

Schlussbericht vom 30.09.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 22056 BR

Thema

Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung

Berichtszeitraum

01.10.2021 bis 31.03.2024

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

Schlussbericht

Titel: Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch
Kondensatorentladung

IGF-Nr.: 22056 BR

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

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel
Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale

Projektbearbeiter: Dr.-Ing. Johannes Koal

weitere Autoren: Dr.-Ing. Jörg Zschetzsche
Dipl.-Ing. Martin Baumgarten

Version: 11. März 2025

Förderhinweis

Das IGF Vorhaben Nr. 22 056 BR / DVS Nr. 04.3496 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 Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben „Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung“ (IGF-Nr. 22 056 BR / DVS-Nr. 04.3496) verfolgte das Ziel, den Einfluss der einsatzgehärteten Schicht auf die Fügeverbindung zu bewerten und zu optimieren.

In Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurden 17 unterschiedliche Materialkombinationen untersucht. Neben den Materialvariationen (16MnCr5, S355MC, DC01, 18CrNiMo6) wurde auch untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Einhärtetiefen (0,15 mm, 0,3 mm und 0,8 mm) haben. Um die Ergebnisse statistisch abzusichern, wurde eine statistische Versuchsplanung (DOE) durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 1000 Schweißversuche durchgeführt und ausgewertet. Zusätzlich wurde eine Prozesssimulation entwickelt, um den verdeckt ablaufenden Buckelschweißprozess orts- und zeitaufgelöst zu analysieren. Dazu wurde erstmals eine einsatzgehärtete Schicht simulativ berücksichtigt. Aufgrund der starken temperaturabhängigen Netzverzerrung muss eine Neuvernetzung innerhalb des iterativen Simulationsablaufs erfolgen. Erst dadurch ist die Anwendung des Simulationsmodells möglich.

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens sind Empfehlungen für die Prozessführung und die Einhärtetiefe. Besonders durch die Anwendung des Simulationsmodells konnte das Prozessverständnis erweitert werden, da auch die einsatzgehärtete Schicht durch die Oberflächenaktivierung entfernt wird. Die Untersuchungen wurden mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen begleitet. Abschließend wurden Zugversuche mit zyklischer Beanspruchung durchgeführt und Wöhlerlinien in Abhängigkeit von der Einhärtetiefe ermittelt. Dabei konnte statistisch nicht sicher festgestellt werden, ob signifikante Unterschiede in der Beanspruchbarkeit der Fügeverbindungen eine Abhängigkeit von der Einhärtetiefe vorhanden ist.

Die Ergebnisse werden im Rahmen der Mitarbeit in der AGV3.5 des DVS diskutiert und werden in das Merkblatt DVS 2911 eingearbeitet.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 22 056 BR / DVS Nr. 04.3496) 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 und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei gedankt.

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

Vorname, Name	Art der Forschungsarbeit
Cedric Nikolov	Forschungspraktikum
Hendrik Jakubowski	Forschungspraktikum
Hendrik Jakubowski	Diplomarbeit
Tim Hertzschuch	Diplomarbeit
Tobias Roschke	Forschungspraktikum
Richard Schuffenhauer	Forschungspraktikum

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

Unser Dank gilt besonders:

Vorname, Name	Firma
Klaus-Dieter Czekalla (Projektpate)	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
Daniel de Boer	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
Dr. Hans-Jürgen Rusch	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
Axel Schneider	Kapkon GmbH
Fabian Demmer	Kapkon GmbH
Bernd Rödder	NIMAK GmbH
Stephan Löcherbach	NIMAK GmbH

Sören Pehle	Fraunhofer IWU
Franz Wetzl	Robert Bosch GmbH
René Dittrich	IfU Diagnostic Systems GmbH
Harms & Wende GmbH & Co. KG	Harms & Wende GmbH & Co. KG
Alexander Hornung	Stäubli Electrical Connectors GmbH
Dr. Tobias Broda	Stäubli Electrical Connectors GmbH
Ralf Hinnenkamp	Bock & Klingenberg GmbH
Mathias Wolf	Bock & Klingenberg GmbH
Dr. Nicolas Stocks	VEMAG GmbH
Stephan Kliché	Magcam NV
Thomas Noack	Volkswagen AG

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Danksagung	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
Formelverzeichnis.....	13
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	15
2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU	17
3 Stand der Technik.....	19
3.1 Kondensatorentladungsschweißen	19
3.2 Verfahrenstechnische Grundlagen	20
3.3 Kontaktwiderstände.....	23
3.4 Maschinenteknik des KE-Schweißens	25
3.4.1 Mechanischer Teil der Kondensatorschweißanlage.....	26
3.4.2 Elektrischer Teil der Kondensatorentladungsschweißanlage	29
3.5 Prozessbeschreibung des Schweißablaufs.....	30
3.6 Parameter und Einstellgrößen	32
3.7 Neues Prozessverständnis – Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte (KshW).....	35
3.8 Geometrien für KE-Buckelschweißen	37
3.8.1 Buckelgeometrien für Stahllegierungen	37
3.8.2 Buckelgeometrien für Aluminiumlegierungen.....	40
3.9 Schweißen oberflächenbehandelter Werkstoffe	41

4	Forschungsziel.....	42
5	Lösungsweg.....	43
6	Versuchsvorbereitung.....	45
6.1	Einhärtetiefe und Materialkombinationen	45
6.2	Festlegen der Fügeaufgabe.....	46
6.3	Anlagentechnik	47
6.4	Festlegen der zu messenden Größen.....	48
6.4.1	Strommessung.....	48
6.4.2	Spannungsmessung.....	49
6.4.3	Wegmessung.....	49
6.4.4	Kraftmessung.....	49
6.5	Bewerten der Auspresskraft.....	50
6.6	Bewerten der Spritzerklassen.....	50
7	AP1 – Einfluss der einsetzgehärteten Schicht auf Prozess und Verbindung	52
8	AP2 – Steigerung der Verbindungsqualität durch Wärmebehandlung	59
8.1	Prozessintegrierte Induktionserwärmung.....	59
8.1.1	Methodik.....	59
8.1.2	Ergebnisse	61
8.2	Nachpulsschweißen	62
8.2.1	Methodik.....	62
8.2.2	Ergebnisse	63
8.3	Mehrpulsschweißen.....	64
8.3.1	Methodik.....	64
8.3.2	Ergebnisse	69
8.4	Dynamische Beanspruchung.....	72

9	AP3 - Prozesssimulation einsatzgehärteter Schichten	74
9.1	Modellbildung	74
10	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen	84
11	Verwendung der Zuwendungen	88
12	Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	89
13	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen.....	90
14	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen.....	91
14.1	Fachtagungen, Kolloquien und Berichterstattungen	91
14.2	Veröffentlichungen und Fachbeiträge.....	92
14.3	Studien- und Abschlussarbeiten	93
15	Transfermaßnahmen	94
15.1	Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen	94
15.2	Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende	96
15.3	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	97
16	Literaturverzeichnis.....	99
17	Anhang	104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung der Widerstandsschweißverfahren nach DIN 1910-100 [17]	20
Abbildung 2: Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [2] ...	22
Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrenscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [20], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [23]	23
Abbildung 4: Gestellausführungen von KE-Schweißmaschinen der Firma GLAMATronic [29]	26
Abbildung 5: Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts).....	27
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket	28
Abbildung 7: Prinzipschaltbild einer Kondensatorentladungsschweißanlage [2] .	29
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen [2]	31
Abbildung 9: Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [2]	33
Abbildung 10: Variationen von Schweißbuckeln (DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., 2016).....	38
Abbildung 11: Axialsymmetrische Darstellung einer Fügeaufgabe mit Buckelbauteil, Blech und Buckel- zentrierung und sechs Gestaltungshinweisen	39
Abbildung 12: Übersicht und Detailansicht der technischen Zeichnung des Ringbuckels	43
Abbildung 13: Iterativer Projektablauf.....	44
Abbildung 14: Bearbeitung der Arbeitspakete	44
Abbildung 15: Übersicht und Detailansicht untersuchten Einhärtetiefen.....	45
Abbildung 16: Darstellung der Fügeaufgabe im Querschnitt.....	47
Abbildung 17: Versuchsanlage der Firma KAPKON (KKP 18-MCS /gKE / MF)	48
Abbildung 18: Klassifizierung der Schweißspritzer	51

Abbildung 19: Gegenüberstellung der Schweißbereiche in Abhängigkeit der Einhärtetiefe; Buckelwerkstoff: 16MnCr5, Blechwerkstoff: S355MC	52
Abbildung 20: Querschliff von MDK 1 und MDK 2	53
Abbildung 21: Gegenüberstellung der Schweißbereiche in Abhängigkeit der Einhärtetiefe; Buckelwerkstoff: 18CrNiMo6, Blechwerkstoff: DC01	54
Abbildung 22: Querschliff von MDK 6 und MDK 7	55
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Schweißbereiche in Abhängigkeit der Einhärtetiefe; Buckelwerkstoff: 16MnCr5, Blechwerkstoff: 16MnCr5	57
Abbildung 24: Querschliff von MDK 14 und MDK 11	57
Abbildung 25: Experimenteller Aufbau zur Induktionserwärmung.....	60
Abbildung 26: Härtemessung der Fügezone.....	60
Abbildung 27: Aufhärtung in der Fügezone für Werkstoffkombination 9 und 11	61
Abbildung 28: Aufhärtung in der Fügezone für Werkstoffkombination 14 und 17...	62
Abbildung 29: Prinzip der Nachpulsschweißung nach Petersmann [12].....	63
Abbildung 30: Aufhärtung in der Fügezone in Abhängigkeit des Nachpulses und der Federkonstante c_1 und c_2	64
Abbildung 31: Mehrpulsschweißen; thermisch ungekoppelt und ungedämpft	65
Abbildung 32: Mehrpulsschweißen; thermisch ungekoppelt und gedämpft.....	66
Abbildung 33: Mehrpulsschweißen; thermisch gekoppelt und ungedämpft.....	67
Abbildung 34: Mehrpulsschweißen, thermisch gekoppelt und gedämpft	68
Abbildung 35: Mehrpulsschweißen, thermisch gekoppelt und angepasst	69
Abbildung 36: Auspresskraft und maximale Aufhärtung der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 9 und 11	70
Abbildung 37: Querschliffe der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 9 und 11	70
Abbildung 38: Auspresskraft und maximale Aufhärtung der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 15 und 17.....	71
Abbildung 39: Querschliffe der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 15 und 17	72

Abbildung 40: Nomenklatur	72
Abbildung 41: Zeitfestigkeitsgeraden alles Schweißversuche	73
Abbildung 42: Geometrischer Aufbau des Simulationsmodells	74
Abbildung 43: Verlauf Kohlenstoffanteil in Abhängigkeit des Randabstands	75
Abbildung 44: Ablauf der Schweißprozesssimulation	77
Abbildung 45: Gemessener Verlauf des Schweißstroms (Randbedingung in Simulation)	78
Abbildung 46: Deformation des ungehärteten Buckels während der Aktivierung ...	79
Abbildung 47: Deformation des gehärteten Buckels während der Aktivierung	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einstellgröße und deren Einfluss an KE-Maschinen [2], [12], [38]	34
Tabelle 2: Untersuchte Buckel- und Blechwerkstoffe	45
Tabelle 3: Übersicht aller untersuchten Kombinationen	46
Tabelle 4: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung	85
Tabelle 5: Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens	90

Abkürzungsverzeichnis

IIW	International Institute of Welding
CHD	Einsatzhärtetiefe
ECR	Electrical Contact Resistance (Elektrischer Kontaktwiderstand)
FEM	Finite-Elemente-Methode
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
FTM	Professur für Fügetechnik und Montage
HSC	High Speed Current
DOE	Statistische Versuchsplanung
NE	Nachsetzeinheit
KE	Kondensatorentladung
gKE	Getaktete Kondensatorentladung
PA	Projektbegleitender Ausschuss
KMU	Klein und mittelständische Unternehmen
MF	Mittelfrequenz
KshW	Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZP	Zerstörende Prüfung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
i.O.	In Ordnung
n.i.O.	Nicht in Ordnung

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$\rho_{1,2}$	Spezifischer Widerstand	$\Omega \cdot m$
σ_s	Streckgrenze des weicheren Werkstoffs	$N \cdot m^{-2}$
σ_{cont}	Kontaktdruck	$N \cdot m^{-2}$
ρ_{film}	Spezifischer Filmwiderstand	$\Omega \cdot m$
C	Kapazität	mF
E_L	Ladeenergie	Ws, kWs, kJ
ECR	Spezifischer Kontaktwiderstand	$\Omega \cdot m$
F_E	Elektrodenkraft	kN
I	Strom (allgemein)	A
I_{eff}	Effektivstrom	kA
I_p	Spitzenstrom	kA
Q	Wärme (allgemein)	J
R	Widerstand (allgemein)	Ω
R_{ges}	Gesamtwiderstand	$\mu\Omega$
R_E	Engewiderstand	$\mu\Omega$
R_K	Kontaktwiderstand	$\mu\Omega$

R_t	Übergangswiderstand	$\mu\Omega$
s	Blechdicke	mm
s_E	Elektrodenweg	mm
t	Zeit (allgemein)	s
t_I	Stromflusszeit	ms
t_w, t_h	Schweißzeit (bei AC/DC-Stromquellen)	ms
t_p	Stromanstiegszeit	ms
t_0	Schweißbeginn	ms
U_E	Elektrodenspannung	V
U_L	Ladespannung	V

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

In nahezu allen Bereichen des Maschinenbaus werden einsatzgehärtete Bauteile mit erhöhtem Verschleißwiderstand und erhöhter Schwingfestigkeit für eine Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Beispiele sind Zahnräder, Zahnkränze, Schrauben-, Steuer-, Synchron-, Schneckenräder, Steuerstangen, Achsschenkel, Ventile, Steuer-schieber, Pumpenritzel, -wellen, -zylinder, -körper, Kolben und Hydraulikzylinder. Meist werden hohe Stückzahlen gefertigt. Zunehmend besteht die Anforderung, fertig bearbeitete Werkstücke stoffschlüssig zu verbinden. Durch das Einsatzhärten verfügen die Werkstücke gleichzeitig über eine harte verschleißbeständige Oberfläche und einen zähen Kern. Die Eigenschaften beruhen auf dem Aufkohlen einer bis zu 4 mm dicken Randschicht auf bis zu 0,8% Kohlenstoff [1]. Dadurch ist die Schweißbeignung nicht mehr gegeben. Soll dennoch geschweißt werden, kommen bevorzugt das Laser- oder das Elektronenstrahlschweißen zum Einsatz. Vorher muss die einsatzgehärtete Schicht im Schweißbereich mechanisch entfernt oder der entsprechende Bereich während der Wärmebehandlung abgedeckt werden, damit kein Kohlenstoff eindiffundieren kann. Diese zusätzlichen Schritte sind, neben den ohnehin aufwändigen Schweißtechnologien, ein nicht zu vernachlässigender Kostenfaktor.

Gerade für klein und mittelständische Unternehmen (KMU) ist es notwendig, robuste, kostengünstige und einfach anzuwendende Fügeverfahren zur Verfügung zu haben. Dazu zählt das Kondensatorentladungs-Buckelschweißen (KE-Buckelschweißen). Dieses effiziente Verfahren ermöglicht es, endbearbeitete Bauteile bis 200 mm Durchmesser in wenigen Millisekunden zu verschweißen [2]. Die Professur für Fügetechnik und Montage (FTM) hat ein neues Verständnis zum Prozessablauf beim KE-Schweißen erarbeitet [3], [4], [5]. Die Leistungsdichte ist in der Fügezone so hoch, dass Metallverdampfung auftritt, die zur Aktivierung der Oberflächen führt [6], [7]. Die Verbindung entsteht ohne eine Schweißlinse, rein durch das Aufeinanderpressen der aktivierten Oberflächen und plastischer Verformung des Buckels [7], [8], [9], [10]. Die Übertragung dieser Erkenntnisse auf einsatzgehärtete

Bauteile führt zur These, dass das KE-Schweißen für einsatzgehärtete Bauteile genutzt werden kann, ohne dass die einsatzgehärtete Schicht mechanisch entfernt werden muss.

Die Forschungsstelle befasste sich in einem bis 03/2022 laufenden Forschungsvorhaben [11] mit der Optimierung der Buckelgeometrie beim KE-Schweißen. Dort wurde auch das KE-Schweißen einsatzgehärteter Bauteile untersucht. So sollte u. a. überprüft werden, ob die Optimierung der Buckelgeometrie auch auf das KE-Schweißen einsatzgehärteter Teile übertragen werden kann. Diese Ziele wurden für einsatzgehärtete Teile erreicht. Einsatzgehärtete Bauteile umfassten jedoch nur einen kleinen Teil des Versuchsumfangs, so dass nur ein Anwendungsfall, Grundwerkstoff 16MnCr5, mit einer Einsatzhärte (Case Hardness Depth, CHD) von 0,5 mm bei 550 HV1, untersucht wurde. Die Variationen in der Herstellung der Einsatzschichten sind so umfassend, dass die ganzheitliche Betrachtung und eine Verallgemeinerung für andere industrierelevante Werkstoffe und einsatzgehärtete Schichten im genannten Projekt nicht Bestandteil sein konnten und daher nicht erarbeitet wurden. Das soll nun systematisch mit den hier geplanten wissenschaftlichen Untersuchungen erfolgen.

2 **Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU**

Das KE-Buckelschweißen ist ein hochproduktives, robustes und einfach anzuwendendes Fügeverfahren, das vor allem bei großen Stückzahlen erfolgreich eingesetzt wird. Ein Trend großer Unternehmen ist die Abgabe von Fertigungsaufgaben an externe, meist mittelständische, Zulieferer. Typischerweise setzen KMU jeweils drei bis fünf Anlagen in der Fertigung ein. Die Herstellung von KE-Schweißanlagen ist auch mittelständisch geprägt. Fast alle deutschen Hersteller sind KMU und Mitglied der AGV3.5 Kondensatorentladungsschweißen des DVS mit.

Obwohl das effiziente, robuste und somit für KMU besonders interessante KE-Schweißen seit langem bekannt ist, gilt es als Nischenverfahren. Trotz vieler erfolgreicher Anwendungen ist offenbar gegenüber dem KE-Schweißen eine starke Skepsis vorhanden. Im Vergleich zum Widerstandsschweißen mit Mittelfrequenz (MF) wird es selten und zum Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile kaum eingesetzt. Neben den fehlenden wissenschaftlichen und technologischen Untersuchungen ist eine weitere Ursache, dass das KE-Schweißen zum Widerstandsschweißen zählt. Das heißt, bei qualitätsgerechten Verbindungen wird im Querschleiff eine Schweißlinse erwartet. Beim KE-Buckelschweißen entsteht aber typischerweise keine Schweißlinse. Somit erfolgen oft Fehlinterpretationen, obwohl die Verbindungen das wichtigste Qualitätskriterium, die Festigkeit, erfüllen [12].

Das KE-Schweißen weist Besonderheiten auf, die es für das stoffschlüssige Fügen einsatzgehärteter Bauteile ohne vorheriges Entfernen der Randschicht prädestinieren [7], [9], [11]. Prozessbedingt wird mindestens ein Teil der aufgekohlten Randschicht aus der Fügezone entfernt. Aufgrund der nur wenige Millisekunden dauernden Erwärmung erfährt der Werkstoff in der Fügezone sehr große Temperaturgradienten. Deshalb ist bei entsprechend hohem Kohlenstoffgehalt mit einer hohen Aufhärtung zu rechnen. Allerdings ist die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone gering [13]. Die Untersuchungen sollen die wissenschaftlichen und technologischen Grundlagen zur Anwendung des kosteneffizienten KE-Schweißens zum unmittelbaren Fügen einsatzgehärteter Bauteile liefern. Die mittelständischen Hersteller und Anwender von KE-Schweißanlagen haben kaum die Möglichkeit, diesen hochdynamischen Prozess systematisch zu erforschen. Gerade KMU verfügen in

der Regel nicht über die notwendigen Kapazitäten oder technischen Voraussetzungen, Prozessgrößen mit der erforderlichen Genauigkeit aufzunehmen, Effekte tiefgehend wissenschaftlich zu untersuchen, zu verallgemeinern und Prozesskenntnisse methodisch zu erarbeiten.

Die Vorteile des KE-Schweißens im Vergleich zu den zurzeit üblichen Strahlschweißverfahren liegen in den geringeren Investitionskosten, den geringeren Aufwendungen zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit (kein Strahlenschutz erforderlich), der Einsparung von Hilfsstoffen (kein Schutzgas oder Vakuum erforderlich), in der geringeren Schweißzeit, dem gleichzeitigen symmetrischen Wärmeeintrag und nicht zuletzt im nicht notwendigen Abtragen der Randschicht. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Netzbelastung, die auch im Zuge der zukünftigen Ressourcenschonung und der Entwicklung zur Second-Life-Battery für die Unternehmen nicht unerheblich ist.

Mit Gelingen dieses Forschungsprojekts stehen den mittelständischen Anwendern, und auch branchenübergreifend Härtereien und Oberflächenbehandlern, unmittelbar ein kostengünstiges und einfach anzuwendendes Verfahren zur Verfügung, und den mittelständischen Herstellern der Schweißanlagen eröffneten sich neue Anwendungsgebiete.

3 Stand der Technik

3.1 Kondensatorentladungsschweißen

Das Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen) ist eines der ältesten Schweißverfahren. Schon 1766 wurde das Potential der in einem Kondensator gespeicherten Energie für das Fügen erkannt [14]. Das Kondensatorentladungsschweißen wird aufgrund der kurzen Stromanstiegszeit und der vergleichsweise niedrigen und schnellen Wärmeeinbringung gegenüber dem konventionellen Punkt- oder Buckelschweißen seit Mitte der 50er Jahre für ausgewählte Schweißaufgaben eingesetzt. Im allgemeinen Sprachgebrauch hat sich die Abkürzung KE-Schweißen oder auch die von der englischsprachigen Bezeichnung „capacitor discharge welding“ abgeleitete Abkürzung CD-Schweißen durchgesetzt [8]. Während das Verfahren bereits seit 1940 im nordamerikanischen Schrifttum bekannt ist, erscheint eine der ersten deutschsprachigen Veröffentlichungen im Jahr 1960 von Früngel [15].

Zunächst beschränkte sich die Anwendung der KE-Schweißtechnik auf einige wenige Einsatzgebiete in der Elektro-, Uhren-, Kamera- oder Flugzeugindustrie und gewann bei der industriellen Herstellung von Vakuumröhren an besonderer Bedeutung [16].

Das Kondensatorentladungsschweißen gehört zur Gruppe der konduktiven Widerstandsschweißverfahren, wird aber im Sinne von DIN 1910-100 [17] nicht durch einen eigenständigen Schweißprozess charakterisiert (siehe Abbildung 1). Es stellt eine besondere Form des Buckelschweißens dar, findet aber auch vereinzelt als Widerstandspunktschweißen Anwendung [2].

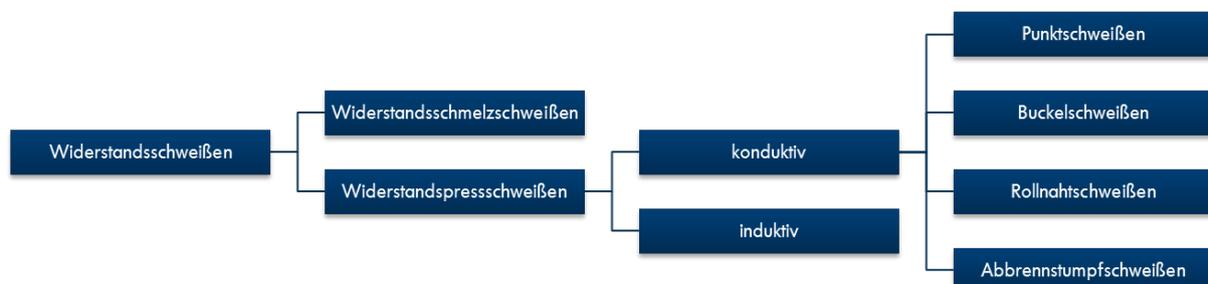


Abbildung 1: Klassifizierung der Widerstandsschweißverfahren nach DIN 1910-100 [17]

Aus heutiger Sicht dominiert das KE-Buckelschweißen gegenüber dem KE-Punktschweißen. Beim Buckelschweißen weist ein Fügeteilpartner eine buckelähnliche Kontur auf, um den Stromfluss in der Berührungsfläche zu konzentrieren (Krüger, 2013).

3.2 Verfahrenstechnische Grundlagen

Die grundlegende Wirkweise teilt das KE-Schweißen (in diesem Bericht stets als Buckelschweißprozess betrachtet) mit anderen konduktiven Widerstandspressschweißprozessen. Die Werkstücke werden unter gleichzeitiger Anwendung von Kraft und Wärme stoffschlüssig gefügt. Die erforderliche Wärme entsteht in der Fügeebene durch einen elektrischen Stromfluss, der zu einer Widerstandserwärmung am elektrischen Widerstand (Kontaktwiderstand) der Schweißzone führt [17], [18]. Sowohl die Kraft als auch der elektrische Strom wird auf die Werkstücke durch die Elektroden aufgebracht. Die beim Schweißen entstehende Wärmemenge Q ergibt sich nach dem ersten Jouleschen Gesetz zu:

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

Daraus ist ersichtlich, dass die den Werkstücken zugeführte Wärme von der Stromflusszeit t_I , der Stromstärke I sowie dem elektrischen Gesamtwiderstand im Schweißstromkreis R_{ges} abhängt. Jedoch steht nicht die gesamte Wärme an der Schweißstelle zur Verfügung. Ein Teil der Wärme geht durch Ableitung in die Bauteile und in die Elektroden, durch Spritzer sowie durch Wärmestrahlung für die Verbindungsbildung verloren. Die Höhe der Verlustwärme ist im Wesentlichen von der Wärmeleitfähigkeit der Werkstückmaterialien, deren Geometrie und der Stromflusszeit abhängig [19]. Es ist sinnvoll, die Stromflusszeit gering zu halten und die erforderliche Wärmemenge über höhere Schweißströme einzubringen [20].

Charakteristisch für das KE-Schweißen ist ein einzelner, kurzer, hoher Stromimpuls von bis zu 1000kA, der aus der transformierten Entladung eines Kondensators erzeugt wird [21]. Abbildung 2 zeigt den Stromverlauf beim Kondensator-entladungsschweißen. Festgelegt wird die Ladespannung und damit proportional zur Kapazität die Ladeenergie (vgl. Gleichung (2)). Das Laden der Kondensatoren kann

langsam erfolgen. Dies führt zu einer geringen und symmetrischen Netzbelastung. Der Verlauf des Schweißstromes ergibt sich aus dem elektrischen Aufbau der Schweißmaschine, die einen elektrischen Schwingkreis darstellt [22].

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (2)$$

Das DVS-Merkblatt 2911[2] legt die Kenngrößen beim KE-Schweißen fest:

- t_p Stromanstiegszeit, Zeit bis zum Erreichen des Spitzenstroms
- I_p Spitzenstrom, Maximum des Schweißstromes
- t_h Schweißzeit, Zeit bis zum Abfall des Schweißstromes auf 50% des Spitzenstroms
- t_l Stromflusszeit, Zeit bis zum Abfall des Schweißstromes auf 5% des Spitzenstroms
- I_{eff} Effektivwert des Schweißstromes, berechnet sich aus dem Integral des Quadrats der Stromstärke über der Schweißzeit

Der Zeitpunkt t_0 wird beim Überschreiten der Triggerschwelle (5% des Maximalwertes der Stromstärke-Skala) festgelegt. Diese Festlegung dient hauptsächlich zur schnellen Auswertung von Stromkurven z.B. für in die Schweißmaschine integrierte Messtechnik (da der Spitzenstrom erst nach der Schweißung bekannt ist).

Abbildung 2 zeigt eine schematische Zuordnung der genannten Kenngrößen.

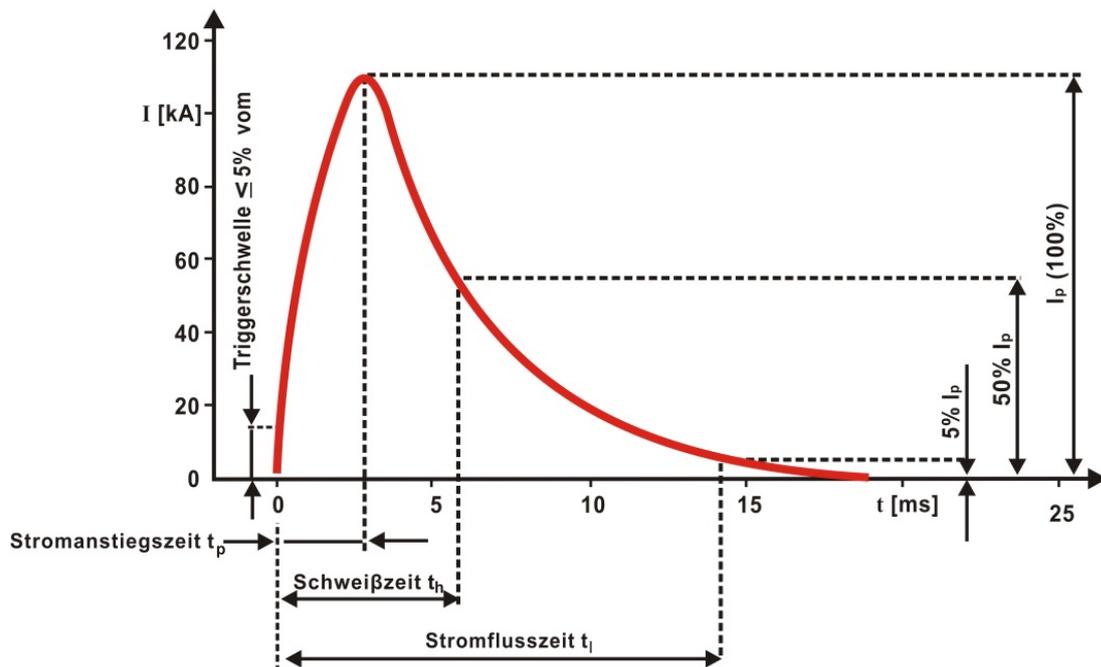


Abbildung 2: Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [2]

Der Schweißstrom erzeugt die zum Fügen notwendige Wärme durch die Joule'sche Erwärmung an den Widerständen der Schweißstelle, die eine Reihenschaltung unterschiedlicher Widerstände darstellen. Die Teilwiderstände R_i addieren sich zum Gesamtwiderstand R_{ges} . Da der die Widerstände durchfließende Strom in der Reihenschaltung aller Teilwiderstände identisch ist (vgl. Abbildung 3), teilt sich die eingebrachte Wärmemenge entsprechend dem Verhältnis der Teilwiderstände auf.

Eine Besonderheit beim Buckelschweißen ist die Stromdichtekonzentration an der Fügestelle durch die Buckelgeometrie. Es werden großflächige Elektroden eingesetzt, wodurch die Erwärmung an den Elektrodenkontaktflächen reduziert und der Elektrodenverschleiß verringert wird.

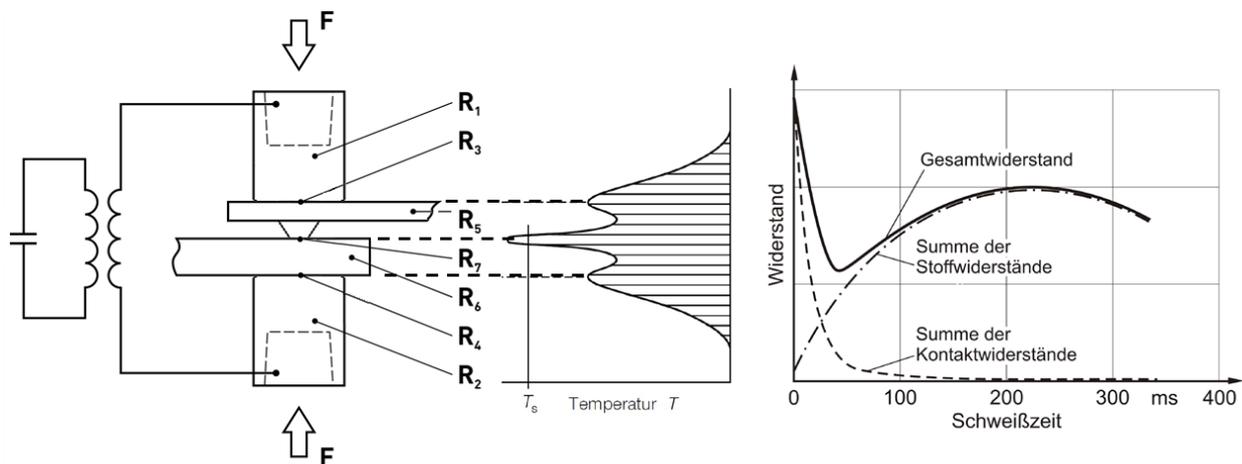


Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrensscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [20], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [23]

3.3 Kontaktwiderstände

In der Literatur werden die Begriffe Kontaktwiderstand, Kontaktübergangswiderstand und Übergangswiderstand oft synonym verwendet, jedoch ist eine klare Differenzierung für das Verständnis des Verfahrens, der Prozesssimulation und der entsprechenden Messgrößen wichtig. In der DIN EN ISO 18594 [24] werden die Begriffe der Widerstände festgelegt:

- Der Kontaktwiderstand (contact resistance) ist die elektrische Eigenschaft einer Berührungsfläche zweier Körper, die den Fluss eines konstanten elektrischen Stromes behindert und begrenzt, z. B. Berührungsfläche zwischen Elektrode/Elektrode, Elektrode/Blech oder Blech/Blech.
- Der Stoffwiderstand (bulk resistance) entspricht dem ohmschen Widerstand eines metallischen Werkstoffs.
- Der Gesamtwiderstand (total resistance) enthält die Kontakt- und Stoffwiderstände und wird zwischen den Abgriffen an den Elektroden gemessen.

Der Stoffwiderstand ist abhängig von der Länge des durchflossenen Leiters, dem Querschnitt der stromdurchflossenen Fläche und dem Werkstoff. Für einen homogenen, linearen Leiter mit dem Querschnitt A_L und der Länge l_L gilt die Gleichung:

$$R = \rho_R(T) \cdot \frac{l_L}{A_L} \quad (3)$$

Die materialabhängige Proportionalitätskonstante ρ_R heißt spezifischer elektrischer Widerstand oder Resistivität. Diese ist temperaturabhängig. Aus Gleichung (3) wird die Temperaturabhängigkeit des Stoffwiderstands deutlich. Der elektrische Widerstand von metallischen Leitern nimmt mit steigender Temperatur zu [25], [26].

Der Begriff des Kontaktwiderstandes wurde bereits von Werner von Siemens (*1816, †1892) geprägt. Der elektrische Kontakt ist ein Zustand, der durch die Berührung zweier elektrischer Kontaktstücke zum Zwecke der Stromleitung oder Informationsübertragung entsteht. Bei der betrachteten Anwendung liegt zwischen Elektrode und Blech bzw. Blech und Blech ein ruhender Kontakt vor. Als Kontaktwiderstand R_K wird der zusätzliche Widerstand genannt, der zusätzlich zu der Summe der Stoffwiderstände zweier sich berührender Leiter messbar ist. Verursacht wird der Kontaktwiderstand durch die Rauheit jeder realen Festkörperoberfläche. Werden zwei Körper mit einer Presskraft aufeinandergespreßt, berühren sie sich nicht, wie auf den ersten Blick anzunehmen, auf der ganzen scheinbaren Kontaktfläche, sondern nur partiell. Die Ursache dafür liegt in der realen Oberfläche, die, mikroskopisch betrachtet, nicht glatt ist, sondern aus erhabenen Spitzen und abgesenkten Tälern besteht. Beim Aufeinandertreffen der Mikrospitzen wird die Fließgrenze der Materialien durch die Flächenpressung lokal weit überschritten. Dies führt zum Abdrängen der Spitzen in benachbarte Täler. Die plastische Verformung schreitet so lange fort, bis sich ein Gleichgewicht aus der Presskraft und der Kraft, die durch die in der elastischen Verformung der Oberfläche gespeicherte Energie ausgeübt wird, einstellt. In den Bereichen der tatsächlichen Berührung, in der Kontakttheorie tragende Kontaktfläche genannt, besteht im Falle einer technisch sauberen Oberfläche ein elektrischer Kontakt. Bei der Betrachtung der verwendeten Elektroden aus Kupferlegierungen und den zu verarbeitenden Werkstücken aus Stahllegierungen wird schnell deutlich, dass hierbei nicht von einer technisch sauberen Oberfläche gesprochen werden kann. Viel mehr befinden sich auf der Oberfläche des Grundwerkstoffs unterschiedliche Schichten. Es handelt sich um Oxid- und Hydroxidschichten und weitere Schichten aus Ölen, Staubteilchen oder ähnlichen Verunreinigungen, die die Stromleitung behindern. Somit bleiben von der tragenden Kontaktfläche nur kleine Flächenbereiche übrig, die rein metallische Berührungsflächen ergeben. Die Summe dieser Bereiche, auch a-spots (aus dem Englischen: asperity=Unebenheit) genannt, bildet die sogenannte wirksame Kontaktfläche. Die Widerstandserhöhung durch die

a-spots wird Engewiderstand genannt. Dieser entsteht durch die Einschnürung der Strombahnen in den Berührungsflächen, vergleichbar der Spannungsüberhöhung in einem gekerbten Bauteil. Der Engewiderstand ist eine statistische Größe, abhängig von der Kontaktwerkstoffpaarung und der Größe und Verteilung der wirksamen Kontaktfläche. Deshalb kann rechnerisch nur der wahrscheinlichste Wert (Mittelwert) ermittelt werden, jedoch nicht der reale Wert. Neben den a-spots existieren weiterhin andere Flächen der tragenden Kontaktfläche:

- quasimetallische Berührungsflächen, die mit einer adsorbierten Schicht bedeckt sind, durch die Elektronen verlustlos tunneln können; diese sind von den a-spots elektrisch nicht zu unterscheiden
- halbleitende Fremdschichten
- mechanisch tragende, isolierende Fremdschichten (insb. die Aluminiumoxidschicht)

Der Fremdschichtwiderstand ist der Widerstand einer Fremdschicht, abhängig von deren Dicke und elektrischen Eigenschaften. In erster Näherung kann der Kontaktwiderstand aus der Summe der Engewiderstände durch die a-spots sowie quasimetallischen Berührungsflächen und den Fremdschichtwiderständen berechnet werden [27], [28].

3.4 Maschinentechnik des KE-Schweißens

Die KE-Schweißanlagen unterschiedlicher Hersteller sind sich in ihrem Aufbau sehr ähnlich. Sie bestehen aus einem elektrischen und einem mechanischen Teil, dessen Einzelkomponenten an den jeweiligen Leistungs- und Einsatzbereich angepasst sind. In der Ausführung des mechanischen Teils gibt es darüber hinaus je nach Art der zu verschweißende Teile unterschiedliche Konzepte. KE-Schweißanlagen können in die zwei Grundgestellvarianten C-Gestell und Portalgestell eingeteilt werden (siehe Abbildung 4).



a) C-Gestell

b) Portalgestell

Abbildung 4: Gestellausführungen von KE-Schweißmaschinen der Firma GLAMATronic [29]

Beide Bauformen haben spezifische Vor- und Nachteile, welche bei der Auswahl einer Anlagenvariante für einen fertigungstechnischen Einsatz in Betracht gezogen werden sollten. Der Arbeitsraum eines C-Gestells ist von drei Seiten her zugänglich. Durch die elastische Aufbiegung des C-Gestells wird die Krafrichtung geneigt und dadurch die Krafteinwirkung auf die Fügeteile ungleichmäßig verteilt. Das hat insbesondere beim Schweißen von Ringbuckeln größeren Durchmessers negative Auswirkungen. Ein Portalgestell hat einen nur von zwei gegenüberliegenden Seiten zugänglichen Arbeitsraum, gewährleistet aber eine exakt senkrechte und gleichmäßige Krafteinwirkung auf die Fügeteile. Der Einsatz von 2 Transformatoren führt zur Ausbildung eines in zwei Achsen symmetrischen Magnetfelds während des Schweißens [2].

3.4.1 Mechanischer Teil der Kondensatorschweißanlage

Der mechanische Teil der Anlage besteht aus dem Gestell zur Aufnahme aller mechanischen und elektrischen Komponenten sowie der Schweißkrafteinheit. Diese hat zwei wesentliche Aufgaben. Sie ist einerseits für die Übertragung der elektrischen Energie auf die Bauteile, andererseits für den Aufbau und das Aufrechterhalten der Presskraft verantwortlich. Als Mittler sowohl des Schweißstroms als auch der Schweißkraft fungieren die Elektroden. Die zu verschweißenden Bauteile werden zwischen einer Unter- und einer Oberelektrode, die den notwendigen Druck auf die Bauteile ausüben, aufgenommen, während, ebenfalls über die Elektroden, der Strom zugeführt wird. Die Elektrodenform wird der jeweiligen Geometrie der Bauteile angepasst. Kontaktiert werden die Elektroden über bandförmige Leiter aus Kupfer. Um

die ohmschen Verluste der Strombänder möglichst gering zu halten, müssen die Leiter entsprechend niederohmig sein [30]. Dies wird durch eine möglichst große Querschnittsfläche und eine geringe Länge der Leiter erreicht. Das Schweißfenster bildet durch seine geometrische Anordnung eine Leiterschleife. Da die Induktivität der Leiterschleife von deren umschlossener Fläche abhängt, ist diese so klein wie möglich zu halten und der Schweißtransformator muss sich nah an der Schweißkraft-einheit befinden [31]. In und um die Leiter bzw. Leiterschleife bildet sich dabei ein magnetisches Feld. Zusätzlich zur Aufbiegung ist insbesondere auf der offenen Seite von C-Gestellen eine elektromagnetische Verdrängung im Schweißergebnis bemerkbar. Die wirkende elektrodynamische Lorentz-Kraft F_D überlagert sich mit der Schweißkraft und beansprucht so die Elektroden und deren Führung. Dadurch wird das Schweißgut nach außen gedrängt. Das Portalgestell wirkt mit seiner geometrisch symmetrischen Anordnung diesem Effekt entgegen [2].

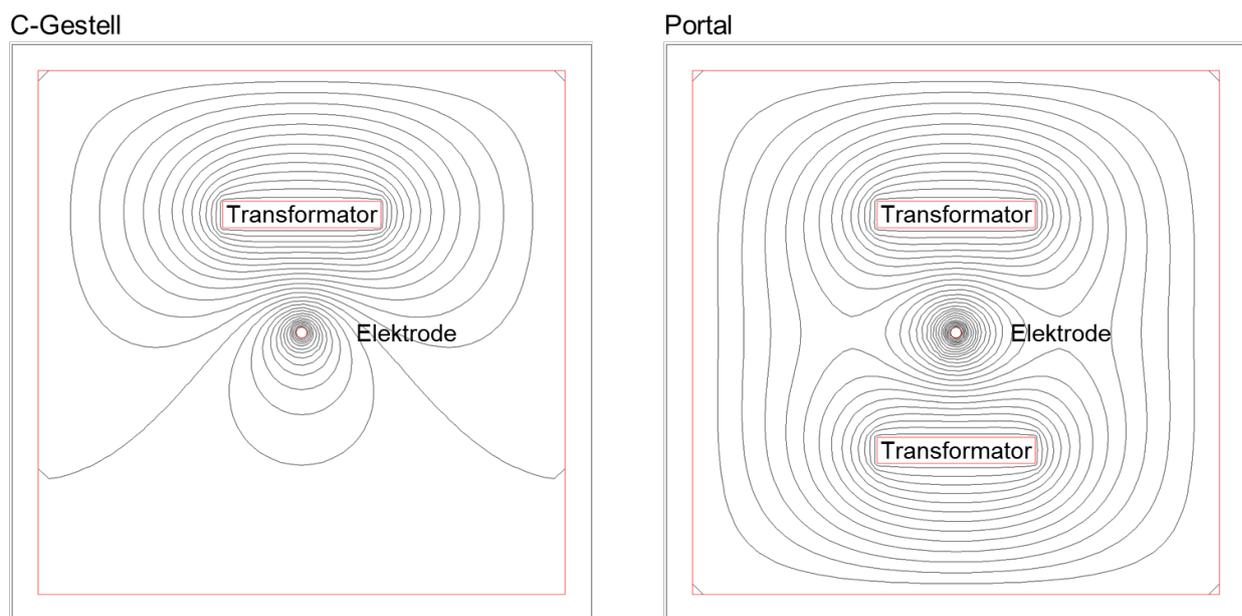


Abbildung 5: Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts)

Die Schweißqualität beim Buckelschweißen wird neben den elektrischen Prozessparametern stark durch das Nachsetzverhalten beeinflusst. Während des Schweißimpulses erweicht der Schweißbuckel in sehr kurzer Zeit. Die Kraft, die durch die Fügezone übertragbar ist, sinkt ab. Aufgrund dessen beginnt die Oberelektrode zu beschleunigen, bis erneut ein Kräftegleichgewicht erreicht ist. Bricht die Elektrodenkraft während des Schweißprozesses durch unzureichendes Nachsetzen ein,

kommt es zu einem hohen Anstieg des Übergangswiderstandes. Dadurch steigt die Temperatur zwischen den Schweißelektroden und insbesondere in der Fügezone stark an, verbunden mit starker Spritzerbildung und hohem Elektrodenverschleiß. Das servomotorische, pneumatische oder hydraulische Kraftsystem allein würde zu träge reagieren. Deshalb wird es um Nachsetzeinheiten (NE), die vom eigentlichen Kräfteerzeugungssystem abgekoppelt sind, erweitert. Abbildung 6 stellt schematisch die Wirkungsweise dar. Die Nachsetzeinheit ist als ein Federpaket mit zwei parallel geschalteten Federn dargestellt und zwischen der Oberelektrode und der als blauer Kasten abstrahierten Kräfteinheit angeordnet.

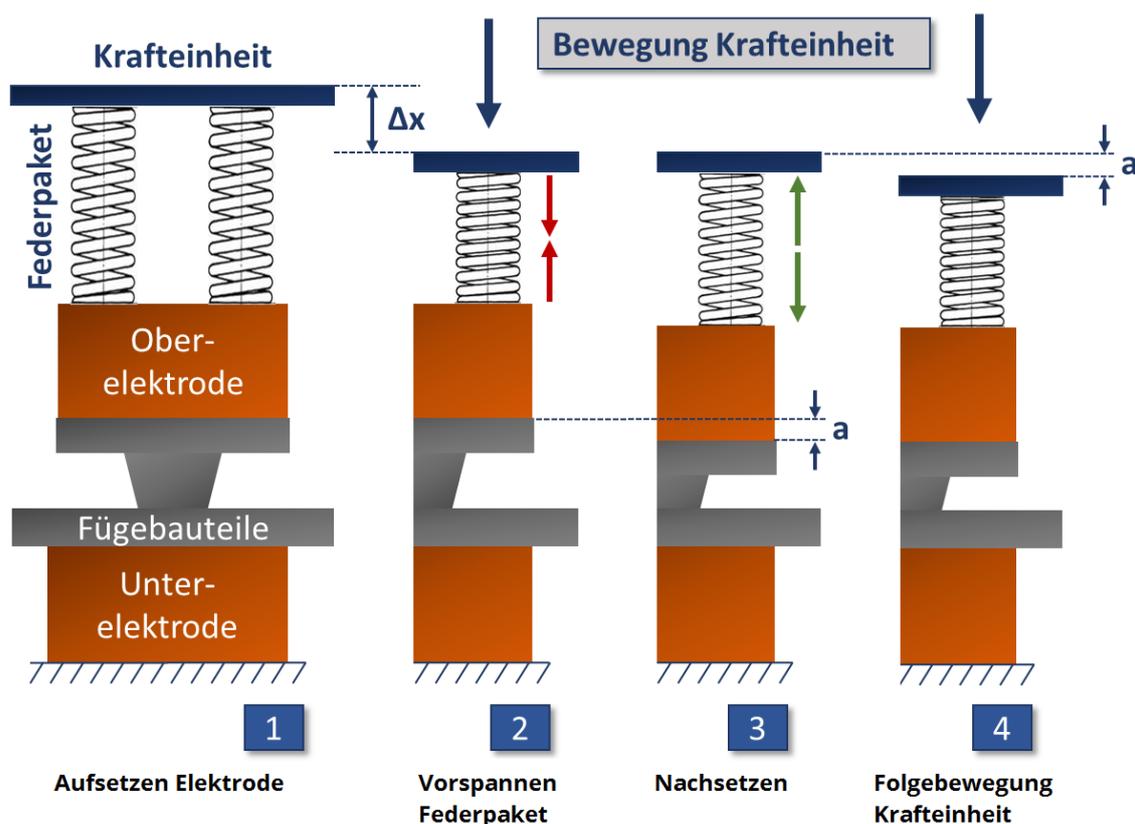


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket
 Der dritte Schritt zeigt deutlich, dass die träge Kräfteinheit nicht folgen kann und auf derselben Höhe verbleibt. Das vorgespannte und weitaus dynamischere Federpaket setzt schnell, im Idealfall synchron zur Buckelerweichung, nach und verringert den Kräfteinbruch. Der mechanische Kontakt zwischen den Fügebauteilen und den Elektroden bleibt erhalten. In modernen Anlagen wird die Nachsetzeinheit über Stahlfederpakete oder Elastomere realisiert. Neuste Maschinentechnik ermöglicht das Nachsetzen mit elektromagnetischen Bewegungseinheiten [32]. [12]

3.4.2 Elektrischer Teil der Kondensatorentladungsschweißanlage

Der elektrische Aufbau der Leistungsteile einer KE-Schweißanlage wird anhand eines allgemeinen Prinzipschaltbildes in Abbildung 7 dargestellt. Hinzu kommen Schweißsteuerung und Überwachung.

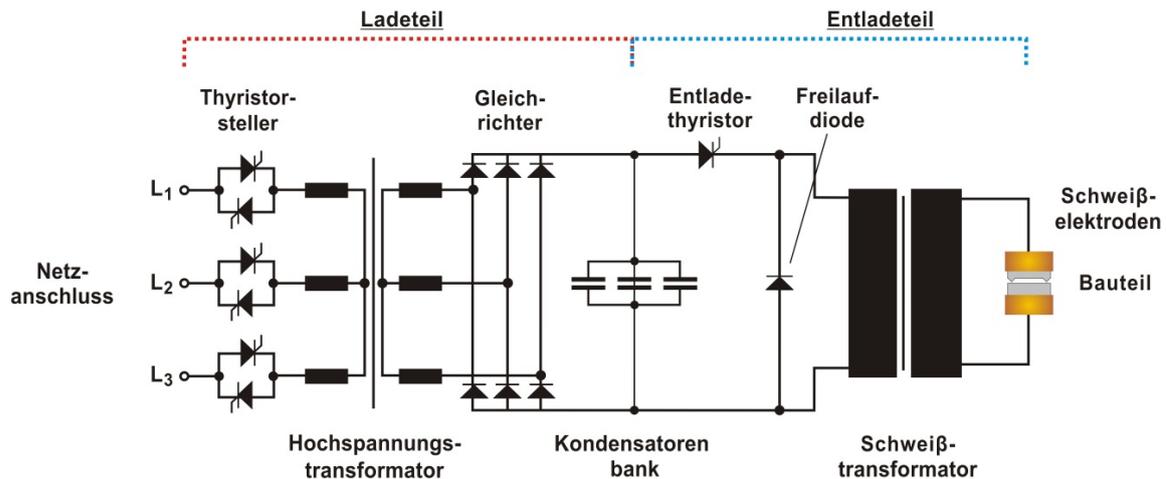


Abbildung 7: Prinzipschaltbild einer Kondensatorentladungsschweißanlage [2]

KE-Schweißanlagen werden üblicherweise an 400V Drehstrom betrieben, wobei die eigentliche Schweißung galvanisch vom Netz getrennt abläuft [2]. Der Schweißablauf teilt sich dabei in eine Lade- und Entladephase des Kondensators auf. In der Lade- phase wird der Kondensator bis zu der von der Schweißsteuerung vorgegebenen Ladespannung geladen. Der Ladetransformator hat die Aufgabe, die netzseitige Spannung bis auf den maximalen Wert der Ladespannung am Kondensator zu transformieren (siehe Abbildung 7, Hochspannungstransformator). Der Ladestrom wird gleichgerichtet (siehe Abbildung 7, Gleichrichter).

Der Kondensator besteht meist aus mehreren parallel geschalteten Metallfolienkondensatoren mit hoher Spannungsfestigkeit und niedriger Selbstinduktion (siehe Abbildung 7, Kondensatorbank) [12]. Die Schweißung beginnt durch einen Auslöseimpuls an einen Entladethyristor (siehe Abbildung 7, Entladethyristor), sodass sich der Kondensator über den Schweißtransformator (siehe Abbildung 7, Schweißtransformator) entlädt [12]. Dabei ergibt sich das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} des Schweißtransformators näherungsweise aus dem Verhältnis der Primärspannung U_1 zur Sekundärspannung U_2 bzw. dem umgekehrten Verhältnis des primärseitigen

Stroms I_1 zum sekundärseitigen Strom I_2 [2]. Dabei beschreibt \ddot{u} das Verhältnis der Wicklung N_1 zu N_2 des Schweißtransformators [12]. Die folgende Formel zeigt die Zusammenhänge zwischen der Übersetzung, den Wicklungszahlen und den elektrischen Kennwerten:

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

Das Übersetzungsverhältnis des Schweißtransformators regelt das Verhältnis der Kondensatorspannung U_1 zur Schweißspannung U_2 . Eine Änderung der Übersetzung ist meist durch (mechanisches) Umklemmen am Transformator möglich. Der Schweißtransformator ist möglichst induktions- und streuungsarm aufgebaut und besteht sekundärseitig aus nur wenigen Windungen [15], [31]. Um unnötige Verluste zu vermeiden, sollte der Eisenkern des Transformators nicht in Sättigung gehen [22]. Im Sekundärstromkreis befinden sich die Elektroden mit den zu verschweißenden Bauteilen, sodass der Entladestrom über die Schweißstelle fließt.

3.5 Prozessbeschreibung des Schweißablaufs

Der Prozess des KE-Schweißens läuft wie folgt ab:

1. Einlegen der Teile
2. Sanftes Aufsetzen der Elektroden mit der Vorkraft
3. Aufbauen der Schweißkraft
4. Laden der Kondensatorbank
5. Zünden des Entladethyristors → Entladen des Kondensators

Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

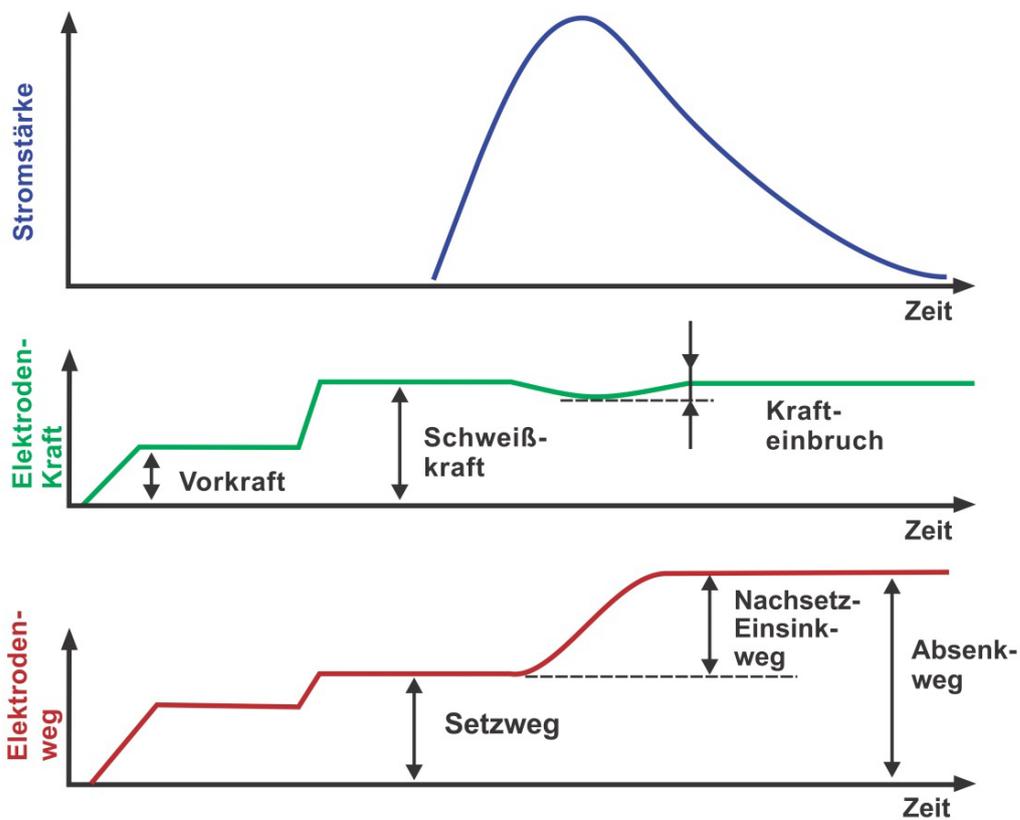


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen [2]

Aufgrund der sehr schnellen Erwärmung durch den sehr hohen und sehr kurzen Schweißimpuls spielt die Wärmeleitung eine sehr eingeschränkte Rolle. Simulationsergebnisse aus einem abgeschlossenen Forschungsprojekt zum Erwärmungsverhalten zeigen Temperaturen oberhalb der Siedetemperaturen der eingesetzten Stahlwerkstoffe [33]. Das verdampfende Metall expandiert schlagartig und reinigt die Oberflächen der Fügepartner (Aktivierung). Die somit aktivierten Oberflächen verbinden sich, wenn die Elektrodenkraft die Atome der aktivierten Oberfläche derart aneinanderpresst, dass ihr Abstand auf die Gitterkonstante des Metallgitters reduziert wird und zwischenatomare Kräfte wirken [34], [35].

Die Erwärmung des Bauteils und die damit verbundene Abnahme der Festigkeit zieht ein Absinken der Schweißkraft nach sich. Die Größe dieses Krafteinbruchs und dessen Dauer hängt von der Massenträgheit der Krafteinheit bzw. des Schweißkopfes einerseits und von der Leistungsfähigkeit der Nachsetzeinheit andererseits ab [36],

[37]. Zum Zeitpunkt t_p erreicht der Schweißstrom seinen Maximalwert und bei t_h erreicht der Schweißstrom den Wert des halben Spitzenstroms. Definitionsgemäß charakterisiert dieser Zeitpunkt das Ende des Schweißvorgangs. Die Schweißzone erkaltet bereits wieder und die Bauteile sind in der Fügezone stoffschlüssig verbunden. In der verbleibenden Zeit, bis der Schweißstrom auf null abgesunken ist, können die Elektroden noch in geringerem Maße einsinken. Der Absenkweg setzt sich aus dem Setz- und Einsinkweg zusammen. Der Setzweg beschreibt die Bewegung der Elektroden während sich die Anpresskraft auf den Sollwert der Schweißkraft erhöht, ohne dass ein Strom fließt. Der Einsinkweg ist definiert durch die Bewegung der Elektroden während und nach der Stromflusszeit. Zusätzlich wird der Begriff Nachsetzweg benutzt, der das Nachsetzen der Schweißelektroden während des Schweißens bezeichnet. In der Literatur wird er oft mit dem Einsinkweg gleichgesetzt [2], [8]. Zu beachten ist, dass der Nachsetz-/Einsinkweg nicht sofort nach dem Ende der Stromflusszeit gemessen wird, da die Elektroden erst später ihre endgültige Position erreichen. Nach dem Beenden des Schweißvorgangs öffnet die Steuerung die Elektroden und die verschweißten Bauteile werden entnommen. [2]

3.6 Parameter und Einstellgrößen

Die wichtigsten Einflussgrößen auf den KE-Schweißprozess und somit auch auf das Schweißergebnis sind in Abbildung 9 dargestellt und werden in

Tabelle 1 erläutert.



Abbildung 9: Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [2]

Tabelle 1: Einstellgröße an KE-Maschinen und deren Einfluss [2], [12], [38]

Parameter	Einfluss
Schweißkraft	Verformung des Buckels Eindrücken des Buckels in Blech Kontaktwiderstand zwischen den Bauteilen sowie zwischen Bauteilen und Elektroden Federkraft der NE und damit Federweg und Beschleunigung der NE
Ladespannung	für die Entladung zur Verfügung stehende Energie Maximalstrom Energie die in die Fügestelle eingebracht wird (nicht identisch der Ladeenergie)
Transformatorüber- setzung	Stromanstiegszeit Schweißzeit Stromflusszeit Maximalstrom
Kapazität des Kon- densators	für die Entladung zur Verfügung stehende Energie Energie die in die Fügestelle eingebracht wird (nicht identisch der Ladeenergie) Stromanstiegszeit Schweißzeit Stromflusszeit Maximalstrom
Nebenzeiten wie: Vorhaltezeit Nachhaltezeit Ladezeit	Taktzeit Ladestrom, Netzanschluss

Parameter	Einfluss
Vorkraft	Kraft beim Aufsetzen Verformung beim Aufsetzen
Antriebseinheit	Geschwindigkeit beim Schweißkraftaufbau Geschwindigkeit des Ausgleiches des Krafteinbruchs in Nachhaltezeit Aufsetzbewegung, Prellen
Nachsetzeinheit	Krafteinbruch Nachsetzbewegung beim Schweißen Spritzer Elektrodenverschleiß

Die Einstellgrößen Schweißkraft und die Ladeenergie gelten somit als direkte bzw. feste Einstellgrößen für den Schweißprozess. Die dynamische Nachsetzeinheit und die Transformatorübersetzung gehören zu den optionalen Einstellgrößen. Es gilt zu beachten, dass durch die Komplexität des Prozesses alle Einstellgrößen untereinander in Wechselwirkung stehen und deshalb in Abhängigkeit zueinander betrachtet werden müssen.

3.7 Neues Prozessverständnis - Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte (KshW)

Das KE-Schweißen ist durch einen nur wenige Millisekunden andauernden, sehr hohen Stromimpuls (je nach Konfiguration bis 1000 kA Spitzenstromstärke) gekennzeichnet. In der Fügezone treten schlagartig sehr hohe Leistungsdichten (gemittelt über 10^6 W/cm^2) auf. Das entspricht der Leistungsdichte, die beim Laserstrahlschweißen zur Bildung einer Dampfkapillare führt [23]. Deshalb entsteht die Verbindung nicht, wie beim Widerstandsschweißen mit Konstantstrom oder 50 Hz-Wechselstrom, über die schmelzflüssige Phase (Ausbildung einer Schweißlinse), sondern durch Aufeinanderpressen aktivierter Oberflächen und plastische Verformung des Buckels [34], [35]. Der Prozess läuft in vier charakteristischen Phasen ab, die fließend ineinander übergehen [3], [7], [38]:

1. Kontaktieren, gekennzeichnet durch die Bewegung und das Aufsetzen der Elektroden, den Anstieg der Elektrodenkraft bis zur Schweißkraft (Kraftaufbau), die plastische Verformung im Bereich der Buckelaufstandsfläche, die Ausprägung der Kontaktfläche (scheinbare und tatsächliche). Durch lokal unterschiedliche Flächenpressungen und unterschiedliche große Relativbewegungen ergeben sich lokal unterschiedlich ausgeprägte Kontaktwiderstände, die später zu unterschiedlich starker Erwärmung führen. Bei hohen Kräften ist die Aufsetzgeschwindigkeit nicht entscheidend.

2. Aktivieren, gekennzeichnet durch den Stromfluss mit sehr hohem Stromstärkegradienten, bis kurz vor dem Stromstärkemaximum, und sehr hoher Leistungsdichte in der Kontaktzone. In der Kontaktzone entsteht Metallverdampfung, Fremd- und Oxidschichten werden mit dem expandierenden Metaldampf mitgerissen (Mikrospritzer), die Oberfläche wird dadurch aktiviert. Die Stromdichte ist nicht in der gesamten Kontaktfläche konstant. Aufgrund der geometrischen Einschnürung des Strompfades ist die Leistungsdichte am Rand größer. Dort tritt zuerst Metallverdampfung auf. Die Bereiche der Kontaktfläche, in denen Metaldampf vorliegt, sind nicht mehr elektrisch leitfähig, der Stromfluss erfolgt über die restliche Kontaktfläche, die dann ebenfalls sukzessive aktiviert wird. Das Buckelvolumen wird marginal erwärmt. Während dieser Phase erfolgt noch kein Nachsetzen der Elektroden.

3. Entstehen des Stoffschlusses, gekennzeichnet durch Beginn des Nachsetzens der Elektroden, Aufeinanderpressen der aktivierten Oberflächen, dadurch Herstellen des Stoffschlusses und Beseitigung des Kontaktwiderstandes, abfallende Stromstärke und Stromdichte, abklingende Metallverdampfung, konduktive Erwärmung des Buckelvolumens, Buckelentfestigung und beginnende plastische Verformung des Buckels.

4. Nachpressen, gekennzeichnet durch Nachsetzen der Elektroden, Abklingen des Stromflusses, plastische Verformung des Buckels, Herstellen des Stoffschlusses in nicht aktivierten Bereichen, flüssiger Werkstoff wird aus der Fügezone gepresst, Vergrößerung der Anbindungsfläche, Ende des Nachsetzens der Elektroden, Wärmeableitung und Abkühlen der Fügezone.

3.8 Geometrien für KE-Buckelschweißen

3.8.1 Buckelgeometrien für Stahllegierungen

Auf der Grundlage dieses neuen Prozessmodells wurden bisher noch keine Rückschlüsse auf die Schweißbarkeit und insbesondere die Schweißsicherheit (Konstruktion) gezogen. Die Normen und Merkblätter zum Buckelschweißen, z.B. DIN EN ISO 8167:2021[39], DIN 8519:1996-05 [40] oder Merkblatt DVS 2905 [41], beziehen sich auf alle Verfahrensvarianten (Gleichstrom, Wechselstrom, KE-Schweißen). Die besondere Prozesscharakteristik des KE-Schweißens, die Möglichkeit, große Ringbuckel oder eine Vielzahl von Buckeln gleichzeitig zu verschweißen, werden nicht berücksichtigt. Im DVS-Merkblatt 2905 Buckelschweißen von Stählen [41] wird lediglich angemerkt, dass die Reproduzierbarkeit der KE-Schweißungen sehr hoch ist, wenn die Toleranzen der Buckelgeometrie, insbesondere der Buckelhöhe, in engen Grenzen liegen und die erforderlichen Randbedingungen (Buckelgeometrie) erfüllt werden.

Das einzige Merkblatt, das sich speziell mit dem KE-Schweißen befasst, ist DVS 2911 [2]. Dort werden trapezförmige Ringbuckel mit einer Breite der Buckelspitze von 0,1 bis 0,4 mm empfohlen, wobei ballige Buckelspitzen ($R \approx 0,3$ bis 0,5 mm) zu bevorzugen sind (siehe Abbildung 10).

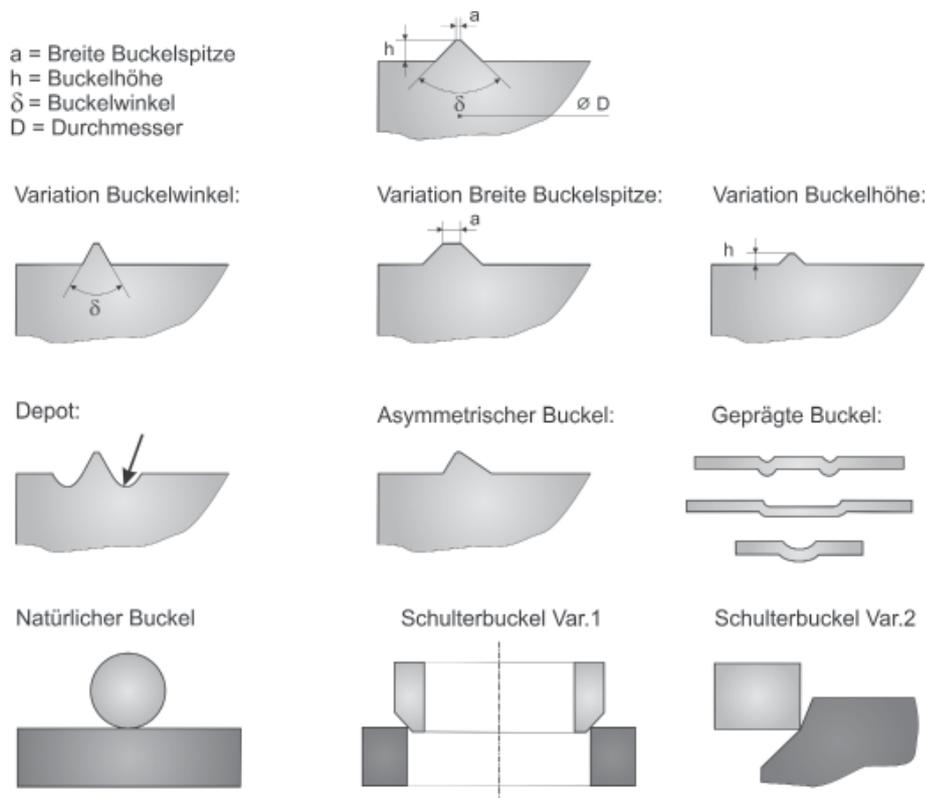


Abbildung 10: Variationen von Schweißbuckeln [2]

Um Kerben zu vermindern (z. B. Sichtseite von Rohrverbindungen), sollen asymmetrische Buckel angewandt werden. Die Toleranzen für die Buckelmaße sind nach [42] zu wählen. Bei hohen Anforderungen an die Wiederholgenauigkeit der Schweißergebnisse ist die Buckelgeometrie mit eingeschränkten Toleranzen zu fertigen, um einen umlaufenden Kontakt der Buckelspitze zu garantieren (z. B. Ebenheit der Buckelspitze kleiner 0,05 mm). Im Rahmen eines abgeschlossenen Forschungsvorhabens der Professur für Fügetechnik und Montage der TU Dresden wurde der Einfluss der Buckelgeometrie für Ringbuckel bis zu einem Durchmesser von 200 mm untersucht [11]. Als Ergebnis konnten sechs Gestaltungsgrundsätze ermittelt werden, die in Abbildung 11 dargestellt sind. Die Ergebnisse fließen in die Überarbeitung des Merkblatt DVS 2911 [2] ein:

1. Symmetrische Krafteinleitung über den Buckelquerschnitt
2. Verlängerung der Buckelkante bis zur Außenkontur, um maximalen Raum für Spritzer zu bieten
3. Symmetrischer Buckelquerschnitt, Innenwinkel α_1 und Außenwinkel α_2 gleich, Winkel $>45^\circ$ zur Spritzerminimierung und Winkel $<45^\circ$ zur Maximierung der Festigkeit bei höherer Spritzerneigung
4. Aufstandsfläche radial ($r=1,5\text{ mm}$) oder spitz. Die initiale Kontaktfläche stellt sich durch plastische Verformung des Buckels während der Kontaktierung ein. Dadurch wird Aktivierung der Kontaktfläche gewährleistet.
5. Abstand x zwischen Blech und Buckel ausreichend groß dimensionieren, um ausreichend Raum für Spritzer zu gewährleisten. Bei zu kleinem Abstand stoppen Spritzer bereits kurz nach Austritt und behindern die Ausbildung der Fügeverbindung
6. Verwenden einer Buckelzentrierung, um Buckel und Blech reproduzierbar zu positionieren. Dadurch steigt die Wiederholgenauigkeit der Ergebnisse

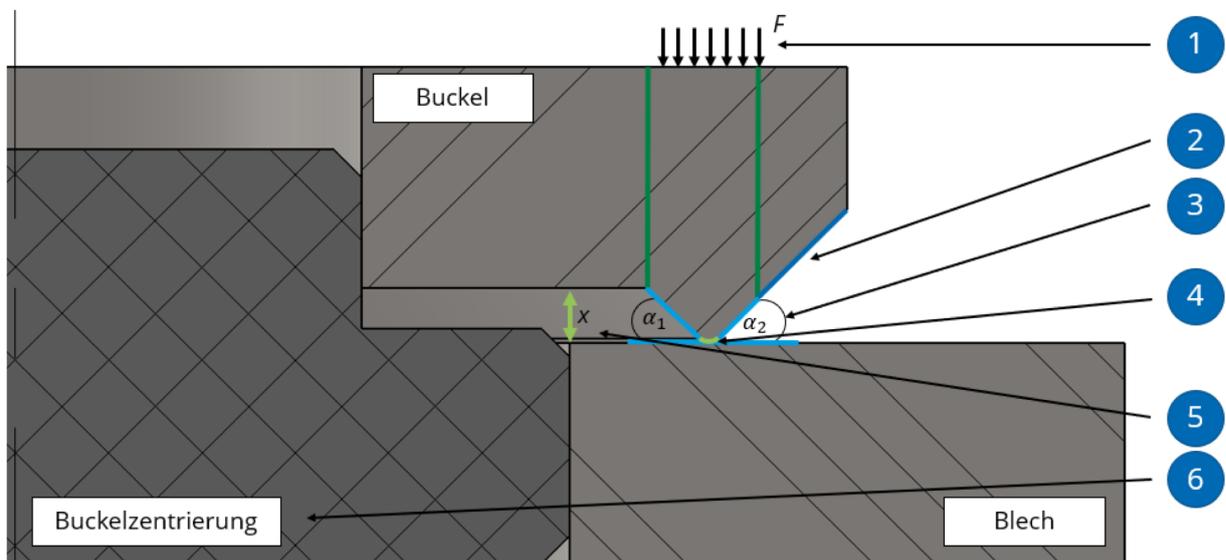


Abbildung 11: Axialsymmetrische Darstellung einer Fügeaufgabe mit Buckelbauteil, Blech und Buckelzentrierung und sechs Gestaltungshinweisen

3.8.2 Buckelgeometrien für Aluminiumlegierungen

In Nomen, DVS-Merkblättern und Veröffentlichungen gibt es nur wenige konkrete Empfehlungen zur Gestaltung geprägter oder massiver Buckel für das Aluminiumbuckelschweißen. Die meisten Empfehlungen gelten für das Buckelschweißen von Stahl bzw. nur allgemein für das Buckelschweißen [39], [40], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]. Es existieren jedoch allgemeine Aussagen:

Die Form der Buckel ist für jeden Anwendungsfall so festzulegen, dass einerseits eine für das Schweißen ausreichende Steifigkeit des Buckels erreicht wird, andererseits beim Prägen der Buckel durch Überschreiten der Umformbarkeitsgrenze keine Risse im Werkstoff auftreten. Nur in ein Blech geprägte Hohllangbuckel sind aufgrund ihrer geringen Steifigkeit im Allgemeinen schlecht schweißgeeignet, günstiger sind hier in beide Bleche eingebrachte Hohllangbuckel, die sich um 90° versetzt gegenüberstehen (Kreuzbuckelschweißung). Ringbuckel eignen sich zum Schweißen von Blechen bis zu einer Blechdicke von etwa 2,5 mm. Für dünne Bleche bis etwa 1,25 mm sind sie wegen ihrer Steifigkeit besser geeignet als Rundbuckel. Ringbuckel können als frei geprägte Buckel oder als formgeprägte Buckel hergestellt werden. Der Anwendungsbereich von Rundbuckeln ist mit dem der Ringbuckel vergleichbar, jedoch sind Rundbuckel für dickere Bleche ($s = 2,0$ bis $3,5$ mm) besser geeignet als für dünnere. Im Allgemeinen werden Rundbuckel freigespresst, Sonderformen können jedoch auch formgepresst werden. Bei Stahl gebräuchliche Rundbuckel (zum Beispiel nach DIN 8519 [40] und im International Institute of Welding (IIW) genormt) haben sich aufgrund ungenügender Steifigkeit nicht bewährt (DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., 2006). Dilthey stellt fest, dass für das KE-Schweißen (für Stahl) die Buckel aus DIN EN 28167 (mittlerweile zurückgezogen und durch [39], [40] ersetzt) ungeeignet sind [48].

Weiterhin gibt es Angaben für Stahl und NE-Metalle. Letztere gelten allerdings explizit nicht für Aluminiumlegierungen [46], [47], jedoch wird festgestellt, dass durch formgeprägte Buckel eine kleinere Maßtoleranz erreicht werden kann [47].

Cramer stellt fest, dass das KE-Schweißen durch die kurze Stromzeit und hohen Spitzenstrom anfälliger für Spritzer ist und deshalb massive und steife Buckel besser geeignet sind, da diese während der kurzen Erwärmungszeit eine deutlich günstigere

Stabilität aufweisen und die Stromdichtekonzentration länger bestehen bleibt. Die Ergebnisse wurden allerdings ebenfalls an Stahl ermittelt. [45]

3.9 Schweißen oberflächenbehandelter Werkstoffe

Nitrierte und einsatzgehärtete Stähle gelten allgemein als nicht schweißgeeignet, da die Schichten in der Fügeverbindung spröde Phasen bilden würden bzw. zur unerwünschten Aufhärtung führen [50]. Eine Schweißverbindung kann hergestellt werden, wenn die entsprechende Schicht entfernt wird oder andere besondere Maßnahmen ergriffen werden. Nach [12] können Einsatzstähle mit bis zu 0,6 % Kohlenstoff im Randbereich durch KE-Schweißen mit Baustahl verschweißt werden, weil ein Teil der höher kohlenstoffhaltigen Schicht aus dem Schweißbereich gedrückt wird. Die Wärmeeinflusszonen sind nur etwas mehr als 1 mm breit und bestehen aus Martensit und Zwischenstufengefüge. Das Auftreten von Härterissen kann durch ausreichend hohe Energie des Pulses und eine niedrige Transformatorübersetzung vermieden werden. Eine Korrelation mit der Elektrodenkraft wurde nicht festgestellt. In [51] wurde das Reibschweißen untersucht. Mit entsprechend angepassten Parametern können oberflächenbehandelte Bauteile sicher verbunden werden, weil die Schicht aus der Fügezone gedrängt wird. Eine Entfernung vor dem Schweißen ist beim Reibschweißen nicht erforderlich. Das induktiv unterstützte Laserstrahlschweißen ist ebenso geeignet, um Bauteile mit einsatzgehärteten oder randschichtgehärteten, fertig bearbeiteten Funktionsflächen rissfrei zu schweißen [52], [53]. Die prozessintegrierte Kurzzeitwärmebehandlung dient zum Vorwärmen mit konstanter Haltetemperatur oder in verschiedenen Formen zum Nachwärmen.

4 Forschungsziel

Einsatzgehärtete Werkstücke verfügen über eine harte verschleißbeständige Oberfläche und einen zähen Kern. Dies entsteht durch das Aufkohlen einer bis zu 4 mm dicken Randschicht (bis zu 0,8% Kohlenstoff) [1]. Dies senkt die Schweißbeignung, weshalb das Laser- oder das Elektronenstrahlschweißen bevorzugt wird. Vorher muss die einsatzgehärtete Schicht im Schweißbereich mechanisch entfernt oder entsprechende Bereiche während der Wärmebehandlung abgedeckt werden, damit kein Kohlenstoff eindiffundieren kann. Diese zusätzlichen Schritte sind neben den ohnehin aufwändigen Schweißtechnologien ein nicht zu vernachlässigender Kostenfaktor. Ziel ist den Einfluss der Einsatzhärtungstiefe und den Grundwerkstoff beim KE-Buckelschweißen zu bewerten und den Fügeprozess hinsichtlich der Herausforderungen zu optimieren. Es sind folgende Fragen offen und zu beantworten:

- Wieviel einsatzgehärtete Schicht kann und muss für eine i. O.-Verbindungen beseitigt werden?
- Kann der prozessimmanente Materialabtrag, insbesondere Spritzer, so gesteuert werden, dass er zulässig, das heißt nicht schädlich, ist?
- In welcher Größenordnung kann die Härte mit welchen Methoden (Vorwärmen, Nachwärmen) eingestellt werden?

Hierzu werden folgende Arbeitshypothesen aufgestellt:

1. Beim KE-Buckelschweißen wird die Randschicht prozessbedingt teilweise aus der Fügezone entfernt, jedoch meist weniger als die Randschichtdicke tief ist.
2. Martensitbildung kann nicht vermieden werden, jedoch kann die Härte durch prozessintegrierte Wärmebehandlung definiert verringert werden.
3. Die notwendige prozessintegrierte Wärmebehandlung ist wesentlich von der Aufkohlungstiefe und den Grundwerkstoffen abhängig.
4. Eine Härte > 600 HV in der Fügezone erhöht die Sprödbruchgefahr unzulässig.
5. Die Spritzerneigung kann durch die Koordination elektrischer und mechanischer Prozessparameter positiv beeinflusst werden.
6. Prozesssimulationen erhöhen das Prozessverständnis, wodurch Temperaturprofile orts aufgelöst bestimmt und damit die notwendige prozessintegrierte Wärmebehandlung hergeleitet werden können.

5 Lösungsweg

Die Untersuchungen werden an Ringbuckeln durchgeführt. Diese entsprechen den gängigen Anwendungen. Die Details der Abmessungen (siehe Abbildung 12) werden aus dem abgeschlossenen Forschungsvorhaben [11] übernommen.

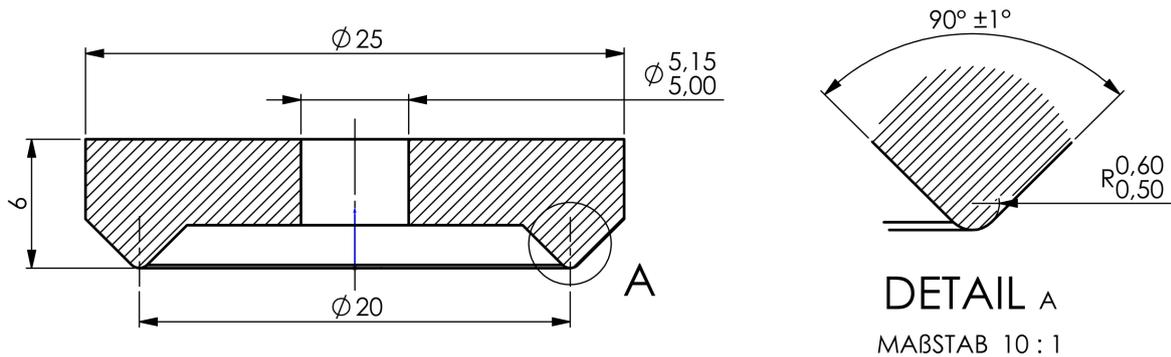


Abbildung 12: Übersicht und Detailansicht der technischen Zeichnung des Ringbuckels

Die Bearbeitung des Projektes erfolgt iterativ im Zusammenspiel von Simulation und Experiment. Der iterative Projektablauf ist in Abbildung 13 dargestellt. Durch die Simulation können die messtechnisch nicht zugänglichen Bereiche und Vorgänge zeitlich und örtlich hoch aufgelöst charakterisiert und visualisiert werden (Stromdichte, Temperatur, mechanische Spannung, Verformung). Dazu wird ein eigenes iteratives Modell genutzt, das während der Projektbearbeitung um die einsatzgehärtete Schicht weiterentwickelt und validiert wurde.

Im Experiment werden bauteilähnliche Prüfkörper geschweißt, die zerstörend geprüft werden. Die Ergebnisse dienen der Ermittlung der Zielgrößen und der Validierung der Simulation. Die Schweißungen wurden auf einer KE-Portalmaschine durchgeführt. Die Messdatenerfassung und die Hochgeschwindigkeitskinematografie erfolgten herstellerunabhängig mit einem eigenen Messsystem.

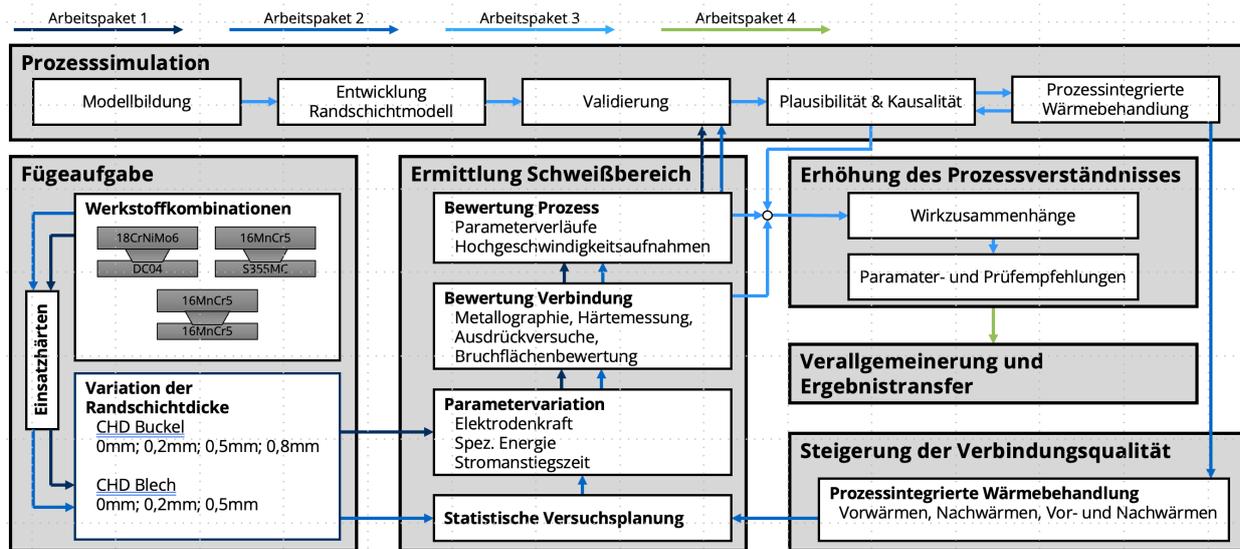


Abbildung 13: Iterativer Projektablauf

Das Forschungsvorhaben ist in vier Arbeitspakete unterteilt:

1. Einfluss der einsatzgehärteten Schicht auf Prozess und Verbindung
2. Steigerung der Verbindungsqualität durch prozessintegrierte Wärmebehandlung
3. Erhöhung des Prozessverständnis durch numerische Untersuchungen
4. Verallgemeinerung, Berichterstattung, Ergebnistransfer und Abschlussbericht

Die zeitliche Bearbeitung der Arbeitspakete ist in Abbildung 14 dargestellt.

Arbeitspakete (AP)	2021	2022				2023				2024
	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I
AP1 Einfluss der einsatzgehärteten Schicht auf Prozess und Verbindung	X	X	X	X	X	X				
AP2 Steigerung der Verbindungsqualität durch prozessintegrierte Wärmebehandlung				X	X	X	X	X		
AP3 Erhöhung des Prozessverständnis durch numerische Untersuchungen	X	X	X	X	X	X	X	X		
AP4 Verallgemeinerung, Berichterstattung, Ergebnistransfer und Abschlussbericht		X		X	X			X		

Geplante Bearbeitungszeit
 Kostenneutrale Verlängerung

Abbildung 14: Bearbeitung der Arbeitspakete

6 Versuchsvorbereitung

6.1 Einhärtetiefe und Materialkombinationen

Die durchzuführenden Experimente werden mit unterschiedlichen Einhärtetiefen (CHD) untersucht. Aus Vorversuchen wurde ein Einsinkweg von 0,2 mm im Schweißbereich ermittelt. Daher werden die Proben mit den folgenden Einhärtetiefen hergestellt, um Einhärtetiefen zu erhalten, die teilweise nicht prozessbedingt entfernt werden (Aktivierung): 0 mm; 0,15 mm; 0,30 mm und 0,80 mm (siehe auch Abbildung 15).

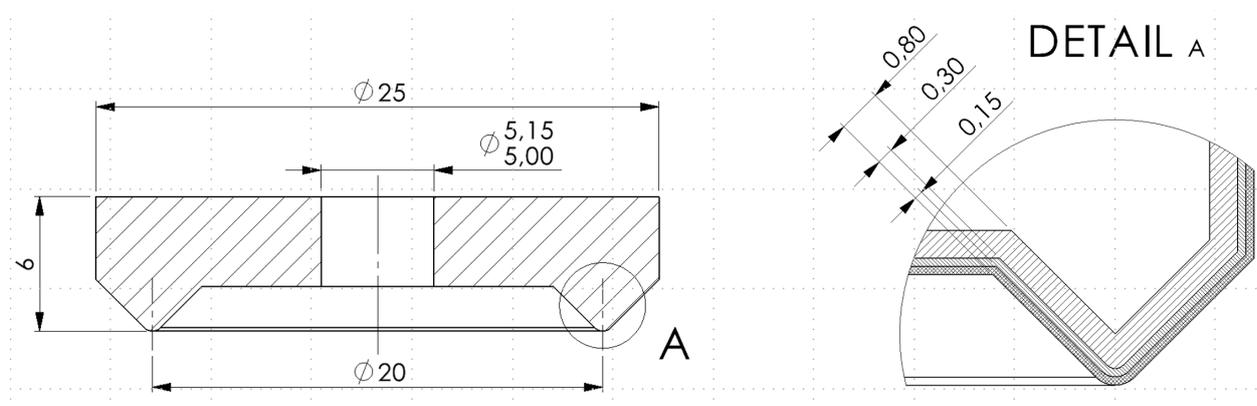


Abbildung 15: Übersicht und Detailansicht untersuchten Einhärtetiefen

Um allgemeingültige Ergebnisse zu erzielen, werden die Untersuchungen an drei Werkstoffkombinationen durchgeführt. Diese sind in Tabelle 2 gelistet.

Tabelle 2: Untersuchte Buckel- und Blechwerkstoffe

Buckelwerkstoff	Blechwerkstoff
16MnCr5	S355MC
18CrNiMo6	DC01
16MnCr5	16MnCr5

Die Buckel- und Blechgeometrien wurden in Absprache mit dem PA festgelegt. Alle untersuchten Werkstoffkombinationen, die sich aus der Variation von Einhärtetiefe (CHD) und Werkstoff ergeben, sind in **Error! Reference source not found.** dargestellt. Zu allen Werkstoffkombinationen wurde folgende Auswertung durchgeführt:

Zerstörende Prüfung (ZP), Bruchfläche (B), Hochgeschwindigkeitskinematographie (HG), Querschliff (S), Querschliff geätzt (Geätzt), Härtemapping (Härte).

Tabelle 3: Übersicht aller untersuchten Kombinationen

Werkstoffkombination	Buckelwerkstoff	Blechwerkstoff	CHD Buckel	CHD Blech	Status	Auswertung					
						ZP	B	HG	S	Geätzt	Härte
1	16MnCr5	S355MC	0,00mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
2	16MnCr5	S355MC	0,15mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
3	16MnCr5	S355MC	0,30mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
4	16MnCr5	S355MC	0,80mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
5	18CrNiMo6	DC01	0,00mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
6	18CrNiMo6	DC01	0,15mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
7	18CrNiMo6	DC01	0,30mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
8	18CrNiMo6	DC01	0,80mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
9	16MnCr5	16MnCr5	0,00mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
10	16MnCr5	16MnCr5	0,00mm	0,15mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
11	16MnCr5	16MnCr5	0,00mm	0,30mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
12	16MnCr5	16MnCr5	0,15mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
13	16MnCr5	16MnCr5	0,15mm	0,15mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
14	16MnCr5	16MnCr5	0,15mm	0,30mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
15	16MnCr5	16MnCr5	0,30mm	0,00mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
16	16MnCr5	16MnCr5	0,30mm	0,15mm	durchgeführt	X	X	X	X	X	X
17	16MnCr5	16MnCr5	0,30mm	0,30mm	durchgeführt	X	X	X	X	x	x

6.2 Festlegen der Fügeaufgabe

Gemeinsam mit dem PA wurde zur ersten Sitzung die Fügeaufgabe festgelegt. Diese ist im Querschnitt in Abbildung 16 dargestellt. Dabei wurden aufgrund des abgeschlossenen Forschungsvorhabens [11] und der industriellen Erfahrung folgende Hinweise eingearbeitet:

- Äußere Buckelflanke bis zum Außenbereich des Bauteils verlängern
- Krafteinwirkung symmetrisch über den Buckelquerschnitt
- Wiederholbarkeit der Positionierung durch Buckelzentrierung erhöhen
- Spannungsmessung an unterer und oberer Elektrode für Validierung der Simulation
- Elektrodenwerkstoff CuCr1Zr
- Blechdicke $t = 3\text{mm}$

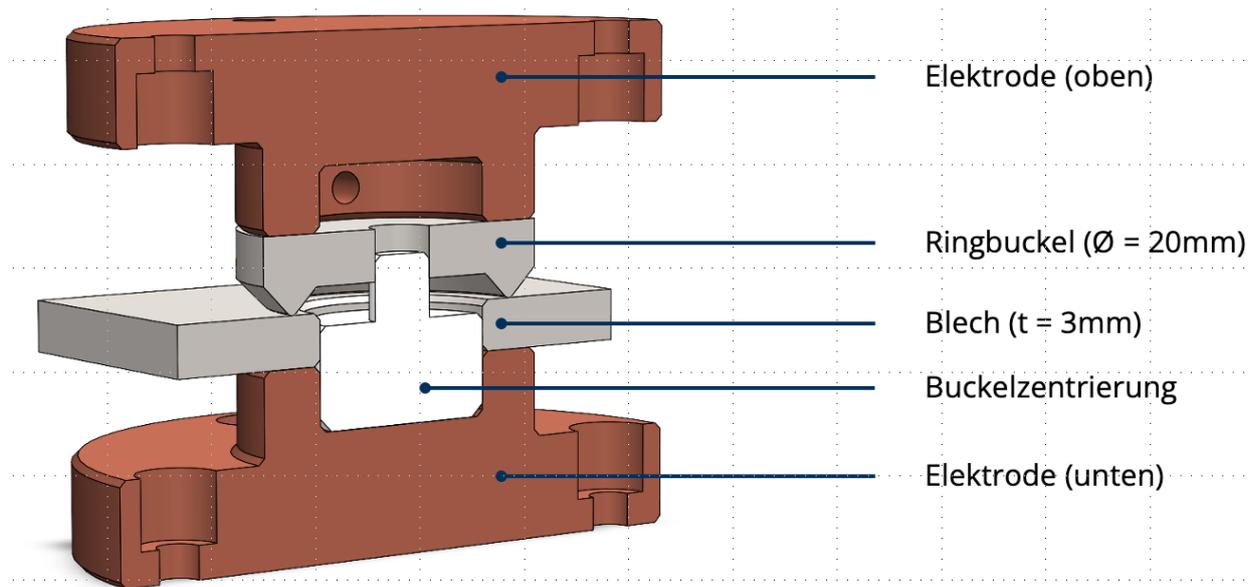
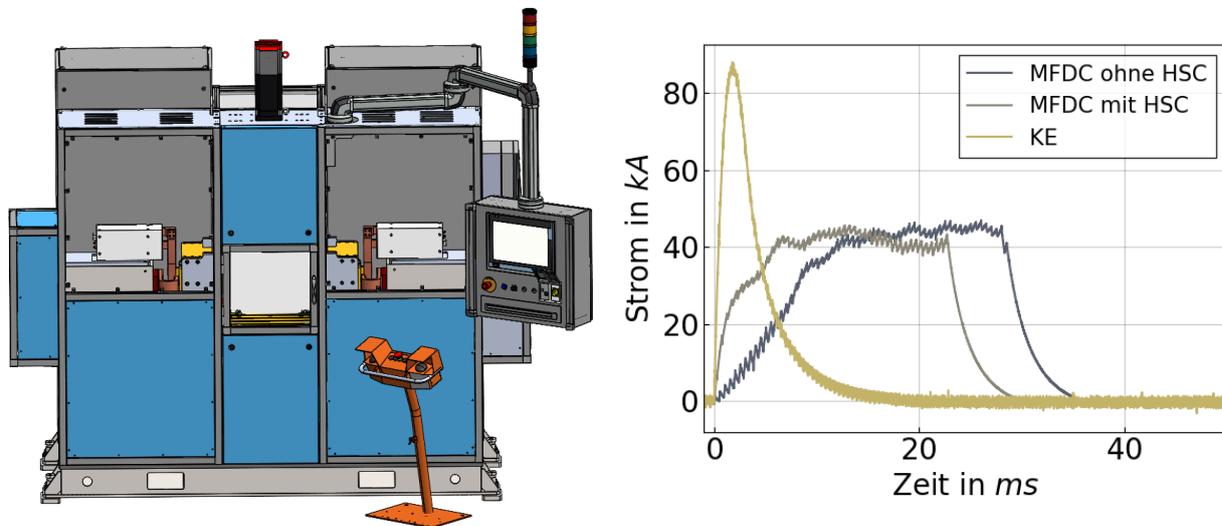


Abbildung 16: Darstellung der Fügeaufgabe im Querschnitt

6.3 Anlagentechnik

Die Versuche werden auf einer Portalanlage der Firma KAPKON in Sonderausführung durchgeführt (KAPKON KKP 18-MCS / gKE / MF). Diese Portalanlage verfügt über zwei Stromquellen: KE und MFDC. Über einen SEW Synchronservomotor CMP80M ist eine max. Elektrodenkraft von 30 kN möglich. Im Arbeitsraum ist ein Säulenführungsgerüst implementiert, wodurch die bewegliche Masse von variabel zwischen 8 kg oder ca. 40 kg eingestellt werden kann. Die Federkonstante wird über Schraubendruckfeder oder Elastomerfedern eingestellt und liegt im Bereich zwischen 1 und 3 kN/mm. Die Portalanlage ist in Abbildung 17a dargestellt. Für die Mittelfrequenz-Technik wird eine GeniusHWI 436W BAS-EA als Schweißinverter verwendet. Damit ist eine maximale Schweißstromstärke von 55 kA möglich. Mit dem High-Speed-Current-Modus (HSC-Modus) ist eine Stromanstiegszeit von 5 ms möglich. Für das Kondensatorentladungsschweißen können 4 Kondensatorbänke genutzt werden. So sind unterschiedliche Stromanstiegszeiten, Maximalstromstärken und Mehrpulsschweißungen möglich. Die kleinste Stromanstiegszeit beträgt 1,36 ms und die Maximalstromstärke ca. 210 kA. Die unterschiedlichen Charakteristika der Stromprofile sind in Abbildung 17b dargestellt. In die Schweißanlage ist eine Labor-Gleichstromquelle integriert, sodass die Übergangswiderstandsmessung unmittelbar vor und nach dem Schweißen ohne den Kraftfluss zu unterbrechen möglich ist.



a) Versuchsanlage

b) Stromprofile (schematisch)

Abbildung 17: Versuchsanlage der Firma KAPKON (KKP 18-MCS /gKE / MF)

6.4 Festlegen der zu messenden Größen

Die Forschungseinrichtung verfügt über ein mobiles Messsystem und eine Hochgeschwindigkeitskamera. In Absprache mit dem PA wurde festgelegt, dass bei allen Hauptversuchen die Stromstärke I , der Elektrodenweg s_E , die Elektrodenspannung U_E und die Elektrodenkraft F_E gemessen wird. Alle Messgrößen werden mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen synchronisiert. Die Parameterverläufe werden mit dem 8-kanaligen Messsystem Dewesoft Sirius synchron aufgezeichnet. Damit ist eine Abtastung von bis zu 1 MHz möglich; bei einer Auflösung von 24-bit. Der Messbereich kann zwischen $\pm 10\text{ mV}$ und $\pm 50\text{ V}$ gewählt werden. Ebenso stehen Messkanäle zur Verfügung mit einem Messbereich von $\pm 1400\text{ V}$.

6.4.1 Strommessung

Die verwendete KE-Maschine erreicht bis zu 210 kA Spitzenstromstärke. Für die Messung der Stromstärken werden Rogowskimessspulen (Rogowskigürtel) mit nachgestelltem Integrator genutzt [54]. Damit können Stromstärken berührungsfrei und ohne Beeinflussung des Schweißstroms gemessen werden. Der Integrator gibt eine kalibrierte Spannung aus, die mit dem o.g. Messsystem aufgezeichnet wird.

6.4.2 Spannungsmessung

Mit dem 8-kanaligen Analog-Digital-Wandler können Spannungen direkt gemessen werden. Während des Prozesses wird die Elektrodenspannung gemessen. Bei Messungen zeigen sich am Anfang des Schweißvorganges, das heißt direkt nach Beginn der Entladung des Kondensators, Spannungsmaxima, die nicht allein auf die ohmschen Widerstände zurückzuführen sind. Diese Maxima resultieren aus einem systematischen Messfehler. Durch den Aufbau bedingt existiert immer eine Fläche zwischen den Kabeln des Spannungsabgriffs. Diese wirken wie eine Luftspule mit einer Windung. In dieser wird eine Spannung induziert, wenn sich das um die stromführenden Elektroden entstehende Magnetfeld, welches die Leiterschleife senkrecht durchdringt, ändert. Da sich das Magnetfeld proportional zur Stromstärke im Leiter verhält, ist auch die Änderung des Magnetfeldes proportional zur Änderung des Stromes. Der Stromanstieg ist vor allem zu Beginn der Kondensatorentladung am höchsten, während die Stromstärke und die anfallende Spannung noch klein sind. Zu diesem Zeitpunkt ist damit die gemessene Spannung im Wesentlichen auf Induktion in der Messleitung zurückzuführen [55]. Mit der in [56], [57] entwickelten Methode ist es möglich, den systematischen Messfehler analytisch zu bestimmen und das Spannungssignal zu korrigieren.

6.4.3 Wegmessung

Zur Wegmessung werden potentiometrische Wegaufnehmer eingesetzt. Die Eignung wurde in [33] untersucht und nachgewiesen. Die Wegaufnehmer werden direkt vom o.g. Messsystem mit einer Versorgungsspannung von 9 Volt gespeist. Die Masse von Versorgungsspannung und der Bezugspunkt der Messspannung werden verbunden. Somit kann der Weg verzögerungsfrei aufgezeichnet werden. Die axiale Genauigkeit ist durch die direkte Verarbeitung der Spannung über dem veränderlichen Widerstand des potentiometrischen Wegaufnehmers nur noch vom Messbereich des Sensors, der Speisespannung und der Auflösung des Messgerätes abhängig. Für den Elektrodenweg wird ein Sensor mit dem Messbereich von 25 mm genutzt.

6.4.4 Kraftmessung

Für die Kraftmessung werden die in den Maschinen eingebauten piezoelektrisch Kraftsensoren genutzt. Die durch einen Ladungsverstärker bereitgestellte Spannung

wurde mit dem o.g. Messgerät aufgezeichnet und durch eine Kalibrierkurve in die Kraft umgerechnet.

6.5 Bewerten der Auspresskraft

Zur Ermittlung von Schweißbereichen wird eine Mindestauspresskraft festgelegt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass eine Mindestnahtbreite von 0,7 mm erreicht werden muss (ergibt sich aus 0,3 mm Abschmelzung des Buckels). Die Streckgrenze des weicheren Werkstoffs der Fügeverbindung wird verwendet. Bei einem Ringbuckeldurchmesser von 20 mm beträgt die Mindestauspresskraft bei einer Streckgrenze von $355 \frac{N}{mm^2}$ nach Gleichung (5): $F_{min} = 7,8 \text{ kN}$.

$$F_{min} = 355 \frac{N}{mm^2} * \left(\frac{\pi}{4} * ((20mm + 0,7mm)^2 - (20mm - 0,7mm)^2) \right) \quad (5)$$

6.6 Bewerten der Spritzerklassen

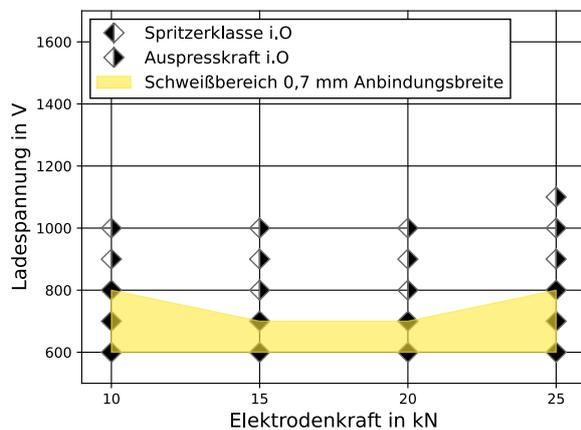
Für die Ermittlung der Schweißbereiche ist neben der Mindestauspresskraft auch die Spritzerklasse erforderlich. Diese wurde in einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben in vier Kategorien unterteilt (siehe Abbildung 18) [33]. Bei der Spritzerklasse 0 können keine Schweißspritzer detektiert werden. Vereinzelt kleine Funken sind feststellbar. Bei Spritzerklasse 1 sind Schweißspritzer feststellbar. Diese verglühen nach kurzer Distanz. Bei Spritzerklasse 2 sind deutliche Schweißspritzer erkennbar. Die Menge an Schweißspritzern hat stark zugenommen. Diese verglühen außerhalb der Anlage und bewegen sich bereits Richtung Erdboden. Bei Spritzerklasse 3 verglühen die Schweißspritzer auf dem Erdboden.



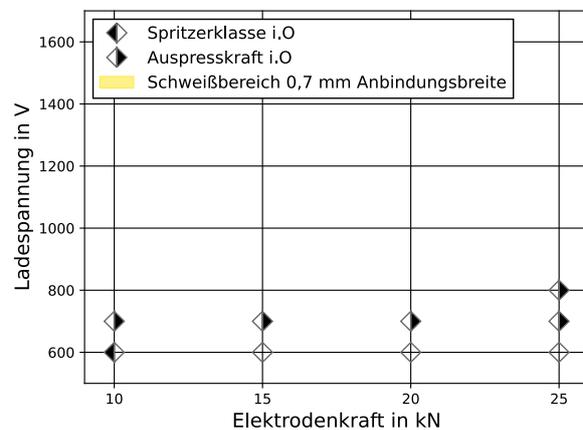
Abbildung 18: Klassifizierung der Schweißspritzer

7 AP1 – Einfluss der einseitiggehärteten Schicht auf Prozess und Verbindung

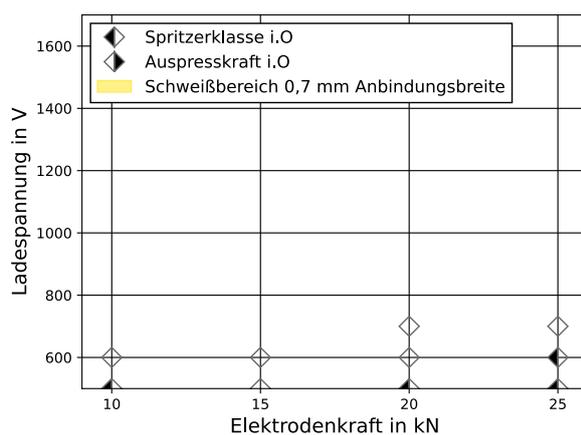
In Abhängigkeit der Werkstoffkombinationen (MDK) 1 bis 17 (siehe Tabelle 3) werden folgend die Schweißbereiche beschrieben. Die Ladespannung wird zwischen 600 V und 1300 V und die Elektrodenkraft zwischen 10 kN und 25 kN variiert. Die Kriterien für die untere Grenze sind die Mindestauspresskraft (siehe Abschnitt 6.5) und für die obere die Spritzerklasse (siehe Abschnitt 6.6). In Abbildung 19 sind die Schweißbereiche mit unterschiedlichen Einhärtetiefen gegenübergestellt. Dabei handelt es sich um den Buckelwerkstoff 16MnCr5 und den Blechwerkstoff S355MC.



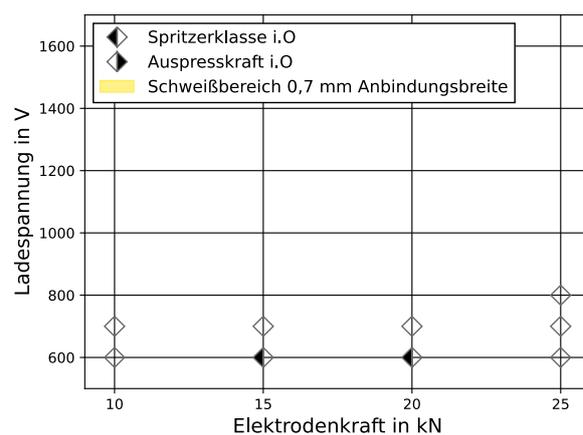
a) Werkstoffkombination 1, CHD 0,00 mm



b) Werkstoffkombination 2, CHD 0,15 mm



c) Werkstoffkombination 3, CHD 0,30 mm

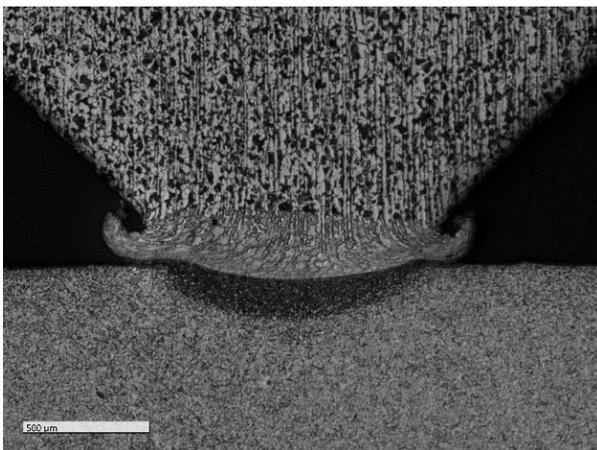


d) Werkstoffkombination 4, CHD 0,80 mm

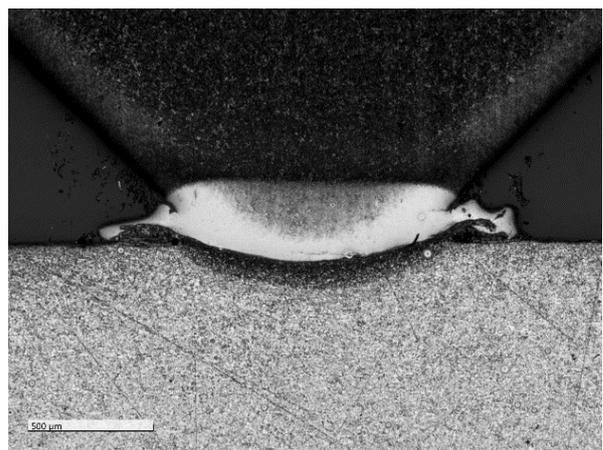
Abbildung 19: Gegenüberstellung der Schweißbereiche in Abhängigkeit der Einhärtetiefe; Buckelwerkstoff: 16MnCr5, Blechwerkstoff: S355MC

In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass kein Schweißbereich ermittelt werden kann, sobald der Buckelwerkstoff einplatzgehärtet ist. Es wird zwar die geforderte Mindestauspresskraft von 7,8 kN erreicht, allerdings neigt die einplatzgehärtete Schicht am Buckel zu starker Spritzerbildung.

Im Querschliff in Abbildung 20 ist die einplatzgehärtete Schicht erkennbar. In Abbildung 20a ist eine „in Ordnung“ (i.O.) Verbindung ohne einplatzgehärtete Schicht erkennbar. Das für das KE-Buckelschweißen typische austretende Material zeigt keine Risse. Beim Verschweißen kleinster einplatzgehärteten Schichten von 0,15 mm (siehe Abbildung 20b) sind bereits kleine Risse erkennbar. Diese treten fast immer im Bereich des Materialaustritts auf. Mit zunehmender Einsatzhärte nimmt die Spritzerneigung zu.



a) Keine Einhärtetiefe (MDK 1)



b) 0,15 mm Einhärtetiefe (MDK2)

Abbildung 20: Querschliff von MDK 1 und MDK 2

Für die Werkstoffkombination 18CrNiMo6 (Buckel) und DC01 (Blech) wurden Schweißbereichsdiagramme in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einsatzhärteiefen ermittelt (Abbildung 21). Auffällig beim Vergleich von MDK 1 bis 4 ist, dass durch den Einsatz eines Tiefziehblechs (DC01) ein Schweißbereich trotz einplatzgehärteter Schichten erreicht werden kann. Der Schweißbereich nimmt mit zunehmender Einhärtetiefe ab.

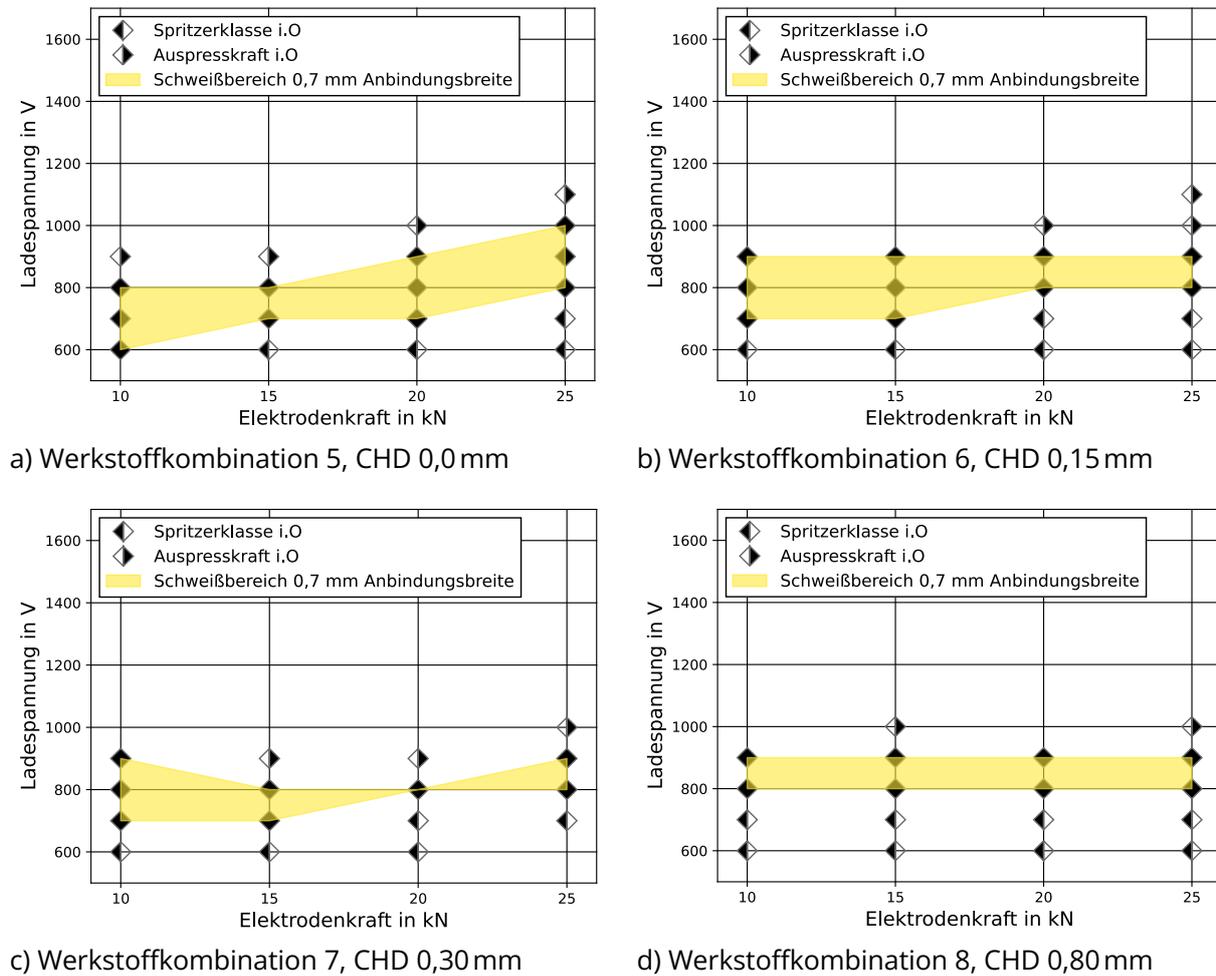
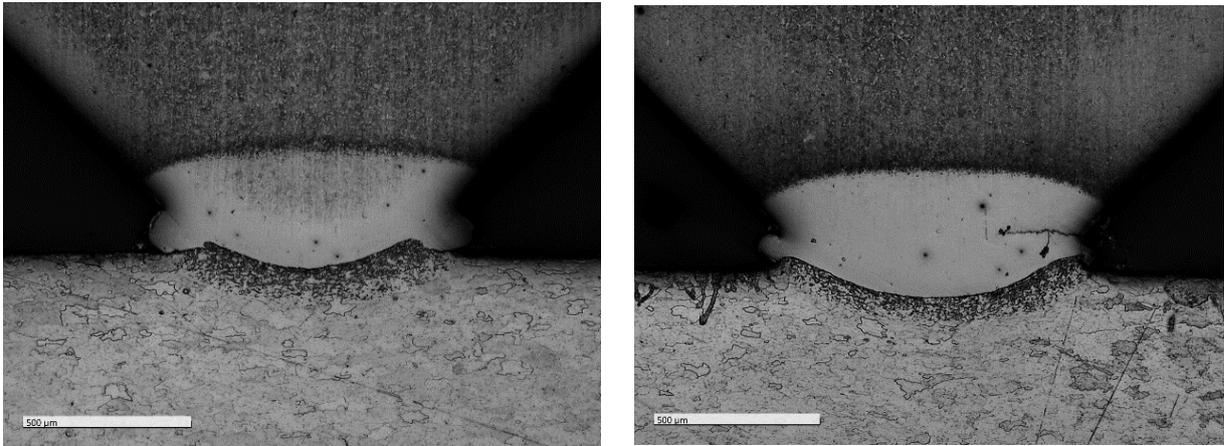


Abbildung 21: Gegenüberstellung der Schweißbereiche in Abhängigkeit der Einhärtetiefe; Buckelwerkstoff: 18CrNiMo6, Blechwerkstoff: DC01

Trotz der ermittelten Schweißbereiche zeigen die Querschliffe der einseitiggehärteten Teile Unregelmäßigkeiten (Risse). Für eine Einhärtetiefe von 0,00 mm bis 0,15 mm können keine Risse festgestellt werden. Ab CHD 0,30 mm sind Risse in der Fügezone ähnlich zu den in MDK 2 bis 4 erkennbar (siehe Abbildung 22).

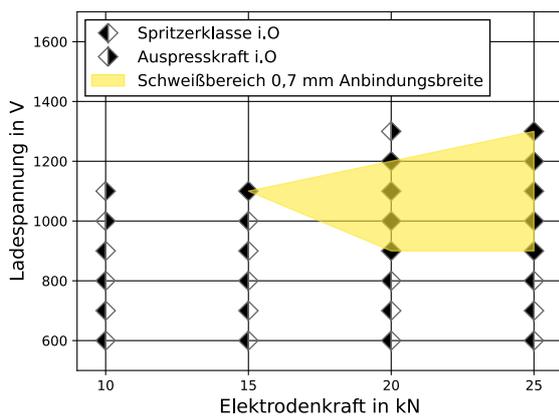


a) 0,15 mm Einhärtetiefe (MDK 6)

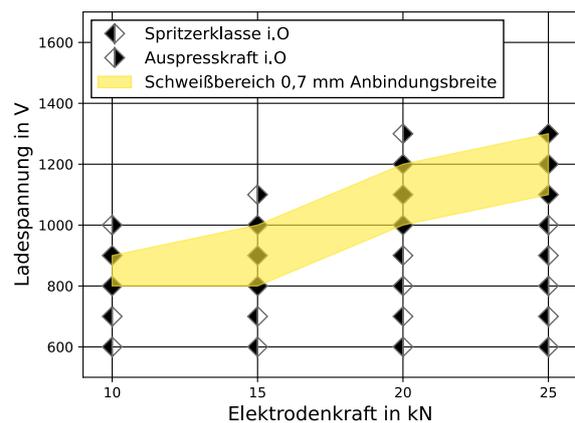
b) 0,30 mm Einhärtetiefe (MDK 7)

Abbildung 22: Querschliff von MDK 6 und MDK 7

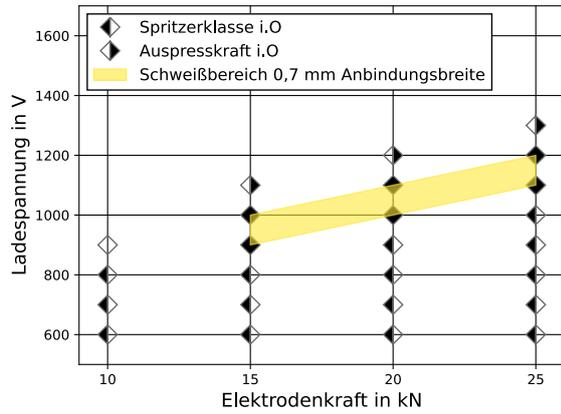
Um den Einfluss der einsatzgehärteten Schichten vertieft zu untersuchen, wurden für die Materialkombinationen 9 bis 17 (Buckelwerkstoff = 16MnCr5, Blechwerkstoff = 16MnCr5), sowohl der Buckel als auch das Blech mit unterschiedlichen Einhärtetiefen geschweißt. Entgegen der Beobachtungen von MDK 1 bis 4 (Blechwerkstoff = S355MC) lassen sich hier Schweißbereiche, selbst bei einsatzgehärteten Buckeln, feststellen (MDK 12 und MDK 15). Allerdings sind diese Bereiche kleiner, als wenn das Blech oder Buckel und Blech einsatzgehärtet ist. Grund hierfür ist das unterschiedlichem Umformvermögen der Grundwerkstoffe.



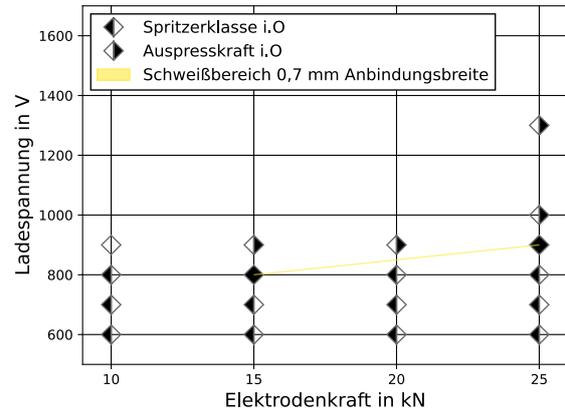
a) Werkstoffkombination 9



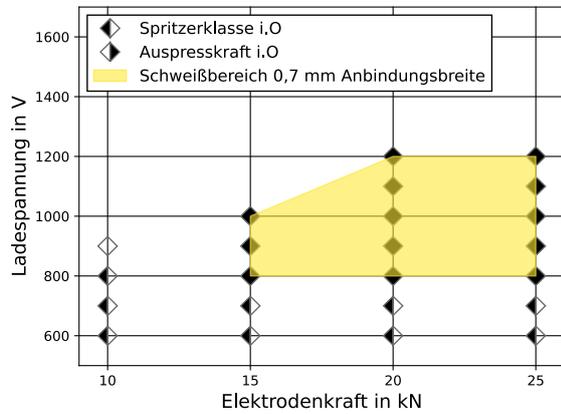
b) Werkstoffkombination 10



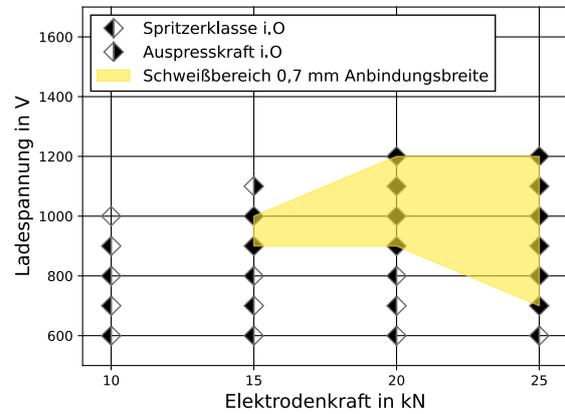
c) Werkstoffkombination 11



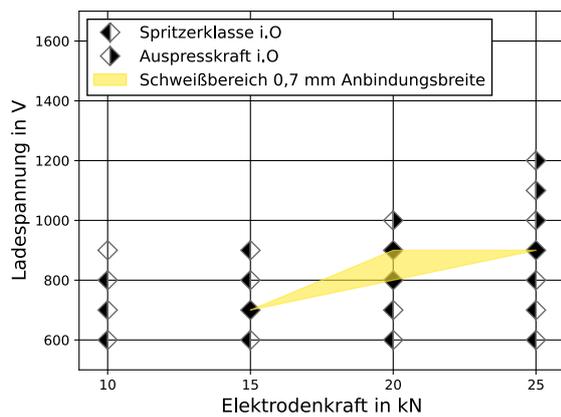
d) Werkstoffkombination 12



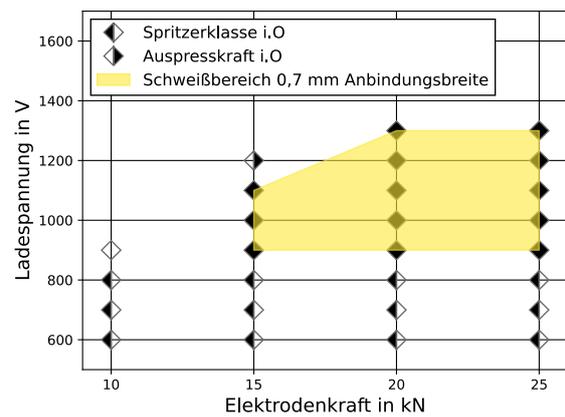
e) Werkstoffkombination 13



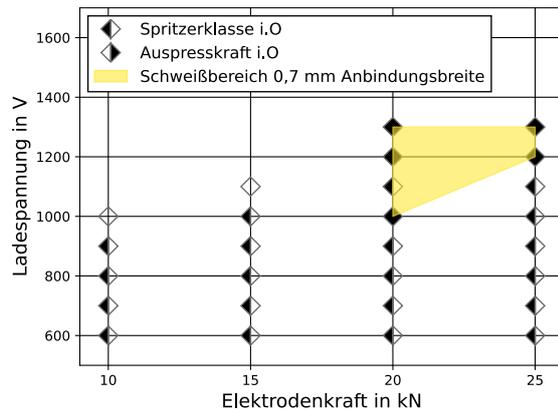
f) Werkstoffkombination 14



g) Werkstoffkombination 15



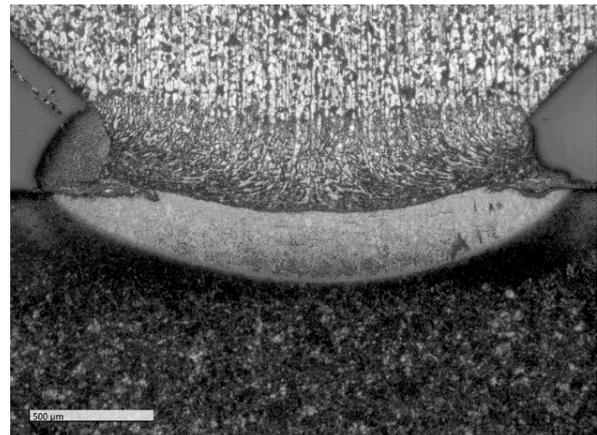
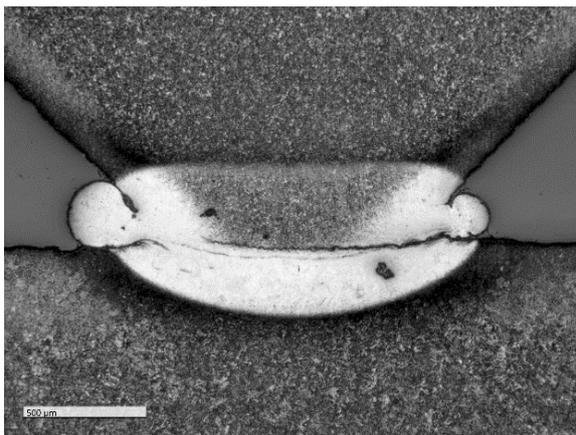
h) Werkstoffkombination 16



i) Werkstoffkombination 17

Abbildung 23: Gegenüberstellung der Schweißbereiche in Abhängigkeit der Einhärtetiefe; Buckelwerkstoff: 16MnCr5, Blechwerkstoff: 16MnCr5

Auffällig sind auch die unterschiedlichen Schweißbereiche bei unterschiedlicher Einhärtetiefe. So vergrößert sich der Schweißbereich durch das Einsatzhärten des Blechs, wenn der Buckel ebenfalls einsatzgehärtet ist (vgl. Abbildung 23d und Abbildung 23e; MDK 12 und MDK 13). Gleiches ist bei MDK 15 und MDK 16 erkennbar (vgl. Abbildung 23g und Abbildung 23h). Allerdings sind auch bei diesen Materialkombination die Verbindungen rissbehaftet, sobald der Buckel einsatzgehärtet ist. (siehe Abbildung 24a). Ist nur das Blech einsatzgehärtet, lassen sich rissfreie Verbindungen herstellen (siehe Abbildung 24a).



a) 0,15 mm Einhärtetiefe Buckel (MDK 14)

b) 0,30 mm Einhärtetiefe Blech (MDK 11)

Abbildung 24: Querschliff von MDK 14 und MDK 11

An den ermittelten Schweißbereichen ist erkennbar, dass die Spritzerneigung stark zunimmt, sobald eine einsatzgehärtete Schicht vorhanden ist. Zusätzlich neigen die einsatzgehärteten Buckel zu Rissen. In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom

Schweißen einsatzgehärteter Bauteile ist eine deutliche Steigerung der Mikrospritzer erkennbar. Auch wenn die einsatzgehärtete Schicht vollständig entfernt wird, begünstigen das mangelnde Umformvermögen (vgl. Abbildung 24a und Abbildung 24b), die Aufhärtung in der Fügezone und der Temperaturgradient senkrecht zur Fügeebene (siehe Abschnitt 9 Prozesssimulation) die Rissentstehung. Um die Verbindungsqualität zu steigern, wird deshalb eine prozessintegrierte Wärmebehandlung untersucht.

8 AP2 – Steigerung der Verbindungsqualität durch Wärmebehandlung

Ziel des zweiten Arbeitspakets ist das Steigern der Verbindungsqualität durch eine prozessintegrierte Wärmebehandlung (in Abhängigkeit der Einsatzhärtetiefe). Dazu wurden folgende drei Methoden angewandt:

1. Prozessintegrierte Induktionserwärmung (siehe Abschnitt 8.1)
2. Nachpulsschweißen nach Petersmann (siehe Abschnitt 8.2)
3. Mehrpulsschweißungen nach Rusch / Stocks (siehe Abschnitt 8.3)

Ziel ist, die Aufhärtung in der Fügezone zu reduzieren und die quasistatische Auspresskraft zu erhöhen. Die Untersuchungen wurden an den Werkstoffkombinationen 9 bis 17 (Blech: 16MnCr5, Buckel: 16MnCr5) durchgeführt.

8.1 Prozessintegrierte Induktionserwärmung

8.1.1 Methodik

Mit der verfügbaren Induktionsanlage war eine Bauteilerwärmung nur vor dem Schweißen möglich. Aufgrund fehlender Schnittstellen konnte eine Wärmebehandlung durch Induktion nach dem KE-Buckelschweißen nicht durchgeführt werden. In Abbildung 25 ist der experimentelle Aufbau dargestellt. Zu sehen ist der Induktor, der um den Ringbuckel platziert ist und somit die Fügezone erwärmt. Es wurden zwei Temperaturen gewählt:

1. Vorwärmen auf 156 °C
2. Vorwärmen auf 205 °C

Die Temperaturen wurden mit einem Thermoelement Typ K erfasst und validiert.



Abbildung 25: Experimenteller Aufbau zur Induktionserwärmung

In AP1 (siehe Abschnitt 7) wurde für die Ermittlung der Schweißbereiche die Auspresskraft ermittelt. In AP2 wird zusätzlich die Aufhärtung in der Fügezone bewertet. In Abbildung 25 ist das prinzipielle Vorgehen der Härtemessung in der Fügezone dargestellt. Es wird die Vickershärte HV1 ermittelt. Die Abstände und die Anordnung der Härtemesspunkte sind in Abbildung 26 dargestellt.

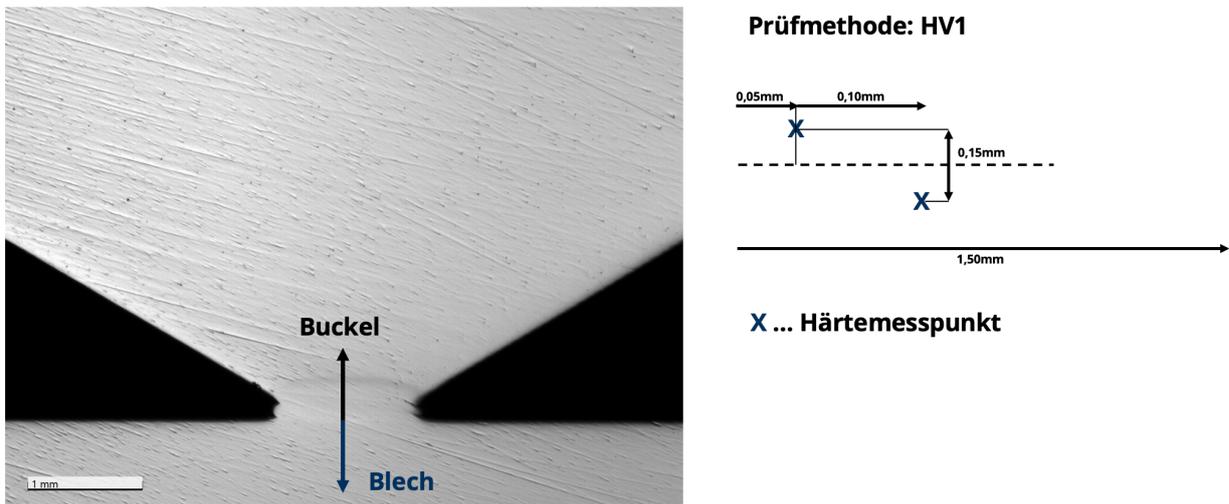
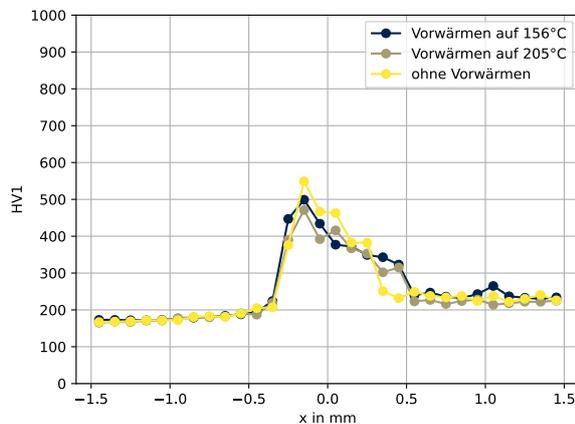


Abbildung 26: Härtemessung der Fügezone

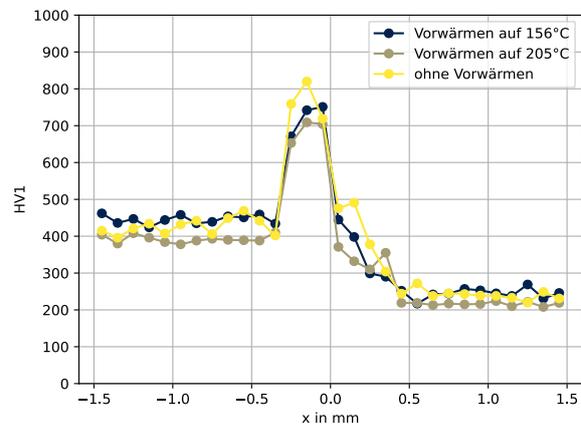
Die Maschinenparameter sind 25 kN Elektrodenkraft und Ladeenergie 14,2 kWs. Die Stromanstiegszeit t_p beträgt dabei 2 ms bei einem Maximalstrom I_{\max} von 140 kA.

8.1.2 Ergebnisse

In Abbildung 27 ist der Vergleich einer nicht einsatzgehärteten MDK (Abbildung 27a) und einer einsatzgehärteten (Abbildung 27b, 0,30 mm CHD-Buckel) ersichtlich. Sowohl das Blech als auch der Buckel sind jeweils aus 16MnCr5 hergestellt. Ohne einsatzgehärtete Schicht entsteht eine Aufhärtung von ca. 500 HV1, sowohl mit als auch ohne induktives Vorwärmen. Für den einsatzgehärteten Buckel ist eine Steigerung der Aufhärtung in der Fügezone auf über 800 HV1 feststellbar. Durch das induktive Vorwärmen kann diese leicht reduziert werden auf 750 HV1 bzw. bei einer Vorwärmtemperatur von 205 °C auf ca. 700 HV1.



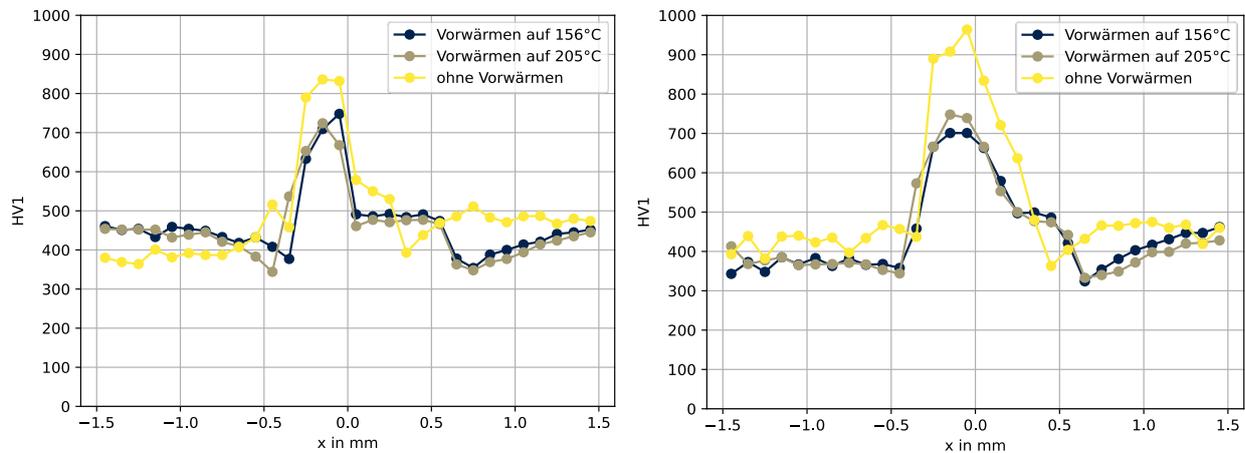
a) Werkstoffkombination 9



b) Werkstoffkombination 11

Abbildung 27: Aufhärtung in der Fügezone für Werkstoffkombination 9 und 11

In Abbildung 28 ist der Einfluss eines einsatzgehärteten Blechs und Buckels auf die Aufhärtung in der Fügezone dargestellt. Dabei wurde die CHD von 0,30 mm im Buckel nicht verändert. In Abbildung 28a beträgt die CHD im Blech 0,15 mm und in Abbildung 28b 0,30 mm. Bei einer CHD von 0,15 mm im Blech sind im Vergleich zum ungehärteten Blech keine Unterschiede in der Aufhärtung erkennbar (ca. 800 HV1). Ab 0,30 mm CHD steigt die Aufhärtung in der Fügezone auf knapp 1000 HV1. Durch das induktive Vorwärmen kann diese Aufhärtung für beide Fälle wieder auf ein ähnliches Niveau wie bereits zuvor herabgesenkt werden. Die Aufhärtung beträgt mit induktiven Vorwärmen ca. 700 HV1, unabhängig von der Einhärttiefe.



a) Werkstoffkombination 14

b) Werkstoffkombination 17

Abbildung 28: Aufhärtung in der Fügezone für Werkstoffkombination 14 und 17

8.2 Schweißen mit Nachpuls

8.2.1 Methodik

In Abbildung 29 ist das Prinzip des Schweißens mit Nachpuls, in Anlehnung an Petersmann dargestellt [12]. Die Zeit zwischen den beiden Pulsen beträgt 13 s, weil in [12] ein erneutes Laden der Kondensatorbank erforderlich war und diese Versuche nachgestellt werden sollten.

Die Schweißparameter sind im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen gleichgeblieben: Elektrodenkraft $F_E = 25 \text{ kN}$, Ladeenergie 1. Puls = $14,2 \text{ kW}$, $t_p = 2 \text{ ms}$ und $I_{\text{max}} = 140 \text{ kA}$. Die Ladeenergie des zweiten Schweißpulses (Nachpuls) beträgt $11,9 \text{ kW}$. Um im späteren Verlauf der Untersuchungen die einzelnen Impulse zu vergleichen, wurde die spezifische Fügeenergie ϵ_{50} nach Rusch ermittelt [22]. Diese beträgt für den 1. Puls $3,37 \text{ kW}/50 \mu\Omega$ und für den 2. Puls $2,96 \text{ kW}/50 \mu\Omega$.

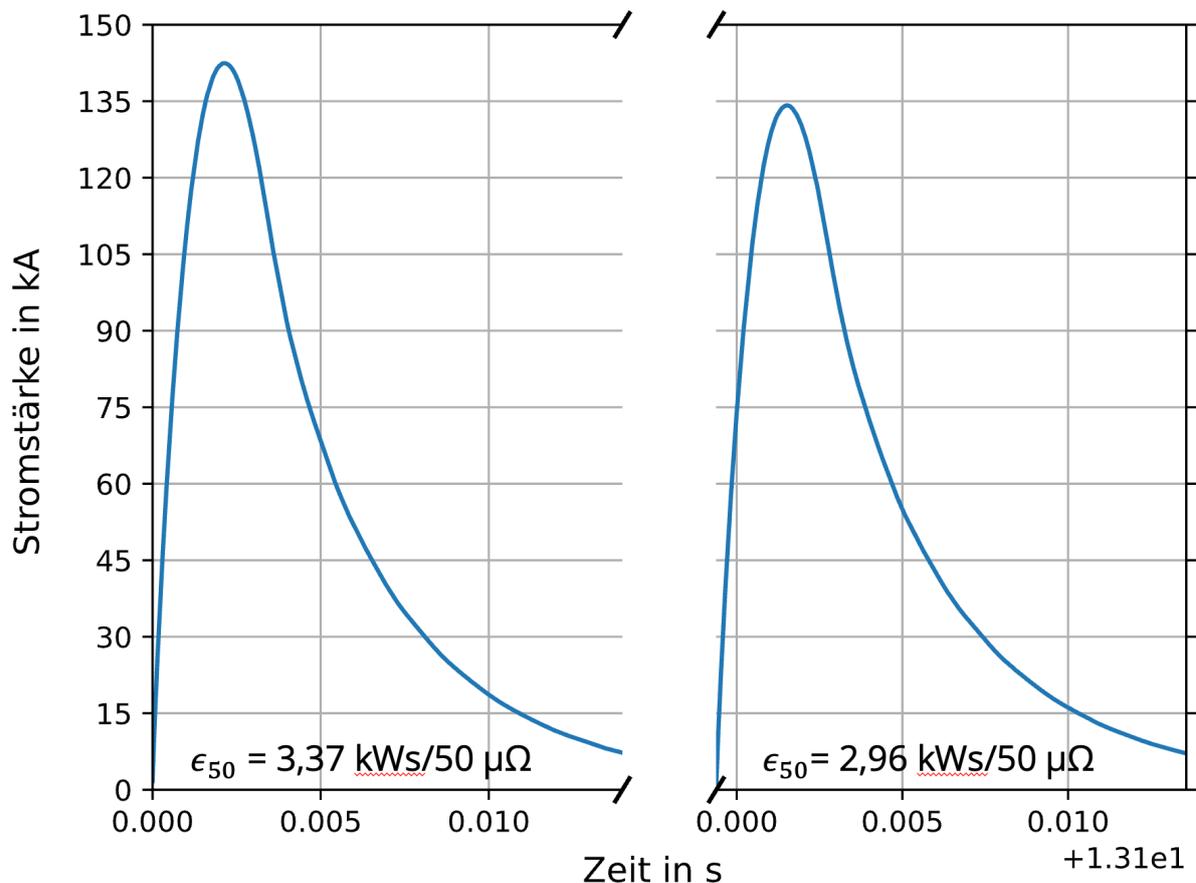
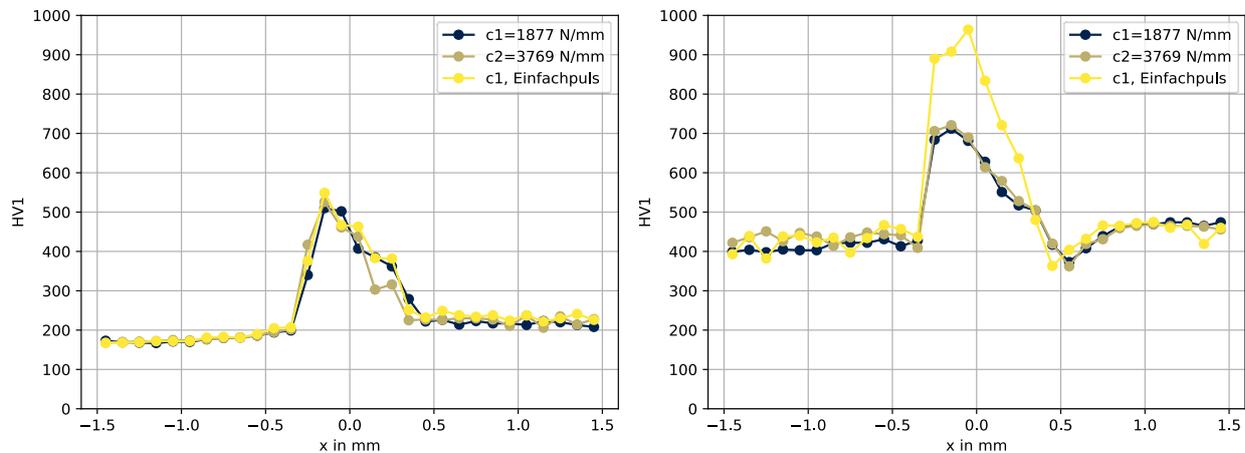


Abbildung 29: Prinzip der Nachpulschweißung nach Petersmann [12]

8.2.2 Ergebnisse

In Abbildung 30 ist die Aufhärtung in der Fügezone mit und ohne Nachpuls dargestellt. Zusätzlich wurden zwei die Nachsetzeinheit mit unterschiedlichen Federkonstanten ausgestattet, um den Einfluss der Mechanik zu bestimmen. Es konnte kein Einfluss der Federkonstante der Nachsetzeinheit auf die Aufhärtung festgestellt werden. In Abbildung 30a ist der Härteverlauf einer nicht einsatzgehärteten Schweißung dargestellt. Die Aufhärtung in der Fügezone bleibt auch mit dem Nachpuls unverändert. Ähnlich wie beim induktiven Vorwärmen, zeigt sich beim Einsatz von einsatzgehärteten Bauteilen ein starker Anstieg der Härte in der Fügezone auf ca. 1000 HV1. Auch hier bewirkt der Nachpuls eine Reduktion der Aufhärtung, wie das induktive Vorwärmen, auf ~700 HV1.



a) Werkstoffkombination 9

b) Werkstoffkombination 17

Abbildung 30: Aufhärtung in der Fügezone in Abhängigkeit des Nachpulses und der Federkonstante c_1 und c_2

8.3 Mehrpulsschweißen

8.3.1 Methodik

Die Mehrkondensator-Schweißanlage bietet nahezu beliebig viele Einstellmöglichkeiten der Strompulse [22]. Die Pulshöhe kann über die jeweilige Ladespannung der Kondensatorbank eingestellt werden, die Verzögerung zwischen den Pulsen ist frei wählbar, gleichzeitiges Schalten entspricht der Änderung der Kapazität, die Pulse können thermisch gekoppelt und somit verstärkt werden (siehe thermische Kopplung nach Stocks [38]). Durch eine getaktete Entladung Zusätzlich können die Pulse abgeflacht werden. Folgende fünf Möglichkeiten des Nachpulses wurden untersucht:

1. Thermisch ungekoppelt, steilster Verlauf
2. Thermisch gekoppelt, abgeflachter Verlauf durch getaktete Entladung
3. Thermisch gekoppelt, abgeflachter Verlauf
4. Thermisch gekoppelt, abgeflachter Verlauf durch getaktete Entladung
5. Thermisch gekoppelt, abgeflachter Verlauf und angepasst durch getaktete Entladung

Nachfolgenden werden die zeitlichen Verläufe der einzelnen Schweißpulse dargestellt. Die Schweißparameter sind ähnlich zu den Versuchen davor mit Ausnahme der Elektrodenkraft. Diese wurde auf 20 kN reduziert, um Risse zu vermeiden.

In Abbildung 31 ist der zeitliche Verlauf der thermisch ungekoppelten Mehrpuls-schweißung mit steilstem Nachpuls dargestellt. Die Verzögerung zwischen den beiden Pulsen beträgt 3,1 Sekunden. Die spez. Fügeenergie ϵ_{50} des 1. Pulses beträgt 1,95 kW_s/50 $\mu\Omega$ und des zweiten 1,82 kW_s/50 $\mu\Omega$.

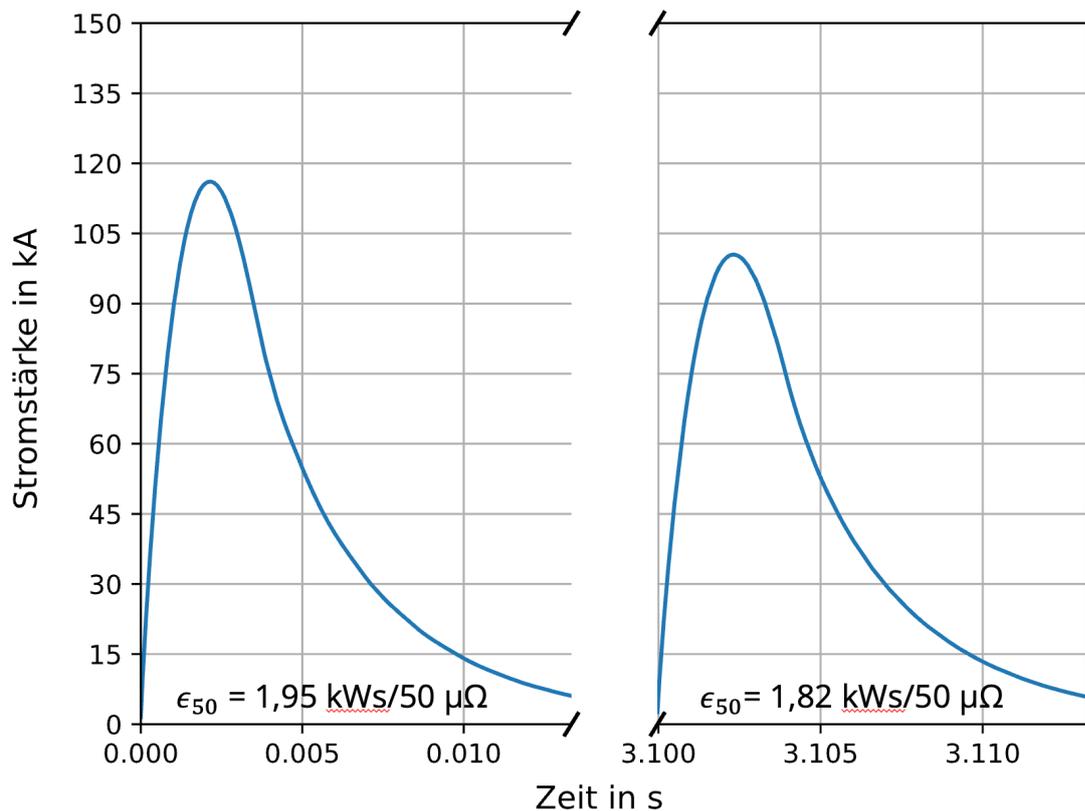


Abbildung 31: Mehrpulsschweißen; thermisch ungekoppelt und ungedämpft

In Abbildung 32 ist der zeitliche Verlauf der thermisch ungekoppelten Mehrpuls-schweißung mit abgeflachtem 2. Schweißpuls dargestellt. Im Unterschied zur steilsten Puls erfolgt die Entladung hier durch eine getaktete Kondensatorentladung (gKE). Damit können die Pulsverläufe nahezu beliebig variiert werden. Bspw. ist in Abbildung 32 die Pulshöhe reduziert auf ca. 75 kA. Und die Schweißzeit ist erhöht. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird hier die spez. Fügeenergie ϵ_{50} konstant gelassen (1,85 kW_s/50 $\mu\Omega$). Die Pausenzeit zwischen den beiden Pulsen beträgt 3 Sekunden.

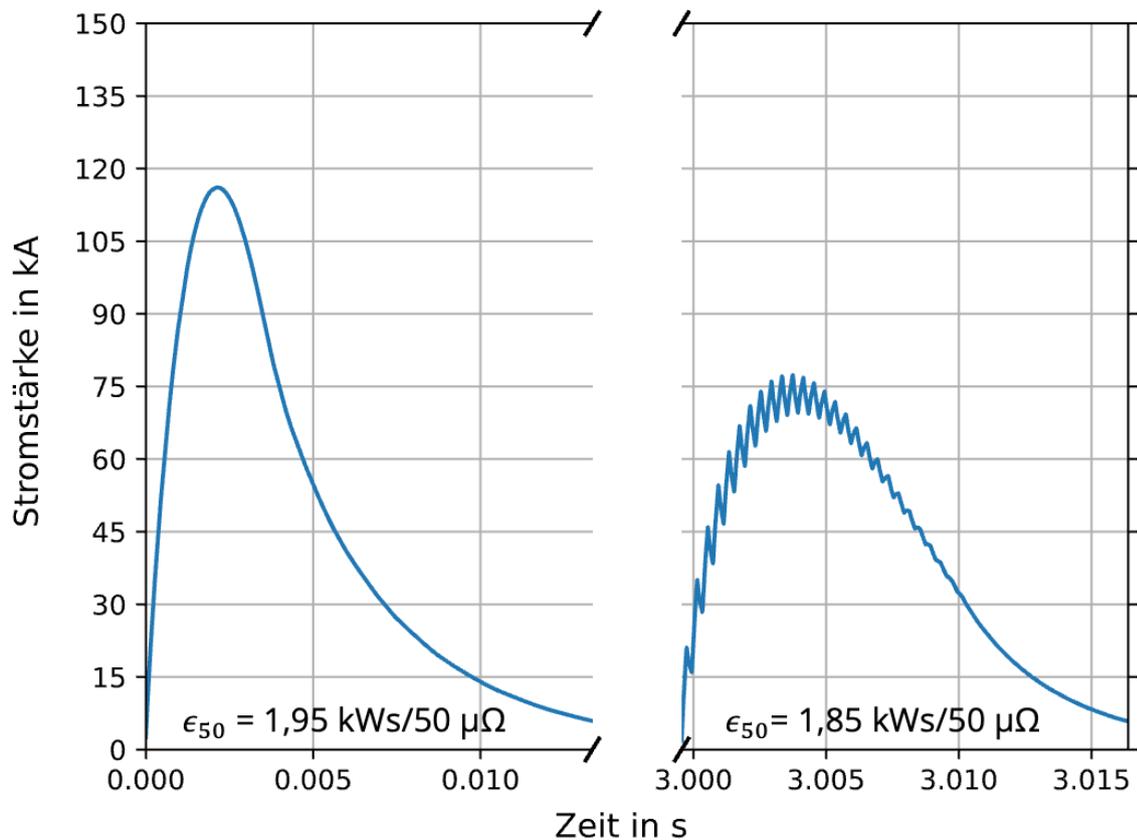


Abbildung 32: Mehrpulsschweißen; thermisch ungekoppelt und gedämpft

In Abbildung 33 ist der zeitliche Verlauf der thermisch gekoppelten Mehrpulsschweißung mit steilem 2. Schweißpuls dargestellt. Zwischen den Pulsen ist keine Pause (thermische Kopplung). Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird hier die spez. Fügeenergie ϵ_{50} des zweiten Pulses nahezu konstant gelassen ($1,77 \text{ kWs}/50 \mu\Omega$).

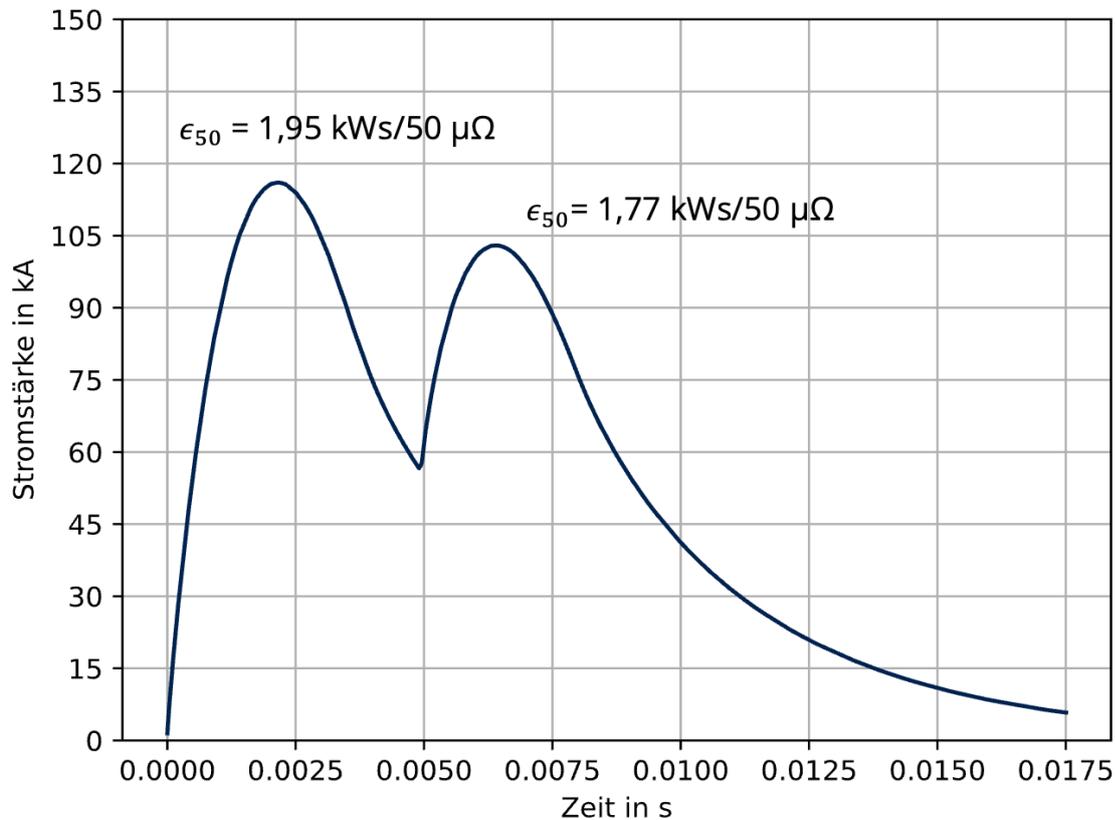


Abbildung 33: Mehrpulsschweißen; thermisch gekoppelt

In Abbildung 34 ist der zeitliche Verlauf der thermisch gekoppelten Mehrpulsschweißung mit abgeflachtem 2. Schweißpuls dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 33 ist die Stromhöhe reduziert und die Schweißzeit ist erhöht. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, beträgt hier die spez. Fügeenergie ϵ_{50} des zweiten Schweißpulses $1,74 \text{ kWs}/50 \mu\Omega$.

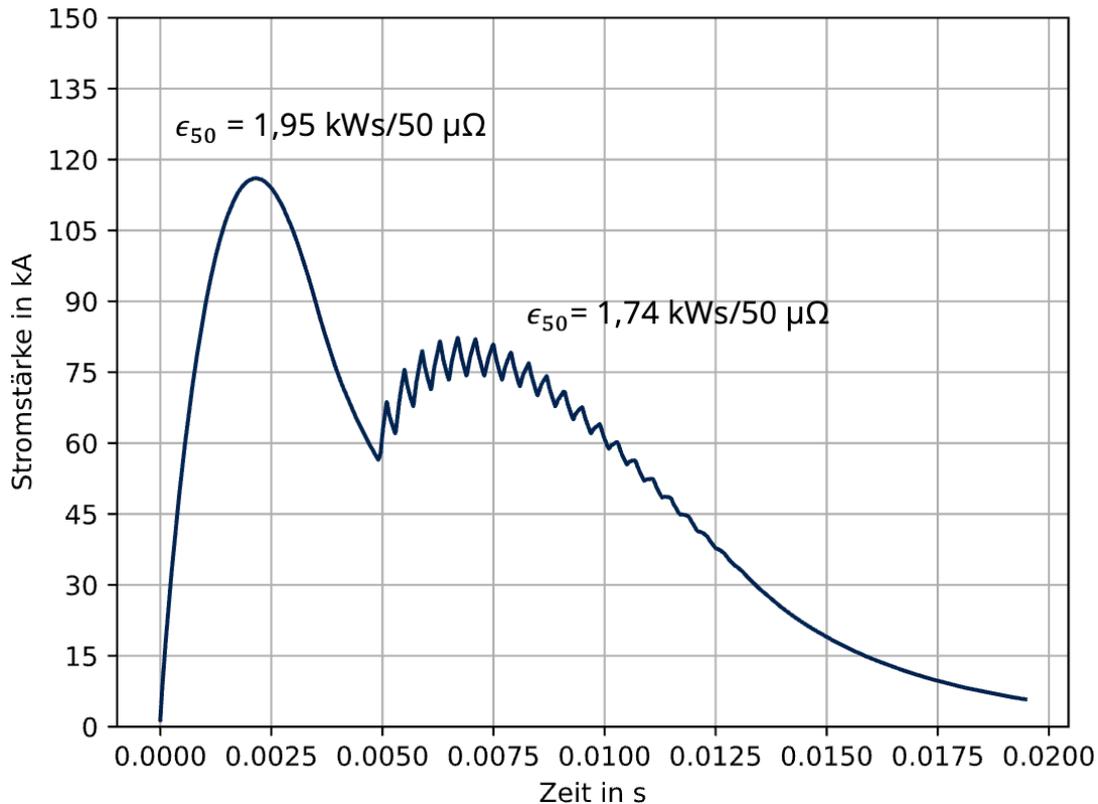


Abbildung 34: Mehrpulsschweißen, thermisch gekoppelt und gedämpft

In Abbildung 35 ist die fünfte Untersuchungseinstellung dargestellt. Hier wurde das Stromprofil so angepasst, dass drei Pulse verwendet werden. Im Vergleich zu Abbildung 34 wurde die Stromstärke des zweiten Pulses erhöht und die Schweißzeit reduziert. Zum Abschluss wird ein Schweißpuls so geschaltet, dass die spez. Fügeenergie ca. $1,80 \text{ kWs}/50 \mu\Omega$ beträgt.

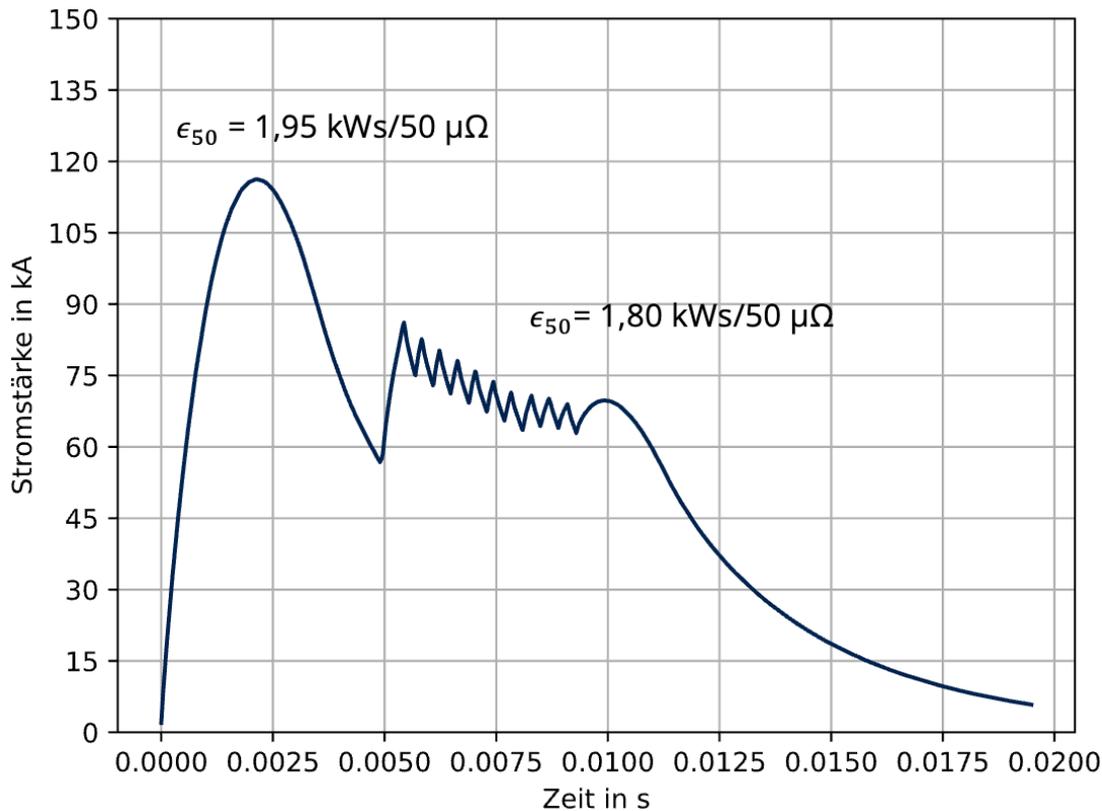
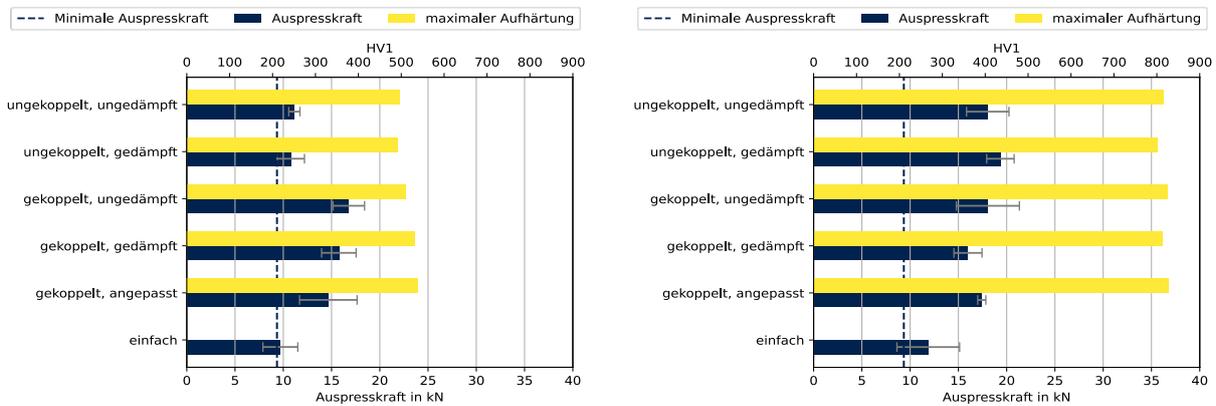


Abbildung 35: Mehrpulsschweißen, thermisch gekoppelt und angepasst

8.3.2 Ergebnisse

In Abbildung 36 sind die Ergebnisse der Auspresskraft und der maximalen Aufhärtung für die Werkstoffkombinationen 9 und 11 für die unterschiedlichen Mehrpulsschweißungen zusammengefasst. In Abbildung 36a ist für die nicht einsatzgehärteten Bauteile eine Steigerung der Aufhärtung erkennbar, wenn das Mehrpulsschweißen eingesetzt wird. Bei den thermisch ungekoppelten Mehrpulsschweißungen ist nicht ersichtlich, ob das signifikant ist. Bei den thermisch gekoppelten Pulsen ist davon auszugehen, da die Mittelwertsunterschiede sehr groß sind (von knapp 10 kN auf ca. 15 kN). Die Unterschiede der Auspresskraft zwischen der Pulsform des zweiten Schweißpulses ist gering. Die Aufhärtung beträgt für alle Pulsformen ca. 500 HV1. Liegt eine einsatzgehärtete Schicht vor, wird die Aufhärtung nach dem Schweißen deutlich höher. In Abbildung 36b bspw. hat das Blech eine 0,30 mm tiefe einsatzgehärtete Schicht (Werkstoffkombination 11). Ebenfalls sind für alle Pulsformen keine signifikanten Unterschiede in der Aufhärtung feststellbar. Im Unterschied zu den nicht einsatzgehärteten Teilen steigt die Auspresskraft an. Aufgrund der Streuung von ca. 2-3 kN je Pulsform sind dort auch kaum Unterschiede in

den Auspresskräften feststellbar. Einzig für die Pulsform „gekoppelt, angepasst“ ist ersichtlich, dass die Streuung sehr gering (< 1kN) ist.

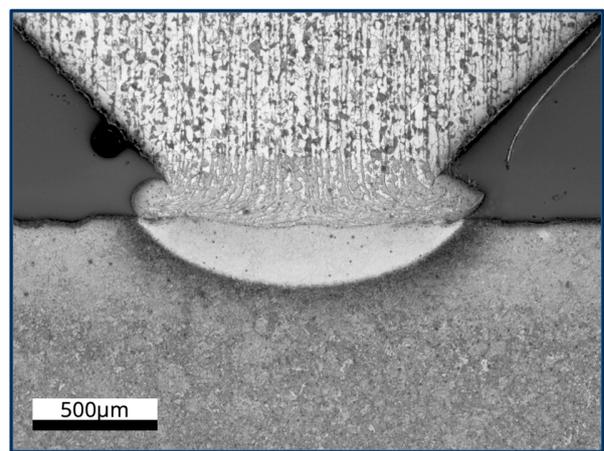
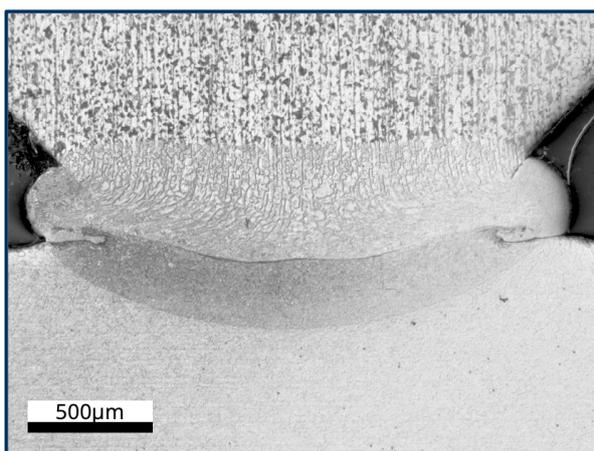


a) Werkstoffkombination 9

b) Werkstoffkombination 11

Abbildung 36: Auspresskraft und maximale Aufhärtung der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 9 und 11

In Abbildung 37 ist je eine Querschliff für die Werkstoffkombination 9 und 11 dargestellt. Diese Querschliffe sind für alle Pulsformen ähnlich. Hierbei ist zu erkennen, dass trotz der höheren Anbindungsbreite für Werkstoffkombination 9 in Abbildung 37a die Auspresskräfte nicht höher sind als für die Werkstoffkombination 11 (siehe Abbildung 37b). Alle Fügeverbindungen sind rissfrei.



a) Werkstoffkombination 9

b) Werkstoffkombination 11

Abbildung 37: Querschliffe der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 9 und 11

In Abbildung 38 und Abbildung 39 sind die Auspresskräfte, die Aufhärtung und die Querschlitze für die Werkstoffkombinationen 15 und 17 dargestellt. Bei Werkstoffkombination 15 handelt es sich um einen einseitig gehärteten Buckel (CHD 0,30 mm) und bei Werkstoffkombination 17 sind beide Bauteile einseitig gehärtet (CHD 0,30 mm). In den Aufhärtungen sind im Vergleich zum einseitig gehärteten Blech geringe Unterschiede feststellbar. Die Aufhärtung beträgt für alle Pulsformen ca. 800 HV1. Bei den Auspresskräften sind deutliche Unterschiede feststellbar. Sobald nur das Blech einseitig gehärtet ist (siehe Abbildung 38a), kann die Mindestanforderung von 10 kN Auspresskraft nicht mehr prozesssicher erreicht werden. Die höchsten Auspresskräfte werden bei der Pulsform „gekoppelt, steil“ erreicht. Allerdings zeigt die Streuung der Auspresskraft, dass bei wenigen Versuchen die Auspresskraft unter 10 kN beträgt. Wird ein einseitig gehärtetes Blech mit einem einseitig gehärteten Buckel verschweißt, können die Anforderungen an die Auspresskraft erfüllt werden. Allerdings ist hierbei eine hohe Streuung zu erkennen. Die höchsten Auspresskräfte konnten hier bei der Pulsform „ungekoppelt, abgeflacht“ erreicht werden.

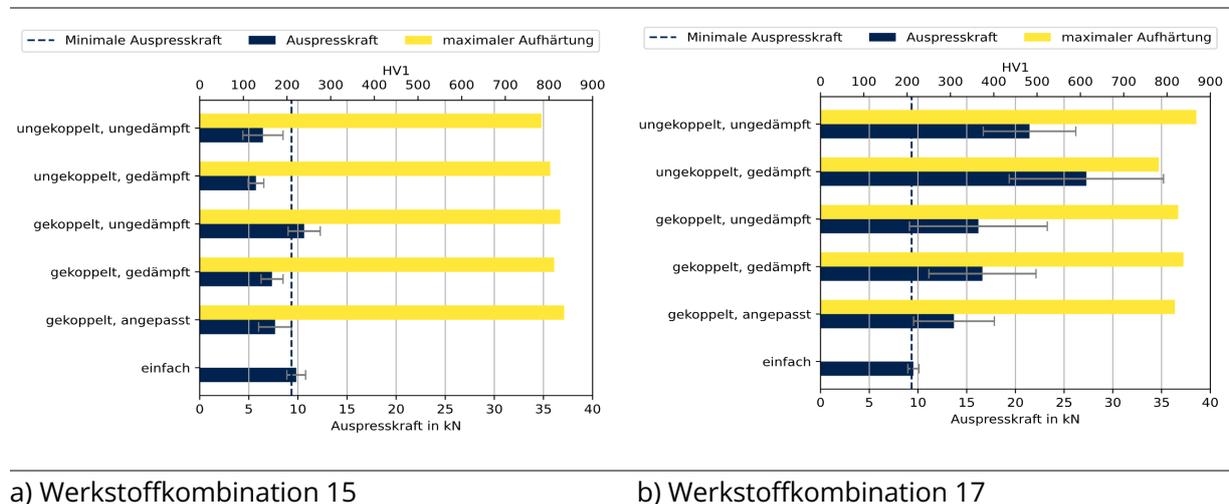


Abbildung 38: Auspresskraft und maximale Aufhärtung der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 15 und 17

Die Fügeverbindungen zeigen vereinzelt Risse, sowohl für den einseitig gehärteten Buckel (Werkstoffkombination 15) als auch für beide (Werkstoffkombination 17) (siehe Abbildung 39). Die Anbindungsbreite nahezu gleich groß.



a) Werkstoffkombination 15

b) Werkstoffkombination 17

Abbildung 39: Querschliffe der Mehrpulsschweißungen für Werkstoffkombination 15 und 17

8.4 Dynamische Beanspruchung

Im tatsächlichen Einsatz werden Buckelschweißverbindungen meist zyklisch beansprucht. Aus diesem Grund wurde die Zeitfestigkeit unterschiedlicher Ringbuckelschweißproben untersucht. Dazu wurde eine Wöhlerlinie ermittelt. In Abbildung 41 sind die Zeitfestigkeitsgeraden über die Spannungsamplitude aller Schweißversuche dargestellt. Dafür wurde folgende Nomenklatur entsprechend der Schweißpulse aus Abschnitt 8.3.1 verwendet:

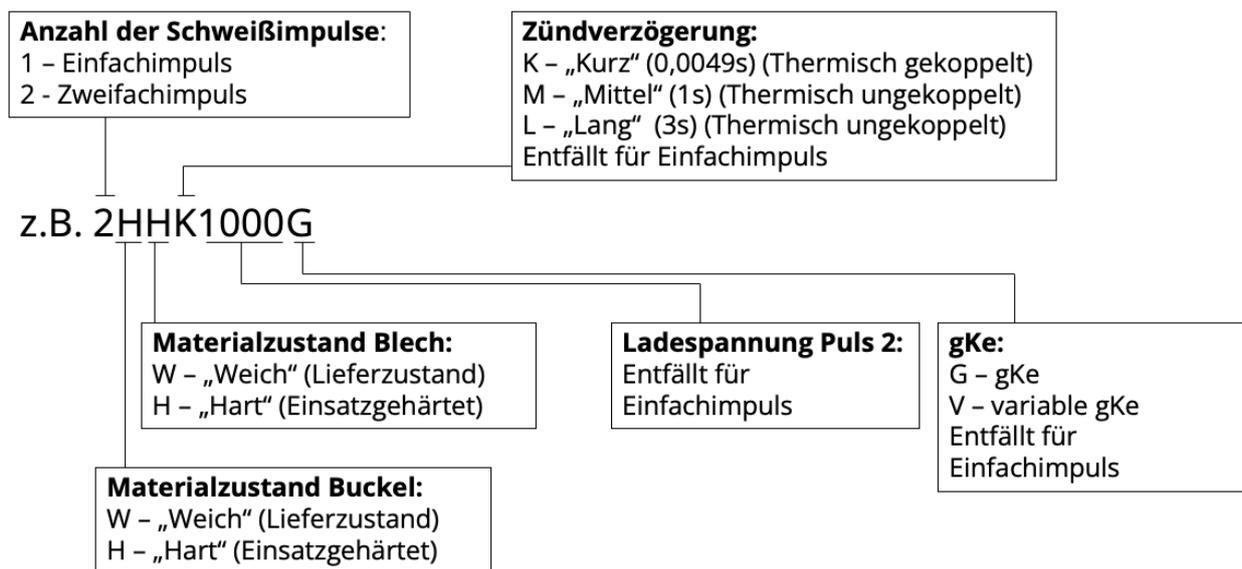


Abbildung 40: Nomenklatur

In Abbildung 41 ist zu erkennen, dass unabhängig von der Werkstoffkombination und den Schweißparametern alle Versuche eine ähnliche Steigung aufweisen (zwischen 4,6 und 5). Ausnahme ist die Einpulsschweißung (1HH). Mit einer Steigung von 3,6 ist das dynamische Verhalten schlechter. Statistisch unterliegt dieses Ergebnis

allerdings Schwankungen. Es konnte aufgrund des geringen Versuchsumfang nicht sichergestellt werden, dass dieser Unterschied signifikant und auf die Einpulsschweißung zurückzuführen ist. Der Übergang in die Dauerfestigkeit befindet sich bei einer Lastamplitude σ_{Amp} von ca. 40 N/mm². Für zwei Konfigurationen (Mehrpulsschweißung, Weich-Hart) liegt dieser Übergang bei ca. 25 N/mm². Der Übergang von der Kurzzeitfestigkeit zur Zeitfestigkeit liegt bei ca. 100 N/mm². Wie auch bei der Reduktion der Aufhängung können auch hier Unterschiede zwischen den Pulsformen und Materialkombinationen festgestellt werden. Inwiefern diese Unterschiede bei der zyklischen Beanspruchung signifikant sind, ist nicht abschätzbar. Die Anstiege sind nahezu ähnlich.

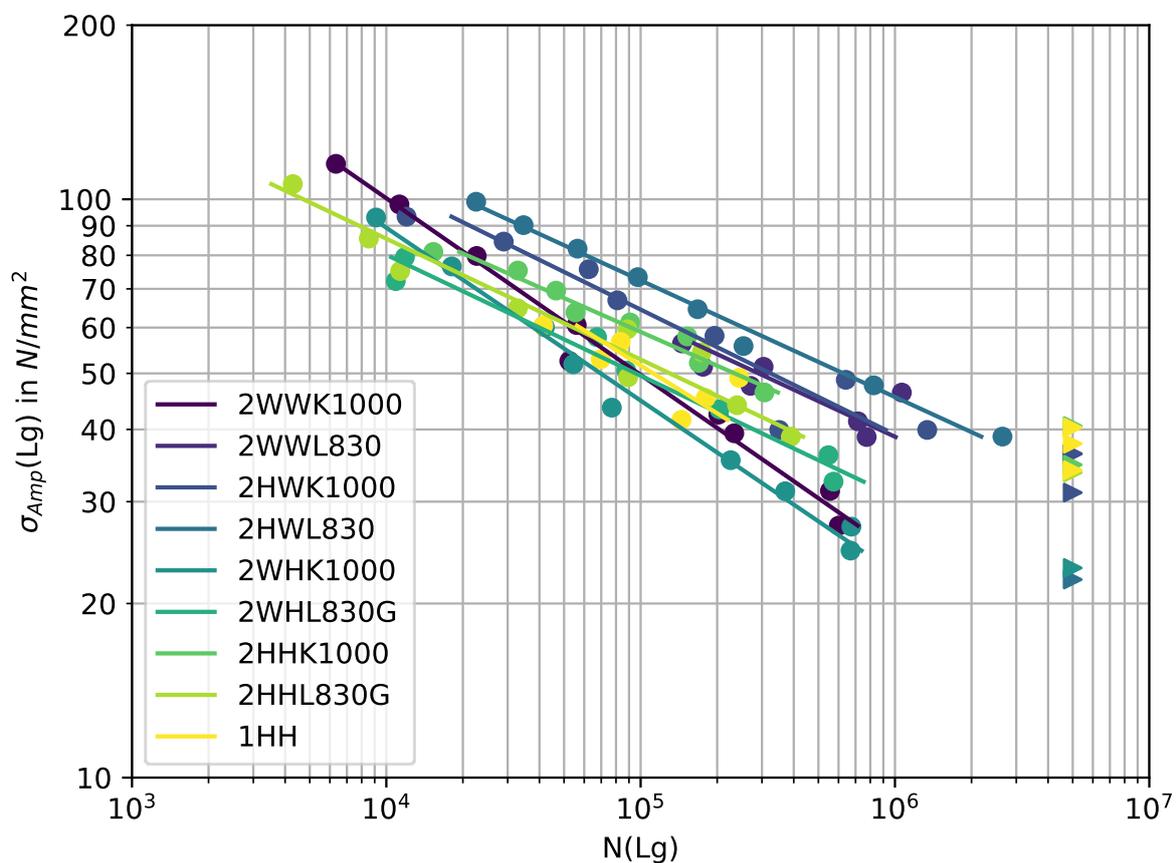


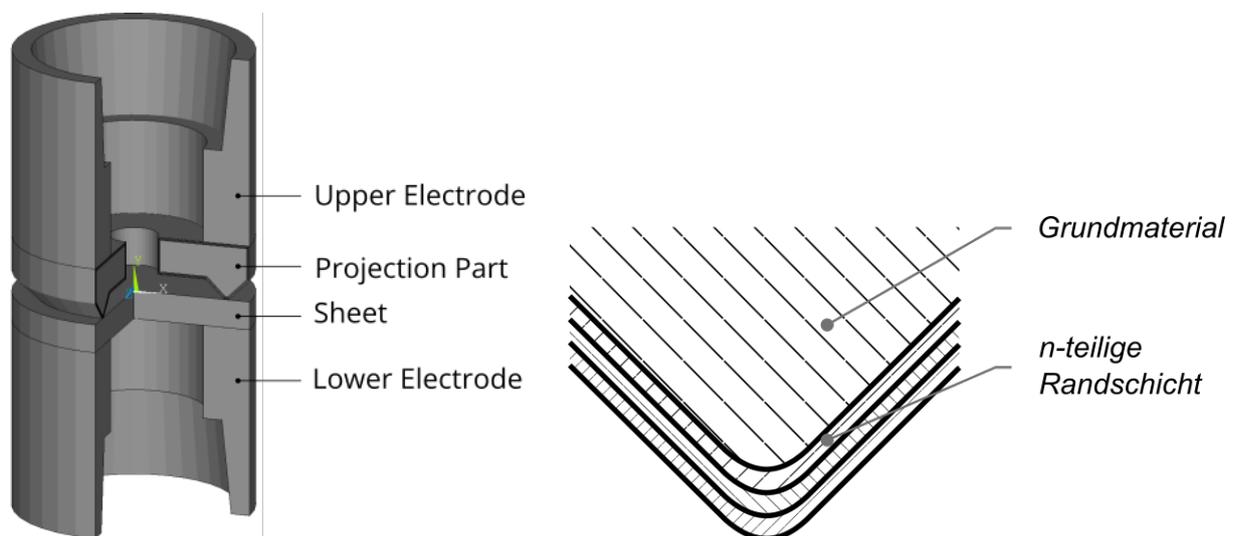
Abbildung 41: Zeitfestigkeitsgeraden aller Schweißversuche

Es wurden zusätzlich noch schlagartige Versuche durchgeführt. Das Protokoll mit den Ergebnissen befindet sich im Anhang A.

9 AP3 - Prozesssimulation einsetzgehärteter Schichten

9.1 Modellbildung

Für die Prozesssimulation kommen am Lehrstuhl bestehende Simulationsmodelle zu Einsatz, welche um die einsetzgehärteten Schichten erweitert werden. Abbildung 42 a) zeigt die Komponenten, die im Simulationsmodell abgebildet sind: Obere und untere Elektrode, Ringbuckel und Blech. Die Implementierung der einsetzgehärteten Schicht ist im Randbereich des Ringbuckels zu erkennen. Einsatzgehärtete Schichten weisen gegenüber dem Grundwerkstoff veränderte Materialeigenschaften und Eigenspannungen auf. Innerhalb der FEM-Simulation sind Materialeigenschaften Parameter, welche den Elementen zugewiesen werden. Ohne Randschicht kann ein Körper für die FEM mit Elementen vernetzt werden, welche alle die gleichen Eigenschaften aufweisen. Für die Implementierung der Randschicht ist es allerdings notwendig, die Materialeigenschaften in Abhängigkeit vom Ort zuzuweisen. Dafür wird der Körper geometrisch in zwei Bereiche eingeteilt: Der erste Bereich ist der Kern, welcher die Eigenschaften des Grundwerkstoffes aufweist. Der zweite Bereich ist die Randschicht, welche die Eigenschaften der Randschicht aufweist.



a.) Dreiviertelschnitt der Komponenten b.) Aufbau der Randschicht

Abbildung 42: Geometrischer Aufbau des Simulationsmodells

Die Materialeigenschaften und Eigenspannungen variieren allerdings auch innerhalb der Randschicht. Das ist auf den örtlich veränderlichen Kohlenstoffgehalt und den zeitlichen Temperaturverlauf, der ebenfalls vom Ort abhängt, bei der Abkühlung zurückzuführen. Die Eigenschaften der Randschicht verändern sich kontinuierlich mit dem Abstand zum Bauteilrand, wie Abbildung 43 zeigt. Materialeigenschaften, die sich räumlich kontinuierlich verändern, können in FEM Simulationen mit Hilfe von Phasenfeldern implementiert werden. Allerdings ist dafür die Einführung weiterer Differentialgleichungen notwendig, welche die Grenze zweier Phasen unterschiedlicher Eigenschaften beschreiben. Die Phasen sind in diesem Fall die Randschicht und der Kern. Da die Prozesssimulation von KE-Buckelschweißprozessen bereits sehr aufwändig hinsichtlich der Berechnungszeit ist und die Lösung der Phasenfeldgleichungen zusätzlichen Berechnungsaufwand bedeutet, wird diese Methode nicht eingesetzt. Die kontinuierlich veränderlichen Randschichteigenschaften werden durch eine diskrete Einteilung und mehrere Unterschichten approximiert. Jeder Unterschicht werden Eigenschaften zugewiesen, die bei dem entsprechenden Kohlenstoffgehalt gelten. Dieses Vorgehen ist ebenfalls in **Error! Reference source not found.** dargestellt, dort beispielhaft für eine Einteilung in vier Unterschichten. Die Einteilung in Unterschichten der Randschicht erfolgt geometrisch, wie in Abbildung 42b dargestellt.

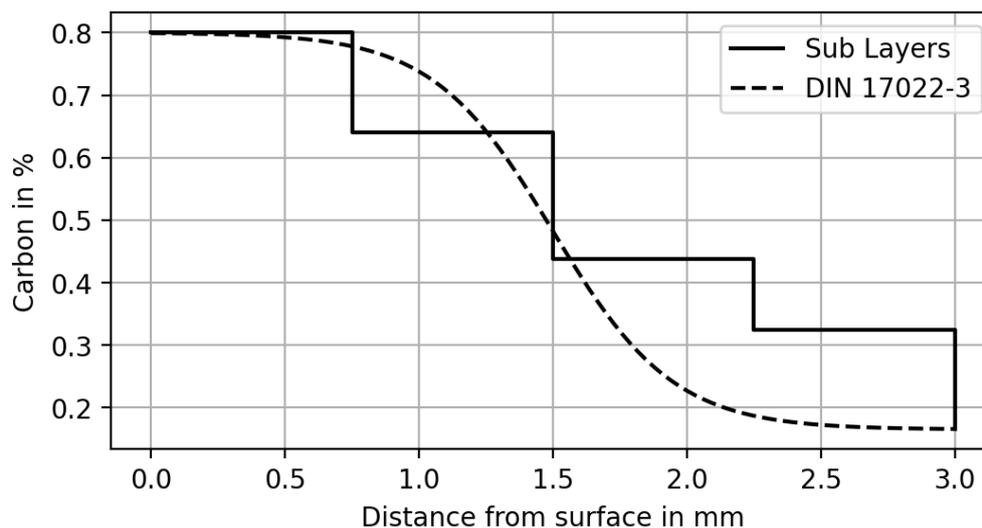


Abbildung 43: Verlauf Kohlenstoffanteil in Abhängigkeit des Randabstands

Tabelle 4 zeigt die Materialeigenschaften, die für die Simulation des Schweißprozesses notwendig sind am Beispiel des Buckelwerkstoffes 16MnCr5. Im Vergleich zu den

Eigenschaften im Kern steigt der spezifische elektrische Widerstand und die spezifische Wärmeleitfähigkeit sinkt. Das ist auf den erhöhten Anteil von Legierungselementen (Kohlenstoff) zurückzuführen. Daraus kann geschlossen werden, dass mehr Wärme bei gleicher elektrischer Leistung entsteht und die Wärme schlechter abtransportiert wird. Die umgewandelte Wärmemenge an der Fügezone wird durch den fließenden Strom über den Kontakt sowie den elektrischen Kontaktwiderstand bestimmt. Durch die verringerten elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten wird eine höhere Temperatur in der Fügezone für gehärtete Komponenten erwartet. Allerdings nimmt die spezifische Wärmekapazität in der Randschicht zu. Das bedeutet, dass weniger der eingebrachten Wärmemenge in Temperatur umgesetzt wird. Das führt im Gegenzug zu verringerten Temperaturen. Welcher der beiden Effekte im Schweißprozess überwiegt, kann nur durch die Simulation des Prozesses ermittelt werden. Der Wärmeausdehnungskoeffizient sinkt in den gehärteten Bereichen. Bei gleicher Temperaturverteilung wird erwartet, dass die Ausdehnung des Buckels geringer ist. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ist die Veränderung der Streckgrenze maßgeblich. Da die Streckgrenze deutlich ansteigt, wird erwartet, dass die Deformation des Buckels bei gleicher mechanischer Last deutlich geringer ist.

Tabelle 4: Materialdaten 16MnCr5 im Kernbereich und der Randschicht bei Raumtemperatur

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert Kern	Maximum Randschicht
Dichte	ρ	$\frac{g}{cm^3}$	7,83	7,76
Wärmeausdehnungskoeffizient	α	$\frac{1}{K}$	25,45	25,02
Spezifische Wärmeleitfähigkeit	λ	$\frac{W}{mK}$	41,73	33,27
Spezifischer Elektrischer Widerstand	ρ_{el}	Ωm	0,23	0,29
E-Modul	E	GPa	210,48	209,34
Poissonzahl	ν	1	0,29	0,29
Spezifische Wärmekapazität	c_p	$\frac{J}{gK}$	0,45	0,57
Streckgrenze	σ_y	MPa	564	2521

In Folge des raschen Abkühlens werden in der Randschicht Eigenspannungen erzeugt. Das rasche Abkühlen führt zu Druckeigenspannungen, die ebenfalls vom Abstand zum Bauteilrand abhängen. Die Literatur zeigt, dass Druckeigenspannungen bis zu 600MPa entstehen. Für die Implementierung der Druckeigenspannungen in der Randschicht ist es notwendig, den gesamten Spannungszustand für das Bauteil zu berechnen. Dafür wird eine separate Simulation durchgeführt, bei der die Druckeigenspannungen in der Randschicht als Randbedingung vorgegeben werden. Weitere Randbedingungen werden nicht vorgegeben. Bei vorgegebener Druckeigenspannung im Randschichtbereich stellt sich eine entsprechende Deformation des Buckels sowie der zugehörige Spannungszustand im Kern des Bauteils ein. Geometrie und Spannungszustand des gesamten Bauteils dienen anschließend als Startbedingung für die Simulation des Schweißprozesses. Der Simulationsprozess ist in einem Ablaufdiagramm in Abbildung 44 dargestellt.

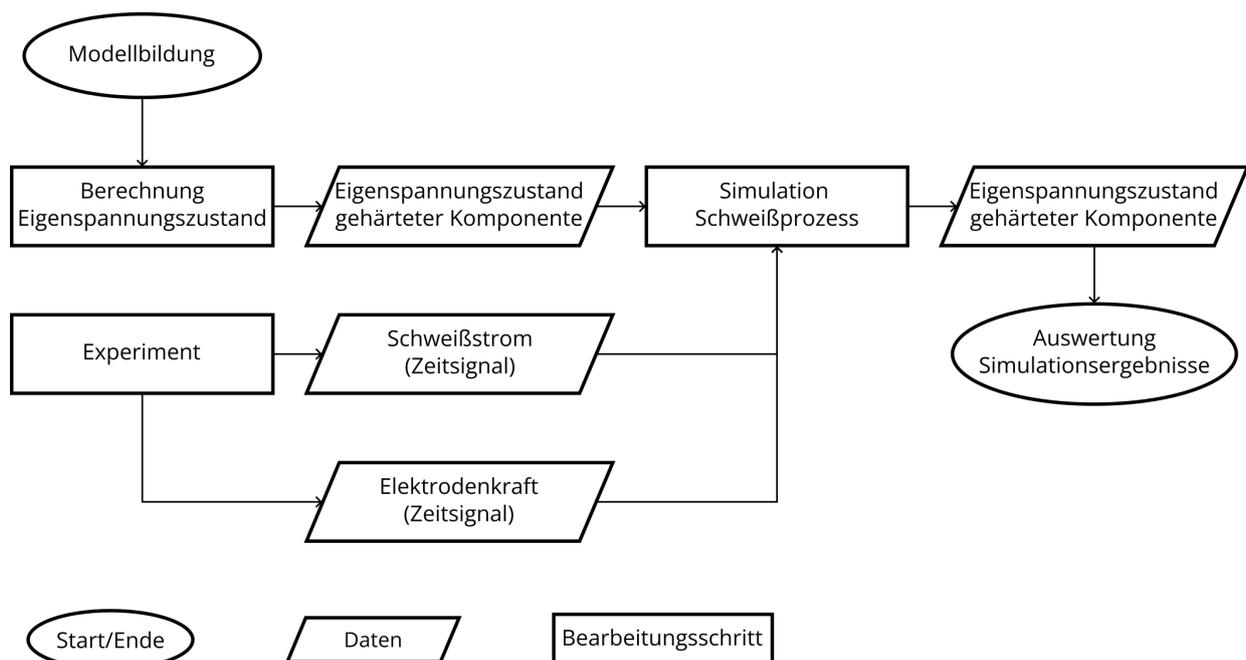


Abbildung 44: Ablauf der Schweißprozesssimulation

Die Simulation des Prozesses wird im Rahmen des Projekts genutzt, um die Ursachen für die experimentell gewonnenen Erkenntnisse zu ermitteln und das Verständnis für den gesamten Prozess zu vertiefen. Um die Vergleichbarkeit mit den Experimenten sicherzustellen, werden im Experiment gemessene Prozessgrößen

(Schweißstrom und Elektrodenkraft) als Randbedingungen für die Simulation verwendet. Der Verlauf des Schweißstroms für einen gehärteten und einen ungehärteten Buckel ist in Abbildung 45 dargestellt.

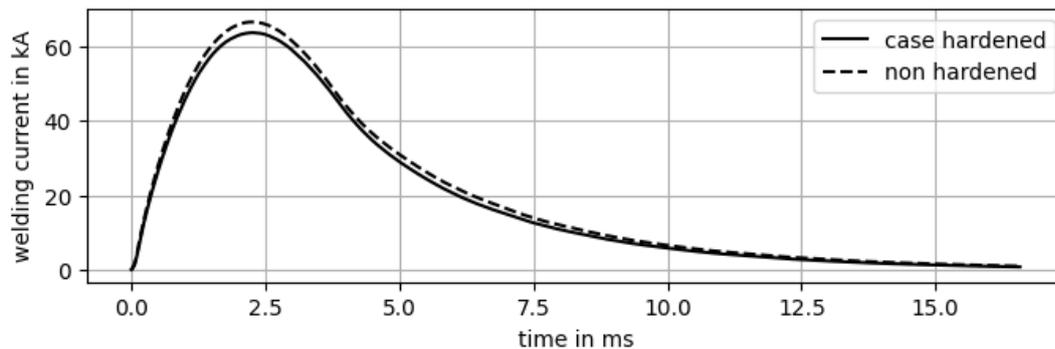


Abbildung 45: Gemessener Verlauf des Schweißstroms (Randbedingung in Simulation)

9.2 Darstellung der Simulationsergebnisse

Abschnitt 3.7 zeigt, dass die wesentliche Prozessphase für die Ausbildung der Verbindung die Aktivierungsphase ist. Daher wird die Auswertung der Simulationsmodelle in dieser Prozessphase durchgeführt. Die Ausbildung der Verbindung findet im Kontakt von Buckel und Blech statt. Daher werden in der Auswertung die Kontaktgrößen: Kontaktwiderstand, Temperatur in der Kontaktfläche, Kontaktdruck sowie die Deformation des Buckels und des Blechs in der Umgebung der Aufstandsfläche ausgewertet. Um den Einfluss der gehärteten Randschicht auf den Prozess zu verstehen, wird eine Simulation mit und eine Simulation ohne Randschicht miteinander verglichen. Als Buckelwerkstoff wird 16MnCr5 und als Blechwerkstoff wird S355MC verwendet. Für die Simulation mit Randschicht wird eine Einhärtetiefe von 0,8mm angenommen.

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die Deformation des ungehärteten und des gehärteten Buckels im globalen Koordinatensystem der Simulation. Auf der Abszisse ist die x-Koordinate dargestellt, die in diesem Fall dem Radius vom Zentrum des rotationssymmetrischen Bauteils entspricht. Auf der Ordinate ist die Distanz von der Buckelspitze angegeben. Um die Deformation deutlicher darzustellen, ist der Abstand von der Buckelspitze in μm angegeben, während der Radius in mm angegeben ist. Der schraffierte Bereich zeigt den Buckel. Die zeitliche Entwicklung der Deformation ist vom Startzeitpunkt, bei dem die Elektrodenkraft bereits appliziert ist, bis zur

Prozesszeit von 1 ms dargestellt, bei welcher bereits Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur erreicht werden. Bis zu einer Prozesszeit von 0,5 ms kann wenig Deformation festgestellt werden. Ab 0,75 ms beginnt sich am Rand der Aufstandsfläche des ungehärteten Buckels eine konvexe Wölbung auszubilden. Diese wird bis zum Zeitpunkt von 1 ms deutlich größer. Das gleiche Verhalten kann am gehärteten Buckel beobachtet werden. Allerdings ist die Aufstandsfläche, die an der Breite der deformierten Buckelkontur abgelesen werden kann, etwas größer. Bereits zum Beginn des Prozesses ist die Kontaktfläche zwischen gehärtetem Buckel und Blech um 8,4% höher als zwischen ungehärtetem Buckel und Blech.

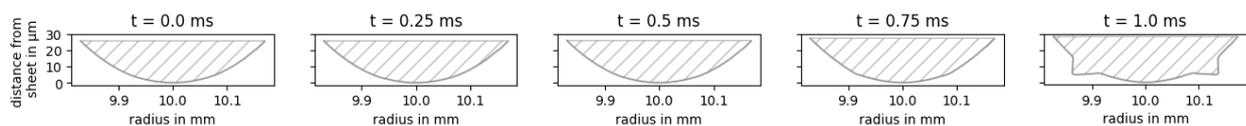


Abbildung 46: Deformation des ungehärteten Buckels während der Aktivierung

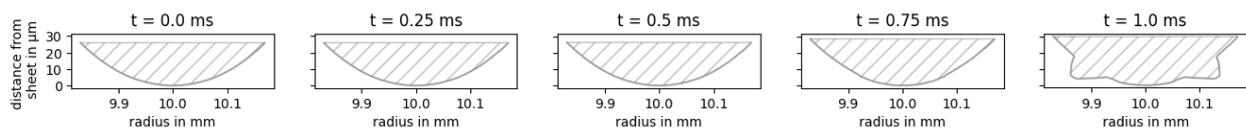


Abbildung 47: Deformation des gehärteten Buckels während der Aktivierung

Error! Reference source not found. und **Error! Reference source not found.** zeigen den Kontaktdruck. Für diese und die folgenden Darstellungen wird die Kontur der aktuellen Buckelform als Abszisse verwendet. Die Ordinate ist normal zur Kontur ausgerichtet. Der Kontaktdruck weist für den Beginn des Prozesses in beiden Fällen nahezu gleiche Werte sowie einen qualitativ identischen Verlauf auf. Für den ungehärteten Buckel beginnt der Kontaktdruck bereits bei 0,25 ms zu sinken. Beim gehärteten Buckel ist dieses Verhalten viel später, bei 0,75 ms, zu erkennen. Da die Elektrodenkraft unverändert wirkt, ist das Sinken des Kontaktdruckes auf Veränderungen der Kontaktsituation zurückzuführen. Durch steigende Temperaturen fallen E-Modul und Streckgrenze des Materials. Dadurch kann weniger Kraft pro Fläche im Kontakt aufgenommen werden. Die Folge ist, dass die Kontaktfläche größer wird. Im Fall des gehärteten Buckels zeigt sich, dass dieser in das Blech eindringt, bis die Steigerung der Kontaktfläche ausreicht, um die geringere Festigkeit des Materials zu kompensieren. Dabei unterscheidet sich das Verhalten des gehärteten Buckels von dem des ungehärteten. Der gehärtete Buckel weist geringere Werte des Kontaktdrucks auf. Die Differenz zum ungehärteten Buckel steigt mit zunehmender

Prozesszeit. Der geringere Kontaktdruck sowie die vergrößerte Kontaktfläche sind auf die Steifigkeit des gehärteten Buckels zurückzuführen, der Buckel dringt dadurch mehr in das weichere Blech ein und bildet eine größere Kontaktfläche aus.

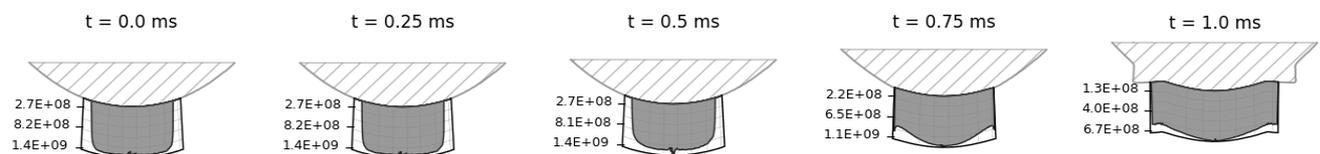


Abbildung 48: Kontaktdruck in Pa des ungehärteten Buckels während der Aktivierung

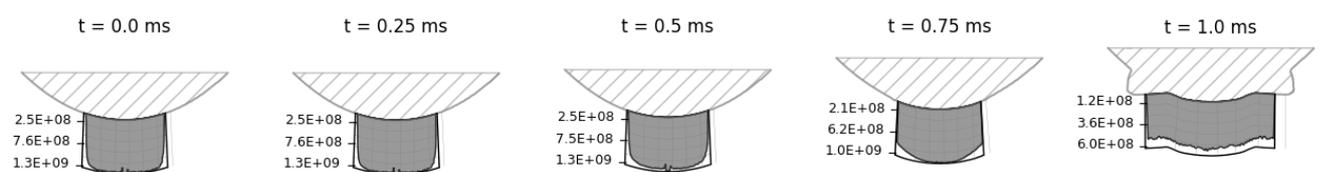


Abbildung 49: Kontaktdruck in Pa des gehärteten Buckels während der Aktivierung

Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Kontaktleitfähigkeit. Die Darstellungsweise ist analog zu der des Kontaktdrucks. Zu Beginn des Prozesses ist die Temperatur gleichmäßig verteilt (Raumtemperatur). Der Kontaktdruck ist am gehärteten Buckel zwar etwas geringer als am ungehärteten Buckel, allerdings wirkt sich dieser Unterschied nicht erkennbar auf die Kontaktleitfähigkeit aus. Im Prozessverlauf sinkt die Kontaktleitfähigkeit aufgrund steigender Temperaturen in beiden Fällen. Die Kontaktleitfähigkeit des ungehärteten Buckels sinkt stärker als die des gehärteten Buckels. Am Ende der Aktivierungsphase steigt die Kontaktleitfähigkeit in beiden Fällen lokal stark an. In diesen Bereichen des Kontakts wird die Schmelztemperatur des Materials überschritten. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass das Material beider Körper miteinander verbunden ist. Daher sieht die Implementierung der Kontaktleitfähigkeit vor, dass die allein Leitfähigkeit des Materials für den Kontakt gilt. Zusätzliche elektrische Widerstände durch Oberflächenrauheit sowie Oberflächenschichten existieren nicht mehr. Um den Einfluss der stark lokalisierten Maxima der Kontaktleitfähigkeit zu bewerten, kann die globale Kontaktleitfähigkeit durch Integration über die aktuelle Kontaktfläche berechnet werden. Hier zeigt sich, dass die globale Leitfähigkeit am gehärteten Buckel bis zu 0,75 ms zwischen 3,3% und 5,8% geringer ist. Am Ende der Aktivierungsphase wird die Abweichung jedoch deutlich größer und steigt auf 38,8%.

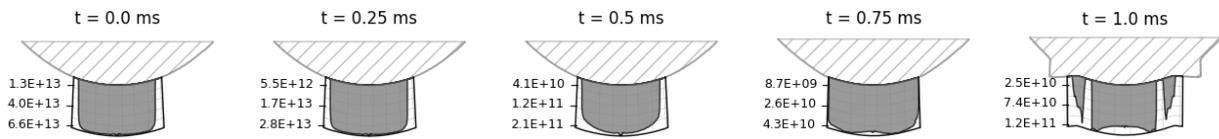


Abbildung 50: Kontaktleitfähigkeit in S/m² des ungehärteten Buckels während der Aktivierung

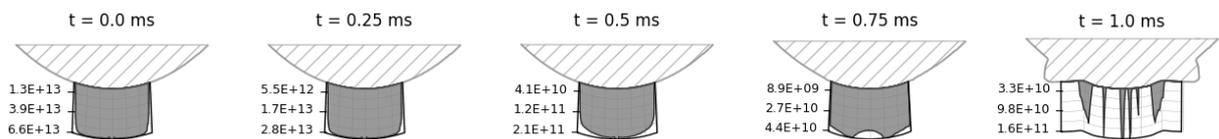


Abbildung 51: Kontaktleitfähigkeit in S/m² des gehärteten Buckels während der Aktivierung

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Temperatur am Kontakt. Zu Beginn weisen die Kontakte in beiden Fällen eine gleichmäßig verteilte Temperatur (Raumtemperatur) auf. Bis zu einer Prozesszeit von 0,5 ms steigen die Temperaturen in beiden Fällen gleichermaßen an. Das zeigt, dass die geringfügig niedrigeren Leitfähigkeiten des gehärteten Buckels zunächst keine Auswirkung haben. Ab einer Prozesszeit von 0,75 ms treten am gehärteten Buckel aufgrund der niedrigeren Kontaktleitfähigkeiten deutlich höhere Temperaturen auf. Da höhere Temperaturen die elektrische Leitfähigkeit der angrenzenden Materialien und damit auch des Kontakts reduzieren, beginnt hier ein selbstverstärkender Prozess. Die Temperatur des gehärteten Buckels wird daher immer mehr steigen als die des ungehärteten Buckels.

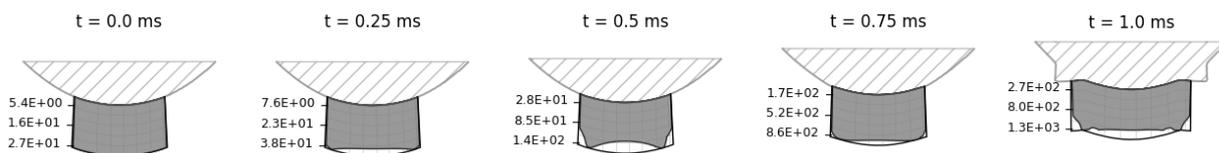


Abbildung 52: Kontakttemperatur in K des ungehärteten Buckels während der Aktivierung

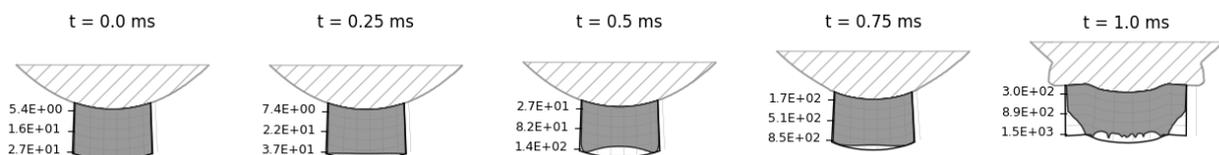


Abbildung 53: Kontakttemperatur in K des gehärteten Buckels während der Aktivierung

9.3 Diskussion und Einordnung Simulationsergebnisse

Zusammenfassend zeigen die Simulationsergebnisse, dass die Temperatur bis zum Ende der Aktivierungsphase bei gehärteten Buckeln stärker ansteigt als bei ungehärteten Buckeln. Die Ursache dafür liegt nicht nur in den verringerten elektrischen und thermischen Widerständen der gehärteten Schicht, sondern auch an der erhöhten Steifigkeit des Buckels. Die Materialeigenschaften der Randschicht zeigen eine erhöhte spezifische Wärmekapazität gegenüber dem Grundmaterial. Die dämpfende Wirkung auf den Anstieg der Temperatur dominiert aber nicht, da die Temperaturen der einatzgehärteten Buckel höher sind als beim ungehärteten Buckel. Der gehärtete Buckel verformt sich weniger und dringt im Vergleich zu einem ungehärteten Buckel weiter in das Blech ein. Die Bedingung dafür ist allerdings, dass das Blech weicher ist als der Buckel. Je größer der Unterschied in der Festigkeit ist, desto weiter kann der gehärtete Buckel in das Blech eindringen. Die Folge ist eine vergrößerte Kontaktfläche, woraus geringere Kontaktdrücke und geringere elektrische Kontaktleitfähigkeiten entstehen. Dadurch entstehen im Schweißprozess mit gehärteten Komponenten höhere Temperaturen.

Die Ergebnisse der Simulation können mit den Beobachtungen der Experimente zusammengeführt werden. Abbildung 19 zeigt den Schweißbereich für einen ungehärteten und gehärteten Buckel mit verschiedenen Härtetiefen. Dabei zeigt sich, dass beim Einsatz gehärteter Buckel kein Schweißbereich mehr vorhanden ist. Für die Einhärtetiefe von 0,8mm, der auch in der Simulation abgebildet ist, zeigt sich, dass die geforderte Auspresskraft nicht mehr erreicht werden kann. Gleichzeitig treten bereits Schweißspritzer auf. Das Auftreten von Schweißspritzern bei geringerer elektrischer Belastung im Vergleich zum ungehärteten Buckel kann anhand der berechneten Temperaturen der Simulation erklärt werden. Die Temperaturen steigen bei gehärteten Buckeln schneller und höher. Abbildung 20 zeigt weiter, dass die Verbindungen mit gehärtetem Buckel rissbehaftet sind. Auch dieses Ergebnis kann mit den berechneten Temperaturen der Simulation erklärt werden. Die erhöhten Temperaturen in der Fügezone führen bei gleichbleibender Prozesszeit auch zu höheren räumlichen Temperaturgradienten. In der Abkühlphase des Prozesses kann davon ausgegangen werden, dass durch die zwischenzeitlich höheren Temperaturgradienten auch höhere thermische Spannungen auftreten. Das führt beim Schweißen gehärteter Buckel zu größerer Rissanfälligkeit. Die Experimente zeigen außerdem,

dass die Spritzerneigung und Rissanfälligkeit durch das Härten beider Fügepartner nicht so groß sind, wie beim Einsatz von ungehärteten Blechen und gehärteten Buckeln. Diese Erkenntnis wird durch die Ergebnisse der Simulation gestützt. Die erhöhten Prozesstemperaturen können nur entstehen, wenn die Kontaktleitfähigkeit gering ist. Diese ist nur geringer, wenn die Kontaktfläche größer ist, was durch das Eindringen des Buckels in das Blech erreicht wird. Ist der Festigkeitsunterschied zwischen Buckel und Blech aber nicht so groß, wird dieser Effekt abgemildert. Das Situationsergebnis gleicht dem von ungehärteten Fügepartnern.

10 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung“ (IGF-Nr. 22 056 BR / DVS Nr. 04.3496) mit einem Bewilligungszeitraum vom 01.10.2021 – 31.03.2024 wurde das Kondensatorentladungsschweißen von einsatzgehärteten Buckelbauteilen wissenschaftlich untersucht. Die Untersuchungen beinhalteten die Auswirkungen unterschiedlicher Einhärttiefen auf die Auspresskraft der Verbindung, das Spritzerverhalten während des Schweißens und die Festigkeit bei zyklischer Beanspruchung. Aufgrund der COVID19-Pandemie wurde das Forschungsvorhaben um 6 Monate bis zum 31.03.2024 kostenneutral verlängert. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Bewertung und Optimierung des Buckelschweißens an einsatzgehärteten Bauteilen. Dabei konnten die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Forschungsvorhaben (Füssel, Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden, 2018; Füssel, Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung, 2020 und Füssel, Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile, 2022) bestätigt und angewandt werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht. Das Ergebnis sind allgemeine Prozessempfehlungen, die im Abschnitt „Zusammenfassung“ beschrieben sind. Es wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das eine einsatzgehärtete Schicht berücksichtigt. Dies war zu Beginn des Forschungsvorhabens nicht verfügbar. Durch die Anwendung des weiterentwickelten Simulationsmodells können jetzt physikalische Effekte, wie die Oberflächenaktivierung, beschrieben und die Auswirkung unterschiedlicher Einhärttiefen untersucht werden (siehe Abschnitt 9). Bei der experimentellen Untersuchung wurden die signifikanten Einflüsse auf die Festigkeit ermittelt (siehe Abschnitt 7 und 8). Im Weiteren sind Transfermaßnahmen geplant, die in Abschnitt 15 beschrieben sind. In Tabelle 5 ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung ersichtlich.

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung

Arbeitspaket	Zielsetzung	Ergebnisse
AP 1: Einfluss der ein- satzgehärteten Schicht auf Prozess und Verbin- dung	Herstellen stoffschlüssiger Verbindungen in Abhängig- keit unterschiedlicher Einhärttiefen	Feststellung signifikanter Einflüsse der Einhärttiefen Erhöhung des Prozessver- ständnis
	Messtechnische Erfassung der Prozessdaten	Schweißbereichsermitt- lung in Abhängigkeit der Einhärttiefe
	Statistische Versuchspla- nung	Werkstoffeinfluss
	Prozessvisualisierung durch Hochgeschwindigkeitsauf- nahmen	Spritzerklasse in Abhän- gigkeit der Einhärttiefen
	Quasi-statische Prüfung der Bauteile in Abhängigkeit der Einhärttiefe	Rissigkeit in Abhängigkeit der Einhärttiefe

AP 2: Steigerung der Verbindungsqualität durch Wärmebehandlung	Quasi-statische Prüfung der Bauteile in Abhängigkeit der Buckelgeometrie	Optimierung des Prozessablaufs
	Implementierung einer induktiven Vorwärmung	Statistische Einflüsse der Einhärttiefe auf quasi-statische Festigkeit
	Mehrpulsschweißungen	Werkstoffabhängigkeit der Einhärttiefe auf quasi-statische Festigkeit
	Untersuchung des Gefüges im Buckelquerschnitt	
	Ermitteln der Aufhärtung in der Fügezone	
	Korrelation mit den Prozessdaten	
	Zerstörungsfreie Prüfung	

AP 3: Prozesssimulation einsatzgehärteter Schichten	Mechanisch-thermisch-elektrische Prozesssimulation des KE-Buckelschweißens in Abhängigkeit der Einhärttiefe Berücksichtigung einer temperaturabhängigen Buckeldeformation und der Kontaktwiderstandserwärmung Neuvernetzung inkl. Einsatzgehärteter Schicht	Entwicklung eines iterativ gekoppelten Simulationsmodells mit einsatzgehärteter Schicht Implementierung der Kontaktwiderstandserwärmung Implementierung einer Neuvernetzung zur Berücksichtigung starker Buckeldeformationen Erhöhung des Prozessverständnisses durch Auswertung der Stromdichteverteilung Darstellung der Oberflächenaktivierung beim KE-Buckelschweißen
AP 4: Ergebnistransfer	Verallgemeinerung, Veröffentlichung der Ergebnisse und Abschlussbericht	Siehe Abschnitt 15

11 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 22,5 PM in Vollzeit. Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft. Es wurden Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet und notwendiges, weiteres Probenmaterial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte beschafft.

12 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

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.

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

Die Erkenntnisse zum Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile stehen potentiellen Nutzern zur Verfügung. Hersteller von Fügeelementen und Schweißanlagen und Anwender des KE-Schweißens können die Erkenntnisse direkt in ihre Produkte und Prozesse einfließen lassen. In den kommenden Sitzungen der AG V3.5 wird das Merkblatt DVS 2911 überarbeitet, und die Prozessempfehlungen des Forschungsvorhabens werden implementiert. In Tabelle 6 sind die wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzen für KMUs zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens

Wissenschaftlich-technischer Nutzen	Wirtschaftlicher Nutzen
Prozessgestaltung durch Mehrpuls-schweißen und induktives Vorwärmen	Schweißprozess- und Bauteilempfehlungen für das kostengünstige und einfache KE-Buckelschweißen
Einfluss der thermischen Kopplung	Prozessgestaltung für einsatzgehärtete Bauteile
Einfluss der Einhärtetiefe	Alternative zum Laser- und Elektronenstrahlschweißen beim Fügen großer Bauteile
Sicherung der Ergebnisse durch statistische Versuchsplanung	Gestaltungsempfehlung im Merkblatt DVS 2911 (Aufnahme der Ergebnisse im Frühjahr 2025 geplant)
Erhöhung des Prozessverständnisses durch numerische Prozesssimulation	→ Reduzierung von Versuchsumfängen
Bestätigung der Erkenntnisse vergangener Forschungsvorhaben	

14 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

14.1 Fachtagungen, Kolloquien und Berichterstattungen

Koal, Johannes (2021): Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 18.11.2021.

Koal, Johannes (2021): Numerische Simulation großer Deformationen beim Buckelschweißen durch Kondensatorentladung. DVS Congress 2021, Große Schweißtechnische Tagung und DVS Campus, Essen, 2021.

Koal, Johannes (2022): Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 10.05.2022.

Koal, Johannes (2022): Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 17.11.2022.

Koal, Johannes (2022): Impact of Activation in Projection Welding with Capacitor Discharge. The 13th International Seminar "Numerical Analysis of Weldability, Leibnitz, Austria, 2022.

Koal, Johannes (2023): Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 06.06.2023.

Koal, Johannes (2023): Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile durch Kondensatorentladung. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Magdeburg, 16.11.2023.

Koal, Johannes (2023): Understanding the bonding mechanism in short-time resistance projection welding. IIW Annual Assembly, Singapore, 2023.

Koal, Johannes (2023): KE-Buckelschweißen einsatzgehärteter Bauteile – Einfluss einer prozessintegrierten Wärmebehandlung. Abschlussberichterstattung des Forschungsvorhabens. DVS Congress 2023, Große Schweißtechnische Tagung und DVS Campus, Essen, 2023.

14.2 Veröffentlichungen und Fachbeiträge

Koal Johannes, Baumgarten Martin, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe: Numerische Simulation großer Deformationen beim Buckelschweißen durch Kondensatorentladung. DVS Congress 2021, Große Schweißtechnische Tagung und DVS Campus, DVS Berichte 371, S. 562-567, 2021

Koal Johannes, Baumgarten Martin, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe: Impact of Activation in Projection Welding with Capacitor Discharge. Mathematical Modeling of Weld Phenoma 13, 2022.

Koal Johannes, Baumgarten Martin, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe: Impact of Activation in Projection Welding with Capacitor Discharge. Mathematical Modeling of Weld Phenoma 13, 2023.

Koal Johannes, Hertzschuch Tim, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe, Schmale Hans Christian: Optimierung der Ringbuckelgeometrie großer Bauteile für das Kondensatorentladungsschweißen. 25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen, 2023.

Koal Johannes, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe, Schmale Hans Christian: Was ist Kurzzeitschweißen?. 25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen, 2023.

Koal Johannes: Oberflächenaktivierung beim Buckelschweißen durch Kondensatorentladung. Dissertation, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, 2023.

Koal Johannes, Baumgarten Martin, Zschetzsche Jörg: Impact of activation in projection welding with capacitor discharge using multiphysics simulation and a

process-integrated transition resistance measurement. *Mathematical modeling of Weld Phenomena* 13, 2023.

Koal Johannes, Hertzschuch Tim, Baumgarten Martin, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe: Quality monitoring of projection welding using machine learning with small data sets. *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 28, Nr. 4, 2023.

14.3 Studien- und Abschlussarbeiten

- Hertzschuch, Tim (2021): Optimierung der Buckelgeometrie beim Kondensatorentladungsschweißen mittels statistischer Versuchsplanung. Forschungspraktikum. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Roschke, Tobias (2021): Nachsetzeinheiten für Buckelschweißmaschinen mit Kondensatorentladung. Forschungspraktikum. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Hertzschuch, Tim (2022): Qualitätsüberwachung von Buckelschweißverbindung durch Maschinelles Lernen mit geringen Datenmengen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Jakubowski, Hendrik (2023): Reduzierung der Aufhärtung in der Fügezone beim Buckelschweißen durch Kondensatorentladung. Forschungspraktikum. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Nikolov, Cedrik (2023): Akustische Qualitätsüberwachung beim Buckelschweißen. Forschungspraktikum. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Jakubowski, Hendrik (2024): Zyklische Beanspruchung einsatzgehärteter Buckelschweißverbindungen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.

15 Transfermaßnahmen

15.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
A: Informationen an die Unternehmen des PA	Fachliche Betreuung, Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU); gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	1. PA: 09.12.2022 (Webkonferenz)
		2. PA: 02.06.2022 (Webkonferenz)
		3. PA: 08.12.2022 (Dresden)
		4. PA: 24.05.2023 (Gladbeck)
		5. PA: 20.11.2023 (Dresden)
B: Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Informationen über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während und nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
C: 5 geplante Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie 2 Zwischenbericht / 5 Zwischenpräsentationen vor dem FA 4 jeweils 1. und 2. HJ ab 10/2022	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	PA: siehe Maßnahme A FA4: 18.11.2021 10.05.2022 17.11.2022 06.06.2023 16.11.2023
D: Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungseinrichtung oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
E: Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.5 „Kondensatorentladungsschweißen“ im Ausschuss für Technik des DVS	Übernahme der Ergebnisse in Merkblätter, Arbeitsblätter und Normen	Halbjährlich (12/2022, 06/2023, 12/2023, 05/2024, 11/2024)
F: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
G: 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 06/2022 Akademische Arbeiten: s. Jakubowski, Nikolov, Hertzschuch, Roschke

15.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
A: Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Informationen über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend
B: Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an den Forschungseinrichtungen oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend
C: Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.5 „Kondensatorentladungsschweißen“ im Ausschuss für Technik des DVS	Übernahme der Ergebnisse in das Merkblatt DVS 2911	12 / 2025
D: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen mit Fachbeitrag in Tagungsband	Informieren potenzieller Anwender, vor allem national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	Große Schweißtechnische Tagung 2025
E: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend auf Anfrage

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
F: Vorstellung der Ergebnisse auf Weiterbildungsveranstaltungen der DVS-Bezirksverbände (Dresden)	Ergebnistransfer an die persönlichen und industriellen (KMU) Mitglieder des DVS, bereits schon im Arbeitskreis	Fortlaufend auf Anfrage
G: Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes und Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	4. Quartal 2024
H: 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 04/2025

15.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

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

Eine weite Verbreitung der Forschungsergebnisse an KMU ist über die schon getätigten bzw. noch beabsichtigten Konferenzvorträge, Fachbeiträge in Zeitschriften und Tagungsbände sowie die Einbindung in die akademische Ausbildung an den Universitäten gegeben. Die Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (sowohl KMU als auch Großunternehmen) und auch weitere Firmen haben durch die Veröffentlichungen Zugriff auf die Forschungsergebnisse. Auch die Online-Veröffentlichungen auf den Internetseiten der Forschungseinrichtungen lassen erwarten, dass sich weitere

KMU bei den Forschungseinrichtungen melden, um Forschungsergebnisse abzurufen und in die Praxis zu überführen. Eine Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter/Technische Regelwerke/Normen durch Zuarbeit bei der Überarbeitung von DVS-Merkblättern ist auf Anfrage vorstellbar und wird gerne unterstützt.

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

16 Literaturverzeichnis

- [1] D. Liedtke, *Einsatzhärten*, Merkblatt 452, 2008.
- [2] DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., *Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik*, Merkblatt DVS 2911, 2016.
- [3] J. Zschetzsche, U. Füssel, M. Hertel, M.-M. Ketzler, C. Mathiszik, und H.-J. Rusch, „Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte“, in *23. DVS Sondertagung Widerstandsschweißen*, DVS Media GmbH, 2016.
- [4] J. Zschetzsche, M.-M. Ketzler, U. Füssel, H.-J. Rusch, und N. Stocks, „Process Monitoring at Capacitor Discharge Welding“, in *ASNT Research Symposium 2019 Proceedings*, ASNT, 2019, S. 154–160. doi: 10.32548/RS.2019.017.
- [5] J. Koal, N. Stocks, F. Fippel, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Neuartiges Verfahren zum Herstellen von Verbundelektroden aus Kupfer und Wolfram“, *METALL*, Bd. 74, S. 89–91, 2020.
- [6] J. Koal, M. Baumgarten, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Impact of activation in projection welding with capacitor discharge using multiphysics simulation and a process-integrated transition resistance measurement“, *Mathematical modelling of Weld Phenomena*, Bd. 13, S. 551–566, 2023, doi: 10.3217/978-3-85125-968-1-31.
- [7] J. Koal, „Oberflächenaktivierung beim Buckelschweißen durch Kondensatorentladung“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-871968>
- [8] H. Cramer, „Widerstandsschweißen von höherkohlenstoffhaltigen Stählen mit sehr kurzer Wärmeeinbringung“, SLV München, Schlussbericht AiF-Nr. 2037/00, DVS-Nr. 4.027, 2003.
- [9] M.-M. Ketzler, M. Hertel, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Heat development of the contact area during capacitor discharge welding“, *Weld World*, Bd. 63, Nr. 5, S. 1195–1203, 2019, doi: 10.1007/s40194-019-00744-x.
- [10] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden“, *Schweißen und Schneiden*, Bd. 71, Nr. 1–2, S. 24–34, 2019.

- [11] U. Füssel, J. Koal, und J. Zschetzsche, „Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile“, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, Schlussbericht IGF-Nr. 20 825 BR, 2022.
- [12] C. Petersmann, „Kondensator-Impuls-Schweißen höher kohlenstoffhaltiger, randschichtgehärteter Einsatzstähle am Beispiel eines Pkw-Sitzbeschlages“, Dissertation, RWTH Aachen, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik, 2004.
- [13] V. Zhuk, S. Jüttner, und J. Zschetzsche, „Umwandlungsverhalten von kohlenstoffhaltigen Stählen beim Kurzzeitschweißen“, in *13. Magdeburger Maschinenbautage - autonom - vernetzt - nachhaltig*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät Maschinenbau, Institut für Mobile Systeme – Lehrstuhl Mechatronik, 2017.
- [14] W. Piersig, *Geschichtlicher Überblick zur Entwicklung der Metallbearbeitung: Beitrag zur Technikgeschichte*. in Beitrag zur Technikgeschichte, no. 8. München: GRIN Verlag GmbH, 2009.
- [15] F. Frügel, „Das Kondensator-Impulsschweißen: Wirkungsweise und Vorteile des Verfahrens - Physikalische Grundlagen - Durchführung des Verfahrens - Verwendete Schweißelektroden - Maschinelle Ausrüstung“, *Schweißen und Schneiden*, Bd. 12, Nr. 1, S. 14–18, 1960.
- [16] U. Krüger, *Kondensator-Entladungsschweißen für vielfältige Schweißaufgaben*,“ in *Jahrbuch Schweißtechnik, Düsseldorf, DVS Media GmbH, 2013, pp. 200-211*. in Jahrbuch Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2013.
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005*, DIN 1910–100, 2008.
- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Schweißen und verwandte Verfahren – Terminologie – Teil 1: Allgemeine Begriffe (ISO/TR 25901-1:2016); Dreisprachige Fassung*, ISO/TR 25901–1, 2016.
- [19] K.-J. Matthes und W. Schneider, Hrsg., *Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*, 6., Aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2016.
- [20] A. H. Fritz und G. Schulze, Hrsg., *Fertigungstechnik*, Bd. 0. in Springer-Lehrbuch, vol. 0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12879-0.
- [21] DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., *Steuern und Leistungsteile für das Widerstandsschweißen*, Merkblatt DVS 2904, 2010.

- [22] H.-J. Rusch, „Prozesstechnische Anforderungen und elektrotechnisches Design von Kondensatorentladungsmaschinen“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2018.
- [23] U. Dilthey, *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1*, 3. Auflage. Springer-Verlag GmbH, 2006.
- [24] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollen-nahtschweißen – Verfahren für das Bestimmen des Übergangswiderstands von Aluminium- und Stahlwerkstoffen*, DIN EN ISO 18594, 2007.
- [25] E. Hering, R. Martin, J. Kempkes, und J. Gutekunst, Hrsg., *Elektrotechnik und Elektronik in Maschinenbau und Mechatronik: Für Studierende und für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024. doi: 10.1007/978-3-662-67538-0.
- [26] G. Hagmann, *Grundlagen der Elektrotechnik: das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester: mit 225 Abbildungen, 4 Tabellen, Aufgaben und Lösungen*, 17., Durchgesehene und Korrigierte Auflage. in Elektrotechnik. Wiebelsheim: AULA-Verlag, 2017.
- [27] G. Knoblauch, Hrsg., *Steckverbinder: Systemkonzepte und Technologien*. in Kontakt & Studium, no. 558. Renningen-Malmsheim: expert-Verl, 1998.
- [28] R. Holm, *Die technische Physik der elektrischen Kontakte*. Berlin: Springer, 1941.
- [29] GLAMATronic GmbH Schweiß- & Anlagentechnik, „Gestellausführungen von KE-Maschinen der Firma GLAMATronic“. Zugegriffen: 20. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.glamatronic.de/anlagentechnik/#schweissmaschinen>
- [30] H. Clausert, Hrsg., *Grundgebiete der Elektrotechnik. 1: Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder / von Horst Clausert*, 10. überarb. Aufl. München: Oldenbourg, 2008.
- [31] W.-E. Büttner, *Grundlagen der Elektrotechnik. 1, 3.*, Verbesserte Auflage. München Wien: Oldenbourg, 2011.
- [32] NIMAK GmbH, „magneticDRIVE – die Revolution im Widerstandsschweißen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nimak.de/de/magneticdrive/>
- [33] U. Füssel, M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche, und M. Hertel, „Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden“, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, Schlussbericht IGF-Nr. 18 987 BR, 2018.

- [34] R. D'Angelo und H.-J. Schur, „Untersuchung zum rationellen Einsatz des Kaltpreßschweißens durch plastische Deformation und Überlagerung zusätzlicher Bewegungskomponenten“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 1972.
- [35] D. Rischka, „Untersuchungen zum Bindemechanismus beim Kaltpreßschweißen ausgewählter Metalle“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 1981.
- [36] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Charakterisieren von Nachsetzeinheiten“, gehalten auf der DVS Congress: Große Schweißtechnische Tagung, DVS Media GmbH, 2018, S. 467–476.
- [37] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Auswirkungen des Kraftaufbaus auf den Kontaktwiderstand beim Kondensatorentladungsschweißen“, *Schweißen und Schneiden*, Bd. 70, Nr. 8, S. 554–559, 2018.
- [38] N. Stocks, „Erhöhung der Verschleißbeständigkeit durch partielle Integration von Hartmetallinserts mithilfe der KE-Mehrpulstechnik“, Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2021.
- [39] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Widerstandsschweißen – Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln – Buckel zum Widerstandsschweißen*, DIN EN ISO 8167, 2021.
- [40] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Buckel für das Buckelschweißen von Stahlblechen - Langbuckel und Ringbuckel*, DIN 8519, 1996.
- [41] *Buckelschweißen von Stählen*, Merkblatt DVS 2905, 2001.
- [42] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Allgemeintoleranzen - Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*, DIN ISO 2768, 1991.
- [43] U. Dilthey, J. Dickersbach, und H.-C. Bohlmann, „Optimierung der Buckelgeometrie zum Schweißen mit Kondensatorimpulsstrom“, *Schweißen und Schneiden*, Bd. 50, Nr. 1, S. 11–17, 1998.
- [44] D. Neef, „Das Festigkeitsverhalten von Kondensator-Impuls-Schweißverbindungen eines Stahlbleches St37 unter Verwendung verschiedener Buckelformen“, Diplomarbeit, RWTH Aachen, Institut für schweißtechnische Fertigungsverfahren, Aachen, 1966.
- [45] H. Cramer, „Untersuchungen zum Anschweißen von Widerstandsschweißmuttern an Bleche aus höher- bis höchstfesten Werkstoffen“, SLV München, Schlussbericht AiF-Nr. 14.435N, DVS-Nr. 04.039, 2007.

- [46] DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlfeinblechen mit metallischen Überzügen – Teil 1: Überblick*, Merkblatt DVS 2920-1, 2017.
- [47] DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., *Widerstandsbuckelschweißen an NE-Metallen und Werkstoff paarungen für Kleinteile*, Merkblatt DVS 2944, 2017.
- [48] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., *Widerstandsschweißen – Verfahren zum Buckelschweißen von niedriglegierten Stählen mit oder ohne metallischem Überzug*, DIN EN ISO 16432, 2007.
- [49] DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollen- nahtschweißen von Stahlfeinblechen mit Aluminiumüberzügen*, Merkblatt DVS 2919, 2013.
- [50] Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH (GSI), „Internationaler Schweißfachingenieurs (SFI) - Hauptgebiet 1: Schweißprozesse und -ausrüstung“, Lehrgangsunterlagen, 2021.
- [51] U. Dilthey, J. Ellermeier, und L. Kabatnik, „Reibschweißen oberflächenbehandelter Stahl- und Gußkomponenten hoher Oberflächenhärte und geringer Adhäsionsneigung“, *Schweißen und Schneiden*, Bd. 49, Nr. 6, S. 342–347, 1997.
- [52] A. Bormann, „Serielle, induktive Wärmebehandlung laserstrahlgeschweißter Feinbleche“, Dissertation, Universität Hannover, Hannover, 2004.
- [53] A. Jahn, B. Brenner, und E. Beyer, „Induction assisted laser welding of advanced high strength steels to increase the formability of welded automotive body structures“, in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Scottsdale, Arizona, USA: Laser Institute of America, 2006, S. 1701. doi: 10.2351/1.5060784.
- [54] DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., *Messen beim Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen*, Merkblatt DVS 2908, 2016.
- [55] W. Brunst, *Das elektrische Widerstandsschweißen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1952. doi: 10.1007/978-3-642-51079-3.
- [56] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Eliminieren von Spannungsmessfehlern infolge hoher veränderlicher Ströme beim Widerstandsschweißen“, *Schweißen und Schneiden*, Bd. 68, Nr. 11, S. 730–734, 2016.
- [57] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche, und U. Füssel, „Elimination of voltage measuring errors as a consequence of high variable currents in resistance welding“, *Welding and Cutting*, Bd. 16, Nr. 3, S. 164–168, 2017.

17 **Anhang**

Nachfolgend befindet sich der Ergebnisbericht zum Schlagschädigungsverhalten von Ringbuckelschweißverbindungen.