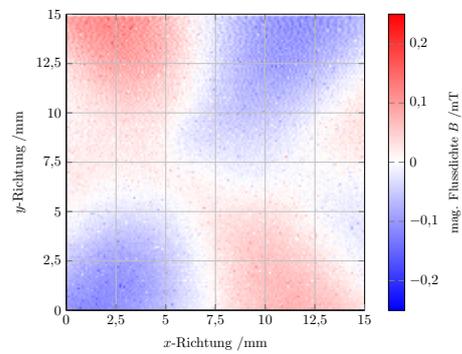
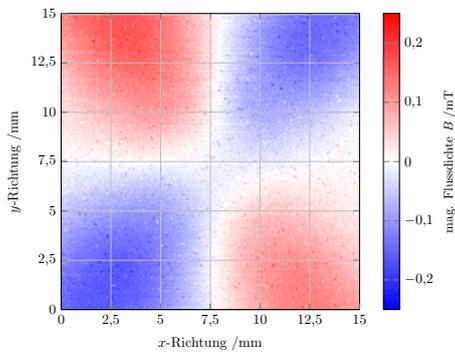
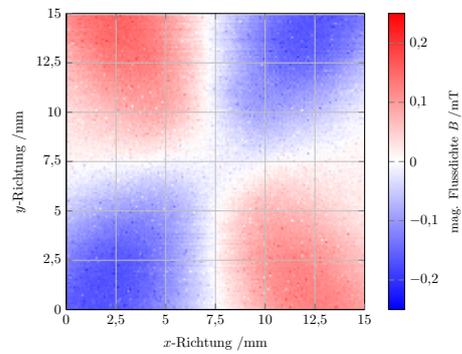
konst. Parameter	$t_s =$ 200 ms	$t_w =$ 300 ms	$t_h =$ 500 ms	$F_E =$ 2,5 kN	$I_{\text{mag}} =$ 60 A		
var. Parameter	$I_w$	$t_{\text{mag}}$					
Nummer #	$I_w$ /kA	$t_{\text{mag}}$ /ms	$d_1$ /mm	Nummer #	$I_w$ /kA	$t_{\text{mag}}$ /ms	$d_1$ /mm
P1	8	500	5,95	P2	7	500	4,73 (SB)
P3	8	400	6,04	P4	7	400	4,89
P5	8	300	6,08	P6	7	300	4,92 (SB)
P7	8	200	5,97	P8	7	200	5,05
P9	8	100	6,12	P10	7	100	5,3
P11	8	50	6,57	P12	7	50	5,25
P13	8	20	6,85	P14	7	20	5,29
P15	8	10	6,45	P16	7	10	5,5
P17	8	0	6,08	P18	7	0	5,8

(a) ER88: P1,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=500$  ms(b) ER88: P2,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=500$  ms(c) ER88: P3,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=400$  ms(d) ER88: P4,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=400$  ms(e) ER88: P5,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=300$  ms(f) ER88: P6,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=300$  ms

**Abbildung A.5:** ER88: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.1)

(a) ER88: P7,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=200$  ms(b) ER88: P8,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=200$  ms(c) ER88: P9,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=100$  ms(d) ER88: P10,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=100$  ms(e) ER88: P11,  $I_w=8$  kA,  $t_{\text{mag}}=50$  ms(f) ER88: P12,  $I_w=7$  kA,  $t_{\text{mag}}=50$  ms

**Abbildung A.6:** ER88: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.2)

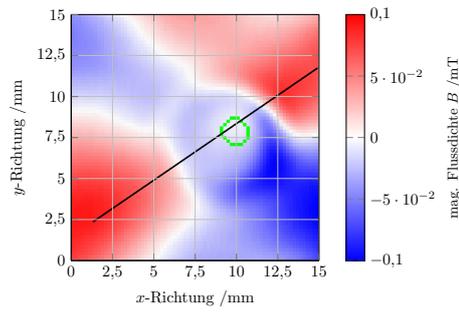
(a) ER88: P13,  $I_w=8\text{ kA}$ ,  $t_{\text{mag}}=20\text{ ms}$ (b) ER88: P14,  $I_w=7\text{ kA}$ ,  $t_{\text{mag}}=20\text{ ms}$ (c) ER88: P15,  $I_w=8\text{ kA}$ ,  $t_{\text{mag}}=10\text{ ms}$ (d) ER88: P16,  $I_w=7\text{ kA}$ ,  $t_{\text{mag}}=10\text{ ms}$ (e) ER88: P17,  $I_w=8\text{ kA}$ ,  $t_{\text{mag}}=0\text{ ms}$ (f) ER88: P18,  $I_w=7\text{ kA}$ ,  $t_{\text{mag}}=0\text{ ms}$ 

**Abbildung A.7:** ER88: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variabler Magnetisierungszeit (Tab.3)

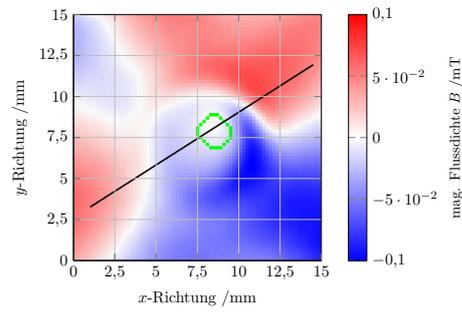
### A.1.2 Einfluss des Elektrodeneindrucks

**Tabelle A.3:** Versuchsparameter für die Untersuchung des Elektrodeneindrucks  $e$  der Versuchsreihe ER66

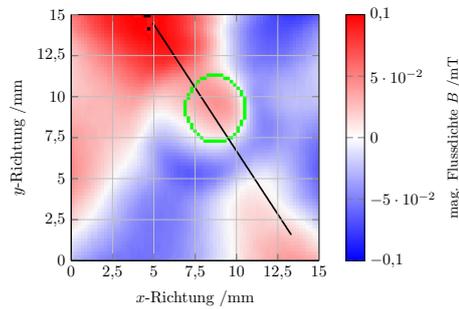
konst. Parameter	$t_s =$ 200 ms	$t_w =$ 300 ms	$t_h =$ 500 ms	$F_E =$ 2,5 kN	$I_{\text{mag}} =$ 35 A	$t_{\text{mag}}$ 400 ms	$t_{\text{mag.o}}$ 400 ms
var. Parameter	$I_w$						
Nummer #	$I_w$ /kA	$d_1$ /mm	$e$ /mm	$A_{\text{mag}}$ mm <sup>2</sup>	$A_{\text{sp}}$ mm <sup>2</sup>		
P21	6	7,55	0,185	2,08	44,71		
P22	6,4	7,28	0,176	3,4	41,56		
P23	6,8	8,2	0,272	11,36	52,59		
P24	7,2	8,4	0,28	17,92	55,41		
P25	7,6	8,44	0,307	16,64	55,88		
P26	8	8,88	0,324	21,6	61,93		
P27	8,4	9,46	0,428	32,16	70,20		
P28	8,8	9,66	0,426	28	73,28		



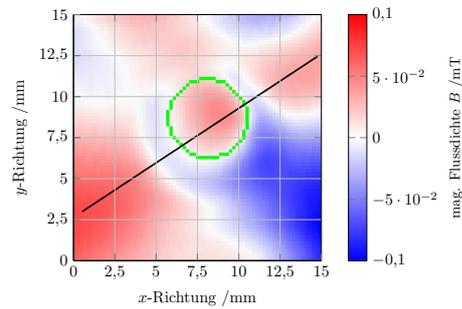
(a) ER66: P21,  $I_w=6$  kA



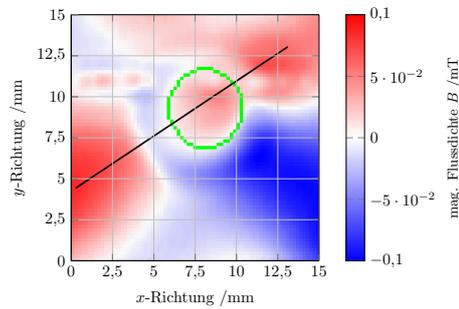
(b) ER66: P22,  $I_w=6,4$  kA



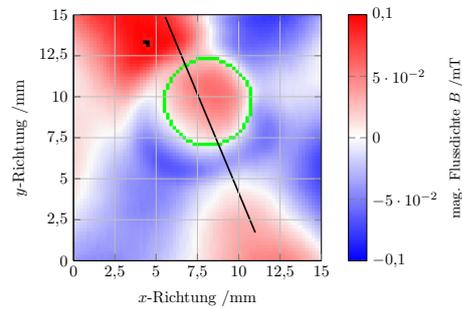
(c) ER66: P23,  $I_w=6,8$  kA



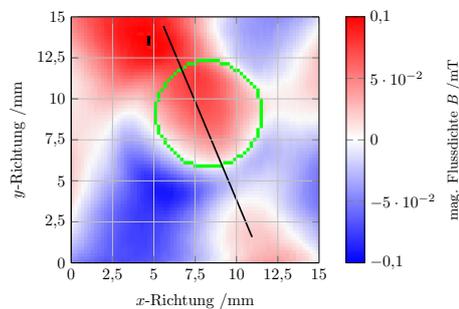
(d) ER66: P24,  $I_w=7,2$  kA



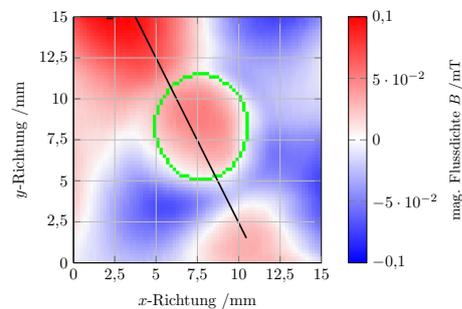
(e) ER66: P25,  $I_w=7,6$  kA



(f) ER66: P26,  $I_w=8$  kA



(g) ER66: P27,  $I_w=8,4$  kA



(h) ER66: P28,  $I_w=8,8$  kA

**Abbildung A.8:** ER66: Einfluss des Elektrodeneindrucks: Intensitätsplots der mag. Flussdichte mit variablem Schweißstrom

## B Ultraschallmodul 4.0 (USM 4.0)

Das *USM 4.0* ist mit eigenen Ansteuerungs- und Auswertesystemen ausgestattet, die in [15], [22] entwickelt und ausführlich beschrieben sind. Das System beruht auf dem Bosch Rexroth Ultraschallsystem *PSQ 6000* und nutzt dessen Ultraschallsender und -empfänger. Während des Schweißprozesses wird die Füge­stelle mit transversalen Ultraschallwellen, die eine Frequenz um 50 kHz aufweisen, durchschallt. Dazu werden der Ultraschallsender (Aktormodul) an der oberen und der Ultraschallempfänger (Sensor­modul) an der unteren Schweiß­elektrode im Kraftfluss installiert. Während des gesamten Schweißprozesses durchlaufen Ultraschallwellen die Schweißprobe. Die Signale werden vom Empfänger zum Messrechner gesendet. Die Auswertung erfolgt im aktuellen Status des Moduls noch nachträglich. Dabei kann die TM-Kurve für jeden Schweißpunkt ermittelt werden. Die Arbeit [22] zeigt verschiedene Möglichkeiten, einen Zusammenhang zwischen dem Linsendurchmesser und der TM-Kurve durch geeignete Kenngrößen herzustellen. Die TM-Kurve ist in Bezug zum Schweißprozess und dessen Zeitabschnitten in Abbildung B.1 mit wichtigen Kenngrößen eines Schweißpunktes exemplarisch dargestellt.

Bei senkrechtem Einfall ebener Wellen auf ebene Grenzflächen fällt der Einfluss des Einfallswinkels weg. Maßgeblichen Einfluss auf die Reflexion und Transmission der Wellen haben die Schallschnelle  $v$  und die Dichte  $\rho$  des jeweiligen Mediums. Das Produkt beider Größen ergibt die Schallimpedanz  $Z$  (Gleichung B.1). So kann der charakteristische Verlauf der TM-Kurve im Folgenden näherungsweise beschrieben werden.

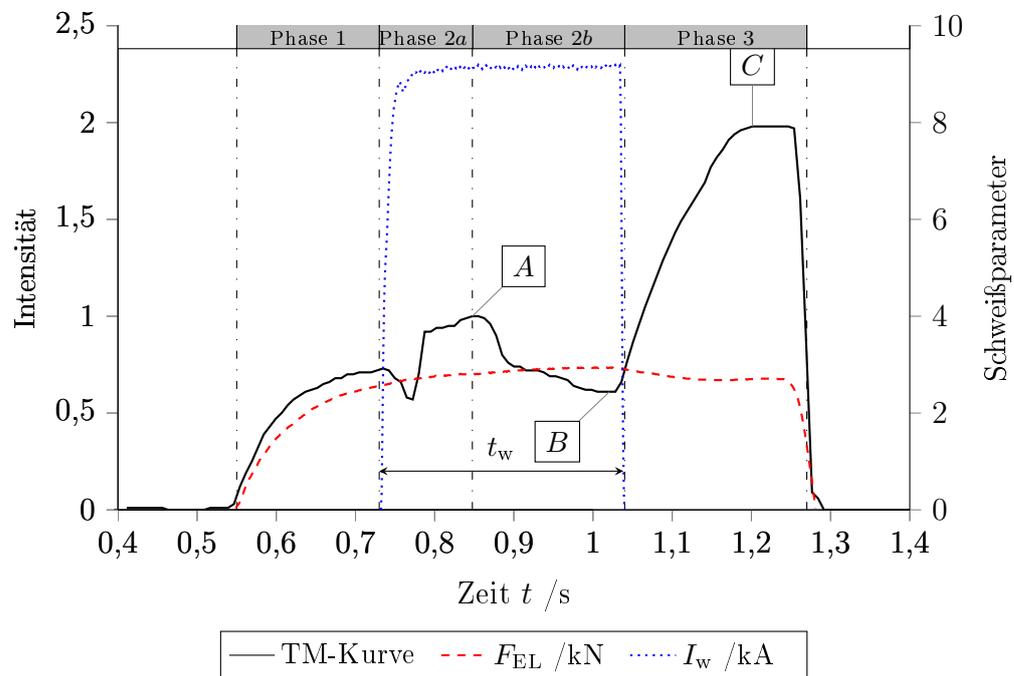
$$Z = \rho v \tag{B.1}$$

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{B.2}$$

$$D = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{B.3}$$

In der ersten Phase steigt die Transmissionsintensität der Ultraschallsignale deutlich an. Hier werden die Bleche durch die Elektrodenkraft  $F_{\text{EL}}$  zusammengepresst,

was die Einkoppelbedingungen deutlich verbessert. Der Bereich der Schweißzeit  $t_w$  kann in zwei Phase (2a, 2b) unterteilt werden. Nach dem Einschalten des Schweißstroms  $I_w$  erwärmen sich die Bleche und ihre Festigkeit fällt ab, wodurch ein verbessertes Einkoppeln der Wellen möglich ist. Das Schmelzen der Zinkbeschichtung der Bleche bewirkt den ersten kurzzeitigen Einbruch im Verlauf der TM-Kurve. Die Zinkschmelze wird anschließend aus der Fügezone verdrängt. Die Schallschnelle beschreibt die Geschwindigkeit, mit der die Teilchen um ihre Ruhelage schwingen. Aus den Impedanzen der sich kontaktierenden Medien kann nach den Gleichungen B.2 und B.3 der Reflexionsgrad  $R$  und der Transmissions- bzw. Durchlässigkeitsgrad  $D$  bestimmt werden. Mit zunehmender Widerstandserwärmung der Bleche steigt der Einfluss der sich ändernden Schallimpedanzen von Stahl  $Z_{St}$  und Kupfer  $Z_{Cu}$ . Zu Beginn der Schweißzeit  $t_w$  ist  $Z_{Cu}$  kleiner als  $Z_{St}$ . Da jedoch die Elektrodenkappen aktiv von innen mit Kühlwasser auf einem relativ gleichen Temperaturniveau gehalten werden und die Stahlbleche sich weiter erwärmen, sinkt  $Z_{St}$ . Folglich ändert sich das Verhältnis zwischen den beiden Impedanzen gemäß den Gleichungen B.2 und B.3. Genau im Punkt  $A$ , dem lokalen Maximum, gleichen sich die Impedanzen. Hier endet auch die Phase 2a. Die sich anschließenden Phase 2b ist durch die Bildung der Schweißlinse und der weiter zunehmenden Temperatur in den Blechen geprägt. Das schmelzflüssige Material dämpft die Transversalwellen deutlich, wodurch es zu einem starken Einbruch des empfangenen Signals bis zum lokalen Minimum im Punkt  $B$  kommt. Nach Abschalten des Schweißstroms  $I_w$  in der dritten Phase kühlt sich die Fügezone unter der wirkenden Elektrodenkraft  $F_{EL}$  schnell ab. Die Schweißlinse erstarrt und die Transmission der Ultraschallwellen nimmt deutlich zu, da nun optimale Einkoppelbedingungen für die Schallwellen vorliegen.[22]



**Abbildung B.1:** Einteilung der Durchlässigkeits- bzw. Transmissionskurve (TM-Kurve) in die einzelnen Prozessabschnitte beim Widerstandspunktschweißen und wichtige Kenngrößen (Material: 2x 1 mm DX53+Z100MB)

## Literaturverzeichnis

- [1] ANSYS, Inc. *ANSYS 14.0 Help // Element Reference // I. Element Library // Plane53*, 2013.
- [2] Arndt, V.; Lach, M.; Platte, M.; Müller, H.-U. *Patent: EP 1 358 476 B1: Ultraschall-Sensor für die Prozesssteuerung beim Widerstandspunktschweißen*, Dezember 2006.
- [3] Bolotov, S. und Kulikov, V. *Magnetic-thermal method of inspection of the quality of resistance spot welded joints*. *Welding international*, Band 18, Heft 2, S. 135-138, 2004.
- [4] Bolotov, S. und Kulikov, V. *Melting depth parameters control in spot and arc welding on remaining induction in the join zone*. Belorussian and Russian University, Mogilev, 2005.
- [5] Bruns, J., Kaps, L. *Optimierung von Karosserien mit genetischen Algorithmen unter Betriebsfestigkeitsrandbedingungen*. VDI-Berichte Band 1846, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 409-436, 2004.
- [6] Carl, V. *Qualitätsprüfung von Punktschweißverbindungen mit aktiver Thermografie*. 18. Sondertagung Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, 2001.
- [7] Cho, Y., Rhee, S. *Quality Estimation of Resistance Spot Welding by Using Pattern Recognition With Neural Networks*. University of Michigan, Transactions on instrumentation and measurement, S. 330-334, April 2004.
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 14273: Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln*, März 2002.
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 14329: Widerstandsschweißen: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen - Brucharten und geometrische Messgrößen für Widerstandspunkt, Rollennaht- und Buckelschweißungen*, Dezember 2003.

- 
- [10] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 14327: Widerstandsschweißen. Verfahren für das Bestimmen des Schweißbereichsdiagramms für das Widerstandspunkt, Buckel und Rollennahtschweißen*, Juli 2004.
- [11] Dilthey, U., Dickersbach, J. *Einsatz Neuronaler Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen*. DVS-Berichte Band 189, 1998.
- [12] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen, Zerstörungsfreie Prüfung, quasi-statisch, Merkblatt DVS 2916-5*, Dezember 2006.
- [13] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen, Zerstörende Prüfung, quasi-statisch, Merkblatt DVS 2916-1*, Januar 2009.
- [14] GE Sensing & Inspection Technologies GmbH. *Handbuch Schweißpunktprüfung - UltraLOG / Datenbankmanager*, Mai 2013.
- [15] Heide, M. *Aufbau einer Einrichtung zur Bestimmung des Linsendurchmessers für das Widerstandspunktschweißen*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Fügetechnik und Montage, Studienarbeit, August 2013.
- [16] Jones, M.P. *NDT of Resistance Spot Welds: Trends and Spikes*, 1999.
- [17] Kindsvater, A. *Selektion und simulative bzw. rechnerische Untersuchung magnetischer Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Fügetechnik und Montage, Großer Beleg, April 2012.
- [18] Kustron, P.; Kocimski, J.; Chertov, A. M.; Titov, S.; Korzenisowski, M.; Ambroziak, A.; Maev, R. Gr. *In-Line ultrasonic expulsion investigation of spot weld quality using multi-transducer set-up*. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation Vol.29, American Institute of Physics, November 2010.
- [19] Lehner, G. *Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 6. edition, 2008.
- [20] MagCam NV, [www.magcam.com](http://www.magcam.com) (23.12.2014) . Magcam Brochure, 2014.
- [21] Matesy GmbH, <http://www.matesy.de> (23.12.2014) . cmos-magview, 2014.

- [22] Mathiszik, Ch. *Verifizieren eines ausgewählten Ultraschallmoduls zur Linsenbestimmung beim Widerstandspunktschweißen und Entwicklung eines erkennenden Algorithmus*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Fertigungstechnik, Professur Fügetechnik und Montage, Großer Beleg, Januar 2012.
- [23] Min, Z., Cheng, M., Biao, C. *Fuzzy control system of constant current for spot welding inverter*. International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, Hong Kong, China, May 2009.
- [24] Podrżaj, P., Simončič, S. *Resistance spot welding control based on fuzzy logic*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2009.
- [25] Recknagel, A. *Physik - Elektrizität und Magnetismus*. VEB Verlag Technik Berlin, Berlin, 7. edition, 1970.
- [26] Sachs, L. *Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, London, New York, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest, 7. edition, 1992.
- [27] Schreiber, St. *Ultraschallprüfen beim Widerstandspunktschweißen - Überblick*. 20. Sondertagung Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, 2007.
- [28] Tessonics Inc. Rswa fl. <http://www.tessonics.com/products-rswa.html> (12.11.2014), 2014.
- [29] Tsukada, K. et. al. *A magnetic flux leakage method using a magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation of spot welds*. NDT&E International, Vol. 44, S. 101-105, 2011.
- [30] Vervaeke, K. *Magnetic Spot Weld Testing Using Fast High Resolution*. 6th International Seminar on Advances in Resistance Welding, September 2010.
- [31] Vogt, G.; Rieger, D.; Köhler, C. *State Of Art in Ultrasonic Spotweld Testing - Offline & Inline - New Materials and Coatings*. Vogt Werkstoffprüfsysteme, 2006.
- [32] Voss, K. *Patent: DE 199 37 479: Ultraschall-Sensoranordnung*, März 2001.
- [33] Wagner, M., Seyboldt, D. *Ultraschallprüfen von Punktschweißverbindungen - Erfahrungen aus der Praxis (Daimler)*. 20. Sondertagung Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, 2007.

- 
- [34] Waschkies, E. *Prüfen des Widerstandspunktschweißprozesses mit Ultraschall*. Schweißen und Schneiden, Band 49, Heft 1, S. 15-19, 1997.
- [35] Wild, H., Schmidt, G. *Ultraschallprüfen von Punktschweißverbindungen - Erfahrungen aus der Praxis (Audi AG)*. 20. Sondertagung Widerstandsschweißen, DVS-Berichte, 2007.
- [36] Woodcock, T. e-Mail-Korrespondenz mit T. Woodcock. e-Mail, 2013.
- [37] Woodcock, T. G. *Ermitteln von temperaturabhängigen Magnetisierungskurven für projektrelevante Stahlwerkstoffe*. Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung (IFW-Dresden), 2014.