

Schlussbericht vom 30.10.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21.542 B

Thema

Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen

Berichtszeitraum

01.12.2020 bis 31.05.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Forschungseinrichtung(en)

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

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht

Titel: Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen

IGF-Nr.: 21.542 B

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

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel
Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale
Dr.-Ing. Jörg Zschetzsche

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Christian Mathisik
Autor des Schlussberichts: Dipl.-Ing. Christian Mathisik

Förderhinweis:

Das IGF Vorhaben Nr. 21 542 B/DVS Nr. 04 3321 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht IGF-Vorhaben 21.542 B
Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Fertigungstechnik
Professur für Fügetechnik und Montage
30.10.2023, Version 2023.1.313

Zusammenfassung

Das Widerstandspressschweißen wird meist zum Punkt- und Buckelschweißen eingesetzt. Vorteile sind niedrige Kosten, hohe Produktivität und die ausgeprägte Prozesssicherheit. Anders als bei Punktschweißverbindungen existiert für Buckelschweißverbindungen keine Standardisierung zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP).

Das Forschungsvorhaben (IGF-Nr. 21.542 BR/DVS-Nr. 04.3321) verfolgte das Ziel, verschiedene Methoden zur ZfP von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen wissenschaftlich zu untersuchen. Dazu wurden drei verschiedene ZfP-Prüfsysteme ausgewählt, die prinzipiell als geeignet eingeschätzt wurden. Es handelt sich dabei um zwei bildgebende Ultraschallprüfsysteme und das an der Forschungseinrichtung entwickelte ZfP-System mittels passiver magnetischer Flusssdichteprüfung (pMFT). Die Untersuchungen erfolgten an elf unterschiedlichen Fügeaufgaben, bestehend aus Buckelschweißverbindungen mit Ring-, Segment- und Langbuckeln, welche mittels Kondensatorentladungs- und Mittelfrequenzschweißtechnik hergestellt wurden. Zur Validierung der ZfP-Ergebnisse wurden diese denen der zerstörenden Prüfung (ZP) mittels quasistatischen Zugversuchs (maximale Zugkraft, geometrische Ausprägung der Bruchflächen) und den Bruchflächen gegenübergestellt.

Weiter wurde die pMFT durch die wissenschaftliche Untersuchung zum physikalischen Wirkprinzip im Allgemeinen weiterentwickelt. Dies erfolgt durch die Messung der magnetischen Materialeigenschaften und deren Implementierung in weiterentwickelte numerische Simulationsmodelle, basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM). Durch die Rückkopplung der Simulationsergebnisse auf die experimentellen Untersuchungen konnte das Verständnis über die physikalische Wirkungsweise der pMFT sowohl für die Anwendung beim Punkt- als auch beim Buckelschweißen vertieft werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 21.542 B / DVS-Nr. 04.3321) der Forschungsvereinigung, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Die Forschungseinrichtung bedankt sich bei den mitwirkenden Studierenden, die durch ihre Studien- und Abschlussarbeiten zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben:

Kai Erpel	SHK, Studienarbeit, Diplomarbeit
Nico Kagel	Diplomarbeit
Edgar Schlenstedt	Diplomarbeit
Jiachuan Liang	Diplomarbeit
Medina Busch	SHK
Lisa Marie Bittermann	SHK
Simon Grätz	SHK
Gideon Cramer	SHK
Valentin Jacob Megerlin	SHK

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

Unser Dank gilt:

Dirk Altnau (Projektpate)	BMW Group
Koen Vervaeke, Stephan Kliché	MagcamNV, Belgien
René Dittrich	IfU Diagnostic Systems GmbH
Ralf Bothfeld	Harms & Wende GmbH & Co. KG
Robert Sierlinger, Sabine Ritsche	voestalpine Stahl GmbH
Robert Laurenz	ThyssenKrupp Steel Europe AG
Timo Groll	Bosch Rexroth, Erbach
Thomas Noack	Volkswagen AG
York Oberdörfer, Robert Kitzmann	TESSONICS Europe GmbH
Thomas Himmler, Stefan Widmann, Manfred Maskos	Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG
Jörg Rönnert, Andrey Gadyuchko	Ilmenauer Mechatronik GmbH
Göran Vogt, Carsten Köhler, Philipp Poltersdorf	VOGT Ultrasonics GmbH

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Danksagung.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungsverzeichnis	18
Verzeichnis der Formelzeichen.....	19
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	20
2 Stand der Technik und Forschung.....	22
3 Forschungsziel	25
4 Lösungsweg.....	26
5 Herstellen, Prüfen und Charakterisieren der Buckelschweißproben (AP2).....	30
5.1 Versuchsplanung und Methodik.....	30
5.1.1 Festlegung der Fügeaufgaben	30
5.2 Versuchsanlagen	31
5.2.1 Prägevorrichtung zum Herstellen der geprägten Buckel.....	31
5.2.2 Anlagentechnik zum Schweißen der Proben: MFDC-KE- Portalschweißsystem	32
5.2.3 Ermittlung der Schweißbereiche.....	33
5.2.4 Schweißparameter der Buckelschweißverbindungen	33
5.2.5 Prüfsysteme für die ZfP und ZP der Schweißproben.....	35
5.2.5.1 pMFT-System	35
5.2.5.2 Ultraschallprüfsystem 1	37
5.2.5.3 Ultraschallprüfsystem 2	37
5.2.5.4 Ultraschallprüfvorrichtung.....	37
5.2.5.5 Anlagentechnik für die ZP.....	38
5.2.6 Methodik zur Bewertung der Prüfergebnisse	39
5.2.6.1 Analytische Festigkeitsbetrachtung	40
5.2.6.2 Analytische Betrachtung Versuchsreihen MF2, MF5, KE5 mit M6- Vierkantmuttern nach DIN 928-M6-ST	41
5.2.6.3 Analytische Betrachtung, Versuchsreihen MF1, MF4, KE4 mit M6- Ringbuckelmutter	43

5.2.6.4	Analytische Betrachtung, Versuchsreihen MF3 mit M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln	45
5.2.6.5	Analytische Betrachtung, Versuchsreihen MF6, MF7, KE6, KE7 mit geprägtem Buckel.....	47
5.3	Versuchsergebnisse.....	49
5.3.1	M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST (MF2, MF5, KE5)	49
5.3.1.1	Ergebnisse der pMFT	49
5.3.1.2	Ergebnisse der ZP	50
5.3.1.3	Bewertung mittels Prozessdaten	51
5.3.1.4	Ergebnisdiskussion.....	51
5.3.2	M6-Ringbuckelmutter (MF1, MF4, KE4)	53
5.3.2.1	Ergebnisse der pMFT	53
5.3.2.2	Ergebnisse der ZP	54
5.3.2.3	Bewertung mittels Prozessdaten	54
5.3.2.4	Ergebnisdiskussion.....	55
5.3.3	M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln (MF3)	56
5.3.3.1	Ergebnisse der pMFT	56
5.3.3.2	Ergebnisse der ZP	57
5.3.3.3	Bewertung mittels Prozessdaten	59
5.3.3.4	Ergebnisdiskussion.....	60
5.3.4	Geprägte Langbuckel (MF6, KE6, MF7, K74).....	60
5.3.4.1	Ergebnisse der pMFT	60
5.3.4.2	Ergebnisse der ZP.....	62
5.3.4.3	Bewertung mittels Prozessdaten	63
5.3.4.4	Ergebnisdiskussion.....	64
5.3.5	Ergebnisse der Ultraschallprüfung.....	65
5.3.5.1	M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST (MF2, MF5, KE5)	65
5.3.5.2	M6-Ringbuckelmutter (MF1, MF4, KE4).....	66
5.3.5.3	M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln (MF3)	66
5.3.5.4	Geprägte Langbuckel (MF6, KE6, MF7, K74).....	67
5.4	Zusammenfassung.....	68
6	Numerische Simulation der pMFT mittels FEM (AP3)	70
6.1	Methodik	70

6.2	Versuchsplanung.....	71
6.2.1	Festlegung der Fügeaufgaben.....	71
6.2.2	Anlagentechnik zum Schweißen der Proben: Roboter geführtes MFDC-Zangenschweißsystem.....	71
6.2.3	Herstellung der Schweißproben zum Ermitteln der magnetischen Materialeigenschaften.....	72
6.2.4	Versuchsaufbau für die Messung der magnetischen Materialeigenschaften.....	73
6.2.5	Beschreibung der FE-Modelle.....	74
6.3	Ergebnisse.....	75
6.3.1	Voruntersuchungen.....	75
6.3.2	Messergebnisse.....	76
6.3.2.1	Probenpräparation.....	76
6.3.2.2	pMFT-Messungen.....	77
6.3.2.3	FEM-Simulationen (FE-Modell 1).....	80
6.3.2.4	FEM-Simulationen von Schweißprobengeometrien (FE-Modell 2).....	82
6.4	Ergebnisdiskussion.....	83
6.5	Zusammenfassung.....	84
7	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen.....	86
8	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen.....	87
9	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	88
10	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen.....	89
10.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse.....	89
10.2	Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit.....	90
11	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen.....	92
11.1	Fachzeitschriften, Fachtagungen, Kolloquien.....	92
11.2	Studien- und Abschlussarbeiten.....	92
12	Transfermaßnahmen.....	93
12.1	Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen.....	93
12.2	Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende.....	94
12.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	95

13 Literaturverzeichnis 96
14 Anhang..... 102

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Messaufbau pMFT mit Darstellung der Magnetisierungsvorrichtung mit den beidseitig angeordneten, gleichgerichteten Spulen (1, 2), der Buckelschweißverbindung mit dem Fügeelement (3), dem Blech (4); Messvorrichtung mit Kreuztisch (5); Steuerung für den Magnetisierprozess und Kreuztisch (6); Hallsensor (7) und 2D-Magnetfeldkamera (8)23
- Abbildung 2: Exemplarische Ergebnisse der pMFT einer Segmentbuckelschweißung mit Darstellung einer qualitätsgerechten (i. O.) und einer unzureichenden Schweißverbindung (n. i. O.) [23]23
- Abbildung 3: Zeitlicher Ablauf der Bearbeitung der Arbeitspakete (ANV: ausgabeneutrale Verlängerung, pandemiebedingt).....29
- Abbildung 4: Untersuchte Fügeelemente v.l.n.r: M6-Ringbuckelmutter, M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST), M8-Massebolzen und geprägter 8 mm-Langbuckel31
- Abbildung 5: Prägwerkzeug zum Prägen der Langbuckel für die Versuchsreihen MF6, MF7, KE6 und KE732
- Abbildung 6: Schweißanlage zum KE- und MFDC-Schweißen als Portalsystem an der Technischen Universität Dresden (links) und detaillierter Darstellung des Arbeitsraums mit eingelegtem Fügeelement auf Zentrierdorn am Beispiel der Versuchsreihe MF4/KE4 und Blech (rechts).....32
- Abbildung 7: Ermittelte Schweißbereiche der MFDC-geschweißten Versuchsreihen mit Angabe der verwendeten Schweißparameter für die einzelnen Versuchsreihen und Parameterstufen34
- Abbildung 8: Ermittelte Schweißbereiche der KE-geschweißten Versuchsreihen mit Angabe der verwendeten Schweißparameter für die einzelnen Versuchsreihen und Parameterstufen34
- Abbildung 9: Versuchsaufbau der pMFT am Beispiel von M6-Vierkantmuttern (DIN 928-M6-ST) mit (a) Magnetisierereinrichtung, (b) Messung der magnetischen Restflussdichte auf der Probenoberfläche durch Abrastern mit einem Hallsensor oder (c) Messung der magnetischen Restflussdichte auf der Oberfläche der Proben mit einem Hallsensor-Array als Magnetfeldkamera MiniCube 1D von MAGCAM mit Messergebnis im Hintergrund.....37
- Abbildung 10: Halbautomatische Ultraschallprüfvorrichtung mit links: (1) Prüfkopfaufnahme, (2) Linearführungen zur senkrechten Prüfkopfpositionierung, (3) Wasserbad zur Ultraschalleinkopplung, (4)

zu prüfenden Probe und (5) Schrittmotor zur Positionierung der Proben; rechts: Prinzipdarstellung der rotierenden Probenpositionierung am Beispiel der M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST)	38
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Vorrichtung für die zerstörende Prüfung der Schweißproben mittels Kopfzugversuch (links) und technische Darstellung der verwendeten Matrizengeometrie für die M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) (rechts)	39
Abbildung 12: Vorrichtung zur Kopfzugprüfung der Langbuckelproben MF6, MF7, KE6, KE7, teilzerlegt zum Einlegen der Proben.....	39
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Buckelschweißens mit den Prozessstufen der Vorhalte-, Schweiß- und Nachhaltezeit und den Prozessparametern Elektrodenkraft F_{el} , Schweißstrom I_w und des Nachsetzwegs sel.u	40
Abbildung 14: Illustration zur Betrachtung der vier Einzelbuckel einer Vierkantmutter nach DIN 928 als gemeinsamer Kegelstumpf	41
Abbildung 15: Geometrische Größen zur analytischen Beschreibung und Herleitung der zu erwartenden Anbindungsfläche A_w bei Vierkantmutter nach DIN 928 auf Grundlage des Nachsetzwegs sel.u	41
Abbildung 16: Topographiemessungen an 32 M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST zur Überprüfung der Toleranzen nach DIN 928 mit Darstellung der vier Einzelbuckelflächen A_p und -höhen h₁ und den zugehörigen Mittelwerten je Mutter und statistischer Bewertung	43
Abbildung 17: Topographiemessungen an zehn M6-Ringbuckelmutter mit Darstellung der mittleren Ringbuckelhöhen h₁ und statistischer Bewertung	45
Abbildung 18: Geometrische Größen zur analytischen Beschreibung und Herleitung der zu erwartenden Anbindungsfläche A_w bei M8-Massebolzen auf Grundlage des Nachsetzwegs sel.u	46
Abbildung 19: Topographiemessungen an zehn M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln zur Bewertung und den zugehörigen Mittelwerten je Massebolzen und statistischer Bewertung	46
Abbildung 20: Topographiemessungen an neun ausgewählten geprägten Langbuckeln (jeder 50. Probe aus 400 Prägungen) und statistischer Bewertung für beide Versuchswerkstoffe	48
Abbildung 21: Vorgehensweise zur Ermittlung der Buckelflächen mittels pMFT mit Darstellung der gemessenen Rohdaten (links) und der ersten partiellen	

zweidimensionalen x - und y -Richtung der Flussdichte $\text{grad } B$ mit den ermittelten Flächen je Schweißbuckel 0 – 3 (magentafarben, rechts)	49
Abbildung 22: Zerstörungsfrei ermittelte Anbindungsflächen A_{pMFT} mittels pMFT für die M6-Vierkantmuttern dargestellt für jede einzelne Probe mit den jeweiligen Anbindungsflächen (1 – 4) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)	50
Abbildung 23: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfbzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) und mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft F_{th}	51
Abbildung 24: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfbzugkraft F_{th} mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch F_f und denen der gemessenen Bruchflächen A_{ZP} für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmuttern.....	51
Abbildung 25: Gegenüberstellung der gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den ermittelten Anbindungsflächen A_{pMFT} durch die ZfP mittels pMFT für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmuttern	52
Abbildung 26: Darstellung der Winkelmessung der verschweißten Bereiche für die M6-Ringbuckelmuttern der Versuchsreihe MF1 und den Ergebnissen der Winkelmessungen der untersuchten Proben zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)	53
Abbildung 27: Zerstörungsfrei ermittelter Profilanstieg δB_{pMFT} am Beispiel eines Profilschnitts bei im Winkel von 0° mittels pMFT für die M6-Ringbuckelmuttern von MF4 und KE4 dargestellt für jede einzelne Probe zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)	54
Abbildung 28: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfbzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) und mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft F_{th}	54
Abbildung 29: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfbzugkraft F_{th} mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch F_f und denen der gemessenen Bruchflächen A_{ZP} für die Versuchsreihen mit M6-Ringbuckelmuttern.....	55
Abbildung 30: Gegenüberstellung der Kopfbzugkraft bei Bruch F_f und den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel (links) und den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} mit den Bewertungsparametern Winkel (MF1, mittig) und des normierten Profilanstiegs (MF4, KE4, rechts)	56
Abbildung 31: asymmetrische Bruchflächen der M6-Ringbuckelschweißproben am Beispiel der Proben MF4_129, PS4 (Schweißstrom = 22kA) und KE4_001, PS5 (Ladeenergie = 2,94 kJ)	56

- Abbildung 32: Vorgehensweise zur Ermittlung der Anbindungsflächen mittels pMFT für die Proben der Versuchsreihe MF3 mit M8-Massebolzen mit Darstellung der gemessenen Rohdaten (links) und der Schwellwerteanalyse durch Binarisieren der Messdaten zum Bestimmen der einzelnen Flächen A1, A2 und A3 (Schwarz-Weiß-Bilder).....57
- Abbildung 33: Zerstörungsfrei ermittelte Buckelflächen **ApMFT** mittels pMFT für die M8-Massebolzen dargestellt für jede einzelne Probe mit den jeweiligen Anbindungsflächen (1 – 3) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)57
- Abbildung 34: Schliffbilder repräsentativer Proben der Parametersätze PS2, 10 kA (links), PS4 16 kA (mittig) und PS5 22 kA (rechts)58
- Abbildung 35: Ermittelte Kräfte **Ff** bei der zerstörenden Kopfbzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5)58
- Abbildung 36: Bruchflächen nach der zerstörenden Kopfbzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) mit jeweils der ersten Probe eines jeden Parametersatzes59
- Abbildung 37: Gemessene Bruchflächen **AZP** nach der zerstörenden Kopfbzugprüfung dargestellt für jede einzelne Probe mit den jeweiligen Buckelflächen (1 – 3) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5).....59
- Abbildung 38: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfbzugkraft **Fth** mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch **Ff** und denen der gemessenen Bruchflächen **AZP** für die Versuchsreihe mit M8-Massebolzen59
- Abbildung 39: Gegenüberstellung der Kopfbzugkraft bei Bruch **Ff**, den gemessenen Bruchflächen **AZP** und den zerstörungsfrei ermittelten Anbindungsflächen **ApMFT** für die Versuchsreihe mit M8-Massebolzen60
- Abbildung 40: Vorgehensweise zur Ermittlung der Verbindungsqualität mittels pMFT für die Proben mit geprägten Langbuckeln mit Darstellung der gemessenen Rohdaten (grau) und der Schnittebene (pink) für die Ermittlung der Profile entlang der Buckellängsachse für die drei Parameterstufen PS1, PS3 und PS5 (für eine bessere Darstellung sind die Daten invertiert dargestellt, gleichskalierte Flussdichte **B**)61
- Abbildung 41: Profillängen **l** der magnetischen Flussdichte entlang der Buckellängsachse zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5) für die Versuchsreihen MF6 und KE661
- Abbildung 42: Profilverläufe der magnetischen Flussdichte entlang der Buckellängsachse (links) und die normierte Flussdichte in der

Profilmitte ($l = 0 \text{ mm}$) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5) für die Versuchsreihe MF7	62
Abbildung 43: Profilverläufe der magnetischen Flussdichte entlang der Buckellängsachse (links) und die normierte Flussdichte in der Profilmitte ($l = 0 \text{ mm}$) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5) für die Versuchsreihe KE7	62
Abbildung 44: Ermittelte Kräfte Ff bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft Fth für MF6 und KE6	63
Abbildung 45: Ermittelte Kräfte Ff bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft Fth für MF7 und KE7	63
Abbildung 46: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfzugkraft Fth mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch Ff und denen der gemessenen Bruchflächen AZP für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel	64
Abbildung 47: Gegenüberstellung der Kopfzugkraft bei Bruch Ff und den gemessenen Bruchflächen AZP für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel (links) und den gemessenen Bruchflächen AZP mit den entsprechenden Bewertungsparametern Profillänge (MF6, KE6, mittig) und der Flussdichte in der Profilmitte (MF7, KE7, rechts).....	64
Abbildung 48: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch Ff , den gemessenen Bruchflächen AZP und den ermittelten Anbindungsflächen AUS (Summe aller Buckel) für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmuttern	66
Abbildung 49: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch Ff , den gemessenen Bruchflächen AZP und den ermittelten Anbindungsflächen AUS für die Versuchsreihen mit M6-Ringbuckelmutter	66
Abbildung 50: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch Ff , den gemessenen Bruchflächen AZP und den ermittelten Anbindungsflächen AUS (Summe aller Buckel) für die Versuchsreihe mit M8-Massebolzen.....	67
Abbildung 51: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch Ff , den gemessenen Bruchflächen AZP und den ermittelten Anbindungsflächen AUS für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel.....	67
Abbildung 52: Determinationskoeffizienten $R2$ aller untersuchten Versuchskombinationen und Prüfsysteme in graphischer Darstellung	69

- Abbildung 53: Versuchsstand zum Widerstandspunktschweißen der Professur für Füge-technik und Montage an der Technischen Universität Dresden mit Darstellung des gesamten Versuchstands und der Schweißzange72
- Abbildung 54: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Messen der magnetischen Materialeigenschaften in der Konfiguration zur ein- und beidseitigen Magnetisierung mit (1) Stromquelle, (2) Messeinheit für Strom und Spannung, (3) untere Magnetisierungsspule, (4) obere Magnetisierungsspule, (5) Probenscheibe [51]73
- Abbildung 55: Versuchsaufbau zum Magnetisieren und Messen der Flussdichte an den Probenscheiben; 3, 4: untere, obere Spule; 5: Probenscheibe in Positionier- vorrichtung ; 6: Hallsensor.....74
- Abbildung 56: Geometrien der FE-Modelle für die numerischen Simulationen der Magnetfeldverteilung während des Magnetisierungsvorgangs für die untersuchten Probenscheiben (links) und exemplarischen Punktschweißverbindungen, mit 1: Schweißgefüge/Schweißlinse (SG); 2: Grundwerkstoffgefüge (GW)/oberes und unteres Blech; 3: Bereich der Auswertungen (Luft, Region of Interest); 4: oberer Spulenkern; 5: unterer Spulenkern; 6: obere Spule; 7: untere Spule; 8: Halbraum (Luft als Halbkreis, nicht vollständig abgebildet); - - - Datenlinien zum Auslesen der Flussdichte75
- Abbildung 57: Vergleich der Querschliffprobe (unten links) mit der gemessenen Flussdichte mittels pMFT mit deutlicher Unterscheidung zwischen Schweißlinse-gefüge und dem Grundwerkstoff. Darstellung des Messaufbaus mit scannendem Hallsensor und der darunter positionierten Querschliffprobe; Ergebnisse der Magnetfeldmessung nach der Probenmagnetisierung mit 35 A (oben rechts) und der maßstabgerechten Überlagerung von Magnetfeldmessdaten und dem Querschliff (unten rechts) [51]76
- Abbildung 58: Messergebnisse der topographischen Messungen mittels chromatisch-konfokalem Mikroskop (CCM) und den manuellen Messschiebermessungen zur Bestimmung der Probendimension und Einschätzung der Ebenheit [51].....77
- Abbildung 59: Erzeugtes Magnetfeld bei verschiedenen Strömen der Magnetisierungsspulen MV25 im Vergleich mit den theoretisch berechneten Magnetfeldern [51]77
- Abbildung 60: Am Mikroskop ermittelte Schweißlinsendurchmesser d_n (a) im Vergleich mit Flussdichtemessungen in den Konfigurationen (b) S1, (c) S2 der magnetisierten Probe 20 von MAT4 S235 mit $I_{mag} = 20$ A78

- Abbildung 61: Darstellung der unterschiedlichen Bereiche (ROI) als Kreisformen am Beispiel der Probe 06 von MAT2 (links) mit dem Vergleich der Flussdichteverteilung der einzelnen ROI mit Mittelwerten und als Boxplots beider ROIs und deren Differenz als ROI-GW (rechts) zur Bewertung der Messungen an den Probenscheiben78
- Abbildung 62: Mittlere gemessene Flussdichte an der Probenoberfläche und die daraus berechneten Werte der Remanenzflussdichte im Probenmittelpunkt für die Gefüge der Grundwerkstoffe und den entsprechenden Schweißlinsen79
- Abbildung 63: Schematische Darstellung der Hystereseschleifen mit der Neukurve (1, rot), der oberen Hystereseurve (2), der unteren Hystereseurve (3), den Sättigungspunkten $\pm H_s$, $\pm B_s$ und den charakteristischen magnetischen Parametern Koerzitivfeldstärke H_c und magnetische Restflussdichte B_r der Hauptschleife und drei beispielhaften inneren Rayleigh-Schleifen (links) und Darstellung der variierenden Materialmodelle für die FE-Modelle als Neukurve80
- Abbildung 64: Simulationsergebnisse der untersuchten Werkstoffe mit variierender Permeabilität berechnet aus Messdaten der Flussdichtemessungen an Probenscheiben mit Grundwerkstoff- und Schweißgefüge82
- Abbildung 65: Simulationsergebnisse der untersuchten Werkstoffe mit variierender Permeabilität berechnet aus Messdaten der Flussdichtemessungen an Schweißproben mit einem Linsendurchmesser $d_n = 9,0$ mm mit gleichen Blechdicken von $t = 1,5$ mm mit Grundwerkstoff- und Schweißgefüge83
- Abbildung 66: Gemessene Flussdichte $B_{r,z}$ als Mittelwertverlauf von 180 Profilverläufen (dargestellt für vier Profilverläufe links) in der Gegenüberstellung mit der simulierten Flussdichteverteilung für eine Schweißprobe mit einem Punktdurchmesser $d_w = 6,22$ mm im Experiment und übertragen in die Simulation84
- Abbildung 67: Technische Zeichnung des Stempelwerkzeugs der Prägevorrüstung..... 103
- Abbildung 68: Technische Zeichnung des Matrizenwerkzeugs der Prägevorrüstung..... 104
- Abbildung 69: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $sel.u$ für die Versuchsreihen MF2, MF5 und KE5 mit M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST 105
- Abbildung 70: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $sel.u$ für die Versuchsreihen MF1, MF4 und KE4 mit M6-Ringbuckelmutter 105
- Abbildung 71: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $sel.u$ für die Versuchsreihe MF3, mit M8-Massebolzen..... 106

Abbildung 72: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege **sel.u** für die
Versuchsreihen MF6, KE6, MF7 und KE7 mit geprägtem Langbuckel 106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fügeaufgaben mit Materialkombinationen und Schweißverfahren (MF = Mittelfrequenz, KE = Kondensatorentladung) zur Untersuchung der ZfP-Systemeignung	31
Tabelle 2: Werkstoffdaten der verwendeten Blechwerkstoffe und Fügeelemente	31
Tabelle 3: Kenndaten des Versuchsstands zum Widerstandspunkt- und Buckelschweißen mittels KE- und MFDC-Schweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage.....	33
Tabelle 4: Schweißparameter für die Herstellung der Schweißproben für die ZfP und ZP	35
Tabelle 5: Spulenparameter der Magnetisierungsvorrichtungen.....	36
Tabelle 6: Parameter zur Messung der mag. Flussdichte mittels RMV02 und MAGCAM Minicube 1D.....	37
Tabelle 7: Geometrische Parameter für die verwendete M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST und deren Toleranzen	42
Tabelle 8: Geometrische Parameter für M6-Ringbuckelmutter und deren Toleranzen	44
Tabelle 9: Geometrische Parameter für M8-Massebolzen.....	47
Tabelle 10: Geometrische Parameter für die geprägten Langbuckel in HX340LAD+Z (1,5 mm).....	48
Tabelle 11: Geometrische Parameter für die geprägten Langbuckel in 1.4301 (1,5 mm).....	48
Tabelle 12: Determinationskoeffizienten R2 aller untersuchten Versuchskombinationen und Prüfsysteme	69
Tabelle 13: Materialkombinationen für die Messungen der magnetischen Materialeigenschaften	71
Tabelle 14: Kenndaten des Versuchsstands zum Widerstandspunktschweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage	72
Tabelle 15: Schweißparameter für die Herstellung der Schweißproben für die Ermittlung der magnetischen Materialeigenschaften.....	73
Tabelle 16: Verwendete Konfigurationen für die magnetische Charakterisierung der Probenscheiben	74
Tabelle 17: Permeabilitätsfaktoren μ_{low} und μ_{high} zur Variation der Materialdaten der FEM-Modelle	80

Tabelle 18: Versuchsmatrix für die Simulationen der Probenscheiben.....81

Tabelle 19: Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen93

Tabelle 20: Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende.....94

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspakete
FEM	Fenite-Elemente-Methode
GW	Grundwerkstoff
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	projektbegleitender Ausschuss
PM	Personenmonate
pMFT	passive magnetische Flusssdichteprüfung
RMV02	Vorrichtung für die Remanenzmessungen, Version 2
RSW	Widerstandspunktschweißen
SG	Schweißgut
US	Ultraschall
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZP	zerstörende Prüfung
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung

Verzeichnis der Formelzeichen

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

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Gegenwärtig hat sich kein Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen etabliert. Ziel dieses Vorhabens war es deshalb, Methoden der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) für die industrielle Anwendung an Buckelschweißverbindungen systematisch zu erforschen und weiterzuentwickeln.

Buckelschweißverbindungen werden in der blechverarbeitenden Industrie breit gefächert eingesetzt. Die Anwendungen sind überall zu finden, wo Bleche (bis ca. 3,0 mm Dicke) mit Fügelementen (z. B.: Muttern oder Gewindebolzen) oder mit anderen Blechen verschweißt werden. Hierzu zählen u. a. der Fahrzeugbau, der Metallbau, der Gerätebau, der Maschinenbau, die Möbelindustrie und die Elektrotechnik. Die Verbindungen werden durch Widerstandspressschweißverfahren hergestellt. Vorteile sind die niedrigen Kosten, die hohe Produktivität und die hohe Prozesssicherheit. Verfahrensbedingt ist die Schweißverbindung von außen nicht sichtbar und kann nicht durch die visuelle Prüfung, die Magnetpulverprüfung oder die Farbeindringprüfung beurteilt werden. Mögliche Methoden der ZfP sind die Durchstrahlungsprüfung, die Thermographie, die Ultraschallprüfung und pMFT. Die Durchstrahlungsprüfung wird auf Grund der hohen Kosten, des sehr hohen apparativen Aufwands und der Strahlenbelastung nur bei sehr hochpreisigen und sicherheitsrelevanten Einzelteilen sowie in der Forschung und Entwicklung eingesetzt. Die Thermographie hat sich wegen stark oberflächenabhängigen Absorptionsgraden nicht etabliert. Die Ultraschallprüfung, beim Widerstandspunktschweißen das Standard-ZfP-Verfahren, ist bei Buckelschweißverbindungen nicht üblich. Als Ursachen werden das fehlende Rückwandecho, Bohrungen in Blechteilen (z. B. bei Schweißmutter) und das aufzubringende Koppelmittel genannt. Als quasi zerstörungsfrei gilt die Drehmomentprüfung, die für Muttern, Bolzen und ähnliche Teile genutzt werden kann. Sie liefert jedoch nur die Aussage, ob ein definierter Sollwert der Belastung erreicht wird. Das DVS-Merkblatt 2916-5 [1] stellt den aktuellen Stand der Technik der ZfP von Widerstandspressschweißverbindungen dar, gilt aber nur für Punktschweißverbindungen und ist nicht auf Buckelschweißverbindungen übertragbar. Somit existiert weder ein Regelwerk noch ein etabliertes Prüfverfahren für die ZfP von Buckelschweißverbindungen. Aus diesem Grund ist die zerstörende Prüfung (ZP) die übliche Methode, um die Qualität von Buckelschweißverbindungen zu prüfen. Die ZP kann nur an Stichproben durchgeführt werden und ist kostenintensiv. Beim Auftreten von negativen Ergebnissen müssen alle Bauteile, die seit der letzten ZP geschweißt wurden, als Ausschuss gewertet werden. Deshalb wird versucht, den Prüfumfang zu reduzieren und auf eine Prozessüberwachung

zurückzugreifen. Das gelingt aber nicht immer. Jedoch ist der Trend zu erkennen, dass ein Qualitätsnachweis durch ZfP der Schweißverbindungen gefordert wird.

Eine zuverlässige ZfP-Methode ist somit unerlässlich und sorgt für eine Steigerung der Produktivität und der Wettbewerbsfähigkeit für die Unternehmen, die diese Methode einsetzen.

2 Stand der Technik und Forschung

Die ZfP von Widerstandspressschweißverbindungen ist nicht einheitlich geregelt. Die Normung der ZfP beinhaltet Geräte, Prüfkörper, Qualifizierung von Personal und bezieht sich in der Schweißtechnik auf Schmelzschweißverbindungen. Normen, Merkblätter und Veröffentlichungen zum Thema ZfP von Widerstandspressschweißverbindungen beziehen sich auf alle Widerstandspressschweißverbindungen oder speziell auf Punktschweißverbindungen. Die Recherche nach Normen in Perinorm [2] ergab 56 Treffer, wovon nur drei in Deutschland gültige Normen sind, die wiederum die zerstörende Prüfung beinhalten. Anweisungen zur ZfP von Widerstandspressschweißverbindungen sind in DVS-Merkblättern [1, 3, 4] zu finden. In [3] werden die Sicht-, die Farbeindring- und die Ultraschallprüfung als mögliche ZfP genannt, [4] bezieht sich auf [1]. Dort wird ausschließlich die ZfP von Punktschweißverbindungen behandelt und das Buckelschweißen explizit ausgeschlossen. In der Automobilindustrie liegen unterschiedliche interne Prüfanweisungen für die zerstörende Prüfung vor, z. B. [5, 6]. Andere Anwender orientieren sich an Prüfanweisungen für andere Fügeverfahren, wie [7].

Die Literaturrecherche ergibt ein ähnliches Bild. Recherchiert wurde in den Datenbanken TEMA® [8], Google Scholar [9], Clarivate Analytics [10] und EBSCO Academic Libraries [11]. Zur ZfP von Buckelschweißverbindungen sind die bildgebende Ultraschallprüfung und die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte, die Durchstrahlungsprüfung und die Thermographie grundsätzlich geeignet.

Die bildgebende Ultraschallprüfung wird umfangreich bei Punktschweißverbindungen praktiziert [12–17]. Bis zu 256 Einzelschwinger werden in einem Sensor zusammengefasst (Matrix-Array) und separat angesteuert.

Phased-Array-Systeme nutzen die Interaktion der einzelnen Wellen, so dass Fokustiefe und Winkel der Schallbündel geändert werden können, ohne den Sensor zu bewegen. Die Laufzeit wird als Falschfarbendarstellung ortsabhängig abgebildet [18–21]. Diese Methode kann zur Ermittlung der Anbindungsfläche beim Buckelschweißen genutzt werden. [22] beschreibt die Entwicklung und Anwendung eines mobil einsetzbaren Ultraschall-Verfahrens, das auch für Buckelschweißverbindungen geeignet ist. Das Verfahren wird bisher nicht in der Serienfertigung zur Prüfung von Buckelschweißverbindungen angewendet.

Die pMFT ermöglicht die objektive Bewertung von Widerstandsschweißpunkten, wie die Ergebnisse in [23–26] zeigen. Die Prüfung erfolgt in drei Schritten: Magnetisierung, Messen der Remanenzflussdichte und Berechnen der Anbindungsfläche. Vorteile sind, dass die Prüfung nur wenige Sekunden dauert, automatisierbar ist, kein Koppelmittel benötigt wird und ein objektives Prüfergebnis vorliegt. Die Methode wurde bereits bei einigen Buckelschweißverbindungen getestet und als prinzipiell geeignet bewertet [23]. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau der Voruntersuchungen aus dem Forschungsvorhaben

IGF 19.208 BR an M8-Massebolzen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Messergebnisse der Voruntersuchungen für eine qualitätsgerechte (i. O.) und eine unzureichende (n. i. O.) Schweißverbindungen.

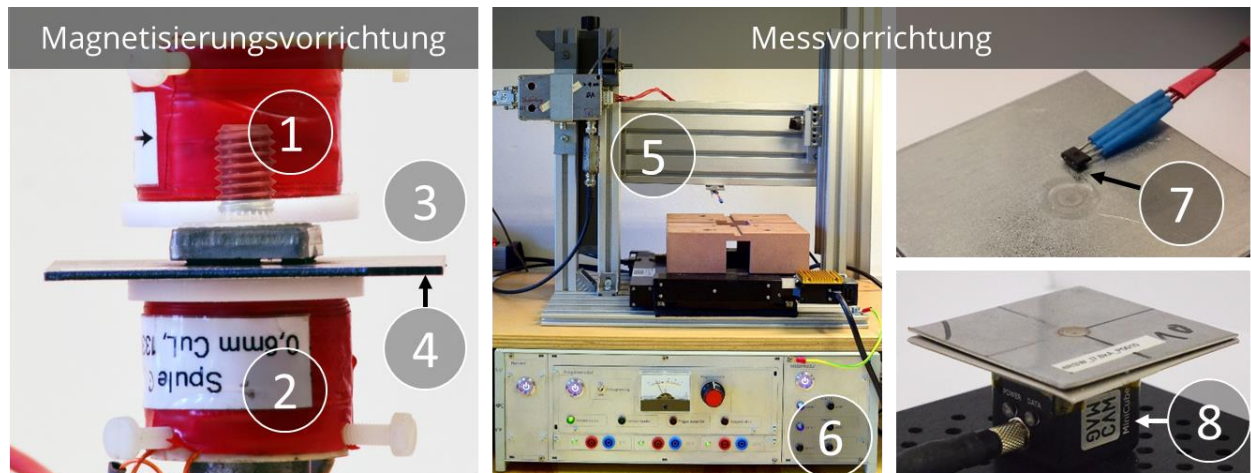


Abbildung 1: Messaufbau pMFT mit Darstellung der Magnetisieruvorrichtung mit den beidseitig angeordneten, gleichgerichteten Spulen (1, 2), der Buckelschweißverbindung mit dem Fügeelement (3), dem Blech (4); Messvorrichtung mit Kreuztisch (5); Steuerung für den Magnetisierungsprozess und Kreuztisch (6); Hallensensor (7) und 2D-Magnetfeldkamera (8)

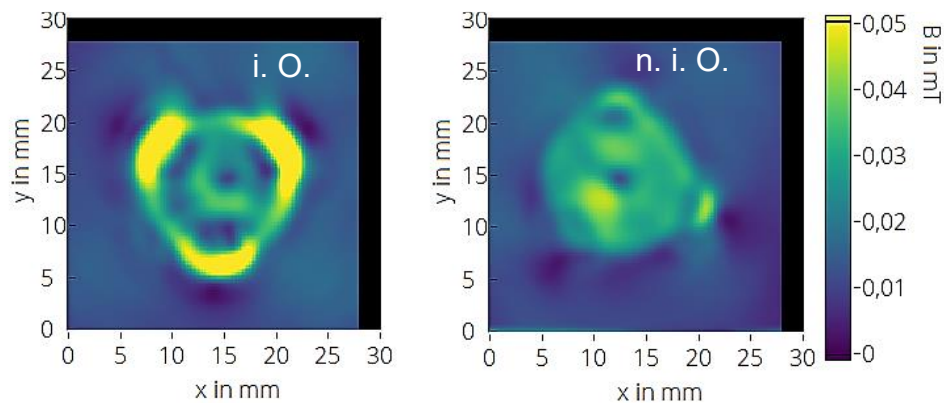


Abbildung 2: Exemplarische Ergebnisse der pMFT einer Segmentbuckelschweißung mit Darstellung einer qualitätsgerechten (i. O.) und einer unzureichenden Schweißverbindung (n. i. O.) [23]

Weitere mögliche Verfahren zur ZfP von Buckelschweißverbindungen sind die Durchstrahlungsprüfung und die Thermographie. Die Durchstrahlungsprüfung erfordert einen sehr hohen apparativen Aufwand, ist mit Strahlungsbelastung verbunden und für die Anwendung in der Serienfertigung von Buckelschweißverbindungen ungeeignet. Die Thermographie wurde zum Prüfen von Punktschweißverbindungen untersucht, hat sich jedoch wegen der unterschiedlichen Emissivität der Oberflächen, den Einflüssen von Materialinhomogenitäten und den langen Messzeiten nicht in der Serienfertigung etabliert [27–29]. Die Qualitätsmerkmale von Buckelschweißverbindungen sind nicht einheitlich. Bei Blech-Blech-Verbindungen (Buckelschweißverbindungen mit geprägten Buckeln und Punktschweißverbindungen) ist es üblich, den Punktdurchmesser und die Bruchart als Qualitätskriterium zu ermitteln [30], wobei der Punktdurchmesser auch zerstörungsfrei ermittelt werden kann. Für Fügeelemente (meist Massivbuckel) werden als Bewertungsmaßstab die Auszugs- oder Ausdrückkräfte, seltener das Torsionsmoment ermittelt [5, 6]. Die Umrechnung ist durch die Anwendung der Festigkeitslehre möglich. Es konnten keine Quellen gefunden werden, in denen einfach anzuwendende Regeln, z. B. das Nennspannungskonzept [31], für Buckelschweißverbindungen mit Fügeelementen aufbereitet wurden.

3 Forschungsziel

Das Forschungsvorhaben „Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen“ (IGF-Nr. 21.542 BR/DVS-Nr. 04.3321) verfolgte das Ziel, unterschiedliche Prüfmethode auf deren Eignung zur ZfP von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen wissenschaftlich zu untersuchen. Dazu wird die Korrelation zwischen den Ergebnissen der ZfP und den jeweiligen Verbindungsfestigkeiten wissenschaftlich untersucht und ausgewertet. Für die Untersuchungen wurden drei verschiedene ZfP-Prüfsysteme ausgewählt. Es handelt sich dabei um zwei bildgebende Ultraschallprüfsysteme und dem an der Forschungseinrichtung entwickelten ZfP-System mittels pMFT. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse wurde die pMFT weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung erfolgte durch eine enge Kopplung zwischen numerischen Berechnungen mittels FEM-Simulationen und experimentellen Versuchen. Für die Ultraschallprüfsysteme wurden Empfehlungen zur Anwendung an Buckelschweißverbindungen hausgearbeitet. Diese können von den jeweiligen Systemanbietern genutzt werden, um deren bestehende Systeme anzupassen bzw. weiterzuentwickeln.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

4 Lösungsweg

Ausgehend von der Problemstellung, dem Bedarf der KMU, der Normung und dem Stand der Forschung und Entwicklung und dem Forschungsziel wurden folgende Arbeitshypothesen abgeleitet:

1. Das Nennspannungskonzept liefert die Korrelation zwischen Kopfzugkraft und Anbindungsfläche

Für Buckelschweißungen (z. B. Schweißmuttern und Bolzen) wird eine je nach Anwendung und Anwender unterschiedlich hohe statische Auszugs- bzw. Ausdrückkraft gefordert. Die These ist, dass sie mit der Anbindungsfläche korreliert und ausreichend genau mit dem Nennspannungsnachweis ermittelt werden kann. Nach [31] ist der Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen zugelassen, wenn der Werkstoff ausreichende Duktilität aufweist (Bruchdehnung $> 6\%$) und die Formzahl nicht zu hoch ist (Grenzwert 5). Es wird angenommen, dass die Werkstoffe das Duktilitätskriterium erfüllen, da sie schweißgeeignet sind. In den Normen für Schweißmuttern [32, 33] wird ein Stahl gefordert, der höchstens 0,25 % Kohlenstoff enthält. Einzige Ausnahme ist der in Fahrzeugteilen häufig verwendete Mangan-Bor-Stahl 22MnB5, der im gehärteten Zustand eine Bruchdehnung von 5 % aufweist [34]. Die Formzahl ist abhängig von der Geometrie und der Beanspruchungsart und muss für jede zu schweißende Kombination bestimmt werden. Hier soll der Nachweis der These experimentell durch Ausmessen der Bruchflächen der Proben erfolgen, an denen die Kopfzugkraft ermittelt wurde. Die Korrelation von Kopfzugkraft und Anbindungsfläche dient der Ermittlung der Mindestanbindungsfläche bei gegebener bzw. geforderter Kopfzugkraft.

2. Die bildgebende Ultraschallprüfung und pMFT ermitteln jeweils die Anbindungsfläche

Die Ermittlung der Anbindungsfläche ist die Grundlage für den Qualitätsnachweis von Buckelschweißverbindungen (siehe 1. Arbeitshypothese).

Bildgebende Verfahren der Ultraschallprüfung sind geeignet zur ZfP von Buckelschweißverbindungen, obwohl sie dafür zurzeit nicht eingesetzt werden. In [22] wurde der Nachweis bereits exemplarisch erbracht. Der Autor und weitere Systemanbieter arbeiten im PA mit und bringen die Prüftechnik und ihre Erfahrungen ins Projekt ein. Die Grenzen der Systeme hinsichtlich ihrer Auflösung (in Abhängigkeit von der Blechdicke), der Größe und Ebenheit der Prüffläche, des Einflusses von Randabständen (Bohrungen) und ihre Zuverlässigkeit sind experimentell zu ermitteln. Es ist zu klären, wie sich das fehlende Rückwandecho und Bohrungen in Blechteilen auf das Prüfergebnis auswirken.

Die pMFT ist ebenfalls geeignet, um die Anbindungsfläche zu ermitteln. Im abgeschlossenen IGF-Projekt wurden die Grundlagen gelegt [26]. Es ist ein Auswertealgorithmus zu

entwickeln, die Materialkennwerte zu ermitteln (3. und 4. Arbeitshypothese) und entsprechend der Ultraschallprüfung die Verfahrensgrenzen zu erforschen. Dem Anwender steht dann eine vergleichende Charakterisierung von zwei geeigneten Methoden der ZfP zur Verfügung.

3. Der Auswertalgorithmus der pMFT für Buckelschweißverbindungen mit Massivbuckeln unterscheidet sich von dem für Punktschweißverbindungen

Die pMFT ist für die ZfP von Punktschweißverbindungen geeignet. Diese Methode, bei der der Punktdurchmesser ermittelt wird, wurde von der Forschungseinrichtung im Rahmen eines IGF-Projektes entwickelt [23]. In Vorversuchen wurde nachgewiesen, dass auch Buckelschweißverbindungen bewertet werden können. Der dafür angepasste Auswertalgorithmus ist noch im Entwicklungsstadium. Im Rahmen der Arbeiten konnte nicht geklärt werden, welchen Einfluss die Geometrie und die Werkstoffeigenschaften der Fügezone auf das Prüfergebnis ausüben.

4. Magnetische Eigenschaften des Schweißgefüges variieren im Vergleich zum Walzgefüge und beeinflussen die Remanenzflussdichte

Eine wesentliche Einflussgröße auf die Remanenzflussdichte übt die Hysteresekurve des Materials aus. Diese Problematik konnte im vorangegangenen IGF-Projekt [23] nicht geklärt werden und war auch nicht Projektziel. Es ist bekannt, dass das Gefüge (Korngröße, Phasenanteile) des ferromagnetischen Werkstoffes die Hysteresekurve beeinflusst [35, 36]. In welchem Maß und wie groß der Einfluss auf die Remanenzflussdichte bei der ZfP von Buckelschweißverbindungen ist, soll in diesem Projekt erforscht werden (5. Arbeitshypothese).

5. FEM-Simulation liefert den Nachweis der physikalischen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

Diese These ist allgemein anerkannt. Hier soll erstmals die Remanenzflussdichte an der Oberfläche von Bauteilen mit Widerstandsschweißverbindungen durch numerische Simulation bestimmt werden. Dazu sind die Materialkennwerte notwendig (4. Arbeitshypothese). Die innere und äußere Geometrie der Verbindung, das Gefüge und dessen magnetischen Eigenschaften sollen in der Simulation variiert werden, um deren Einfluss auf die Remanenzflussdichte zu analysieren (umfangreiche Sensitivanalysen).

Die Bearbeitung erfolgte iterativ im Zusammenspiel mehrerer Methoden: Experiment, numerische Simulation, Algorithmierung, sowie Test und Verallgemeinerung.

Die Experimente umfassen die Herstellung und die zerstörungsfreie sowie die zerstörende Prüfung der Buckelschweißverbindungen. Sie dienen der Validierung der Simulation und liefern die Datenbasis für die Algorithmierung und den Test. Weitere Experimente sind zur Ermittlung der magnetischen Materialkennwerte durchzuführen. Die existierenden Möglichkeiten, die magnetischen Kennwerte des Grundwerkstoffes zu ermitteln, sind nicht für

den verfahrensbeeinflussten Werkstoff geeignet. Da dieser aus der Schweißprobe entnommen werden muss und ein sehr geringes Volumen aufweist, musste ein neuer Versuchsstand entwickelt werden.

Die numerische Simulation mittels FEM erklärt die physikalischen Phänomene der Magnetisierung. Es wurde ein eigenes Modell genutzt, das während der Projektbearbeitung weiterentwickelt wurde, um erstmals die Remanenzflussdichte an der Oberfläche von Buckelschweißverbindungen zu berechnen. Die in die Simulationsmodelle zu implementierenden Materialdaten (Permeabilität, Koerzitivfeldstärke und Remanenzflussdichte) müssen mit einem eigens entwickelten Versuchsstand bestimmt werden. Diese Werte stehen für die Grundwerkstoffe nur vereinzelt und für die verfahrensbeeinflussten Werkstoffe nicht zur Verfügung.

Die *Algorithmierung* liefert den Lösungsweg für die Berechnung der Anbindungsfläche. Für die pMFT wurde eine neue Berechnungsvorschrift gefunden, da die Anwendung des Punktschweiß-Algorithmus nicht zielführend ist [23]. Die von zwei unterschiedlichen PA-Mitgliedern bereitgestellten Ultraschallprüfgeräte wurden von den Bereitstellern an die Prüfaufgabe adaptiert. Die Algorithmierung erfolgte mit einer Trainingsmenge, die ca. 2/3 der Schweißverbindungen umfasst. Die restlichen Schweißverbindungen wurden als Testmenge verwendet.

Test und Verallgemeinerung dienen der Bewertung der Prüfmethoden und der statistischen Absicherung der Ergebnisse, so dass diese mit einer abschätzbaren Messunsicherheit angewendet werden können.

Das Forschungsvorhaben ist in vier Arbeitspakete (AP) mit entsprechenden Unterarbeitspaketen eingeteilt:

AP1: Präzisierung der Werkstoffauswahl, Prüfmethodenauswahl, Werkstoffbeschaffung

AP2: Herstellen, Prüfen und Charakterisieren von Schweißproben

AP2.1: Ermitteln der Schweißbereiche, Herstellen der Schweißproben

AP2.2: Prüfen der Schweißverbindungen mittels ZfP und ZP

AP2.3: Auswertung und Vergleich der Prüfergebnisse

AP2.4: Entwicklung eines Auswertealgorithmus für Buckelschweißverbindungen mit Masivbuckeln

AP3: Numerische Simulation der pMFT mittels Finite Elemente Methode

AP3.1: Aufbau eines Versuchsstands zur Erfassung magnetischer Materialdaten

AP3.2: Ermitteln der magnetischen Materialdaten

AP3.3: Numerische Simulation

AP4: Test und Verallgemeinerung, Ergebnistransfer, Abschlussbericht

In AP2 und AP3 wurden die wesentlichen Versuche des Vorhabens durchgeführt und werden im folgenden AP2 und AP3 im Detail beschrieben. AP1 und AP4 sind darin berücksichtigt.

Arbeitspakete (AP)	Jahr	1				2				3 (ANV)	
	Quartal	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
erhebliche pandemiebedingte Einschränkungen zu Versuchsfeldern und Werkstätten der TU Dresden durch COVID-19											
AP1	Präzisierung der Werkstoffauswahl, Prüfmethodeauswahl, Werkstoffbeschaffung	■	■								
AP2	Herstellen, Prüfen und Charakterisieren von Schweißproben			■	■	■	■	■	■	■	■
AP2.1	Ermitteln der Schweißbereiche, Herstellen der Schweißproben			■	■	■	■	■	■	■	■
AP2.2	Prüfen der Schweißverbindungen mittels ZFP und ZP				■	■	■	■	■	■	■
AP2.3	Auswertung und Vergleich der Prüfergebnisse					■	■	■	■	■	■
AP2.4	Entwicklung eines Auswertalgorithmus für Buckelschweißverbindungen mit Massivbuckeln					■	■	■	■	■	■
AP3	Numerische Simulation der Magnetfeldprüfung mittels Finite Elemente Methode	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP3.1	Aufbau Versuchsstand zur Erfassung magnetischer Materialdaten	■	■	■	■						
AP3.2	Ermitteln der magnetischen Materialdaten					■	■	■	■	■	■
AP3.3	Numerische Simulation						■	■	■	■	■
AP4	Ergebnistransfer, Test und Verallgemeinerung, Abschlussbericht	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	■			■			■		■	■
	Zwischenberichte und Schlussbericht		■						■	■	■

Abbildung 3: Zeitlicher Ablauf der Bearbeitung der Arbeitspakete (ANV: ausgabeneutrale Verlängerung, pandemiebedingt)

Im Folgenden sind die Termine der Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) aufgeführt:

1. Sitzung: 19.01.2021, Online, im Rahmen der AG V3.9 Sitzung des DVS
2. Sitzung: 14.10.2021, Online, im Rahmen der AG V3.9 Sitzung des DVS
3. Sitzung: 28.04.2022, Hybrid, im Rahmen der AG V3.9 Sitzung des DVS
4. Sitzung: 11.10.2022, Hybrid, im Rahmen der AG V3.9 Sitzung des DVS
5. Sitzung: 26.04.2023, Präsenz, im Rahmen der AG V3.9 Sitzung des DVS

5 Herstellen, Prüfen und Charakterisieren der Buckelschweißproben (AP2)

5.1 Versuchsplanung und Methodik

5.1.1 Festlegung der Fügeaufgaben

Gemeinsam mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurden die im Forschungsantrag vorgeschlagenen elf Fügeaufgaben abgestimmt und bestätigt (Tabelle 1). Diese Fügeaufgaben dienten zur Untersuchung der unterschiedlichen Prüfsysteme hinsichtlich ihrer Eignung zur ZfP von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen. Sie unterscheiden sich in Fügeelemente mit massiven und mit geprägten Buckeln. Für die Fügeaufgaben mit massiven Buckeln wurden zwei Materialkombinationen (MDK) mit M6-Ringbuckelmutter, zwei mit M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) und eine mit M8-Massebolzen gewählt. Die Fügeaufgaben der geprägten Buckel bestehen aus MDK mit 8 mm langen Buckeln. Alle MDK wurden mit Gleichstrom-Mittelfrequenzschweißtechnik (MFDC) geschweißt. Vier MDK wurden zudem mittels Kondensatorentladungsschweißtechnik (KE) hergestellt. Die eingesetzte Anlagentechnik sowie die gewählten Schweißparameter zum Schweißen der Proben sind in Abschnitt 5.2.2 bzw. Abschnitt 5.2.4 beschrieben. Die MDK mit massivem Buckel werden auf quadratische Bleche mit Kantenlängen von 48 mm geschweißt. Die Bleche der Versuchsreihen MF1, MF2, MF4, MF5, KE4 und KE5 weisen eine zentrische Bohrung mit einem Durchmesser von 7 mm auf. Die Fügeelemente wurden teilweise durch den PA bereitgestellt und teilweise durch die Forschungseinrichtung selbst beschafft. Sie sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Schweißproben mit geprägten Buckeln werden aus rechteckigen Blechen mit einer Länge von 120 mm und einer Breite von 40 mm gekreuzt geschweißt. Für die Proben wurden die Buckel an der Forschungseinrichtung durch eine selbstentwickelte Prägevorrichtung hergestellt. Die Vorrichtung ist in Abschnitt 5.2.1 beschrieben. Es werden Elektroden nach ISO 5821-C0-20-22 der Legierung CuCr1Zr eingesetzt. Für die Versuchsreihen der Ring- und Vierkantbuckelmutter (MF1, MF2, MF4, MF5, KE4, KE5) besitzt die untere Elektrode eine Bohrung von 7,0 mm zum sicheren und reproduzierbaren Positionieren der Schweißmutter mittels Zentrierdorn. Für Versuchsreihe MF3 hat die untere Elektrode eine Sacklochbohrung mit einem Durchmesser von 17 mm und einer Bohrungstiefe von 14 mm. Das Loch dient der sicheren und reproduzierbaren Positionierung der M8-Massebolzen und zur Aufnahme des Gewindebolzens. Es fließt kein Schweißstrom durch den Gewindebolzen. Somit bleibt er vom Schweißprozess unbeeinflusst. Für die Versuchsreihen der geprägten Buckelschweißverbindungen werden beidseitig Elektroden nach ISO 5821-C0-20-22 aus CuCr1Zr eingesetzt.

Tabelle 1: Fügeaufgaben mit Materialkombinationen und Schweißverfahren (MF = Mittelfrequenz, KE = Kondensatorentladung) zur Untersuchung der ZfP-Systemeignung

Buckelart	Materialkombination (Fügeelement/Buckelgeometrie – Blech (Blechdicke t))	Verfahren MF/KE (ID)
Buckel massiv	M6-Ringbuckelmutter – HX340LAD+Z (3,0 mm)	MF1
	M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) – HX340LAD+Z (1,5 mm)	MF2
	M8-Massebolzen – HX340LAD+Z (1,5 mm)	MF3
	M6-Ringbuckelmutter – 22MnB5+AS (1,5 mm, pressgehärtet)	MF4 KE4
	M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) – 22MnB5+AS (1,5 mm, pressgehärtet)	MF5 KE5
Buckel geprägt	Langbuckel (8 mm) in HX340LAD+Z (1,5 mm) – HX340LAD+Z (3,0 mm)	MF6 KE6
	Langbuckel (8 mm) in 1.4301 (1,5 mm) – 1.4301 (1,5 mm)	MF7 KE7

Tabelle 2: Werkstoffdaten der verwendeten Blechwerkstoffe und Fügeelemente

Werkstoff (Fügeelement)	Fließgrenze R_p	Zugfestigkeit R_m
C15+C, blank (M6-Ringbuckelmutter)		
C15+C, blank (M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST))		460 MPa [37]
C15+C, verzinkt (M8-Massebolzen)		
HX340LAD+Z, 1,5 mm (Blech)		447,6 MPa [38]
HX340LAD+Z, 3,0 mm (Blech)		434,0 MPa [38]
22MnB5+AS, pressgehärtet (Blech)		1300 – 1650 MPa [39]
X5CrNi18-10 (1.4301), 1,5 mm (Blech)		500 – 700 MPa [40]



Abbildung 4: Untersuchte Fügeelemente v.l.n.r.: M6-Ringbuckelmutter, M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST), M8-Massebolzen und geprägter 8 mm-Langbuckel

5.2 Versuchsanlagen

5.2.1 Prägevorrüstung zum Herstellen der geprägten Buckel

Die Prägevorrüstung für die Herstellung der geprägten Langbuckel wurde an der Forschungseinrichtung nach DIN EN ISO 8167 [41], DIN 8519 [42] sowie [43] entwickelt und hergestellt. Das Prägwerkzeug wird für die Versuchsreihen MF6, MF7, KE6 und KE7 eingesetzt. Nach DIN EN ISO 8167 [41] ergeben sich folgende Geometrien für eine Blechdicke von 1,5 mm:

- Buckellänge: 6,3 mm
- Buckelbreite: 2,5 mm
- Buckelhöhe: 0,8 mm
- Buckelradius: 1,25 mm

Als Werkzeugmaterial kommt 42CrMo4 zum Einsatz. Da es sich um 600 Prägevorgänge handelt, war der Verschleiß des Werkzeugs gering und es wurde auf Schmiermittel verzichtet. Die Prägevorgänge wurden im Schweißportal, beschrieben in Abschnitt 5.2.2, durchgeführt. Die Werkzeugaufnahme wird durch einen Zapfen mit einem Durchmesser von 20 mm realisiert. Dies entspricht der Elektrodenaufnahme. Das Prägwerkzeug ist in

Abbildung 5 dargestellt. Die technischen Zeichnungen des Prägwerkzeugs sind im Anhang A, Abbildung 67 und Abbildung 68 zu finden. Zur reproduzierbaren Positionierung wurde eine Einlegevorrichtung für die zu prägenden Bleche verwendet.

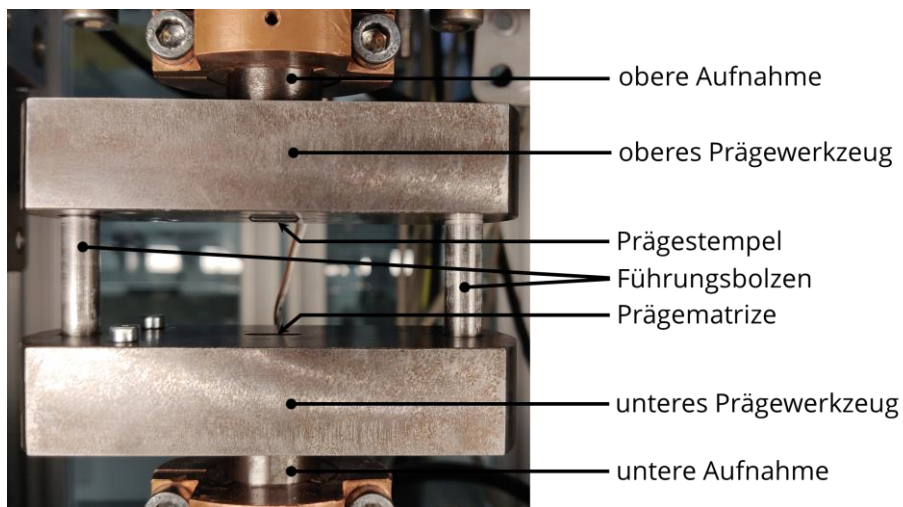


Abbildung 5: Prägwerkzeug zum Prägen der Langbuckel für die Versuchsreihen MF6, MF7, KE6 und KE7

5.2.2 Anlagentechnik zum Schweißen der Proben: MFDC-KE-Portalschweißsystem

Die Proben werden in einer Portalschweißanlage hergestellt, die über Stromquellen für das Gleichstrom-Mittelfrequenz- (MFDC) und für das Kondensatorentladungsschweißen (KE) verfügt. Die Kenndaten der Anlage sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Beide Arten der Schweißstromquellen wurden eingesetzt. Die Anlage hat den Vorteil, dass die unterschiedlichen Schweißsysteme MFDC und KE den gleichen mechanischen Aufbau zum Schweißen der Proben nutzen. Dies ermöglicht Vergleiche zwischen beiden elektrischen Schweißsystemen. Die Portalschweißanlage und der experimentelle Aufbau zum Herstellen der Buckelschweißproben ist in Abbildung 6 zu sehen.

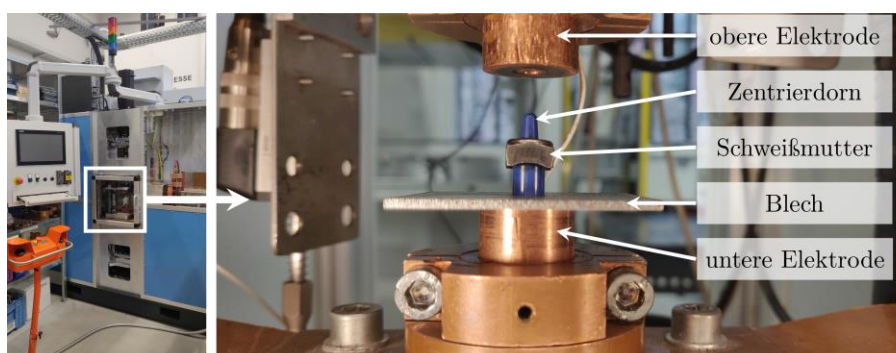


Abbildung 6: Schweißanlage zum KE- und MFDC-Schweißen als Portalsystem an der Technischen Universität Dresden (links) und detaillierter Darstellung des Arbeitsraums mit eingelegtem Fügeelement auf Zentrierdorn am Beispiel der Versuchsreihe MF4/KE4 und Blech (rechts)

Tabelle 3: Kenndaten des Versuchsstands zum Widerstandspunkt- und Buckelschweißen mittels KE- und MFDC-Schweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Füge-
technik und Montage

Bezeichnung	Kenndaten
Schweißstromquelle MFDC	HWH GeniusHWI 436W BAS-EA, 400-440V, 2400A
Bediensoftware MFDC	XPegasus Gold
Max. Schweißstrom MFDC	56 kA
Leistungsmodul KE	LKE 50
Bediensoftware KE	PrimusKE
max. Ladespannung KE	1.300 V
Kondensatorenbanke	4: 12,5 mF; 7,6 mF; 1,6 mF und 21,3 mF
max. Ladeenergie KE	(17 + 10,6) kWs
Trafoübersetzung KE	wahlweise 20 oder 30
Max. Schweißstrom KE	120 kA in 1,9 ms, 254 kA in 2,54 ms
Kraftsystem	SEW Synchronservomotor CMP80M
Max. Kraft	30 kN

5.2.3 Ermittlung der Schweißbereiche

Die Ermittlung der Schweißbereiche erfolgt durch die Variation des Schweißstroms, beginnend bei 4 kA, bis zum Auftreten von starken Schweißspritzern. Die Elektrodenkraft und die Schweißzeit werden konstant gehalten. Der Unterschied zwischen geringer und starker Spritzerneigung äußert sich in der Intensität der Schweißspritzer. Bei einer geringen Spritzerneigung kommt es nicht bei jeder Schweißung zu Schweißspritzern. Sie hinterlassen keine Beeinträchtigungen am Bauteil. Bei einer starken Spritzerneigung treten bei fast jeder Schweißung Spritzer auf. Die Schweißbereiche sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 zu sehen. Darin sind auch die gewählten Schweißparameter angegeben. Die Parameterwahl ist im nächsten Abschnitt 5.2.4 erläutert.

5.2.4 Schweißparameter der Buckelschweißverbindungen

Zum Herstellen unterschiedlicher Qualitätsstufen werden fünf Parametersätze (PS1 – PS5) je Versuchskombination (ID) ausgewählt. In Tabelle 4 sind die Versuchskombinationen mit den jeweiligen Schweißparametern zum Herstellen der Schweißproben dargestellt. Diese Festlegungen basieren auf zuvor ermittelten Schweißbereichen in Abschnitt 5.2.3. Diese beinhalten die Gutschweißungen sowie die unteren und oberen Grenzbereiche. Die unteren Grenzbereiche sind durch eine unzureichende Anbindung definiert. Teilweise können die Verbindungen bereits durch geringste mechanische Belastungen, etwa durch die Handhabung der Proben, versagen. Bei den oberen Grenzbereichen kommt es zu deutlichen Schweißspritzern, mindestens der Spritzerklasse 2 nach [44]. Für die MFDC-Schweißungen wird eine Schweißzeit von 20 ms und eine jeweilige Vor- und Nachhaltezeit von 400 ms gewählt. Diese Parameter orientieren sich am IGF-Vorhaben Nr. 19.878 BR der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg [45]. Die KE-Schweißungen werden mit einer

Kondensatorkapazität von 7,26 mF bei einem Übersetzungsverhältnis 1:20 als Einzelpuls hergestellt.

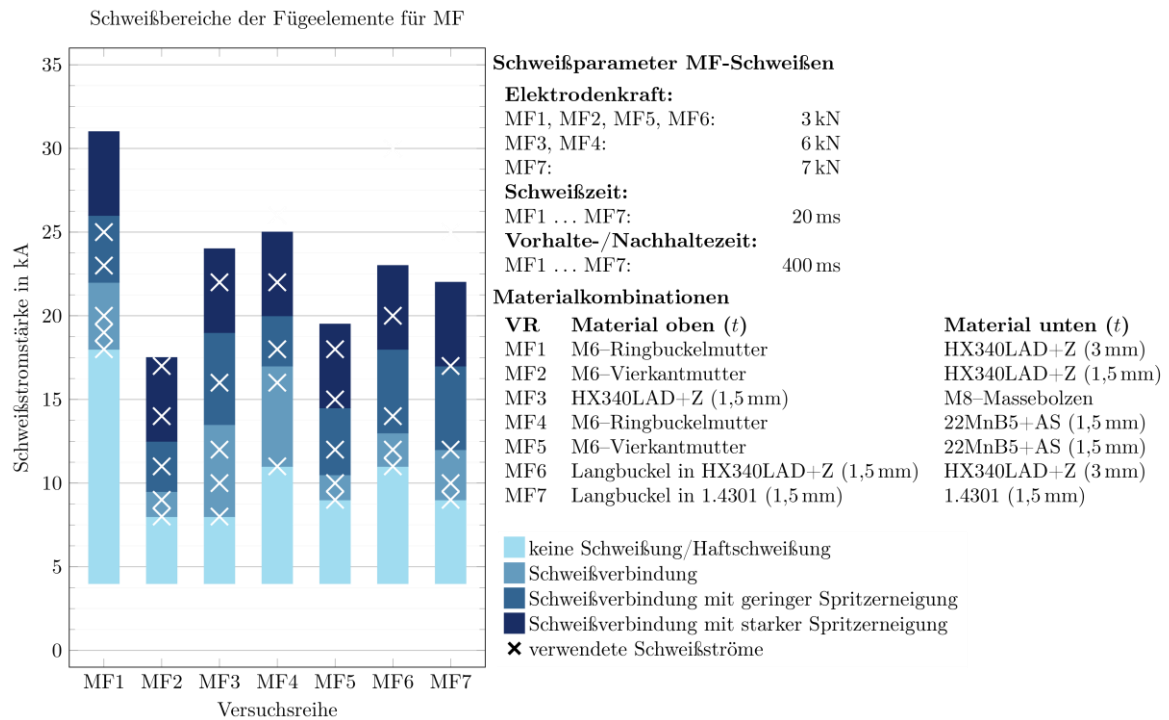


Abbildung 7: Ermittelte Schweißbereiche der MFDC-geschweißten Versuchsreihen mit Angabe der verwendeten Schweißparameter für die einzelnen Versuchsreihen und Parameterstufen

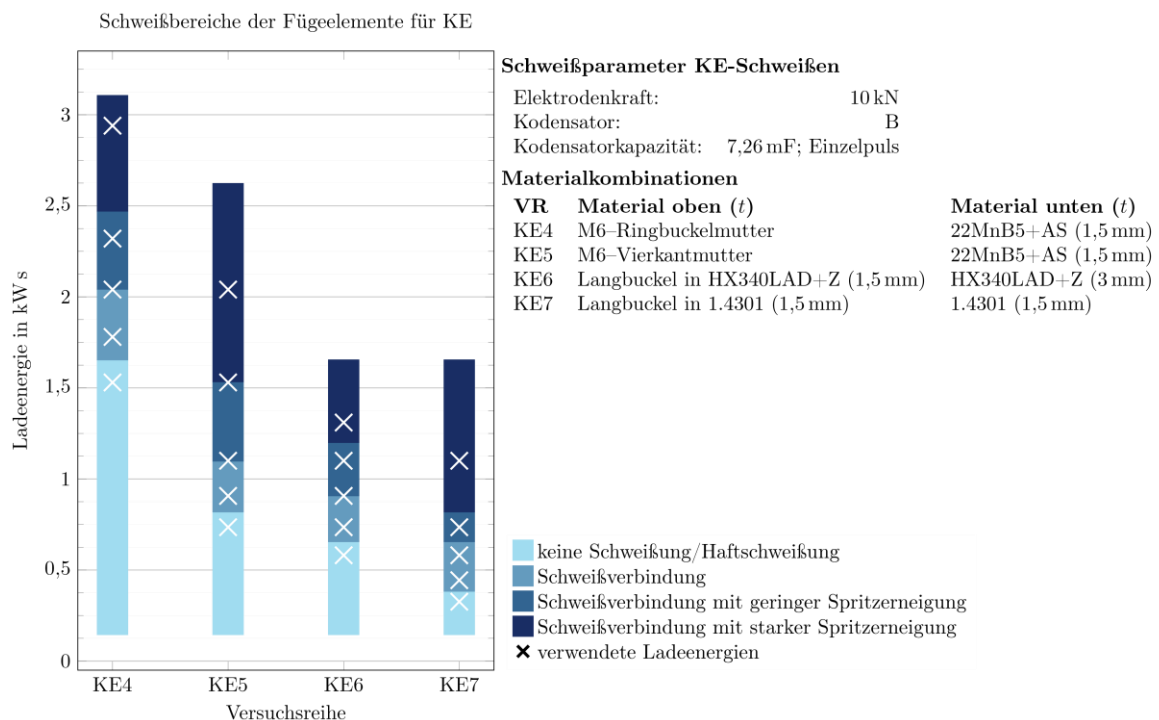


Abbildung 8: Ermittelte Schweißbereiche der KE-geschweißten Versuchsreihen mit Angabe der verwendeten Schweißparameter für die einzelnen Versuchsreihen und Parameterstufen

Tabelle 4: Schweißparameter für die Herstellung der Schweißproben für die ZfP und ZP

VR	Kraft in kN	Schweißzeit in ms (Vorhaltezeit, Nach- haltezeit)	Schweißstrom (MF) in kA / Ladeenergie in kJ (Ladespannung in V)				
			PS1	PS2	PS3	PS4	PS5
MF1	3,0	20 (400, 400)	18	19	20	23	25
MF2	3,0	20 (400, 400)	8	9	11	14	17
MF3	6,0	20 (400, 400)	8	10	12	16	22
MF4	6,0	20 (400, 400)	11	16	18	22	26
MF5	3,0	20 (400, 400)	9	10	12	15	18
MF6	5,0	20 (400, 400)	11	12	14	20	30
MF7	7,0	20 (400, 400)	9	10	12	17	25
KE4	10,0	Einzel puls	1,53 (650)	1,78 (700)	2,04 (750)	2,32 (800)	2,94 (900)
KE5	10,0	Einzel puls	0,735 (450)	0,907 (500)	1,10 (550)	1,53 (650)	2,04 (750)
KE6	5,0	Einzel puls	0,581 (400)	0,735 (450)	0,907 (500)	1,10 (550)	1,31 (600)
KE7	7,0	Einzel puls	0,326 (300)	0,444 (350)	0,581 (400)	0,735 (450)	1,10 (550)

5.2.5 Prüfsysteme für die ZfP und ZP der Schweißproben

5.2.5.1 pMFT-System

Das Prüfsystem für die pMFT ist eine Eigenentwicklung der Forschungseinrichtung. Es besteht aus einer Magnetisierungsvorrichtung und einer Messvorrichtung. Die Magnetisierungsvorrichtung besteht aus zwei gleichsinnig orientieren und koaxial ausgerichteten Spulen mit Spulenkernen aus Luft oder Stahl. Neben der bestehenden MV16 wurde im Vorhaben eine neuentwickelte Magnetisierungsvorrichtung MV25 verwendet. Tabelle 5 zeigt die wesentlichen Kenngrößen beider Magnetisierungsvorrichtungen. Die Weiterentwicklung betrifft den Spulenkerndurchmesser, welcher für die Buckelschweißelemente vergrößert wurde. Weiter wurde die Kerengeometrie für die Versuchsreihe MF3 angepasst, sodass der Gewindebolzen, ähnlich wie bei der Schweißvorrichtung, durch eine Sacklochbohrung mit einem Durchmesser von 8 mm aufgenommen werden kann. Für die anderen Versuchsreihen wurden Einlegevorrichtungen für eine reproduzierbare Probenpositionierung verwendet. Vor jeder Magnetisierung wurde jede Probe entmagnetisiert. Dies erfolgte mit einem 50 Hz-Wechselstrommagnetisierer durch Herausführen der Proben aus einem elektromagnetischen Wechselfeld. Die anschließende Magnetisierung erfolgte mit einer Dauer von 500 ms und dem maximal möglichen Magnetisierungsstrom, je nach Vorrichtung (siehe Tabelle 5), wodurch die magnetische Sättigung im Bereich der Fügezone erreicht wurde.

Tabelle 5: Spulenparameter der Magnetisierungsvorrichtungen

Kenngroße	Bestehende Magnetisierungsvorrichtung (MV16)	Neuentwickelte Magnetisierungsvorrichtung (MV25)
Spulenkerndurchmesser	16 mm	25 mm
Spulenhöhe (Windungshöhe)	15 mm	20 mm
Spulenkernmaterial	S235, Kunststoff	42CrMo4, Luft
Drahtdurchmesser	0,6 mm (Cu-Lack)	0,6 mm (Cu-Lack)
Spulenumwindungen	133 (vierlagig)	180 (sechslagig)
Max. Spulenstrom	30 A	24 A

Nachdem die Proben magnetisiert wurden, wurde die magnetische Restflussdichte, die Remanenz, an der Oberfläche gemessen. Hierfür kommt die von der Forschungseinrichtung entwickelte Messvorrichtung RMV02 zum Einsatz. Diese besteht aus einem Kreuztisch (x - y -Ebene) und einer zusätzlich in diesem Vorhaben hinzugefügten z -Achse zur präzisen Höhen- und Abstandseinstellung zwischen Hallsensor und Probenoberfläche. Zur Messung der magnetischen Flussdichte wird der Hallsensor der Firma Allegro Systems A1324UA mit einem Messbereich von ± 50 mT und einer Empfindlichkeit von 50 mV/mT verwendet. Der Hallsensor ist an der z -Achse befestigt, während die Proben durch den Kreuztisch in der x - y -Ebene verfahren werden können. Als weitere Messsysteme wurden vom PA eine Magnetfeldkamera mit Steuer- und Auswertesoftware und zwei Hallsonden mit zugehörigem Messsystem, jeweils für die gesamte Projektlaufzeit, zur Verfügung gestellt. Die Magnetfeldkamera Minicube1D der Firma Magcam NV verfügt über ein integriertes 2D-Hallsensor-Array mit 128×128 Magnetfeldsensoren auf einem einzigen Chip mit einer Größe von $12,7 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$ [46]. Die Firma Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG hat das Messsystem Magnetoscope 1.070 mit axialer und transversaler Hall-Sonde bereitgestellt. Dieses Messsystem wird für die Kalibrierung der RMV02 eingesetzt. Im vorangegangenen Vorhaben IGF 19.208 BR [23] konnte bereits gezeigt werden, dass das Messsystem Magnetoscope 1.070 gleiche Ergebnisse liefert, wie RMV02 bei vergleichbarem Versuchsaufbau. Aus diesem Grund werden die Messungen der Schweißproben nur mit RMV02 als Einzelsensorsystem durchgeführt.

Bei dem eigenentwickelten Messaufbau RMV02 der Technischen Universität Dresden und den Hall-Sonden der Firma Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG handelt es sich um punktuelle Messsensoren. Aus diesem Grund wird mit diesen Systemen die Flussdichte flächig durch mäanderförmiges Scannen oberhalb der Blechoberfläche gemessen. Je nach Scanauflösung dauert eine Messung i.d.R. vier Minuten. Durch die flächige Sensoranordnung der Magnetfeldkamera Magcam Minicube1D beträgt die Messzeit weniger als 30 Sekunden, dabei wird über 30 Einzelmessungen gemittelt. Die Messzeit der Magnetfeldkamera für eine Messung dauert 0,7 Sekunden.

Die Parameter zur Messung der magnetischen Flussdichte mittels RMV02 und MAGCAM Minicube 1D sind in Tabelle 6 zu finden.

Tabelle 6: Parameter zur Messung der mag. Flussdichte mittels RMV02 und MAGCAM Minicube 1D

KenngroÙe	RMV02	MAGCAM Minicube 1D
Messfläcbe	25 mm x 25 mm	12,7 mm x 12,7 mm
Vorschubgeschwindigkeit	20 mm/s	-
Auflöschung	0,2 mm x 0,2 mm	0,1 mm x 0,1 mm
Mittlungen	1	30 Messungen

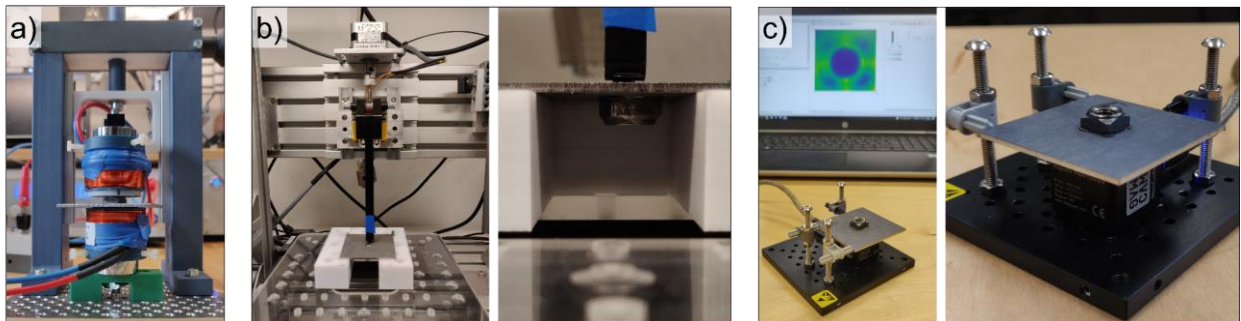


Abbildung 9: Versuchsaufbau der pMFT am Beispiel von M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) mit (a) Magnetisierereinrichtung, (b) Messung der magnetischen Restflussdichte auf der Probenoberfläche durch Abrastern mit einem Hallensensor oder (c) Messung der magnetischen Restflussdichte auf der Oberfläche der Proben mit einem Hallensensor-Array als Magnetfeldkamera MiniCube 1D von MAGCAM mit Messergebnis im Hintergrund

5.2.5.2 Ultraschallprüfsystem 1

Als Ultraschallprüfsystem US1 wurde das bildgebenden Ultraschallprüfsystem RSWA F2-Prüfsystem der Firma Tessonics Inc. eingesetzt. Es wurde durch die Firmen Tessonics Europe GmbH und IfU Diagnostic Systems GmbH im jeweiligen Unternehmen und der Forschungseinrichtung bereitgestellt. Der verwendete Prüfkopf ist mit einem US-Wandler-Array mit 120 Einzelschwingern, 1,25 mm Pitch, ausgestattet.

5.2.5.3 Ultraschallprüfsystem 2

Als Ultraschallprüfsystem US2 wurde das bildgebenden Ultraschallprüfsystem PHAsisBLU der Firma VOGT Ultrasonics GmbH eingesetzt. Es wurde im Unternehmen und der Forschungseinrichtung bereitgestellt. Der verwendete Prüfkopf ist mit einem US-Phased-Array-Wandler mit 121 Einzelschwingern, 1,0 mm Pitch, ausgestattet. Wie beim US1 wird auch für das US2 die gleiche halbautomatische Messvorrichtung, angepasst auf die Prüfkopfgeometrie, verwendet.

5.2.5.4 Ultraschallprüfvorrichtung

Die Messungen erfolgen halbautomatisch durch eine in [47] speziell für das Vorhaben entwickelte Messvorrichtung. Durch diese Messvorrichtung wird der sonst manuell geführte Prüfkopf fixiert und mittels Linearführungen senkrecht auf die Schweißproben abgesenkt. Die Schweißproben werden in einem Wasserbad (Koppelmittel: Wasser) positioniert. Das Wasserbad kann durch einen Schrittmotor in vorher definierten Winkeln gedreht werden. Dies ist notwendig, da die Flächen der Prüfköpfe beider Ultraschallprüfsysteme nicht die gesamte Fläche der Fügeelemente/Verbindungen der Versuchsreihen MF1, MF2, MF3,

MF4, MF5, KE4, KE5 mit einer Messung abdecken. Daher werden mehrere Messungen durch Anpassen der Positionen durch Drehen der Proben realisiert:

- MF1, MF4, KE4: M6-Ringbuckelmutter: 6 Messungen, jeweils 60°-Drehungen, Messungen werden anschließend zusammengesetzt
- MF2, MF5, KE5: M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST): 4 Messungen, je eine pro Buckel, jeweils 90°-Drehungen
- MF3: Massebolzen: 3 Messungen, je eine pro Buckel, 120°-Drehungen

Nach erfolgter Positionierung der Proben und Absenken der Prüfköpfe auf die Proben wird die Messung manuell ausgelöst. Diese Herangehensweise liefert objektive Ergebnisse.

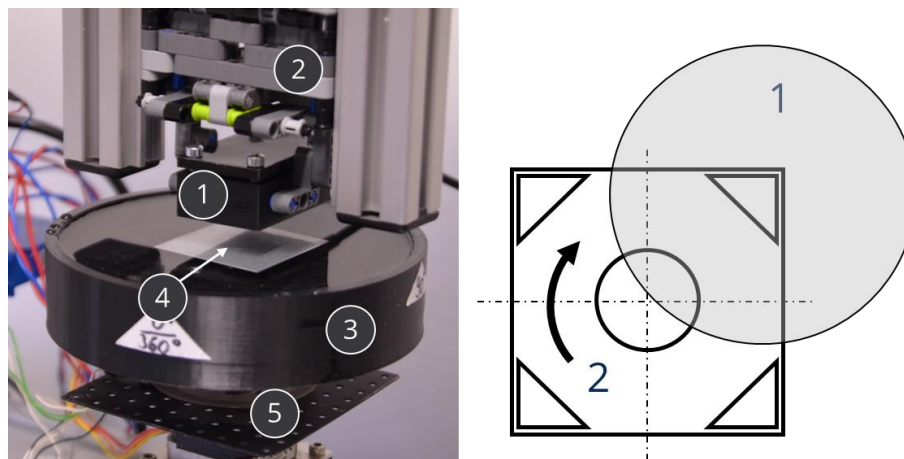


Abbildung 10: Halbautomatische Ultraschallprüfvorrichtung mit links: (1) Prüfkopfaufnahme, (2) Linearführungen zur senkrechten Prüfkopfpositionierung, (3) Wasserbad zur Ultraschalleinkopplung, (4) zu prüfenden Probe und (5) Schrittmotor zur Positionierung der Proben; rechts: Prinzipdarstellung der rotierenden Probenpositionierung am Beispiel der M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST)

5.2.5.5 Anlagentechnik für die ZP

Die ZfP-Ergebnisse werden mit den Ergebnissen der quasistatischen zerstörenden Prüfung der Schweißproben verglichen. Die Proben der Versuchsreihen mit Schweißmuttern werden auf einen Gewindebolzen in einer Kopfzugvorrichtung geschraubt (Abbildung 11, links). Die Proben mit Massebolzen werden über den Gewindebolzen in die Zugvorrichtung eingeschraubt. Die Zugvorrichtung zieht in Achsrichtung am Gewindebolzen, was einer Kopfzugprüfung entspricht. Die Bleche werden durch eine Matrize fixiert, die die Fügeelemente mit einem Umfangsabstand von 1 mm umschließen. Die Matrizegeometrie ist beispielhaft für die M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) in Abbildung 11, rechts, dargestellt. Sie wurde in [47, 48] entwickelt und wird für weitere Anwendungen gleicher Art empfohlen. Die Matrize für eckige Fügeelemente besitzen Aussparungen an den Ecken. Dadurch wird ein Abscheren verformter Schweißbuckel vermieden, was zu fehlerhaften Kopfzugprüfungen führen würde. Über den Gewindebolzen wird an den Schweißmuttern gezogen, bis diese vom Blech abreißen. Die Kraft F wird über den Traversenweg s der Zugprüfmaschine aufgezeichnet. Die Versuchsreihen der Langbuckelproben werden als Kreuzzugproben hergestellt und entsprechen mit einer Kreuzzugvorrichtung zerstörend

geprüft (Abbildung 12). Die Proben sind ungelocht und werden über Klemmbacken mit Zahnprofil gegen Rutschen gesichert. Die Prüfgeschwindigkeit für alle Proben wird mit 10 mm/min festgelegt.

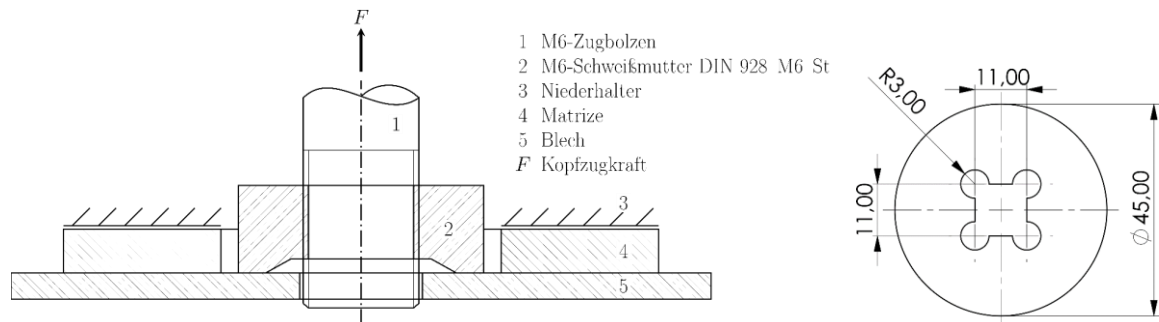


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Vorrichtung für die zerstörende Prüfung der Schweißproben mittels Kopfzugversuch (links) und technische Darstellung der verwendeten Matrizengeometrie für die M6-Vierkantmutter (DIN 928-M6-ST) (rechts)

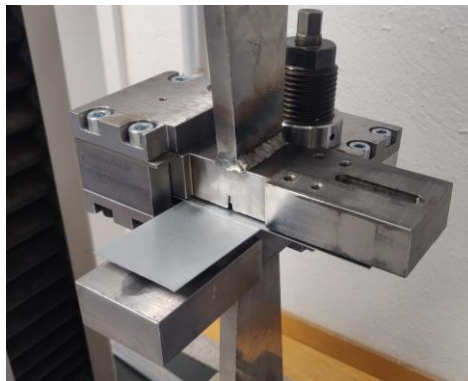


Abbildung 12: Vorrichtung zur Kopfzugprüfung der Langbuckelproben MF6, MF7, KE6, KE7, teilzerlegt zum Einlegen der Proben

5.2.6 Methodik zur Bewertung der Prüfergebnisse

Die aus den drei verschiedenen Prüfsystemen ermittelten Ergebnisse werden den Ergebnissen der ZP zur Bewertung gegenübergestellt. Dazu werden neben den in Abschnitt 5.2.5.5 beschriebenen Ergebnissen der Kopfzugprüfung auch Messungen und Bruchflächenbewertungen am Lichtmikroskop einbezogen. Im Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass die Bruchflächenbewertung nicht einheitlich ist und dass dafür auch keine standardisierten Methoden existieren. Dies führt im Allgemeinen zu Unsicherheiten. In mehreren Sitzungen des PA wurde dies thematisiert, worin die Unsicherheiten seitens der Sitzungsteilnehmer ebenfalls bestätigt wurden. Aus diesem Grund wird eine Herangehensweise mittels geometrischer Analyse und gemessenem Nachsetzweg in Anlehnung an das Nennspannungskonzept gewählt. Durch die entwickelte Matrizengeometrie ist davon auszugehen, dass vorwiegend die Normalkraft bei der quasistatischen zerstörenden Prüfung der Schweißproben wirkt. Im Folgenden wird die analytische Festigkeitsbetrachtung für die einzelnen Buckelgeometrien vorgestellt. Die analytische geometrische Betrachtung erfolgt anhand geometrischer Kennwerte. Diese werden entweder durch entsprechende

Normen oder technische Zeichnungen vorgegeben. Zusätzlich werden Messungen der Buckelgeometrien mittels chromatisch-konfokaler Mikroskopie und entsprechend selbstentwickelten Auswerteprogrammen hinzugezogen.

5.2.6.1 Analytische Festigkeitsbetrachtung

Die zu erwartende minimale Zugkraft $F_{z,min}$ bis zum Versagen der Schweißverbindungen (Bruch) wird in Anlehnung zum Nennspannungskonzept für den einachsigen Lastfall beim Zugversuch betrachtet. Voraussetzung ist eine möglichst senkrecht zu den Anbindungsflächen wirkende Zugkraft. Dies wird durch die in Abschnitt 5.2.5.5 entwickelte Matrize realisiert. Die zu erwartende minimale Zugkraft $F_{z,min}$ kann auf Grundlage der theoretisch zu erwartenden gesamten Anbindungsfläche $A_{w,ges}$ und der jeweils niedrigeren Fließgrenze R_p der Fügepartner nach Gleichung (1) ermittelt werden. Die Elektrodenbewegung bzw. der Nachsetzweg $s_{el,u}$ wird zur Vorhersage der erwarteten geschweißten Flächen $A_{w,ges}$ der Buckel verwendet (Abbildung 13). Die während des Schweißprozesses gemessenen Nachsetzwege $s_{el,u}$ sind für die jeweiligen Versuchsreihen im Anhang B zu finden.

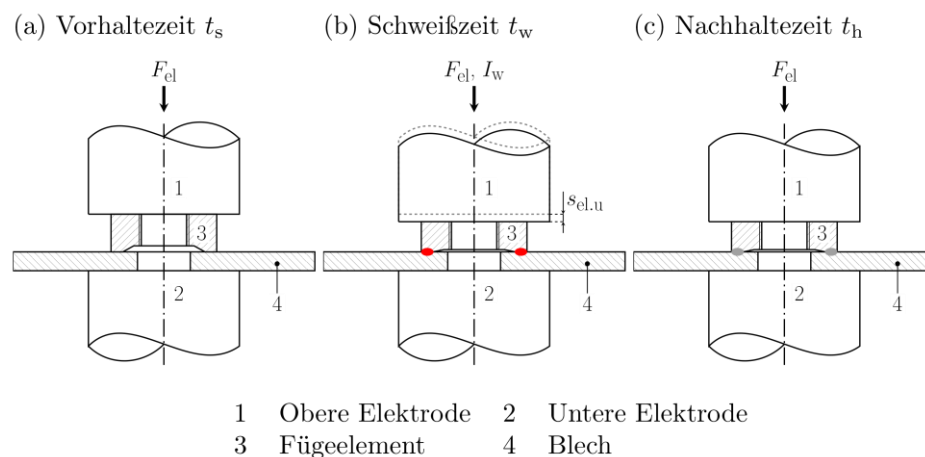


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Buckelschweißens mit den Prozessstufen der Vorhalte-, Schweiß- und Nachhaltezeit und den Prozessparametern Elektrodenkraft F_{el} , Schweißstrom I_w und des Nachsetzwegs $s_{el,u}$

Die Betrachtungen berücksichtigen keine Gewindefestigkeiten. Weiter werden vollangebundene Querschnitte angenommen, die sich durch den Nachsetzweg $s_{el,u}$ und der Buckelgeometrie ergeben. Verdrängtes Material, das aus flüssigen oder festen Phasen während des Schweißprozesses resultiert, wird nicht in die Festigkeitsbetrachtung einbezogen. Diese Betrachtung wird für die Bewertung der Verbindungsqualität auf Grundlage des gemessenen Nachsetzwegs und der sich ergebenden Flächen herangezogen. Die Flächen ergeben sich durch Angaben in den entsprechenden Normen, oder durch eigene topographische Messungen mittels chromatisch-konfokaler Mikroskopie.

$$F_{th} = R_p A_{w,ges} \quad (1)$$

5.2.6.2 Analytische Betrachtung Versuchsreihen MF2, MF5, KE5 mit M6-Vierkantmuttern nach DIN 928-M6-ST

Gemäß Abbildung 14 können die vier Schweißbuckel der Schweißmutter als ein quadratischer Kegelstumpf betrachtet werden.

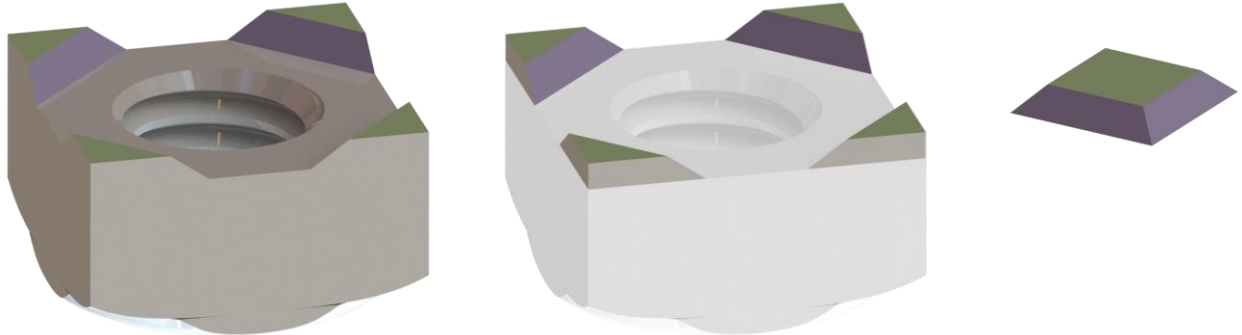


Abbildung 14: Illustration zur Betrachtung der vier Einzelbuckel einer Vierkantmutter nach DIN 928 als gemeinsamer Kegelstumpf

Mit dem Einsinken der Schweißbuckel vergrößert sich die Kontaktfläche der Buckel im Vergleich zur ursprünglichen. Die geometrischen Beziehungen können analytisch gemäß den folgenden Gleichungen (2) bis (13) beschrieben werden, die sich aus den geometrischen Größen nach Abbildung 15 herleiten lassen.

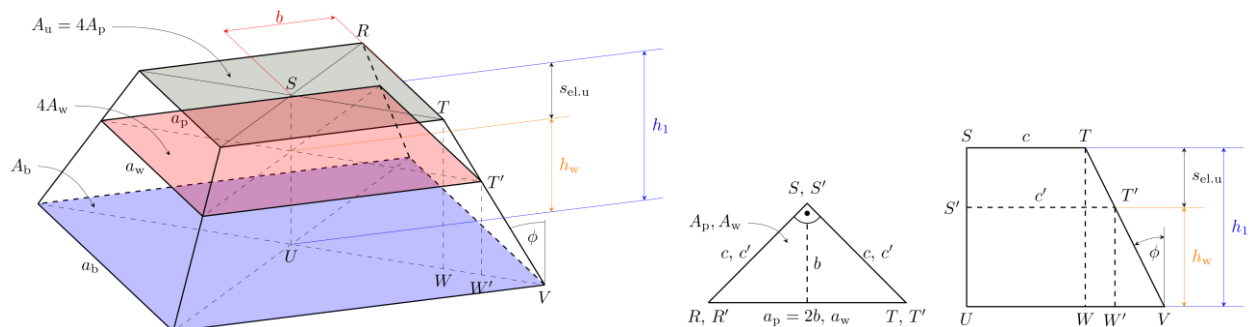


Abbildung 15: Geometrische Größen zur analytischen Beschreibung und Herleitung der zu erwartenden Anbindungsfläche A_w bei Vierkantmuttern nach DIN 928 auf Grundlage des Nachsetzwegs $s_{el,u}$

Die Ausgangsgesamtfläche A_u aller vier Buckeleinzelflächen A_p ergibt sich aus der folgenden Beziehung, mit der Buckeleinzelflächenhöhe b ,

$$A_u = 4b^2. \quad (2)$$

$$A_p = b^2 \quad (3)$$

Die Kantenlänge c lässt sich nach Satz des Pythagoras ebenfalls über b bestimmen und kann auch über die Eckpunkte S und T beschrieben werden:

$$c = \sqrt{2b^2}. \quad (4)$$

$$\overline{ST} = c \quad (5)$$

Durch das Abschmelzen und/oder Verdrängen von Buckelmaterial ergeben sich die äquivalenten Längen c' und $\overline{WW'}$. c' kann nach Gleichung (6) beschrieben werden. Die

Vergrößerung der Fläche kann mit Hilfe des Winkels ϕ und Gleichung (7) beschrieben werden. Des Weiteren setzt sich c' aus c und der Strecke $\overline{WW'}$ zusammen, was durch Gleichung (8) beschrieben wird.

$$\overline{S'T'} = c' \quad (6)$$

$$\tan \phi = \frac{\overline{WW'}}{s_{\text{el.u}}} \quad (7)$$

$$c' = c + \overline{WW'} \quad (8)$$

Durch Umstellen der Gleichung (7) nach $\overline{WW'}$ und Einsetzen von Gleichung (4) in (8) folgt:

$$c' = \sqrt{2b^2} + s_{\text{el.u}} \tan \phi. \quad (9)$$

Durch weiteres Umstellen der Gleichung (4) und Einsetzen in (3) folgt für die Buckeleinzelfläche A_p und der äquivalenten Buckelanbindungseinzelfläche A_w :

$$A_p = \frac{1}{2} c^2 \quad (10)$$

$$A_w = \frac{1}{2} c'^2 \quad (11)$$

$$A_w = \frac{1}{2} (\sqrt{2b^2} + s_{\text{el.u}} \tan \phi)^2 \quad (12)$$

$$A_{w,\text{ges}} = 2 (\sqrt{2b^2} + s_{\text{el.u}} \tan \phi)^2 \quad (13)$$

Mit Hilfe der Gleichung (13) können die zu erwartenden Anbindungsflächen auf Grundlage des Nachsetzwegs $s_{\text{el.u}}$, der Buckeleinzelflächenhöhe b und des Buckelwinkels ϕ berechnet werden. Der Nachsetzweg wurde für jede hergestellte Schweißverbindung des Projekts im Prozess gemessen. Die Buckeleinzelflächenhöhe b und der Buckelwinkels ϕ sind durch DIN 928 für die Fertigung der Schweißmuttern vorgegeben. Die Maße für die verwendete M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST und deren Toleranzen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Geometrische Parameter für die verwendete M6-Vierkantmutter nach DIN 928-M6-ST und deren Toleranzen

Kenngroße	Nennmaß	Toleranz	unterer Grenzwert	oberer Grenzwert
b	1,2 mm	$\pm 0,15$ mm	1,05 mm	1,35 mm
h_1	0,8 mm	$\pm 0,1$ mm	0,7 mm	0,9 mm
ϕ	45°	$\pm 5^\circ$	40°	50°
$A_p(b)$	1,44 mm ² (**)	-	1,1025 mm ² (**)	1,8225 mm ² (**)

(**) berechnete Werte anhand von Toleranzangaben

Daraus ergeben sich Grenzmaße für diese Maße und deren Resultierenden. Um die Toleranzen der verwendeten Schweißmuttern abschätzen zu können, wurden Topographiemessungen an einer Stichprobe von 32 Schweißmuttern mit einem chromatisch-konfokalen Mikroskop durchgeführt und mit den Toleranzangaben nach DIN 928 verglichen. Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Es ist zu erkennen, dass die

Toleranzen bezüglich der Buckelhöhen h_1 eingehalten werden und leicht oberhalb des Nennwerts liegen. Die Buckelflächen A_p liegen dagegen leicht unter dem berechenbaren Nennwert (Gleichung (3)), mit 17 von 128 Flächen ($\approx 13\%$), die außerhalb der Toleranzen liegen. Auf Grundlage der Messergebnisse wird die analytische Betrachtung der zu erwartenden Anbindungsflächen angewendet. Die Buckeleinzelflächenhöhen b wurden mit Gleichung (3) auf Grundlage der gemessenen Buckelflächen A_p berechnet. Als Mindestfläche wird der ungünstigste Fall aus der Kombination kleinster Buckeleinzelflächenhöhe $b = 1,05$ mm mit kleinstem Buckelwinkel $\phi = 40^\circ$ betrachtet. Dieser Fall stellt die kleinste resultierende Fläche nach dem Schweißen dar.

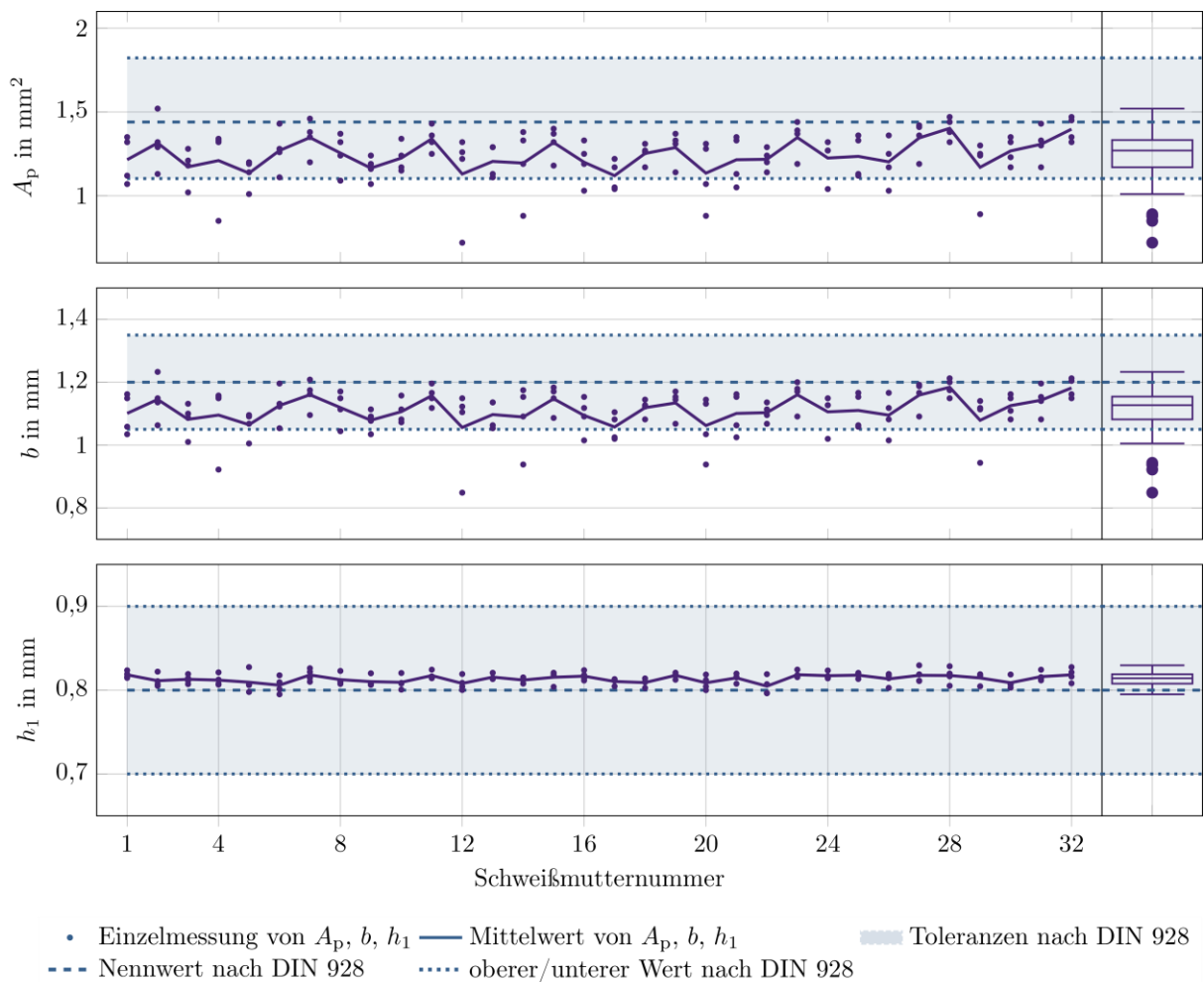


Abbildung 16: Topographiemessungen an 32 M6-Vierkantmuttern nach DIN 928-M6-ST zur Überprüfung der Toleranzen nach DIN 928 mit Darstellung der vier Einzelbuckelflächen A_p und -höhen h_1 und den zugehörigen Mittelwerten je Mutter und statistischer Bewertung

5.2.6.3 Analytische Betrachtung, Versuchsreihen MF1, MF4, KE4 mit M6-Ringbuckelmutter

Die Querschnittsfläche der Buckelgeometrie kann als gleichschenkliges Dreieck oder gleichschenkliges Trapez betrachtet werden. Im Folgenden wird sie als gleichschenkliges Trapez infolge eintretender Buckeldeformationen vor dem Beginn des Schweißens auf Grund der bereits wirkenden Elektrodenkraft angenommen. Die Anbindungsfläche ist ein

Kreisring. Die Zunahme der Ringbreite c' ergibt sich nach Gleichung (7) und in Adaption von Gleichung (8) zu Gleichung (15) bzw. Gleichung (16). Die Anbindungsfläche lässt sich folglich mit dem mittleren Ringbuckelradius r mit Gleichung (17) ermitteln. Die gemessenen Werte der Buckelhöhen h_1 , Ringbreiten c und der Buckelflächen A_p von zehn zufällig ausgewählten M6-Ringbuckelmuttern sind in Abbildung 17 zu sehen. Toleranzangaben sind für h_1 , den Buckeldurchmesser D und die Buckelbasisbreite b in der technischer Zeichnung gegeben [49]. Die anderen geometrischen Größen ergeben sich durch Umrechnungen. Für den analytischen Ansatz wird aus der jeweils gemessenen Buckelfläche A_p und dem Buckeldurchmesser D die Ringbreite c nach Gleichung (14) berechnet.

$$c = \frac{A_p}{\pi} D \quad (14)$$

$$c' = c + 2\overline{WW'} \quad (15)$$

$$c' = c + 2s_{el.u} \tan \phi \quad (16)$$

$$A_{w.ges} = 2\pi r c' \quad (17)$$

Tabelle 8: Geometrische Parameter für M6-Ringbuckelmuttern und deren Toleranzen

Kenngroße	Nennmaß	Toleranz	unterer Grenzwert	oberer Grenzwert
b	1,8 mm	$\pm 0,2$ mm	1,6 mm	2,0 mm
h_1	1,2 mm	+ 0; - 0,2 mm	1,0 mm	1,2 mm
D	13 mm	$\pm 0,2$ mm	12,8 mm	13,2 mm
ϕ	$\sim 33^\circ$ (*)	-	$\sim 29^\circ$ (**)	$\sim 38^\circ$ (**)
A_p	8,98 mm ² (*)	-	7,38 mm ² (*)	10,81 mm ² (*)

(*) gemessene Werte, (**) berechnete Werte anhand von Toleranzangaben

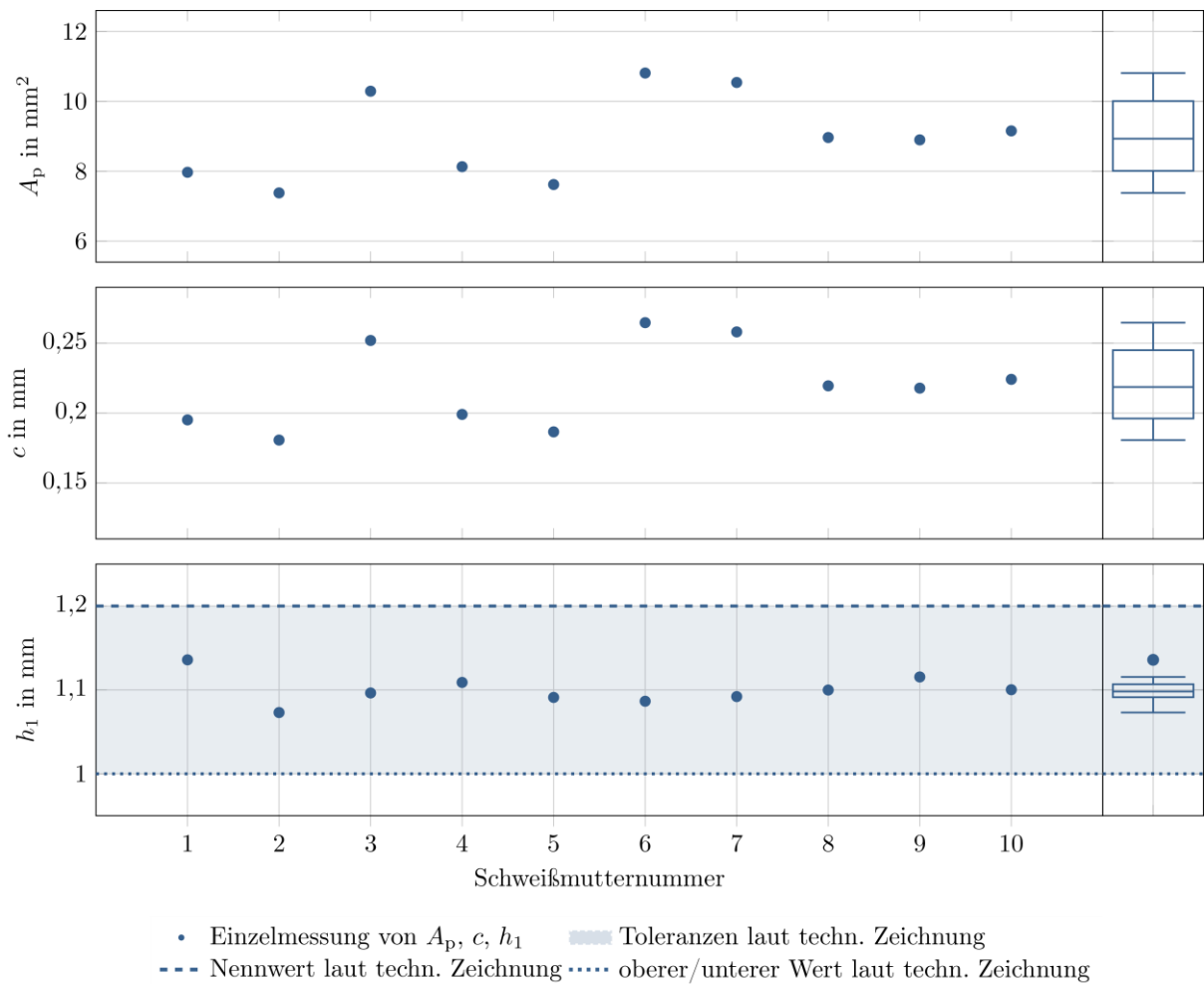


Abbildung 17: Topographiemessungen an zehn M6-Ringbuckelmuttern mit Darstellung der mittleren Ringbuckelhöhen h_1 und statistischer Bewertung

5.2.6.4 Analytische Betrachtung, Versuchsreihen MF3 mit M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln

Die drei Segmentbuckel der M8-Massebolzen werden im Folgenden in ihrer geometrischen Form als rechteckiger Kegelstumpf (Mansardenflachdach) betrachtet. Abbildung 15 zeigt die geometrischen Größen. In Anlehnung an die Herleitung für die Vierkantmuttern nach DIN 928 nach Gleichungen (2) bis (13) kann die Anbindungsfläche A_w eines Buckels über Gleichung (19) ermittelt werden, wobei es sich in diesem Fall nicht um eine quadratische, sondern um eine rechteckige Grundfläche handelt. Daher ergibt sich die obere Deckfläche A_p analog zu Gleichung (2) nach Gleichung (18), mit halben Kantenlängen a und b . Die gesamte Anbindungsfläche $A_{w,ges}$ aller drei Buckel ergibt sich nach Gleichung (24). Toleranzangaben bzgl. der Buckelgeometrien sind den vorliegenden technischen Unterlagen nicht zu entnehmen [50]. Abbildung 19 zeigt die gemessenen Werte der wesentlichen Geometrieparameter zur analytischen Beschreibung der zu erwartenden Anbindungsfläche A_w infolge des Nachsetzwegs $s_{el.u.}$.

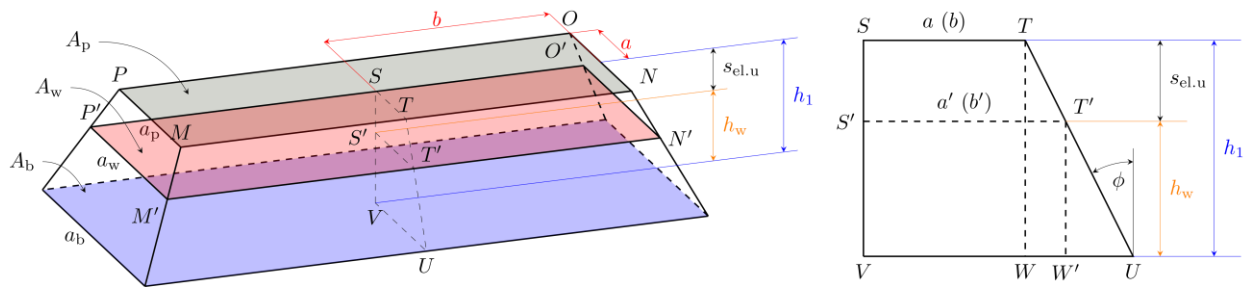


Abbildung 18: Geometrische Größen zur analytischen Beschreibung und Herleitung der zu erwartenden Anbindungsfläche A_w bei M8-Massebolzen auf Grundlage des Nachsetzwegs $s_{el.u}$

$$A_p = 4ab, \text{ mit } l_p = 2b \tag{18}$$

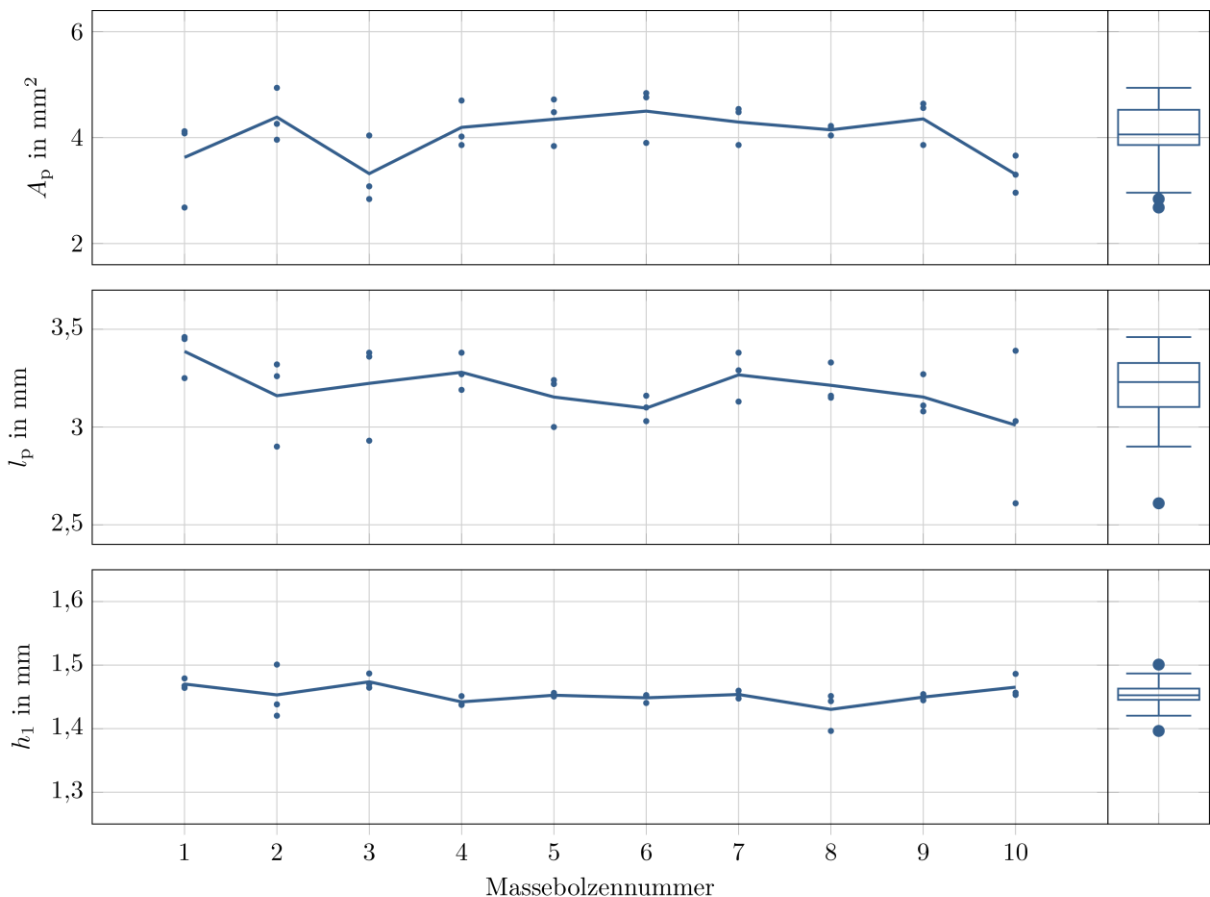
$$A_w = 4a'b' \tag{19}$$

$$c' = \overline{WW'} \tag{20}$$

$$a' = a + c' \text{ und } b' = b + c' \tag{21), (22)}$$

$$c' = s_{el.u} \tan \phi \tag{23}$$

$$A_{w.ges} = 12(a + s_{el.u} \tan \phi)(b + s_{el.u} \tan \phi) \tag{24}$$



• Einzelmessung von A_p , l_p , h_1 — Mittelwert von A_p , l_p , h_1

Abbildung 19: Topographiemessungen an zehn M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln zur Bewertung und den zugehörigen Mittelwerten je Massebolzen und statistischer Bewertung

Tabelle 9: Geometrische Parameter für M8-Massebolzen

Kenngroße	Mittelwert	Toleranz	unterer Wert	oberer Wert
$l_p (= 2b)$	3,19 mm (*)	-	2,61 mm (*)	3,46 mm (*)
a	0,32 mm (**)	-	0,26 mm (**)	0,36 mm (**)
h_1	1,45 mm (*)	-	1,40 mm (*)	1,50 mm (*)
ϕ	$\sim 30^\circ$ (*)	-	-	-
A_p	4,05 mm ² (*)	-	2,68 mm ² (*)	4,94 mm ² (*)

(*) gemessene Werte, (**) berechnete Werte

5.2.6.5 Analytische Betrachtung, Versuchsreihen MF6, MF7, KE6, KE7 mit geprägtem Buckel

Die Buckelgeometrie setzt sich aus zwei halben Kugelsegmenten an den Enden des Buckels und einem Zylindersegment zwischen den Enden zusammen. Beide halbe Kugelsegmente ergeben ein gesamtes Kugelsegment. Die resultierende Fläche infolge des Nachsetzwegs $s_{el.u}$ ergibt sich nach den Gleichungen (25) und (26), mit dem Radius r der Teilanbindungsfläche $A_{w.1}$ und dem Buckelradius r_p . Die Querschnittsfläche des Zylindersegments ist ein Kreisabschnitt, bei dem die Sehnenlänge s sich nach Gleichung (27) berechnen lässt und über die Buckellänge l_p nach Gleichung (28) die Teilanbindungsfläche $A_{w.2}$. Die Gesamtanbindungsfläche $A_{w.ges}$ ergibt sich nach Gleichung (29), womit alle notwendigen Parameter gegeben sind. Die gemessenen geometrischen Parameter sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 zusammengefasst. Es liegen keine Toleranzangaben vor.

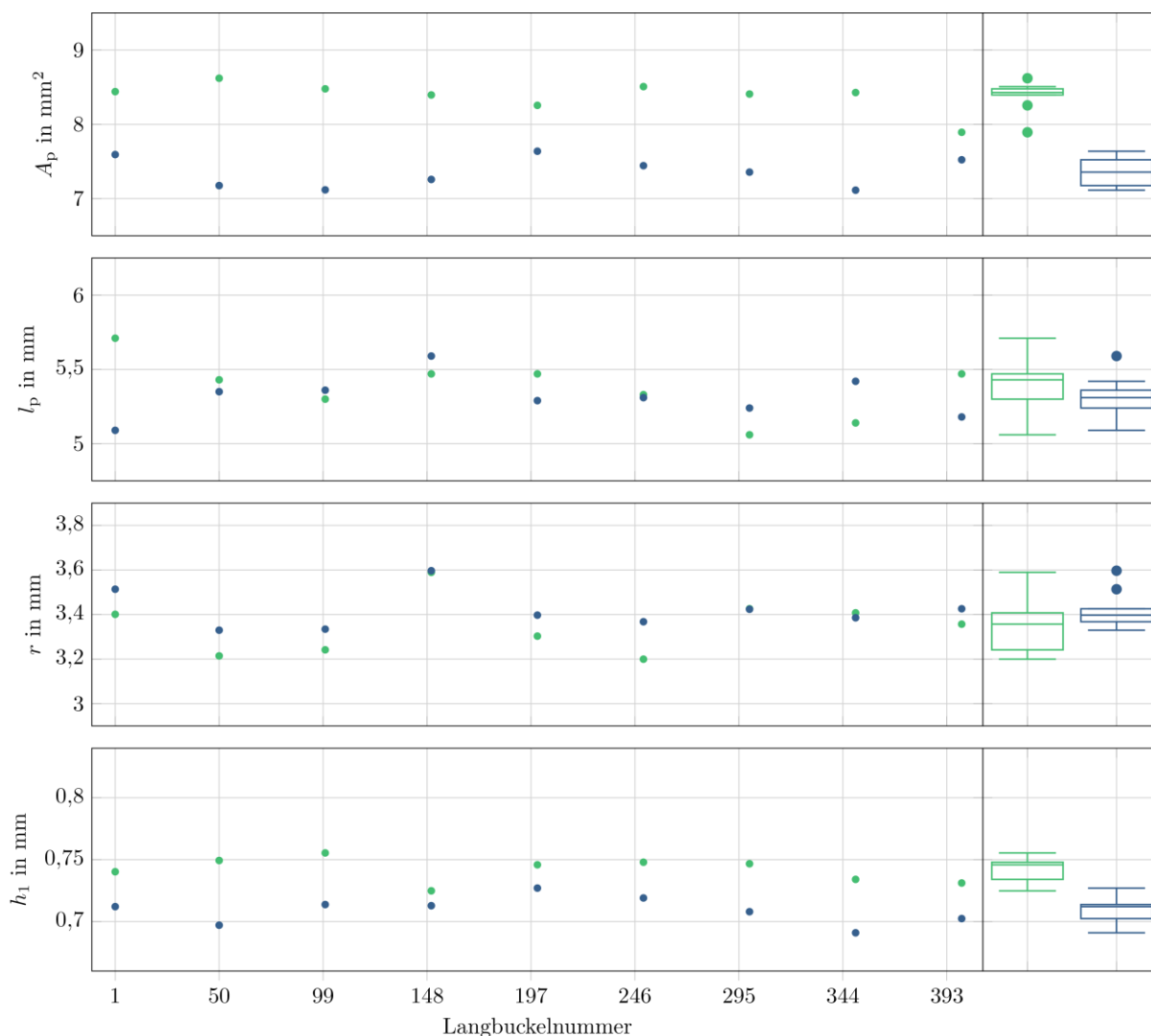
$$r = \sqrt{s_{el.u}(2r_p - s_{el.u})} \quad (25)$$

$$A_{w.1} = \pi r^2 = \pi s_{el.u}(2r_p - s_{el.u}) \quad (26)$$

$$s = 2r \quad (27)$$

$$A_{w.2} = 2rl_p = 2l_p \sqrt{s_{el.u}(2r_p - s_{el.u})} \quad (28)$$

$$A_{w.ges} = A_{w.1} + A_{w.2} \quad (29)$$



● Einzelmessung von A_p , l_p , r , h_1 ● HX340LAD+Z, $t = 1,5$ mm: ● 1.4301, $t = 1,5$ mm

Abbildung 20: Topographiemessungen an neun ausgewählten geprägten Langbuckeln (jeder 50. Probe aus 400 Prägungen) und statistischer Bewertung für beide Versuchswerkstoffe

Tabelle 10: Geometrische Parameter für die geprägten Langbuckel in HX340LAD+Z (1,5 mm)

Kenngroße	Mittelwert	Toleranz	unterer Wert	oberer Wert
l_p	5,31 mm	-	5,09 mm	5,59 mm
h_1	0,71 mm	-	0,69 mm	0,73 mm
r	3,42 mm	-	3,33 mm	3,60 mm
A_p	7,38 mm ² (*)	-	7,11 mm ² (*)	7,64 mm ² (*)

(*) gemessene Werte, (**) berechnete Werte

Tabelle 11: Geometrische Parameter für die geprägten Langbuckel in 1.4301 (1,5 mm)

Kenngroße	Nennmaß	Toleranz	unterer Grenzwert	oberer Grenzwert
l_p	5,36 mm	-	5,06 mm	5,71 mm
h_1	0,74 mm	-	0,72 mm	0,76 mm
r	3,35 mm	-	3,32 mm	3,59 mm
A_p	8,38 mm ² (*)	-	7,89 mm ² (*)	8,62 mm ² (*)

(*) gemessene Werte, (**) berechnete Werte

5.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden den entsprechend Buckelgeometrien zugeordnet. Der Fokus liegt auf den Ergebnissen der ZfP mittels pMFT, da hierfür neue Bewertungsansätze entwickelt werden mussten. Hierbei werden der analytische Ansatz aus Abschnitt 5.2.6.1, der auch die Bewertung mittels Prozessdaten beinhaltet, und die Ergebnisse der ZP einbezogen. Die Ergebnisse der eingesetzten Ultraschallprüfsysteme werden anschließend vorgestellt. Diese beziehen sich ebenfalls auf die Ergebnisse der ZP. Für alle Untersuchungen wurden dieselben Proben verwendet.

5.3.1 M6-Vierkantmuttern nach DIN 928-M6-ST (MF2, MF5, KE5)

5.3.1.1 Ergebnisse der pMFT

Für die Bewertung der Schweißproben wurde eine neue Bewertungsmethodik entwickelt. Diese basiert auf den in den IGF-Vorhaben 17.539 [26] und 19.208 [23] entwickelten Bewertungsalgorithmen. Des Weiteren wird die Methode der „Region of Interest“ (ROI) verwendet, welche in [51] entwickelt wurde und die Messbereiche maskiert. Mittels Schwellwertanalyse der ersten partiellen Ableitungen in x - und y -Richtung der Flussdichte B können die Buckelflächen ermittelt und bewertet werden, was beispielhaft in Abbildung 21 dargestellt ist.

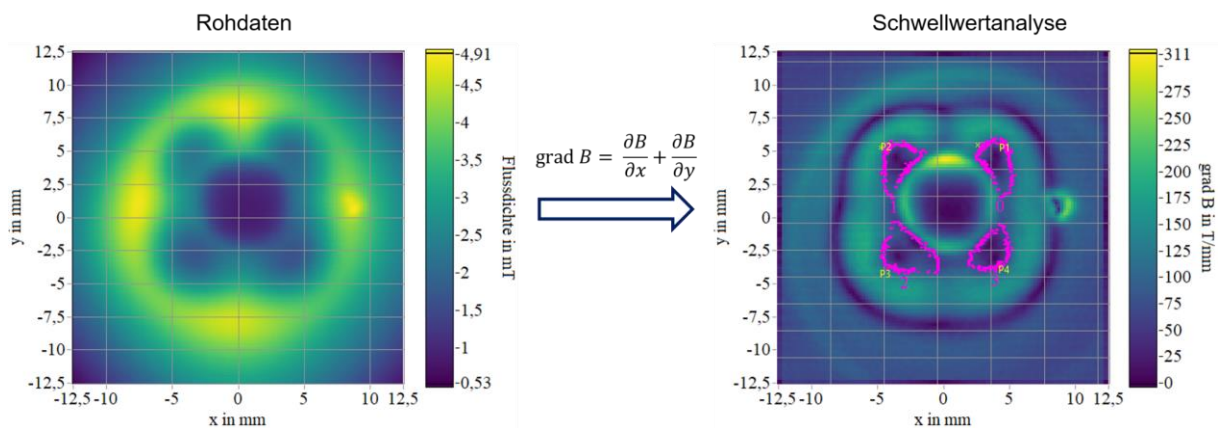


Abbildung 21: Vorgehensweise zur Ermittlung der Buckelflächen mittels pMFT mit Darstellung der gemessenen Rohdaten (links) und der ersten partiellen zweidimensionalen x - und y -Richtung der Flussdichte $\text{grad } B$ mit den ermittelten Flächen je Schweißbuckel 0 – 3 (magentafarben, rechts)

Die einzeln ermittelten Flächen sind in Abbildung 33 für jede Probe der Versuchsreihen anhand gestapelter Balkendiagramme dargestellt und den jeweiligen Parametersätzen zugeordnet. Die Gesamthöhe jedes Balkens ergibt die gesamte Fläche aller vier Buckelanbindungsflächen A_{pMFT} . Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Versuchsreihen. Während bei den Versuchsreihen MF2 und KE5 die Flächen mit zunehmendem Schweißstrom bzw. steigender Ladeenergie stetig steigen, kommt es bei MF5 zu einem Sprung von PS3 zu PS4. Bei allen Versuchsreihen sind die Buckelflächen

innerhalb einer Probe im gleichen Größenbereich verteilt. Bei MF2 nehmen ab PS5 die Buckelflächen wieder ab, was auf eine erhöhte Spritzerneigung zurückzuführen ist. Die theoretische Anbindungsfläche $A_{w,ges}$ nimmt bei allen Versuchsreihen mit zunehmender Schweißenergie zu. Bei MF2 liegen ab PS2 alle gemessenen Flächen A_{pMFT} oberhalb der theoretisch bestimmten Flächen $A_{w,ges}$, während dies bei MF5 ab PS4 und KE5 ab PS3 zu beobachten ist. Dies kann mit der höheren Festigkeit und der AlSi-Beschichtung bei MF5 und KE5 zusammenhängen.

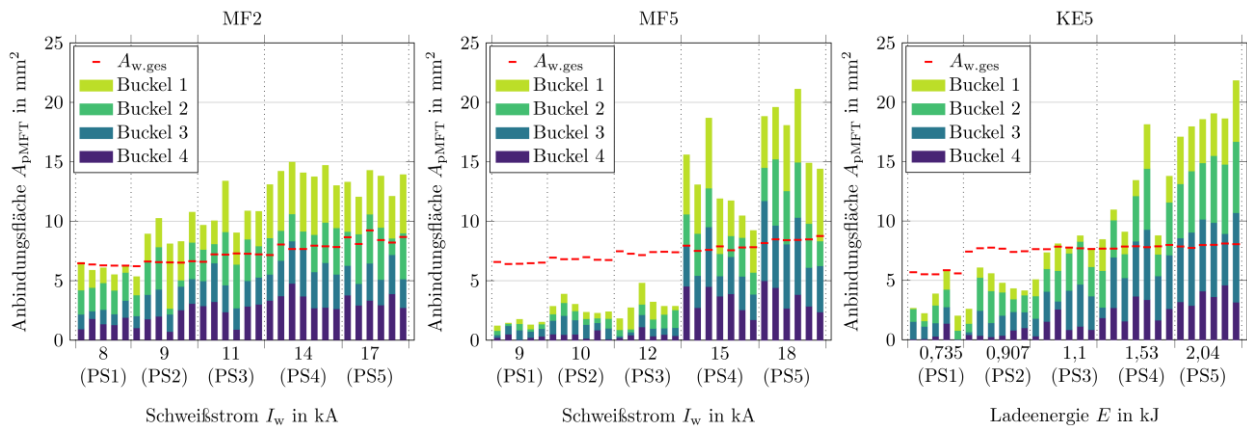


Abbildung 22: Zerstörungsfrei ermittelte Anbindungsflächen A_{pMFT} mittels pMFT für die M6-Vierkantmuttern dargestellt für jede einzelne Probe mit den jeweiligen Anbindungsflächen (1 – 4) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)

5.3.1.2 Ergebnisse der ZP

Die Ergebnisse der Kopfzugprüfung sind in Abbildung 23 dargestellt. Allgemein sind stetig zunehmende Kopfzugkräfte F_f mit zunehmendem Schweißstrom I_w bzw. steigender Ladeenergie E zu beobachten. Allerdings können für die KE-geschweißten Proben wesentlich höhere maximale Zugkräfte bis zum Versagen der Buckelschweißverbindungen mit einer mittleren Kopfzugkraft $F_f(\text{KE5-PS5}) = 9,16 \text{ kN}$ gegenüber $F_f(\text{MF5-PS5}) = 2,50 \text{ kN}$ und $F_f(\text{MF2-PS5}) = 5,43 \text{ kN}$ mit Standardabweichungen $\sigma(\text{KE5-PS5}) = 0,787 \text{ kN}$ und $\sigma(\text{MF5-PS5}) = 0,526 \text{ kN}$ bzw. $\sigma(\text{MF2-PS5}) = 0,73 \text{ kN}$ erreicht werden. Die theoretisch berechnete minimale Bruchkraft F_{th} weicht bei allen drei Fügevariationen deutlich von den experimentell ermittelten Werten ab. Bei MF2 werden ab PS4 größere Kräfte F_f gemessen als F_{th} , während bei MF5 nur bei einer Probe eine höhere experimentell ermittelte Kopfzugkraft festgestellt wurde. Bei den KE5-Proben sind bereits ab PS3 höhere F_f zu beobachten. Dies ist auf die unterschiedlichen Schweißsysteme und Materialkombinationen zurückzuführen.

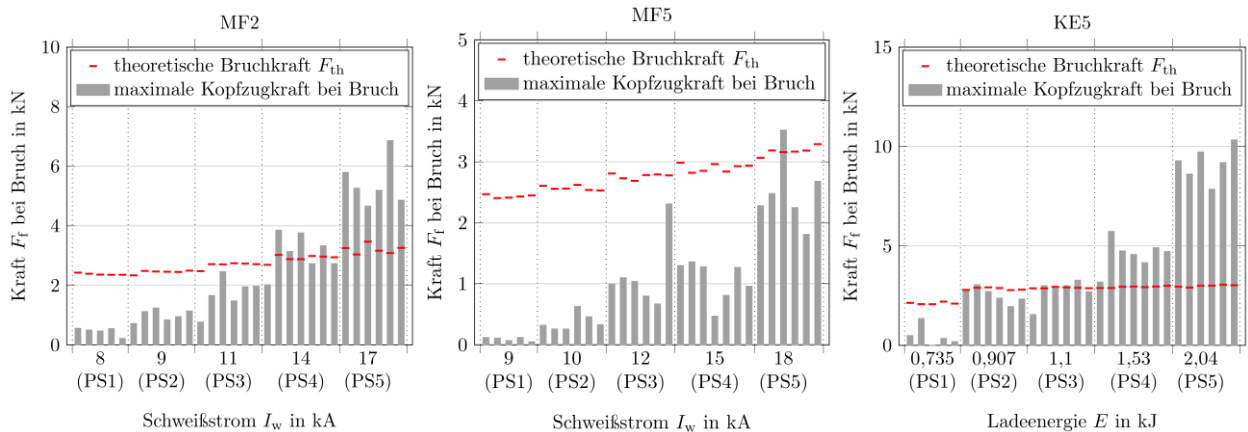


Abbildung 23: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) und mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft F_{th}

5.3.1.3 Bewertung mittels Prozessdaten

Die Gegenüberstellung der theoretisch bestimmten Kopfzugkräfte F_{th} mit den der experimentell ermittelten Kräfte beim Bruch F_f und den gemessenen Bruchflächen A_{zP} für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmutter ist in Abbildung 24 zu sehen. Für MF2 zeigen sich gute Korrelationen. Bei MF5 und KE5 sind Zusammenhänge zu erahnen, allerdings nicht als vertrauenswürdig einzustufen. Dies ist auf den sehr festen Grundwerkstoff mit seiner AlSi-Beschichtung zurückzuführen. Die Kombination stellt in der Regel eine schwer schweißbare Fügeaufgabe dar.

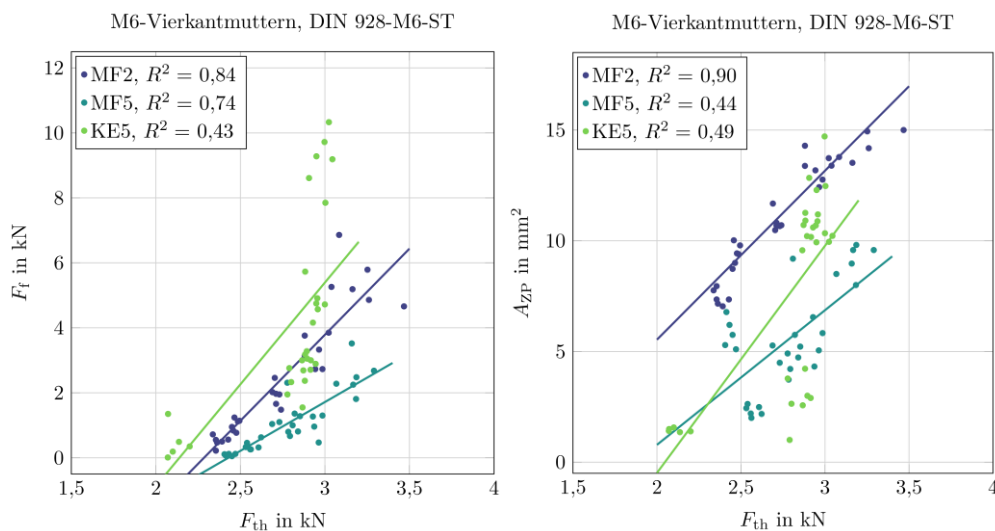


Abbildung 24: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfzugkraft F_{th} mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch F_f und denen der gemessenen Bruchflächen A_{zP} für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmutter

5.3.1.4 Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse der Flächenermittlung und der Kopfzugprüfung zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Versuchsreihen. Bei dem verwendeten Blechwerkstoff für MF5 und KE5 handelt es sich um einen pressgehärteten AlSi-beschichteten 22MnB5. Dieser stellt hohe Anforderungen an die Schweißaufgabe der MF-Versuchsreihe. Häufig kommt es hierbei zu fehlerhaften Schweißungen. Dies bestätigen auch die zerstörungsfrei ermittelten

Bruchflächen, welche sprunghaft von PS3 zu PS4 zunehmen. Ab PS4 kommt es bei den Schweißversuchen zu Schweißspritzern. Die Schweißspritzer verdrängen Verunreinigungen oder auch die verzünderte AlSi-Beschichtung aus der Fügezone, was zu einer verbesserten Verbindungsbildung führt. Beim KE-Schweißen kommt es hingegen bereits bei geringeren Ladeenergien zu Mikrospritzern, die mit dem bloßen Auge nicht sichtbar sind. Sie sorgen für eine Aktivierung der Oberfläche, was insgesamt die Verbindungsbildung ermöglicht [52]. Die bessere Verbindungsbildung bei den KE-geschweißten Proben ist auch anhand der Kopfzugprüfresultate zu sehen. Bereits geringe Ladeenergien ab $E > 0,9 \text{ kJ}$ für KE5-PS2 führen zu höheren Zugkräften als bei den Proben der Versuchsreihe MF5-PS5.

Die Gegenüberstellungen der Ergebnisse aus ZfP und ZP sind in Abbildung 25 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Zusammenhänge zwischen den gemessenen Bruchkräften F_f mit den Bruchflächen A_{ZP} und zwischen den Bruchflächen A_{ZP} mit den zerstörungsfrei ermittelten Flächen A_{pMFT} ähnliche Determinationskoeffizienten R^2 liefern. Bei den Versuchsreihen ist die gleiche Charakteristik wie bei den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.1.1 und Abschnitt 5.3.1.2 zu erkennen. Die ermittelten Flächen zeigen eine Tendenz, mit zunehmenden Kopfzugkräften ebenfalls zu steigen. Mit den $R^2(\text{MF2}) = 0,83$ gegenüber $R^2(\text{MF5}) = 0,40$ und $R^2(\text{KE5}) = 0,64$ kann festgestellt werden, dass die ZfP mittels pMFT für die MF2-Proben vertrauenswürdiger Ergebnisse liefern. Es ist jedoch festzuhalten, dass es sich bisher um erste Ansätze bei der Bewertungsmethodik handelt. Die Verbindungen werden aufgrund der Schweißsysteme unterschiedlich hergestellt. Es kann daher eine große Anbindungsfläche generiert werden, welche aufgrund des eingesetzten Schweißsystems und dem damit zugrundeliegenden Schweißprozessverlauf sehr spröde sein kann.

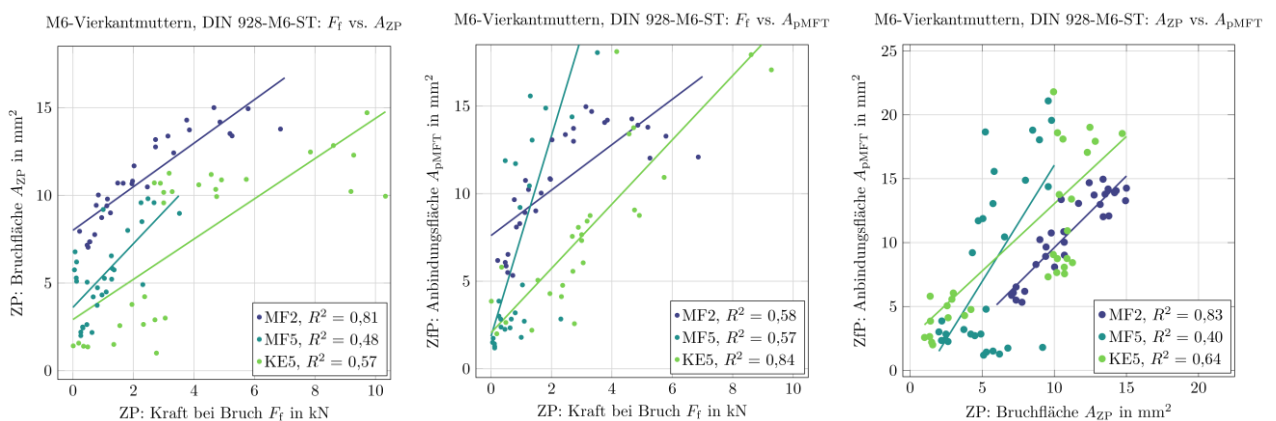


Abbildung 25: Gegenüberstellung der gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den ermittelten Anbindungsflächen A_{pMFT} durch die ZfP mittels pMFT für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmuttern

5.3.2 M6-Ringbuckelmutter (MF1, MF4, KE4)

5.3.2.1 Ergebnisse der pMFT

Die Bewertungsmethode für die M6-Vierkantmutter des vorigen Abschnitts lässt sich nicht auf die M6-Ringbuckelmutter übertragen. Es wurden daher weitere Ansätze entwickelt. Dabei hat der Grundwerkstoff des Blechs einen erheblichen Einfluss auf die Bewertungsmethode, da die Schweißverbindungen von MF1 mit denen aus MF4 und KE4 deutlich voneinander unterscheiden. Für MF1 wurden die verschweißten Bereiche durch Winkelmessungen ermittelt (Abbildung 26, links). In Abbildung 26, mittig und rechts sind die Messungen der untersuchten Proben zu sehen es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigendem Schweißstrom die Winkel der geschweißten Bereiche erwartungsgemäß zunehmen. Die Bewertung der Verbindungen von MF4 und KE4 erfolgt durch die Bewertung des Profilanstiegs der gemessenen Flussdichte im Ringbereich ($d = 13 \text{ mm}, \pm 0,5 \text{ mm}$) der zu erwartenden Schweißverbindungen (Abbildung 27). Die Profilanstiege wurden mit einem Winkelabstand von 1° mittels Profilschnitt ermittelt. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Schweißstrom der Profilanstieg abnimmt, was auf eine homogenere Flussdichteverteilung infolge einer größeren Anbindungsfläche schließen lässt. Für MF4-PS1 konnten keine Messergebnisse erzielt werden. Die Proben dieser Parameterstufe sind bereits beim Entmagnetisieren infolge der starken Vibrationen gebrochen.

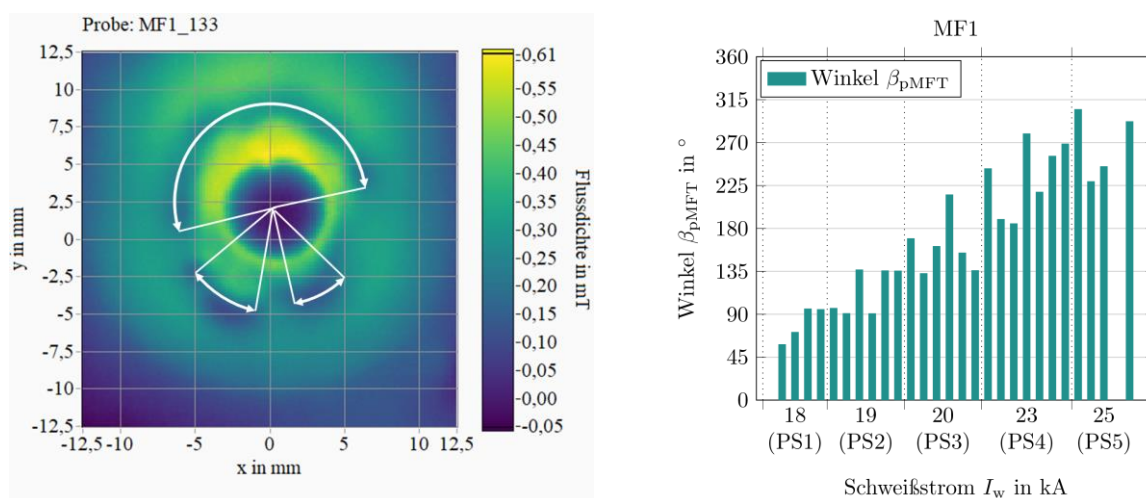


Abbildung 26: Darstellung der Winkelmessung der verschweißten Bereiche für die M6-Ringbuckelmutter der Versuchsreihe MF1 und den Ergebnissen der Winkelmessungen der untersuchten Proben zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)

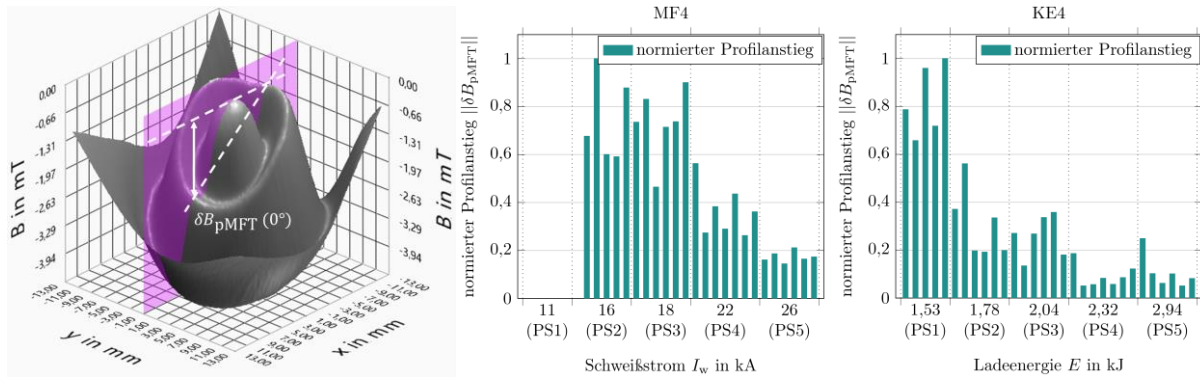


Abbildung 27: Zerstörungsfrei ermittelter Profilanstieg δB_{pMFT} am Beispiel eines Profilschnitts bei im Winkel von 0° mittels pMFT für die M6-Ringbuckelmuttern von MF4 und KE4 dargestellt für jede einzelne Probe zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)

5.3.2.2 Ergebnisse der ZP

Die Ergebnisse der ZP sind in Abbildung 28 dargestellt. Für MF2 ergeben sich mit steigendem Schweißstrom zunehmende Kopfzugkräfte. Dies ist für die theoretisch ermittelten Mindestkräfte ebenfalls zu beobachten, wobei für PS1, PS2 und PS3 diese größer sind als die der experimentell ermittelten Kräfte. Für MF4 und KE4 ist kein Zusammenhang zwischen theoretischen und experimentell Kräften zu erkennen. Die gemessenen Nachsetzwege lassen keine Rückschlüsse auf die Festigkeit der Schweißverbindungen zu. Bei MF4 wurden nur für PS4 und PS5 sehr geringe Kräfte gemessen.

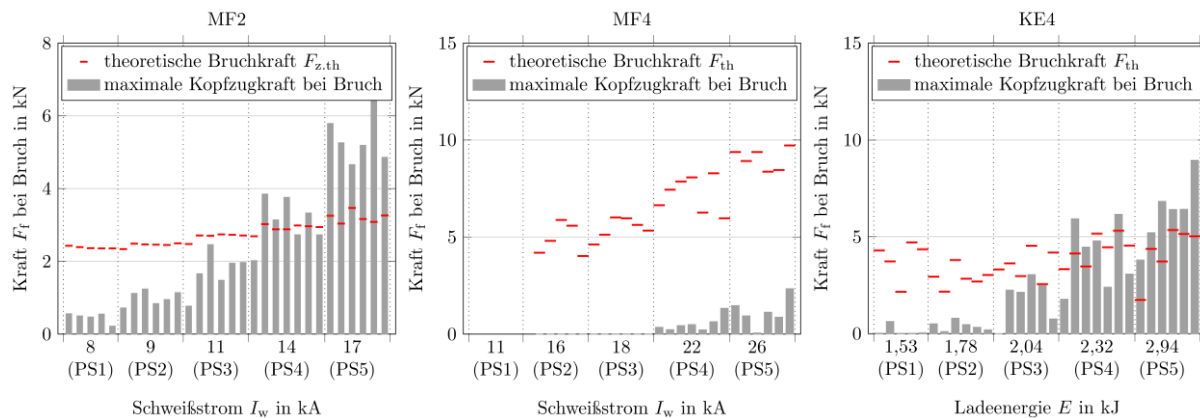


Abbildung 28: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) und mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft F_{th}

5.3.2.3 Bewertung mittels Prozessdaten

Die Gegenüberstellung von theoretischer Kopfzugkraft F_{th} und der ermittelten Kraft bei Bruch F_f bzw. der gemessenen Bruchfläche A_{ZP} sind in Abbildung 29 zu sehen. Die Gegenüberstellungen der MF-Versuchsreihen lassen einen Zusammenhang mittels Determinationskoeffizienten R^2 erahnen. KE4 zeigt keinen Zusammenhang zwischen den theoretischen und experimentellen Ergebnissen. Dies lässt sich auf sehr geringe Nachsetzbewegungen zurückführen, die keine deutliche Unterscheidung zwischen den einzelnen Parametersätzen zulassen (14Anhang Bvgl. Anhang B, Abbildung 70.)

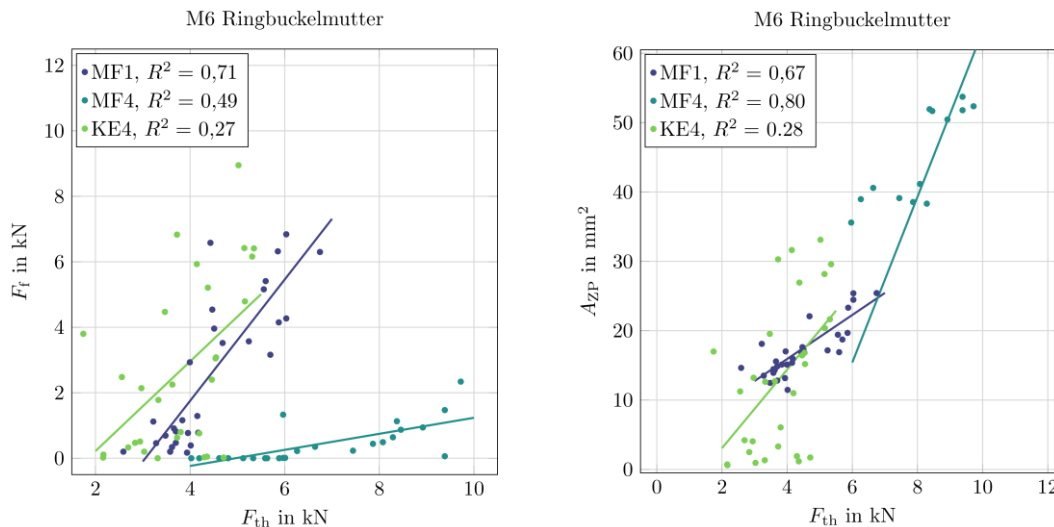


Abbildung 29: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfzugkraft F_{th} mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch F_f und denen der gemessenen Bruchflächen A_{zp} für die Versuchsreihen mit M6-Ringbuckelmutter

5.3.2.4 Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse sind für die Versuchsreihen mit Ringbuckelmutter abhängig vom verwendeten Grundwerkstoff differenziert zu betrachten. Die Gegenüberstellungen von ZP und ZfP sind in Abbildung 30 zu sehen. Dies zeigt der Vergleich der ZP-Messungen miteinander in Abbildung 30, links. Bei MF1 lassen sich Zusammenhänge erahnen, MF4 zeigt kaum einen Zusammenhang zwischen den Kopfzugkräften und den entsprechenden Bruchflächen. Dies ist auf die generelle prozessbedingte unzureichende Schweißqualität in Verbindung mit der Werkstoffkombination zurückzuführen. KE4 zeigt hingegen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Kopfzugkraft und der Bruchfläche, was für eine gute Schweißbarkeit dieser Verbindung spricht. Der Vergleich zwischen den zerstörend ermittelten Größen mit dem Bewertungsparameter β_{PMFT} zeigt für die Versuchsreihe MF1 gute Zusammenhänge zwischen den ermittelten Winkelbereichen und den gemessenen Kopfzugkräften bei Bruch. Gleiches gilt bei den gemessenen Bruchflächen (Abbildung 30, mittig). Die Bewertung für MF4 und KE4 in Abbildung 30, rechts, zeigt hingegen weniger gute Übereinstimmungen zwischen der Kopfzugkraft und der Bruchfläche mit dem Ergebnis des normierten Profilanstiegs. Dies lässt sich u.a. auf die Grundwerkstoffeigenschaften (22MnB5) zurückführen, welche ein anderes magnetisches Verhalten als der Grundwerkstoff von MF1 (HX340LAD) aufweist (vgl. Abschnitt 6.3). Über den Profilanstieg lässt sich auch auf die Homogenität und Symmetrie der Schweißverbindungsausprägung schließen, die bei allen Proben nicht gleichmäßig über den Ringbuckelquerschnitt ist, was an zwei Proben exemplarisch in Abbildung 31 gezeigt ist.

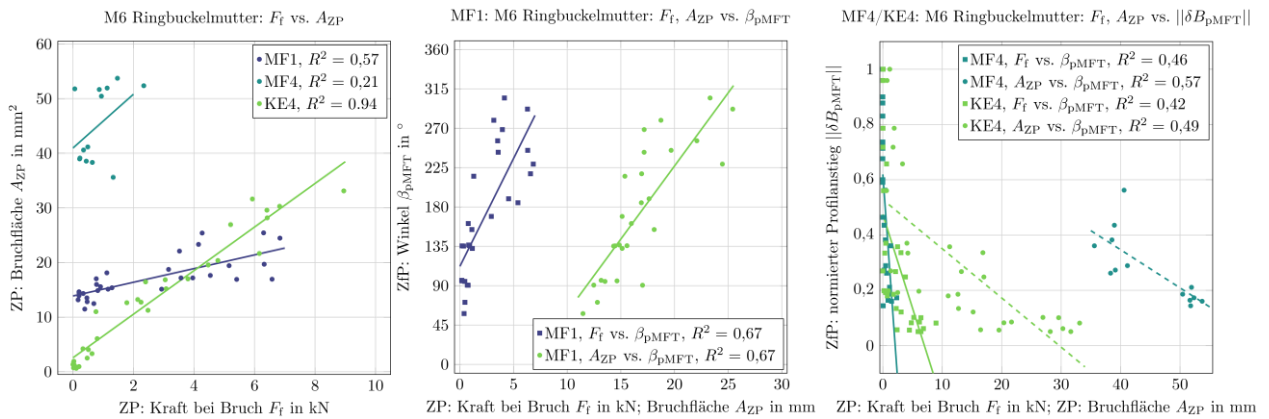


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Kopfzugkraft bei Bruch F_f und den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel (links) und den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} mit den Bewertungsparametern Winkel (MF1, mittig) und des normierten Profilanstiegs (MF4, KE4, rechts)

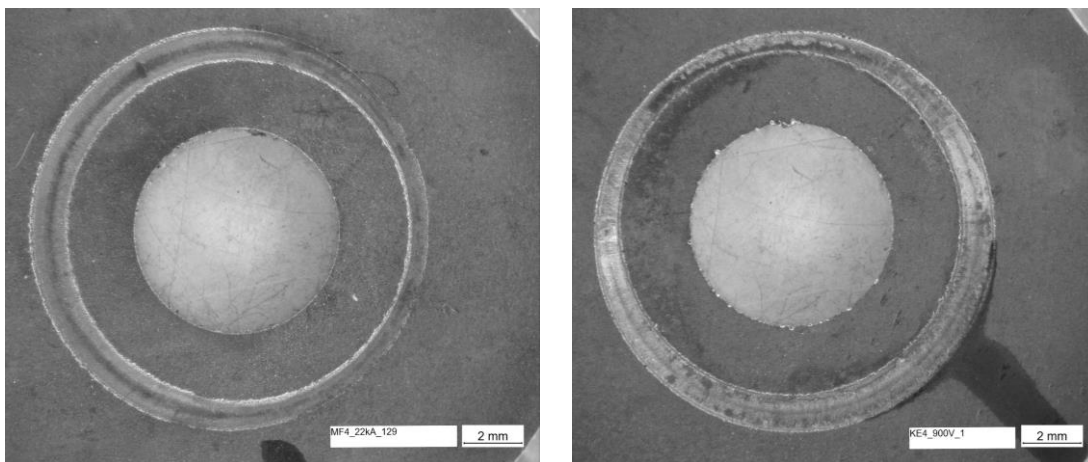


Abbildung 31: asymmetrische Bruchflächen der M6-Ringbuckelschweißproben am Beispiel der Proben MF4_129, PS4 (Schweißstrom = 22kA) und KE4_001, PS5 (Ladeenergie = 2,94 kJ)

5.3.3 M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln (MF3)

5.3.3.1 Ergebnisse der pMFT

Die Vorgehensweise zur Bewertung der M8-Massebolzen mittels pMFT ist in Abbildung 32 dargestellt. Es erfolgt eine Ebenenausrichtung der Messdaten der drei Segmentbuckel mit einer anschließenden Schwellwertanalyse. Die Schwellwertanalyse liefert konkrete Konturen durch Binarisieren der sich kontinuierlich ändernden Messdaten der magnetischen Flussdichte. Die Schwellwerte werden dabei für eine Gutschweißung festgelegt und anschließend auf alle weiteren Schweißproben angewendet. Die innenliegende Fläche der Kontur wird für jeden einzelnen Buckel ermittelt.

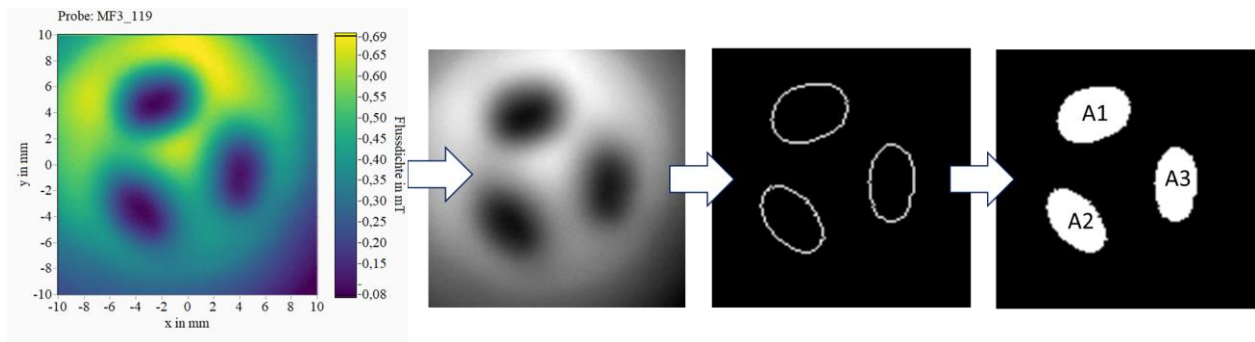


Abbildung 32: Vorgehensweise zur Ermittlung der Anbindungsflächen mittels pMFT für die Proben der Versuchsreihe MF3 mit M8-Massebolzen mit Darstellung der gemessenen Rohdaten (links) und der Schwellwertanalyse durch Binarisieren der Messdaten zum Bestimmen der einzelnen Flächen A1, A2 und A3 (Schwarz-Weiß-Bilder)

Die Ergebnisse der einzelnen Flächen sind in Abbildung 33 für jede Probe anhand gestapelter Balkendiagramme dargestellt und den jeweiligen Parametersätzen zugeordnet. Die Gesamthöhe jedes Balkens ergibt die gesamte Fläche aller drei Buckelanbindungsflächen A_{pMFT} . Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Schweißstrom die Buckelflächen kontinuierlich größer werden. Auffällig ist die zweite Probe aus PS5. Sie weist kleine Buckelflächen (Gesamtfläche 19,2 mm²) auf. Die Buckelflächen innerhalb einer Probe sind im gleichen Größenbereich verteilt.

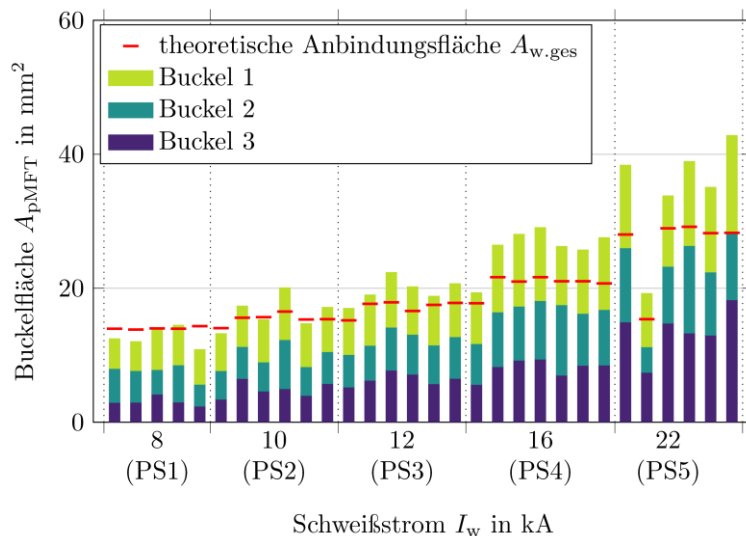


Abbildung 33: Zerstörungsfrei ermittelte Buckelflächen A_{pMFT} mittels pMFT für die M8-Massebolzen dargestellt für jede einzelne Probe mit den jeweiligen Anbindungsflächen (1 – 3) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)

5.3.3.2 Ergebnisse der ZP

Eine qualitative Aussage zur Verbindungsqualität kann anhand von Schliiffbildern getroffen werden. Abbildung 34 zeigt Schliiffbilder der Parameterstufen PS2, PS4 und PS5. Bei allen dargestellten Proben ist eine deutliche Ausprägung einer Schweißverbindung ersichtlich. Eine quantitative Aussage für den Vergleich mit den Ergebnissen der pMFT ist allerdings

nicht möglich, da keine Flächen ermittelt werden können. Es ist zu erkennen, dass die Segmentbuckel mit zunehmendem Schweißstrom über einen größeren Querschnitt mit dem Blech geschweißt sind und der Spalt zwischen der unteren Kante am Fügelement zum Blech folglich geringer wird.

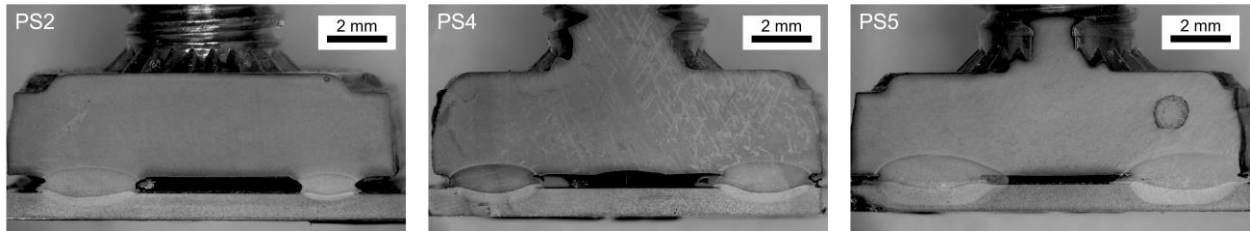


Abbildung 34: Schlichtbilder repräsentativer Proben der Parametersätze PS2, 10 kA (links), PS4 16 kA (mittig) und PS5 22 kA (rechts)

Die Ergebnisse der Kopfzugprüfung sind in Abbildung 35 dargestellt. Allgemein sind stetig zunehmende Kopfzugkräfte F_f mit zunehmendem Schweißstrom I_w zu beobachten. Die unteren drei Parametersätze führen zu sehr kleinen Kopfzugkräften. Ab PS4 nehmen diese deutlich zu. Auffällig ist wieder die zweite Probe aus PS5, welche eine geringe Kopfzugkraft (0,85 kN) aufweist.

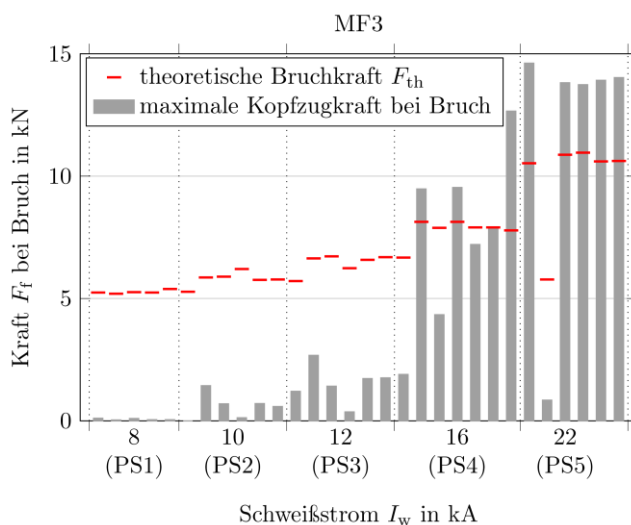


Abbildung 35: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5)

Die Ermittlung der Bruchflächen am Mikroskop erfolgt manuell mittels Konturlinienzug. Abbildung 36 zeigt für jeden Parametersatz die jeweils erste in den Abbildung 33, Abbildung 35 und Abbildung 37 ausgewertete Probe. Während die Proben aus PS1 bis PS4 in der Fügeebene versagen, kommt es zum Ausknöpfen der einzelnen Buckel bei PS5. Die verbleibenden Blechreste sind am Bruchbild zu erkennen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 37 für jede einzelne untersuchte Probe analog von Abbildung 33 und Abbildung 35 dargestellt. Auffällig ist wieder die zweite Probe aus PS5. Sie weist kleinere Bruchflächen im Vergleich zu den anderen Proben aus PS5 auf. Die Bruchflächen nehmen mit steigendem Schweißstrom zu.

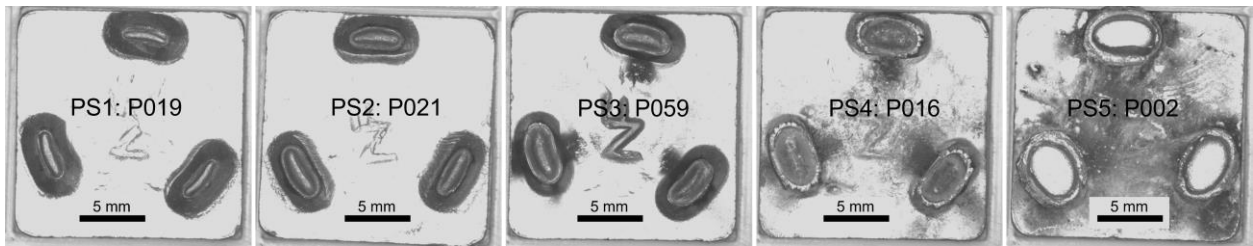


Abbildung 36: Bruchflächen nach der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) mit jeweils der ersten Probe eines jeden Parametersatzes

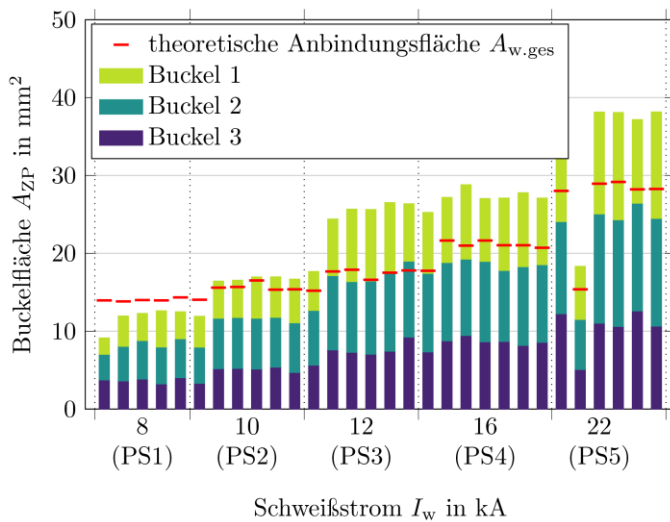


Abbildung 37: Gemessene Bruchflächen A_{ZP} nach der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jede einzelne Probe mit den jeweiligen Buckelflächen (1 – 3) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5)

5.3.3.3 Bewertung mittels Prozessdaten

Die Gegenüberstellung von theoretischer Kopfzugkraft F_{th} und der ermittelten Kraft bei Bruch F_f bzw. der gemessenen Bruchfläche A_{ZP} sind in Abbildung 38 zu sehen. Es ist in beiden Gegenüberstellungen ein Zusammenhang zu beobachten, was ebenso durch die Determinationskoeffizienten R^2 bestätigt wird.

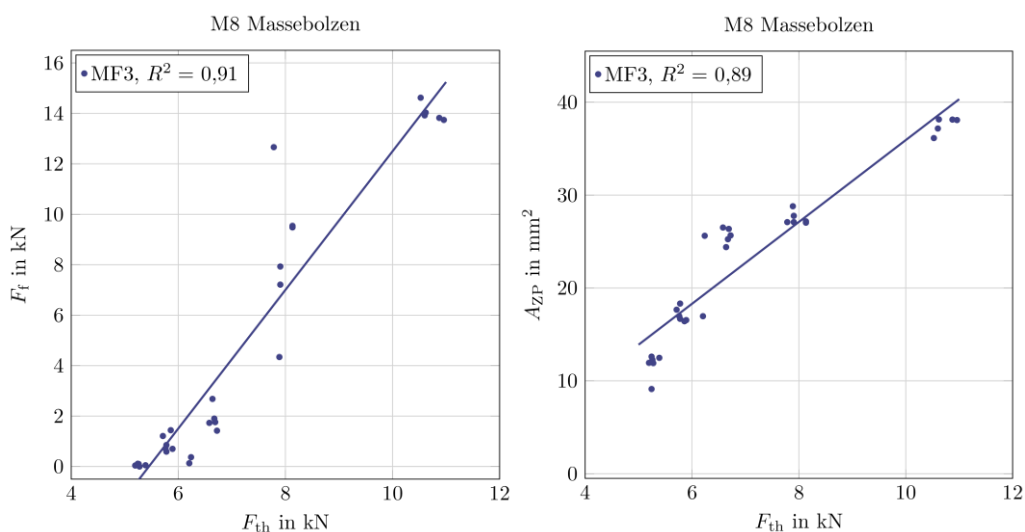


Abbildung 38: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfzugkraft F_{th} mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch F_f und denen der gemessenen Bruchflächen A_{ZP} für die Versuchsreihe mit M8-Massebolzen

5.3.3.4 Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse der Flächenermittlung und der Kopfzugprüfung sind unterschiedlich. Bei Proben, die mit geringen Stromstärken geschweißt wurden, wurden Flächen ermittelt, in der Kopfzugprüfung für PS1 aber sehr geringe Kopfzugkräfte. Erst ab PS2 korrelieren gemessene Fläche und Kopfzugkraft. Ein sprunghafter Anstieg der Kopfzugkraft kann ab PS4 beobachtet werden. Auch hier gilt das gleiche, was in Abschnitt 5.3.1.4 bereits diskutiert wurde.

Die Gegenüberstellungen der Ergebnisse aus ZfP und ZP ist in Abbildung 39 dargestellt. Generell korreliert die Fläche mit der Kopfzugkraft bis auf bei Proben mit geringeingebrachter Energie. Dies betrifft insbesondere die Ergebnisse aus PS1 und PS2, wo sehr geringe Kräfte, jedoch vergleichsweise große Flächen gemessen werden. Die Ergebnisse der ZP zeigen, dass die Bestimmung der Bruchflächen eine große Herausforderung darstellt.

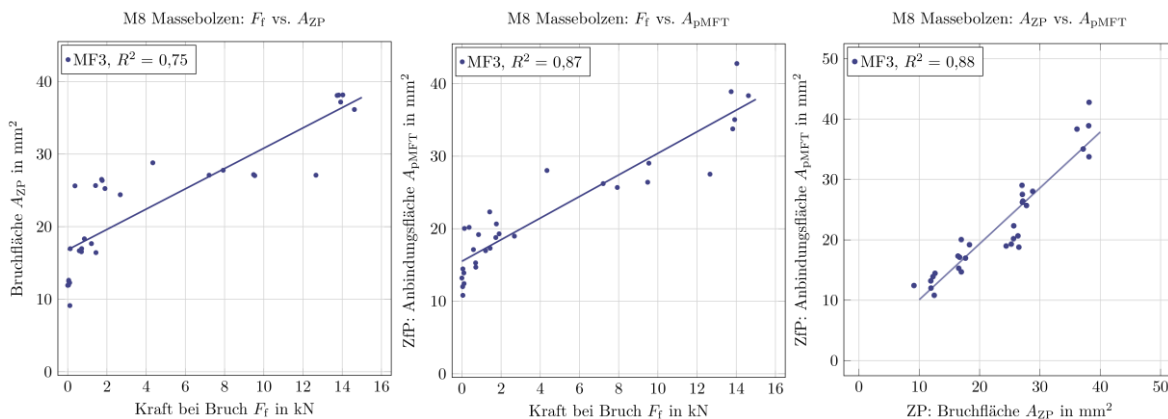


Abbildung 39: Gegenüberstellung der Kopfzugkraft bei Bruch F_f , den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den zerstörungsfrei ermittelten Anbindungsflächen A_{pMFT} für die Versuchsreihe mit M8-Massebolzen

5.3.4 Geprägte Langbuckel (MF6, KE6, MF7, K74)

5.3.4.1 Ergebnisse der pMFT

Die Messergebnisse an Proben mit geprägten Langbuckeln unterscheiden sich in den Versuchsreihen deutlich, in Abhängigkeit vom verwendeten Material. Es ist zwischen MF6, KE6 mit ferritischem und MF7, KE7 mit metastabilem austenitischen Grundwerkstoff zu unterscheiden. Dies wirkt sich auf die Herangehensweise zur Bewertung der pMFT-Messergebnisse aus. Bei allen vier Versuchsreihen hat sich die Bewertung mittels Profillinienzug entlang der Buckellängsachse durch die gemessenen Flusssichtmessdaten als geeignet herausgestellt. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 40 die Vorgehensweise an drei ausgewählten MF7-Proben unterschiedlicher Parametersätze schematisch anhand einer projizierten Schnittebene, die zur Ermittlung der Profilverläufe genutzt wird.

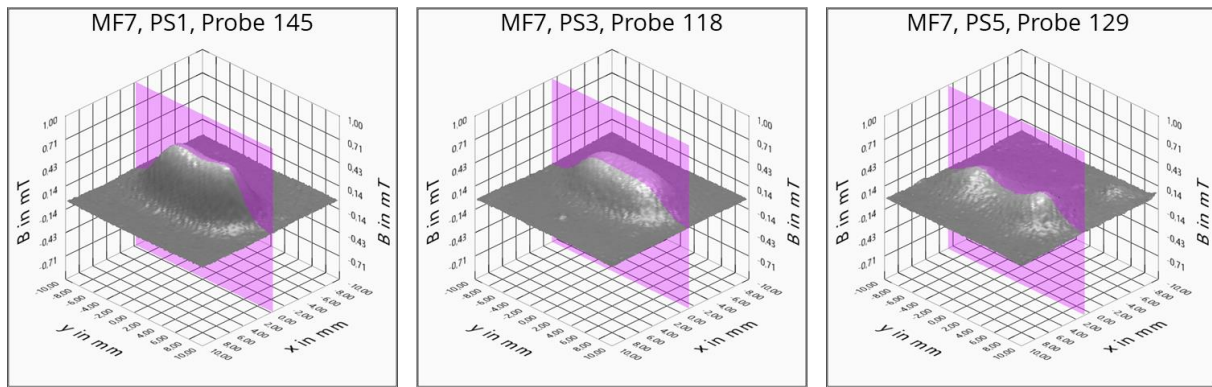


Abbildung 40: Vorgehensweise zur Ermittlung der Verbindungsqualität mittels pMFT für die Proben mit geprägten Langbuckeln mit Darstellung der gemessenen Rohdaten (grau) und der Schnittebene (pink) für die Ermittlung der Profile entlang der Buckellängsachse für die drei Parameterstufen PS1, PS3 und PS5 (für eine bessere Darstellung sind die Daten invertiert dargestellt, gleichskalierte Flussdichte B)

Versuchsreihen MF6 und KE6

Für die Bewertung der Versuchsreihen MF6 und KE6 werden die Profillängen l entlang der Buckellängsachsen mittels Schwellwertanalyse ermittelt. Als geeigneter Schwellwert haben sich 20% der höchsten Flussdichtewerte entlang der Profilverläufe herausgestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt. Die Profillängen nehmen mit zunehmender Schweißenergie ab, was auf die dicken ungeprägten Bleche $t = 3 \text{ mm}$ der Fügeverbindung zurückzuführen ist, da sich die verbleibende magnetische Flussdichte innerhalb der Bleche in der Schweißverbindung unterschiedlich verteilt.

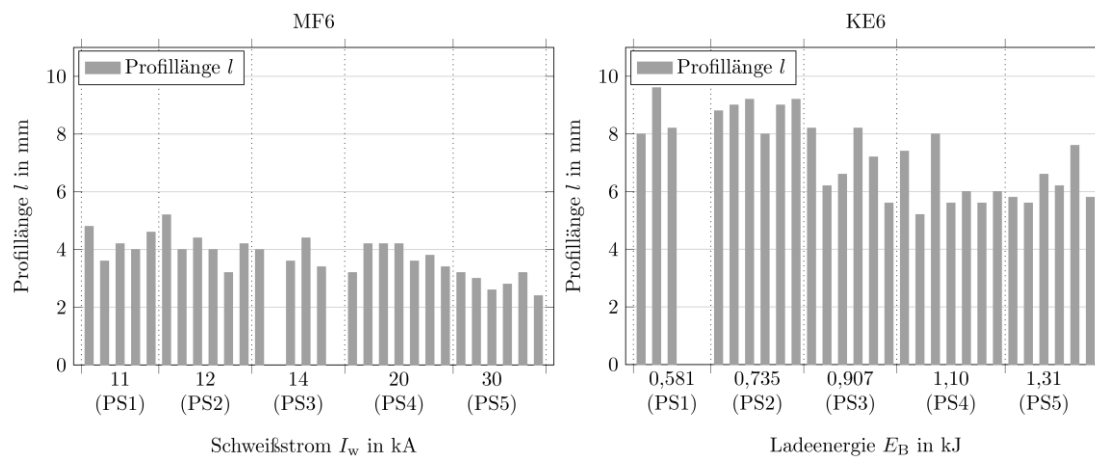


Abbildung 41: Profillängen l der magnetischen Flussdichte entlang der Buckellängsachse zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5) für die Versuchsreihen MF6 und KE6

Versuchsreihen MF7 und KE7

Die Profilverläufe sind in den jeweils linken Diagrammen in Abbildung 42 für MF7 und Abbildung 43 für KE7 zu sehen. Zur Verbindungsbewertung wird anschließend die Flussdichte B_z in der Profilmitte bestimmt, was ebenda, jeweils rechts, zu sehen ist. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Schweißenergie die Flussdichte zunimmt, was auf eine größere verschweißte Anbindung schließen lässt. Zwischen den beiden Versuchsreihen MF7 und KE7 sind Unterschiede zu beobachten. Dies lässt sich auf ein geringeres Schmelzvolumen bei

den KE-geschweißten Proben zurückführen, da das Schweißgefüge die resultierende magnetische Flussdichte erheblich beeinflusst (vgl. Abschnitt 6, [25, 51, 53]).

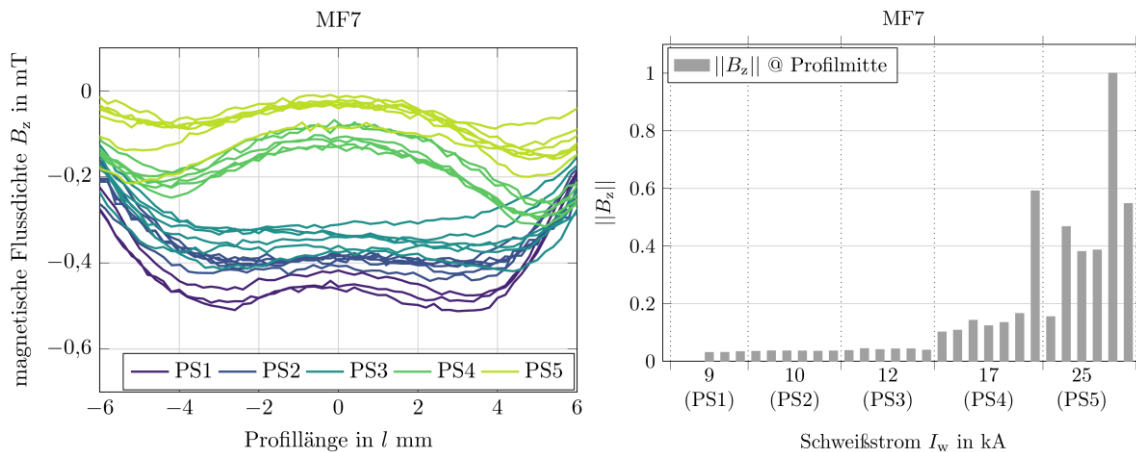


Abbildung 42: Profilverläufe der magnetischen Flussdichte entlang der Buckellängsachse (links) und die normierte Flussdichte in der Profilmittigkeit ($l = 0$ mm) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5) für die Versuchsreihe MF7

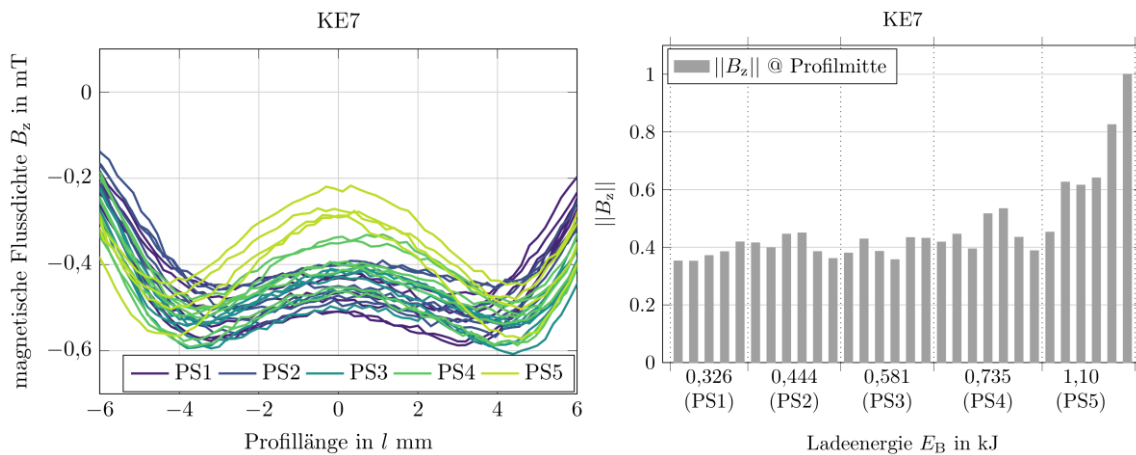


Abbildung 43: Profilverläufe der magnetischen Flussdichte entlang der Buckellängsachse (links) und die normierte Flussdichte in der Profilmittigkeit ($l = 0$ mm) zugeordnet zum entsprechenden Parametersatz (PS1 – PS5) für die Versuchsreihe KE7

5.3.4.2 Ergebnisse der ZP

Die Ergebnisse der ZP sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 zu sehen. Für alle Versuchskombinationen sind die theoretischen Kräfte größer als die der experimentell ermittelten. Dies hängt mit den Annahmen bei der theoretischen Betrachtung zusammen, die die Verformungen infolge der Elektrodenkraft vor Schweißbeginn nicht berücksichtigen, was zu größeren theoretischen Nachsetzwegen führt. Für MF6 konnten erst ab PS4 Kopfbzugkräfte ermittelt werden, während bei KE6 bereits ab PS1 schon sehr geringe gemessen wurden. Ähnliches ist bei MF7 und KE7 zu beobachten.

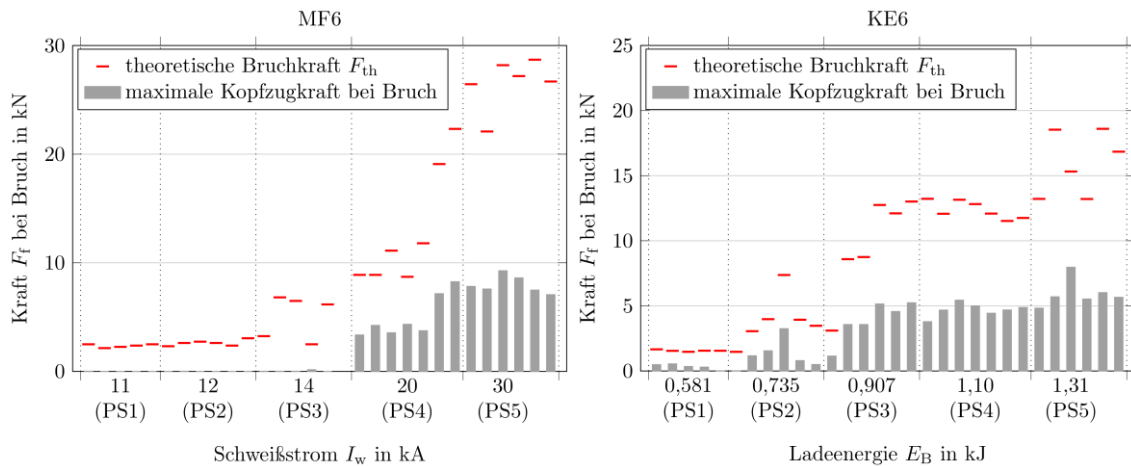


Abbildung 44: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft F_{th} für MF6 und KE6

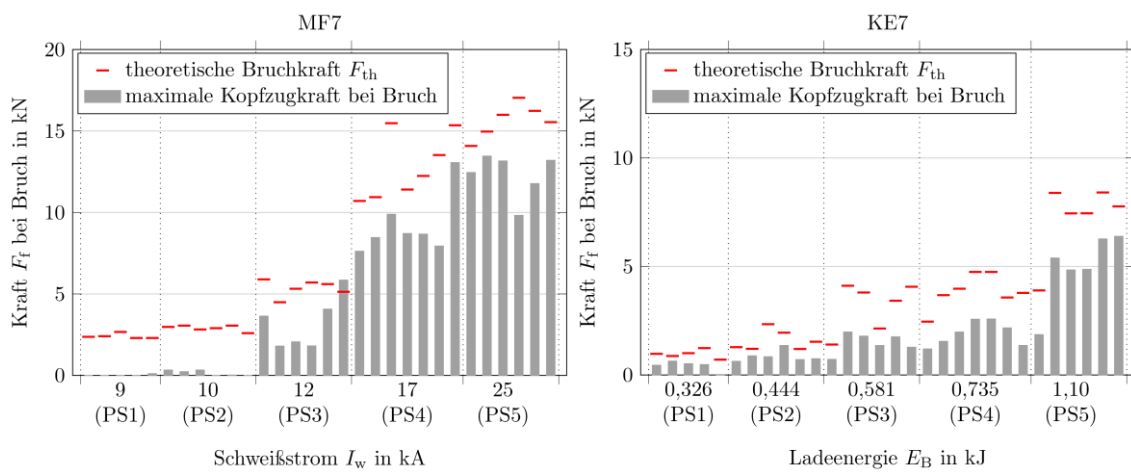


Abbildung 45: Ermittelte Kräfte F_f bei der zerstörenden Kopfzugprüfung dargestellt für jeden Parametersatz (PS1 – PS5) mit Darstellung der theoretischen Bruchkraft F_{th} für MF7 und KE7

5.3.4.3 Bewertung mittels Prozessdaten

Für alle Versuchsreihen mit geprägtem Buckel ist ein Zusammenhang auf Grundlage des Determinationskoeffizienten R^2 zwischen den theoretischen und experimentellen Ergebnissen zu beobachten (Abbildung 46). Dies verdeutlicht eine gute Übereinstimmung zwischen der analytischen Herangehensweise und den experimentellen Versuchen.

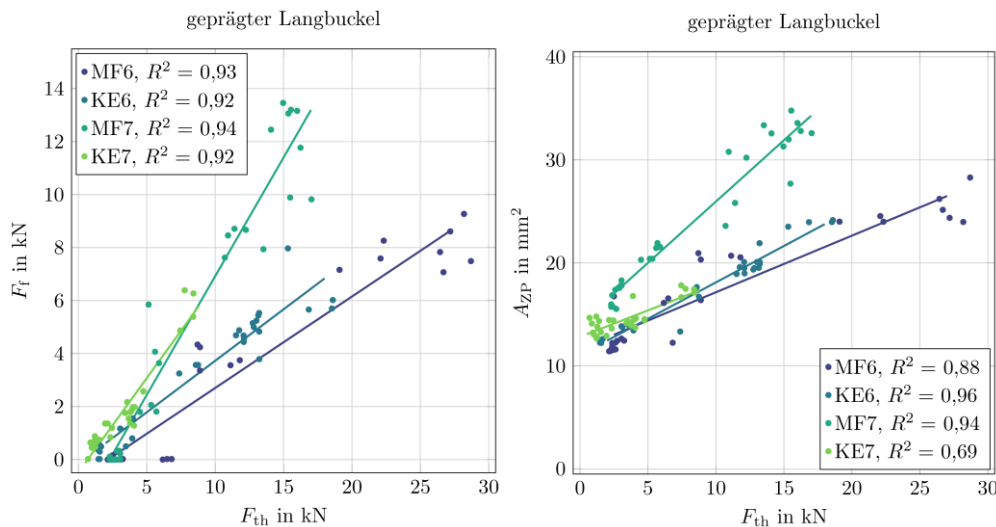


Abbildung 46: Gegenüberstellung der theoretischen Kopfzugkraft F_{th} mit denen der ermittelten Kraft beim Bruch F_f und denen der gemessenen Bruchflächen A_{zp} für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel

5.3.4.4 Ergebnisdiskussion

Die Charakteristik der Profilverläufe aus den vier Versuchsreihen lässt auf das Erwärmungsverhalten im Schweißprozess schließen. Die Verbindungsentstehung beginnt an den äußeren Längsbuckelradien und wandert mit fortschreitendem Prozessverlauf in die Mitte des Schweißbuckels [54, 55]. Dies begründet die Eignung der Bewertungsparameter, wobei eine generelle bessere Bewertung bei den Versuchsreihen MF7 und KE7 mit metastabilem austenitischem Stahl 1.4301 beobachtet werden kann. Dies verdeutlicht Abbildung 47 mit Gegenüberstellungen von Kopfzugkraft bei Bruch F_f , den gemessenen Bruchflächen A_{zp} und mit den entsprechenden Bewertungsparametern Profillänge l und der normierten Flussdichte in der Profilmittigkeit $||B_z||$. Es zeigt sich, dass die gemessenen Kopfzugkräfte zu den Bruchflächen korrelieren, was bei den restlichen Versuchsreihen nicht zu beobachten ist.

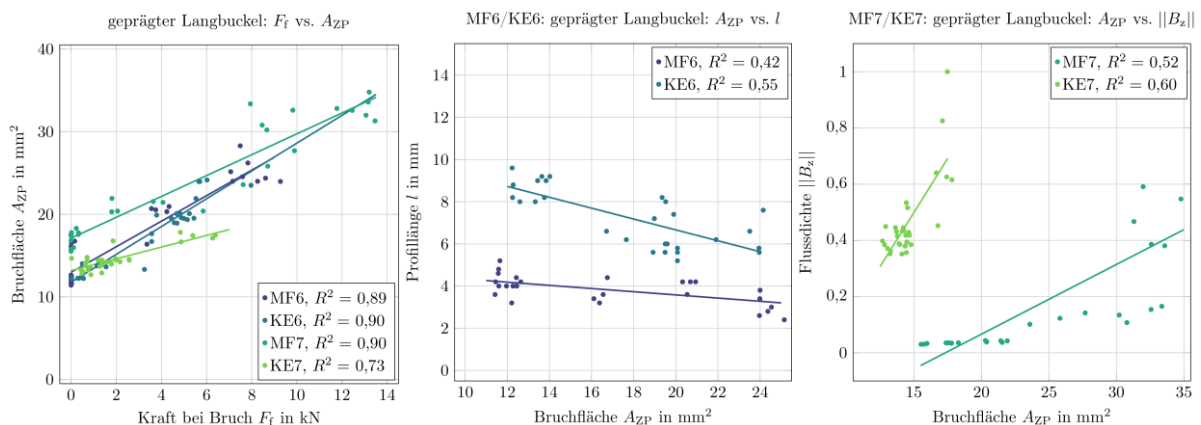


Abbildung 47: Gegenüberstellung der Kopfzugkraft bei Bruch F_f und den gemessenen Bruchflächen A_{zp} für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel (links) und den gemessenen Bruchflächen A_{zp} mit den entsprechenden Bewertungsparametern Profillänge (MF6, KE6, mittig) und der Flussdichte in der Profilmittigkeit (MF7, KE7, rechts)

5.3.5 Ergebnisse der Ultraschallprüfung

Die eingesetzten bildgebenden Ultraschallprüfsysteme geben die Messergebnisse als Bilddaten aus. Diese werden durch die in den Systemen hinterlegten Datenverarbeitungsalgorithmen aus den Messdaten generiert. Die Bilddaten sind reduzierte Informationen. Die Rohdaten (Schallverläufe) wurden nicht zur Verfügung gestellt. Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist hervorzuheben, dass die Algorithmen **nicht** für die Bewertung von Buckelschweißverbindungen entwickelt wurden. Dies äußert sich insbesondere darin, dass die Geräte darauf ausgelegt sind, Punktdurchmesser beim Widerstandspunktschweißen zu ermitteln und daher versuchen, „kreisförmige“ Zusammenhänge in den Daten zu finden. Bei den untersuchten Buckelschweißverbindungen handelt es sich jedoch um Anbindungsflächen, die den Geometrien der Buckel entsprechen. Aus diesem Grund wurden im Projekt die Bilddaten verarbeitet. Die Bilder werden auf die notwendigen Bereiche maskiert (Region of Interest, ROI). Es wurden Farbkorrekturen mit Farbwertanalysten (Schwellwertanalysen) durchgeführt und auf die entsprechenden Flächen skaliert. Dies ermöglicht eine optimale Bewertung der Bilddaten. Die Untersuchungen liefern den Ultraschallsystementwicklern Anhaltspunkte für mögliche Weiterentwicklungen und Adaptionen der Geräte für die Anwendung bei Buckelschweißverbindungen.

5.3.5.1 M6-Vierkantmuttern nach DIN 928-M6-ST (MF2, MF5, KE5)

Die Messergebnisse der M6-Vierkantmuttererschweißungen sind für beide Ultraschallprüfsysteme (US-System 1, US-System 2) in Abbildung 48 zu sehen. Die Ergebnisse der Systeme unterscheiden sich darin, dass mit US-System 2 häufiger kleinere Flächen ermittelt werden. Dies kann an den unterschiedlichen Funktionsweisen der beiden Systeme liegen (Abschnitt 5.2.5.2, Abschnitt 5.2.5.3). An den schrägen Buckelflanken kommt es zu Reflexionen der Schallwellen, die unvorhersehbar ins Volumen streuen und ggf. auch wieder zum Prüfkopf zurück reflektiert werden, was u. U. zu Missinterpretationen durch die US-Systeme führen kann. Die Streuungen sind gleichwertig zu betrachten. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die Ermittlung der Bruchflächen A_{ZP} der zerstörten M6-Vierkantbuckelproben nicht als trivial eingestuft wird und daher ebenfalls Streuungen unterliegt. Im Vergleich fallen die Streuungen zur ermittelten Kopfzugkraft F_f bei Bruch geringer aus.

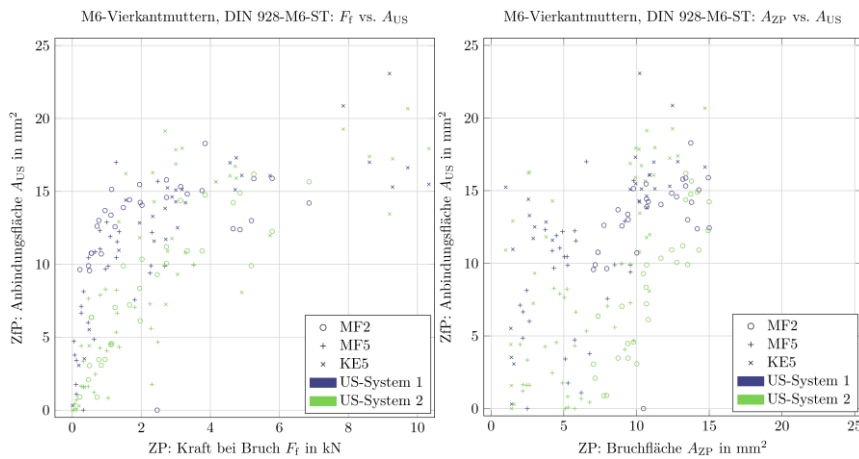


Abbildung 48: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch F_{f_i} , den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den ermittelten Anbindungsflächen A_{US} (Summe aller Buckel) für die Versuchsreihen mit M6-Vierkantmuttern

5.3.5.2 M6-Ringbuckelmutter (MF1, MF4, KE4)

Die Messergebnisse der Versuchsreihen mit M6-Ringbuckelmutter sind für beide Ultraschallprüfsysteme in Abbildung 49 zu sehen. Für MF1 konnten nur mit US-System 1 durchgeführt werden. US-System 2 lieferte an dieser Stelle keine auswertbaren Ergebnisse, was u. U. ebenfalls mit den Unterschieden in den Funktionsweisen der Systeme in Kombination mit der Materialkombination zusammenhängen könnte. Für die anderen Versuchsreihen sind die Ergebnisse vergleichbar. Es gelten auch bei dieser Kombination die gleichen Randbedingungen und Einschränkungen, die im vorherigen Abschnitt bereits benannt sind.

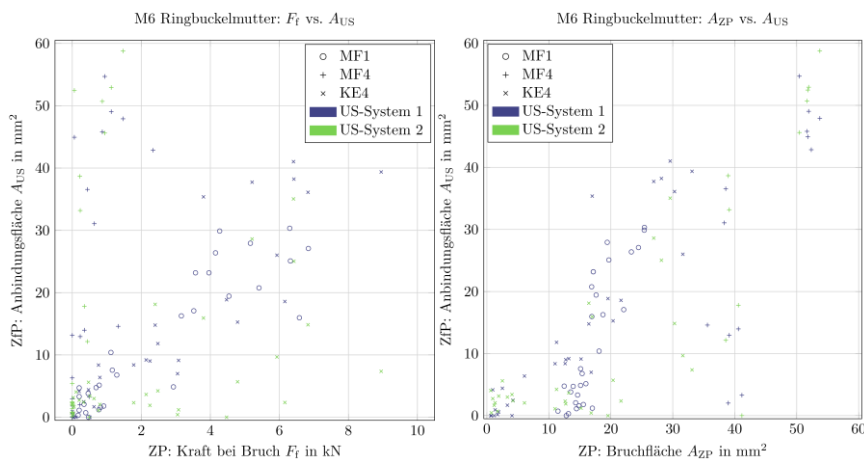


Abbildung 49: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch F_{f_i} , den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den ermittelten Anbindungsflächen A_{US} für die Versuchsreihen mit M6-Ringbuckelmutter

5.3.5.3 M8-Massebolzen mit drei Segmentbuckeln (MF3)

Die Messergebnisse mit M8-Massebolzen sind für beide Ultraschallprüfsysteme in Abbildung 50 zu sehen. Beide Systeme liefern auch bei dieser Versuchskombination

vergleichbare und plausible Ergebnisse. Mit zunehmenden Kopfzugkräften und Bruchflächen steigen die zerstörungsfrei ermittelte Anbindungsflächen bei beiden Systemen im ähnlichen Maß. US-System 2 liefert für niedrigere Kräfte und Bruchflächen vergleichsweise kleinere Anbindungsflächen gegenüber US-System 1.

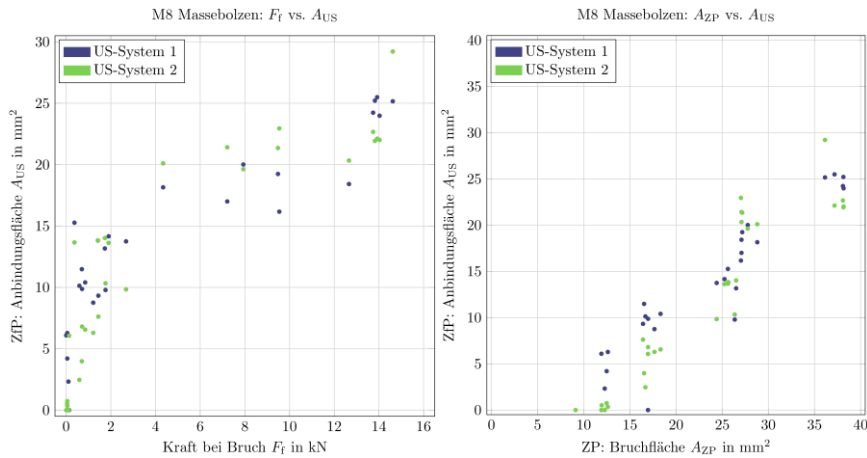


Abbildung 50: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch F_f , den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den ermittelten Anbindungsflächen A_{US} (Summe aller Buckel) für die Versuchsreihe mit M8-Massebolzen

5.3.5.4 Geprägte Langbuckel (MF6, KE6, MF7, K74)

Die Messergebnisse mit geprägten Langbuckeln beider Ultraschallprüfsysteme sind in Abbildung 51 zu sehen. Für die vier Versuchsreihen treffen ebenfalls die bereits in den vorangegangenen Ergebnisdarstellungen genannten Punkte zu. Beide Systeme liefern auch für die geprägten Buckel vergleichbare Ergebnisse, wobei der Zusammenhang zu den ermittelten Kopfzugkräften plausibler erscheint. Die Systeme messen kaum Flächen bei geringen Kopfzugkräften, während bereits Bruchflächen zu verzeichnen sind. Dies hebt nochmals die Schwierigkeiten bei der Bruchflächenbeurteilung hervor.

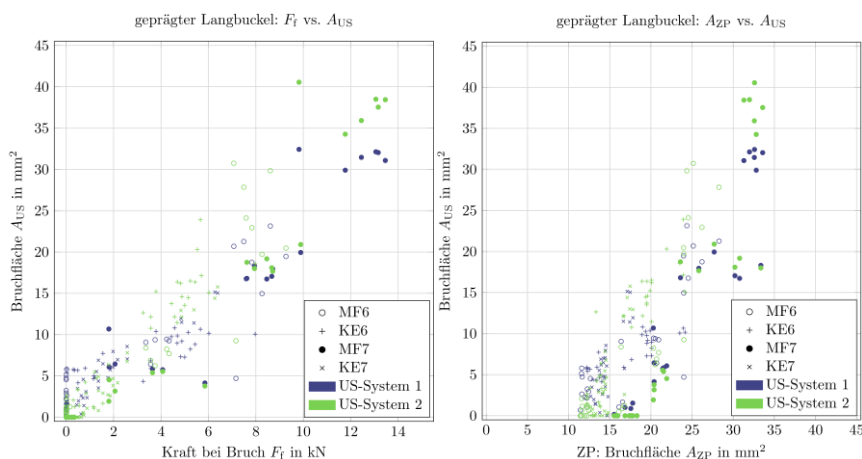


Abbildung 51: Messergebnisse der Ultraschallprüfsysteme in der Gegenüberstellung von Kopfzugkraft bei Bruch F_f , den gemessenen Bruchflächen A_{ZP} und den ermittelten Anbindungsflächen A_{US} für die Versuchsreihen mit geprägtem Langbuckel

5.4 Zusammenfassung

Mit den im Forschungsvorhaben IGF 21.542 B weiterentwickelten Bewertungsmethoden zur ZfP von Buckelschweißverbindungen mittels pMFT können die einzelnen stoffschlüssig angebondenen Buckelflächen der Proben ermittelt werden. Die durch den PA zur Verfügung gestellten Ultraschallprüfsysteme liefern vergleichbare Ergebnisse, mit einer Ausnahme, MF1. Ursache ist, dass mit dem Ultraschallsystem 2 keine Messdaten erfasst werden konnten. Bei der Erarbeitung der Ergebnisse wurde ein deutliches Wissensdefizit in den Erfahrungen und in der Literatur zur Bewertung der Bruchflächen beim Buckelschweißen ersichtlich. Durch die im Vorhaben entwickelte Kopfzugvorrichtung konnte nachgewiesen werden, dass das Nennspannungskonzept auch für Buckelschweißverbindungen anwendbar ist. Auf dieser Basis ist es möglich, die Ergebnisse der ZfP mit denen der ZP zu vergleichen. Die selbstentwickelten Bewertungsmethoden für die pMFT und die Ultraschallprüfungen liefern eine gute Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen. Die US-Systeme sind aktuell bereits in der Lage, größere Anbindungsflächen zuverlässig zu detektieren. Kleinere Anbindungsflächen, die in den Auflösungsbereichen der Systeme liegen, stellen eine Herausforderung für die Systeme dar. Gleiches gilt für die Bewertung mittels pMFT, wobei an dieser Stelle das eingesetzte Material mit seinen magnetischen Eigenschaften und der verwendeten Blechdicke entscheidend für die Ergebnisqualität ist. Es ist davon auszugehen, dass mit dünneren Blechen und einem größeren Unterschied der magnetischen Eigenschaften zwischen Schweißgefüge und Grundwerkstoff und Wärmeeinflusszone bessere Ergebnisse generiert werden. Der analytische Ansatz auf Basis des gemessenen Nachsetzwegs liefert gute Ergebnisse bei entsprechender Schweißbarkeit der Kombinationen. Dies wird insbesondere bei den Versuchskombinationen mit dem Blechwerkstoff 22MnB5+AS im gehärteten Zustand im Vergleich von MF4, KE4, MF5 und KE5 deutlich. Diese Kombinationen stellen große Herausforderungen dar, was durch den gezielten Einsatz der ZfP ergänzend unterstützt werden kann.

Eine Gesamtzusammenfassung der Bewertungsmethoden und Systeme zeigen Tabelle 12 und Abbildung 52. Es ist festzustellen, dass die Versuchsreihen MF3, MF6, KF7, KE6 und KE7 für alle Gegenüberstellungen gute Ergebnisse und gute Korrelationen liefern. MF1, MF2, MF4, MF5, KE4 und KE5 stellen für alle Systeme großer Herausforderungen dar, wobei die einzelnen Vergleiche differenzierte Ergebnisse liefern. So ist beispielhaft beim Vergleich zwischen der Bruchkraft und den ermittelten Anbindungsflächen das Ultraschallsystem 1 bei MF1 (#4), das Ultraschallsystem 2 bei MF2 (#5) und die pMFT bei KE5 (#3) gut geeignet.

Tabelle 12: Determinationskoeffizienten R^2 aller untersuchten Versuchskombinationen und Prüfsysteme

#	Vergleich	Determinationskoeffizient R^2											Mittelw. \bar{R}^2
		MF1	MF2	MF3	MF4	MF5	MF6	MF7	KE4	KE5	KE6	KE7	
1	F_f vs. A_{ZP}	0,57	0,81	0,75	0,21	0,48	0,89	0,90	0,94	0,57	0,90	0,73	0,71
2	F_f vs. F_{th}	0,71	0,84	0,91	0,49	0,74	0,93	0,94	0,27	0,73	0,92	0,92	0,76
3	F_f vs. A_{pMFT} bzw. BP*	0,67	0,58	0,87	0,46	0,57	0,46	0,50	0,42	0,84	0,55	0,84	0,61
4	F_f vs. A_{US} (US-System 1)	0,81	0,12	0,78	0,41	0,32	0,81	0,93	0,83	0,53	0,59	0,91	0,64
5	F_f vs. A_{US} (US-System 2)	-	0,77	0,77	0,57	0,43	0,85	0,92	0,43	0,37	0,87	0,93	0,63
6	A_{ZP} vs. F_{th}	0,67	0,90	0,89	0,80	0,44	0,88	0,94	0,28	0,49	0,96	0,69	0,72
7	A_{ZP} vs. A_{pMFT}	0,67	0,83	0,88	0,57	0,40	0,42	0,52	0,49	0,61	0,55	0,60	0,60
8	A_{ZP} vs. A_{US} (US-System 1)	0,73	0,18	0,79	0,52	0,13	0,74	0,90	0,84	0,51	0,67	0,61	0,60
9	A_{ZP} vs. A_{US} (US-System 2)	-	0,75	0,82	0,30	0,19	0,79	0,87	0,39	0,47	0,84	0,68	0,55
	Mittelwert \bar{R}^2	0,54	0,64	0,83	0,48	0,41	0,75	0,82	0,54	0,57	0,76	0,77	

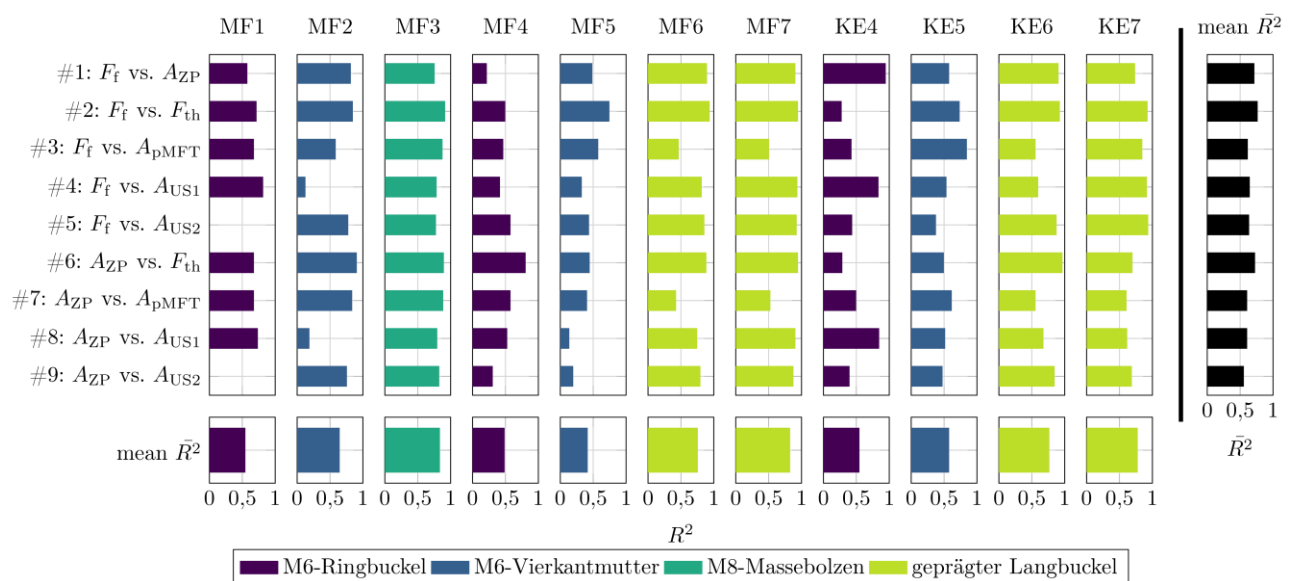


Abbildung 52: Determinationskoeffizienten R^2 aller untersuchten Versuchskombinationen und Prüfsysteme in graphischer Darstellung

6 Numerische Simulation der pMFT mittels FEM (AP3)

6.1 Methodik

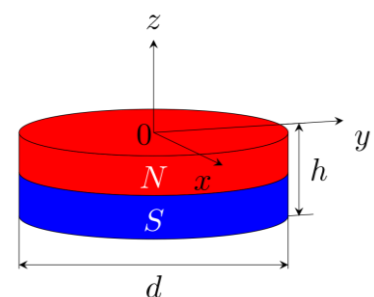
Die gemessene Restflussdichte $B_{r,z}(s)$ an den Oberflächen der Probenscheiben wird herangezogen, um die Remanenzflussdichte B_r im inneren der Proben zu bestimmen. Dies erfolgt in erster Näherung nach [56–59] durch eine Betrachtung der Proben als Permanentmagnet. Nach Gleichung (30) bzw. nach von Umstellen Gleichung (31) nach [56] kann hierbei mithilfe der gemessenen Flussdichtewerte in Abhängigkeit von der Probengeometrie und des Messabstands die Remanenzflussdichte berechnet werden. Die ermittelten Remanenzflussdichtewerte B_r für die vier Grundwerkstoffe (GW) und deren Schweißgefüge (SG) werden miteinander verglichen und in die FEM-Simulationsmodelle implementiert. Grundlage der Materialdaten sind die Messungen aus [51], die anschließend durch ermittelte Faktoren verändert werden, um das physikalische Verhalten beim Magnetisierungsvorgang durch Sensitivanalysen zu untersuchen. Die Faktoren ergeben sich aus den mittleren Unterschieden zwischen GW und SG. Die damit angepassten Materialdaten spiegeln anschließend Schweißlinsen mit niedrigerer, gleicher und höherer Permeabilität μ wider. Diese Parametervariation ist experimentell nicht möglich, weshalb die FEM zum Einsatz kommt, um das grundlegende Verständnis beim Magnetisierungsvorgang zu vertiefen und auf die Remanenzflussdichtemessungen zu übertragen. Hierfür werden die Ergebnisse der Messungen mit der Konfiguration S2 nach Tabelle 16 verwendet, da dies auch dem Magnetisierungskonzept der pMFT von Schweißproben entspricht. Die Ergebnisse der anderen Konfigurationen sind in [51] veröffentlicht. Für die FEM werden zwei Modelle erstellt. Mit dem ersten Modell werden die experimentellen Versuche der Probenscheiben mit variierender Permeabilität μ abgebildet. Das zweite Modell dient der Übertragung auf die Magnetisierung von Punktschweißverbindungen und einem experimentellen Vergleich.

$$B_{r,z}(z) = \frac{B_r}{2} \left[\frac{h+z}{\sqrt{r^2 + (h+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right] \quad (30)$$

$$B_r = 2B_{r,z}(z) \left[\frac{h+z}{\sqrt{r^2 + (h+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right]^{-1} \quad (31)$$

Mit:

- h : Höhe des Magneten
- r : Radius des Magneten, $r = d/2$
- d : Durchmesser des Magneten
- z : Abstand über Magnet
- $B_z(s)$: magnetische Flussdichte mit Abstand s auf der Symmetrieachse
- B_r : Remanenzflussdichte



6.2 Versuchsplanung

6.2.1 Festlegung der Fügeaufgaben

Die MDKs zur Weiterentwicklung der pMFT hinsichtlich der physikalischen Wirkungsweise sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Ausgangspunkt dieser Untersuchungen waren Vorversuche an Querschliffen von Zwei-Blech Punktschweißverbindungen, welche in Abschnitt 6.3.1 beschrieben sind. Ziel war es, die unterschiedlichen magnetischen Materialeigenschaften vom jeweiligen Grundwerkstoff und dem Schweißgefüge zu bestimmen, um diese in die FEM zu implementieren. Eine große Herausforderung bestand darin, dass das Schweißgefüge von der Wärmeeinflusszone und vom Grundwerkstoff umgeben ist. Es wurden daher zweiseitige Punktschweißverbindungen mit drei Blechen gleicher Materialdicke mittels MFDC geschweißt. Es wurde ein möglichst großer Schweißpunkt angestrebt, um eine magnetische Beeinflussung innerer Bereiche der Schweißlinse durch den Grundwerkstoff zu minimieren. Die außenliegenden Bleche wurden anschließend durch Fräsen oder Senkerodieren entfernt, ohne die unterschiedlichen Gefüge des mittleren Blechs zu verändern. Mittels Drahterodieren wurden Probescheiben mit einem Durchmesser von 25 mm koaxial zur Schweißlinse-rotationsachse ausgeschnitten. Abschließend wurden die Probescheiben geschliffen und unter Wasserkühlung poliert, um eine glatte Oberfläche zu erhalten. Die Scheiben beinhalten den Grundwerkstoff am Rand, die Wärmeeinflusszone und die Schweißlinse im Zentrum. Für die Bewertung der geometrischen Eigenschaften der Scheiben wurden topographische Messungen mit einem chromatisch-konfokalen Mikroskop (CCM) durchgeführt. Die Anlagentechnik zum Schweißen und der entwickelte Versuchsaufbau zum Messen der magnetischen Materialeigenschaften sind in Abschnitt 6.2.4 beschrieben. Die gewählten Schweißparameter sind in Abschnitt 6.2.3 zusammengestellt. Zur vergleichenden Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften der Grundwerkstoffe wurden aus 2 mm dicken Blechen jeden Materials Scheiben im Durchmesser von 10 mm durch Drahterodieren hergestellt.

Tabelle 13: Materialkombinationen für die Messungen der magnetischen Materialeigenschaften

ID	Materialkombination (Blechdicke t)	Gefüge Grundwerkstoff	Magnetischen Verhalten
MAT1	3x 22MnB5+AS150 (je 2,0 mm)	martensitisch	ferromagnetisch
MAT2	3x HX340LAD+Z100 (je 2,0 mm)	ferritisch	ferromagnetisch
MAT3	3x 1.4301 (je 2,0 mm)	austenitisch	paramagnetisch
MAT4	3x S235 (je 2,0 mm)	ferritisch	ferromagnetisch

6.2.2 Anlagentechnik zum Schweißen der Proben: Roboter geführtes MFDC-Zangenschweißsystem

Für die Herstellung der Schweißproben zur Ermittlung der magnetischen Materialeigenschaften wurde der Versuchsstand mit einer robotergeführten C-Schweißzange der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik

und Montage eingesetzt, welcher in Abbildung 53 abgebildet ist. Die Kenndaten des Versuchstands sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

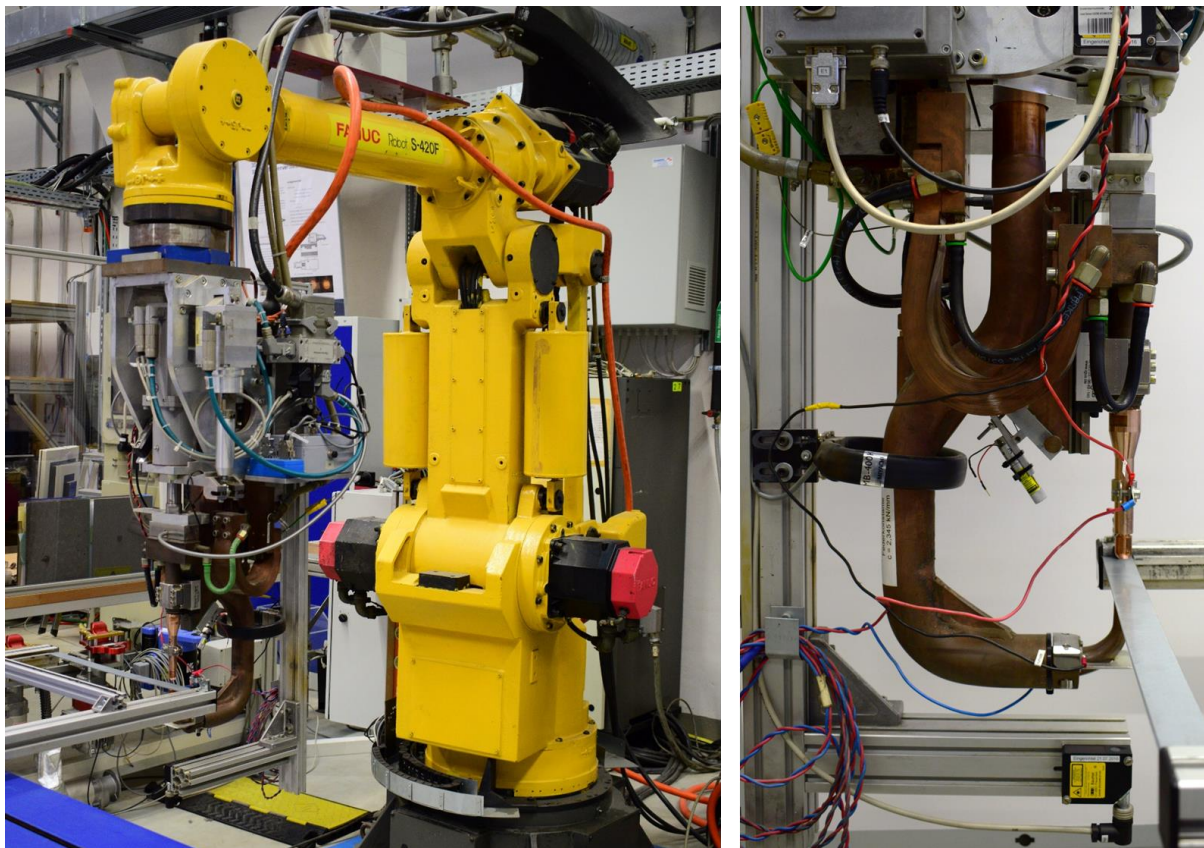


Abbildung 53: Versuchsaufbau zum Widerstandspunktschweißen der Professur für Fügetechnik und Montage an der Technischen Universität Dresden mit Darstellung des gesamten Versuchsaufbaus und der Schweißzange

Tabelle 14: Kenndaten des Versuchsaufbaus zum Widerstandspunktschweißen der Technischen Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage

Bezeichnung	Kenndaten
Schweißstromquelle	Harms & Wende GmbH: HWG2708SKIQR-05, Inverterfrequenz: 1 kHz
Bediensoftware	XPegasus Gold (V5.2.26.7878)
Schweißzange	C-Bauform an 6-Achs-Industrieroboter
Zangensteifigkeit	2,345 kN/mm
Zangenfenster	300 mm
Kraftsystem	servoelektrisch von 500 N – 3,6 kN
Messdatenaufzeichnung	Goldammer GmbH: G0S-1034-4, Arduino Pro ATmega 2560

6.2.3 Herstellung der Schweißproben zum Ermitteln der magnetischen Materialeigenschaften

Für alle Materialkombinationen MAT1 – MAT4 konnten die gleichen Schweißparameter verwendet werden, welche in Tabelle 15 zu finden sind. Es wurden Elektrodenkappen vom Typ ISO 5821 A0-16-20-40 [60] der Legierung CuCr1Zr mit unbearbeitetem Ausgangszustand verwendet. Je Materialkombination wurden fünf Proben hergestellt. Die Schweißparameter wurden auf Grundlage des an der Professur vorhandenen Prozessverständnisses und wenigen Vorversuchen und anschließender zerstörender Torsionsprüfung festgelegt. In

diesen Vorversuchen wurden Schweißpunktdurchmesser für MAT2 und MAT4 zwischen 12 mm und 13 mm gemessen. Da MAT 1 und MAT3 aus Sicherheitsgründen (Überschreitung des maximal möglichen Torsionsmoments von 265 Nm) nicht mittels Torsionsprüfung zerstört werden konnten, werden ähnliche, bzw. auch größere Punktdurchmesser für diese Materialdickenkombinationen angenommen. Dies wird zudem auch durch die höheren spezifischen Stoffwiderstände der Werkstoffe begründet, die in der Regel eine größere Schweißverbindung erzeugen. Für MAT2 wurden maximale Torsionsmomente von 170 Nm und für MAT4 von 190 Nm je Fügeebene gemessen.

Tabelle 15: Schweißparameter für die Herstellung der Schweißproben für die Ermittlung der magnetischen Materialeigenschaften

ID	Kraft in kN	Schweißzeit in ms	Vorhaltezeit in ms	Nachhaltezeit in ms	Schweißstrom in kA
MAT1 – MAT4	3,6	1000	400	400	16

6.2.4 Versuchsaufbau für die Messung der magnetischen Materialeigenschaften

Die Messungen zum Ermitteln der magnetischen Materialeigenschaften wurden mit fünf Probescheiben pro Material durchgeführt. Der experimentelle Aufbau gleicht dem der pMFT, beschrieben in Abschnitt 5.2.5.1. Es wird die neuentwickelte Magnetisierungsvorrichtung MV25 mit ein- und beidseitigen Spulen mit Spulenkernen aus 42CrMo4 oder Luft (kein Spulenkern) verwendet. Es wurde ein modularer Prüfstand entwickelt, der je nach Anforderung individuell zusammengestellt werden kann. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 54 zu sehen. Die Stromquelle (1) und die Messeinheit (2) wurden in jedem Versuchsaufbau verwendet. Zur Messung des Magnetisierungsstroms und der Spannung wurde die Messeinheit (2) verwendet. Dieses Modul ist mit einem Halbleiterrelais ausgestattet, das von einem Arduino-Mikrocontroller über eine digitale Schnittstelle (DI) gesteuert wird. Damit kann der Stromkreis zeitgesteuert und ereignisabhängig unterbrochen werden. Dadurch wird verhindert, dass die Spulen überhitzen oder durchbrennen. Die verschiedenen Konfigurationen sind Tabelle 16 zu entnehmen.

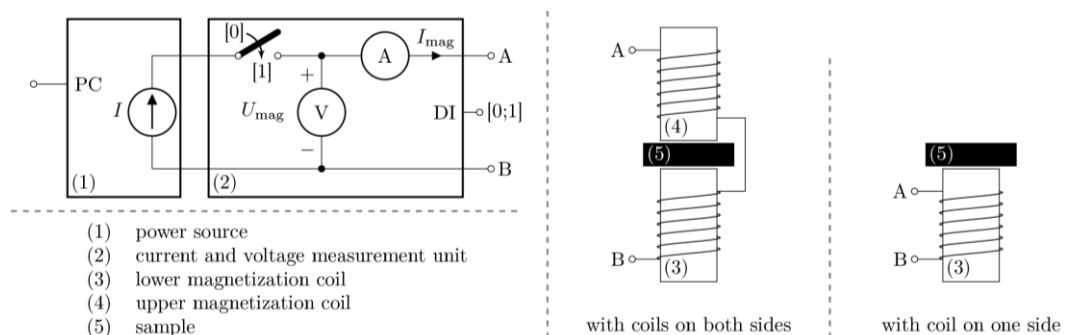


Abbildung 54: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Messen der magnetischen Materialeigenschaften in der Konfiguration zur ein- und beidseitigen Magnetisierung mit (1) Stromquelle, (2) Messeinheit für Strom und Spannung, (3) untere Magnetisierungsspule, (4) obere Magnetisierungsspule, (5) Probescheibe [51]

Tabelle 16: Verwendete Konfigurationen für die magnetische Charakterisierung der Probenscheiben

ID	Spulenkonfiguration	Spulenkernmaterial und Durchmesser
S1	eine Spule D25, N180, einseitig	Stahl 42CrMo4, $d = 25$ mm
S2	zwei Spulen D25, N180, beidseitig, gleichgerichtet	Stahl 42CrMo4, $d = 25$ mm
A1	eine Spule D25, N180, einseitig	Luft, $d = 25$ mm
A1	zwei Spulen D25, N180, beidseitig, gleichgerichtet	Luft, $d = 25$ mm

Abbildung 55 zeigt den Versuchsaufbau zum Magnetisieren und Messen der Probenscheiben. Die Scheiben (5) wurden direkt auf der unteren Spule (3) platziert. Bei Verwendung der oberen Spule (4) wurde diese direkt auf der oberen Probenoberfläche positioniert, wie in Abbildung 54 schematische dargestellt. Alle Proben wurden vor den Experimenten entmagnetisiert. Danach wurde jede Probe schrittweise mit einem ansteigenden Magnetisierungsstrom $I_{\text{mag}} = 5$ A, 10 A, 15 A, und 20 A magnetisiert. Nach jedem Magnetisierungsschritt wurde die Vektorkomponente in z-Richtung der magnetischen Restflussdichte $B_{r,z}$ mit dem Hallsensor in einem Abstand von $z = 0,1$ mm zur Probenoberfläche gemessen, die der unteren Spule zugewandt war. Die Schrittweite der Abtastung in x - und y -Richtung betrug 0,5 mm.

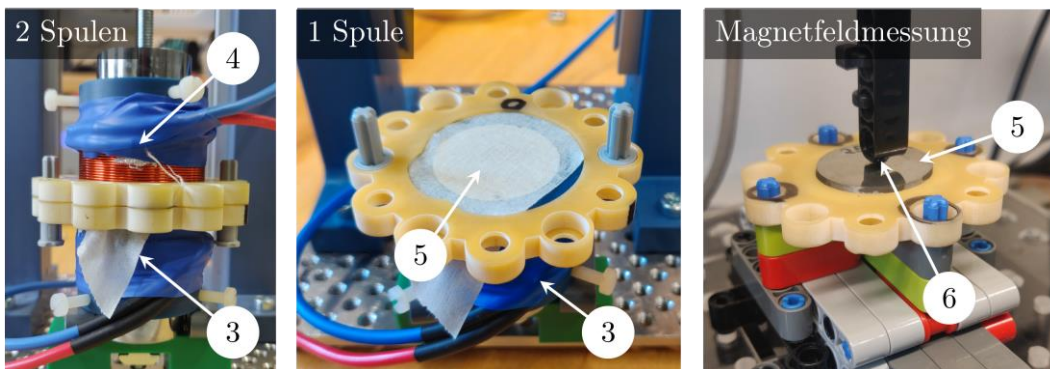


Abbildung 55: Versuchsaufbau zum Magnetisieren und Messen der Flussdichte an den Probenscheiben; 3, 4: untere, obere Spule; 5: Probenscheibe in Positioniervorrichtung; 6: Hallsensor

6.2.5 Beschreibung der FE-Modelle

Für die numerischen Untersuchungen wurden zwei axialsymmetrische Modelle entwickelt. Beide basieren auf den bereits vorhandenen Erkenntnissen aus den selbst durchgeführten Vorhaben IGF 17.539 [26] und IGF 19.208 [23]. Als Simulationsumgebung wird ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2020 R1, verwendet. Als physikalische Umgebung wird *Structural* und *Magnetic-Nodal* ausgewählt. Die Simulationen erfolgen statisch mit dem Elementtyp PLANE233 und werden für den Magnetisierungsprozess mit variierenden Eingangsparametern zur Visualisierung und Auswertung der Magnetfeldverteilung durchgeführt. Die in [23] gemessenen magnetischen Materialeigenschaften der Stahlbleche und -kerne werden als Materialdaten in das FE-Modell implementiert. Hierzu wird die Neukurve der Hystereseschleife verwendet. Die FE-Modelle sind in Abbildung 56 zu sehen. Für die Auswertung wird der radiale Verlauf (rot gestrichelte Linie) der Flussdichte entlang

in den Höhen $z = 0$ mm und $z = 0,6$ mm (Abstand Hallsensormessung zur Probenoberfläche + Hallelementtiefe im Sensor) ausgelesen und den Ergebnissen der Remanenzmessung gegenübergestellt.

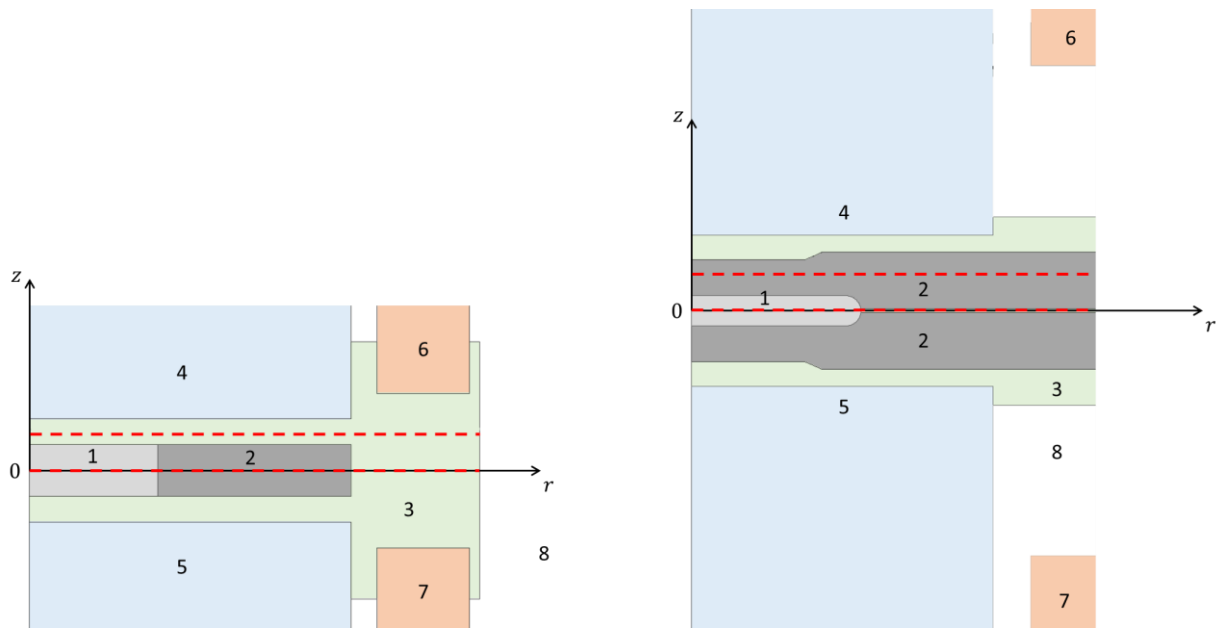


Abbildung 56: Geometrien der FE-Modelle für die numerischen Simulationen der Magnetfeldverteilung während des Magnetisierungsvorgangs für die untersuchten Probenscheiben (links) und exemplarischen Punktschweißverbindungen, mit 1: Schweißgefüge/Schweißlinse (SG); 2: Grundwerkstoffgefüge (GW)/oberes und unteres Blech; 3: Bereich der Auswertungen (Luft, Region of Interest); 4: oberer Spulenkern; 5: unterer Spulenkern; 6: obere Spule; 7: untere Spule; 8: Halbraum (Luft als Halbkreis, nicht vollständig abgebildet); - - - Datenlinien zum Auslesen der Flussdichte

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Voruntersuchungen

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen sehr deutlich, dass die magnetischen Eigenschaften des Schweißgefüges von denen des Grundmaterials abweichen. Dies ist auf die Veränderung des Mikrogefüges zurückzuführen, die durch die schnelle Abkühlung des geschmolzenen Materials nach dem Schweißprozess verursacht wird. Abbildung 57 zeigt den Vergleich der untersuchten Probe in einer Querschnittsansicht mit einer Darstellung der der pMFT-Messung. Die Magnetfeldverteilung an der Oberfläche der Probe im magnetisierten Zustand mit einem Magnetisierungsstrom von $I_{\text{mag}} = 35$ A zeigt sehr deutlich die Position der Schweißlinse. Es muss also davon ausgegangen werden, dass sich die magnetischen Eigenschaften zwischen dem Schweiß- und dem Grundwerkstoffgefüge unterscheiden. Die maßstabsgetreue Überlagerung bestätigt dies (Abbildung 57, unten rechts).

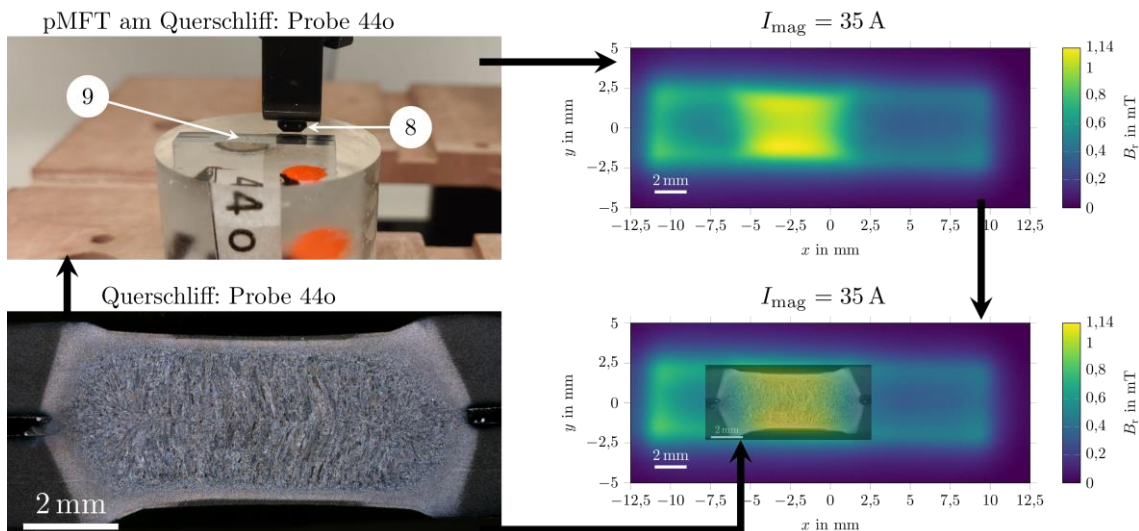


Abbildung 57: Vergleich der Querschliffprobe (unten links) mit der gemessenen Flussdichte mittels pMFT mit deutlicher Unterscheidung zwischen Schweißlinsengefüge und dem Grundwerkstoff. Darstellung des Messausbaus mit scannendem Hallsensor und der darunter positionierten Querschliffprobe; Ergebnisse der Magnetfeldmessung nach der Probenmagnetisierung mit 35 A (oben rechts) und der maßstabsgerechten Überlagerung von Magnetfeldmessdaten und dem Querschliff (unten rechts) [51]

6.3.2 Messergebnisse

6.3.2.1 Probenpräparation

Vor der magnetischen Charakterisierung wurden die Probenscheiben topographisch vermessen, um die Einflüsse von Unebenheiten einschätzen zu können (Abbildung 58). Die Scheibendicken t wurden mit Hilfe von Messschiebern und der Auswertung der topografischen Messungen auf beiden Seiten bestimmt. Die Ebenheit der Scheiben wurde anhand von Profilschnitten der topografischen Messungen ermittelt. Dabei wurden 180 radial angeordnete Profilschnitte mit einem Winkelabstand von 1° erzeugt. Daraus wurde der mittlere Kugelradius r mittels Kreisanpassung (Regressionskreis) aus dem durchschnittlichen Profilschnitt aller Messungen ermittelt. Die Auswertung der Dicke zeigt, dass drei Proben im Vergleich zu den anderen deutlich dünner sind. Der Vergleich zwischen den topographischen Messungen beider Seiten und der manuell gemessenen Dicke liegen im gleichen Bereich und können als vergleichbar angesehen werden. Die Kugelradien r liegen in einem Größenbereich, der im Verhältnis zu den Scheibendurchmessern als vernachlässigbar einzuschätzen ist.

Zur Bewertung der erzeugten Magnetfelder wurden Validierungsmessungen der Magnetisierungsspulen MV25 durchgeführt. Dazu wurde die magnetische Flussdichte der Spule ohne Kern gemessen. Zu diesem Zweck wurde die Hallsensor zunächst von unten nach oben durch die Luftspule geführt. Die Spulenströme wurden auf 1 A und 2 A eingestellt. In einer zweiten Messung wurde die magnetische Flussdichte oberhalb der Spule mit einem Spulenstrom von 1A gemessen. Die Schrittweite in axialer Richtung z beträgt jeweils $z = 0,5$ mm. Die gemessenen Werte wurden mit theoretischen Werten für mehrlagige Spulen nach

der Näherungsgleichung (32) nach [61, 62] und mit Hilfe der Gleichungen (33) und (34) verglichen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 59 dargestellt. Dabei unterscheiden sich die Messdaten aus dem Experiment nur unwesentlich von denen der theoretischen Betrachtung. Erwartungsgemäß nimmt die magnetische Feldstärke H mit zunehmendem axialem Abstand z von der Spulenmitte $z = 0$ deutlich ab.

$$B(z) = \frac{\mu_0 NI}{2l(r_o - r_i)} \left[\frac{l}{2-z} \ln \frac{r_o + \sqrt{r_o^2 + \left(\frac{l}{2-z}\right)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + \left(\frac{l}{2-z}\right)^2}} + \frac{l}{2+z} \ln \frac{r_o + \sqrt{r_o^2 + \left(\frac{l}{2+z}\right)^2}}{r_i + \sqrt{r_i^2 + \left(\frac{l}{2+z}\right)^2}} \right] \quad (32)$$

$$B = \mu H \quad (33)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (34)$$

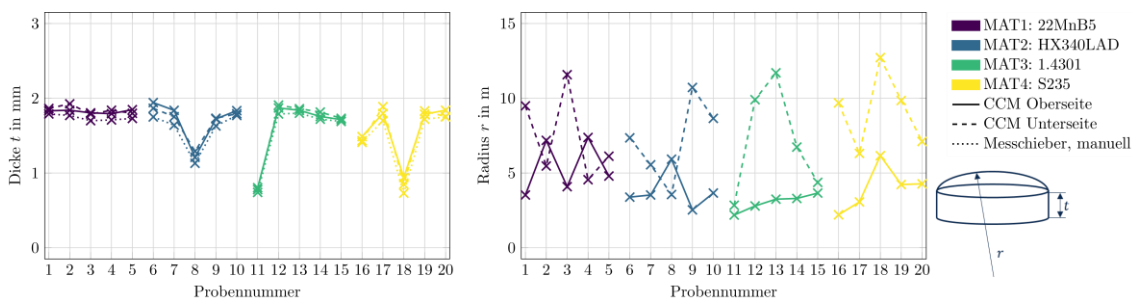


Abbildung 58: Messergebnisse der topographischen Messungen mittels chromatisch-konfokalem Mikroskop (CCM) und den manuellen Messschiebermessungen zur Bestimmung der Probendimension und Einschätzung der Ebenheit [51]

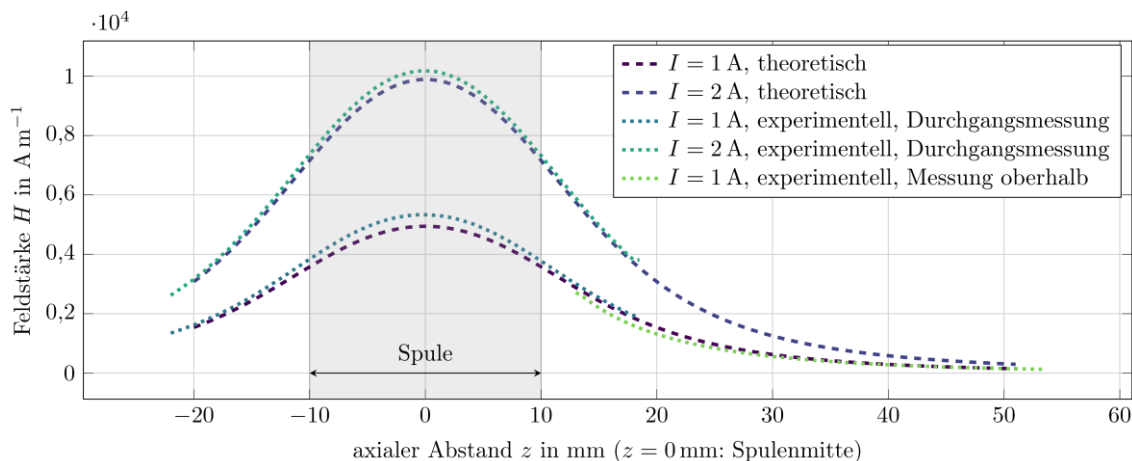


Abbildung 59: Erzeugtes Magnetfeld bei verschiedenen Strömen der Magnetisierungsspulen MV25 im Vergleich mit den theoretisch berechneten Magnetfeldern [51]

6.3.2.2 pMFT-Messungen

Abbildung 60 zeigt den direkten Vergleich zwischen dem Mikroskop und anhand der ausgewählten Konfigurationen S1 und S2 die gemessenen Schweißlinsendurchmesser d_n . Die Probenscheiben an sich und das sich darin befindende Schweißlinsengefüge heben sich bei jeder pMFT-Messung deutlich hervor. Bei der zufällig ausgewählten Probe 20 von MAT4

S235 beträgt die Differenz zwischen Mikroskop- und magnetischen Messungen weniger als 0,2 mm. Dies bestätigt die gute Eignung der gewählten Messmethoden für die magnetische Charakterisierung des Schweißgefüges im Vergleich zum Grundwerkstoff.

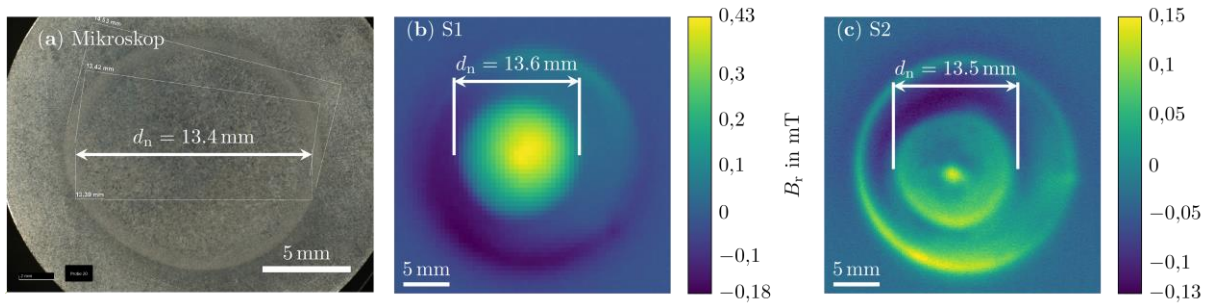


Abbildung 60: Am Mikroskop ermittelte Schweißlinsendurchmesser d_n (a) im Vergleich mit Flussdichtemessungen in den Konfigurationen (b) S1, (c) S2 der magnetisierten Probe 20 von MAT4 S235 mit $I_{\text{mag}} = 20$ A

Für die Auswertung der magnetischen Restflussdichte bei den Probenscheiben mit Schweißgefüge wurden zwei Bereiche (ROI) mit elliptischer oder kreisförmiger Form gewählt. Der innere Bereich beinhaltet das Gefüge der Schweißlinse und der äußere den Grundwerkstoff, die Wärmeinflusszone (HAZ) sowie die Schweißlinse. Durch Subtraktion des inneren vom äußeren Bereich können diese voneinander losgelöst betrachtet werden. Abbildung 61 zeigt die ausgewählten ROI am Beispiel der Probe 06 von MAT2 in S1-Konfiguration. Die Auswertung der einzelnen Bereiche als Boxplots zeigt deutlich den Unterschied zwischen der magnetischen Flussdichteverteilung des Schweißgefüges (SG), der gesamten Probe und des Grundwerkstoffs (GW).

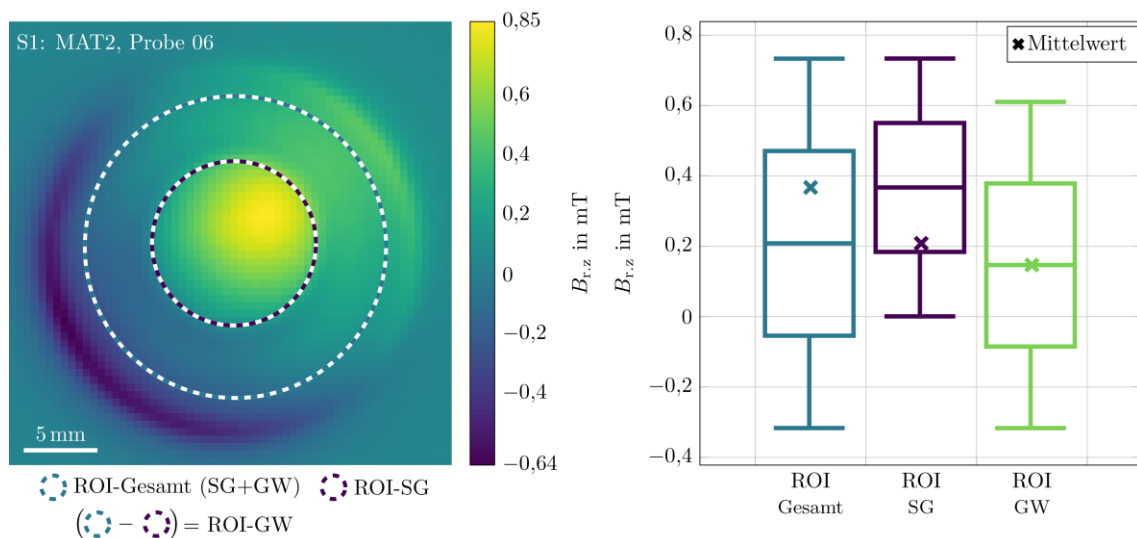


Abbildung 61: Darstellung der unterschiedlichen Bereiche (ROI) als Kreisformen am Beispiel der Probe 06 von MAT2 (links) mit dem Vergleich der Flussdichteverteilung der einzelnen ROI mit Mittelwerten und als Boxplots beider ROIs und deren Differenz als ROI-GW (rechts) zur Bewertung der Messungen an den Probenscheiben

Der Unterschied zwischen den Bereichen zeigt sich auch im Mittelwert. Daher werden die Mittelwerte der Bereiche für die magnetische Charakterisierung der Materialien ausgewertet. Für die Probenscheiben der Grundwerkstoffe wird ein kleiner mittlerer Bereich der

Messdaten herangezogen, da die Probenscheiben für die Betrachtung als Permanentmagnet für das Grundwerkstoffgefüge nicht genutzt werden können. Von diesen Bereichen werden ebenfalls die Mittelwerte für die Umrechnung zur Remanenzflussdichte bestimmt. Die Ergebnisse der gemessenen Flussdichte $B_{r,z}(z)$ und den daraus berechneten Werten der Remanenzflussdichte B_r sind in Abbildung 62 für die einzelnen Werkstoffe zu sehen.

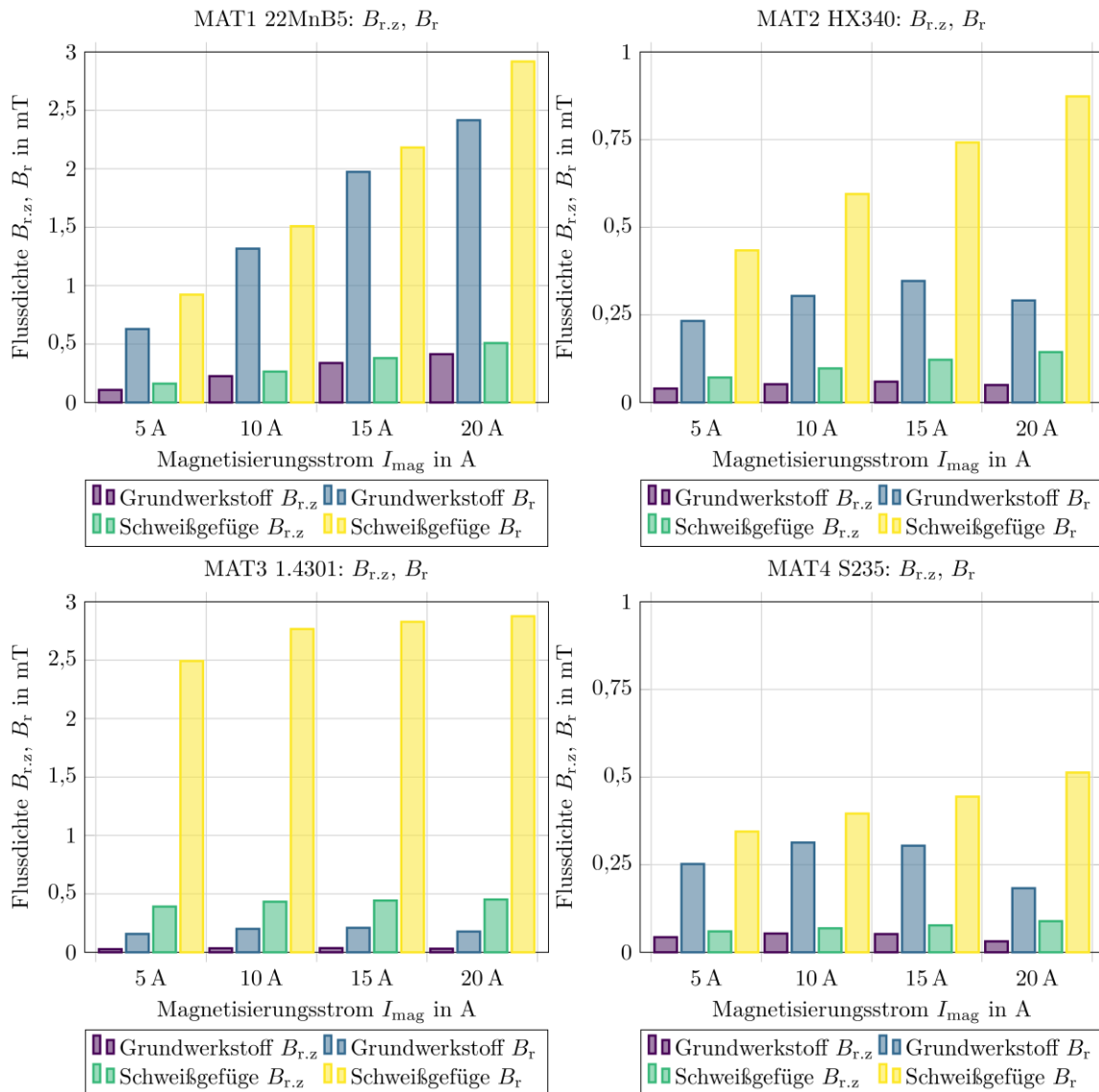


Abbildung 62: Mittlere gemessene Flussdichte an der Probenoberfläche und die daraus berechneten Werte der Remanenzflussdichte im Probenmittelpunkt für die Gefüge der Grundwerkstoffe und den entsprechenden Schweißlinsen

Für die vier untersuchten Werkstoffe werden mit zunehmendem Magnetisierungsstrom I_{mag} steigende Flussdichten $B_{r,z}(z)$ an den Probenoberflächen gemessen. Daraus resultieren ebenfalls steigende Werte für die nach Gleichung (31) berechnete Remanenzflussdichte B_r . Allerdings sind bei MAT2 und MAT4 ab einem Strom von $I_{mag} = 20$ A sinkende Werte beim Grundwerkstoff zu beobachten. Weiter ist zu erkennen, dass die Werte der Schweißgefüge grundsätzlich höher sind als die der Grundwerkstoffe. Sehr deutlich wird dies bei MAT3, dem metastabilen Austenit im Grundwerkstoffzustand. Durch

die hohen Abkühlraten von $\Delta T > -1000 \text{ K/s}$ [63] nach dem Abschalten des Schweißstroms bleibt Deltaferrit in der Schweißlinse zurück, welches ferromagnetische Eigenschaften aufweist [53]. Anhand der Daten werden die Faktoren μ_{low} und μ_{high} für die Variation der Permeabilität μ ermittelt, mit denen die Werkstoffdaten für die Materialmodelle der FEM-Simulationen durchgeführt werden. Die Faktoren μ_{low} und μ_{high} berechnen sich nach den Gleichungen (35) und (36) und sind in Tabelle 17 dargestellt. Daraus ergeben sich die in Abbildung 63 dargestellten Materialmodelle für die FE-Modelle, wobei als Eingangsgröße die Neukurve der Hystereseschleife genutzt wird.

$$\mu_{\text{low}} = \frac{B_r(\text{GW})}{B_r(\text{SG})} \quad (35)$$

$$\mu_{\text{high}} = \frac{B_r(\text{SG})}{B_r(\text{GW})} \quad (36)$$

Tabelle 17: Permeabilitätsfaktoren μ_{low} und μ_{high} zur Variation der Materialdaten der FEM-Modelle

ID	μ_{low} (GW>SG)	μ_{high} (GW<SG)
MAT1	0,8	1,2
MAT2	0,45	2,25
MAT3	0,06	150
MAT4	0,58	1,7

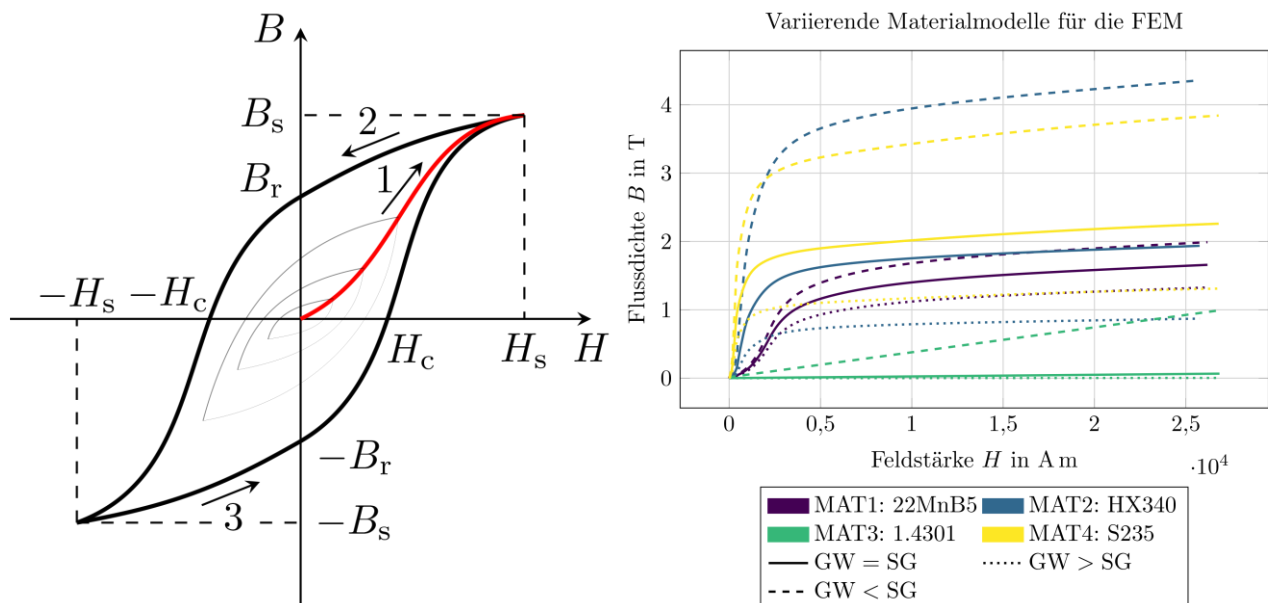


Abbildung 63: Schematische Darstellung der Hystereseschleifen mit der Neukurve (1, rot), der oberen Hysteresekurve (2), der unteren Hysteresekurve (3), den Sättigungspunkten $\pm H_s$, $\pm B_s$ und den charakteristischen magnetischen Parametern Koerzitivfeldstärke H_c und magnetische Restflussdichte B_r der Hauptschleife und drei beispielhaften inneren Rayleigh-Schleifen (links) und Darstellung der variierenden Materialmodelle für die FE-Modelle als Neukurve

6.3.2.3 FEM-Simulationen (FE-Modell 1)

Für jeden Werkstoff wurden zwölf variierende Eingangsparameter für die Simulationen gewählt. Es handelt sich dabei um vier steigende Magnetisierungsströme und den

entsprechenden Materialmodellen (Tabelle 18). Für die Simulationen der MAT3-Varianten wurde zusätzlich noch eine Kombination aus MAT3 für den Grundwerkstoff und MAT1 für das Schweißgefüge gewählt. Dies berücksichtigt den Fall des verbleibenden ferromagnetischen Deltaferrits in der Schweißlinse. MAT1 wurde hierbei gewählt, da die Messdaten vergleichbar mit den Messdaten der Probenscheiben von MAT3 sind. Die Ergebnisse der FEM-Simulationen sind in Abbildung 64 dargestellt. Für alle Variationen ist eine gleiche Charakteristik zu beobachten. Mit steigenden Magnetisierungsströmen I_{mag} sind steigende Flussdichtewerte B festzustellen. Die Materialien und die Verläufe unterscheiden sich prinzipiell in den Ausschlägen der Flussdichteverläufe bei einem Radius $r = 5$ mm. An dieser Stelle ist der Übergang vom Schweißgefüge zum Grundwerkstoff im Modell hinterlegt. Die Ausschläge sind dabei vom Verhältnis zwischen Grundwerkstoff (GW) und Schweißgefüge (SG) abhängig. Bei gleichen Werkstoffeigenschaften μ_{ref} sind die Übergänge von GW zu SG homogen. Für $\text{GW} > \text{SG}$ ist der Verlauf mit zunehmendem Radius r für $r < 5$ mm zunächst fallend, bei $r = 5$ mm sprunghaft steigend und bei $r > 5$ mm nähert sich dem Verlauf der Referenz μ_{ref} an. $\text{GW} < \text{SG}$ verhält sich genau umgekehrt. Auch bei der Kombination SIMMAT3+MAT1 ist ein gleiches Verhalten zu sehen, da an dieser Stelle $\text{GW} < \text{SG}$ gilt. Bei $r = 12,5$ mm ist die Kante der Probenscheibe modelliert, was an dieser Stelle zu einer absinkenden Flussdichte mit zunehmendem Radius führt.

Tabelle 18: Versuchsmatrix für die Simulationen der Probenscheiben

ID	μ_{ref} (GW = SG)	μ_{low} (GW > SG)	μ_{high} (GW < SG)
SIMMAT1			
SIMMAT2			
SIMMAT3		$I_{\text{mag}} = 5 \text{ A}, 10 \text{ A}, 15 \text{ A}, 20 \text{ A}$	
SIMMAT4			
SIMMAT3+MAT1	MAT3 = μ_{ref} (GW); MAT1 = μ_{ref} (SG); $I_{\text{mag}} = 5 \text{ A}, 10 \text{ A}, 15 \text{ A}, 20 \text{ A}$		

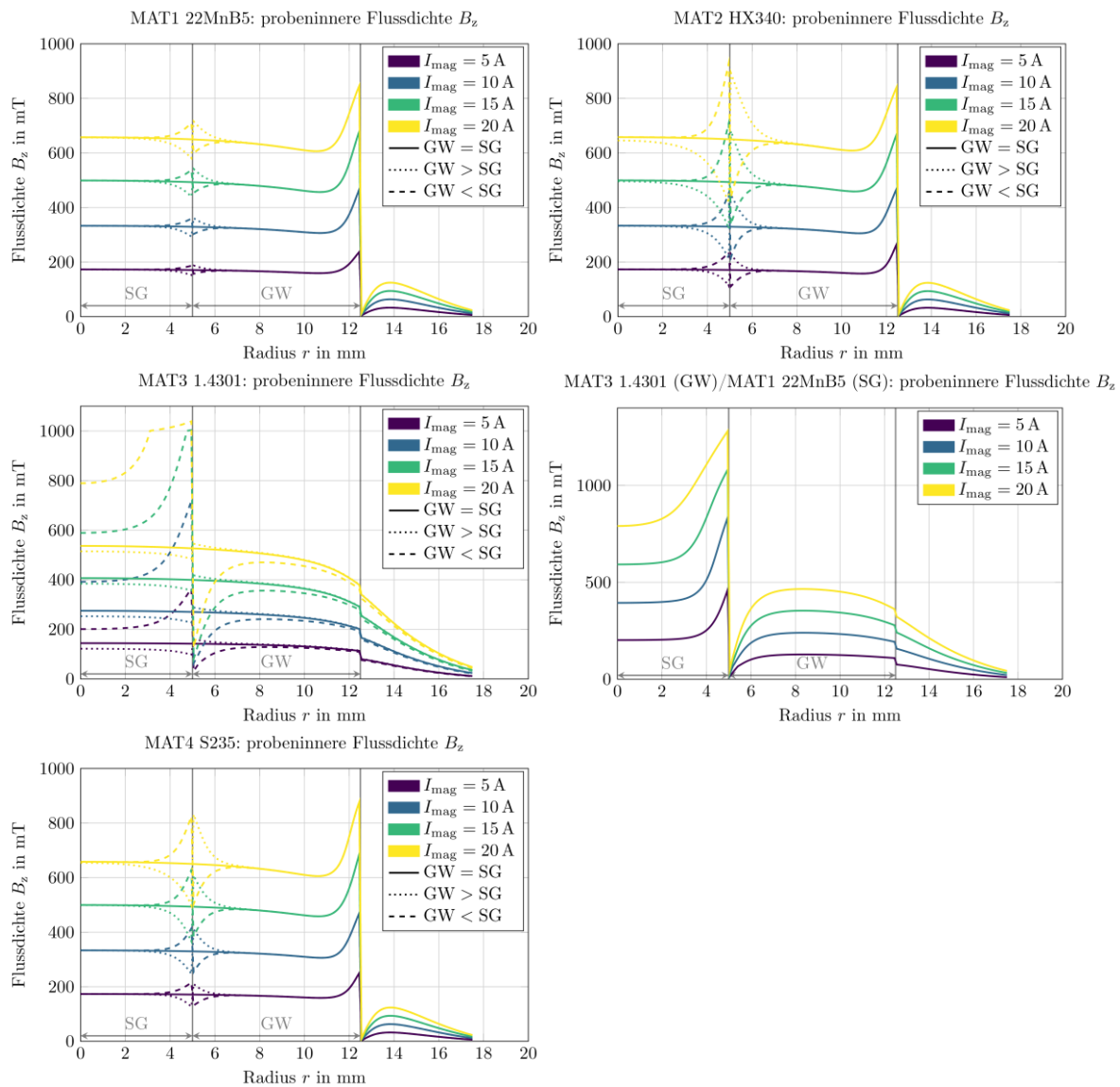


Abbildung 64: Simulationsergebnisse der untersuchten Werkstoffe mit variierender Permeabilität berechnet aus Messdaten der Flussdichtemessungen an Probenscheiben mit Grundwerkstoff- und Schweißgefuge

6.3.2.4 FEM-Simulationen von Schweißprobengeometrien (FE-Modell 2)

Die FEM-Simulationen der Schweißprobengeometrien werden für einen Linsendurchmesser $d_n = 9,0$ mm mit gleichen Blechdicken von $t = 1,5$ mm durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 65 zu sehen. Der Einfluss der Schweißlinse und der Variation der Permeabilitäten μ , μ_{low} und μ_{high} entsprechend Abschnitt 6.3.2.3 ist bei allen Werkstoffen insbesondere am Rand der Schweißlinse ($r = 4,5$ mm) zu sehen. Grundsätzlich ist ein gleiches Verhalten der Flussdichteverläufe zu beobachten. Unterschiede sind in den Ausschlägen bei den Flussdichteverläufen im Probeninneren zu erkennen. Der Flussdichteverlauf entlang der Sensorlinie ist bei den ferromagnetischen Grundwerkstoffen im Ausgangszustand vergleichbar. Abweichend verhält sich wiederum MAT3. Auch bei diesen Untersuchungen wurde die Kombination von MAT3 im GW und MAT1 im SG simuliert, was den Realfall näher abbilden soll. Der Vergleich bei MAT3 untereinander zeigt einen deutlichen Unterschied bei der Berücksichtigung des ferromagnetischen Schweißgefuges, was

die gute Bewertungsmöglichkeit dieser Werkstoffkombination unterstreicht. Dies wurde in [53] bereits experimentell näher untersucht. Die Simulation liefert nun einen tieferen Einblick in die Vorgänge während der Magnetisierung.

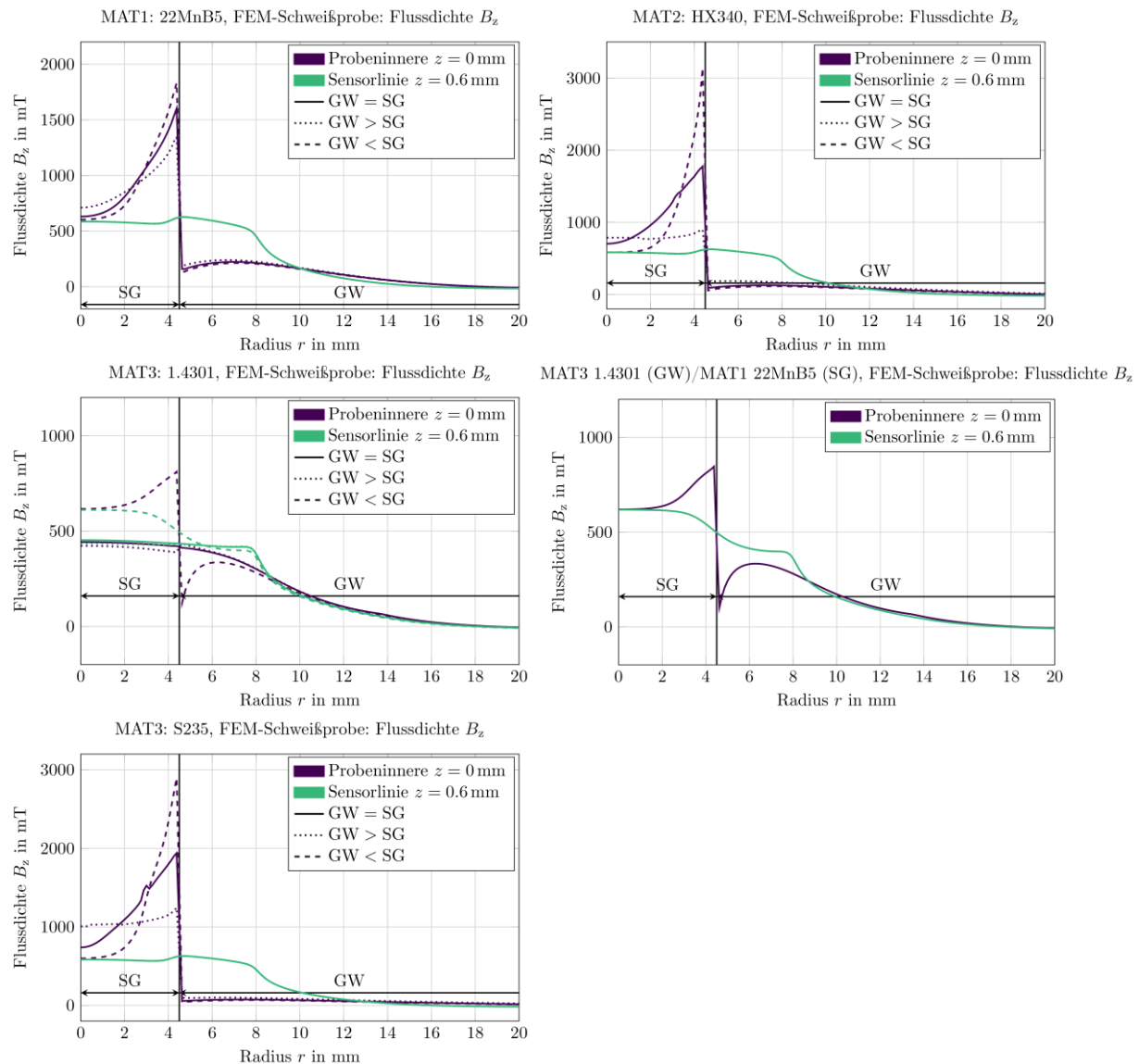


Abbildung 65: Simulationsergebnisse der untersuchten Werkstoffe mit variierender Permeabilität berechnet aus Messdaten der Flussdichtemessungen an Schweißproben mit einem Linsendurchmesser $d_n = 9,0$ mm mit gleichen Blechdicken von $t = 1,5$ mm mit Grundwerkstoff- und Schweißgefüge

6.4 Ergebnisdiskussion

Um diese auf Erkenntnisse der vorangegangenen Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen, wurde aus dem Versuchsumfang aus [64] eine Probe zufällig ausgewählt. Die Probe hat einen Punktdurchmesser $d_w = 6,22$ mm, welcher in die Simulation des FE-Modells 2 übertragen wurde. Um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen, wurden 180 radiale Profilverläufe der gemessenen Restflussdichte $B_{r,z}$ um den Probenmittelpunkt bewertet und der sich daraus mittlere Profilverlauf den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt. Abbildung 66 zeigt exemplarisch die Ermittlung der gemessenen Restflussdichte $B_{r,z}$ mittels

Profilverlauf und die Gegenüberstellung der Ergebnisse. Es ist zu erkennen, dass beiden Verläufe im Profil ähnlich sind. Die Flussdichtewerte sind auf Grund der verschiedenen Situationen (Experiment: Restflussdichte, Simulation: Magnetisierungsprozess) deutlich unterschiedlich. Die Probengeometrie und die magnetischen Eigenschaften der Gefügestrukturen beeinflussen den Magnetisierungsprozess, welcher anschließend die resultierende Restflussdichte maßgeblich bestimmt.

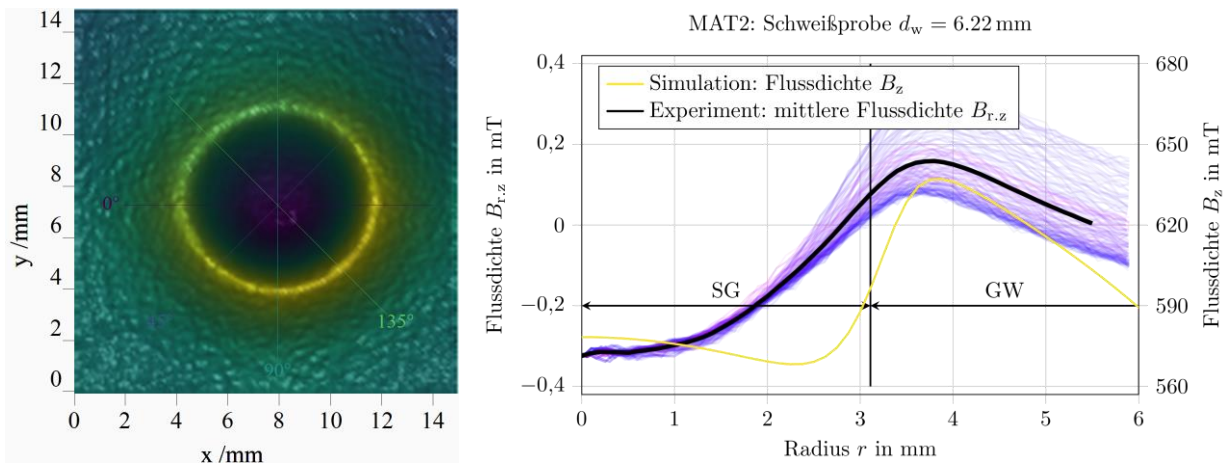


Abbildung 66: Gemessene Flussdichte $B_{r,z}$ als Mittelwertverlauf von 180 Profilverläufen (dargestellt für vier Profilverläufe links) in der Gegenüberstellung mit der simulierten Flussdichteverteilung für eine Schweißprobe mit einem Punktdurchmesser $d_w = 6,22 \text{ mm}$ im Experiment und übertragen in die Simulation

6.5 Zusammenfassung

Das Ineinandergreifen von experimentellen Versuchen und numerischen Simulationen mittels FEM konnte erstmalig der Einfluss der unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften der verschiedenen Gefügestrukturen von Punktschweißverbindungen bei der zerstörungsfreien Bewertung mittels pMFT quantifizieren und nachweisen. Die Voruntersuchungen an konventionellen Querschnittsproben zeigten, dass die magnetischen Eigenschaften der Gefüge der beiden Bereiche voneinander abweichen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden kleine Probenscheiben aus Schweißpunkten und dem Grundwerkstoff herausgeschnitten und das mittlere Blech für die Restflussdichtemessungen vorbereitet. Durch diese aufwendige, aber notwendige Vorbereitung der Proben wurde sichergestellt, dass die verschiedenen Bereiche der Schweißverbindung möglichst unbeeinflusst blieben. Anschließend wurden mittels der pMFT-Methode 2D-Oberflächenscans mit unterschiedlichen Magnetisierungszuständen der Proben durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass die Geometrie der Schweißlinse sich in den magnetischen Messungen widerspiegelt und bestimmt werden kann. Allein dieser Erkenntnisgewinn zeigt bereits, dass unterschiedliche magnetische Eigenschaften zwischen Schweiß- und Grundwerkstoffgefüge vorliegen müssen. Die Auswertemethode mittels ROI zeigt eine mögliche Variante, die für weitere Untersuchungen an ähnlichen Proben angewendet werden kann. Diese sind unter anderem die berührungslose zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen

zur Erkennung von Inhomogenitäten wie Rissen, Lunkern, Einschlüssen. Dies sollte in künftigen Studien genauer untersucht werden, z. B. mit Härtemessungen im Vergleich mit metallographischen Untersuchungen. Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen kann die pMFT-Methode für die ZfP von Widerstandsschweißverbindungen weiterentwickelt werden.

7 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Die Ergebnisse des Vorhabens liefern einen großen Fortschritt in Richtung ZfP von Buckelschweißverbindungen. Erstmals wurden drei physikalisch unterschiedlich funktionierende bildgebende Prüfmethode an Buckelschweißverbindungen wissenschaftlich untersucht. Es konnten neue Methoden zur Bewertung der verschiedenen Prüfansätze entwickelt werden, die eine gute Ausgangslage für weitere Entwicklungen liefern, um die ZfP von Buckelschweißverbindungen in naher Zukunft industriell umzusetzen. Die untersuchten Prüfmethode und Systeme liefern für die meisten Verbindungskombinationen eine Anbindungsfläche, bzw. Bewertungskenngrößen, die mit den Ergebnissen der ZP korrelieren. Für die pMFT wurden neue Bewertungsalgorithmen entwickelt, die sich von den bisherigen und für Punktschweißverbindungen entwickelten unterscheiden. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf die Methoden für Punktschweißverbindungen zurückgekoppelt werden, was wiederum einen Fortschritt in diesem Bereich darstellt. Für die ZP konnte durch den analytischen Ansatz für die Versuchskombinationen das Nennspannungskonzept zur Korrelation zwischen Kopfzugkraft und Anbindungsfläche angewendet werden, wobei hierfür eine neue Matrizengeometrie für die ZP durch den quasistatischen Kopfzug entwickelt wurde.

In den umfangreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die magnetischen Eigenschaften des Schweißgefüges im Vergleich zum Walzgefüge der Grundwerkstoffe variieren und die pMFT somit beeinflussen. Mit dem Vergleich von FEM-Simulationen mit Messungen der pMFT konnte das Verständnis über die physikalischen Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge weiter vertieft werden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens erfüllen die Zielsetzungen.

8 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungseinrichtung, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes mit 23.94 PM in Vollzeit. Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial und die zur Verfügung gestellten Messsysteme verwendet.

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

9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

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

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

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

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

10.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Anhand der Forschungsergebnisse dieses Vorhabens konnte erstmalig gezeigt werden, dass eine ZfP von Buckelschweißverbindungen möglich ist. Drei physikalisch unterschiedlich funktionierende ZfP-Systeme wurden dazu untersucht. Zusätzlich wurde ein analytischer Ansatz auf Basis des Nachsetzwegs zur Qualitätsbeurteilung hergeleitet und bewertet. Durch umfangreiche FEM-Simulationen konnte das physikalische Verständnis über die pMFT deutlich vertieft werden, was zu weiteren Entwicklungen der Prüfmethode führt.

Die Ergebnisse des Projektes, die Niederschlag im DVS-Regelwerk finden, können von Anwendern, Dienstleistern und Herstellern von Prüftechnik, direkt genutzt werden. Anwender und Dienstleister verfügen so über ZfP-Methoden und könnten die kostenintensive ZP einschränken. Hersteller von Prüftechnik finden in den Buckelschweißverbindungen ein neues Anwendungsfeld für ihre Prüfsysteme.

Voraussetzung ist eine anerkannte Interpretation der Prüfergebnisse (Anbindungsfläche), da bei Schweißelementen wie Muttern und Bolzen oft eine Kopfzugkraft vorgegeben wird. Weiter ist anzumerken, dass es keine einheitlichen Vorgaben für die Kopfzugkraft gibt (siehe Stand der Technik). Es wurden diesbezüglich innovative Vorschläge gemacht, die die analytische Betrachtung auf Basis des Nachsetzwegs berücksichtigen. Weiter wurde eine neue Matrizengeometrie für die zerstörende Prüfung vorgeschlagen. Es ist geplant, diesen Vorschlag zeitnah der AG V3.2 sowie AG V3.5 des Ausschusses für Technik des DVS e.V. zu präsentieren. Dies kommt dem Bedarf nach, einheitliche Regelungen zu schaffen, der Anbindungsfläche gerecht werden.

Das Prüfen von Buckelschweißverbindungen mit Ultraschall wird bisher nicht praktiziert. Die Eignung der aktuell verfügbaren Technik konnte im Vorhaben nachgewiesen werden. Es besteht somit die Möglichkeit für die Systemanbieter, die Ultraschallprüfung unmittelbar und mit leichten Änderungen (z. B. angepasster Prüfkopf) für Buckelschweißverbindungen einzusetzen. So kann Prüftechnik für die ZfP von Buckelschweißverbindungen genutzt werden, die bekannt oder bereits vorhanden ist und die sich bei Widerstandspunktschweißverbindungen seit langer Zeit bewährt hat.

Die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte ist prinzipiell für Einzellösungen umsetzbar, z. B. als integrierte Prüfung in einer automatisierten Fertigung. Innovative Bewertungsmöglichkeiten liefern Ergebnisse, mit denen auf die Schweißqualität geschlossen werden kann. Eine kommerzielle Verwertung der Ergebnisse durch

Prüfgerätehersteller wird angestrebt. Das angestrebte Prüfsystem soll sowohl automatisiert als auch manuell anzuwenden sein.

10.2 Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit

Das Widerstandsbuckelschweißen ist ein hochproduktives und einfach anzuwendendes Fügeverfahren, das sehr häufig von KMU eingesetzt wird. Vorteile bietet es vor allem bei großen Stückzahlen. Ein Trend großer Unternehmen ist die Abgabe von Fertigungsaufgaben an externe, meist mittelständische, Zulieferer. In [65] wird berichtet, dass in der Automobilindustrie der Wertschöpfungsanteil der Zulieferer im Zeitraum von 2002 bis 2015 um 40% von 417 Mrd. Euro auf 700 Mrd. Euro gestiegen ist. Im Jahr 2018 wurden in Deutschland allein 5,1 Millionen PKW, ohne Nutzfahrzeuge, hergestellt, [66]. In einer Autokarosserie werden ca. 500 Muttern und Gewindebolzen verschweißt. Dies verdeutlicht den großen Umfang des Buckelschweißens allein in der Automobilindustrie.

An die Zulieferer werden sehr hohe Qualitätsanforderungen gestellt. Dies steht im Kontrast zum sehr stark preisgetriebenen Umfeld, wodurch besonders KMU einem starken Konkurrenzdruck unterliegen [67]. Um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten, müssen besonders KMU sehr wirtschaftlich arbeiten. Im Bereich des Widerstandsbuckelschweißens stehen dem die hohen Kosten für die Bauteilprüfung entgegen. Aktuell werden fast in jeder Fertigung Bauteile stichprobenartig entnommen und zerstörend geprüft. Das ist ökonomisch und ökologisch nicht sinnvoll und nicht nachhaltig.

Inzwischen haben sich Konkurrenzverfahren wie das Laserstrahlschweißen etabliert. Grund dafür ist nicht zuletzt die Möglichkeit der ZfP der Bauteile (sichtbare Naht). Für mittelständische Unternehmen ist die Anwendung des Lasers vor allem wegen der höheren Investitionskosten (Laserstrahlquelle, Spannvorrichtungen) und der hohen Anforderungen an die Arbeitssicherheit eine große Herausforderung.

Besonders KMU können durch die Möglichkeit der ZfP von Buckelschweißverbindungen direkt profitieren, indem sie das effiziente Widerstandsbuckelschweißen einsetzen können, Einsparungen durch weniger zerstörende Prüfungen erzielen und nicht prüfbare Gutteile nicht verschrotten müssen. Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die rechtliche Absicherung, die sich durch den Einsatz objektiver, dokumentationsfähiger ZfP-Methoden ergibt, um eventuellen Rechtsansprüchen entgegenzuwirken. Dies erfordert den Aufbau eines Qualitätssicherungssystems, das den Einsatz anerkannter ZfP-Methoden beinhaltet. Dies stellt nicht nur für die Fertigungsbetriebe, sondern auch für die Prüfgerätehersteller und die Prüfdienstleister (meist KMU) ein Potential zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit dar. Voraussetzung sind innovative Prüfmethode, die sichere, objektive und dokumentationsfähige Aussagen zu den Eigenschaften der Schweißverbindungen liefern. Im Fokus der Untersuchungen sollen zwei Erfolg versprechende Prüfmethode stehen: die

bildgebende Ultraschallprüfung und die bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte. Deren Einsatz ist für KMU interessant, weil sie einfach anzuwenden sind, objektive Prüfergebnisse liefern, keine aufwändige Qualifikation des Personals erfordern und die Investition- und Betriebskosten im vertretbaren Rahmen bleiben. Nicht zuletzt profitieren die mittelständischen Hersteller von Buckelschweißanlagen, wenn die Anwendung des Buckelschweißens zunimmt.

11 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

11.1 Fachzeitschriften, Fachtagungen, Kolloquien

- C. Mathiszik, E. Zschetzsche, A. Reinke, J. Koal, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Magnetic Characterization of the Nugget Microstructure at Resistance Spot Welding," *Crystals*, vol. 12, no. 11, p. 1512, 2022, doi: 10.3390/cryst12111512.
- C. Mathiszik, J. Koal, J. Zschetzsche, U. Füssel, and H. C. Schmale, "Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen," in *25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen*, Duisburg, 2023.
- C. Mathiszik, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Reliable detection of stick welds at resistance spot welding," *RejNDT*, vol. 1, no. 1, 2023, doi: 10.58286/28127.
- C. Mathiszik, J. Koal, J. Zschetzsche, U. Füssel, and H. C. Schmale, "Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen," in *DVS Congress 2023: DVS-Berichte Band 389*, DVS e.V., Ed., Düsseldorf: DVS Media, 2023.

11.2 Studien- und Abschlussarbeiten

- N. Kagel, "Automatisierte Bruchflächencharakterisierung von Buckelschweißverbindungen," Diplomarbeit, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2021.
- K. Erpel, "Untersuchungen zur Anwendung des Nennspannungskonzept beim Zugversuch von Buckelschweißverbindungen," Forschungspraktikum, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2022.
- K. Erpel, "Entwicklung einer Methode zur Validierung der Verbindungsqualität von Punktschweißverbindungen," Diplomarbeit, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2023.
- E. Schlenstedt, "Entwicklung einer Methode zur Validierung der Verbindungsqualität von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen," Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage; Hochschule für Technik und Wirtschaft - HTW Dresden, Dresden, 2023.
- J. Liang, "Bewertung der passiven magnetischen Flussdichteprüfung durch maschinelles Lernen beim Widerstandspunktschweißen," Diplomarbeit, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2023.

12 Transfermaßnahmen

12.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 19: Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
A: Informationen an die Unternehmen des PA	Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU), Einflussnahme auf den Forschungsverlauf durch Industrie	PA: 19.01.2021 PA: 14.10.2021 PA: 28.04.2022 PA: 11.10.2022 PA: 26.04.2023
B: Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während und nach der Projektlaufzeit
C: 5 Zwischenpräsentationen auf den Sitzungen des FA 4 jeweils halbjährlich ab 05/2021	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	27.05.2021 18.11.2021 10.05.2022 17.11.2022 06.06.2023
AG V 3.9 im Ausschuss für Technik des DVS	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	12.05.2021 28.04.2022 11.10.2022 26.04.2023
D: Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungseinrichtung oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Ergebnissen	15.12.2021: Informationsaustausch mit Harms & Wende GmbH & Co. KG, Hamburg; 22.10.2022: Informationsaustausch mit Vogt Ultrasonics GmbH, Burgwedel; 23.10.2023: Informationsaustausch mit Volkswagen AG, Wolfsburg 8.12.2022: Informationsaustausch mit Harms & Wende GmbH & Co. KG, Hamburg; 30.01.2023: Informationsaustausch mit Tessonics Europe GmbH, Frechen; 07.03.2023: Informationsaustausch mit Tessonics Europe GmbH, Frechen;

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
F: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, gewinnen von Multiplikatoren	02.05.2022: Besuch Messe Control;
G: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Siehe Maßnahme D Fortlaufend während der Projektlaufzeit
H: Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften	Information von potenziellen Anwendern, vor allem KMU	MDPI Crystals, Open Access: [51]
L: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-/Diplom- bzw. Bachelor-/Masterarbeiten	Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium an der TU Dresden, Beitrag bei der jährlichen SFI Ausbildung in Dresden)	Akademische Arbeiten: Kagel, N. Diplomarbeit [68] Erpel, K.: Studien- [48], Diplomarbeit [69] Liang, J.: Diplomarbeit [70] Schlenstedt, E.: Diplomarbeit [47]

12.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Tabelle 20: Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
B: Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend
F: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, gewinnen von Multiplikatoren	Sondertagung Widerstandsschweißen 2023: Vortrag und Manuskript [72] ; DVS Congress 2023: Vortrag und Manuskript [71]; ECNDT 2023: Vortrag und Manuskript [64] IIW Annual Assembly 2023;
G: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend auf Anfrage
H: Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften	Information von potenziellen Anwendern, vor allem KMU	Schweißen und Schneiden 1. Quartal 2024
I: Vorstellung der Ergebnisse auf Weiterbildungsveranstaltungen der DVS-Bezirksverbände (Magdeburg und Dresden)	Ergebnistransfer an die persönlichen und industriellen (KMU) Mitglieder des DVS, bereits schon im Arbeitskreis	Fortlaufend auf Anfrage

Maßnahme	Ziel	Zeitraum und Rahmen
J: Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes und Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	4. Quartal 2023
K: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	2024
L: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-/Diplom- bzw. Bachelor-/Masterarbeiten	Ausbildung und Information von zukünftigen Ingenieuren und Anwendern (z.B. Maschinenbaustudium an der TU Dresden, Beitrag bei der jährlichen SFI Ausbildung in Dresden)	Für die Lehre und Weiterbildung ab 10/2023

12.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

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

Eine weite Verbreitung der Forschungsergebnisse an KMU ist über die schon getätigten bzw. noch beabsichtigten Konferenzvorträge, Fachbeiträge in Zeitschriften und Tagungsbände sowie die Einbindung in die akademische Ausbildung an den Universitäten gegeben. Die Firmen des projektbegleitenden Ausschusses (sowohl KMU als auch Großunternehmen) und auch weitere Firmen haben durch die Veröffentlichungen Zugriff auf die Forschungsergebnisse. Auch die Online-Veröffentlichungen auf den Internetseiten der Forschungseinrichtungen lassen erwarten, dass sich weitere KMU bei den Forschungseinrichtungen melden, um Forschungsergebnisse abzurufen und in die Praxis zu überführen. Eine Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter/Technische Regelwerke/Normen durch Zuarbeit bei der Überarbeitung von DVS-Merkblättern ist geplant. Die bereits durchgeführten Transfermaßnahmen in Tabelle 19 zeigen insbesondere bei der Maßnahme D, dass großes Interesse an den Ergebnissen zur ZfP von Widerstandsschweißverbindungen besteht und zukünftige Weiterentwicklungen der Prüfmethode das Potential besitzen, diese im industriellen Umfeld zur ZfP von Buckelschweißverbindungen zu etablieren.

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

13 Literaturverzeichnis

- [1] *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen Zerstörungsfreie Prüfung*, DVS 2916-5, 2017.
- [2] Beuth, *Perinorm, Management-Software für nationale, europäische und internationale Normen sowie technische Regelwerke*. [Online]. Available: <https://perinorm.com/> (accessed: Jul. 24 2019).
- [3] *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlblechen bis 3 mm mit metallischen Überzügen - Teil 2: Verzinktes Stahlfeinblech (ZE und Z)*, DVS 2920-2, 2017.
- [4] *Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik*, DVS 2911, 2016.
- [5] *Prüfung von Schweißmuttern und -schrauben*, MBN 10346, 2015.
- [6] *Schweißverbindungen mit Schweißelementen aus Stahl - Festigkeitsprüfung und Beurteilung der Widerstandsbuckel- und Lichtbogenschweißverbindungen mit Schrauben, Bolzen und Muttern*, VW 60560, 2015.
- [7] *Prüfung von Verbindungseigenschaften. Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen*, DVS 3840-1, 2007.
- [8] WTI-Frankfurt-digital GmbH, *TEMA® Technik und Management*. [Online]. Available: <https://www.wti-frankfurt.de/> (accessed: Jul. 24 2019).
- [9] *Google Scholar*. [Online]. Available: <https://scholar.google.de/> (accessed: Jul. 24 2019).
- [10] *Clarivate Analytics: Scientific and Academic Research*. [Online]. Available: <https://clarivate.com/> (accessed: Jul. 24 2019).
- [11] *EBSCO Academic Libraries*. [Online]. Available: <https://www.ebsco.com/products/research-databases/academic-search-complete> (accessed: Jul. 24 2019).
- [12] J. Erlewein, "Stand der Ultraschallprüfung an Punktschweißverbindungen: Vortrag," Dresden, Dec. 18 2014.
- [13] L. Bösch, C. Gruber, and J. Neges, "Vergleichsuntersuchungen mittels Ultraschallprüfung, Materialographie und mechanisch-technologischer Prüfverfahren an Widerstandspunktschweißungen unterschiedlicher Verbindungsqualität," in *DACH-Jahrestagung 2008*.
- [14] P. Buschke and J. Wagner, "Schweißpunktprüfung in der Produktion an schwer zugänglichen oder kritischen Punkten in der Produktionslinie," in *DGZfP-Jahrestagung 2009*.
- [15] R. Kaminski, "Die Ultraschallprüfung von Punktschweißverbindungen an beschichteten Stahlfeinblechen und Optimierung der Schweißparameter," Hürth, 1999.
- [16] W. Roye, "Ultraschallprüfung von Schweißpunkten im Automobilbau," SD 198, 1999.
- [17] L. Bösch, H. Pasic, J. Neges, and M. Linkenbach, "Ultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen an hochfesten Stahlverbindungen im Karosseriebau," in

- DACH-Jahrestagung 2004*. [Online]. Available: <https://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/v29/v29.htm>
- [18] OLYMPUS CORPORATION, *Einführung in die Gruppenstrahlertechnik*. [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/phased-array/> (accessed: Feb. 4 2019).
- [19] G. Vogt, J. Mußmann, B. Vogt, and W.-K. Stiller, "Imaging spot weld inspection using Phased Array technology – new features and correlation to destructive testing," in *12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018: 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Sweden, 2018 : proceedings*, 2018.
- [20] J. K. Na and S. T. Gleeson, "Portable matrix phased array spot weld inspection system," US 2014/0165730 A1, USA 14/183,643, Jun 19, 2014.
- [21] J. K. Na, "Nondestructive inspection of resistance spot welds using matrix phased array ultrasonic technology," in *Advanced Materials & Processes*, pp. 22–24.
- [22] R. Augner, K. Loth, K. Harsch, H. Krauter, and G. Maier, "Schweißverbindungsprüfung im Automobilbau - Entwicklung, Erprobung und Serienanwendung eines mobilen Ultraschallminiscanners," in *DACH-Jahrestagung 2008*.
- [23] U. Füssel, C. Mathiszik, and J. Zschetzsche, "Zerstörungsfreie Charakterisierung der Anbindungsfläche beim Widerstandspressschweißen durch bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte: Schlussbericht IGF 19.208 B," Technische Universität Dresden, Professur Füge-technik und Montage, Dresden, 2019. [Online]. Available: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/if/fue/ressourcen/dateien/ag_thermisches_fuegen/Schlussbericht_IGF_19208.pdf?lang=de
- [24] T. Reinhardt, C. Mathiszik, J. Vinz, E. Streller, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Erarbeitung eines Algorithmus zur automatisierten Auswertung der Messergebnisse der bildgebenden Analyse der Remanenzflussdichte," in *DVS-Berichte*, Band 344, *DVS Congress 2018: Große Schweißtechnische Tagung, DVS-Studentenkongress, Vorträge der Veranstaltungen in Friedrichshafen am 17. und 18. September 2018*, Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2018.
- [25] C. Mathiszik, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Automated non-destructive evaluation of spot welds using the imaging analyses of the residual magnetic flux density," in *ASNT Research Symposium 2019*, Orange County, Garden Grove, USA, CA, 2019.
- [26] U. Füssel, C. Mathiszik, J. Zschetzsche, C. Großmann, and M. Heide, *Zerstörungsfreie Bewertung des Linsendurchmessers beim Widerstandspunktschweißen mit magnetischen Prüfverfahren: Schlussbericht IGF-Nr. 17.539 BR/DVS-Nr. 04.058*: Technische Universität Dresden, Professur für Füge-technik und Montage, 2015.
- [27] J. Chen and Z. Feng, "IR-based spot weld NDT in automotive applications," in *SPIE Sensing Technology + Applications*, Baltimore, Maryland, United States, 2015, p. 948513.

- [28] J. Schlichting, S. Brauser, L. A. Pepke, C. Maierhofer, M. Rethmeier, and M. Kreuzbruck, "Thermographic testing of spot welds," *NDT&E International*, vol. 48, no. 1, pp. 23–29, 2012.
- [29] B. Zubert, F. Hönl, C. Gühmann, and M. Rethmeier, "Information capacity of the spot weld emissivity," *Materials Testing*, vol. 56, no. 2, pp. 96–103, 2014.
- [30] *Widerstandsschweißen – Prüfung von Schweißverbindungen – Schäl- und Meißelprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen*, DIN EN ISO 10447, 2015.
- [31] Forschungskuratorium Maschinenbau, *FKM -Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*, 6th ed. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH, 2012.
- [32] *Vierkant-Schweißmuttern*, DIN 928:2013-05, 2013.
- [33] *Sechskant-Schweißmuttern*, DIN 929:2013-05, 2013.
- [34] Hyunwoo S., *Scherschneiden von Mangan-Bor-Stählen unter Temperatureinfluss*. Dissertation. München, 2015.
- [35] T. Krenke, M. Acet, E. F. Wassermann, X. Moya, L. Mañosa, and A. Planes, "Martensitic transitions and the nature of ferromagnetism in the austenitic and martensitic states of Ni–Mn–Sn alloys," *Phys. Rev. B*, vol. 72, no. 1, p. 47, 2005, doi: 10.1103/PhysRevB.72.014412.
- [36] C. D. Jiles, "Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 21, pp. 1186–1195, 1988.
- [37] *Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpresstählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für nicht für eine Wärmebehandlung nach der Kaltverarbeitung vorgesehene Stähle*, DIN EN 10263-2, 2018.
- [38] voestalpine Stahl GmbH, "chemische Analyse und mechanische Kennwerte der gelieferten Versuchswerkstoffe für IGF 19.208," 2017.
- [39] *Stähle zum Warmumformen – unbeschichtet oder vorbeschichtet (Werkstoffanforderungen an Halbzeuge und Bauteile)*, VW 50066, 2020.
- [40] *Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*, DIN EN 10088-3, 2014.
- [41] *Widerstandsschweißen - Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln - Buckel zum Widerstandsschweißen*, DIN EN ISO 8167, 2021.
- [42] *Buckel für das Buckelschweißen von Stahlblechen - Langbuckel und Ringbuckel*, DIN 8519, 1996.
- [43] J. Dietrich, *Praxis der Umformtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

- [44] M.-M. Ketznel, M. Hertel, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Heat development of the contact area during capacitor discharge welding," *Weld World*, vol. 63, no. 5, pp. 1195–1203, 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00744-x.
- [45] S. Jüttner, *Entwicklungen und Untersuchungen von Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit hoher Wärmestromdichte: Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 19878 BR*. Magdeburg: Universitätsbibliothek, 2020.
- [46] Magcam NV, "Magcam Brochure: advanced magnet inspection," 2017.
- [47] E. Schlenstedt, "Entwicklung einer Methode zur Validierung der Verbindungsqualität von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen," Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage; Hochschule für Technik und Wirtschaft - HTW Dresden, Dresden, 2023.
- [48] K. Erpel, "Untersuchungen zur Anwendung des Nennspannungskonzept beim Zugversuch von Buckelschweißverbindungen," Forschungspraktikum, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2022.
- [49] BMW AG, "Rundschweißmutter, technische Zeichnung," 2009.
- [50] BMW AG, "ZB Massebolzen M8," 2014.
- [51] C. Mathiszik, E. Zschetzsche, A. Reinke, J. Koal, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Magnetic Characterization of the Nugget Microstructure at Resistance Spot Welding," *Crystals*, vol. 12, no. 11, p. 1512, 2022, doi: 10.3390/cryst12111512.
- [52] J. Koal, J. Zschetzsche, U. Füssel, and H. C. Schmale, "Was ist Kurzzeitschweißen?," in *25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen*, Duisburg, 2023.
- [53] C. Mathiszik, T. Reinhardt, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "NDT of austenitic steels - Evaluation of spot weld nugget diameters by imaging analyses of the residual flux density," in *12th ECNDT, Gothenburg, Sweden, 2018: 12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Sweden, 2018 : proceedings*, 2018. [Online]. Available: <https://www.ndt.net/article/ecndt2018/papers/ecndt-0478-2018.pdf>
- [54] M.-M. Ketznel, Jörg Zschetzsche, M. Hertel, and U. Füssel, "Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden: Schlussbericht IGF 18.987 BR," Institut für Fertigungstechnik, Professur Fügetechnik und Montage, TU Dresden, Dresden 18.987 BR, May. 2018. Accessed: Sep. 27 2018. [Online]. Available: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/if/fue/ressourcen/dateien/ag_thermisches_fuegen/veroeffentlichungen/Schlussbericht_IGF-18-987BR.pdf?lang=de
- [55] M.-M. Ketznel, N. Stocks, M. Hertel, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim KE-Schweißen," in *DVS Congress 2017: Große*

Schweißtechnische Tagung : DVS-Studentenkongress : Vorträge der Veranstaltungen in Düsseldorf vom 26. bis 29. September 2017, 2017, pp. 126–131.

- [56] J. M. Camacho and V. Sosa, "Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry," *Revista mexicana de física E*, vol. 59, no. 1, pp. 8–17, 2013. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35422013000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- [57] L. Arbenz, O. Chadebec, C. Espanet, Y. Rtimi, and G. Cauffet, "Characterization of Permanent Magnet Magnetization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2692391.
- [58] A. Kost, T. Honma, and H. Igarashi, "Inverse inference of magnetization distribution in cylindrical permanent magnets," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 1168–1171, 2000, doi: 10.1109/20.877648.
- [59] N.N., "Flussdichte eines Magneten im Abstand x: Application Note PE007 1.5," Berlin, 2018.
- [60] *Widerstandsschweißen - Punktschweiß-Elektrodenkappen*, DIN EN ISO 5821, 2010.
- [61] R. M. Duffy and R. P. Netterfield, "Design of Faraday rotators and modulators," *Review of Scientific Instruments*, vol. 55, no. 5, pp. 743–746, 1984, doi: 10.1063/1.1137809.
- [62] M. Basharat *et al.*, "Design and Analysis of Multilayer Solenoid Coil for Faraday Modulator," *MATEC Web Conf.*, vol. 114, p. 4004, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201711404004.
- [63] Z. Han, J. Orozco, J. E. Indacochea, and C. H. Chen, "Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study: Real and simulated welds were used to develop a model for predicting temperature distribution," *Welding journal*, vol. 1989, no. 68, 363s–371s, 1989.
- [64] C. Mathiszik, J. Zschetzsche, and U. Füssel, "Reliable detection of stick welds at resistance spot welding," *ReJNDT*, vol. 1, no. 1, 2023, doi: 10.58286/28127.
- [65] Mercer-Management-Consulting, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik (IPA), and Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), *Future Automotive Industry Structure (FAST) 2015 - die neue Arbeitsteilung in der Automobilindustrie*. Frankfurt am Main, 2004.
- [66] Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), *Automobilproduktion: Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland*. [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html> (accessed: Jul. 4 2019).
- [67] Industrie- und Handelskammer Arnsberg Hellweg-Sauerland, *Herstellermacht setzt Preisen zu*. [Online]. Available: <http://www.automotive-sw.de/webseite.asp?ID=130> (accessed: Jul. 15 2019).
- [68] N. Kagel, "Automatisierte Bruchflächencharakterisierung von Buckelschweißverbindungen," Diplomarbeit, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2021.

- [69] K. Erpel, "Entwicklung einer Methode zur Validierung der Verbindungsqualität von Punktschweißverbindungen," Diplomarbeit, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2023.
- [70] J. Liang, "Bewertung der passiven magnetischen Flusssdichtepprüfung durch maschinelles Lernen beim Widerstandspunktschweißen," Diplomarbeit, Institut für Fertigungstechnik, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2023.
- [71] C. Mathiszik, J. Koal, J. Zschetzsche, U. Füssel, and H. C. Schmale, "Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen," in *DVS Congress 2023: DVS-Berichte Band 389*, DVS e.V., Ed., Düsseldorf: DVS Media, 2023.
- [72] C. Mathiszik, J. Koal, J. Zschetzsche, U. Füssel, and H. C. Schmale, "Zerstörungsfreie Prüfung von Buckelschweißverbindungen an Blechstrukturen," in *25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen*, Duisburg, 2023.

14 Anhang

Anhang A Technische Zeichnungen der Prägevorrichtung

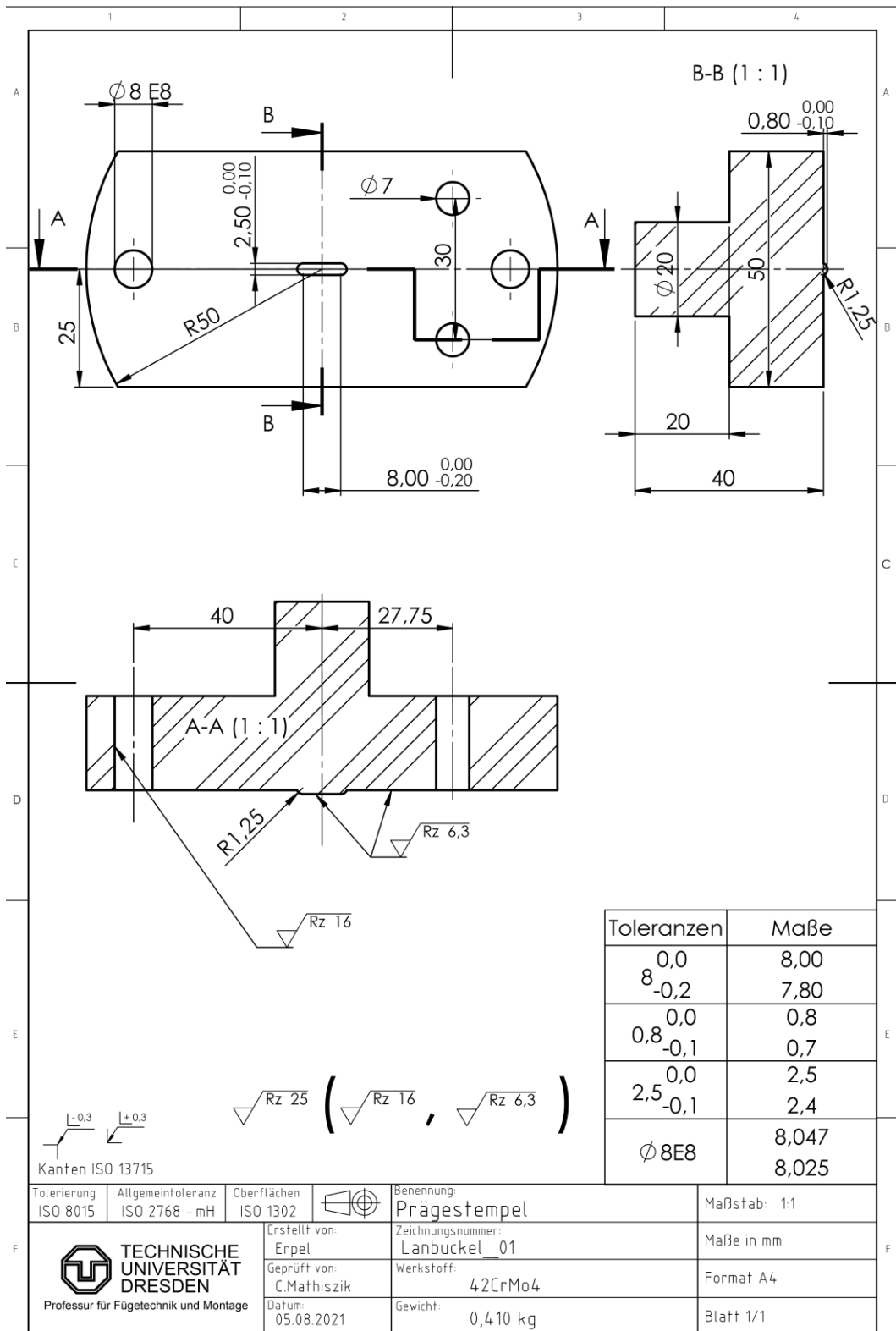


Abbildung 67: Technische Zeichnung des Stempelwerkzeugs der Prägevorrichtung

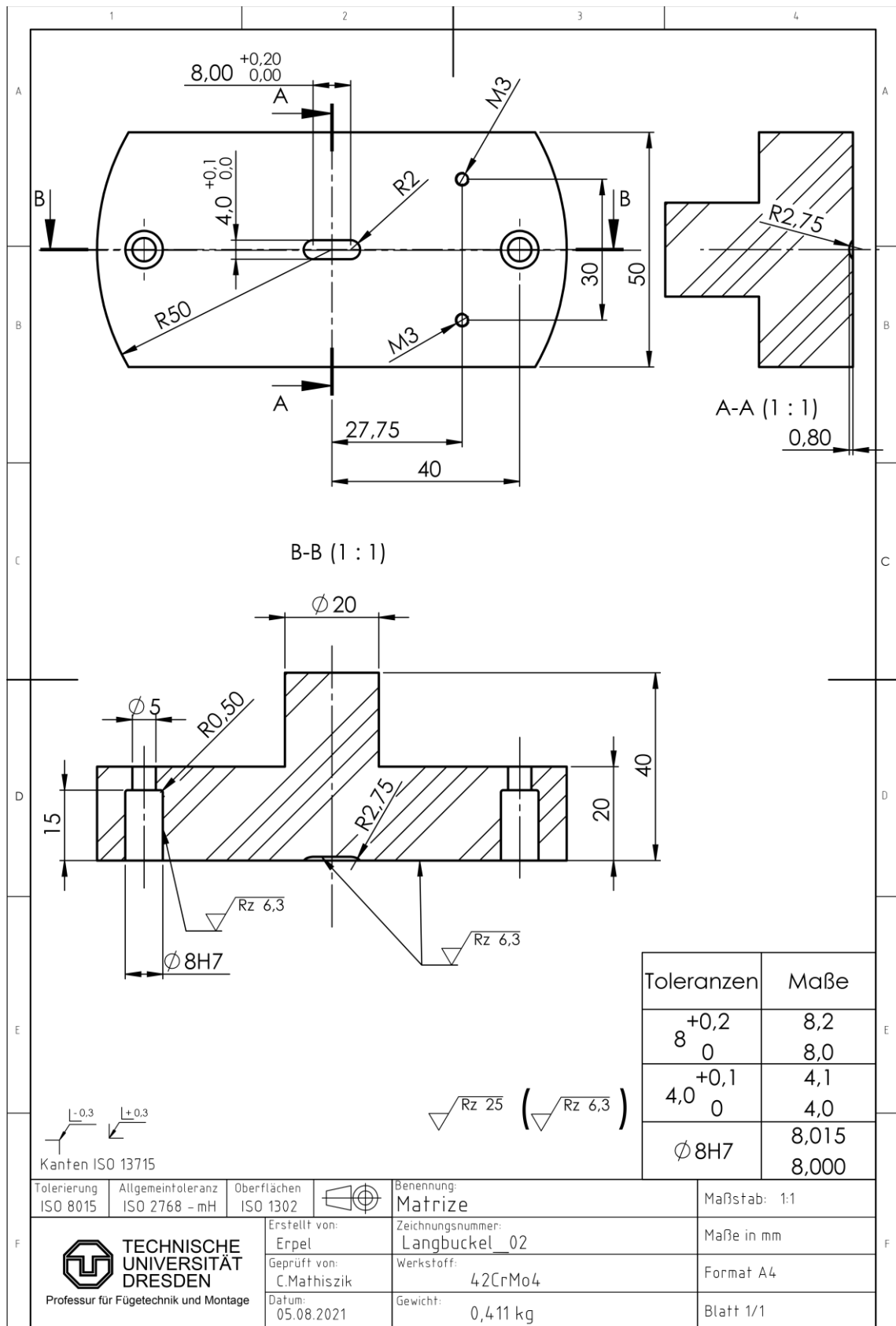


Abbildung 68: Technische Zeichnung des Matrizenwerkzeugs der Prägevorrichtung

Anhang B Messergebnisse Nachsetzweg

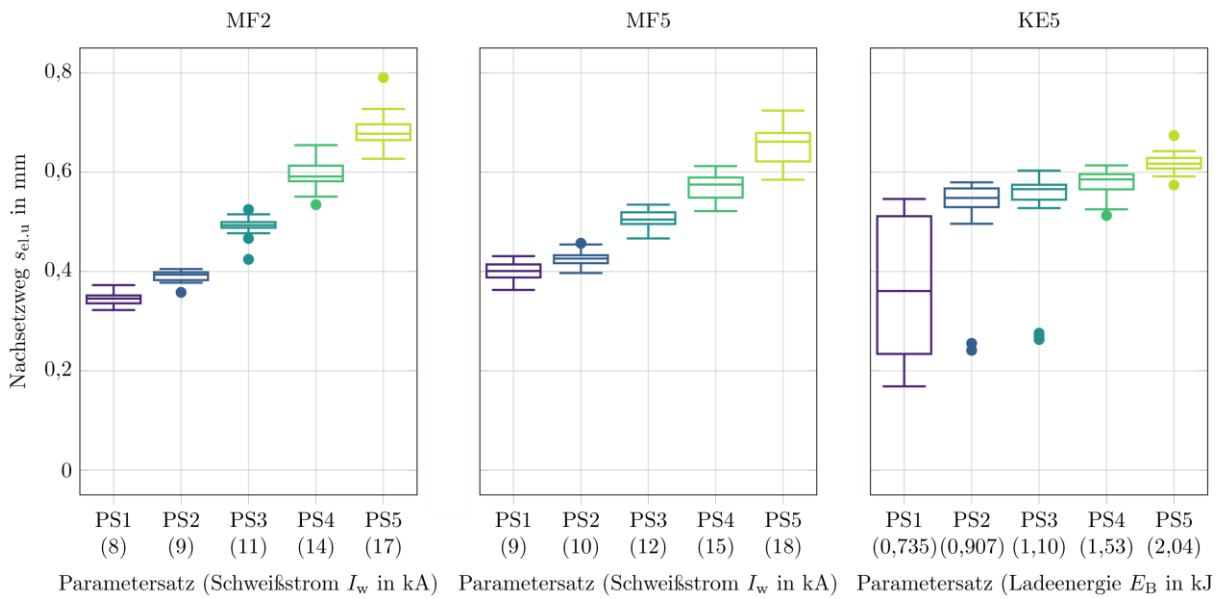


Abbildung 69: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $s_{el,u}$ für die Versuchsreihen MF2, MF5 und KE5 mit M6-Vierkantmuttern nach DIN 928-M6-ST

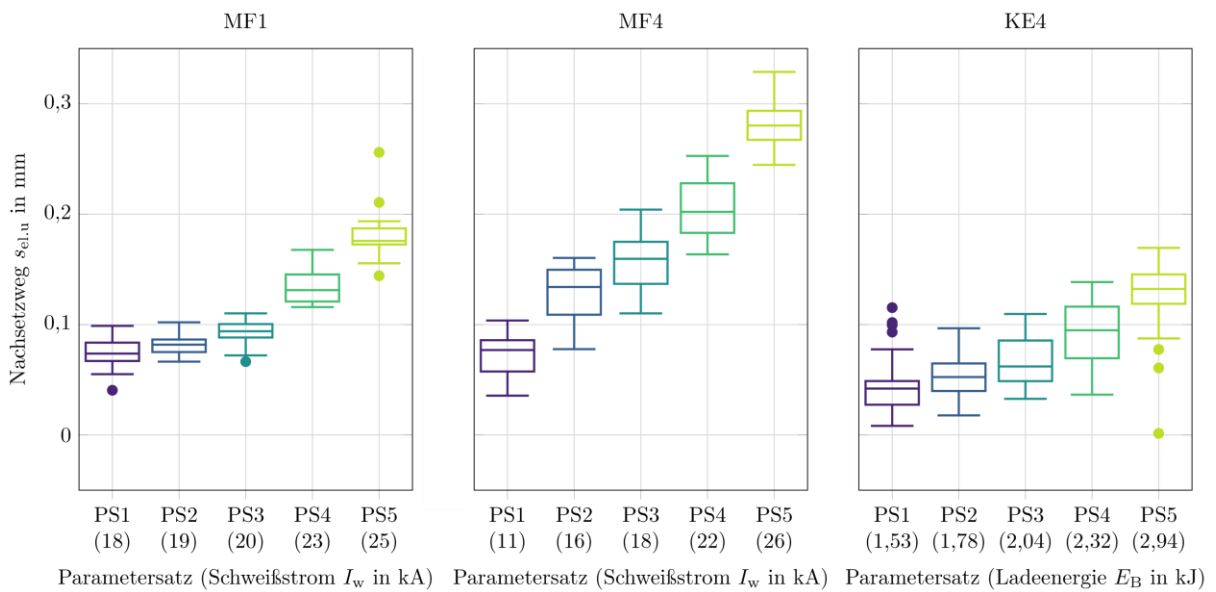


Abbildung 70: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $s_{el,u}$ für die Versuchsreihen MF1, MF4 und KE4 mit M6-Ringbuckelmuttern

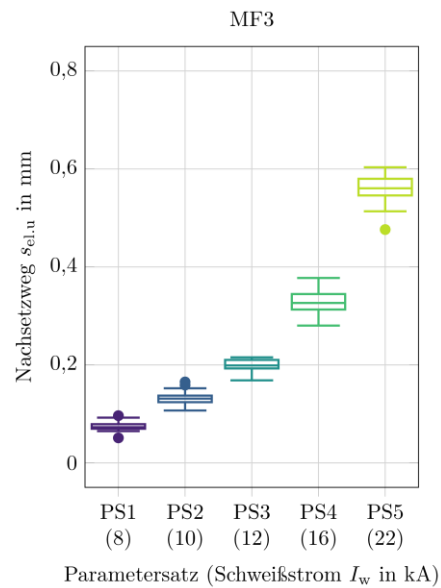


Abbildung 71: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $s_{el,u}$ für die Versuchsreihe MF3, mit M8-Massebolzen

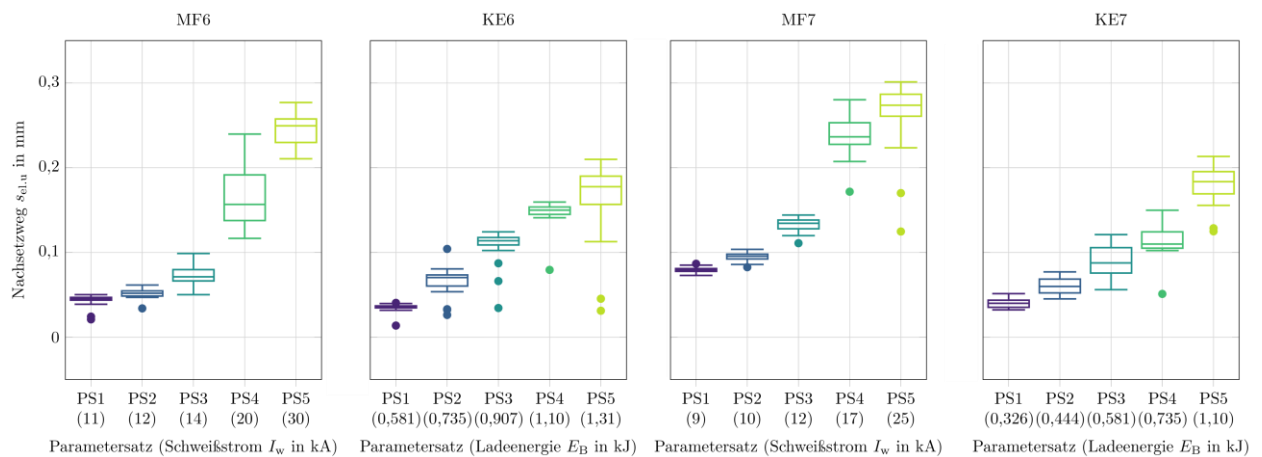


Abbildung 72: Statistische Auswertung der gemessenen Nachsetzwege $s_{el,u}$ für die Versuchsreihen MF6, KE6, MF7 und KE7 mit geprägtem Langbuckel