

Schlussbericht vom 09.12.2022

zu IGF-Vorhaben Nr. 20825 BR

Thema

Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile

Berichtszeitraum

01.10.2019 bis 31.03.2022

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:

Schlussbericht

Titel: Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile

IGF-Nr.: 20.825 BR

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

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

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Johannes Koal

weiterer Autor: Dr.-Ing. Jörg Zschetzsche

Version: 16. Dezember 2022

Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben Nr.: 20.825 BR / DVS-Nr.: 04.3194 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 „Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile“ (IGF-Nr. 20.825 BR/DVS-Nr. 04.3194) verfolgte das Ziel, den Einfluss der Buckelgeometrie auf die Fügeverbindung zu bewerten und zu optimieren.

Dazu wurden in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) drei Hauptversuchsreihen bei je einem Anlagenhersteller durchgeführt. Je Hauptversuchsreihe wurden 13 unterschiedliche Buckelgeometrien untersucht und Vorzugsvarianten für die weiteren Untersuchungen definiert. So wurden insgesamt 13 Buckelgeometrien und 4 Werkstoffkombinationen systematisch untersucht. Um die Ergebnisse statistisch abzusichern, wurde eine statistische Versuchsplanung (DOE) durchgeführt. Insgesamt wurden während der drei Hauptversuchsreihen ca. 1100 Schweißversuche durchgeführt und ausgewertet. Zusätzlich wurde eine Prozesssimulation entwickelt, um den verdeckt ablaufenden Buckelschweißprozess orts- und zeitaufgelöst zu analysieren. Dazu wurde erstmals ein iteratives multiphysikalisches Simulationsmodell entwickelt. 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 Gestaltungsempfehlungen für Massivbuckel, die in Abschnitt 12 beschrieben sind. Zusätzlich konnte neues Prozessverständnis über das Kurzzeitschweißens mit hoher Wärmestromdichte generiert werden [1]. Besonders durch die Anwendung des Simulationsmodells konnte dieses Prozessverständnis erweitert werden, denn die Oberflächenaktivierung ist auf den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Leistungsdichte zurückzuführen. So konnte nachgewiesen werden, dass Leistungsdichten erreicht werden, die Metallverdampfung hervorrufen. Die qualitativen Beobachtungen aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden auch quantitativ untersetzt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 11 beschrieben.

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

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 20.825 BR / DVS-Nr. 04.3194) der Forschungsvereinigung, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Unterstützung sei gedankt.

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

Vorname, Name	Art der Forschungsarbeit
Martin Baumgarten	Diplomarbeit
Erik Streller	Diplomarbeit
Chris Röder	Forschungspraktikum
Maximilian Becker	Forschungspraktikum
Maximilian Becker	Diplomarbeit
Tim Hertzschuch	Forschungspraktikum
Tim Hertzschuch	Diplomarbeit

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
Axel Schneider (Projektpate)	Kapkon GmbH
Nicolas Stocks	Kapkon GmbH
Fabian Demmer	Kapkon GmbH
Daniel de Boer	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
Klaus-Dieter Czekalla	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
Dr. Hans-Jürgen Rusch	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH

Jens Cremer	Doceram GmbH
Bernd Rödder	NIMAK GmbH
Stephan Löcherbach	NIMAK GmbH
Frank Klösters	Nedschroeff Plottenberg GmbH
Helmut Braun	Robert Bosch GmbH
Franz Wetzl	Robert Bosch GmbH
Alexander Hornung	Stäubli Electrical Connectors GmbH
Günther Reverchon	Contronnic Prozess- und Automatisierungstechnik GmbH
Alexander Lohr	BorgWarner Transmission Systems Arnstadt GmbH
Jürgen Gerhards	Mercedes-Benz AG
Ralf Hinnenkamp	Bock & Klingenberg GmbH
Mathias Wolf	Bock & Klingenberg GmbH
Stephan Kliché	Magcam NV
Thomas Noack	Volkswagen AG

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Danksagung	3
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis.....	12
Abkürzungsverzeichnis	13
Verzeichnis der Formelzeichen	14
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	16
2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU	18
3 Stand der Technik	20
3.1 Kondensatorentladungsschweißen.....	20
3.2 Verfahrenstechnische Grundlagen.....	21
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)	34
3.8 Geometrien für KE-Buckelschweißen.....	35
3.8.1 Buckelgeometrien für Stahllegierungen	35
3.8.2 Buckelgeometrien für Aluminiumlegierungen	37
3.9 Schweißen oberflächenbehandelter Werkstoffe	38
4 Forschungsziel	40

5	Lösungsweg	42
6	Versuchsvorbereitung.....	44
6.1	Übersicht aller Buckelgeometrien und -werkstoffe.....	44
6.2	Festlegen der Fügeaufgabe.....	46
6.3	Festlegen der zu messenden Größen	46
6.3.1	Strommessung.....	47
6.3.2	Spannungsmessung.....	47
6.3.3	Wegmessung.....	47
6.3.4	Kraftmessung.....	48
6.4	Bewerten der Auspresskraft	48
6.5	Bewerten der Spritzerklassen.....	48
6.6	Bauteilvorbereitung.....	49
7	Hauptversuch 1	50
7.1	Ermittlung der Schweißbereiche	50
7.1.1	Schweißbereich der Geometrie 1 für MDK 1 und 2	51
7.1.2	Schweißbereich der Geometrie 2 für MDK 1 und 2	52
7.1.3	Schweißbereich der Geometrie 3 für MDK 1 und 2	52
7.1.4	Schweißbereich der Geometrie 4 für MDK 1 und 2	53
7.1.5	Schweißbereich der Geometrie 5 für MDK 1 und 2	54
7.2	Anbindungsbreite.....	55
7.3	Härteverlauf.....	57
7.4	Fazit der Ergebnisse aus Hauptversuch 1.....	58
8	Hauptversuch 2	59
8.1	Ermittlung der Faktorstufen.....	59
8.2	Aufbau der statistischen Versuchsplanung	60
8.3	Ermittelte Auspresskräfte.....	61
8.4	Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung.....	64

8.4.1	Pareto-Diagramme.....	64
8.4.2	Haupt- und Wechselwirkungen.....	66
8.5	Einzelversuche nitrierten Oberflächen	67
8.6	Fazit der Ergebnisse aus Hauptversuch 2.....	69
9	Hauptversuch 3	70
9.1	Aufbau der statistischen Versuchsplanung	71
9.2	Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung.....	72
9.2.1	Pareto-Diagramme.....	72
9.2.2	Haupt- und Wechselwirkungen.....	73
9.2.3	Fazit der Ergebnisse aus Hauptversuch 3	74
10	Zusammenfassung der Hauptversuche.....	75
11	Numerische Prozesssimulation	76
11.1	Iteratives Simulationsmodell	76
11.2	Kontaktwiderstandsberechnung	78
11.3	Simulation großer Deformationen	81
11.4	Stromdichteverteilung im Buckelquerschnitt.....	82
12	Gestaltungsempfehlungen für Massivbuckel.....	84
13	Literaturverzeichnis	86
14	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen.....	94
15	Verwendung der Zuwendungen	98
16	Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	99
17	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen	100
18	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen	101
18.1	Fachtagungen, Kolloquien und Berichterstattungen.....	101
18.2	Veröffentlichungen und Fachbeiträge	102

18.3 Studien- und Abschlussarbeiten.....	102
19 Transfermaßnahmen.....	104
19.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen.....	104
19.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende.....	106
19.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung der Widerstandsschweißverfahren nach DIN 1910-100 [9].....	20
Abbildung 2: Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [2] ...	22
Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrenscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [12], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [15]	23
Abbildung 4: C-Gestell mit pneumatischen Antriebssystem (links) [21] und Portalgestell mit hydraulischem Antriebssystem [22].....	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]	32
Abbildung 10: Variationen von Schweißbuckeln [2]	36
Abbildung 11: Iterativer Projektablauf	42
Abbildung 12: Bearbeitung der Arbeitspakete und Termine des Forschungsvorhabens	43
Abbildung 13: Geometrische Abmessung des Ringbuckels für einen Buckeldurchmesser von 50 mm und 100 mm	44
Abbildung 14: Darstellung der Fügeaufgabe im Querschnitt	46
Abbildung 15: Klassifizierung der Spritzer	49
Abbildung 16: Experimenteller Aufbau bei der Fa. Glamatronic GmbH.....	50
Abbildung 17: Stromstärkeverlauf aller Versuche	51
Abbildung 18: Schweißbereich der Geometrie 1 für MDK1 und MDK2.....	51
Abbildung 19: Schweißbereich der Geometrie 2 für MDK1 und MDK2.....	52
Abbildung 20: Schweißbereich der Geometrie 3 für MDK1 und MDK2.....	53

Abbildung 21: Schweißbereich der Geometrie 4 für MDK1 und MDK2.....	53
Abbildung 22: Schweißbereich der Geometrie 5 für MDK1 und MDK2.....	54
Abbildung 23: Ermittlung der Anbindungsbreite im Querschliff für Buckelgeometrie 2 und MDK 1	55
Abbildung 24: Anbindungsbreite unterschiedlicher Schweißversuche in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK	56
Abbildung 25: Prüfmethode zur Bestimmung der Vickershärte HV1 in der Fügezone	57
Abbildung 26: Maximale und Verlauf der Vickershärte HV1	57
Abbildung 27: Experimenteller Aufbau bei der Fa. Nimak GmbH.....	59
Abbildung 28: Einfluss-, Stör und Zielgrößen der statistischen Versuchsplanung	60
Abbildung 29: Faktorstufen der vollfaktoriellen Versuchsplanung mit zwei Zentrumspunkten	61
Abbildung 30: Mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 30 kN.....	62
Abbildung 31: Mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 35 kN.....	63
Abbildung 32: Mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 40 kN.....	64
Abbildung 33: Pareto-Diagramm der Auspresskraft und der Spritzerklasse mit Haupt- und Wechselwirkungen	65
Abbildung 34: Haupteffekte in Abhängigkeit der Faktorstufen der Einflussgrößen auf die Zielgrößen Auspresskraft und Spritzerklasse.....	66
Abbildung 35: Wechselwirkungseffekte in Abhängigkeit der Werkstoffkombination und der Buckelgeometrie auf die Zielgrößen Auspresskraft und Spritzerklasse	67
Abbildung 36: Auspresskraft der Buckelgeometrie 2 in Abhängigkeit unterschiedlicher MDKs [56].....	68
Abbildung 37: Ausschnitt einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit sehr feinen Schweißspritzern, die aus der Fügezone austreten	68
Abbildung 38: Experimenteller Aufbau bei der Fa. Kapkon GmbH.....	70

Abbildung 39: Vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentrums- und Sternpunkten.....	71
Abbildung 40: Pareto-Diagramm der Auspresskraft und der Spritzerklasse mit Haupt- und Wechselwirkungen	72
Abbildung 41: Haupteffekte in Abhängigkeit der Faktorstufen der Einflussgrößen auf die Zielgrößen Auspresskraft und Spritzerklasse.....	73
Abbildung 42: Ablauf der iterativen Simulation [57].....	76
Abbildung 43: Axialsymmetrisches Simulationsmodell mit Randbedingungen	77
Abbildung 44: Messung und Darstellung der Teilspannungen für die Anpassung der numerischen Parameter [58].....	79
Abbildung 45: Einfluss der numerischen Parameter	80
Abbildung 46: Einfluss der Anpassung der numerischen Parameter auf die Temperaturverteilung.....	81
Abbildung 47: Darstellung der Neuvernetzung am Analogiemodell [57].....	81
Abbildung 48: Stromdichteverteilung in der Fügezone [58]	82
Abbildung 49: Axialsymmetrische Darstellung einer Fügeaufgabe mit Buckelbauteil, Blech und Buckelzentrierung und sechs Gestaltungshinweisen.	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einstellgröße und deren Einfluss an KE-Maschinen [1, 26, 32]	33
Tabelle 2: Übersicht aller untersuchten Buckelgeometrien im Detail (A).....	45
Tabelle 3: Verwendete Werkstoffe in Abhängigkeit des Hauptversuchs beim Anlagenhersteller (ALH).....	45

Abkürzungsverzeichnis

ALH	Anlagenhersteller
KE-Schweißen	Kondensatorentladungsschweißen
IIW	International Institute of Welding
CHD	Einsatzhärtetiefe
ECR	Electrical Contact Resistance (Elektrischer Kontaktwiderstand)
FEM	Finite-Elemente-Methode
NHD	Nitrierhärtetiefe
DOE	Statistische Versuchsplanung
NE	Nachsetzeinheit
PA	Projektbegleitender Ausschuss
KshW	Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZP	Zerstörende Prüfung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
i.O.	In Ordnung
n.i.O.	Nicht in Ordnung

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
α_1, α_2	Buckelwinkel	°
ρ_R	Resistivität	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
$\rho_{1,2}$	Spezifischer Widerstand	$\Omega \cdot \text{m}$
σ_s	Streckgrenze des weicheren Werkstoffs	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
σ_{cont}	Kontaktdruck	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
ρ_{film}	Spezifischer Filmwiderstand	$\Omega \cdot \text{m}$
C	Kapazität	mF
E_L	Ladeenergie	Ws, kW, kJ
ECR	Spezifischer Kontaktwiderstand	$\Omega \cdot \text{m}$
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^2	Bestimmtheitsmaß	

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

Das Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen) wird meist zum Buckelschweißen eingesetzt und ist eines der wenigen Verfahren, die das Verbinden großer, endbearbeiteter Bauteile ermöglichen. Große Bauteile im Sinn dieses Forschungsvorhabens verfügen über rotationssymmetrische Ringbuckel mit einem Durchmesser von ca. 50 bis 150 mm und werden durch spanende Bearbeitung hergestellt. Solche Bauteile werden sehr häufig im Getriebebau, für Kolben und Zylinder von Pumpen oder als Ventile, Werkzeuge und kleinere Druckbehälter eingesetzt. Große Ringbuckel verhalten sich beim Schweißen anders als kleine Buckelschweißteile wie Muttern oder geprägte Blechteile. Ursache dafür sind die geometrischen Abmessungen und die hohe Steifigkeit der Massivbuckel. Beim KE-Schweißen ist es wichtig, dass der Schweißstrom gleichmäßig über den Umfang des Buckels verteilt fließt. Deshalb werden für große Bauteile Portalmaschinen mit symmetrischer Stromzuführung eingesetzt und für die Maßtoleranzen enge Grenzen gesetzt [2, 3]. Allerdings gibt es für die Konstruktion der Buckel kaum Hinweise in der Normung und in der Literatur.

Das KE-Schweißen zählt zu den Widerstandspressschweißverfahren. Es ist durch eine extrem kurze Schweißzeit, eine sehr hohe Schweißstromstärke und einen sehr geringen Wärmeeintrag in das Bauteil gekennzeichnet. Da die Energie für jede Schweißung konstant ist, ergeben sich kaum abweichende Stromkurven. Daraus resultieren reproduzierbare Ergebnisse und eine hohe Maßhaltigkeit der geschweißten Bauteile. Es können Bauteile mit extrem unterschiedlichen Materialdicken sowie Stähle mit hohem Kohlenstoffäquivalent verschweißt werden. Die Netzbelastung während des Schweißens ist nicht stoßartig, weil die Schweißenergie in einer Kondensatorbatterie zwischengespeichert wird und die Ladung der Kondensatoren langsam zwischen den Schweißstakten erfolgt.

Das KE-Schweißen ist ein effizientes Nischenverfahren, dessen Potenzial kaum ausgenutzt wird. Im Rahmen vorheriger Projekte wurde von der Forschungsstelle ein neues Prozessverständnis erarbeitet, auf dessen Grundlage bereits Anwendungen für das KE-Schweißen erschlossen wurden [4, 1]. Um die Vorteile des Verfahrens besser auszunutzen und das KE-Schweißen als Standardverfahren zu etablieren, fehlen

u. a. noch systematische Untersuchungen und Richtlinien, die sich mit der geometrischen Gestaltung der Buckel befassen.

Praxis ist es, dass der Anlagenhersteller (ALH) mit einer Fügeaufgabe konfrontiert wird und vor der Beauftragung mit der Lieferung einer neuen oder dem Umbau einer vorhandenen Anlage den Nachweis der Schweißbarkeit erbringen muss. Wesentliche Forderungen sind ausreichende Festigkeit (zerstörend geprüft (ZP) durch Belastungstests oder am Querschliff), geringe bzw. keine Spritzerbildung (meist subjektive Beurteilung), Schweißen oberflächenbehandelter Werkstoffe, größeres Maßtoleranzfeld für die Buckelgeometrie (bisher werden ca. 0,05 mm vorgegeben [2]), großer Schweißbereich und quantifizierbare zerstörungsfreie Prüfung (ZfP).

Die Auswahl der Parameter erfolgt derzeit durch Schweißversuche auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen. Wesentliche Einflussgrößen sind die Maschinenparameter und die Buckelgeometrie, die entsprechend der gewünschten Schweißverbindung und dem Werkstoff angepasst werden müssen. Die Maschinenparameter werden von den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Anlage bestimmt. Durch die elektrischen Eigenschaften (Kapazität der Kondensatorbatterie, Ladespannung, Transformatorübersetzung, Induktivität und Widerstand des Sekundärstromkreises) wird der Stromstärkeverlauf festgelegt, durch die mechanischen Eigenschaften der Maschine (Schweißkraft, Masse und Federkonstante der Nachsetzeinheit) das Nachsetzverhalten der Elektroden. Die Fügeverbindung entsteht im Zusammenwirken der Erwärmung der Fügezone mit der Elektrodenbewegung.

Die Buckelgeometrie ist eine sehr wichtige Einflussgröße und bietet aufgrund der spanenden Bearbeitung der Bauteile große Gestaltungsspielräume, die jedoch kaum genutzt werden. Meist werden trapezförmige Buckelquerschnitte mit einer Aufstandsfläche von ca. 0,2 mm und einem Buckelwinkel von 90° gewählt [2]. Dieses Potenzial soll im Rahmen dieses Projektes auf der Grundlage des durch den Antragsteller erarbeiteten neuen Prozessverständnisses [4, 1] systematisch erschlossen werden.

2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Alle bedeutenden deutschen Hersteller von KE-Schweißmaschinen sind mittelständische Unternehmen, arbeiteten im PA mit, haben ihre Vorschläge zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens eingebracht und sind sehr an den Ergebnissen interessiert. Neben den Herstellern von KE-Schweißanlagen waren auch Anwender vertreten, die sowohl mittelständische als auch große Unternehmen sind.

Das Schweißen von großen, fertig bearbeiteten Bauteilen erfolgt gewöhnlich durch das Laserstrahlschweißen oder das Elektronenstrahlschweißen. Als Alternative bietet sich das KE-Schweißen an. Neben den oben genannten Vorteilen ist zu erwähnen, dass keine zusätzlichen Einrichtungen, wie Einhausung zum Strahlenschutz, Vakuumkammer oder Schutzgaszufuhr, erforderlich sind. Es wird keine mehrdimensionale Bewegungseinrichtung für die Strahlführung, sondern nur eine lineare Bewegungseinheit für die Elektrode benötigt. Der Wärmeeintrag ergibt sich aus der Bauteilgeometrie, dem Werkstoff und den Maschinenparametern. Die Verbindung wird am gesamten Umfang gleichzeitig hergestellt. In Kombination mit dem geringen Wärmeeintrag wird so eine nahezu verzugsfreie Schweißverbindung hergestellt.

In Deutschland sind ca. 1000 KE-Schweißanlagen im Einsatz. Jährlich werden ca. 100 neue Anlagen verkauft. Mit einer Anlage werden im Zweisechichtbetrieb ca. 540.000 Teile pro Jahr gefertigt. Vorsichtig geschätzt kann die Fertigung, bei der das KE-Schweißen angewendet wird, in Deutschland auf mindestens 540 Millionen Teile pro Jahr beziffert werden, wovon ca. 10 % große Bauteile sind. Die Bauteilanzahl ist zwar beträchtlich, könnte jedoch bedeutend höher sein. Die geringe Marktdurchdringung ist darauf zurückzuführen, dass die Vorteile des KE-Schweißverfahrens oft nicht in Betracht gezogen werden, die Prüfergebnisse falsch interpretiert werden bzw. Prüf- und Überwachungsmethoden fehlen. So wird nach wie vor oft davon ausgegangen, dass die Verbindung über die schmelzflüssige Phase entsteht. Dementsprechend fordert die Qualitätssicherung im Querschliff eine Schweißlinse. Da die Verbindung durch das Zusammenpressen aktivierter Oberflächen und die plastische Verformung der Buckel entsteht, ist bei i. O.-Schweißungen keine Linse nachweisbar, sondern

eine Grenzfläche, die bei makroskopischer Prüfung nicht eindeutig auf eine Schweißverbindung schließen lässt. Anwender des KE-Schweißens führen zur Qualitätskontrolle andere zerstörende Prüfungen (ZP), wie Belastungstests zur Ermittlung maximal ertragbarer Kräfte und Momente durch. Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind zu aufwändig (Durchstrahlungsprüfung), werden aufgrund fehlender Erfahrungen nicht eingesetzt (Ultraschallprüfung) oder sind noch im Entwicklungsstadium (bildgebende Analyse der Remanenzflussdichte). Ziel war es, weitere wissenschaftliche Grundlagen zu schaffen, die dem effizienten KE-Schweißen zu breiter Anwendung verhelfen.

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 [5]. 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 [6]. Während das Verfahren bereits seit 1940 im nordamerikanischen Schrifttum bekannt ist, erscheint eine der ersten deutschsprachigen Veröffentlichungen im Jahr 1960 von Frügel [7].

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 [8].

Das Kondensatorentladungsschweißen gehört zur Gruppe der konduktiven Widerstandsschweißverfahren, wird aber im Sinne von DIN 1910-100 [9] 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].

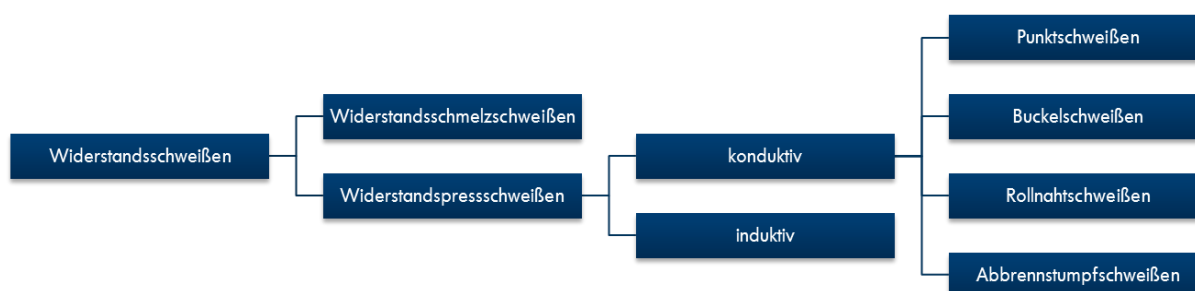


Abbildung 1: Klassifizierung der Widerstandsschweißverfahren nach DIN 1910-100 [9]

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 [8].

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 [10]. 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:

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} I^2(t) \cdot R_{\text{ges}}(t) dt \quad (1)$$

Daraus ist ersichtlich, dass die den Werkstücken zugeführte Wärme von der Stromflusszeit t_1 , 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 [11]. Es ist sinnvoll, die Stromflusszeit gering zu halten und die erforderliche Wärmemenge über höhere Schweißströme einzubringen [12].

Charakteristisch für das KE-Schweißen ist ein einzelner, kurzer, hoher Stromimpuls von bis zu 1000kA, der aus der transformierten Entladung eines Kondensators erzeugt wird [13]. 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. [14]

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

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 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.

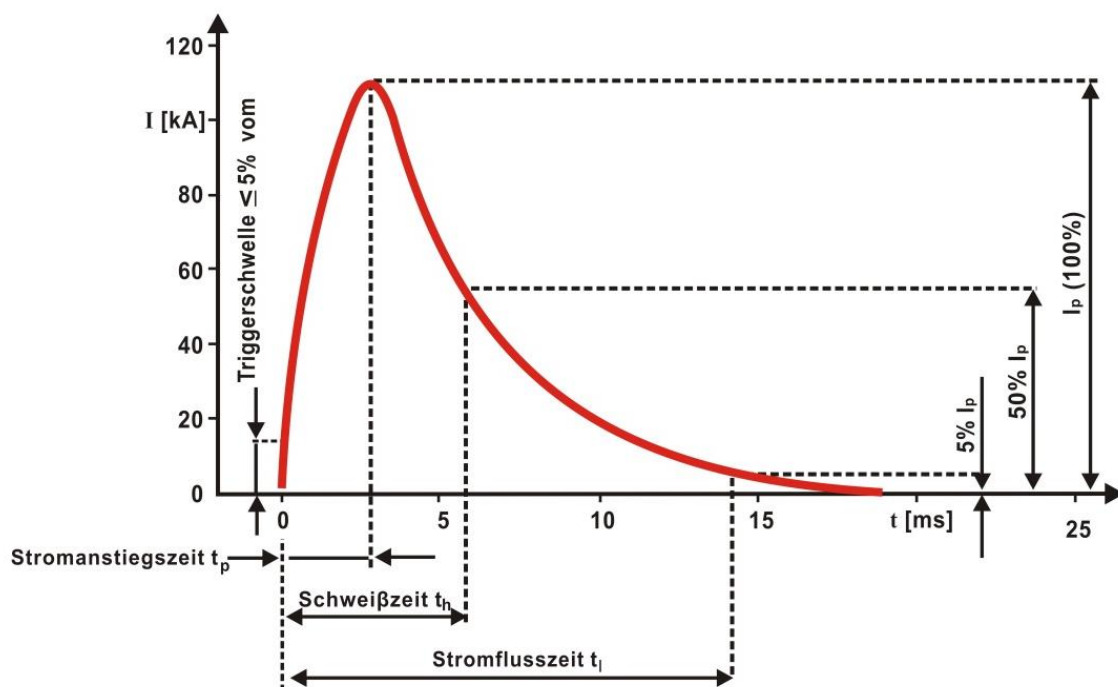


Abbildung 2: Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [2]

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.

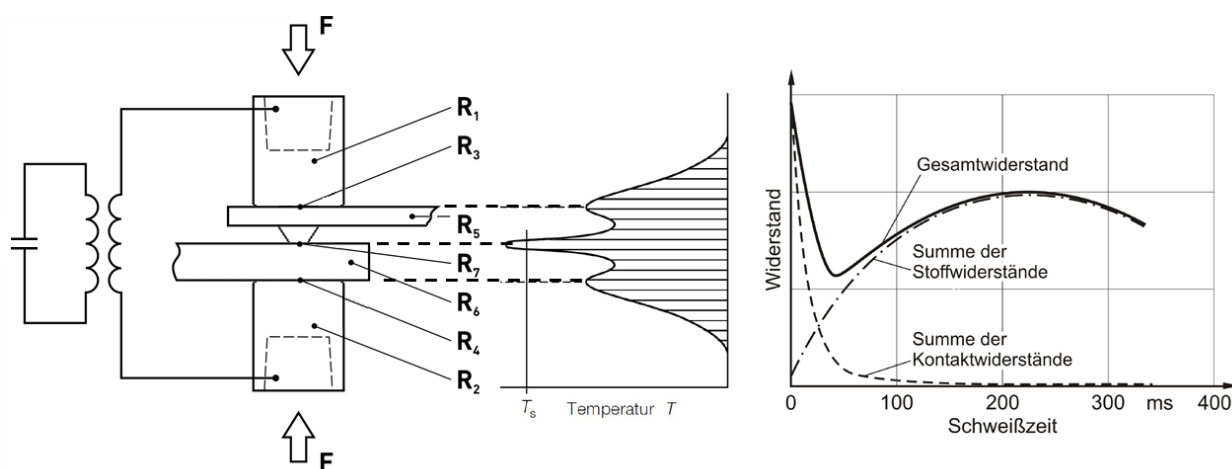


Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrensscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [12], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [15]

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 [16] 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. [17, 18]

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 aufeinandergepresst, 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. [19, 20]

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 verschweißenden Teile unterschiedliche Konzepte. KE-Schweißanlagen können in die zwei Grundgestellvarianten C-Gestell und Portalgestell eingeteilt werden (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: C-Gestell mit pneumatischem Antriebssystem (links) [21] und Portalgestell mit hydraulischem Antriebssystem [22]

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 von 2 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 aufgenommen, die den notwendigen Druck auf die Bauteile ausüben, 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 [23]. 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 [24]. 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, 22].

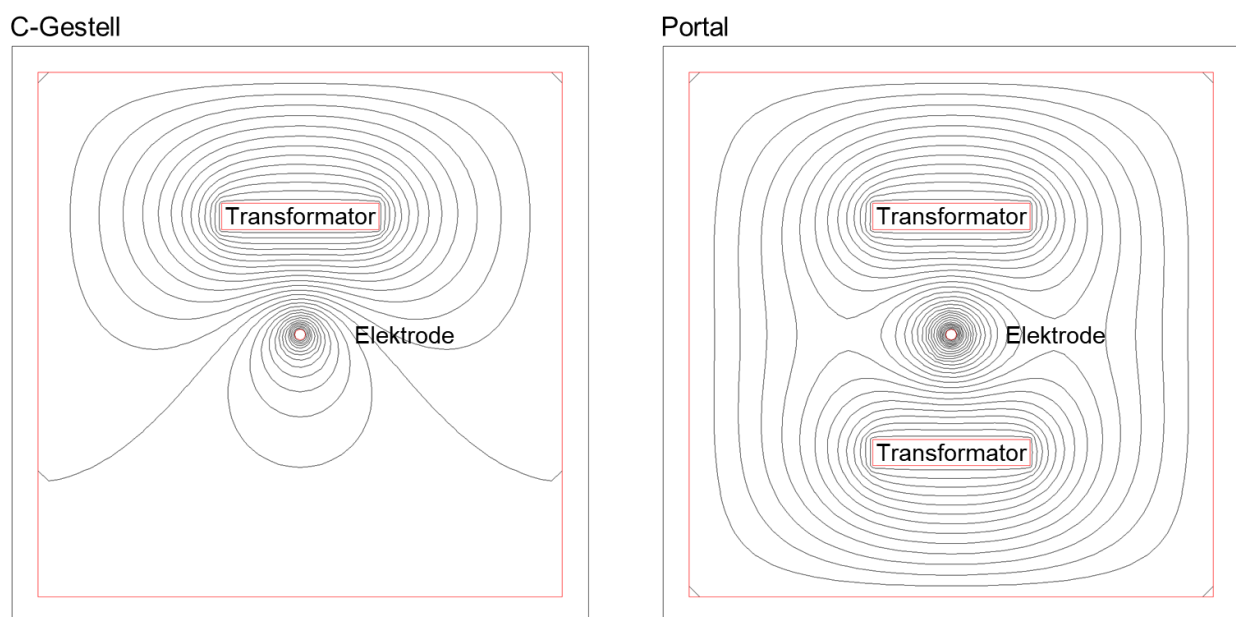


Abbildung 5: Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts)

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.

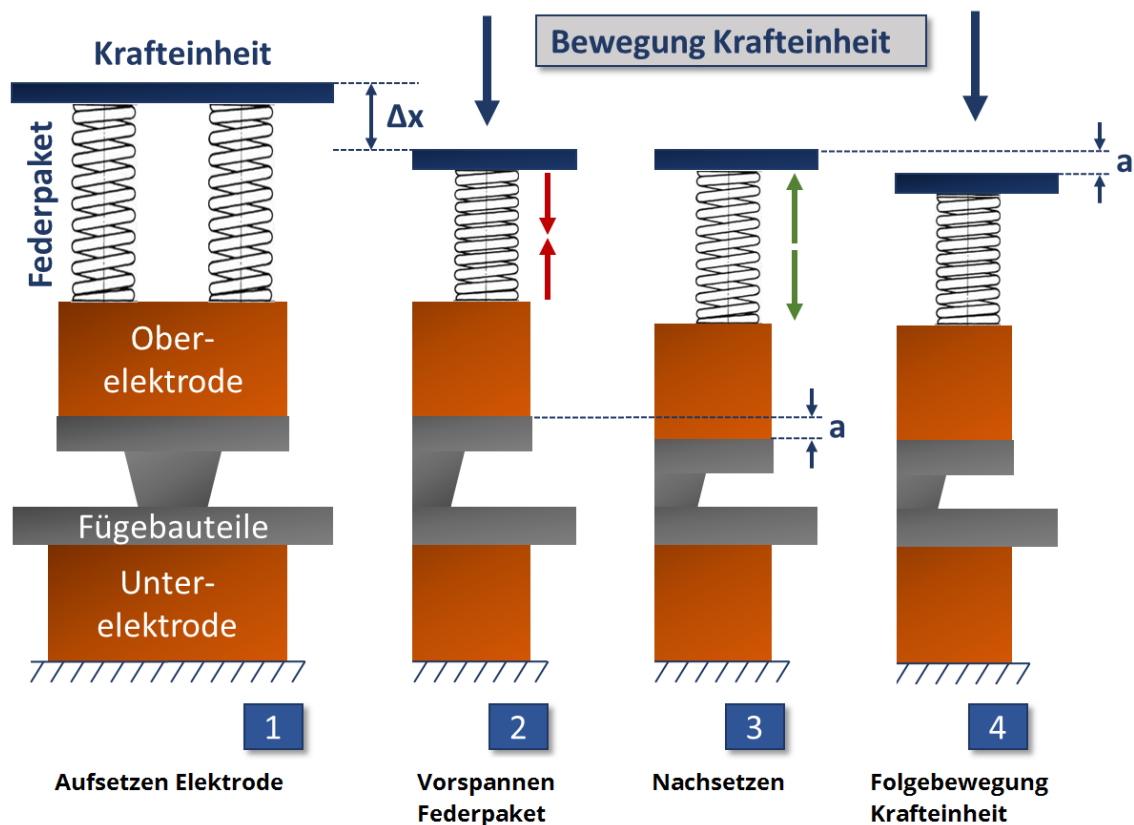


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket

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 Maschinenteknik ermöglicht das Nachsetzen mit elektromagnetischen Bewegungseinheiten [25]. [26]

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.

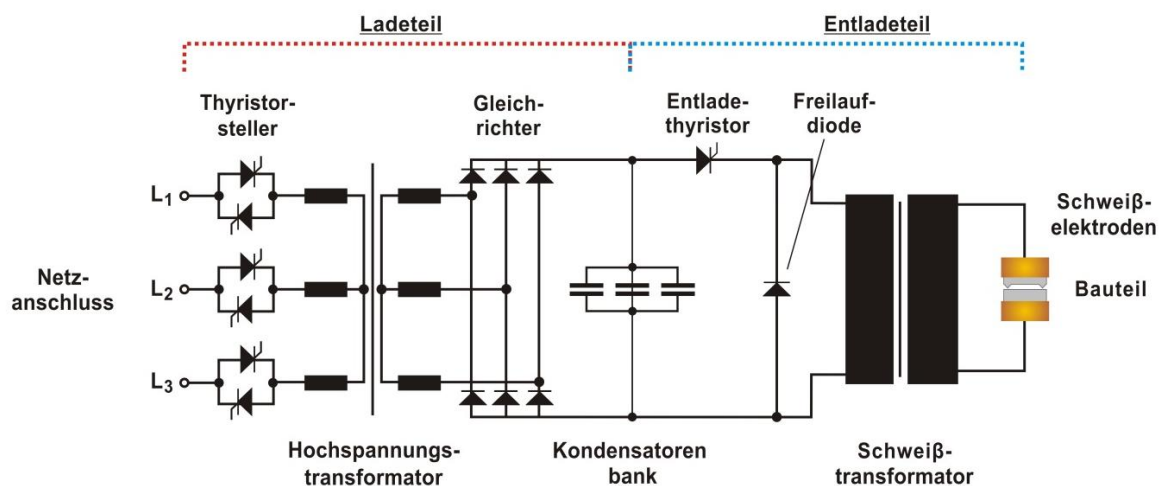


Abbildung 7: Prinzipschaltbild einer Kondensatorentladungsschweißanlage [2]

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) [26]. 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 [26]. 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 [26]. 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 . Mit einer geringeren Übersetzung verringert sich die Entladezeit und damit geht eine Erhöhung des Spitzenstromwerts t_p einher. Die freigesetzte Energie während des gesamten Schweißprozesses bleibt bei allen Übersetzungsverhältnissen gleich. 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 [24, 27]. Um unnötige Verluste zu vermeiden, sollte der Eisenkern des Transformators nicht in Sättigung gehen [14]. 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:

- Einlegen der Teile
- Sanftes Aufsetzen der Elektroden mit der Vorkraft
- Aufbauen der Schweißkraft
- Laden der Kondensatorbank
- Zünden des Entladethyristors → Entladen des Kondensators

Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

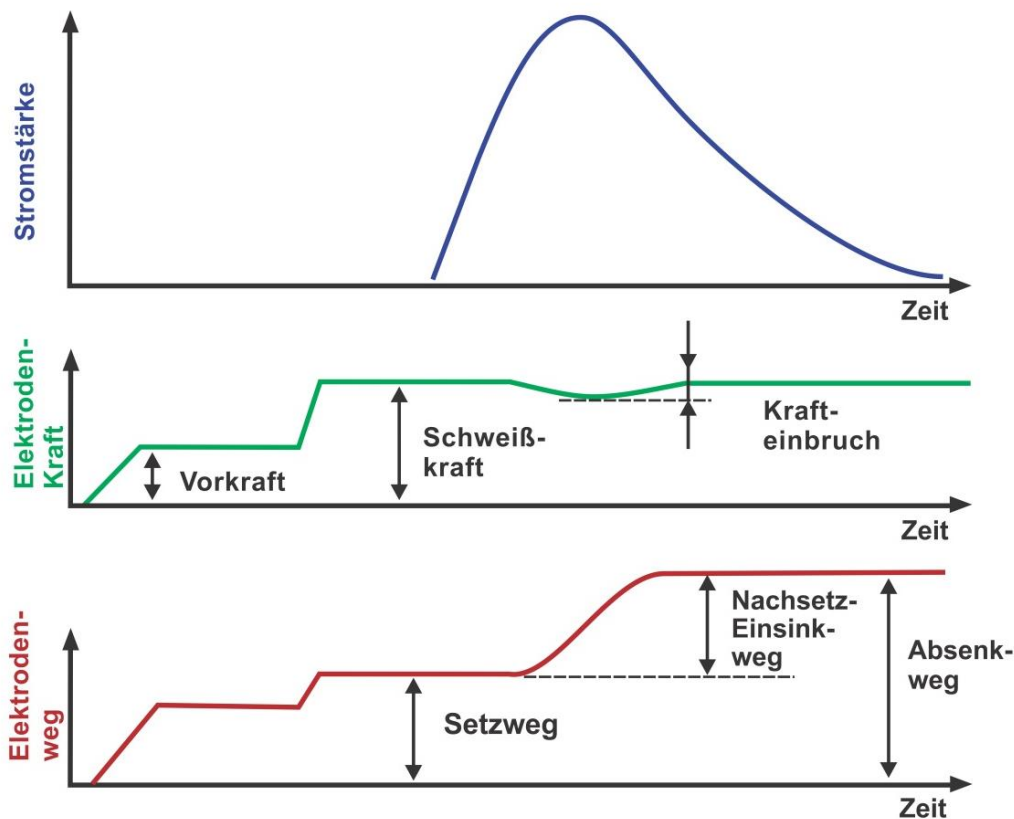


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen [2]

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 [4]. 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 [28, 29].

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 [30,

31]. 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, 6]. 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

Beim KE-Schweißen hängen der Schweißprozess und somit auch das Schweißergebnis von diversen Einflussgrößen und Parametern ab. In Abbildung 9 sind die wichtigsten Einflussgrößen dargestellt, die in

Tabelle 1 erläutert werden.



Abbildung 9: Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [2]

Tabelle 1: Einstellgröße und deren Einfluss an KE-Maschinen [2, 26, 32]

Parameter	Einfluss
Schweißkraft	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • für die Entladung zur Verfügung stehende Energie • Maximalstrom • Energie die in die Fügestelle eingebracht wird (nicht identisch der Ladeenergie)
Transformatorübersetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Stromanstiegszeit • Schweißzeit • Stromflusszeit • Maximalstrom
Kapazität des Kondensators	<ul style="list-style-type: none"> • für die Entladung zur Verfügung stehende Energie • Energie die in die Fügestelle eingebracht wird (nicht identisch der Ladeenergie) • Stromanstiegszeit • Schweißzeit • Stromflusszeit • Maximalstrom
Nebenzeiten wie: <ul style="list-style-type: none"> • Vorhaltezeit • Nachhaltezeit • Ladezeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Taktzeit • Ladestrom, Netzanschluss
Vorkraft	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft beim Aufsetzen • Verformung beim Aufsetzen

Parameter	Einfluss
Antriebseinheit	<ul style="list-style-type: none">• Geschwindigkeit beim Schweißkraftaufbau• Geschwindigkeit des Ausgleiches des Krafteinbruchs in Nachhaltezeit• Aufsetzbewegung, Prellen
Nachsetzeinheit	<ul style="list-style-type: none">• 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 [15]. 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 [28, 29]. Der Prozessablauf besteht aus vier charakteristischen Phasen, die fließend ineinander übergehen [4, 1]:

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. EN ISO 8167:2021 [33], DIN 8519:1996-05 [34] oder Merkblatt DVS 2905 [35], beziehen sich auf alle Verfahrensvarianten (Gleichstrom, Wechselstrom, KE-Schweißen).

Die besondere Prozesscharakteristik des KE-Schweißens und die Möglichkeit, große Ringbuckel zu verschweißen, werden nicht berücksichtigt. Im DVS-Merkblatt 2905 Buckelschweißen von Stählen [35] 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).

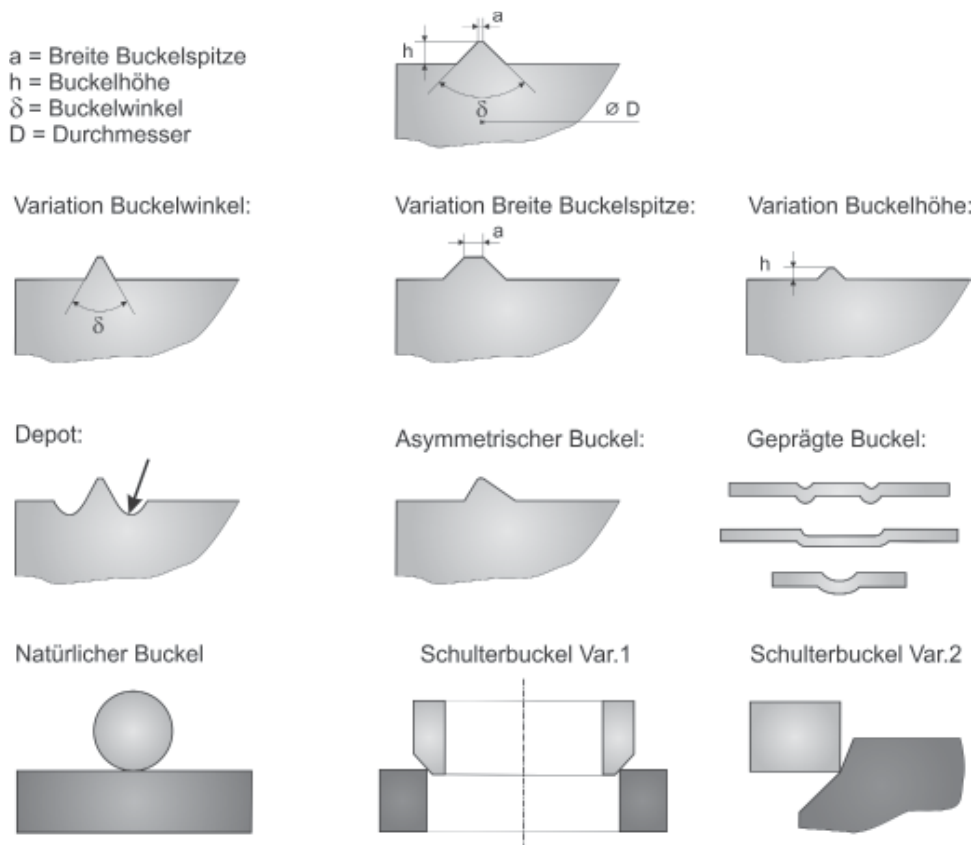


Abbildung 10: Variationen von Schweißbuckeln [2]

Um Kerben zu vermindern (z. B. Sichtseite von Rohrverbindungen), sollen asymmetrische Buckel angewandt werden. Die Toleranzen für die Buckelmaße sind nach [36] 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).

Die wenigen recherchierbaren Veröffentlichungen zur Buckelgeometrie beim KE-Schweißen beschreiben ein empirisches Vorgehen. In [6] wurden Ronden mit einem Durchmesser von 20 mm und einem Buckeldurchmesser von 17 mm verschweißt. Es wird festgestellt, dass die Buckelgeometrie beim KE-Schweißen einen großen Einfluss ausübt. Spitzere Buckelwinkel (50°) bewirken verstärkte Spritzerbildung und müssen mit geringerer Energie geschweißt werden. Die höhere Spritzerneigung kann „[...] nur durch ein besseres Nachsetzverhalten mit Hilfe einer höheren Elektrodenkraft oder mit einem strafferen Federpaket ausgeglichen werden [...]“ [6]. Stumpferer Buckelwinkel ergeben eine höhere Kerbwirkung der Fügeverbindung. Die Verbreiterung der Aufstandsfläche von 0,1 auf 0,3 mm zeigte keinen wesentlichen Einfluss. Die Rissbildung im Randbereich der Verbindungen höherkohlenstoffhaltiger Stähle kann ohne Nachwärmimpulse nicht vermieden werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf große Buckel ist nur bedingt möglich [37]. Weitere Untersuchungen der Buckelgeometrie sind in [38, 39, 40] zu finden.

3.8.2 Buckelgeometrien für Aluminiumlegierungen

In Normen, 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 [34, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44]. 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 formgespresst werden. Bei Stahl gebräuchliche Rundbuckel (zum Beispiel nach DIN 8519 [34] und im International Institute of Welding (IIW) genormt) haben sich aufgrund ungenügender Steifigkeit nicht bewährt [45]. Dilthey stellt fest, dass für das KE-Schweißen (für Stahl) die Buckel aus DIN EN 28167 (mittlerweile zurückgezogen und durch [33, 34] ersetzt) ungeeignet sind [40].

Weiterhin gibt es Angaben für Stahl und NE-Metalle. Letztere gelten allerdings explizit nicht für Aluminiumlegierungen [41, 44], jedoch wird festgestellt, dass durch formgeprägte Buckel eine kleinere Maßtoleranz erreicht werden kann [44].

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. [38]

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 [46]. Eine Schweißverbindung kann hergestellt werden, wenn die entsprechende Schicht entfernt wird oder andere besondere Maßnahmen ergriffen werden. Nach [26] 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 [47] 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 [48, 49]. Die prozessintegrierte Kurzzeitwärmebehandlung dient zum Vorwärmen mit konstanter Haltezeittemperatur oder in verschiedenen Formen zum Nachwärmen.

4 Forschungsziel

Das Schweißen von großen, fertig bearbeiteten Bauteilen erfolgt gewöhnlich durch das Laserstrahlschweißen oder das Elektronenstrahlschweißen. Als Alternative bietet sich das KE-Schweißen an. Neben den oben genannten Vorteilen ist zu erwähnen, dass keine zusätzlichen Einrichtungen, wie Einhausung zum Strahlenschutz, Vakuumkammer oder Schutzgaszufuhr, erforderlich sind. Es wird keine mehrdimensionale Bewegungseinrichtung für die Strahlführung, sondern nur eine lineare Bewegungseinheit für die Elektrode benötigt. Der Wärmeeintrag ergibt sich aus der Bauteilgeometrie, dem Werkstoff und den Maschinenparametern. Die Verbindung wird am gesamten Umfang gleichzeitig hergestellt. In Kombination mit dem geringen Wärmeeintrag wird so eine nahezu verzugsfreie Schweißverbindung hergestellt.

Die Auswahl der Parameter erfolgt beim KE-Schweißen auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen. Wesentliche Einflussgrößen sind die Maschinenparameter und die Buckelgeometrie, die entsprechend der gewünschten Schweißverbindung und dem Werkstoff angepasst werden müssen [2, 14, 33, 43]. Die Maschinenparameter werden von den elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Anlage bestimmt. Durch die elektrischen Eigenschaften (Kapazität der Kondensatorbatterie, Ladespannung, Transformatorübersetzung, Induktivität und Widerstand des Sekundärstromkreises) wird der Stromstärkeverlauf festgelegt [2, 14], durch die mechanischen Eigenschaften der Maschine (Schweißkraft, Masse und Federkonstante der Nachsetzeinheit) das Nachsetzverhalten der Elektroden [2, 4, 31]. Die Fügeverbindung entsteht im Zusammenwirken der Erwärmung der Fügezone mit der Elektrodenbewegung.

Dabei ist die Buckelgeometrie eine sehr wichtige Einflussgröße und bietet aufgrund der spanenden Bearbeitung große Gestaltungsspielräume, die jedoch kaum genutzt werden. Meist werden trapezförmige Buckelquerschnitte mit einer Aufstandsfläche von ca. 0,2 mm und einem Buckelwinkel von 90 ° gewählt [2]. Große Ringbuckel (>Ø 50 mm) verhalten sich beim Schweißen anders als kleine Buckelschweißteile wie Muttern oder geprägte Blechteile. Ursache dafür sind die geometrischen Abmessungen und die hohe Steifigkeit der Massivbuckel. Beim KE-Schweißen ist es wichtig, dass der Schweißstrom gleichmäßig über den Buckel verteilt fließt. Deshalb werden für große Bauteile Portalmaschinen mit symmetrischer Stromzuführung eingesetzt und

für die Maßtoleranzen enge Grenzen gesetzt [2, 3, 37]. Allerdings gibt es für die Konstruktion großer Buckelgeometrien kaum Hinweise in der Normung und in der Literatur.

Das Potenzial der Geometrie großer Massivbuckel wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auf der Grundlage des durch den Antragsteller erarbeiteten neuen Prozessverständnisses [4, 1] systematisch erschlossen.

5 Lösungsweg

Die Bearbeitung des Projektes erfolgt iterativ im Zusammenspiel von Simulation und Experiment sowie durch Anwendung der statistischen Versuchsplanung (DOE). Der iterative Projektablauf ist in Abbildung 11 dargestellt. Ein rein experimentelles Vorgehen ist zu aufwändig und der Erkenntnisgewinn zu gering. 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 weiterentwickelt und validiert wird.

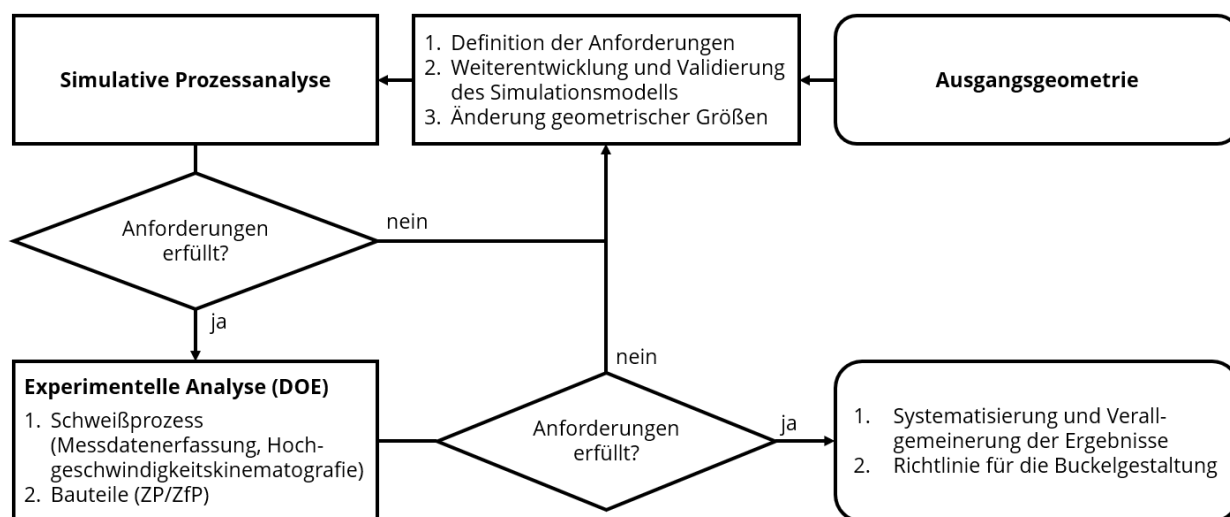


Abbildung 11: Iterativer Projektablauf

Die durchzuführenden Experimente werden mittels DOE festgelegt, um Ergebnisse mit ausreichender Sicherheit und Genauigkeit bei minimaler Versuchsanzahl zu erlangen. Im Experiment werden bauteilähnliche Prüfkörper geschweißt, die zerstörungsfrei und zerstörend geprüft werden. Die Ergebnisse dienen der Ermittlung der Zielgrößen und der Validierung der Simulation. Die Schweißungen, drei Hauptversuchsreihen, wurden auf Portalmaschinen bei drei industriellen Anlagenherstellern (ALH) durchgeführt. Die Messdatenerfassung und die Hochgeschwindigkeitskinematografie vor Ort wurden durch mobile Messtechnik und eine Hochgeschwindigkeitskamera realisiert. Das Schweißen auf unterschiedlichen Anlagen ermöglicht auch die Bewertung abweichender Maschineneigenschaften (Nachsetzverhalten, Stromkurven).

Das Forschungsvorhaben ist in vier Arbeitspakete unterteilt:

1. Schweißversuche mit bauteilähnlichen Prüfkörpern
2. Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung der Bauteile
3. Weiterentwicklung, Validierung und Anwendung des Simulationsmodells
4. Zusammenfassen der Ergebnisse, Abschlussbericht

Die zeitliche Bearbeitung der Arbeitspakete, die Treffen des projektbegleitenden Ausschusses und die Termine der Hauptversuche sind in Abbildung 12 dargestellt.

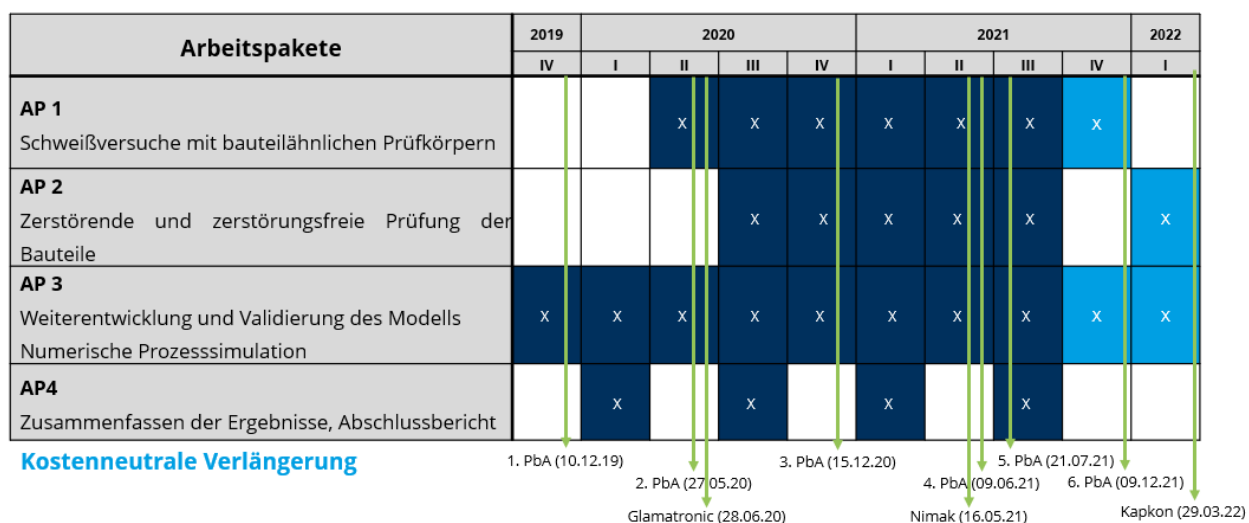
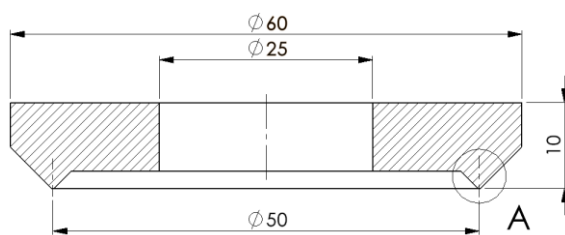


Abbildung 12: Bearbeitung der Arbeitspakete und Termine des Forschungsvorhabens

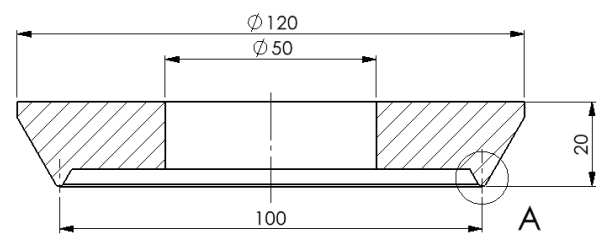
6 Versuchsvorbereitung

6.1 Übersicht aller Buckelgeometrien und -werkstoffe

Die Untersuchungen sind in drei Hauptversuchsreihen bei drei unterschiedlichen Anlagenherstellern (ALH) unterteilt. ALH 1 ist die *GLAMATronic GmbH - KE-Schweißen*, ALH2 ist die *NIMAK GmbH* und ALH3 ist die *KAPKON GmbH*. Bei ALH 1 und ALH2 wurden Ringbuckeldurchmesser von 50 mm untersucht (siehe Abbildung 13a) und bei ALH3 wurde der Ringbuckeldurchmesser auf 100 mm erhöht (siehe Abbildung 13b). Bei der Erhöhung des Durchmessers wurde die Abmessung linear skaliert. Im Rahmen einer Diplomarbeit konnte festgestellt werden, dass auch die Schweißbereiche und die Spritzerneigung linear skalierbar sind [50].



a) Abmessung für Buckel- \varnothing = 50 mm



b) Abmessung für Buckel- \varnothing = 100 mm

Abbildung 13: Geometrische Abmessung des Ringbuckels für einen Buckeldurchmesser von 50 mm und 100 mm

In

Tabelle 2 sind die einzelnen Detailabmessungen der jeweiligen Buckelgeometrie in Abhängigkeit der Versuchsreihe beim Anlagenhersteller dargestellt. Die Geometrien wurden immer in Absprache mit dem PA festgelegt. Aufgrund der hohen Erfahrung innerhalb des PAs wurden ausschließlich Geometrien eingesetzt, die in der Anwendung wiederzufinden sind (Ausnahme: Geometrie 4). Die Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsreihe wurden für die Festlegung der Geometrie der neuen Versuchsreihe berücksichtigt. Alle untersuchten Materialdickenkombinationen (MDK) sind in Tabelle 3 dargestellt. Der Fokus lag auf MDK 1 und MDK 2, da diese auch im Getriebebau für große Ringbuckeldurchmesser verwendet werden. Bei MDK 2 wurden die Bauteile einsatzgehärtet.

Tabelle 2: Übersicht aller untersuchten Buckelgeometrien im Detail (A)

ALH1 (Ø 50 mm)	Geometrie 1 	Geometrie 2 	Geometrie 3 	Geometrie 4 	Geometrie 5
ALH2 (Ø 50 mm)	Geometrie 2 	Geometrie 6 	Geometrie 7 	Geometrie 8 	
ALH3 (Ø 100 mm)	Geometrie 9 	Geometrie 10 	Geometrie 11 	Geometrie 12 	Geometrie 13

Tabelle 3: Verwendete Werkstoffe in Abhängigkeit des Hauptversuchs beim Anlagenhersteller (ALH)

MDK	Buckelwerkstoff	Blechwerkstoff	Hauptversuch
1	42CrMo4	S355MC	ALH1, ALH2, ALH3
2	16MnCr5, einsatzgehärtet	S355MC	ALH1, ALH2, ALH3
3	42CrMo4	S355MC, nitriert	ALH2
4	16MnCr5, einsatzgehärtet	S355MC, nitriert	ALH2

6.2 Festlegen der Fügeaufgabe

Gemeinsam mit dem PA wurde zur ersten Sitzung die Fügeaufgabe festgelegt. Diese ist im Querschnitt in Abbildung 14 dargestellt. Dabei wurden aufgrund von Vorversuchen und der industriellen Erfahrung folgende Hinweise eingearbeitet:

- Äußere Buckelflanke bis zum Außenbereich des Bauteils verlängern
- Krafteinwirkung symmetrisch über Buckelquerschnitt
- Wiederholbarkeit der Positionierung durch Buckelzentrierung erhöhen
- Spannungsmessung an unterer und oberer Elektrode für Validierung der Simulation
- Blechdicke $s = 8\text{mm}$, um beim Prüfen hohe Steifigkeit des Blechs zu gewährleisten

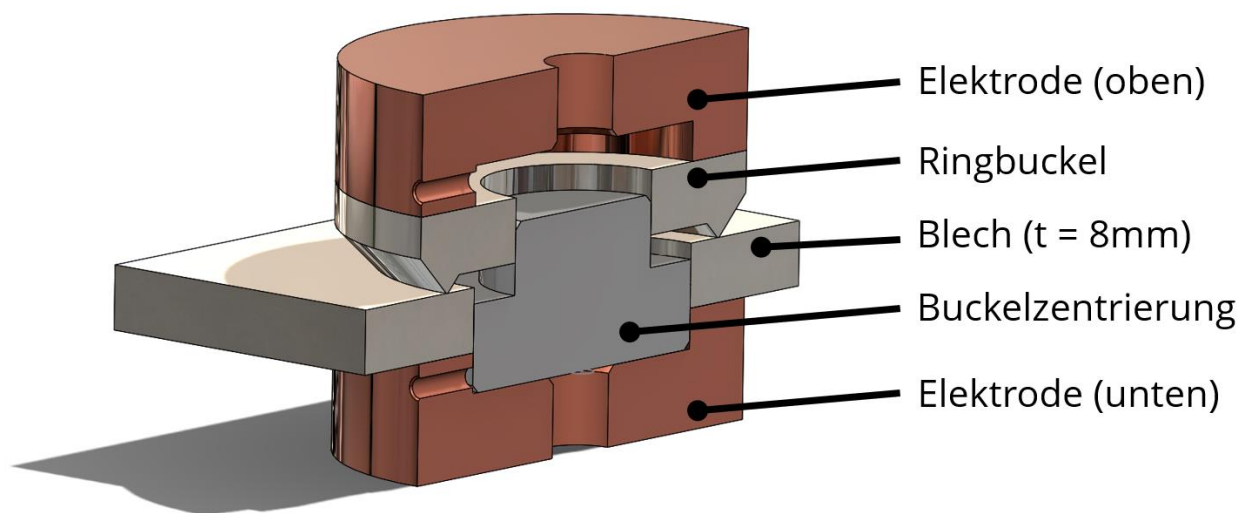


Abbildung 14: Darstellung der Fügeaufgabe im Querschnitt

6.3 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 Dewe-50-USB2-8 synchron aufgezeichnet. Damit ist eine Abtastung von bis zu 200kHz möglich; bei einer Auflösung von 24-bit. Der Messbereich ist abhängig von der verwendeten Messkarte und kann zwischen $\pm 10\text{mV}$ und $\pm 50\text{V}$

gewählt werden. Ebenso stehen Messkarten zur Verfügung mit einem Messbereich von $\pm 0,5$ mV bis ± 10 V und Messkarten mit einem Messbereich von ± 20 V und ± 1400 V.

6.3.1 Strommessung

Die verwendeten KE-Maschinen erreichen bis zu 1000 kA Spitzenstromstärke. Für die Messung der Stromstärken werden Rogowskimessspulen (Rogowskigürtel) mit nachgestelltem Integrator genutzt [51]. 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.

6.3.2 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 [52]. Mit der in [53, 54] entwickelten Methode ist es möglich, den systematischen Messfehler analytisch zu bestimmen und das Spannungssignal zu korrigieren.

6.3.3 Wegmessung

Zur Wegmessung werden potentiometrische Wegaufnehmer eingesetzt. Die Eignung wurde in [4] 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.

6.3.4 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.

6.4 Bewerten der Auspresskraft

Zur Ermittlung von Schweißbereichen wird eine Mindestauspresskraft festgelegt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass eine Mindestnahtbreite von 1 mm erreicht werden muss. Die Streckgrenze des weicheren Werkstoffs der Fügeverbindung beträgt $355 \frac{N}{mm^2}$. Bei einem Ringbuckeldurchmesser von 50 mm beträgt die Mindestauspresskraft nach Gleichung (5): $F_{min} = 55,8 \text{ kN}$.

$$F_{min} = 355 \frac{N}{mm^2} * \left(\frac{\pi}{4} * ((50mm + 1mm)^2 - (50mm - 1mm)^2) \right) \quad (5)$$

6.5 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 15) [4].

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 Schweißspritzer hat stark zugenommen. Diese verglühen außerhalb der Anlage und bewegen sich bereits Richtung Erdboden. Bei Spritzerklasse 3 verglühen die Schweißspritzer auf dem Erdboden.

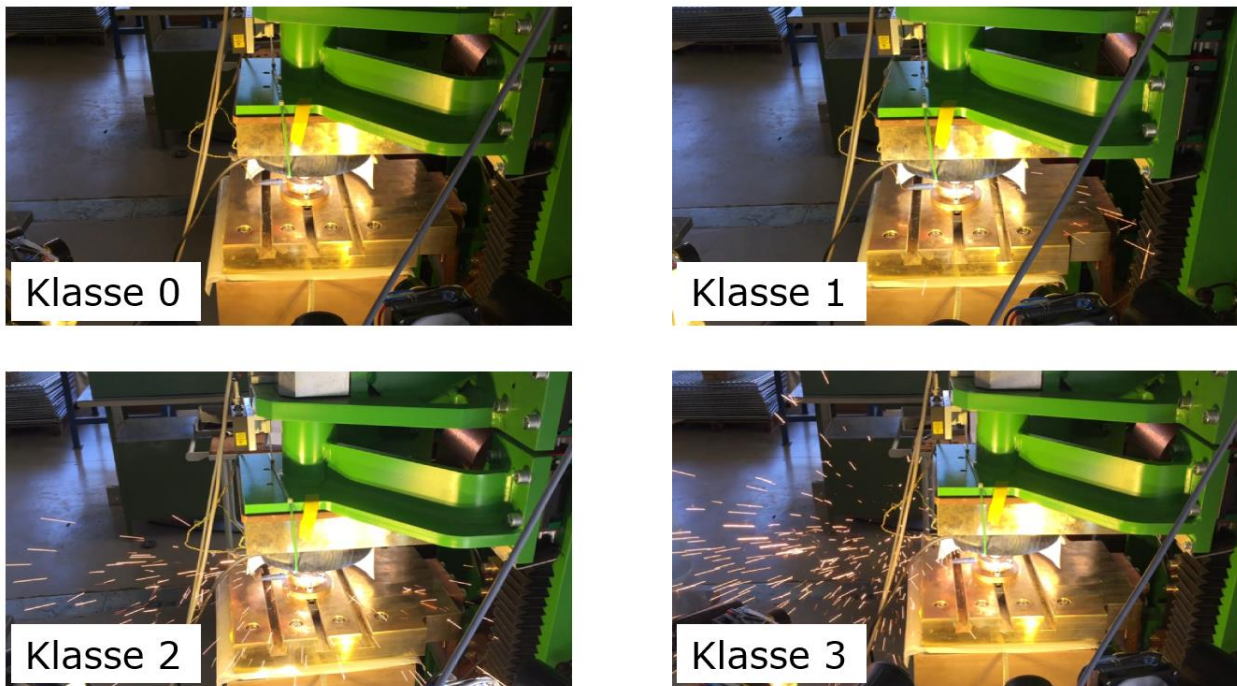


Abbildung 15: Klassifizierung der Spritzer

6.6 Bauteilvorbereitung

Für alle Hauptversuche wurden die Bauteile auf die gleiche Art und Weise vorbereitet. Um den Einfluss der Buckelgeometrie nicht von der Blechoberfläche oder der Zunderschicht zu beeinflussen, wurden alle Blechproben beidseitig geschliffen. Der Werkstoff 16MnCr5 wurde durch Vakuumhärten einsatzgehärtet. Die Einsatzhärte-tiefe (CHD) beträgt $0,5 \text{ mm} + 0,3 \text{ mm}$ bei einer Härte von $670 + 100 \text{ HV}_{30}$. Bei MDK 3 wurde der Baustahl S355MC gasoxinitriert. Die Nitrierhärte-tiefe (NHD) beträgt dabei $0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ mm}$.

7 Hauptversuch 1

Die erste Hauptversuchsreihe fand bei der Fa. *GLAMATronic GmbH - KE-Schweißen* statt. Zur Verfügung stand eine Portalanlage *GKS-P 120/200* mit 120 kWs Ladeenergie E_L bei einer maximalen Ladespannung U_L von 3200 V. Dabei wird ein maximaler Spitzenstrom I_p von 750 kA bei einer Stromanstiegszeit t_p von 7,3 ms erreicht. Insgesamt wurden fünf Buckelgeometrien bei einem Buckeldurchmesser von 50 mm untersucht und zwei verschiedenen Werkstoffkombinationen (siehe Abschnitt 6.1). In Abbildung 16 ist die Fügeaufgabe vor Ort dargestellt.

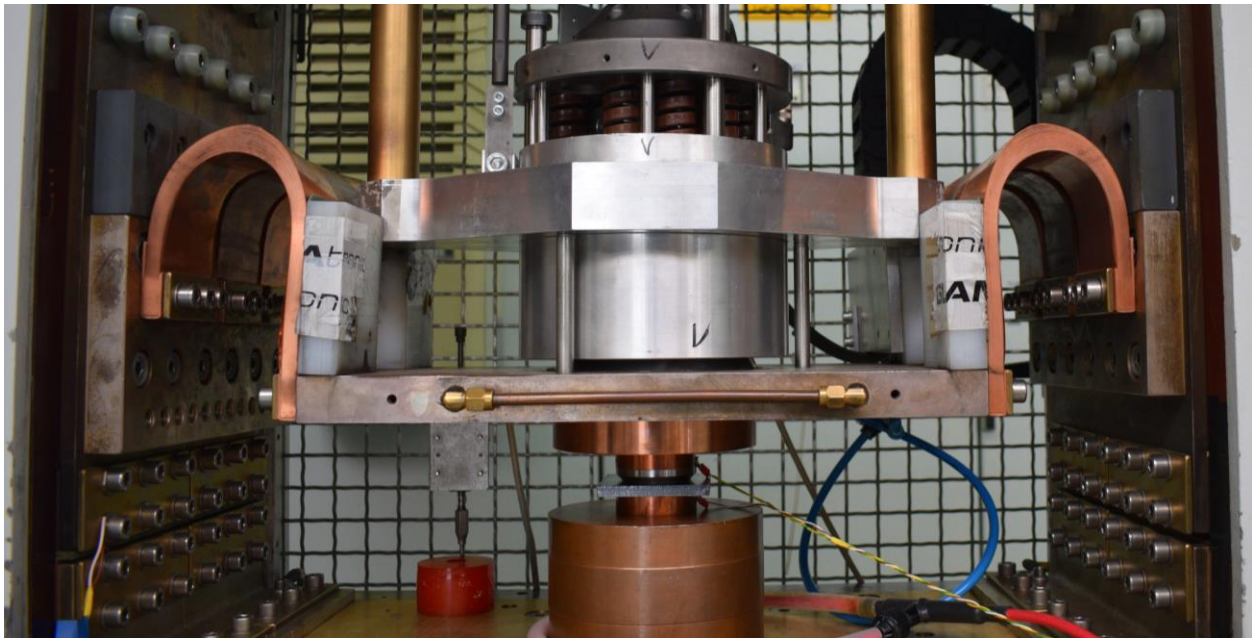


Abbildung 16: Experimenteller Aufbau bei der Fa. Glamatronic GmbH

7.1 Ermittlung der Schweißbereiche

Zur Ermittlung der Schweißbereiche wurde die Elektrodenkraft F_E von 20 bis 70 kN und die Ladeenergie E_L von 10 bis 40 kJ variiert. Die untere Grenze des Schweißbereichs ist erreicht, wenn die Mindestauspresskraft $F_{min} = 55,8 \text{ kN}$ nicht erreicht wird (siehe Abschnitt 6.4). Die obere Schweißbereichsgrenze ist erreicht, wenn die Spritzerklasse größer oder gleich 2 ist (siehe Abschnitt 6.5). Mit Wiederholungsversuchen wurden insgesamt 407 Versuche durchgeführt und ausgewertet. Allerdings werden nur vereinzelte Versuche drei Mal wiederholt. In Abbildung 17 ist der Stromstärkeverlauf aller Versuche dargestellt. Dort sind die sechs unterschiedlichen Einstellungen der Ladeenergie erkennbar. Die maximale Stromstärke beträgt ca. 320 kA.

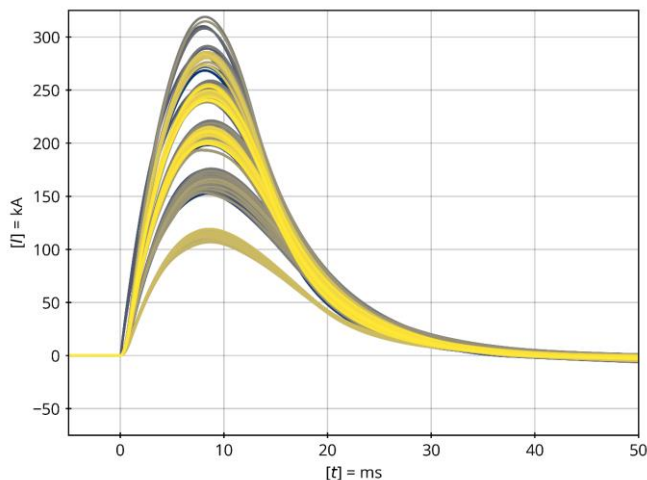
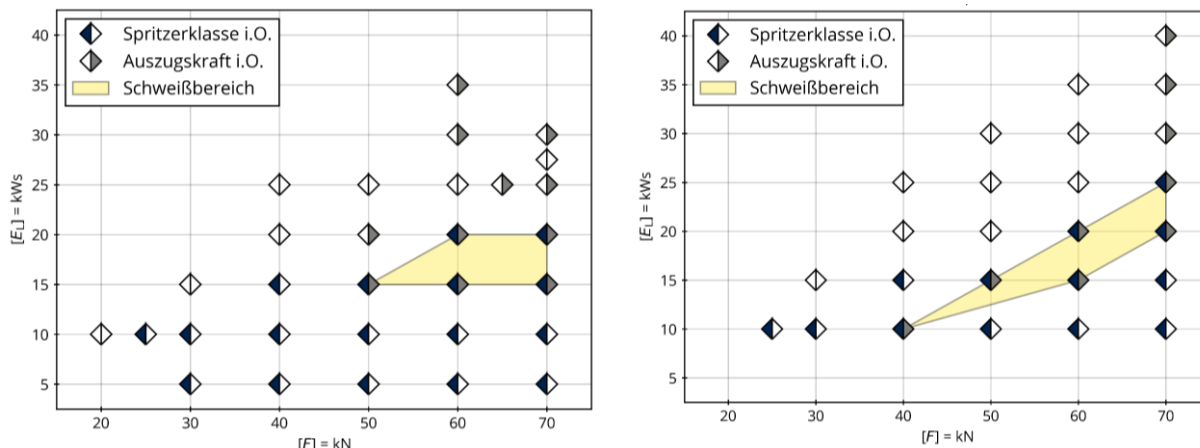


Abbildung 17: Stromstärkeverlauf aller Versuche

7.1.1 Schweißbereich der Geometrie 1 für MDK 1 und 2



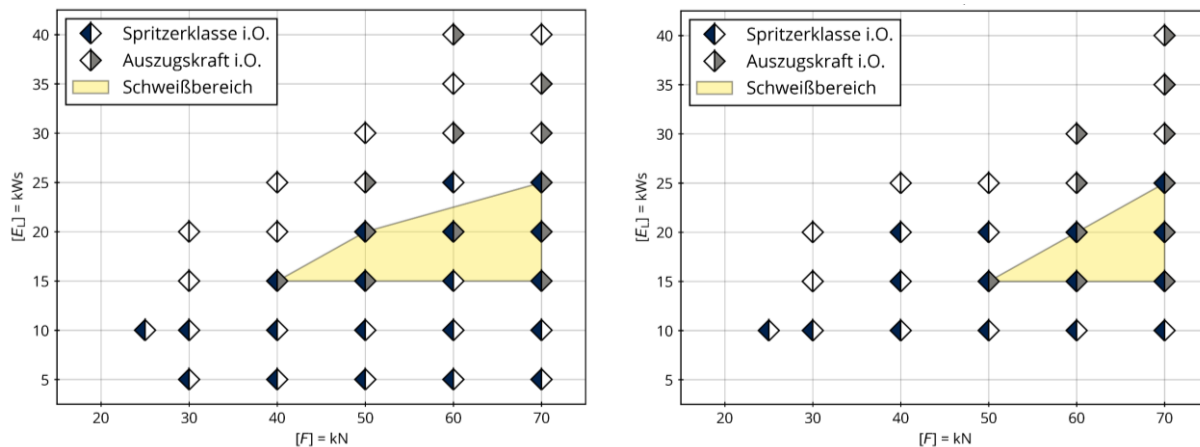
a) MDK 1: 42CrMo4-S355MC

MDK 2: 16MnCr5-S355MC

Abbildung 18: Schweißbereich der Geometrie 1 für MDK1 und MDK2

In Abbildung 18 sind die Schweißbereiche der Geometrie 1 für zwei verschiedene MDK gegenübergestellt. Für den Buckelwerkstoff 42CrMo4 und 16MnCr5 kann ein Schweißbereich festgestellt werden. Für MDK 1 wird bei einer Elektrodenkraft von 60 kN und einer Ladeenergie von 20 kW eine Auspresskraft über 100 kN festgestellt. Bei 16MnCr5 ist ebenfalls eine maximale Auspresskraft von etwa 100 kN feststellbar. Diese tritt bei einer Elektrodenkraft von 70 kN und einer Ladeenergie von 25 kW auf.

7.1.2 Schweißbereich der Geometrie 2 für MDK 1 und 2



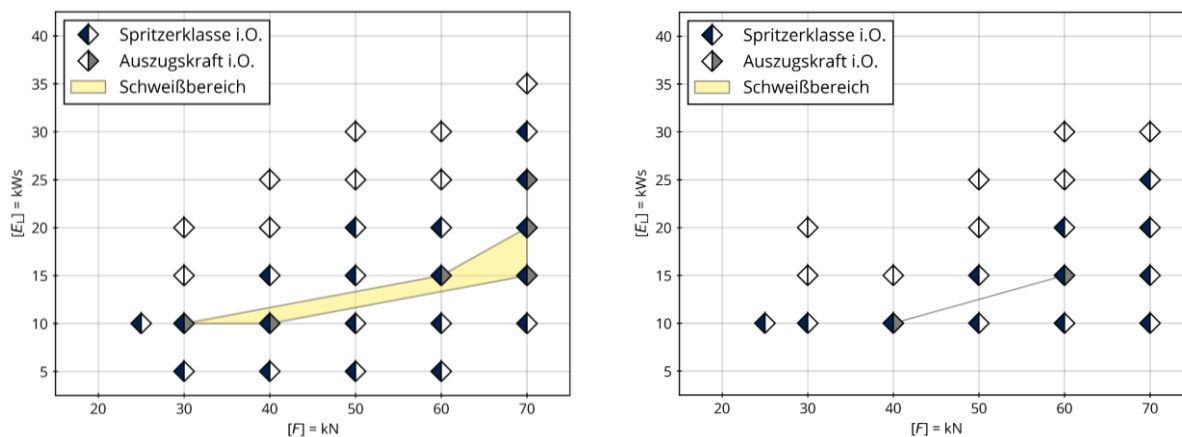
a) MDK 1: 42CrMo4-S355MC

MDK 2: 16MnCr5-S355MC

Abbildung 19: Schweißbereich der Geometrie 2 für MDK1 und MDK2

In Abbildung 19 sind die Schweißbereiche der Geometrie 2 für zwei verschiedene MDK gegenübergestellt. Für den Buckelwerkstoff 42CrMo4 und 16MnCr5 wird der größte Schweißbereich aller fünf untersuchen Buckelgeometrien festgestellt. Der Hauptgrund hierfür ist die geringere Spritzerneigung. Die Auspresskräfte der Buckelgeometrie 2 sind mit denen der Buckelgeometrie 1 vergleichbar. Auch hier werden Auspresskräfte über 100 kN festgestellt. Beispielsweise bei einer Ladeenergie von 25 kWs und einer Elektrodenkraft von 70 kN für MDK 1. Für die MDK2 konnte bei gleicher Parametereinstellung eine Auspresskraft von 175 kN festgestellt werden, was die größte ermittelte Auspresskraft der Versuchsreihe darstellt.

7.1.3 Schweißbereich der Geometrie 3 für MDK 1 und 2



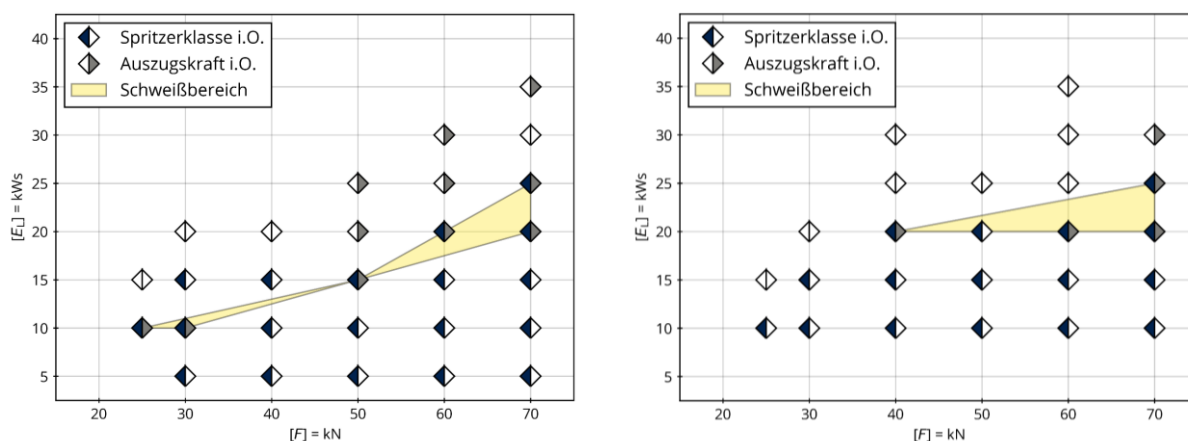
a) MDK 1: 42CrMo4-S355MC

MDK 2: 16MnCr5-S355MC

Abbildung 20: Schweißbereich der Geometrie 3 für MDK1 und MDK2

In Abbildung 20 sind die Schweißbereiche der Geometrie 3 für zwei verschiedene MDK gegenübergestellt. Für die Buckelwerkstoffe 42CrMo4 (MDK1) und 16MnCr5 (MDK2) wird ein geringer Schweißbereich festgestellt. Grund hierfür sind die hohe Spritzerneigung und die geringen Auspresskräfte bei MDK 2. Bereits ab einer Ladeenergie von 15kWs werden Spritzerklasse 2 oder 3 erreicht. Bei den Buckelgeometrien 1, 2, 4 und 5 ist dies nur bei geringen Elektrodenkräften (< 30 kN) festzustellen.

7.1.4 Schweißbereich der Geometrie 4 für MDK 1 und 2



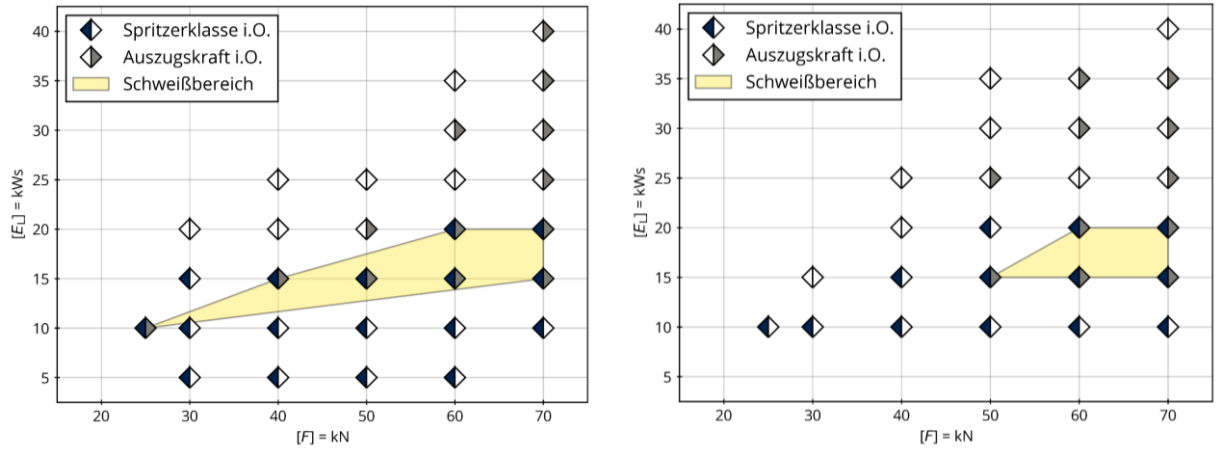
a) MDK 1: 42CrMo4-S355MC

MDK 2: 16MnCr5-S355MC

Abbildung 21: Schweißbereich der Geometrie 4 für MDK1 und MDK2

In Abbildung 21 sind die Schweißbereiche der Geometrie 4 für zwei verschiedene MDK gegenübergestellt. Der Schweißbereich der Buckelgeometrie 4 schwankt stark innerhalb der Parameter. So ist beispielsweise eine ausreichende Mindestauspresskraft F_{\min} bei einer Ladeenergie von 20 kWs bei einer Elektrodenkraft von 40 kN und 60kN feststellbar. Allerdings ist bei einer Elektrodenkraft von 50 kN bei gleicher Ladeenergie keine ausreichende Mindestauspresskraft feststellbar. Auch in den Standardabweichungen der Auspresskraft werden bei Buckelgeometrie 4 die höchsten Schwankungen festgestellt.

7.1.5 Schweißbereich der Geometrie 5 für MDK 1 und 2



a) MDK 1: 42CrMo4-S355MC

MDK 2: 16MnCr5-S355MC

Abbildung 22: Schweißbereich der Geometrie 5 für MDK1 und MDK2

In Abbildung 22 sind die Schweißbereiche der Geometrie 5 für zwei verschiedene MDK gegenübergestellt. Buckelgeometrie 5 weist ähnliche Ergebnisse wie Buckelgeometrie 2 auf. Auch Auspresskräfte über 100 kN werden hier für beide Materialdickenkombinationen erreicht.

7.2 Anbindungsbreite

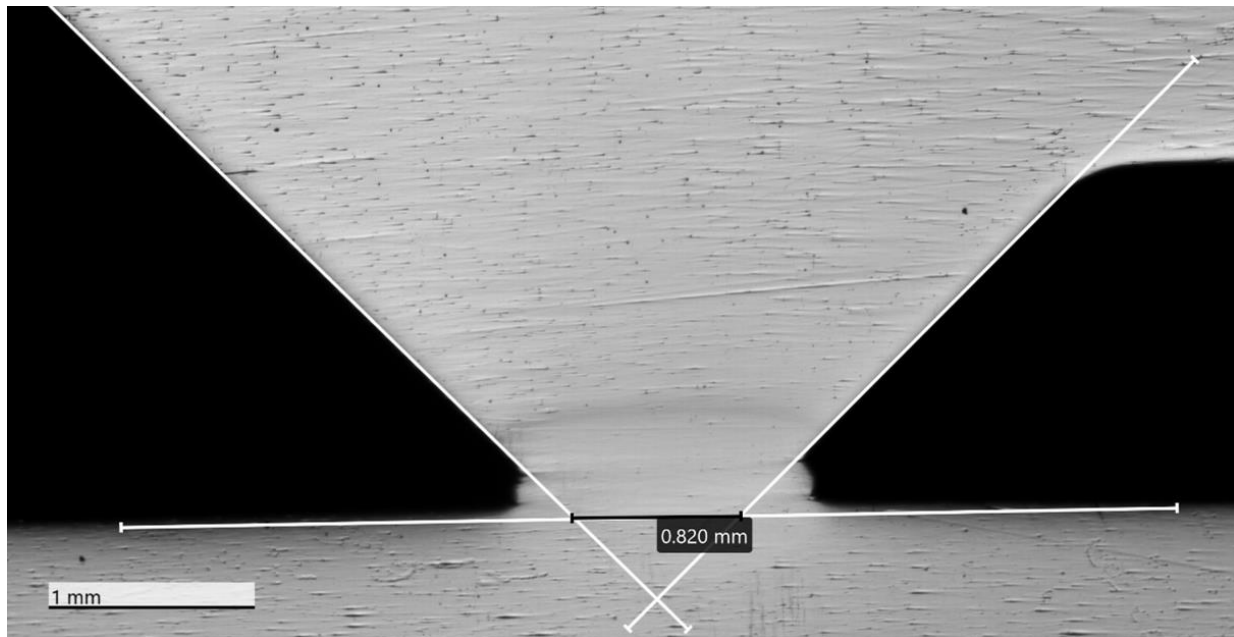


Abbildung 23: Ermittlung der Anbindungsbreite im Querschliff für Buckelgeometrie 2 und MDK 1

Zusätzlich zu den Auspresskräften wurde die Anbindungsbreite für einzelne Schweißparameter ermittelt. Die Auspresskraft wurde nicht vor Ort ermittelt, sondern an der TU Dresden. Dadurch war es nicht möglich, Wiederholungsversuche ausschließlich im Schweißbereich anzufertigen. Je Buckelgeometrie wurden zwischen drei und vier Proben metallographisch untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Spritzerklassen berücksichtigt. Je Probe wurden vier Schliffe hergestellt und anschließend die Anbindungsbreite nach Messmethode 1 in [2] ermittelt. In Abbildung 23 ist beispielhaft die Ermittlung der Anbindungsbreite im Querschliff für Buckelgeometrie 2 und MDK 1 dargestellt.

In Abbildung 24 ist die Anbindungsbreite unterschiedlicher Schweißversuche dargestellt. Als Kriterium wurde eine Anbindungsbreite von 1 mm festgelegt (siehe Abschnitt 6.4). Sind die Anbindungsbreiten > 1 mm dann sind auch die Auspresskräfte $> F_{\min}$. Bei den Übergangsbereichen, wie beispielsweise Versuch 16, sind die Auspresskräfte geringfügig größer die Mindestauspresskraft F_{\min} . In diesem Beispiel handelt es sich um den Buckelwerkstoff 16MnCr5 (MDK 2) die Auspresskraft beträgt 60 kN.

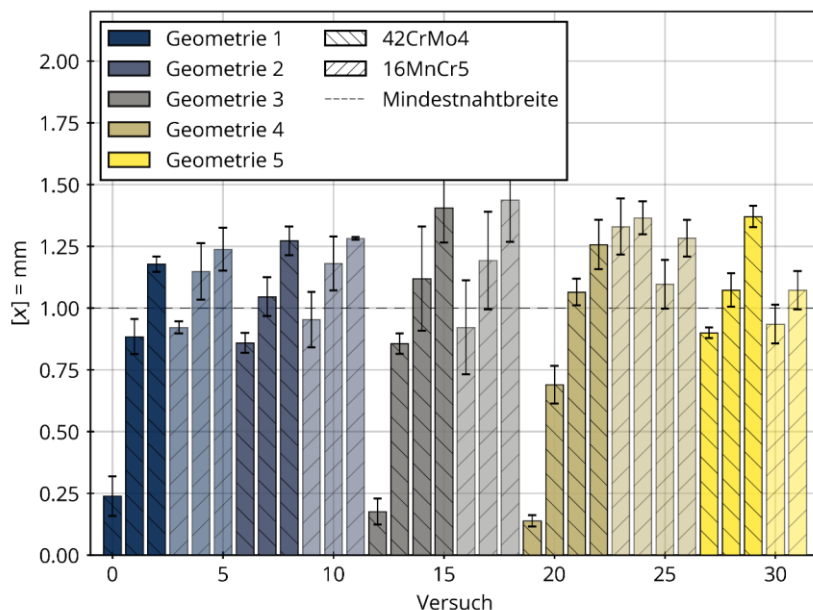


Abbildung 24: Anbindungsbreite unterschiedlicher Schweißversuche in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK

In Abbildung 24 ist die Anbindungsbreite unterschiedlicher Schweißversuche dargestellt. Als Kriterium wurde eine Anbindungsbreite von 1 mm festgelegt (siehe Abschnitt 6.4). Sind die Anbindungsbreiten > 1 mm, dann sind auch die Auspresskräfte > F_{min} zu erkennen. Bei den Übergangsbereichen, wie beispielsweise Versuch 16, sind die Auspresskräfte geringfügig größer oder kleiner als die Mindestauspresskraft F_{min} . In diesem Beispiel handelt es sich um den Buckelwerkstoff 16MnCr5 (MDK 2), der Buckelgeometrie 3, einer Ladeenergie $E_L = 15$ kWs und einer Elektrodenkraft F_E von 40 kN. Dabei beträgt die Auspresskraft ca. 60 kN. Somit ist eine Korrelation der Auspresskraft und der Anbindungsbreite gegeben. Der Einfluss der Buckelgeometrie auf die Anbindungsbreiten lässt sich nicht vollständig darstellen, da die Schweißbereiche beim Festlegen der Schliffproben unbekannt waren.

7.3 Härteverlauf

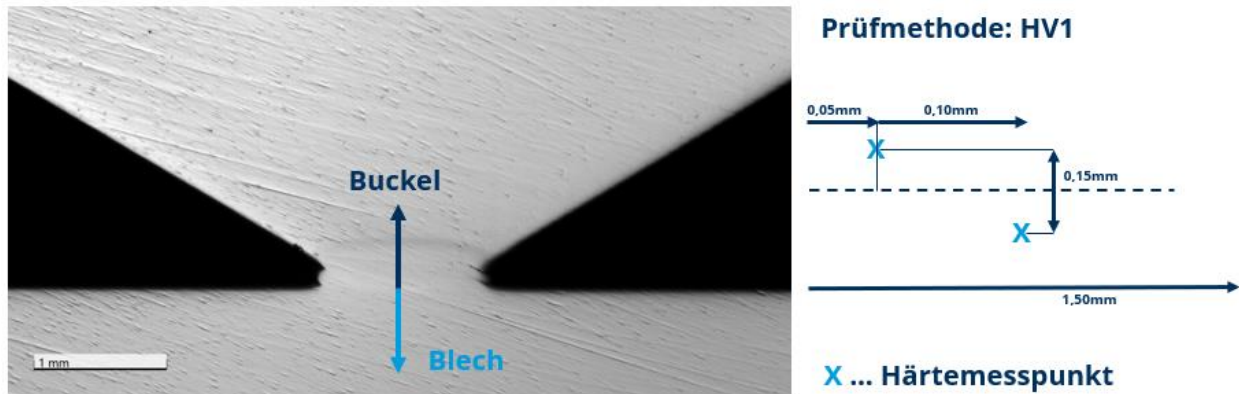
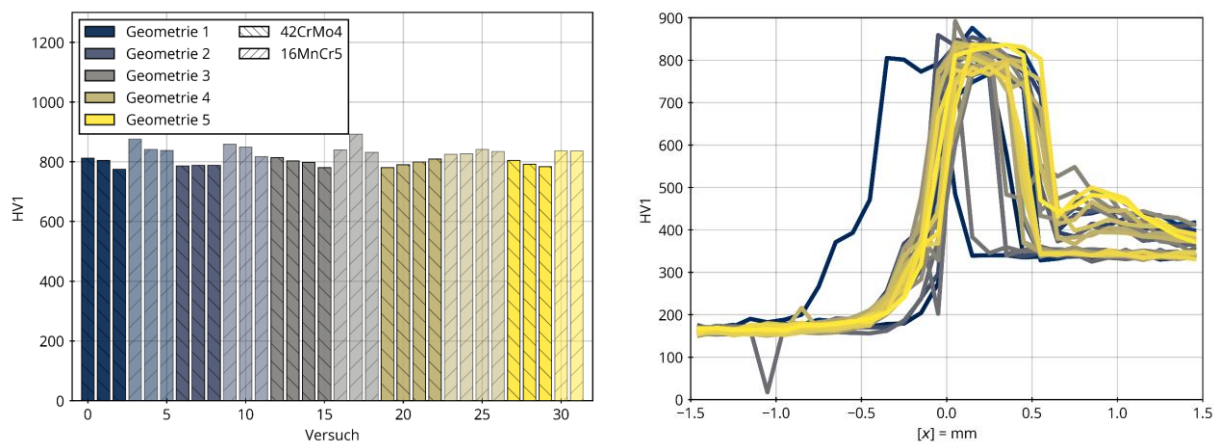


Abbildung 25: Prüfmethode zur Bestimmung der Vickershärte HV1 in der Fügezone

Neben der Anbindungsbreite wurde auch der Härteverlauf in der Fügezone ermittelt. Die Prüfmethode ist in Abbildung 25 dargestellt. Es wird dabei ein Linienscan in den Buckel und ein Linienscan in das Blech durchgeführt.



a) Maximale Vickershärte HV1 in der Fügezone b) Übersicht der Härteverläufe nach Vickers HV1
 Abbildung 26: Maximale und Verlauf der Vickershärte HV1

In Abbildung 26a ist die maximale Vickershärte HV1 unterschiedlicher Schweißversuche in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK dargestellt. Die Versuche entsprechen der Untersuchungen zur Anbindungsbreite (siehe Abbildung 24). Es ist festzustellen, dass unabhängig der Spritzerklasse, der Ladeenergie und der Elektrodenkraft eine Aufhärtung von etwa 800 HV1 in der Fügezone auftritt. Dies ist nicht von der Buckelgeometrie, dem Buckelwerkstoff und der Wärmebehandlung abhängig (siehe Abbildung 26b). Aufgrund dieser Aufhärtung versagt die Fügeverbindung spröde [26].

7.4 Fazit der Ergebnisse aus Hauptversuchsreihe 1

Aufgrund des größten Schweißbereichs und der hohen Auspresskräfte wurde die Ringbuckelgeometrie 2 als Vorzugsvariante festgelegt. Dies bedeutet, dass diese Buckelgeometrie auch im Hauptversuch 2 berücksichtigt wird. In der Auswertung der Anbindungsbreite konnte kein Einfluss der Buckelgeometrie festgestellt werden. Bei der Auswertung der Härtemessung konnte eine Aufhärtung der Fügezone, unabhängig von den experimentellen Randbedingungen, festgestellt werden. Diese beträgt immer ca. 800 HV1. Allerdings ist auch festzustellen, dass neben zahlreichen quantitativen Kenngrößen (Anbindungsbreite, Aufhärtung, Spitzenstrom, spezifische Fügeenergie, usw.) eine statistische Bewertung der Buckelgeometrie ohne DOE nicht zielführend ist. Aus diesem Grund wurde für die zweite Hauptversuchsreihe die statistische Versuchsplanung angewandt.

8 Hauptversuch 2

Die zweite Hauptversuchsreihe fand bei der Fa. *NIMAK GmbH* statt. Zur Verfügung stand eine Portalanlage *PowerKES 20000* mit 20 kWs Ladeenergie E_L bei einer maximalen Ladespannung U_L von 3200 V. Die Anlagentechnik verfügt über eine elektromagnetische Nachsetzeinheit, um schnelleres Nachsetzen während des Buckelabschmelzens zu realisieren [25]. Insgesamt wurden vier Buckelgeometrien bei einem Buckeldurchmesser von 50 mm untersucht und drei verschiedenen Werkstoffkombinationen (siehe Abschnitt 6.1). Die Materialdickenkombination 3 besteht aus einem nitrierten Baustahl. Dieser MDK wird stichprobenartig getestet. In Abbildung 27 ist die Fügeaufgabe vor Ort dargestellt.



Abbildung 27: Experimenteller Aufbau bei der Fa. Nimak GmbH

8.1 Ermittlung der Faktorstufen

Um eine statistische Versuchsplanung durchzuführen, müssen die Faktorstufen bekannt sein. Ziel der Untersuchung ist, den Einfluss der Buckelgeometrie innerhalb des Schweißbereichs zu untersuchen. Dazu wurden in Vorversuchen Spritzerklassen und Auspresskräfte stichprobenartig ermittelt. Ein gemeinsamer Schweißbereich für alle Werkstoffe und Buckelgeometrien existiert nicht. Allerdings wurde ein Bereich

festgelegt, in dem die Spritzerklasse aller Werkstoffe und Buckelgeometrien nicht größer als 2 ist. Dies entspricht einer Elektrodenkraft F_E von 30 bis 40 kN und einer Ladeenergie E_L von 6,48 bis 14,58 kWs.

8.2 Aufbau der statistischen Versuchsplanung

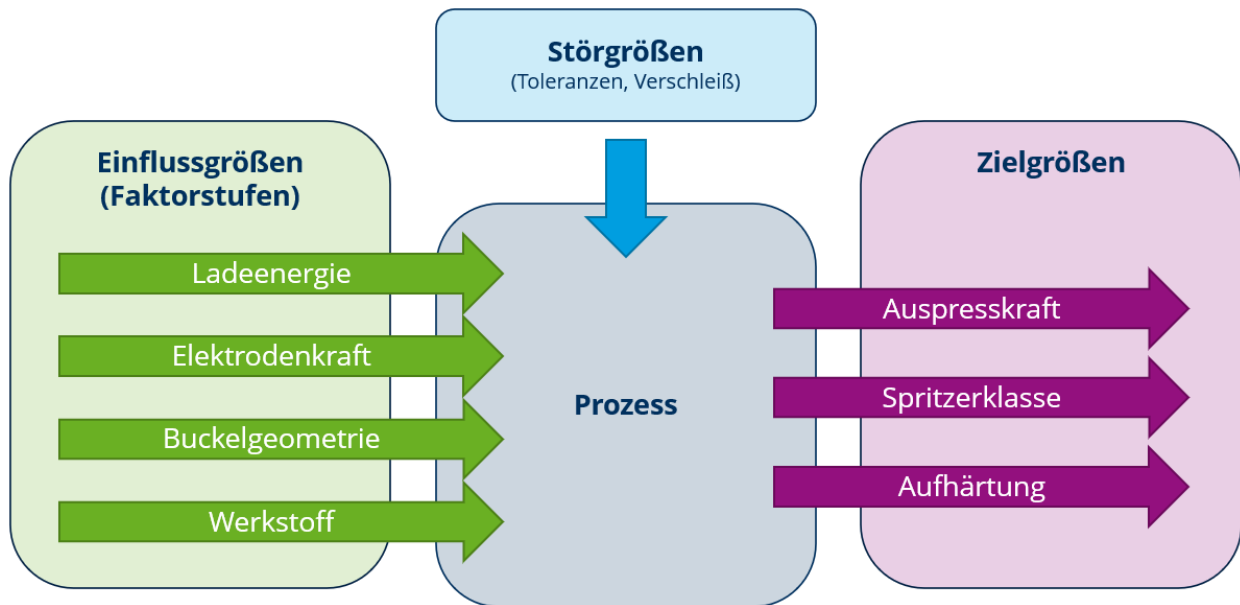


Abbildung 28: Einfluss-, Stör und Zielgrößen der statistischen Versuchsplanung

Um den Einfluss der Buckelgeometrie statistisch zu bewerten, wurde eine statistische Versuchsplanung (DOE) durchgeführt. In Abbildung 28 sind die Randbedingungen der DOE dargestellt. Die Einflussgrößen, auch Faktorstufen genannt, sind die Ladeenergie E_L , die Elektrodenkraft F_E , die Buckelgeometrie und die Materialdickenkombination (Werkstoff). Die Störgrößen der Versuchsplanung sind Toleranzen in der Fertigung der Fügeteile und der Verschleiß der Elektroden. Die Zielgrößen sind die Auspresskraft, die Aufhärtung und die Spritzerklasse.

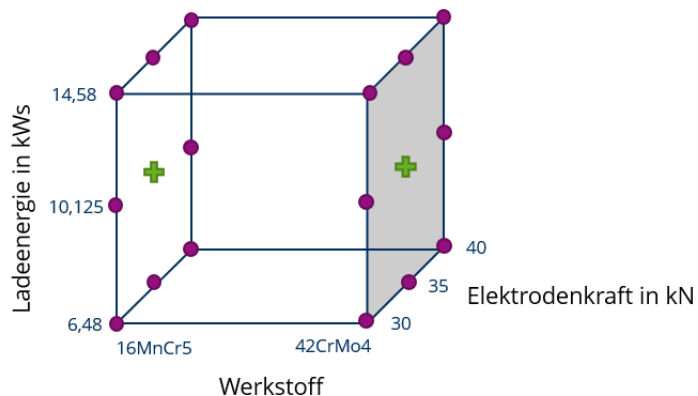


Abbildung 29: Faktorstufen der vollfaktoriellen Versuchsplanung mit zwei Zentrums-
punkten

Die festgelegte statistische Versuchsplanung ist vollfaktoriell mit zwei Zentrums-
punkten. Durch den Zentrums-
punkt können Nichtlinearitäten entdeckt werden. Die Elektrodenkraft F_E und die Ladeenergie E_L wird auf drei Faktorstufen und der Werk-
stoff auf zwei Faktorstufen variiert. Die Elektrodenkraft F_E variiert von 30 bis 40 kN
und die Ladeenergie von 6,48 bis 14,58 kW. Die Faktorstufen wurden durch die Un-
tersuchungen im Hauptversuch 1 nach Kleppmann festgelegt [55] und sind in
Abbildung 29 schematisch dargestellt. Der Zentrums-
punkt wird fünf Mal und jeder
Versuchsplan wird drei Mal je Geometrie wiederholt. Daraus ergeben sich insgesamt
312 DOE-Versuche. Alle Versuche werden in zufälliger Reihenfolge durchgeführt, um
das Ergebnis nicht durch vorangegangene Beobachtungen zu beeinflussen. Zusätz-
lich werden systematische Fehler, wie bspw. eintretender Verschleiß, über die
Versuchsplanung verteilt und betreffen nicht Versuche einer Gruppe.

8.3 Ermittelte Auspresskräfte

Die Auspresskräfte konnten erst nach Durchführung der Hauptversuche an der TU
Dresden ermittelt werden. Aus diesem Grund konnte nicht mit Sicherheit festgestellt
werden, ob die Proben der Vorversuche die Anforderung der Mindestauspresskraft
 F_{\min} erfüllen

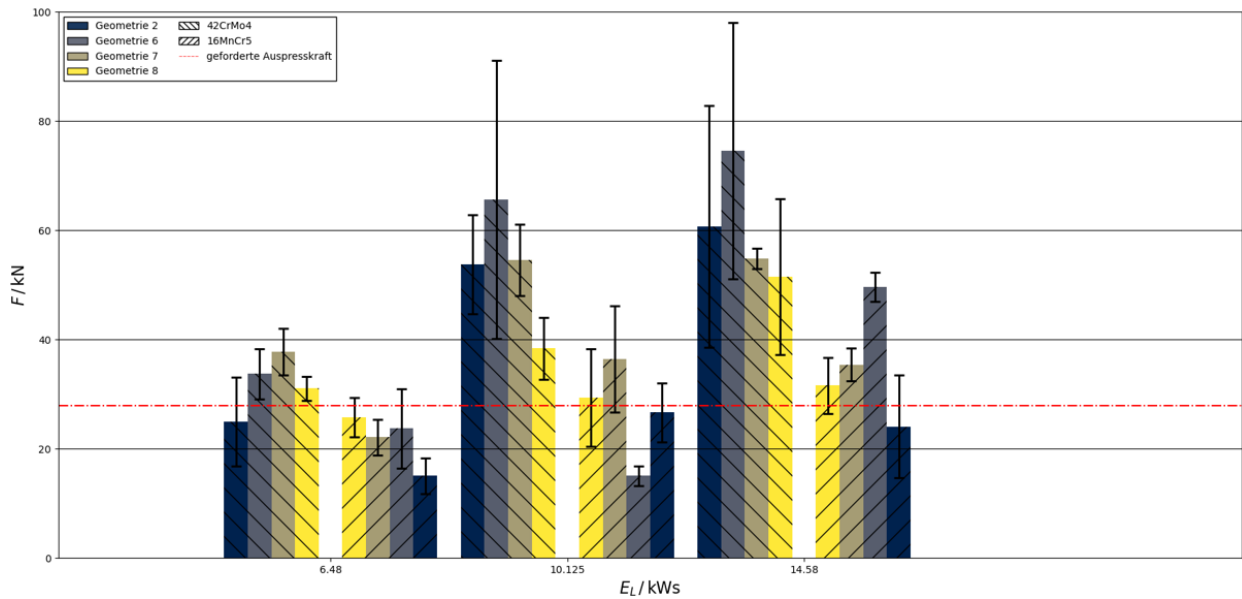


Abbildung 30: Mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 30 kN

In Abbildung 30 ist die mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit von der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 30 kN dargestellt. Die Anforderung der Mindestauspresskraft F_{\min} aus Hauptversuch 1 von 55,8 kN wird unter Berücksichtigung der Standardabweichungen für keine MDK und Ladeenergie erfüllt.

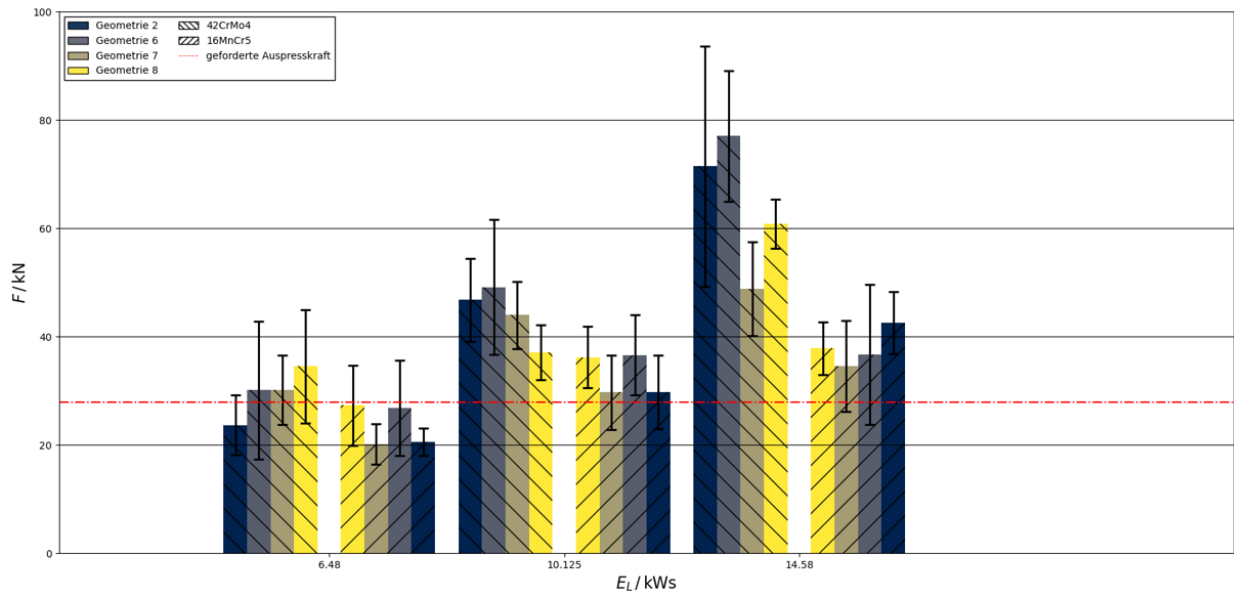


Abbildung 31: Mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 35 kN

Mit steigender Elektrodenkraft ($F_{\min} = 35 \text{ kN}$) erfüllt die MDK 1 bei einer maximalen Ladeenergie von 14,58 kW·s die Anforderungen mit Buckelgeometrie 6 und 8. Die Ergebnisse der Auspresskraft sind in Abbildung 31 dargestellt. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich für eine Elektrodenkraft von 40 kN (siehe Abbildung 32).

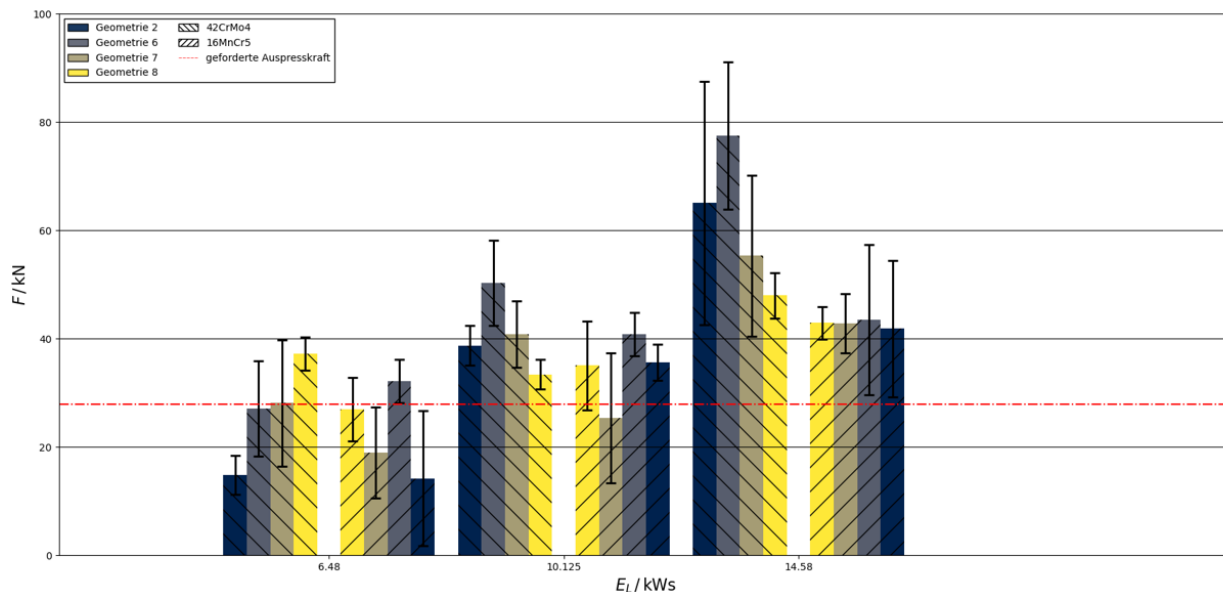
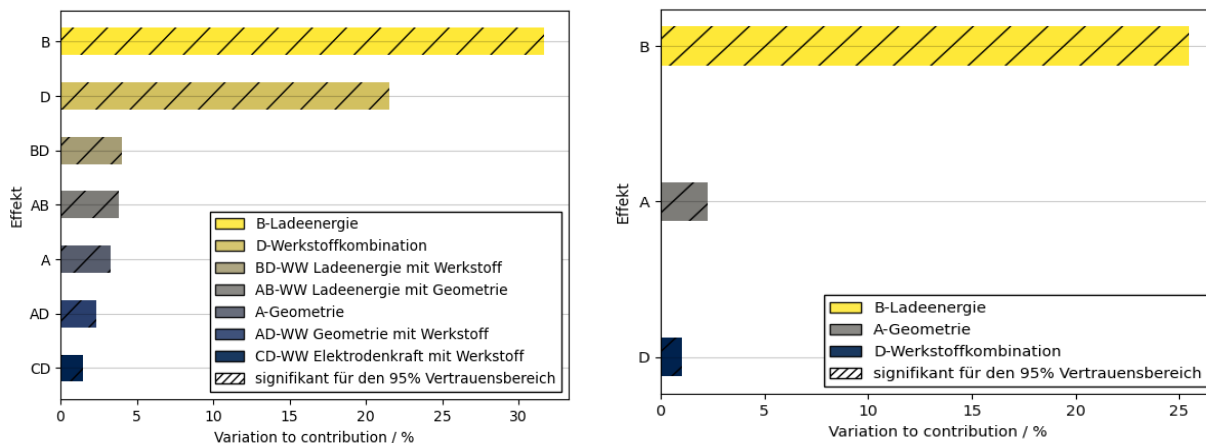


Abbildung 32: Mittlere Auspresskraft in Abhängigkeit der Buckelgeometrie und der MDK für eine Elektrodenkraft von 40 kN

Da die statistische Auswertung zu keinem Ergebnis führt, wenn die Zielgröße nicht erfüllbar ist, wurde im Rahmen des PAs festgelegt, dass für die Auswertung die halbe Nahtbreite ausreichend ist. So ist eine Trennung der Ergebnisse in *in Ordnung* (i.O.) und in *nicht in Ordnung* (n.i.O.) möglich und der Einfluss der Buckelgeometrie kann ermittelt werden. Damit ergibt sich eine Mindestauspresskraft F_{min} von 27,9 kN bei einer Nahtbreite von 0,5 mm (siehe Abschnitt 6.4). Diese neu festgelegte Mindestauspresskraft ist in den Abbildungen 30 bis 32 dargestellt.

8.4 Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung

8.4.1 Pareto-Diagramme



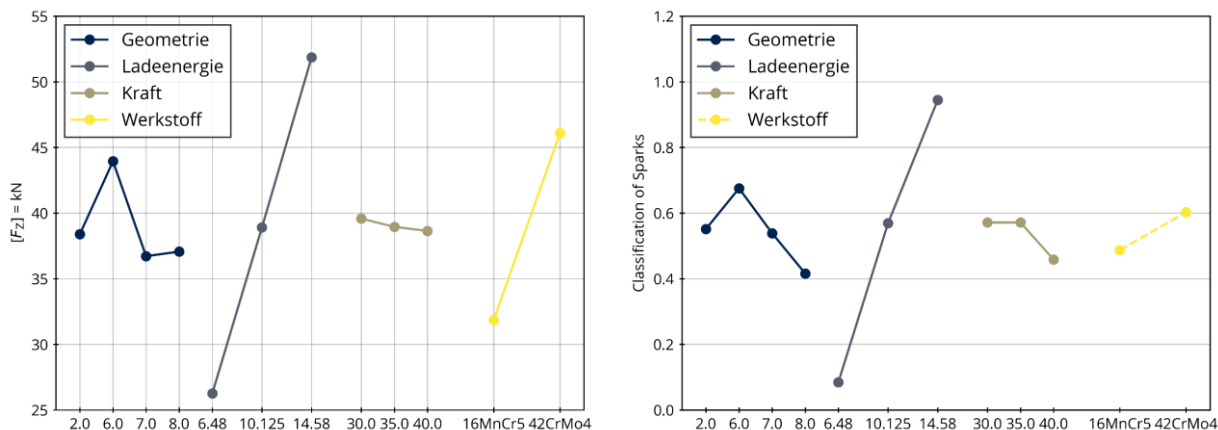
a) Zielgröße = Auspresskraft

b) Zielgröße = Spritzerklasse

Abbildung 33: Pareto-Diagramm der Auspresskraft und der Spritzerklasse mit Haupt- und Wechselwirkungen

Ziel der statistischen Versuchsplanung ist die Ermittlung signifikanter Einflüsse. Die Signifikanz wurde durch die Anwendung einer Varianzanalyse (ANOVA) festgestellt. In Abbildung 33a sind die Haupt- und Wechselwirkungen der Einflussgrößen als Pareto-Diagramm dargestellt. Die Zielgröße ist die Auspresskraft. Alle Haupteffekte, Ladeenergie, Werkstoffkombination und Buckelgeometrie, haben einen signifikanten Einfluss auf die Auspresskraft. Den größten Einfluss hat die Ladeenergie E_L , was den Erwartungen entspricht. Ebenso hat der Werkstoff einen großen Einfluss, was ebenfalls den Erwartungen entspricht. Entscheidend ist allerdings, dass die Buckelgeometrie ebenfalls signifikant ist. Dies bedeutet, dass der Anwender durch die Gestaltung der Buckelgeometrie die Höhe der Auspresskraft beeinflussen kann. Ein Vergleich der Buckelgeometrien zeigt auch, dass kleine Änderungen der Kontur, bspw. des Buckelwinkels, bereits Änderungen im Schweißergebnis bewirken, die statistisch erfassbar sind. Auch die Wechselwirkung der Haupteffekte untereinander zeigt einen signifikanten Einfluss. In Abbildung 33b sind die Hauptwirkungen der Einflussgrößen als Pareto-Diagramm dargestellt. Die Zielgröße ist die Spritzerklasse. Hierbei kann bei den Wechselwirkungseffekten keine Signifikanz festgestellt werden. Bei den Haupteffekten sind, ähnlich wie bei der Auspresskraft, die Einflussgrößen Ladeenergie, Werkstoffkombination und Buckelgeometrie signifikant. Wie zu erwarten hat die Ladeenergie den größten Einfluss auf die Spritzerklasse. Allerdings ist im Vergleich zum Einfluss der Werkstoffe (42CrMo4 und 16MnCr5) der Einfluss der Buckelgeometrie größer als der Einfluss der Werkstoffkombination. Dies zeigt, dass auch bei der Auswahl der Buckelgeometrie der Anwender einen signifikanten Einfluss auf die Spritzerklasse hat.

8.4.2 Haupt- und Wechselwirkungen

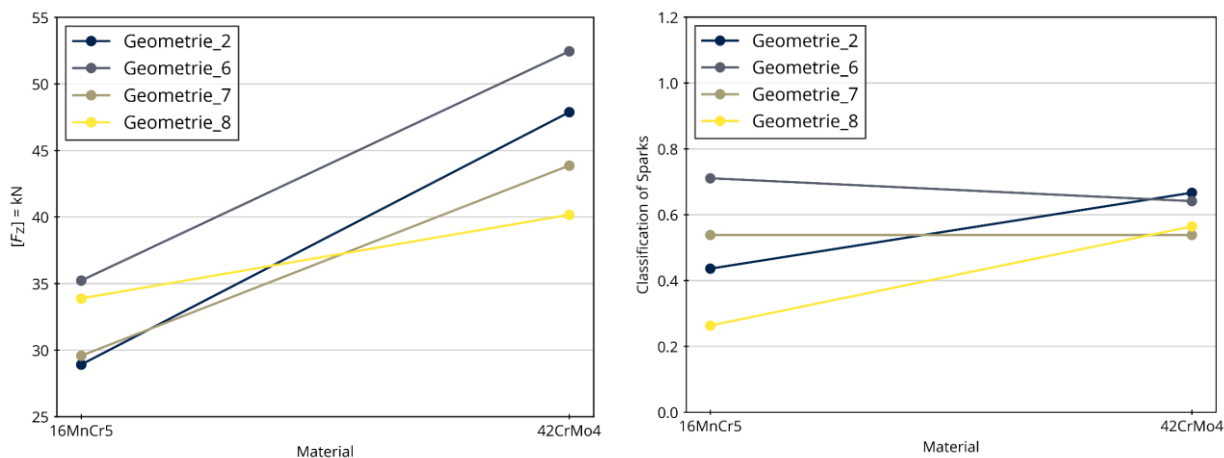


a) Zielgröße = Auspresskraft

b) Zielgröße = Spritzerklasse

Abbildung 34: Haupteffekte in Abhängigkeit der Faktorstufen der Einflussgrößen auf die Zielgrößen Auspresskraft und Spritzerklasse

In Abbildung 34a sind die Haupteffekte der Auspresskraft in Abhängigkeit der Faktorstufen der einzelnen Einflussgrößen dargestellt. In Abbildung 34b sind die Haupteffekte der Spritzerklasse dargestellt. Der signifikante Einfluss der Ladeenergie und des Werkstoffs sind für die Auspresskraft in Abbildung 34a und für die Spritzerklasse in Abbildung 34b deutlich zu erkennen. Buckelgeometrie 6 hat eine signifikant bessere Auspresskraft als die Buckelgeometrie 2, 7 oder 8. Des Weiteren wird bei der Buckelgeometrie 7 die geringste Auspresskraft erreicht. Im Vergleich der Buckelgeometrie 6 und 7 ist festzustellen, dass diese sich ausschließlich durch den Buckelwinkel unterscheiden. Die Buckelgeometrie 6 hat einen Buckelwinkel von 90° und die Buckelgeometrie 7 von 60°. Im Vergleich zum Haupteffekt der Spritzerklasse zeigt sich, dass die Spritzerklasse der Buckelgeometrie 7 deutlich geringer ist als bei Buckelgeometrie 6. Somit ergibt ein spitzerer Buckelwinkel bei radialer Aufstandsfläche eine geringere Auspresskraft, aber auch eine geringere Spritzerklasse.



a) Zielgröße = Auspresskraft

b) Zielgröße = Spritzerklasse

Abbildung 35: Wechselwirkungseffekte in Abhängigkeit der Werkstoffkombination und der Buckelgeometrie auf die Zielgrößen Auspresskraft und Spritzerklasse

In Abbildung 35a sind die Wechselwirkungseffekte der Auspresskraft in Abhängigkeit von der Werkstoffkombination und der Buckelgeometrie dargestellt. Die Buckelgeometrie 6 weist die höchsten Auspresskräfte für beide MDKs auf. Die Auspresskraft bei Buckelgeometrie 8 für die MDK 2 (16MnCr5) ist im Vergleich zu Buckelgeometrie 2 und 7 höher. Allerdings ist die Auspresskraft für Buckelgeometrie 8 für die MDK 1 (42CrMo4) im Vergleich zu Buckelgeometrie 2 und 7 geringer. Damit ist die Auspresskraft wechselwirkend abhängig von der Geometrie und der MDK. Ein ähnliches Verhalten ist auch für die Spritzerklasse festzustellen. Allerdings sind durch die Auswertung der ANOVA die Wechselwirkungseffekte nicht signifikant.

8.5 Einzelversuche mit nitrierten Oberflächen

Außerhalb der statistischen Versuchsplanung wurden auch Füge­teile mit nitrierten Oberflächen getestet. Hierfür wurde nur die Vorzugsvariante aus Hauptversuch 1 getestet (Buckelgeometrie 2).

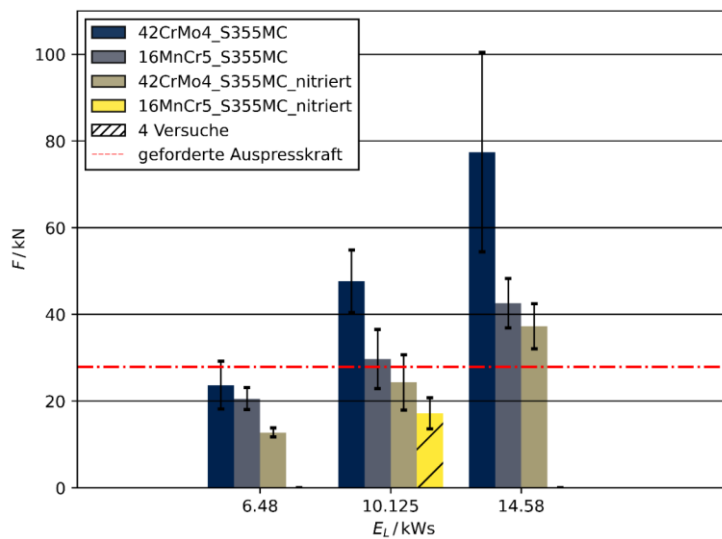


Abbildung 36: Auspresskraft der Buckelgeometrie 2 in Abhängigkeit unterschiedlicher MDKs [56]

Die Abbildung 36 zeigt die erzielten Auspresskräfte in Abhängigkeit der MDK bei einer Elektrodenkraft von 35 kN in Abhängigkeit von der Ladeenergie. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auspresskräfte mit zunehmender Ladeenergie zunehmen. Dies ist unabhängig von der Materialdickenkombination. Zwischen den einzelnen MDKs treten deutliche Unterschiede in den Auspresskräften auf. Dabei werden die geringsten Kräfte bei nitrierten Blechoberflächen erreicht. Die gleiche Charakteristik tritt bei Elektrodenkräften von 30 kN und 40 kN auf.

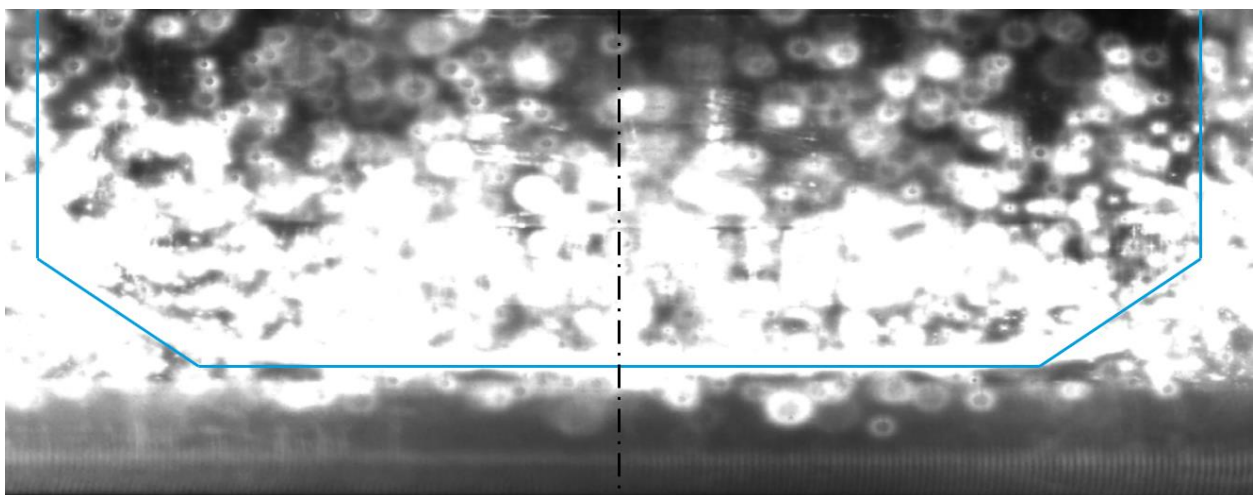


Abbildung 37: Ausschnitt einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit sehr feinen Schweißspritzern, die aus der Fügezone austreten

Ein Grund dafür könnte die starke Spritzerneigung sein. In Abbildung 37 ein Ausschnitt einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme mit sehr feinen Schweißspritzern zu

erkennen, die aus der Fügezone austreten. Ein Grund für die unzureichende Festigkeit der Fügeverbindung könnte die nicht ausreichende Oberflächenaktivierung nach [1] sein.

8.6 Fazit der Ergebnisse aus Hauptversuchsreihe 2

Durch die Ermittlung der Haupt- und Wechselwirkungseffekte der statistischen Versuchsplanung, kann der Einfluss der Buckelgeometrie auf die Auspresskraft und die Spritzerklasse bewertet werden. Dabei ist festzustellen, dass die Buckelgeometrie sowohl auf die Zielgröße Auspresskraft als auch auf die Spritzerklasse einen signifikanten Einfluss hat. Wegen der signifikant höheren Auspresskräfte gilt die Buckelgeometrie 6 als Vorzugsvariante. In weiteren Untersuchungen werden die Buckelgeometrie in winkelabhängige und aufstandsflächenabhängige Geometrien unterteilt und in Hauptversuchsreihe 3 ebenfalls durch eine DOE bewertet (siehe Abschnitt 6.1).

9 Hauptversuchsreihe 3

Die dritte Hauptversuchsreihe wurde bei der Fa. *Kapkon GmbH* durchgeführt. Zur Verfügung stand eine Portalanlage *KKP170-MCS* mit 170 kWs Ladeenergie E_L bei einer maximalen Ladespannung U_L von 1300 V bei einer Kapazität von 176000 μF . Dabei wird ein maximaler Spitzenstrom I_p von 1000 kA bei einer Stromanstiegszeit t_p von 5,2 ms erreicht. Insgesamt wurden fünf Buckelgeometrien mit einem Buckeldurchmesser von 100 mm untersucht und zwei verschiedenen Werkstoffkombinationen (siehe Abschnitt 6.1). Die Buckelgeometrien wurden in winkelabhängig (Geometrie 9, 12 und 13) und aufstandsflächenabhängig (Geometrie 9, 10 und 13) unterteilt. In Abbildung 38 ist die Fügeaufgabe dargestellt.

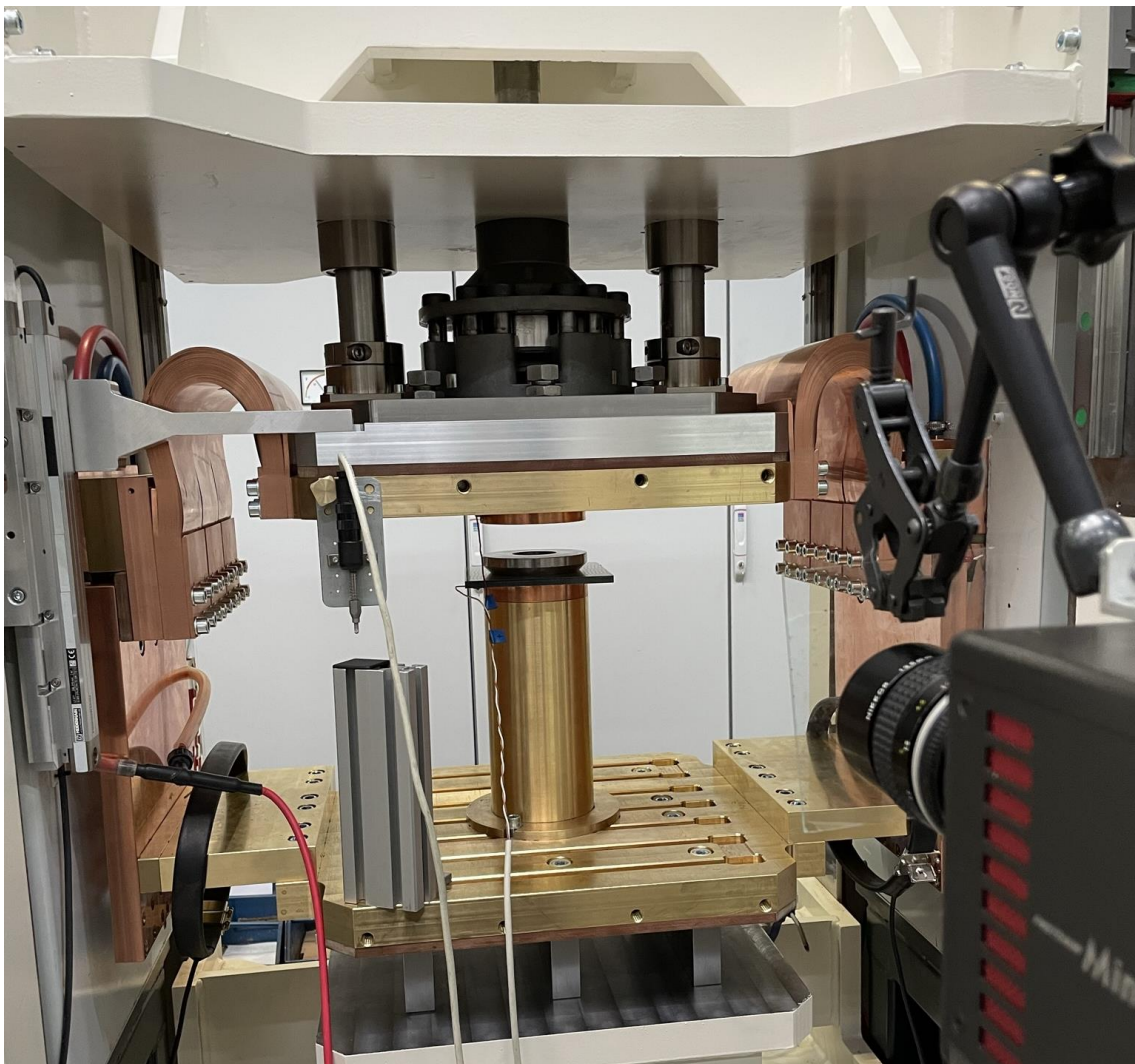


Abbildung 38: Experimenteller Aufbau bei der Fa. Kapkon GmbH

9.1 Aufbau der statistischen Versuchsplanung

Um den Einfluss der Buckelgeometrie statistisch zu bewerten, wurde eine statistische Versuchsplanung (DOE) durchgeführt. Die Randbedingungen sind im Vergleich zur zweiten Hauptversuchsreihe unverändert (siehe Abbildung 28). Die Faktorstufen sind die Ladeenergie E_L , die Elektrodenkraft F_E , die Buckelgeometrie und die Materialdickenkombination (Werkstoff). Die Störgrößen der Versuchsplanung sind Toleranzen in der Fertigung der Fügeteile und der Verschleiß der Elektroden. Die Zielgrößen sind die Auspresskraft und die Spritzerklasse.

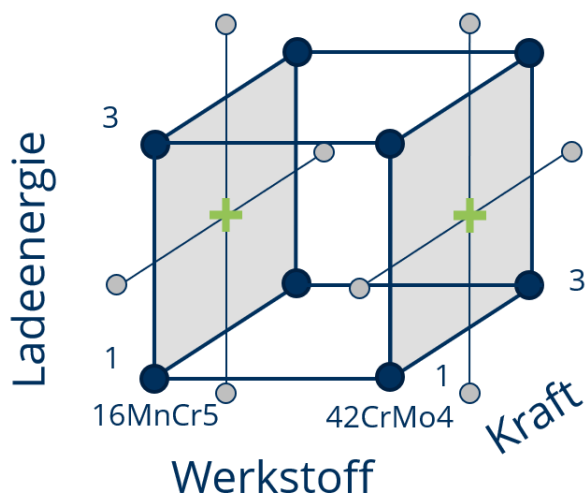


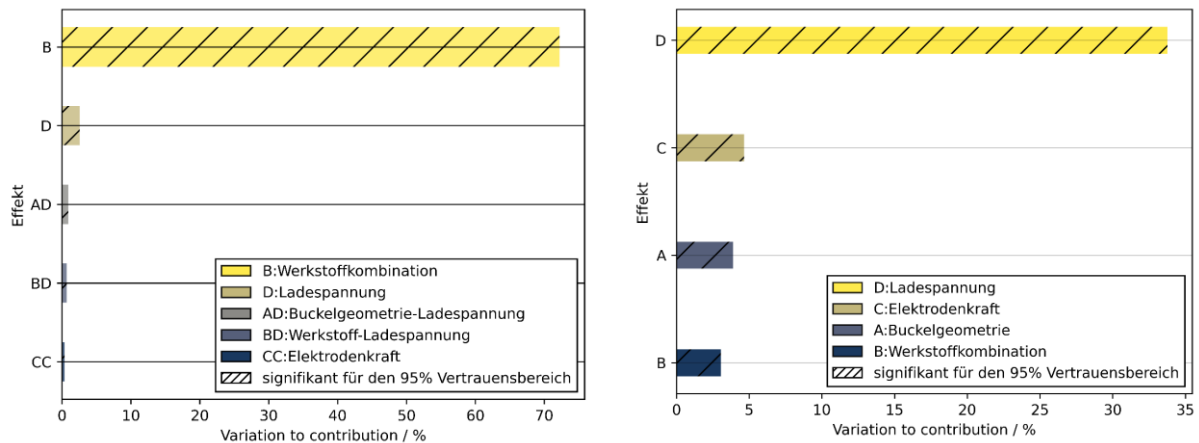
Abbildung 39: Vollfaktorieller Versuchsplan mit Zentrums- und Sternpunkten

Die festgelegte statistische Versuchsplanung ist vollfaktoriell mit zwei Zentrums- und vier Sternpunkten. Dies ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Elektrodenkraft F_E , die Ladeenergie E_L und der Werkstoff werden auf zwei Faktorstufen variiert. Die Faktorstufen der Elektrodenkraft F_E beträgt 130 kN und 140 kN und der Ladeenergie E_L 79,4 kW und 97,0 kW. Die Sternpunkte liegen außerhalb der Faktorstufen. Für die Elektrodenkraft betragen diese 125 kN und 145 kN und für die Ladeenergie betragen diese 71,3 kW und 106,5 kW. Für den Zentrums- und Sternpunkt beträgt die Elektrodenkraft 135 kN und die Ladeenergie 88,0 kW. Der Zentrums- und Sternpunkt wird zwei Mal wiederholt und der gesamte Versuchsplan wird drei Mal wiederholt. Die Durchführung geschah in zufälliger Reihenfolge. Insgesamt wurden 310 randomisierte Versuche durchgeführt. Die Faktorstufen wurden durch Voruntersuchungen ermittelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass bei den äußeren Sternpunkten eine Spritzerklasse größer 2 auftritt. Die Festigkeit der Fügeverbindung konnte vor Ort

nicht ermittelt werden, sodass eine ausreichende Verbindung anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und der Schweißspritzer abgeschätzt werden musste.

9.2 Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung

9.2.1 Pareto-Diagramme



a) Zielgröße = Auspresskraft

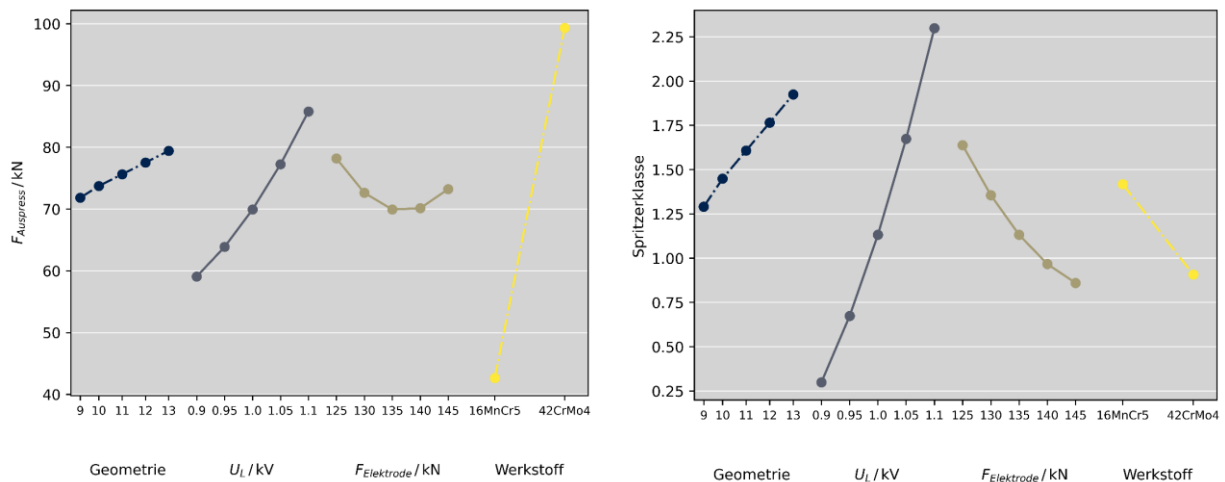
b) Zielgröße = Spritzerklasse

Abbildung 40: Pareto-Diagramm der Auspresskraft und der Spritzerklasse mit Haupt- und Wechselwirkungen

Analog zu Hauptversuchsreihe 2 wurde die Signifikanz durch die Anwendung einer Varianzanalyse (ANOVA) ermittelt. In Abbildung 40a sind die Haupt- und Wechselwirkungen der Einflussgrößen als Pareto-Diagramm dargestellt. Die Zielgröße in Abbildung 40a ist die Auspresskraft. Wie im Hauptversuch 2 haben die Ladeenergie und Werkstoffkombination einen signifikanten Einfluss auf die Auspresskraft. Den größten Einfluss hat in Hauptversuch 3 allerdings die Werkstoffkombination. Diese ist für den Werkstoff 16MnCr5 (MDK 2) mehr als halbiert. Für 42CrMo4 (MDK 1) beträgt die Auspresskraft im Mittel etwa 100 kN und für den 16MnCr5 (MDK 2) 42 kN. Auffällig ist, dass bei dieser Versuchsplanung die Buckelgeometrie keinen signifikanten Einfluss hat. Der Grund hierfür kann das unzureichende Abschmelzen des Buckels sein, sodass die Buckelgeometrie kaum einen Einfluss auf die Ausbildung der Fügeverbindung hat. Dies bedeutet auch, dass durch ein höheres Abschmelzen höhere Festigkeiten möglich sein könnten. Grund für diese Annahme ist, dass bei der Auswertung der Spritzerklasse in Abbildung 40b auffällt, dass die Buckelgeometrie einen signifikanten Einfluss hat. Der Grund hierfür ist, dass die Spritzerklasse bereits von der Kontaktierung und der daraus folgenden Oberflächenaktivierung abhängig ist. Bei der Auswertung der Spritzerklasse hat, ähnlich wie bei Hauptversuch 2, die

Ladespannung den größten signifikanten Einfluss. Der Einfluss der Werkstoffkombination ist geringer als der Einfluss der Buckelgeometrie. Auch dieses Verhalten konnte in Hauptversuchsreihe 2 festgestellt werden, obwohl die Buckelgeometrien abweichen. Signifikante Wechselwirkungen sind bei der Auswertung der Spritzerklasse nicht festzustellen.

9.2.2 Haupt- und Wechselwirkungen



a) Zielgröße = Auspresskraft

b) Zielgröße = Spritzerklasse

Abbildung 41: Haupteffekte in Abhängigkeit der Faktorstufen der Einflussgrößen auf die Zielgrößen Auspresskraft und Spritzerklasse

In Abbildung 41a sind die Haupteffekte der Auspresskraft in Abhängigkeit der Faktorstufen der einzelnen Einflussgrößen dargestellt. In Abbildung 41b sind die Haupteffekte der Spritzerklasse dargestellt. Der signifikante Einfluss der Ladeenergie und des Werkstoffs sind für die Auspresskraft in Abbildung 41a deutlich zu erkennen. Bei der Buckelgeometrie sind Unterschiede erkennbar, allerdings sind diese nicht signifikant. Somit kann in Hauptversuch 3 keine Winkel- oder Aufstandsflächenabhängigkeit der Buckelgeometrie in Abhängigkeit der Auspresskraft festgestellt werden. Bei der Spritzerklasse jedoch kann ein signifikanter Einfluss der Buckelgeometrie festgestellt werden. Bei Buckelgeometrie 9 werden die geringsten Spritzerklassen erreicht. Dabei handelt es sich um eine Buckelgeometrie mit radialer Aufstandsfläche und einem Buckelwinkel von 90°. Um den Einfluss der einzelnen Buckelgeometrie untereinander statistisch auszuwerten, sind Post-Hoc Tests notwendig. Auf diese wurde verzichtet, da aufgrund der zu geringen Abschmelzung des Buckels nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann, ob der Einfluss der Buckelgeometrie auf die Spritzerklasse mit Sicherheit festgestellt werden kann.

9.2.3 Fazit der Ergebnisse aus Hauptversuchsreihe 3

In Hauptversuchsreihe 3 wurde ein Buckeldurchmesser von 100 mm untersucht. Diese Geometrie erfordern Anlagen mit hoher Ladeenergie und hohen Elektrodenkräften. Das Prüfen dieser Bauteile erfordert zudem Prüfmaschinen mit bis 200 kN Prüfkraft. Leider konnte vor Ort nicht ermittelt werden, ob die Buckel ausreichend abgeschmolzen sind. Bei der Auswertung an der TU Dresden wurde festgestellt, dass durch höhere eine Ladeenergie mehr Abschmelzung möglich ist. Dies begründet auch die Ergebnisse der statistischen Versuchsplanung, wo kein signifikanter Effekt der Buckelgeometrie auf die Auspresskraft feststellbar ist. Bei der Spritzerklasse kann ein signifikanter Effekt festgestellt werden. Um den Einfluss der einzelnen Buckelgeometrien zu untersuchen, sind Post-Hoc-Tests notwendig.

10 Zusammenfassung der Hauptversuchsreihen

In den drei Hauptversuchsreihen wurden in ca. 1100 Schweißversuchen 13 verschiedene Buckelgeometrien an vier verschiedenen MDKs ausgewertet. Insbesondere durch die Methode der statistischen Versuchsplanung lassen sich signifikante Effekte ermitteln. So konnte festgestellt werden, dass sowohl die Auspresskraft als auch die Spritzerklasse durch die Buckelgeometrie signifikant beeinflusst wird. Dieser Einfluss ist geringer als der Einfluss der Ladeenergie oder Werkstoffkombination. Dennoch kann durch die Gestaltung der Buckelgeometrie der Anwender einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit nehmen. Hauptversuchsreihe 2 zeigt durch die nahezu ähnlichen Auspresskräfte der Geometrie 2, 7 und 8, dass trotz großer Abweichungen der Buckelgeometrie dennoch ähnliche Festigkeit erreicht werden. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse des Post-Hoc-Test, dass signifikante Unterschiede auch zwischen den Mittelwerten feststellbar sind [56]. Geometrie 6 weist eine signifikant bessere Auspresskraft auf als Geometrie 2, 7 und 8. Die Geometrie 6 unterscheidet sich im Buckelwinkel und der Aufstandsfläche. Ziel der dritten Hauptversuchsreihe war es, den Einfluss der Aufstandsfläche und des Buckelwinkels zu ermitteln für einen Buckeldurchmesser von 100 mm festzustellen. Aufgrund des unzureichenden Buckelabschmelzens können die Ergebnisse in der statistischen Versuchsplanung nicht vollständig berücksichtigt werden.

11 Numerische Prozesssimulation

Die Fügeverbindung beim KE-Buckelschweißen entsteht unter elektrischer und mechanischer Belastung, verdeckt und unmittelbar innerhalb kürzester Zeit (5 ms bis 15 ms). Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ermöglicht eine mechanische, thermische und elektrische Beurteilung, eine örtliche und zeitliche Auflösung der Beanspruchungen und sensitive Analysen mit experimentell nicht einstellbaren Randbedingungen. Aus diesem Grund ist die numerische Prozesssimulation die einzige Möglichkeit, den verdeckt ablaufenden Buckelschweißprozess orts- und zeitabhängig zu analysieren. Aufgrund starker temperaturabhängiger Buckeldeformationen entsteht eine starke Verzerrung des Netzes, was zu Konvergenzproblemen führt. Aus diesem Grund muss das Simulationsmodell zum Zeitpunkt der Netzverzerrung neuvernetzt werden. Diese Neuvernetzung kann nur in einer thermisch-mechanischen Simulationsumgebung (auch *Physik* genannt) durchgeführt werden. Zur Bewertung des Buckelschweißprozesses ist neben der thermisch-mechanischen Simulationsumgebung auch die thermisch-elektrische notwendig. Aus diesem Grund muss ein iteratives Simulationsmodell aus zwei Simulationsumgebungen aufgebaut werden, die miteinander gekoppelt sind.

11.1 Iteratives Simulationsmodell

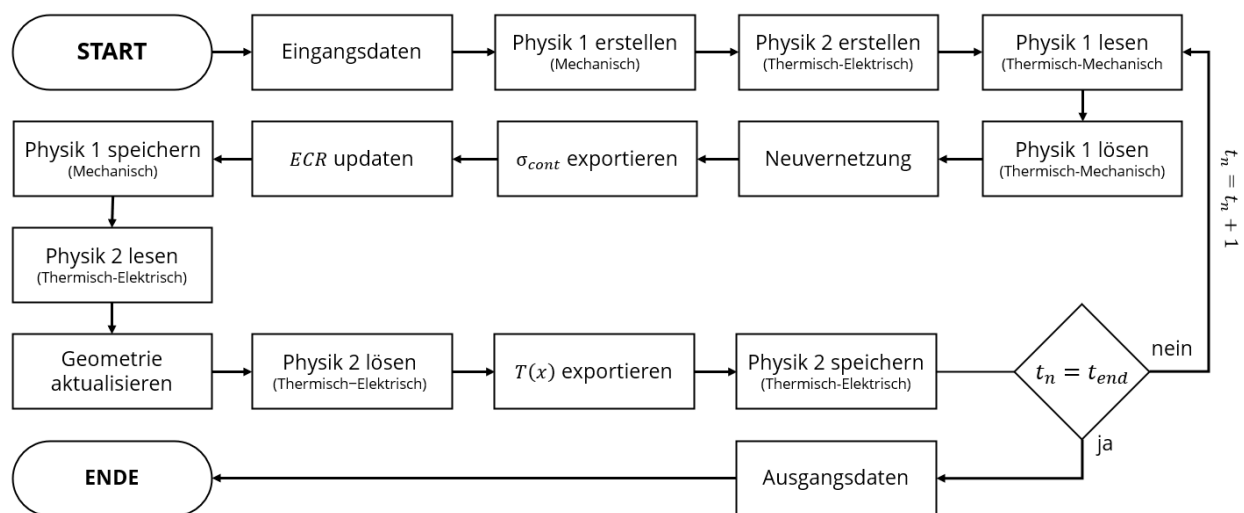


Abbildung 42: Ablauf der iterativen Simulation [57]

Der iterative Simulationsablauf der thermisch-mechanischen (Physik 1) und thermisch-elektrischen (Physik 2) Simulationsumgebung ist in Abbildung 42 dargestellt. Zu Beginn werden die einzelnen Simulationsmodelle erstellt. Dies bedeutet, dass die

Randbedingungen, die Materialdaten und die Simulationseinstellungen festgelegt werden. Das axialsymmetrische Simulationsmodell ist in Abbildung 43 dargestellt.

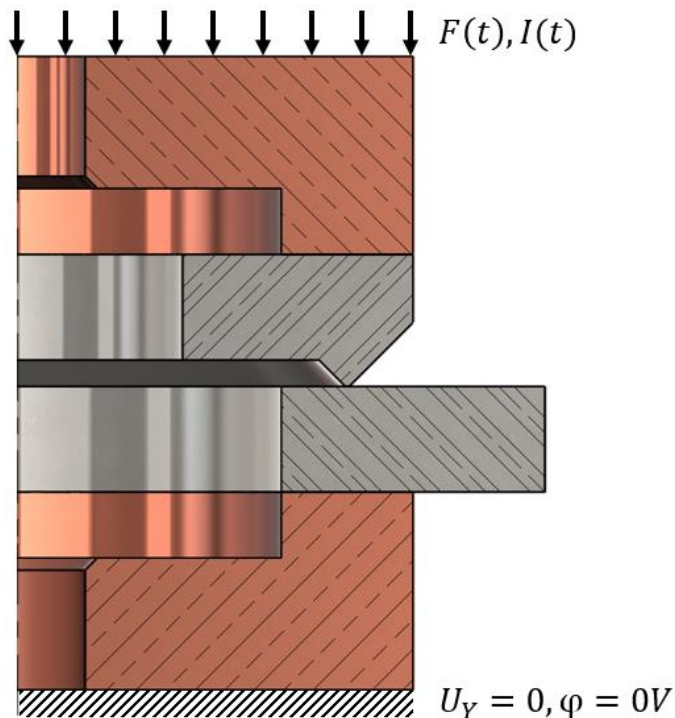


Abbildung 43: Axialsymmetrisches Simulationsmodell mit Randbedingungen

An der Elektrodenoberseite wird der experimentell gemessene Stromstärke- und Kraftverlauf aufgebracht. Die untere Elektrode wird in Y-Verschiebung gesperrt und das elektrische Potential beträgt hier 0 V. Es werden drei Kontaktsituationen definiert:

- Elektrode-Buckel
- Buckel-Blech
- Blech-Elektrode

Weitere Einzelheiten zum Simulationsmodell und den Materialeigenschaften sind in [58, 57, 59] beschrieben. Zu Beginn des iterativen Simulationsablaufs wird die thermisch-mechanische Physik für eine kleine Zeitschrittweite (hier 0,001 ms) transient gelöst (siehe Abbildung 42). Das Ergebnis ist die Verschiebung und Verformung des Buckels sowie der Kontaktdruck in der Fügezone. Durch den Kontaktdruck in der Fügezone ist es möglich den Kontaktwiderstand nach SONG bei Raumtemperatur zu berechnen (siehe Abschnitt 11.2 Kontaktwiderstandsberechnung) [60]. Anschließend

wird die thermisch-elektrische Physik gelöst, indem das verformte Modell implementiert wird (*Geometrie aktualisieren*). In der thermisch-elektrischen Physik wird durch den elektrischen Kontaktwiderstand (ECR) die Kontaktwiderstandserwärmung berücksichtigt. Abschließend wird die Temperaturverteilung in die thermisch-mechanische Simulation implementiert, um eine temperaturabhängige Verformung zu gewährleisten. Dieses iterative Vorgehen wird so lange wiederholt, bis die Endzeit t_{end} erreicht ist. In der thermisch-mechanischen Physik wird des Weiteren die Netzqualität beobachtet und eine Neuvernetzung initialisiert, sobald der Innenwinkel eines Elements größer als 150° ist.

11.2 Kontaktwiderstandsberechnung

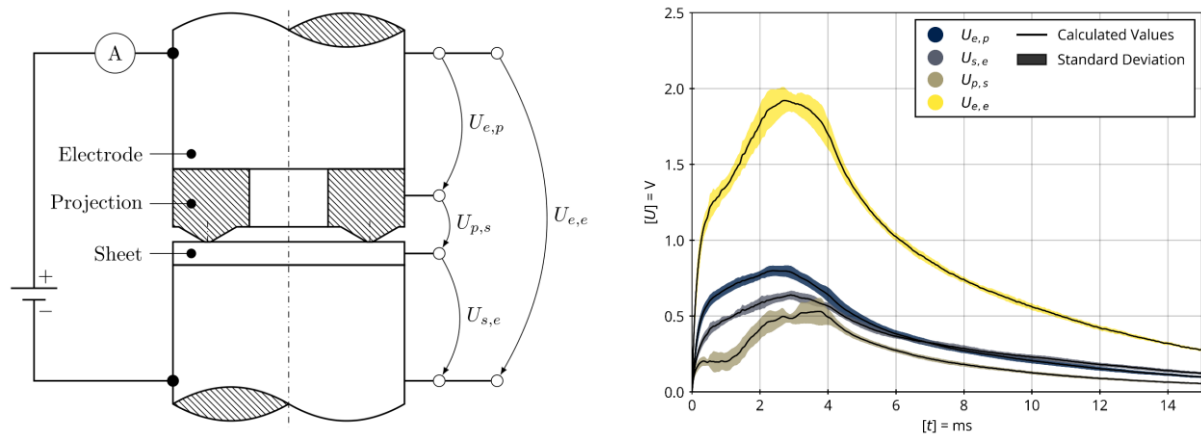
Um das Widerstandsschweißen simulativ abzubilden, ist die Kontaktwiderstandserwärmung notwendig. Dies wird durch die Implementierung einer Kontakttheorie möglich. Hamedi stellt in [61] unterschiedliche Kontakttheorien für das Widerstandsschweißen gegenüber und bewertet diese. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde die Kontakttheorie nach SONG verwendet, da diese für das Buckelschweißen von Stahllegierungen validiert ist [60]. Der elektrische Kontaktwiderstand (ECR) berechnet sich nach [60] wie folgt:

$$ECR(T, \sigma_{cont}) = 3\xi \cdot \left(\frac{\sigma_s(T)}{\sigma_{cont}^\kappa} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_1(T) + \sigma_2(T)}{2} + \rho_{film} \right) \quad (6)$$

Die Ermittlung des ECR ist temperatur- und druckabhängig. Für die Berechnung sind folgende Kenngrößen notwendig:

- temperaturabhängigen spezifischen Widerstände ρ_1 und ρ_2
- Streckgrenze σ_s des weicheren Werkstoffs
- temperaturabhängiger Kontaktdruck σ_{cont}
- spezifischer Oberflächenwiderstand ρ_{film}

Des Weiteren ist die Kontaktwiderstandsberechnung von zwei numerischen Parametern abhängig. Durch den numerischen Parameter ξ werden Schwankungen in der Fremdschichtdicke berücksichtigt und durch den numerischen Parameter κ werden unterschiedliche Oberflächenrauheiten berücksichtigt [60].



a) Messaufbau

b) Darstellung der Teilspannungen

Abbildung 44: Messung und Darstellung der Teilspannungen für die Anpassung der numerischen Parameter [58]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde der Einfluss der numerischen Parameter untersucht und an die experimentellen Ergebnisse angepasst. Dazu ist es notwendig die Teilspannungen aller Kontaktbereiche zu erfassen:

- Teilspannung Elektrode-Buckel $U_{e,p}$
- Teilspannung Buckel-Blech $U_{p,s}$
- Teilspannung Blech-Elektrode $U_{s,e}$

Der messtechnische Aufbau ist in Abbildung 44a dargestellt. Der elektrische Spannungsverlauf ist in Abbildung 44b dargestellt. Dabei wurde der Mittelwert aus sieben Versuchen gemittelt. Bei der Erfassung der elektrischen Spannung ist die Eliminierung der induktiven Spannung nach [53] zu berücksichtigen.

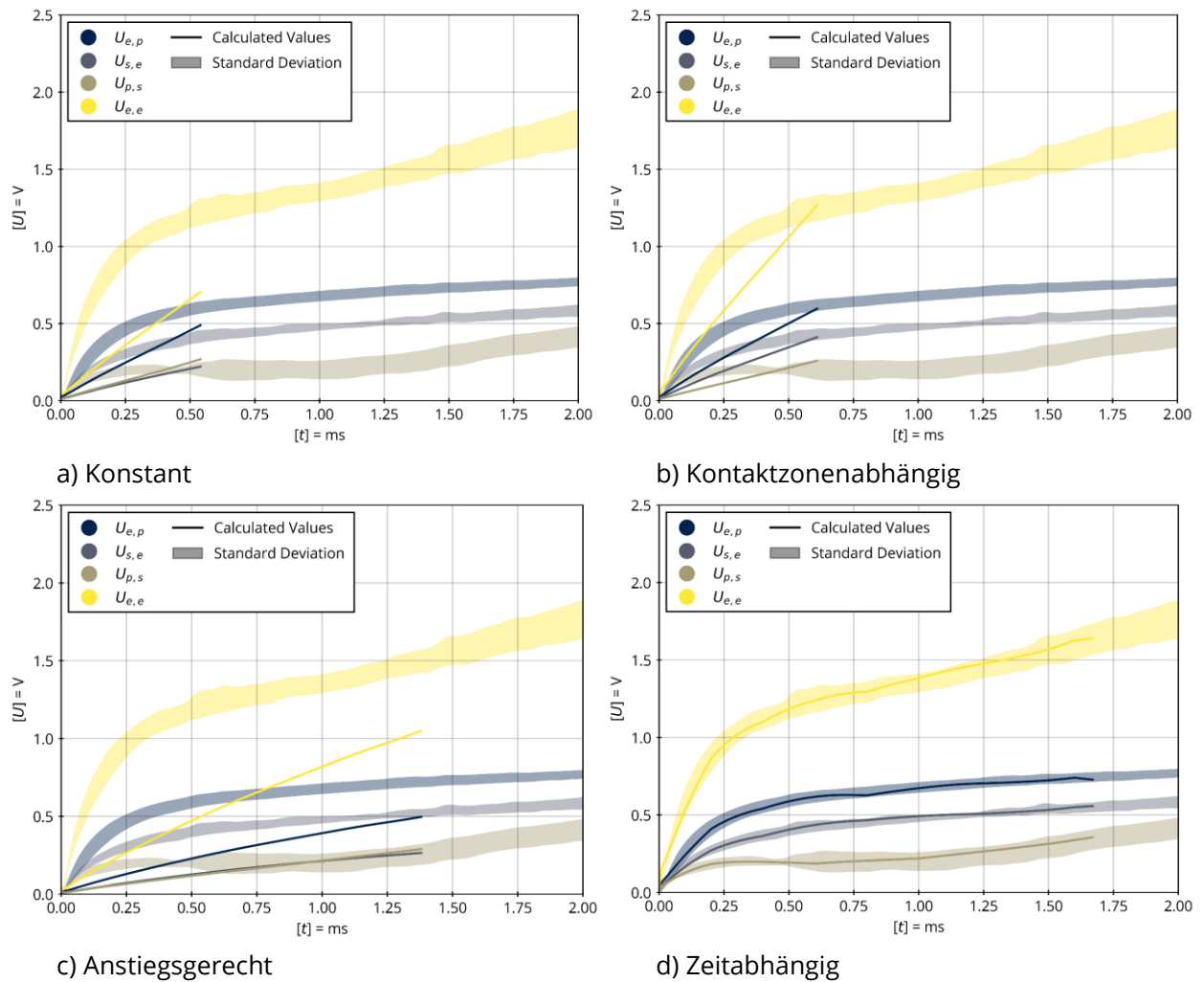


Abbildung 45: Einfluss der numerischen Parameter

In Abbildung 45 ist der Einfluss der numerischen Parameter dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass bei konstantem numerischem Parameter die Teilspannungen simulativ nicht korrekt abgebildet werden. Somit entspricht die Kontaktwiderstandserwärmung nicht der Realität (siehe Abbildung 45a). Durch weitere Optimierung der numerischen Parameter ist eine kontaktzonenabhängige Anpassung möglich, sodass die Reihenfolge der einzelnen Teilspannungen korrekt ist (siehe Abbildung 45b). In Abbildung 45c sind die numerischen Parameter so gewählt, dass neben der Reihenfolge auch eine anstiegsgerechte Abbildung der Teilspannung möglich ist. Werden die numerischen Parameter zeitabhängig optimiert, ist es möglich, den elektrischen Spannungsverlauf des Experiments im Simulationsmodell nachzubilden (Abbildung 45d). Dadurch ist eine zeitabhängige Anpassung des Simulationsmodells an das Experiment möglich.

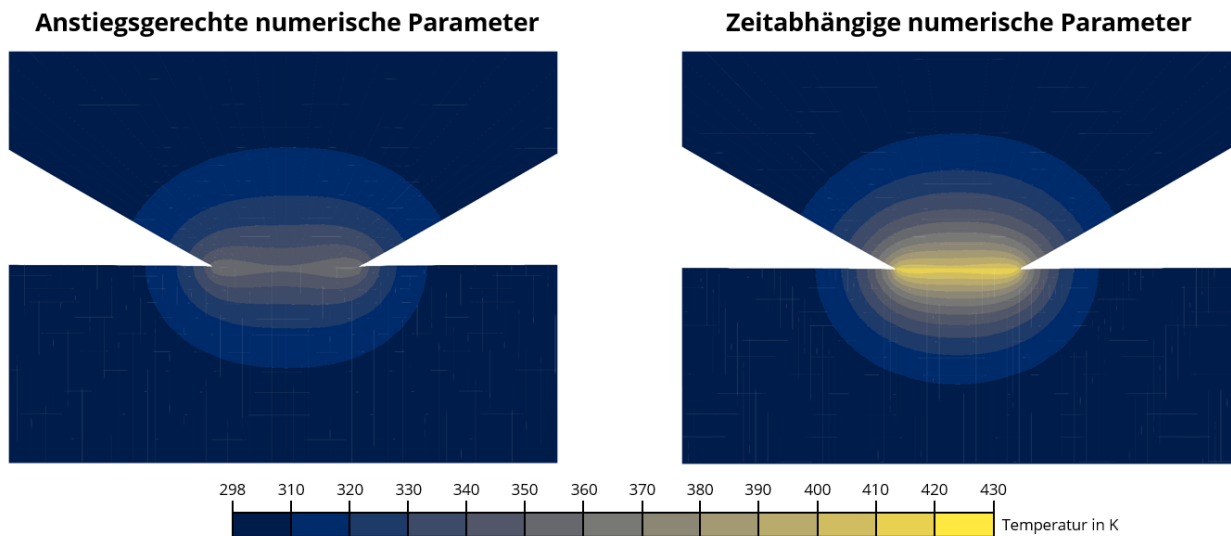


Abbildung 46: Einfluss der Anpassung der numerischen Parameter auf die Temperaturverteilung

In Abbildung 46 ist beispielhaft eine Temperaturverteilung im Buckelquerschnitt zweier unterschiedlicher numerischer Parameter dargestellt. Dabei sind deutliche Unterschiede in der Temperaturverteilung erkennbar. Aus diesem Grund ist eine Anpassung der elektrisch-thermischen Simulation an die Teilspannung zwingend notwendig.

11.3 Simulation großer Deformationen

Um den KE-Buckelschweißprozess simulativ abzubilden, ist neben der Anpassung der numerischen Parameter an das Experiment auch die Berücksichtigung einer Neuvernetzung notwendig. Die Einzelheiten des Vorgehens wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens in [57] veröffentlicht.

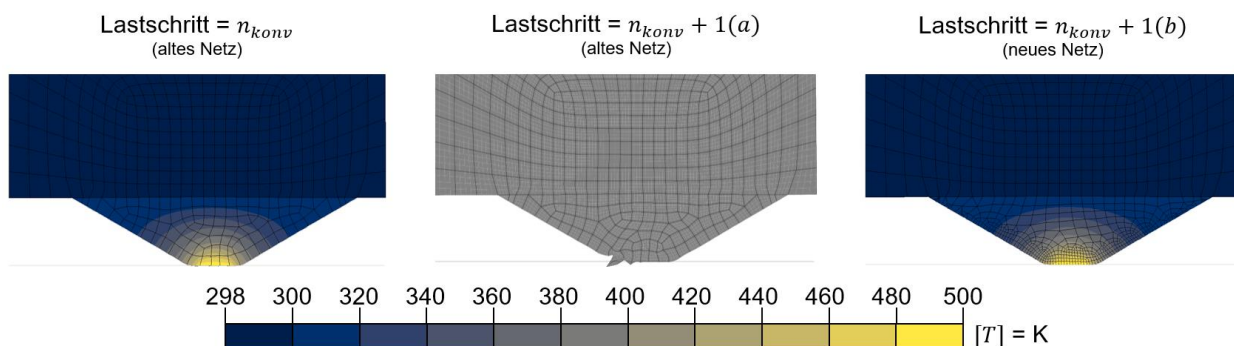


Abbildung 47: Darstellung der Neuvernetzung am Analogiemodell [57]

In Abbildung 47 ist die Neuvernetzung an einem Analogiemodell dargestellt. In diesem Analogiemodell wird eine Temperatur im Buckelquerschnitt aufgebracht und

dieser Buckel wird mit einer Kraft beansprucht. Zum Zeitpunkt n_{konv} ist eine Konvergenz möglich. Im weiteren Verlauf versagt die Simulation zum Zeitpunkt $n_{konv} + 1(a)$. In Abbildung 47 ist die Netzverzerrung zum Zeitpunkt $n_{konv} + 1(a)$ erkennbar. Um starke Buckeldeformationen abzubilden ist zu diesem Zeitpunkt eine Neuvernetzung notwendig. Dadurch ist eine Konvergenz möglich und der Zeitpunkt zum Zeitpunkt $n_{konv} + 1(b)$ in Abbildung 47 wird erreicht.

11.4 Stromdichteverteilung im Buckelquerschnitt

Das beschriebene Simulationsmodell ist geeignet, die thermischen, elektrischen und mechanische Effekte unterschiedlicher Buckelgeometrien abzubilden. In Abbildung 48 ist die Stromdichteverteilung im Buckelquerschnitt dargestellt. Alle Untersuchungsergebnisse sind in [58] veröffentlicht.

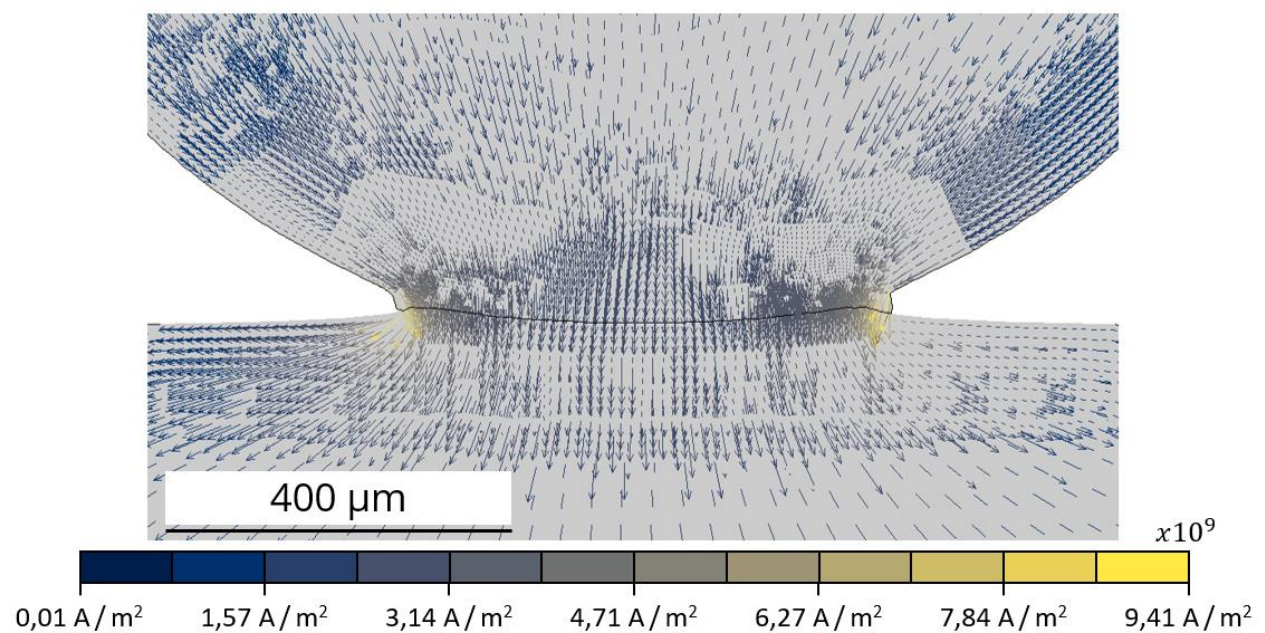


Abbildung 48: Stromdichteverteilung in der Fügezone [58]

In Abbildung 48 ist die Stromdichteverteilung zum Zeitpunkt der maximalen Stromstärke I_p dargestellt ($t = 2,37$ ms; $I_p = 120$ kA). Die maximale Stromdichte ist im Außenbereich der Buckelkontur. Auch die maximalen Temperaturen sind dort festzustellen. Beim Lasertiefschweißen entsteht ein mit Metaldampf gefülltes Keyhole. Um dieses Keyhole auszubilden sind Leistungsdichten zwischen 1 und 5 MW / cm² notwendig [62, 63, 64]. Die maximale Stromdichte in Abbildung 48 beträgt 9,41 A / m². Dadurch ergibt sich eine maximale Leistungsdichte von etwa 32 MW / cm². Die Simulationsergebnisse zeigen, dass auch beim KE-Buckelschweißen

Leistungsdichten erreicht werden, bei dem Metallverdampfung auftritt. Ebenfalls im Zentrum des Buckels werden Leistungsdichten über 2 MW / cm^2 erreicht, sodass die gesamte Aufstandsfläche durch Metallverdampfung aktiviert ist. Durch die Auswertung des zeitlichen Verlaufs ist festzustellen, dass die Aktivierung der Fügezone im Außenbereich beginnt und im weiteren Verlauf wird die gesamte Fügezone aktiviert [58]. Wird die Aufstandsfläche zu groß gewählt, kann das Zentrum der Fügezone nicht aktiviert werden. Die Folge sind unzureichende Fügeverbindungen [4].

12 Gestaltungsempfehlungen für Massivbuckel

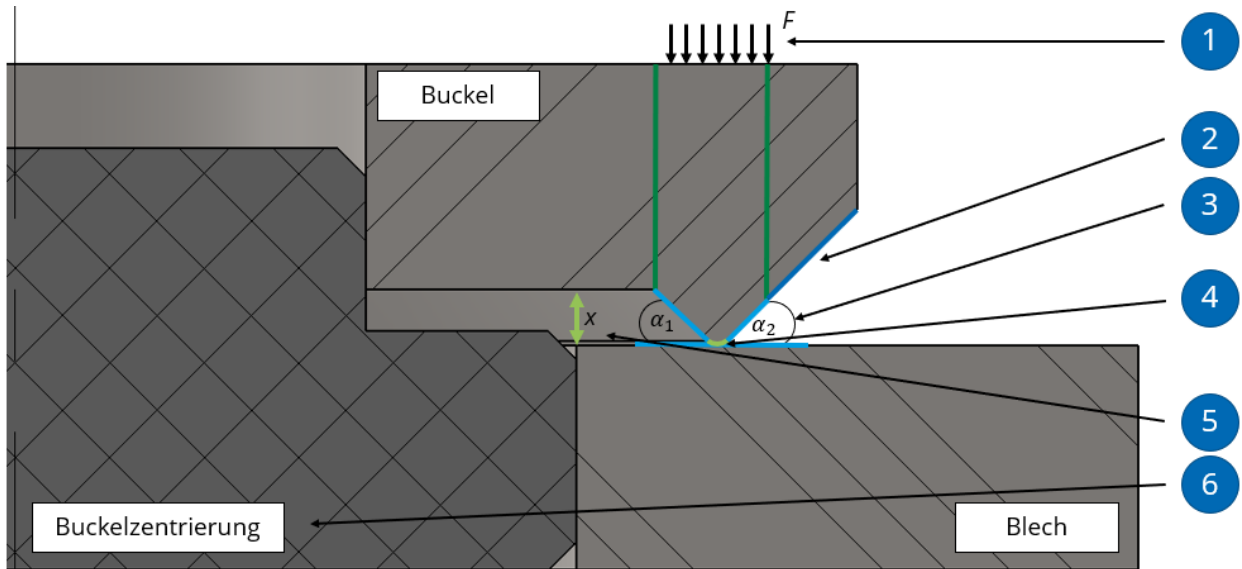


Abbildung 49: Axialsymmetrische Darstellung einer Fügeaufgabe mit Buckelbauteil, Blech und Buckelzentrierung und sechs Gestaltungshinweisen.

Als Ergebnis der experimentellen und numerischen Untersuchungen des KE-Buckelschweißens unterschiedlicher Buckelgeometrien ist es möglich, sechs wesentliche allgemeine Gestaltungshinweise zu geben. Diese sind zusätzlich in Abbildung 49 visualisiert.

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 ($r=1,5$ 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

13 Literaturverzeichnis

- [1] J. Zschetzsche, M. Hertel, M.-M. Ketzel, C. Mathiszik, U. Füssel und H.-J. Rusch, „Kurzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte,“ in *23. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen*, Duisburg, 2016.
- [2] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2911: Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik,“ 2016.
- [3] E. Rauschnabel und H. J. Kniat, „Kondensatorentladungsschweißen von Präzisionsteilen. Beispiele aus dem Getriebebau,“ Erding, 2000.
- [4] U. Füssel, Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur Fügetechnik und Montage: Schlussbericht IGF-Nr. 18.987 BR/DVS-Nr. 04.069, 2018.
- [5] W. Piersig, „Geschichtlicher Überblick zur Entwicklung der Metallbearbeitung,“ in *Beitrag zur Technikgeschichte (8)*, München, GRIN Verlag GmbH, 2010.
- [6] H. Cramer, „Widerstandsschweißen von höherkohlenstoffhaltigen Stählen mit sehr kurzer Wärmeeinbringung,“ SLV München, Schlussbericht (AiF-Nr. 2037/00 DVS-Nr. 4.027), München, 2003.
- [7] F. Früngel, „Das Kondensator-Impulsschweißen: Wirkungsweise und Vorteile des Verfahrens - Physikalische Grundlagen - Durchführung des Verfahrens - Verwendete Schweißelektroden - Maschinelle Ausrüstung,“ *Schweißen und Schneiden*, Bd. 12, Nr. 1, pp. 14-18, 1960.
- [8] U. Krüger, „Kondensator-Entladungsschweißen für vielfältige Schweißaufgaben,“ in *Jahrbuch Schweißtechnik*, Düsseldorf, DVS Media GmbH, 2013, pp. 200-211.

- [9] DIN 1910-100:2008-2, „Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzung zu DIN EN 14610:2005,“ 2008.
- [10] DIN EN 14610:2005-02, „Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse,“ 2005.
- [11] K.-J. Matthes und E. Richter, Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen; mit 130 Tafeln, München: Fachbuchverlag Leipzig, 2006.
- [12] A. H. Fritz, Fertigungstechnik, 12. Auflage Hrsg., Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [13] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2904: Steuerungen und Leistungsteile für das Widerstandsschweißen,“ 2010.
- [14] H.-J. Rusch, Prozesstechnische Anforderungen und elektrotechnisches Design von Kondensatorentladungsmaschinen, Dissertation, Technische Universität Dresden, Professur für Fügetechnik und Montage, 2018, 2018.
- [15] U. Dilthey, Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologie, 3. Auflage Hrsg., Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2006.
- [16] DIN EN ISO 18594:2007-06, „Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollnahtschweißen - Verfahren für das Bestimmen des Übergangswiderstands von Aluminium- und Stahlwerkstoffen,“ 2007.
- [17] G. Hagemann, Grundlagen der Elektrotechnik: Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester; mit 4 Tabellen, Aufgaben und Lösungen, 15. Auflage Hrsg., Wiebelsheim: Aula-Verlag, 2011.
- [18] E. Hering, R. Martin, J. Gutekunst und J. Kempkes, Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer, 4. Auflage Hrsg., Berlin: Springer-Vieweg (VDI-Buch), 2018.

-
- [19] R. Holm, Die technische Physik der elektrischen Kontakte, Berlin: Verlag von Julius Springer, 1941.
- [20] G. Knoblauch, T. Heinisch, M. Henzler, H. Junck, H. Katzier, R. Knoll, G. Mosedale, P. Pauli, M. Römer, H. Ulbricht und R. Premerlani, Steckverbinder: Theorie der Kontakte, neue Technologien, Produkte und Management-Konzepte, 5. Auflage Hrsg., Tübingen: expert, 2019.
- [21] Conntronic Prozess- und Anlagentechnik GmbH, „CD Schweißmaschine - L Serie,“ [Online]. Available: <https://www.conntronic.com/ct-standardmaschinen>. [Zugriff am 14 November 2022].
- [22] Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH, „Glamatronic Schweißanlagen,“ [Online]. Available: <https://www.glamatronic.de/anlagen/#schweissmaschinen>. [Zugriff am 14 November 2022].
- [23] L. Brabetz, C. Koppe und O. Haas, Grundgebiete der Elektrotechnik 1: Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder: Mit 5 Tabellen, 13. Auflage Hrsg., München: De Gruyter Oldenbourg, 2022.
- [24] W. Büttner, Grundlagen der Elektrotechnik, 2. Auflage Hrsg., München: Oldenbourg, 2006.
- [25] NIMAK GmbH, „magneticDRIVE – die Revolution im Widerstandsschweißen,“ [Online]. Available: <https://www.nimak.de/de/magneticdrive/>. [Zugriff am 14 November 2022].
- [26] C. Petersmann, Kondensator-Impuls-Schweißen höher kohlenstoffhaltiger, randschichtgehärteter Einsatzstähle am Beispiel eines Pkw-Sitzbeschlags, Aachen: Dissertation, RWTH Aachen, 2004.
- [27] F. Früngel und W. Knütel, „Kurzeitschweißen mit transformierter Kondensatorentladung,“ *Schweißen und Schneiden*, Bd. 17, Nr. 9, pp. 503-504, 1965.

- [28] D. Rischka, Untersuchungen zum Bindemechanismus beim Kaltpreßschweißen ausgewählter Metalle, Dissertation, Technische Hochschule zu Darmstadt, Darmstadt, 1981.
- [29] R. D'Angelo und H.-J. Schur, Untersuchung zum rationellen Einsatz des Kaltpreßschweißens durch plastische Deformation und Überlagerung zusätzlicher Bewegungskomponenten, Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dresden, 1971.
- [30] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche und U. Füssel, „Auswirkungen des Kraftaufbaus auf den Kontaktwiderstand beim Kondensatorentladungsschweißen,“ *Schweißen und Schneiden*, Bd. 70, Nr. 8, pp. 554-559, 2018.
- [31] M.-M. Ketzler, H.-J. Rusch, J. Zschetzsche und U. Füssel, „Charakterisieren von Nachsetzeinheiten,“ in *DVS Congress 2018: Große Schweißtechnische Tagung, DVS Campus*, Düsseldorf, 2018.
- [32] N. Stocks, Erhöhung der Verschleißbeständigkeit durch partielle Integration von Hartmetallinserts mithilfe der KE-Mehrpulstechnik, Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Dresden, 2021.
- [33] EN ISO 8167:2021, „Widerstandsschweißen - Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln - Buckel zum Widerstandsschweißen,“ 2021.
- [34] DIN 8519:1996-05, „Buckel für das Buckelschweißen von Stahlblechen - Langbuckel und Ringbuckel,“ 1996.
- [35] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2905 - Buckelschweißen von Stählen,“ 2001.
- [36] ISO 2768-1:1991-06, „Allgemeintoleranzen, Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung,“ 1991.
- [37] D. Altnau, K.-D. Czekalla, K. Pöll, A. Schneider und K. Trippe, Interviewees, *Diskussion der Projektskizze "Gestaltung von Massivbuckeln aus Stahl für das KE-Schweißen"*. [Interview]. 01 März 2018.

- [38] H. Cramer, „Untersuchungen zum Anschweißen von Widerstandsschweißmuttern an Bleche aus höher- bis höchstfesten Werkstoffen,“ SLV München, Schlussbericht (AiF-Nr. 14.435 N, DVS-Nr. 04.039), München, 2007.
- [39] D. Neef, Das Festigkeitsverhalten von Kondensator-Impuls-Schweißverbindungen eines Stahlbleches St37 unter Verwendung verschiedener Buckelformen, Diplomarbeit, Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen, Institut für schweißtechnische Fertigungsverfahren, Aachen, 1966.
- [40] U. Dilthey, J. Dickersbach und H.-C. Bohlmann, „Optimierung der Buckelgeometrie zum Schweißen mit Kondensatorimpulsstrom,“ *Schweißen und Schneiden*, Bd. 50, Nr. 1, pp. 11-17, 1998.
- [41] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2920-1 - Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlfeinblechen mit metallischen Überzügen – Teil 1: Überblick,“ 2017.
- [42] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2919 - Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlfeinblechen mit Aluminiumüberzügen,“ 2013.
- [43] DIN EN ISO 16432, „Widerstandsschweißen – Verfahren zum Buckelschweißen von niedriglegierten Stählen mit oder ohne metallischem Überzug,“ 2006.
- [44] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2944 - Widerstandsbuckelschweißen an NE-Metallen und Werkstoffpaarungen für Kleinteile,“ 2017.
- [45] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2936 - Widerstandsbuckelschweißen von Aluminiumwerkstoffen von 0,35 bis 3,5 mm Einzeldicke,“ 2006.
- [46] GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, „Internationaler Schweißfachingenieurlehrgang (SFI) International Welding Engineer (IWE) nach

- IIW Guideline IAB-252-r-14 - Hauptgebiet 1 - Schweißprozesse und -ausrüstung," 2021.
- [47] U. Dilthey, J. Ellermeier und L. Kabatnik, „Reibschweißen oberflächenbehandelter Stahl- und Gußkomponenten hoher Oberflächenhärte und geringer Adhäsionsneigung," *Schweißen und Schneiden*, Bd. 49, Nr. 6, pp. 342-347, 1997.
- [48] A. Bormann, Serielle, induktive Wärmebehandlung laserstrahlgeschweißter Feibleche, Dissertation, Leibnitz Universität Hannover, Hannover, 2004.
- [49] J. Axel, 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, 2006.
- [50] E. Streller, Bewertung der Skalierbarkeit bei Massivbuckeln für das Kondensatorentladungsschweißen, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2020.
- [51] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren e.V., „Merkblatt DVS 2908 - Messen beim Punkt-, Buckel- und Rollennaht-schweißen," 2006.
- [52] B. Walter, Das elektrische Widerstandsschweißen, 1. Auflage Hrsg., Heidelberg: Springer, 1952.
- [53] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche und U. Füssel, „Eliminieren von Spannungsmessfehlern infolge höherveränderlicher Ströme beim Widerstandsschweißen," *Schweißen und Schneiden*, Bd. 68, Nr. 11, pp. 730-734, 2016.
- [54] 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, pp. 164-168, 2017.

- [55] W. Kleppmann, Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren, 6. Auflage Hrsg., Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009.
- [56] T. Hertzschuch, Optimierung der Buckelgeometrie beim Kondensatorentladungsschweißen mittels statistischer Versuchsplanung, Forschungspraktikum, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, 2021.
- [57] J. Koal, M. Baumgarten, J. Zschetzsche und U. Füssel, „Numerische Simulation großer Deformationen beim Buckelschweißen durch Kondensatorentladung,“ *DVS Congress 2021 - Große schweißtechnische Tagung, DVS Campus*, Bd. DVS Berichte 371, pp. 562-567, 2021.
- [58] 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,“ in *The 13th International Seminar "Numerical Analysis of Weldability"*, Leibnitz, Österreich, 2022.
- [59] M. Baumgarten, Numerische Simulation unterschiedlicher Kontakttheorien für das Widerstandspressschweißen mit Kondensatorentladung, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, Dresden, 2020.
- [60] Q. Song, Testing and Modeling of Contact Problems in Resistance Welding, Dänemark: Dissertation, Technical University of Denmark, 2003.
- [61] M. Hamedi und M. Atashparva, „A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding,“ *Welding in the World*, Bd. 61, Nr. 2, pp. 269-290, 2017.
- [62] V. Semak und A. Matsunawa, „The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing,“ *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 30, Nr. 18, pp. 2541-2552, 1997.

- [63] X. Chen und H.-X. Wang, „A calculation model for the evaporation recoil pressure in laser material processing," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 34, Nr. 17, pp. 2637-2642, 2001.
- [64] J. Y. Lee, S. H. Ko, D. F. Farson und C. D. Yoo, „Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 35, Nr. 13, pp. 1570-1576, 2002.
- [65] U. Füssel, Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur Fügetechnik und Montage: Schlussbericht IGF-Nr. 19.889 B/DVS-Nr. 04.075, 2020.

14 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile“ (IGF-Nr.: 20.825 BR, DVS-Nr.: 04.3194) mit einem Bewilligungszeitraum vom 01.10.2019 – 30.09.2021 wurde das Kondensatorentladungsschweißen von großen Buckelgeometrien wissenschaftlich untersucht. Die Untersuchungen beinhalteten die Auswirkungen unterschiedlicher Buckelgeometrien auf die Auspresskraft der Verbindung und das Spritzerverhalten während des Schweißens. Aufgrund der COVID19-Pandemie wurde das Forschungsvorhaben um 6 Monate bis zum 31.03.2022 kostenneutral verlängert. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Bewertung und Optimierung der Buckelgeometrie an großen Bauteilen. Dabei konnten die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Forschungsvorhaben [4, 65] bestätigt und angewandt werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht. Das Ergebnis sind allgemeine Gestaltungsempfehlungen, die in Abschnitt 12 beschrieben sind. Es wurde ein neues Simulationsmodell entwickelt, das eine Neuvernetzung in der Struktursimulation erfordert. Dies war zu Beginn des Forschungsvorhabens nicht bekannt. Diese Neuvernetzung wurde in das Simulationsmodell implementiert. Durch die Anwendung des weiterentwickelten Simulationsmodells können jetzt physikalische Effekte, wie die Oberflächenaktivierung, beschrieben und die Auswirkung unterschiedlicher Buckelgeometrien untersucht werden (siehe Abschnitt 11). Bei der experimentellen Untersuchung wurde die statistische Versuchsplanung (DOE) verwendet, um signifikante Einflüsse auf die Festigkeit zu ermitteln (siehe Abschnitt 7, 8 und 9). Im Weiteren sind Transfermaßnahmen geplant, die in Abschnitt 19.2 beschrieben sind. In Tabelle 4 ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung in Abhängigkeit der Arbeitspakete ersichtlich.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzung

Arbeitspaket	Zielsetzung	Ergebnisse
AP 1: Schweißversuche mit bauteilähnlichen Prüfkörpern	Herstellen stoffschlüssiger Verbindungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Buckelgeometrien Messtechnische Erfassung der Prozessdaten Statistische Versuchsplanung Prozessvisualisierung durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	Feststellung signifikanter Einflüsse der Buckelgeometrie Erhöhung des Prozessverständnisses Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf große Bauteile Gestaltungsempfehlungen für Massivbuckel Spritzerklasse in Abhängigkeit der Buckelgeometrie Spritzerklasse in Abhängigkeit der Werkstoffkombination

AP 2: Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung der Bauteile	Quasi-statische Prüfung der Bauteile in Abhängigkeit der Buckelgeometrie Untersuchung des Gefüges im Buckelquerschnitt Ermitteln der Aufhärtung in der Fügezone Korrelation mit den Prozessdaten Zerstörungsfreie Prüfung	Optimierung der Buckelgeometrie Statistische Einflüsse der Buckelgeometrie auf quasi-statische Festigkeit Werkstoffabhängigkeit der Buckelgeometrie auf quasi-statische Festigkeit Keine zerstörungsfreie Prüfung möglich
AP 3: Weiterentwicklung und Validierung des Modells und numerische Prozesssimulation	Mechanisch-thermisch-elektrische Prozesssimulation des KE-Buckelschweißens in Abhängigkeit der Geometrie Berücksichtigung einer temperaturabhängigen Buckeldeformation und der Kontaktwiderstandserwärmung	Entwicklung eines iterativ gekoppelten Simulationsmodells Implementierung der Kontaktwiderstandserwärmung Implementierung einer Neuvernetzung zur Berücksichtigung starker Buckeldeformationen Erhöhung des Prozessverständnisses durch Auswertung der Stromdichteverteilung Darstellung der Oberflächenaktivierung beim KE-Buckelschweißen

15 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 und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet und notwendiges, weiteres Probenmaterial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte beschafft.

16 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.

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

Die Erkenntnisse zur Gestaltung der Buckelgeometrie stehen potentiellen Nutzern durch die Veröffentlichungen 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 AGV 3.5 Sitzungen wird das Merkblatt DVS 2911 überarbeitet und die Gestaltungsempfehlungen des Forschungsvorhabens implementiert. In Tabelle 5 sind die wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzen für KMUs zusammengefasst.

Tabelle 5: Zusammenfassung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens

Wissenschaftlich-technischer Nutzen	Wirtschaftlicher Nutzen
Optimierung der Buckelgeometrie	Schweißprozess- und Bauteilempfehlungen für das kostengünstige und einfache KE-Buckelschweißen
Sechs Gestaltungsempfehlungen für das KE-Buckelschweißen	
Übertragbarkeit auf große Bauteile	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 2023 geplant)
Erhöhung des Prozessverständnisses durch numerische Prozesssimulation	
Bestätigung der Erkenntnisse vergangener Forschungsvorhaben	→ Reduzierung von Versuchsumfängen

18 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

18.1 Fachtagungen, Kolloquien und Berichterstattungen

- Koal, Johannes (2019): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 26.11.2019.
- Koal, Johannes (2020): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 03.06.2020.
- Koal, Johannes (2020): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 25.11.2020.
- Koal, Johannes (2021): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 27.05.2021.
- Koal, Johannes (2021): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. 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): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. Fortschrittberichterstattung zum laufenden Projekt. Öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 des DVS e.V., Düsseldorf, 10.05.2022.
- 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 (2022): Geometrie von Massivbuckeln für das KE-Schweißen großer Bauteile. Abschlussberichterstattung des Forschungsvorhabens. DVS Congress 2022, Große Schweißtechnische Tagung und DVS Campus, Koblenz, 2022.

18.2 Veröffentlichungen und Fachbeiträge

- Koal, Johannes, Baumgarten Martin, Heilmann Stefan, Zschetzsche Jörg, Füssel Uwe: Performing an Indirect Coupled Numerical Simulation for Capacitor Discharge Welding of Aluminium Components. Processes, Vol. 8, Nr. 11, S. 1330, 2020
- 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 Phenomena 13, 2022.

18.3 Studien- und Abschlussarbeiten

- Baumgarten, Martin (2020): Numerische Simulation unterschiedlicher Kontakttheorien für das Widerstandspressschweißen mit Kondensatorentladung. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Streller, Erik (2020): Bewertung der Skalierbarkeit bei Massivbuckeln für das Kondensatorentladungsschweißen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Röder, Chris (2020): Untersuchung physikalischer Effekte beim KE-Schweißen. Forschungspraktikum. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Becker, Maximilian (2020): Entwicklung eines Algorithmus zur Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beim Kondensatorentladungsschweißen. Forschungspraktikum. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Becker, Maximilian (2021): Schlierenaufnahmen von Kondensatorentladungsschweißprozessen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage. Dresden.
- Hertzschuch, Tim (2021): Optimierung der Buckelgeometrie beim Kondensatorentladungsschweißen mittels statistischer Versuchsplanung.

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.

19 Transfermaßnahmen

19.1 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: 10.12.2019 (Oyten)
		2. PA: 27.05.2020 (Webkonferenz)
		3. PA: 15.12.2020 (Webkonferenz)
		4. PA: 09.06.2021 (Webkonferenz)
		5. PA: 21.07.2021 (Webkonferenz)
		6. PA: 29.03.2022 (Webkonferenz)
B: Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während und nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
C: 6 geplante Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie 2 Zwischenbericht / 6 Zwischenpräsentationen vor dem FA 4 jeweils 1. und 2. HJ ab 10/2019	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	PA: siehe Maßnahme A FA4: 26.11.2019 03.06.2020 25.11.2020 27.05.2021 18.11.2021 10.05.2022
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 (12/2019, 05/2020, 12/2020, 06/2021, 12/2021, 03/2021)
F: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potentiell 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. Baumgarten, Becker, Streller, Hertzschuch, Röder

19.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
A: Bereitstellung von Information über die Technologietransferzentren und Forschungsinformationssysteme der Hochschulen; ebenso auf den Universitätsseiten	Information über laufende Forschungsarbeiten, gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend
B: 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/ 2022
D: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen mit Fachbeitrag in Tagungsband	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	Große Schweißtechnische Tagung 2022
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 2022
H: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	voraussichtlich 2023
I: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-/Diplom- bzw. 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

19.3 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.