

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19.899B

## Thema

Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung

## Berichtszeitraum

01.01.2018 - 31.12.2019

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

## Forschungseinrichtung

Technische Universität Dresden  
Institut für Fertigungstechnik  
Professur Fügetechnik und Montage

Dresden, 05.06.2020

---

Ort, Datum

  
Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

---

Name und Unterschrift des Projektleiters der Forschungseinrichtung

Gefördert durch:

## Schlussbericht

Titel: Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels  
Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher  
Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der  
Entladung

IGF-Nr.: 19.889 B

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

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

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Max-Martin Ketzel  
Dipl.-Ing. Johannes Koal

weiterer Autor: Dr.-Ing. Jörg Zschetzsche

Version: 8. Juni 2020

## **Zusammenfassung**

Das Forschungsvorhaben „Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung“ (IGF-Nr. 19.899 BR/DVS-Nr. 04.075) verfolgte das Ziel, Aluminiumbuckelschweißen durch KE-Schweißen zu ermöglichen.

Dazu wurden zunächst Empfehlungen für eine Buckelgeometrie (für Massivbuckel) erarbeitet. Die experimentellen und simulativen Untersuchungen zeigen, dass stumpfe Buckelwinkel eine geringere Verformung vor und während des Schweißprozesses aufweisen, da durch die Druckverteilung die mechanischen Spannungen am Rand der Buckel geringer sind. Beim Kondensatorentladungsschweißen entsteht die Verbindung durch die Bildung von Metaldampf aufgrund der schnellen, sehr starken Erwärmung der Fügeflächen. Dieser aktiviert die Fügeflächen, welche danach aufeinandergepresst werden. Die Entgasung der Fügeflächen ist Voraussetzung für eine porenfreie Verbindung. Ringbuckel mit breiter Aufstandsfläche ( $\geq 0,75$  mm) zeigten Gaseinschlüsse. Deshalb sollten bei Ringbuckeln kleine Buckelringbreiten bevorzugt werden.

Bei Langbuckeln erfolgt der Wärmeeintrag in die Fügefläche aufgrund der geometriebedingten Verteilung der Stromdichte sowohl im Querschnitt (analog zu Ringbuckeln [1]) als auch im Längsschnitt von außen nach innen. Der kältere Buckel im Inneren (betrachtet im Längsschnitt) hält den mechanischen Kontakt länger aufrecht, sodass es seltener zum schlagartigen Verdampfen der gesamten Kontaktfläche und somit zum Kontaktverlust kommt. Dieser Effekt tritt analog bei Segmentbuckeln auf, welchen Ringbuckeln damit vorzuziehen sind.

Hauptziel des kraftgesteuerten Auslösens mit veränderlicher Kraft war, das Nachsetzverhalten durch die bereits in Bewegung befindliche Nachsetzeinheit positiv zu

beeinflussen. Auf keiner der extra für das Projekt adaptierten Maschinen konnte eine Kraftanstiegsgeschwindigkeit mit ausreichender Wiederholgenauigkeit erreicht werden. Die Untersuchungen zeigen dennoch, dass durch ein schnelleres Nachsetzen der Krafteinbruch und der Elektrodenverschleiß reduziert werden können. Die Reduzierung des Kraftabfalls hatte zur Folge, dass die Verbindung geringere Belastbarkeit aufweist (statischer Kopfzugversuch). Im Gegensatz dazu stieg bei größerem Elektrodenkrafteinbruch während des Schweißens die Belastbarkeit der Verbindung. In Abhängigkeit vom Stromverlauf war ein Grenzbereich festzustellen. Bei zu hohem Krafteinbruch kam es zur schlagartigen Metallverdampfung einhergehend mit sehr starkem Elektrodenverschleiß und meist vollständiger Bauteilzerstörung. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine sehr schnelle Kraftregelung (innerhalb der Schweißzeit von wenigen Millisekunden) die Schweißbarkeit von Aluminiumbuckellegierungen optimieren kann.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 19.899 B / DVS-Nr. 04.075) 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 Studenten, die durch ihre Studien- und Abschlussarbeiten zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben:

Technische Universität Dresden	
Erik Natusch	Diplomarbeit
Markus Dieckmann	Diplomarbeit
Martin Baumgarten	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:

Bernd Rödder (Projektpate) Stephan Löcherbach	NIMAK GmbH
Dr. Hans-Jürgen Rusch Nicolas Stocks	Harms & Wende GmbH & Co. KG
Thomas Nett Günther Möckl Andreas Lohrmann	conntronic GmbH
Axel Schneider	Kapkon GmbH
Klaus-Dieter Czekalla	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH
Dr. Henning Grebe Martin Trapp Sven Engel	Dalex GmbH
Dr. Tillmann Höfer Dipl.-Ing. Jürgen Gerhards	Daimler AG
Robert Gessler	Porsche Leipzig GmbH

Dipl.-Ing. Michael Rotzsch	ELEKTRO-SCHWEISSTECHNIK-DRESDEN GmbH
Dr.-Ing. Hartmut Janssen	Hydro Aluminium Rolled Products GmbH
Frank Klösters	NEDSCHROEF PLETTENBERG GmbH
Dipl.-Ing. Heiko Hindorf	Pef Schweißmaschinenbau GmbH
Dipl.-Wirt.-Ing. Alexander Hornung	Stäubli Electrical Connectors GmbH
Dr.-Ing. Markus Tuchtfeld	Volkswagen AG
Jens Cremer	Doceram GmbH

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Danksagung .....	4
Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis .....	9
Tabellenverzeichnis.....	16
Abkürzungsverzeichnis .....	17
Verzeichnis der Formelzeichen .....	18
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	20
1.1 Anlass für den Forschungsantrag.....	20
1.2 Ausgangssituation.....	22
2 Stand der Technik .....	23
2.1 Kondensatorentladungsschweißen.....	23
2.2 Verfahrenstechnische Grundlagen.....	24
2.3 Kontaktwiderstände.....	26
2.4 Maschinenteknik des KE-Schweißens .....	28
2.4.1 Mechanischer Teil der Kondensatorschweißanlage .....	29
2.4.2 Elektrischer Teil der Kondensatorentladungsschweißanlage .....	31
2.5 Prozessbeschreibung des Schweißablaufs.....	33
2.6 Parameter und Einstellgrößen.....	35
2.7 Buckelgeometrien für Aluminiumbuckelschweißen.....	38
3 Forschungsziel .....	40
4 Eingesetzte Anlagentechnik .....	41
4.1 Versuchsanlagen zum Kondensatorentladungsschweißen.....	41
4.1.1 Maschine 1 .....	41
4.1.2 Maschine 2 .....	43
4.1.3 Maschine 3 .....	44

---

4.1.4	Maschine 4 .....	45
4.2	Messtechnik zur Datenerfassung beim KE-Schweißen .....	46
4.2.1	Strommessung.....	46
4.2.2	Spannungsmessung.....	47
4.2.3	Wegmessung.....	47
4.2.4	Kraftmessung.....	48
5	Versuchswerkstoffe.....	49
6	Erarbeitung allgemein nutzbarer Empfehlungen zur Buckelgeometrie.....	50
6.1	Massivbuckel .....	51
6.1.1	Numerische Untersuchungen .....	52
6.1.2	Experimentelle Untersuchungen .....	65
6.2	Geprägte Buckel .....	70
7	Einfluss des kraftgesteuerten Auslösens der Entladung.....	73
7.1	Versuche an Maschine 1 .....	73
7.2	Versuche an Maschine 2.....	76
7.3	Versuche an Maschine 3.....	82
7.3.1	Ringbuckel.....	82
7.3.2	Langbuckel .....	85
7.4	Versuche an Maschine 4.....	87
7.4.1	Ringbuckel .....	87
7.4.2	Langbuckel .....	89
8	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen.....	91
9	Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen .....	93
10	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen .....	94
11	Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen .....	95
11.1	Fachtagungen, Kolloquien, Fachbeiträge.....	95



11.2 Studien- und Abschlussarbeiten.....	95
12 Transfermaßnahmen.....	96
12.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen.....	96
12.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende.....	97
12.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts.....	99
13 Literaturverzeichnis .....	101
A Anhang .....	106
A.1.1 Gesprächsprotokoll – Telefonat: M.-M. Ketzel mit Markus Tuchtfeld 25.01.2018 – ca. 16:30 Uhr .....	106

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Klassifizierung der verschiedenen Widerstandsschweißverfahren im Sinne der DIN 1910-100 [14].....	23
Abbildung 2:	Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [6] ...	25
Abbildung 3:	Links: Widerstände und Verfahrenscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [16], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [19]	26
Abbildung 4:	C-Gestell mit pneumatischem Antriebssystem (links) [25] und Portalgestell mit hydraulischem Antriebssystem [26].....	29
Abbildung 5:	Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts) [6].....	30
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket .....	31
Abbildung 7:	Prinzipschaltbild einer Kondensatorentladungsschweißanlage [6]..	32
Abbildung 8:	Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen [6].....	34
Abbildung 9:	Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [6]	36
Abbildung 10:	Maschine 1 mit Kurbeltrieb und aufgebauter Hochgeschwindigkeitsaufnahmen .....	42
Abbildung 11:	Kraftverläufe und zugeordnete Zündzeitpunkte (Strichlinie) der Schweißversuche an Maschine 1 .....	43
Abbildung 12:	Maschine 2 mit Säulenführungsgestell und Elastomerfeder .....	44
Abbildung 13:	Maschine 3 mit eingebauter Säulenführung und aufgebauter Hochgeschwindigkeitsmessung .....	45
Abbildung 14:	Maschine 4 mit aufgebauter Hochgeschwindigkeitsmessung .....	46
Abbildung 15:	Verwendeter Ringbuckel mit veränderlichen Geometriebedingungen $\alpha_1$ , $\alpha_2$ und b.....	51
Abbildung 16:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm ausgewählter Aluminiumlegierungen .....	52
Abbildung 17:	Aufbau des FE-Modells .....	54

---

Abbildung 18: Von-Mises-Spannung der numerischen Simulation .....	55
Abbildung 19: Verschiebung des Buckels und Kontaktdruck im Kontaktbereich (15kN, 45°-45°).....	56
Abbildung 20: Numerische Verschiebung aller Versuche.....	57
Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Messung des Übergangswiderstandes.....	58
Abbildung 22: Beispielmessung zur Ermittlung des Übergangswiderstandes.....	59
Abbildung 23: Übergangswiderstand in Abhängigkeit der Kraft und des Buckelwinkels .....	60
Abbildung 24: Beispiel einer Konfokalmessung des Buckeleindrucks .....	61
Abbildung 25: Ausrichtung des Buckeleindrucks .....	61
Abbildung 26: Höhenunterschied des Buckeleindrucks für variierende Buckelwinkel (Simulation und Experiment).....	62
Abbildung 27: Übergangswiderstand mit variierender Buckelringbreite .....	63
Abbildung 28: Höhenunterschied des Buckeleindrucks für variierende Buckelwinkel (Experiment und Simulation).....	64
Abbildung 29: Erstellung der Querschliffe zur Untersuchung der Buckelringbreite .....	68
Abbildung 30: Querschliffe der Buckelgeometrien an drei Betrachtungsstellen.....	68
Abbildung 31: Links: Lichtmikroskopische Aufnahme, Rechts: REM-Aufnahme – Buckelgeometrie Winkel 30°/30° Buckelringbreite 0,5 mm .....	69
Abbildung 32: Bruchfläche nach Kopfzugprüfung, links: Lichtmikroskop, rechts: REM.....	70
Abbildung 33: Stempel und Matrizen zu Prägen von Ringbuckeln.....	71
Abbildung 34: Zündkraft über Winkel der Buckelgeometrie mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- wenn keine Kopfzugkraft angegeben, Querschliff angelegt.....	75
Abbildung 35: Vergleich der Kraftanstiege bei ähnlicher Zündkraft an Maschine 1	76
Abbildung 36: Einfluss der Federsteifigkeit bei statischer Kraftaufbringung auf die ertragbare Kopfzugkraft – $L_E=7,5\text{ kWs}$ – $t_h=2,9\text{ ms}$ – $t_l=6,7\text{ ms}$ .....	77

---

Abbildung 37: Einfluss der Oberflächenvorbehandlung bei statischer Kraftaufbringung auf die ertragbare Kopfzugkraft – $L_E=7,5\text{ kWs}$ – $t_h=2,9\text{ ms}$ – $t_l=6,7\text{ ms}$ – $c=10\text{ kN/mm}$ .....	79
Abbildung 38: Kopfzugkraft über Ladeenergie bei verschiedenen Kraftanstiegszeiten und gleicher Schweißkraft.....	80
Abbildung 39: Kopfzugkraft über Schweißkraft bei verschiedenen Kraftanstiegszeiten und gleicher Ladeenergie.....	80
Abbildung 40: Beispiel der Auswertung des Kraftabfall .....	81
Abbildung 41: Kopfzugkraft und Kraftabfall über den gewählten Versuchsparametern (Schweißkraft/Ladeenergie).....	81
Abbildung 42: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Kraftanstiegszeiten für eine Kraftänderung von 5 kN bei einer Schweißkraft von 8,5 kN .....	83
Abbildung 43: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Kraftanstiegszeiten für eine Kraftänderung von 5 kN bei einer Schweißkraft von 22 kN .....	83
Abbildung 44: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Auslösezeiten für eine Kraftänderung von 20 kN auf 25 kN.....	84
Abbildung 45: Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 3, Ringbuckel.....	86
Abbildung 46: Momentaufnahme aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zweier Versuche mit gleichen Versuchsparametern jedoch unterschiedlichen Blickwinkeln .....	87
Abbildung 47: Schweißbereich Maschine 4 mit Zylinderhub 75 mm – Ringbuckel ..	88
Abbildung 48: Schweißbereich Maschine 4 mit beiden Zylinderhüben – Ringbuckel .....	88
Abbildung 49: Schweißbereich Maschine 4 mit Zylinderhub 95 mm – Langbuckel ..	90
Abbildung 50: Federkennlinien der eingesetzten Federn in Maschine 2 .....	108
Abbildung 51: Drei verwendete Krafteinstellung an Maschine 3 bei Zündkraft 8,5 kN .....	109
Abbildung 52: Drei verwendete Krafteinstellung an Maschine 3 bei Zündkraft 22 kN .....	109
Abbildung 53: Verwendete Krafteinstellung an Maschine 3 bei Krafterhöhung von 20 auf 25 kN in 50 ms .....	110

Abbildung 54: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 100 N/ms .....	110
Abbildung 55: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 50 N/ms	111
Abbildung 56: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 25 N/ms	111
Abbildung 57: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 25 N/ms. Auswertung 1 ms .....	112
Abbildung 58: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 100 N/ms .....	112
Abbildung 59: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 50 N/ms	113
Abbildung 60: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 100 N/ms .....	113
Abbildung 61: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegszeit 50 ms – verschiedene Zündzeitpunkte .....	114
Abbildung 62: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45° .....	115
Abbildung 63: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45° .....	115
Abbildung 64: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45° .....	116
Abbildung 65: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45° .....	116
Abbildung 66: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60° .....	117
Abbildung 67: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60° .....	117
Abbildung 68: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60° .....	118
Abbildung 69: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60° .....	118

Abbildung 70: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°.....	119
Abbildung 71: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°.....	119
Abbildung 72: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°.....	120
Abbildung 73: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30° .....	120
Abbildung 74: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°.....	121
Abbildung 75: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°.....	121
Abbildung 76: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°.....	122
Abbildung 77: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90° .....	122
Abbildung 78: Weg und Kraftverläufe an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/90°.....	123
Abbildung 79: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/90°.....	123
Abbildung 80: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/90°.....	124
Abbildung 81: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/90° .....	124
Abbildung 82: Allgemeiner Ablauf Erstellung Schweißbereich .....	125
Abbildung 83: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,5 mm - kurze Schweißzeit .....	125
Abbildung 84: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,5 mm - lange Schweißzeit .....	126

---

Abbildung 85: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,75 mm - kurze Schweißzeit .....	126
Abbildung 86: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,75 mm - lange Schweißzeit .....	127
Abbildung 87: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 1 mm - kurze Schweißzeit .....	128
Abbildung 88: Querschliff geprägter Buckel – spitzer Buckelwinkel .....	128
Abbildung 89: Querschliff geprägter Buckel – stumpfer Buckelwinkel .....	129
Abbildung 90: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, spitzer Buckelwinkel, Federsteifigkeit $c \approx 1$ kN/mm .....	129
Abbildung 91: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, spitzer Buckelwinkel, Federsteifigkeit $c \approx 2$ kN/mm .....	130
Abbildung 92: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, spitzer Buckelwinkel, Federsteifigkeit $c \approx 10$ kN/mm .....	130
Abbildung 93: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, stumpfer Buckelwinkel, Federsteifigkeit $c \approx 1$ kN/mm .....	131
Abbildung 94: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, stumpfer Buckelwinkel, Federsteifigkeit $c \approx 2$ kN/mm .....	131
Abbildung 95: EDX-Analyse im Querschliff .....	132
Abbildung 96: EDX-Analyse der Bruchfläche .....	133
Abbildung 97: Parameter des Versuchsplan .....	134
Abbildung 98: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 3 bei 6,5kWs, $R^2=0,51$	134
Abbildung 99: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 3 bei 13kWs, $R^2=0,67$	135
Abbildung 100: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Auslösezeiten für eine Kraftänderung von 10kN auf 15kN - Langbuckel .....	135
Abbildung 101: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Auslösezeiten für eine Kraftänderung von 20kN auf 25kN - Langbuckel .....	136
Abbildung 102: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 3 bei 5,4kWs und 13kWs mit Bestimmtheitsmaßen $R^2=0,62$ und $R^2=0,76$ - Langbuckel .....	136
Abbildung 103: Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 3, Langbuckel .....	137

Abbildung 104:Schweißbereich Maschine 4 mit Zylinderhub 75 mm – Ringbuckel	138
Abbildung 105:Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 4 mit $R^2=0,46$ – Ringbuckel.....	138
Abbildung 106:Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 4, Ringbuckel.....	139
Abbildung 107:Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 4 mit $R^2=0,38$ – Langbuckel.....	139
Abbildung 108:Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 4, Langbuckel.....	140



## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Einstellgröße und deren Einfluss an KE-Maschinen [6, 30, 32] .....	37
Tabelle 2:	Untersuchungsschritte der Buckelgeometrie mit untersuchten Werten.....	51
Tabelle 3:	Werkstoffeigenschaften bei Raumtemperatur .....	52
Tabelle 4:	Versuchsplan für numerische Untersuchung und experimentelle Validierung.....	53
Tabelle 5:	Buckelverformung und Buckeleindringung in Blech in Abhängigkeit zum Buckelwinkel.....	65
Tabelle 6:	Einteilung in Spritzerphasen mit Ergebnis der zerstörenden Prüfung .....	75
Tabelle 7:	Arbeitsschritte beim Oberflächenvorbehandeln .....	78
Tabelle 8:	Kenndaten der verwendeten KE-Schweißmaschinen .....	107

## Abkürzungsverzeichnis

KE-Schweißen	Kondensatorentladungsschweißen	
MK		Materi-
alkombination/Werkstoffkombination		
NE		Nach-
setzeinheit		
PA		Projekt-
begleitender Ausschuss		
PTFE		Polytet-
raflourethylen		
RBM		Ringbu-
ckelmutter		
SBM		Seg-
mentbuckelmutter		
WEZ		Wärme-
einflusszone		
ZP		zerstö-
rende Prüfung		

---

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$t$	Zeit (allgemein)	s
$R$	Widerstand (allgemein)	$\Omega$
$I$	Strom (allgemein)	A
$R_{\text{ges}}$	Gesamtwiderstand	$\mu\Omega$
$Q$	Wärme (allgemein)	J
$t_I$	Stromflusszeit	ms
$t_w, t_h$	Schweißzeit (bei AC/DC-Stromquellen)	ms
$t_p$	Stromanstiegszeit	ms
$I_p$	Spitzenstrom	kA
$I_{\text{eff}}$	Effektivstrom	kA
$E_L$	Ladeenergie	Ws, kW <sub>s</sub> , kJ
$C$	Kapazität	mF
$U_L$	Ladeenergie	V
$t_0$	Schweißbeginn	ms
$\rho_R$	Resistivität	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

---

---

$R_K$	Kontaktwiderstand	$\mu\Omega$
$R^2$	Bestimmtheitsmaß	
$R_t$	Übergangswiderstand	$\mu\Omega$
$\alpha_1, \alpha_2$	Buckelwinkel	°
$R_E$	Engewiderstand	$\mu\Omega$

---

# 1 **Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

## 1.1 **Anlass für den Forschungsantrag**

Das Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen) bietet aufgrund seiner Prozesscharakteristik sehr hohes Anwendungspotenzial zum Widerstandsbuckelschweißen von Aluminiumbauteilen. Dieses wird jedoch nicht genutzt. Der Prozess ist durch eine sehr kurze Schweißzeit und sehr hohe Stromstärken gekennzeichnet. Die Wärmeenergie wird in der Fügezone konzentriert, wodurch der Wärmeeintrag in das Bauteil und die Elektroden sehr gering ist. Daraus resultiert eine hohe Maßhaltigkeit der Bauteile, geringe Entfestigung in der Fügezone und geringer Elektrodenverschleiß, der durch die hohe Affinität zwischen Kupfer und Aluminium stets ein Problem beim Widerstandsschweißen von Aluminiumwerkstoffen darstellt. Da die Energie, die für jede Schweißung eingesetzt wird, konstant ist, ergeben sich kaum abweichende Stromkurven und reproduzierbare Ergebnisse. Auch Änderungen des Widerstandes in der Fügezone im Verhältnis 1:5 liefern beim KE-Schweißen noch gleichmäßige Ergebnisse [2]. Diese Eigenschaft des KE-Schweißens ist ein besonderer Vorteil beim Verschweißen von Aluminiumlegierungen, die durch verschiedene Lagerzustände unterschiedliche Oberflächen- und damit Schweißigenschaften aufweisen können. Die Netzbelastung ist nicht stoßartig, weil die Schweißenergie in einer Kondensatorbatterie zwischengespeichert wird und die Ladung der Kondensatoren langsam zwischen den Schweißstakten erfolgt [2, 3]. Das hohe Potenzial dieses Verfahrens bestätigen auch aktuelle Veröffentlichungen zum KE-Punktschweißen von Aluminium [4, 5].

Das effiziente, robuste und somit für KMU besonders interessante KE-Schweißen wird jedoch bisher nicht zum Buckelschweißen von Aluminiumbauteilen eingesetzt, obwohl es aufgrund seiner Charakteristik besonders geeignet erscheint. Die Ursachen sind im Werkstoff und im schnellen Prozessablauf zu suchen. Aluminiumlegierungen weisen im Vergleich zu Stahl eine ca. vierfache elektrische Leitfähigkeit und ca. 50% der Festigkeit auf und entfestigen bei Erwärmung innerhalb eines kleinen Temperaturbereichs. Störend ist auch die festhaftende, hochschmelzende Oxidschicht auf der Oberfläche, die zur Herstellung einer stoffschlüssigen

Verbindung beseitigt werden muss. Das KE-Schweißen ist durch eine Schweißzeit unter 15 ms gekennzeichnet, während der Spitzenstromstärken über 1000 kA erreicht werden können [6]. Daraus ergeben sich z.T. widersprüchliche Anforderungen an den Prozess: eine hohe Elektrodenkraft wegen der hohen Schweißstromstärke, eine niedrige Elektrodenkraft wegen der geringen Werkstofffestigkeit, eine stabile Ausführung der Werkzeugträger und Elektroden (dadurch große Masse) sowie ein sehr schnelles Nachsetzen der Elektroden, möglichst bereits innerhalb der Stromanstiegsphase von wenigen Millisekunden (geringe bewegte Masse). Diese widersprüchlichen Anforderungen sind bisher weder technisch gelöst noch systematisch untersucht worden.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Buckelgeometrie. Die aktuellen Normen und Merkblätter [7–9] enthalten nur für Stahlwerkstoffe typische Merkmale und Maße für Buckel sowie die entsprechenden Werkzeugmaße für die Herstellung. [10] ist das einzige Merkblatt, das sich mit dem Buckelschweißen von Aluminiumwerkstoffen befasst. Dort wird festgestellt, dass beim Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Werkstoffe im Vergleich zu Stahl spezielle Buckelformen erforderlich sind und dass besondere Anforderungen an die Maschinen gestellt werden. Allerdings sind keine konkreten Angaben zu Merkmalen und Maßen der Buckel zu finden. Das KE-Schweißen mit seinen Besonderheiten wird nicht erwähnt.

Das KE-Schweißen zählt zu den Widerstandsschweißverfahren. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass der Werkstoff lokal aufschmilzt und die Verbindung über den schmelzflüssigen Zustand hergestellt wird. Von der Forschungsstelle wurden neue Erkenntnisse zum Prozessverlauf beim KE-Schweißen entdeckt [1]. Die Leistungsdichte in der Fügezone kann beim KE-Schweißen so hoch sein, dass Metallverdampfung auftritt, die zur Aktivierung der Oberflächen führt. Die Verbindung wird dann im plastischen Zustand, ohne eine Schweißlinse, entstehen. Die Übertragung dieser Hypothese auf Aluminiumwerkstoffe führt zu einer neuen Erklärung der Beseitigung der Oxidschicht und der Entstehung der Schweißverbindung. Das erweiterte Prozessverständnis ermöglicht ein neues Herangehen und führt zu neuen Lösungen, um Aluminiumbauteile effizient und kostengünstig durch KE-Buckelschweißen zu fügen.

## 1.2 Ausgangssituation

Ausgangspunkt sind die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes 18.987 B „Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden“ [1]

## 2 Stand der Technik

### 2.1 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 [11]. 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 [12]. Während das Verfahren bereits seit 1940 im nordamerikanischen Schrifttum bekannt ist, erscheint eine der ersten deutschsprachigen Veröffentlichungen im Jahr 1960 von F. Frügel [2].

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 [13].

Das Kondensatorentladungsschweißen gehört zur Gruppe der konduktiven Widerstandsschweißverfahren, wird aber im Sinne von DIN 1910-100 [14] nicht durch einen eigenständigen Schweißprozess charakterisiert. Es stellt eine besondere Form des Buckelschweißens dar, findet aber auch vereinzelt als Widerstandspunktschweißen Anwendung [6].

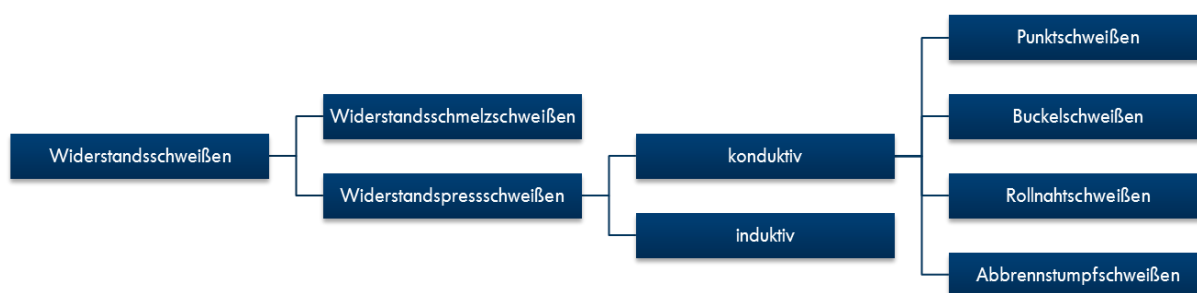


Abbildung 1: Klassifizierung der verschiedenen Widerstandsschweißverfahren im Sinne der DIN 1910-100 [14]

Aus heutiger Sicht dominiert das Buckelschweißen. Das heißt, ein Fügeteilpartner weist eine buckelähnliche Kontur auf, um den Stromfluss in der Berührungsfläche zu konzentrieren [13].



## 2.2 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 [1]. 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 Joulschen Gesetz zu:

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

Daraus ist ersichtlich, dass die den Werkstücken zugeführte Wärme von der Stromflusszeit  $t_I$ , der Stromstärke  $I$  sowie dem elektrischen Gesamtwiderstand im Schweißstromkreis  $R_{\text{ges}}$  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 [15]. Es ist sinnvoll, die Stromflusszeit gering zu halten und die erforderliche Wärmemenge über höhere Schweißströme einzubringen [16].

Charakteristisch für das KE-Schweißen ist ein einzelner, kurzer, hoher Stromimpuls von bis zu 1000kA, der aus der transformierten Entladung eines Kondensators erzeugt wird [17]. 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. [18]

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

Das DVS-Merkblatt 2911 [6] 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
- $I_{\text{eff}}$  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.

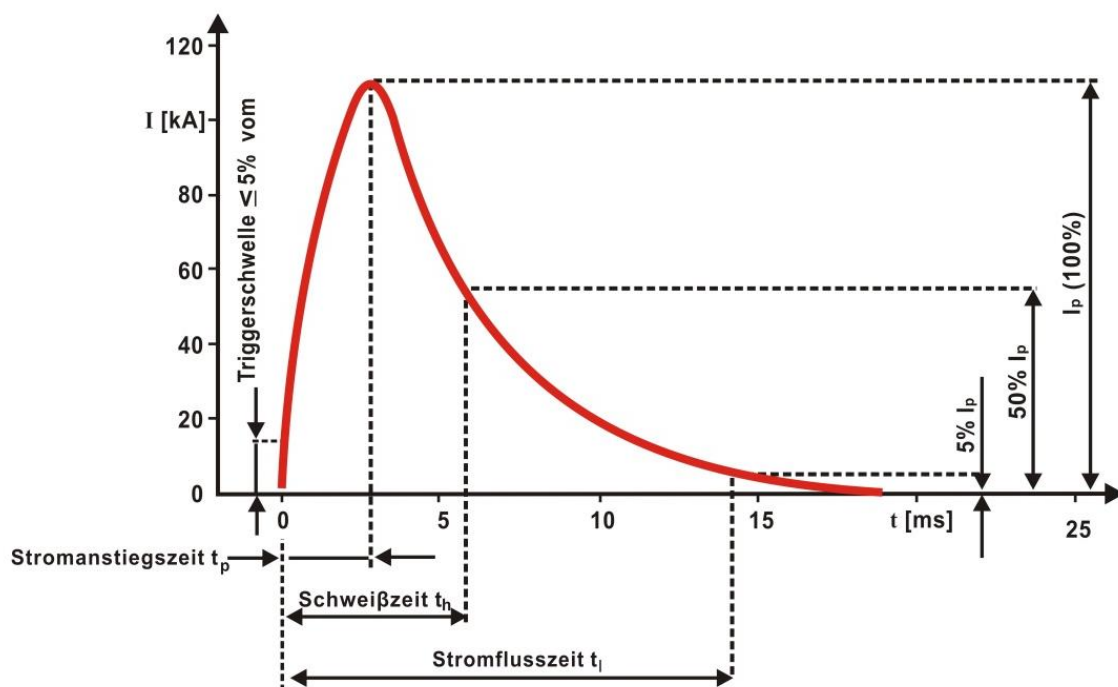


Abbildung 2: Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [6]

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.

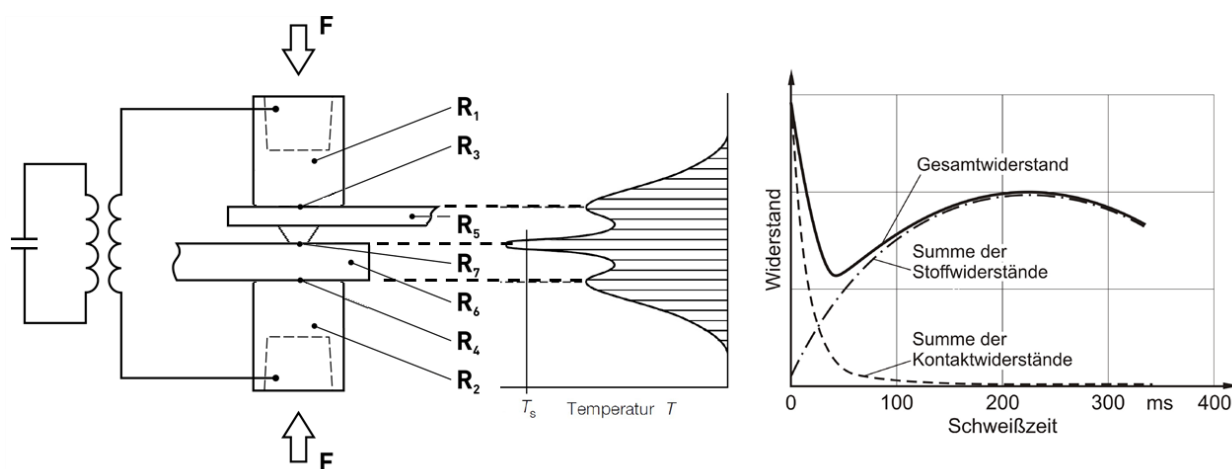


Abbildung 3: Links: Widerstände und Verfahrensscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [16], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [19]

### 2.3 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 [20] 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  $\rho_R$  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. [21, 22]

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 Aluminiumlegierungen wird schnell deutlich, dass hierbei nicht von einer technisch sauberen Oberfläche gesprochen werden kann. Viel mehr befinden sich über dem Grundwerkstoff unterschiedliche Schichten, vor allem eine festhaftende Aluminiumoxidschicht. Auch

andere Schichten aus Ölen, Staubteilchen oder ähnlichen Verunreinigungen können die Stromleitung behindern. Somit bleiben von der tragenden Kontaktfläche nur kleine Flächenbereiche übrig, die aus reinen metallischen Berührungsflächen bestehen. 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 Gashaut 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[23, 24]

## 2.4 Maschinenteknik des KE-Schweißens

Die KE-Schweißanlagen verschiedener 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. Eine KE-Schweißanlage kann in die zwei Grundgestellvarianten C-Gestell- und Portalgestellausführung eingeteilt werden (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: C-Gestell mit pneumatischem Antriebssystem (links) [25] und Portalgestell mit hydraulischem Antriebssystem [26]

Beide Bauformen haben spezifische Vor- und Nachteile, welche bei der Auswahl einer Anlagenvariante für einen fertigungstechnischen Einsatz in Betracht gezogen werden sollten. Während die Elektroden eines C-Gestells von drei Seiten her zugänglich sind, gewährleistet ein Portalgestell eine exakt senkrechte und gleichmäßige Krafteinwirkung auf die Fügeteile. 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. [6]

#### 2.4.1 Mechanischer Teil der Kondensatorschweißanlage

Der mechanische Teil der Anlage besteht aus dem Gestell zur Aufnahme von allen 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. Ihre Form wird dabei 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 [27]. 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 Schweißkrafteinheit befinden [28]. 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 [6, 26].

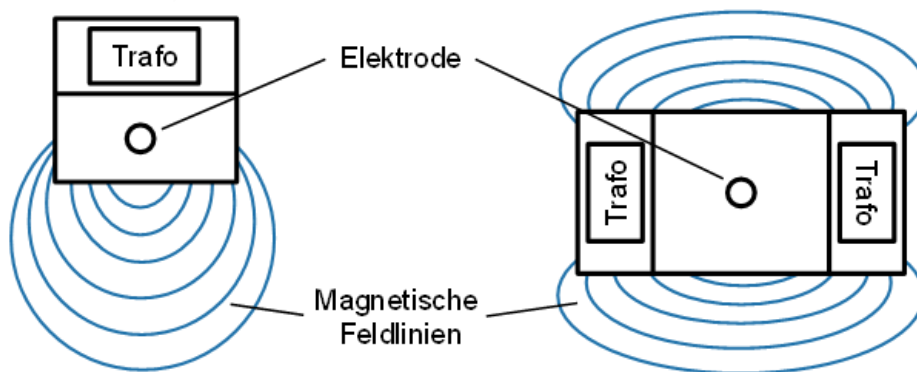


Abbildung 5: Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts) [6]

Die Schweißqualität beim Buckelschweißen wird neben den elektrischen Prozessparametern und der Elektrodenkraft 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 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 alleine würde zu träge reagieren. Deshalb wird es um Nachsetzeinheiten (NE), die vom eigentlichen Krafterzeugungssystem 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 Krafteinheit angeordnet. Der Einsinkweg der Elektroden wird in dieser schematischen Darstellung vernachlässigt.

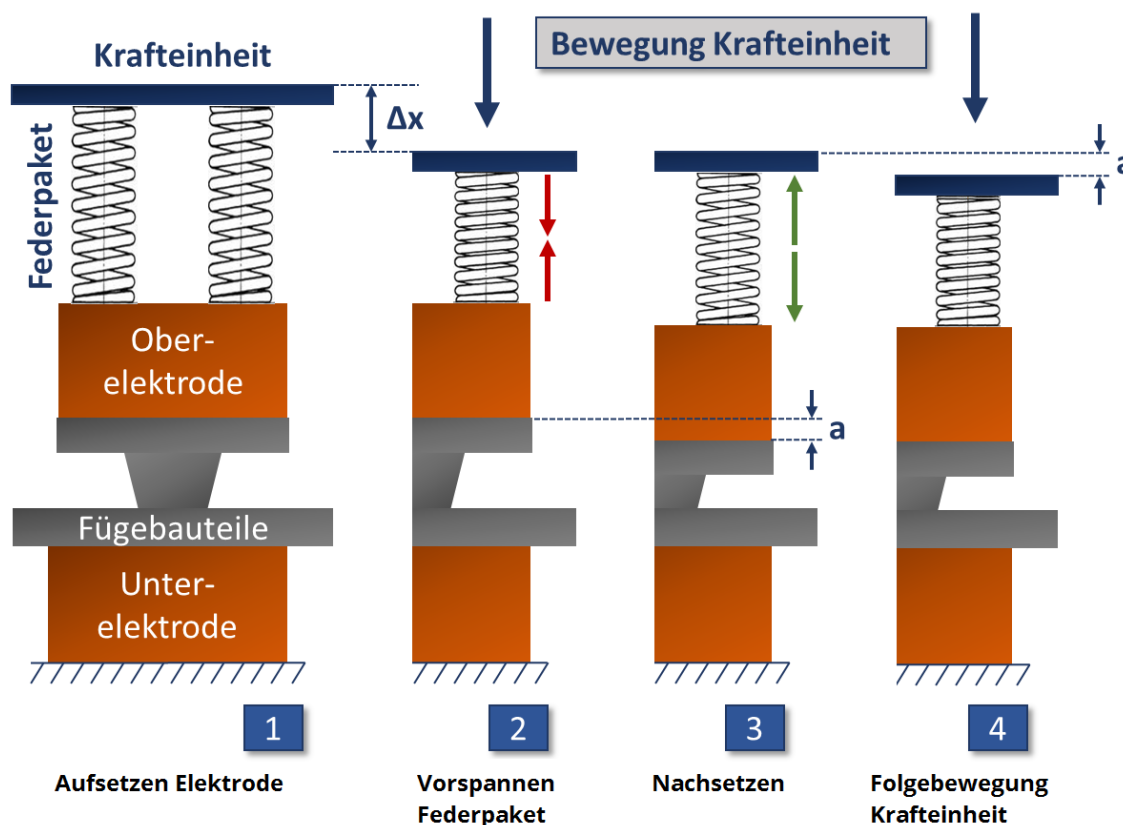


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket

Der dritte Schritt zeigt deutlich, dass die träge Krafteinheit nicht folgen kann und auf derselben Höhe verbleibt. Das vorgespannte und weitaus dynamischere Federpaket setzt schnell, im Idealfall synchron zur Buckelerweichung, nach und verringert bzw. eliminiert den Krafteinbruch. 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 [29]. [30]

#### 2.4.2 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.



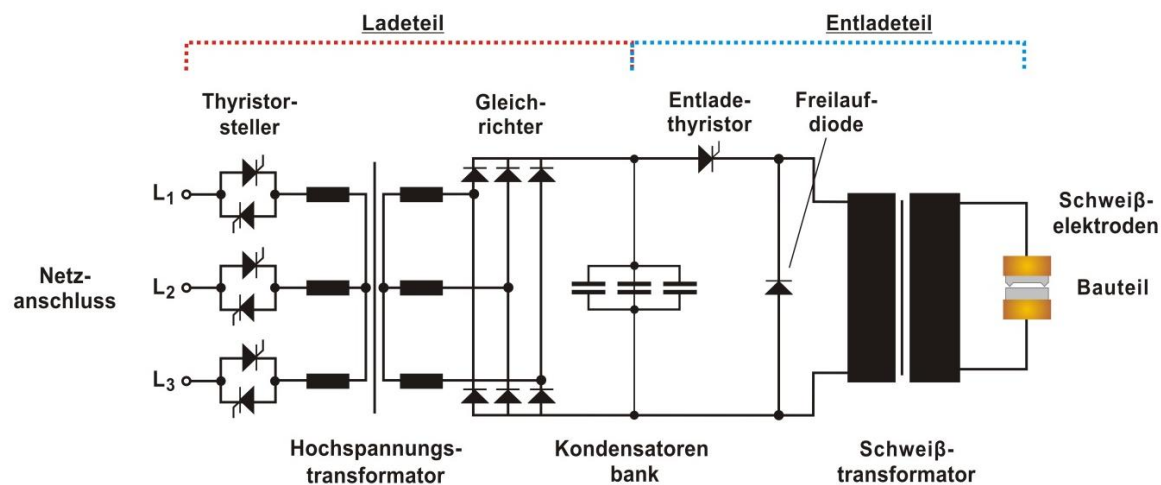


Abbildung 7: Prinzipschaltbild einer Kondensatorentladungsschweißanlage [6]

KE-Schweißanlagen werden üblicherweise an 400V Drehstrom betrieben, wobei die eigentliche Schweißung galvanisch vom Netz getrennt abläuft [6]. Der Schweißablauf teilt sich dabei in eine Lade- und Entladephase des Kondensators auf. In der Ladephase 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) [30]. 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 [30]. 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  $I_2$  [6]. Dabei beschreibt  $\ddot{u}$  das Verhältnis der Wicklung  $N_1$  zu  $N_2$  des Schweißtransformators [30]. 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 [28, 31]. Um unnötige Verluste zu vermeiden, sollte der Eisenkern des Transformators nicht in Sättigung gehen [18]. Im Sekundärstromkreis befinden sich die Elektroden mit den zu verschweißenden Bauteilen, sodass der Entladestrom über die Schweißstelle fließt.

## 2.5 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.

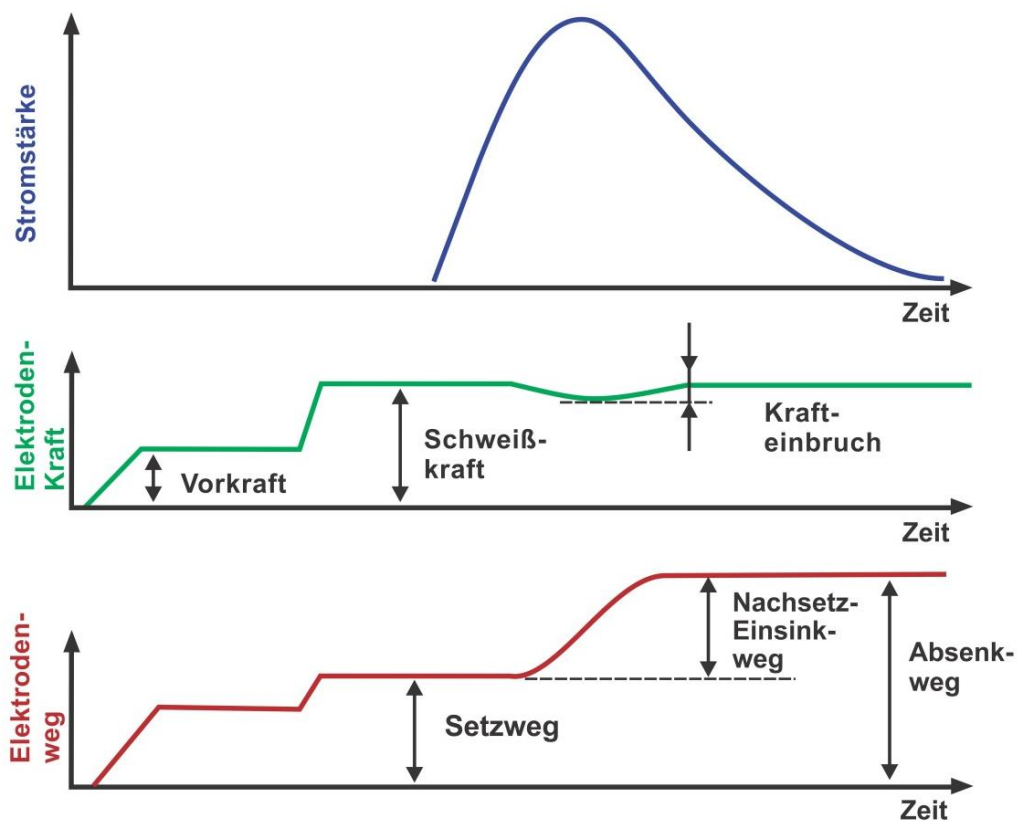


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen [6]

Aufgrund der sehr schnellen Erwärmung durch den sehr hohen und sehr kurzen Schweißimpuls spielt die Wärmeleitung eine sehr eingeschränkte Rolle. Simulationsergebnisse aus dem vorangegangenen Forschungsprojekt [1] zeigen Temperaturen oberhalb der Siedetemperaturen der eingesetzten Stahlwerkstoffe. Das verdampfende Metall expandiert schlagartig und reinigt die Oberflächen der Fügepartner. 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.

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. 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 [6, 12]. 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. [6]

## 2.6 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, welche in

Tabelle 1 erläutert werden.



Abbildung 9: Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [6]

Tabelle 1: Einstellgröße und deren Einfluss an KE-Maschinen [6, 30, 32]

Parameter	Einfluss
Schweißkraft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verformung des Buckels</li> <li>• Eindrücken des Buckels in Blech</li> <li>• Kontaktwiderstand zwischen den Bauteilen sowie zwischen Bauteilen und Elektroden</li> <li>• Federkraft der NE und damit Federweg und Beschleunigung der NE</li> </ul>
Ladespannung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für die Entladung zur Verfügung stehende Energie</li> <li>• Maximalstrom</li> <li>• Energie die in die Fügestelle eingebracht wird (nicht identisch der Ladeenergie)</li> </ul>
Transformator-übersetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stromanstiegszeit</li> <li>• Schweißzeit</li> <li>• Stromflusszeit</li> <li>• Maximalstrom</li> </ul>
Kapazität des Kondensators	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für die Entladung zur Verfügung stehende Energie</li> <li>• Energie die in die Fügestelle eingebracht wird (nicht identisch der Ladeenergie)</li> <li>• Stromanstiegszeit</li> <li>• Schweißzeit</li> <li>• Stromflusszeit</li> <li>• Maximalstrom</li> </ul>
Nebenzeiten wie: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorhaltezeit</li> <li>• Nachhaltezeit</li> <li>• Ladezeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taktzeit</li> <li>• Ladestrom, Netzanschluss</li> </ul>
Vorkraft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraft beim Aufsetzen</li> <li>• Verformung beim Aufsetzen</li> </ul>

---

Parameter	Einfluss
Antriebseinheit	<ul style="list-style-type: none"><li>• Geschwindigkeit beim Schweißkraftaufbau</li><li>• Geschwindigkeit des Ausgleiches des Krafteinbruchs in Nachhaltezeit</li><li>• Aufsetzbewegung, Prellen</li></ul>
Nachsetzeinheit	<ul style="list-style-type: none"><li>• Krafteinbruch</li><li>• Nachsetzbewegung beim Schweißen</li><li>• Spritzer</li><li>• Elektrodenverschleiß</li></ul>

---

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.

## 2.7 Buckelgeometrien für Aluminiumbuckelschweißen

In Nomen, DVS-Merkblättern und Veröffentlichungen gibt es nur wenige konkrete Empfehlungen zur Gestaltung geprägter Buckel für das Aluminiumbuckelschweißen. Die meisten Empfehlungen gelten für das Buckelschweißen von Stahl bzw. nur allgemein für das Buckelschweißen [8, 9, 33–36]. 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 Hohlaluminiumbuckel sind aufgrund ihrer geringen Steifigkeit im Allgemeinen schlecht schweißgeeignet, günstiger sind hier in beide Bleche eingebrachte Hohlaluminiumbuckel, 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 [8] und IIW genormt) haben sich aufgrund ungenügender Steifigkeit nicht bewährt. [10] Dilthey u.a. stellt fest, dass für das KE-Schweißen (für Stahl) die Buckel aus [9] ungeeignet sind [37].

Weiterhin gibt es Angaben für Stahl und NE-Metalle. Letztere gelten allerdings explizit nicht für Aluminiumlegierungen [33, 38], jedoch wird festgestellt, dass durch formgeprägte Buckel eine kleinere Maßtoleranz erreicht werden kann [38].

Cramer stellt fest, dass das KE-Schweißen durch die vergleichsweise 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. [12]

Neef vergleicht in seinen Untersuchungen 3 Buckelformen für Rundbuckel. Er wählt nach Kaltstauchversuchen den steifsten Buckel und trägt den Querschnitt Rotations-symmetrisch aus, sodass ein Ringbuckel entsteht. Bis auf [39] sind keine Veröffentlichungen für das KE-Aluminiumbuckelschweißen bekannt. Die Informationen aus dieser Diplomarbeit sind jedoch nicht allgemein anwendbar, da keine Aussagen zur Charakteristik der Schweißmaschine enthalten sind. [39]



### 3 Forschungsziel

Dieses Forschungsvorhaben verfolgte das wesentliche Ziel, Aluminiumbuckelschweißen durch KE-Schweißen zu ermöglichen. Es setzt sich aus den folgenden Teilzielen zusammen:

- Vertiefung des Prozessverständnisses beim KE-Schweißen
- Erarbeitung von Merkmalen und Maßen für Buckelgeometrien
- Möglichkeiten zum ausreichend schnellen Nachsetzen der Elektroden beim KE-Schweißen von Aluminiumbauteilen

Das erste Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Vertiefung des Prozessverständnisses beim KE-Schweißen. Durch die sehr schnellen Stromanstiegszeiten, den sehr kurzen Schweißzeiten und den sehr hohen Maximalströmen scheint das KE-Schweißen für Aluminiumbuckelschweißverbindungen für besonders geeignet. Das in [1] erarbeitete Prozessverständnis soll bei der Untersuchung angewendet und für den Werkstoff Aluminium und dessen Legierungen vertieft werden. Durch Versuche, begleitet von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, sollen die physikalischen Vorgänge ermittelt und beschrieben werden.

Das zweite Ziel dient der Erarbeitung geeigneter Buckelgeometrien für das Aluminiumbuckelschweißen, die den besonderen Eigenschaften wie niedriger Schmelzpunkt und schlagartige und schnelle Erweichung ab 200°C gerecht werden [40].

Das dritte Ziel ist die Ermittlung des Einflusses des Nachsetzverhaltens der Maschine auf den Prozess. In den Vorversuchen wurde gezeigt, dass der Kraftereinbruch während des Schweißens zur Erhöhung des Kontaktwiderstandes und zum Verschleiß der Elektroden führt. Der Kraftereinbruch kann vermindert werden, wenn die Elektroden schnell genug nachgeführt werden. Weiterhin kann der Kraftereinbruch vermindert werden, indem der Start der Schweißung, d.h. das Zünden des Entladedthyristors in der Bewegung während des Kraftaufbaus ausgelöst wird. Ziel ist eine Reduzierung des Elektrodenverschleißes bei gleichzeitiger Verbesserung der Verbindungsbildung.

## **4 Eingesetzte Anlagentechnik**

### **4.1 Versuchsanlagen zum Kondensatorentladungsschweißen**

Die Schweißversuche wurden mit 4 verschiedenen Maschinen durchgeführt. Maschine 3 arbeitet mit einer kommerziell erhältlichen Krafteinheit und Nachsetzeinheit. Maschinen 1, 2 und 4 wurden speziell für das Projekt mit Krafteinheiten bzw. Nachsetzeinheiten ausgerüstet, die sich im Prototypstatus befinden. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die auftretenden Effekte bei den Schweißversuchen erläutert. Eine Übersicht der Maschinenparameter ist in Tabelle 8 ersichtlich.

#### **4.1.1 Maschine 1**

Die Besonderheit von Maschine 1 (Abbildung 10) ist die Kraftaufbringung via Kurbeltrieb und Nachsetzeinheit. Die Auslösung der Schweißung erfolgt winkelgesteuert.



Abbildung 10: Maschine 1 mit Kurbeltrieb und aufgebauter Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Elektrodenkraft ergibt sich aus der Stauchung der Federn. Diese ist abhängig von der Aufsetzposition der oberen Elektrode und dem Drehwinkel. Die Aufsetzposition kann durch Kupferbeilagen zwischen unterer Elektrode und Polplatte beeinflusst werden. Der Drehwinkel wird über ein I/O-Signal eines induktiven Annäherungssensors realisiert. Die Verarbeitung des Signals erfolgt durch die maschineneigene SPS-Steuerung.

Abbildung 11 zeigt die gemessenen Kraftkurven mit den zugeordneten Zündzeitpunkten der Kondensatorentladung. Es ist ersichtlich, dass die Maximalkraft der Kurven durch nicht verhinderbare Veränderungen an den Elektroden (z.B. durch Verschleiß) und Kraftanpassung durch Änderung der Aufsetzposition (während des Einrichtens) variiert. Die Varianz des Zeitpunktes der Zündung verhindert die Vergleichbarkeit und der Schweißprozess nahezu. Die Varianz ist maschinenbedingt, da

die Signallaufzeit nach Erreichen des eingestellten Zündwinkels variiert. Der Auslösezeitpunkt schwankt um ca. 60 ms. Dies war vor den Messungen nicht bekannt. Die Erkenntnisse aus den Messungen können genutzt werden, um die Steuerung der Anlage zu verbessern.

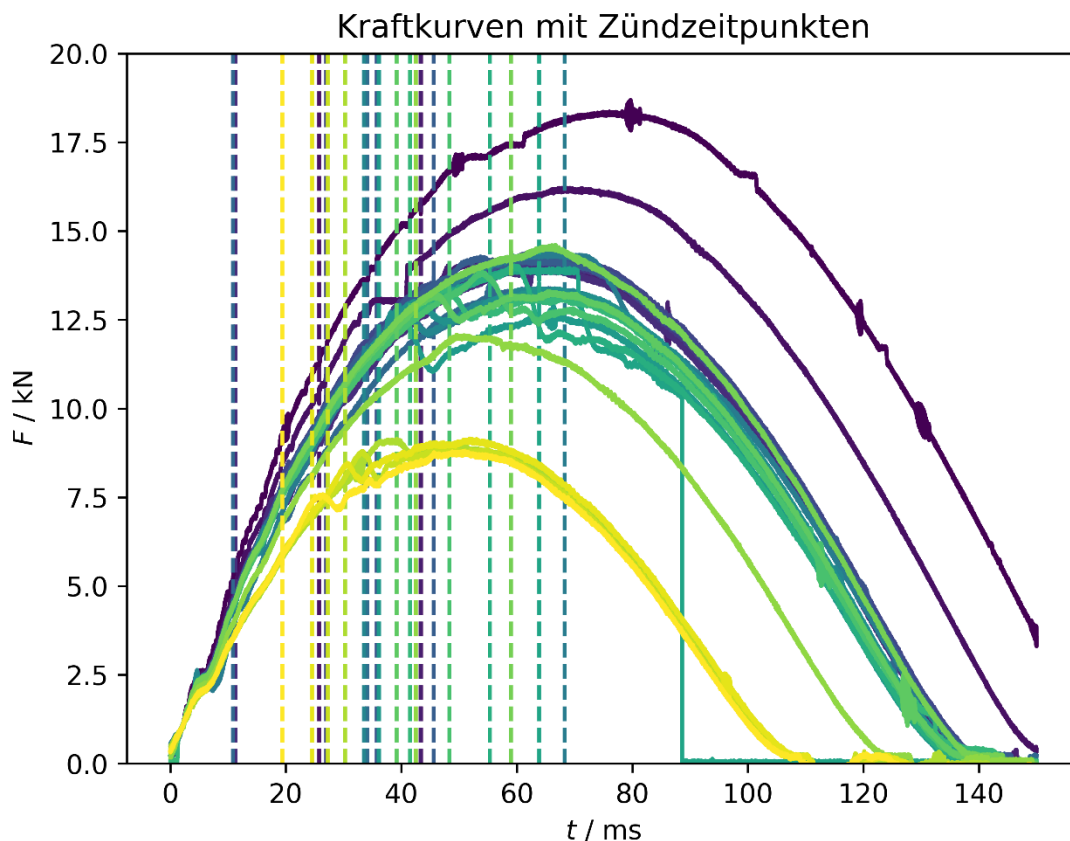


Abbildung 11: Kraftverläufe und zugeordnete Zündzeitpunkte (Strichlinie) der Schweißversuche an Maschine 1

#### 4.1.2 Maschine 2

Maschine 2 arbeitet mit einem Pneumatikzylinder. Als Nachsetzeinheit wird ein Säulenführungsgestell mit austauschbarer Elastomerfeder genutzt (vgl. Abbildung 12). Im Schweißablauf wird zunächst der Pneumatikzylinder mit einem geringen Differenzdruck zwischen den beiden Kammern langsam bis zum Aufsetzen der Elektroden auf die Bauteile verfahren. Durch das Entlüften des Gegendrucks wird die Feder der Nachsetzeinheit gestaucht und die Schweißkraft aufgebaut. Für Schweißversuche im Kraftanstieg muss zunächst ein Signal an die Schweißsteuerung übertragen werden, um die Entladung kraftgesteuert auszulösen. Dazu wird der Federweg der Nachsetzeinheit kontrolliert (Wegmessung vgl. Kapitel 4.2.3). Die

Federkennlinien wurden vorher ermittelt, sodass der Zusammenhang zwischen Federstauchung und Elektrodenkraft bekannt ist (vgl. Abbildung 50). Der Wert der zu erreichenden Kraft kann so in der Steuerung direkt vorgegeben werden. Im Schweißablauf werden die Kondensatoren vor Aufbau der Schweißkraft geladen. Während des Kraftaufbaus wird das Federwegsignal ständig auf Erreichen der Zündschwelle kontrolliert. Somit wird die Zündung zum gewünschten Zeitpunkt ausgelöst. Die auf diesem Weg ausgelöste Zündkraft schwankt um  $\pm 0,2 \text{ kN}$ . Dies entspricht immer einem Wert kleiner 4% der gewählten Zündkräfte.

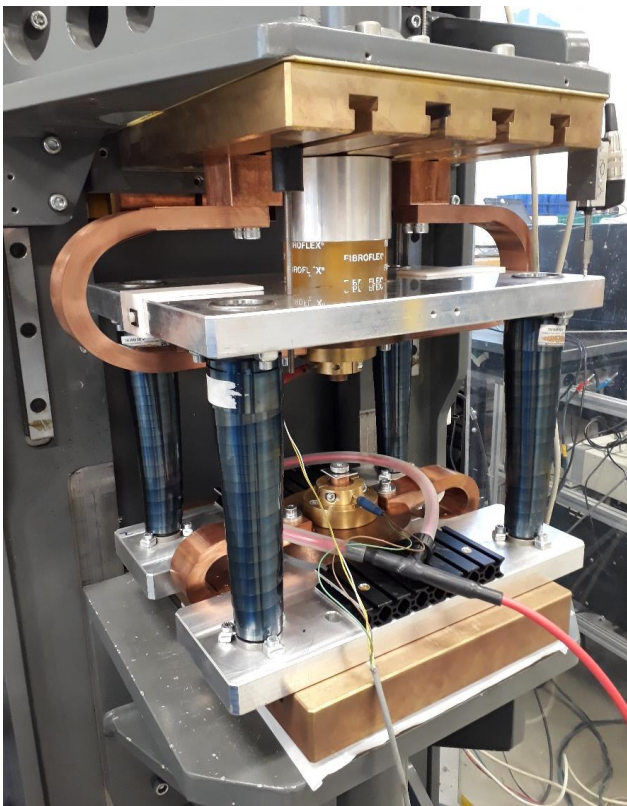


Abbildung 12: Maschine 2 mit Säulenführungsgestell und Elastomerfeder

Durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Federn kann die Geschwindigkeit des Kraftaufbaus variiert werden. Die beiden erreichbaren Kraftanstiegsgeschwindigkeiten betragen 10 und 15 N/ms.

#### 4.1.3 Maschine 3

Maschine 3 ist als Portalanlage ausgeführt (Abbildung 13). In den Arbeitsraum d.h. auf die Polplatten wurde das gleiche Säulenführungsgestell wie bei Maschine 2 eingesetzt (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Zustellung des Schweißkopfes erfolgt über einen Servomotor. Der Kraftaufbau sowie die Funktion des Nachsetzens wird durch einen

Linearmagneten ausgeübt. Zum Schweißbeginn stellt der Servomotor bis zum Aufsetzen der oberen Elektrode auf die Bauteile zu. Dazu ist einmalig ein vorheriges Einmessen notwendig. Zeitgleich wird der Magnetspalt der Nachsetzeinheit eingestellt. Die Wahl des Magnetspaltes erfolgt aufgrund der Erfahrungen des Herstellers.

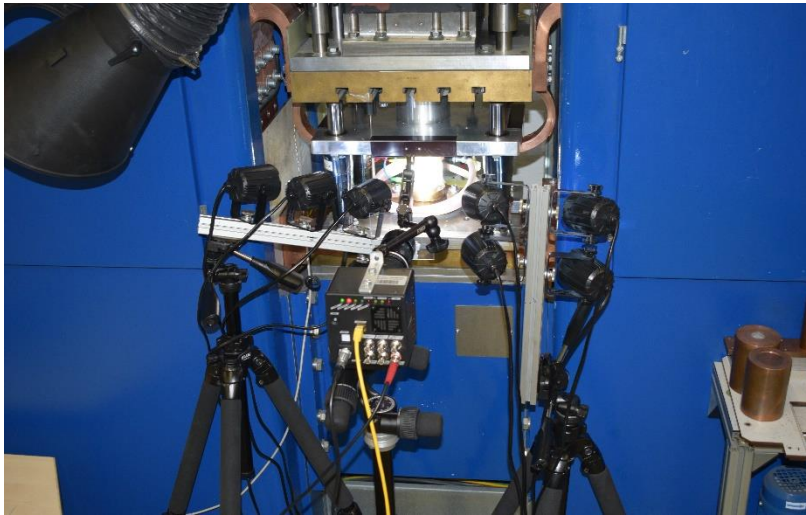


Abbildung 13: Maschine 3 mit eingebauter Säulenführung und aufgebauter Hochgeschwindigkeitsmessung

Die Steuerung von Maschine 3 ermöglicht es, sowohl die Kraftanstiegsgeschwindigkeit zu regeln, als auch die Zündkraft zu steuern. Als größter Kraftanstieg wurde 100N/ms bestimmt. Größere Werte kann die Regelung zum Untersuchungszeitpunkt nicht realisieren. Bei der Auswertung der Versuche zeigt sich, dass der gemessene Kraftanstieg bei gleichen Einstellungen Abweichungen unterliegt (vgl. Abbildungen 54 bis 60). Für die Auswertung der Kraftanstiegsgeschwindigkeit wird die Differenz der Kraft zwischen Zündzeitpunkt und einer Millisekunde vor dem Zündzeitpunkt verwendet. Es ist zu erwähnen, dass die Auswertung in einem größeren Zeitbereich zu deutlich anderen Werten führt. Allerdings wird angenommen, dass für die sehr kurze Schweißzeit der tatsächliche Kraftanstieg zum Zündzeitpunkt ausschlaggebend ist. Deshalb wird der kürzere Zeitbereich für die Auswertung benutzt.

#### 4.1.4 Maschine 4

An Maschine 4 konnten leider keine Versuche im Kraftanstieg durchgeführt werden. Laut Antragsstellung sollten beim PA-Mitglied ebenfalls eine Maschine mit magnetischem Linearantrieb zur Verfügung stehen, allerdings wurde in der zwischen dem Antrag und der Bearbeitung verstrichenen Zeit die Entwicklung und der Bau dieser Maschine eingestellt. Stattdessen wurden Schweißversuche ohne Kraftanstieg

durchgeführt. Die Maschine verfügt über einen Elektroservomotor. Als Nachsetzeinheit ist ein Balgzylinder verbaut. Die Nachsetzeinheit einschließlich der Steuerung befindet sich im Prototypstatus.

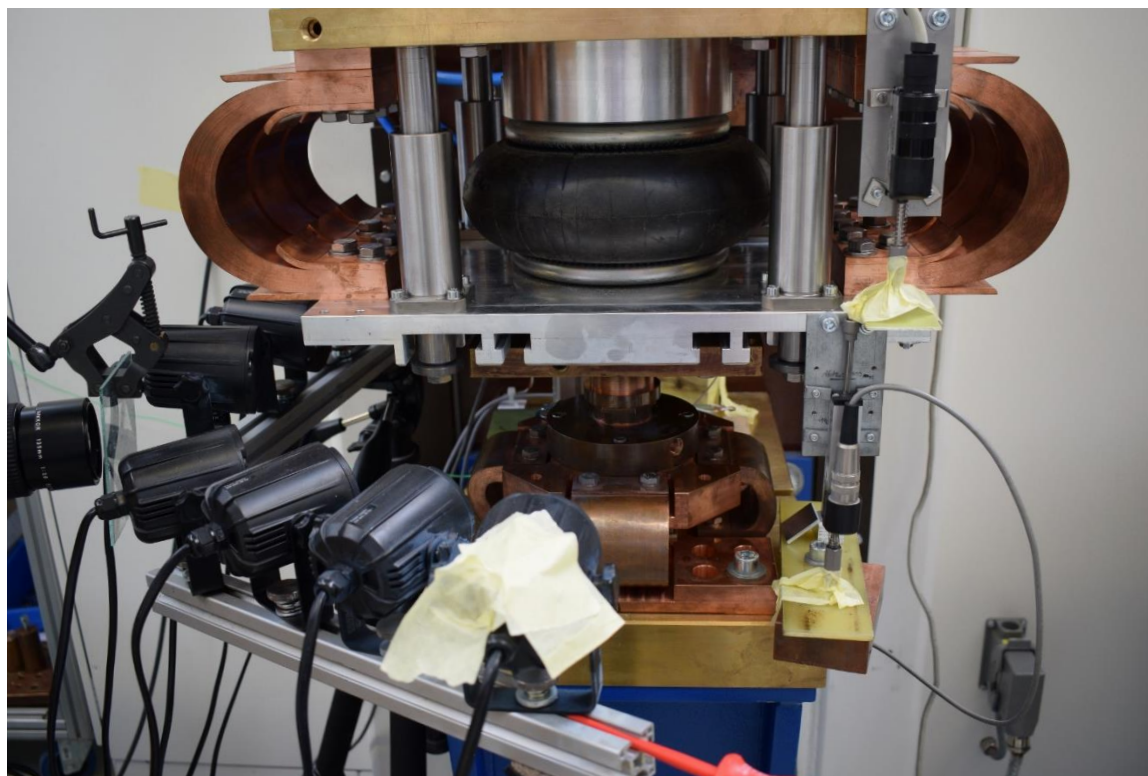


Abbildung 14: Maschine 4 mit aufgebauter Hochgeschwindigkeitsmessung

## 4.2 Messtechnik zur Datenerfassung beim KE-Schweißen

Parameterverläufe werden mit dem 8-kanaligen Messsystem Dewe-50-USB2-8 synchron aufgezeichnet. Damit ist eine Abtastung von bis zu 200 kHz 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  $\pm 0,5\text{mV}$  bis  $\pm 10\text{V}$  und Messkarten mit einem Messbereich von  $\pm 20\text{V}$  und  $\pm 1400\text{V}$ .

### 4.2.1 Strommessung

Die verwendeten KE-Maschinen erreichen bis zu 200 kA Spitzenstromstärke. Für die Messung der Stromstärken werden Rogowskimessspulen (Rogowskigürtel) mit nachgestelltem Integrator genutzt [41]. 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.

#### 4.2.2 Spannungsmessung

Mit dem 8-kanaligen Analog-Digital-Wandler können Spannungen direkt gemessen werden. Während des Prozesses werden die sekundäre Transformatorspannung und 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 [42]. Mit der in [43, 44] entwickelten Methode ist es möglich, den systematischen Messfehler analytisch zu bestimmen und das Spannungssignal zu korrigieren.

#### 4.2.3 Wegmessung

Zur Wegmessung werden potentiometrische Wegaufnehmer eingesetzt. Die Eignung wurde in [1] 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 25mm genutzt. Bei einem Messbereich von  $\pm 10V$  ergibt sich eine theoretische Auflösung von 3,3nm. Bei den für die Nachsetzeinheit verwendeten Sensor mit dem Messbereich 50mm beträgt



---

die theoretische Auflösung 6,6 nm. Kalibriert werden die Wegaufnehmer mit Endmaßen.

#### 4.2.4 Kraftmessung

Für die Kraftmessung werden die in die 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. Vor den Schweißversuchen wurden die Kalibrierkurven verifiziert. Bei Maschine 1 war dies nicht möglich, weshalb auf die Kalibrierkurve des Herstellers ohne Verifizierung zurückgegriffen wurde. Bei Maschine 1 war die Kraftmessung herstellerseitig auf der bewegten Seite zwischen Pleuel und Federpaket eingebaut, sodass die Elektrodenkraft nicht direkt gemessen wird. Bei Maschine 2 wurde die Kraftmessung auf der ruhenden Seite unter der Polplatte verbaut. Dies kann zu einer erhöhten Schwingung führen [1]. Bei Maschine 3 ist der Kraftsensor auf der bewegten Seite zwischen Polplatte und Nachsetzeinheit eingebaut. Bei Maschine 4 wurde der Sensor direkt unter die untere Elektrode eingebaut. Diese Messung ist am nächsten an der Fügezone.

## 5 Versuchswerkstoffe

Die Auswahl der Versuchsmaterialien wurden in Absprache mit dem PA nach Einsatzgebieten der Legierungen im Automobilbau gewählt (vgl. A.1.1). Als Material für potentielle Fügeelemente wurde EN-AW-6082 gewählt. Fügeelemente werden meist im Kaltfließpressverfahren hergestellt. Für eine Variation der Buckelgeometrien bei geringen Stückzahlen ist eine spanende Fertigung jedoch besser geeignet. Deshalb werden als Versuchsbauteile gedrehte Ringbuckelbauteile verwendet. An diesen werden allgemein nutzbarer Empfehlungen zur Buckelgeometrie erarbeitet. Als Blechmaterial bei diesen Versuchen wurde EN-AW-5083 verwendet.

Geprägte Buckel für Blech-Blechverbindungen wurde mit dem Werkstoff EN-AW-6016 für beide Fügepartner untersucht.

Als weiteres Anwendungspotential wird eine Blech-Profil-Verbindung untersucht. Als Profilwerkstoff wird die zum Strangpressen geeignete Legierung EN-AW-6060 genutzt. Als Gegenstück wird Blech aus EN-AW-7075 gewählt.

## 6 Erarbeitung allgemein nutzbarer Empfehlungen zur Buckelgeometrie

Die Buckelgeometrie bestimmt maßgebend die tatsächliche Kontaktfläche der Fügezone und somit den Kontaktwiderstand zu Beginn des Schweißens sowie die Stromdichteverteilung in der Fügezone und im Buckel während des Stromflusses. Während des Kraftaufbaus wird der Buckel plastisch umgeformt. Die (auf den Buckel bezogen) axiale Bewegung der Elektroden bewirkt eine Umformung des Buckels in der Fügeebene in radialer Richtung, was zur Vergrößerung der Oberfläche und somit zur Ausbildung der scheinbaren und wirksamen Kontaktfläche führt. Beim Schweißen stellt sich keine konstante Stromdichteverteilung in der Fügeebene und im Buckel ein. Die örtliche Stromdichte ist wesentlich abhängig von der Buckelgeometrie, wobei die nach der plastischen Verformung vorliegende Geometrie entscheidend ist und nicht die ursprüngliche Buckelgeometrie. An Stellen von Änderungen des Stroms führenden Querschnitts tritt eine örtliche Erhöhung der Stromdichte auf. Das führt zur Metallverdampfung in der Fügeebene und zur lokalen Erwärmung und Entfestigung im Buckel. Durch die Buckelgeometrie können diese beiden Vorgänge gezielt beeinflusst werden. [1]

Im Regelwerk [10] sind zur Buckelgeometrie nur allgemeine Angaben zu finden:

- Hohllangbuckel sind schlecht geeignet, es wird empfohlen, Buckel in beide Bleche einzubringen, die um 90° versetzt angeordnet sind und sich kreuzen,
- Ringbuckel sind bis zu einer Blechstärke von 2,5 mm besser geeignet als Rundbuckel,
- Rundbuckel sind für dickere Bleche besser geeignet als für dünnere, bei Stahl gebräuchliche Rundbuckel haben sich nicht bewährt,
- Massivbuckel sind gebräuchlich beim Schweißen von massiven Teilen aus Knet- und Gusswerkstoffen.

In den 80er Jahren wurden Arbeiten zum Buckelschweißen von Aluminium veröffentlicht [45–47]. Es wurde festgestellt, dass das Buckelschweißen von Aluminium möglich ist, gutes Nachsetzverhalten der Elektroden vorausgesetzt. Dünne Bleche sind nur bedingt schweißbar, der vom Stahl bekannte Ringbuckel ist den Lang- und Rundbuckeln überlegen, bei Massivbuckeln ist die Elektrodenstandzeit höher als bei geprägten Buckeln, die Schweißparameter sind nur innerhalb sehr enger Grenzen

wählbar. Die Untersuchungen wurden mit Einphasen-Wechselstrom- und Dreiphasengleichrichter-Schweißmaschinen durchgeführt. Das KE-Schweißen, das durch viel kürzere Schweißzeiten und höhere Stromstärken gekennzeichnet ist, wurde nicht betrachtet.

## 6.1 Massivbuckel

Die Erarbeitung einer geeigneten Geometrie wird am o.g. Ringbuckel vorgenommen. Es werden zwei Schritte durchgeführt: 1. Untersuchung der Buckelwinkel, 2. Untersuchung der Buckelringbreite. Die Höhe des Buckels wird in diesem Projekt nicht untersucht und deshalb konstant gehalten. In Abbildung 15 ist die verwendete Buckelgeometrie und in Tabelle 2 die dazugehörigen Werte dargestellt.

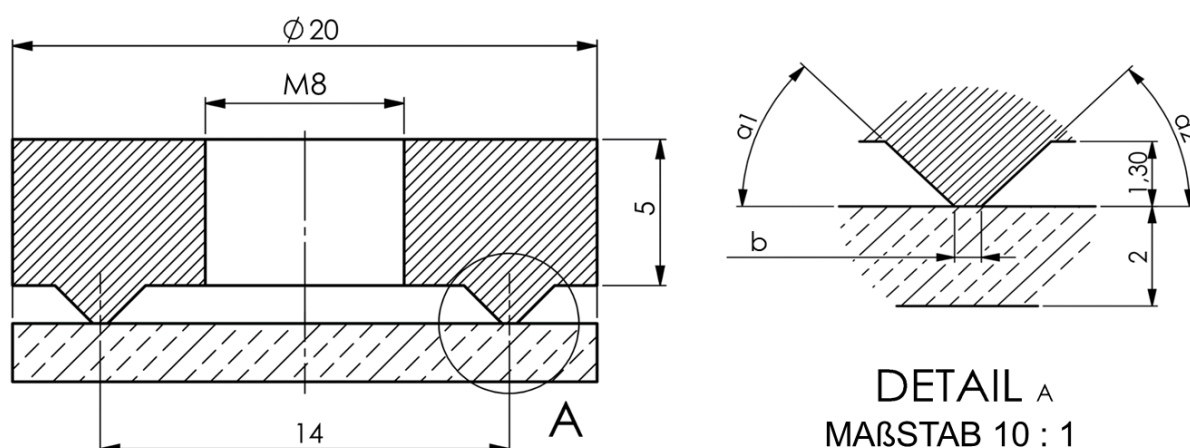


Abbildung 15: Verwendeter Ringbuckel mit veränderlichen Geometriebedingungen  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  und  $b$

Tabelle 2: Untersuchungsschritte der Buckelgeometrie mit untersuchten Werten

	$\alpha_1 / ^\circ$ Innenwinkel	$\alpha_2 / ^\circ$ Außenwinkel	$b / \text{mm}$ Buckelringbreite
Schritt 1	30	30	0,5
	30	90	0,5
	45	45	0,5
	60	60	0,5
	60	90	0,5
	90	90	0,5
Schritt 2	30	30	0,5
	30	30	0,75
	30	30	1

### 6.1.1 Numerische Untersuchungen

Durch numerische Simulationen können Druckspannungs- und Stromdichteverteilungen in der Fügezone berechnet werden. Für eine mechanische Analyse sind die Werkstoffkennwerte aus Tabelle 3 und die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus Abbildung 16 notwendig. Diese Daten wurden durch die proprietäre Software *JMat-Pro* berechnet. Zu erkennen sind geringe Unterschiede zwischen den 5000er und den 6000er Aluminiumlegierungen.

Tabelle 3: Werkstoffeigenschaften bei Raumtemperatur

	EN-AW-5083	EN-AW-6082
E-Modul in <i>GPa</i>	71,27	69,36
Dichte in <i>g/cm<sup>3</sup></i>	2,6553	2,7156
Querkontraktionszahl	0,329	0,336
Auslagerungszustand	T6	T6

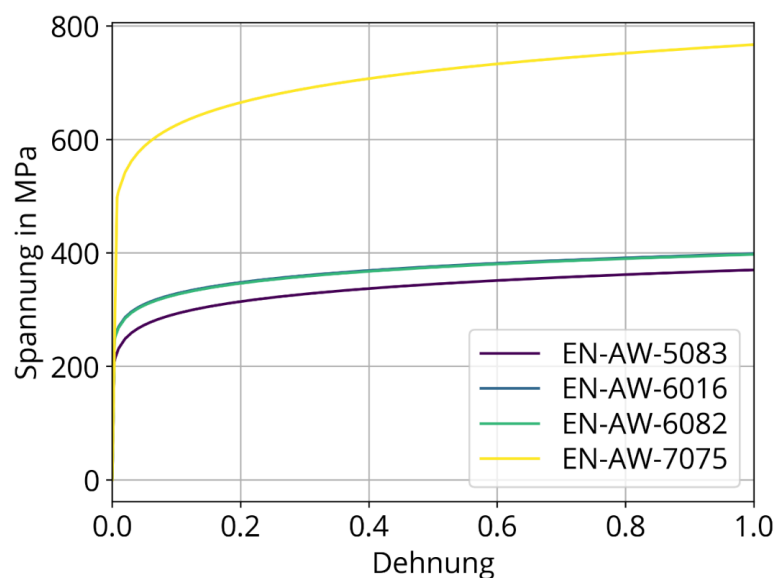


Abbildung 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm ausgewählter Aluminiumlegierungen

Für die Untersuchungen variiert der Innenwinkel  $\alpha_1$ , der Außenwinkel  $\alpha_2$ , die Buckelringbreite  $b$  und die Elektrodenkraft  $F$  nach Tabelle 4. Es entstehen symmetrische

(bspw. 45°-45°) und asymmetrische (bspw. 30°-90°) Ringbuckel. Die Elektrodenkraft  $F$  variiert von 2,5kN bis 15,0kN. Für die experimentelle Validierung wird jeder Versuch drei Mal wiederholt.

Tabelle 4: Versuchsplan für numerische Untersuchung und experimentelle Validierung

Kraft $F$ / N	2.500 N	5.000 N	10.000 N	15.000 N	
Winkel $\alpha_1$ / ° - $\alpha_2$ / °	30-30	30-90	45-45	60-60	60-90
Buckelringbreite $b$ / mm	0,5	0,75	1,0		

Das Simulationsmodell ist mit Finiten Elementen in der proprietäre Software Ansys Mechanical APDL 18.2 modelliert. Abbildung 17 stellt den Aufbau des 2D axialsymmetrischen FE-Modells dar. Zwischen den Elektroden (C20-Kappen nach [48]) befindet sich der Ringbuckel und das Blech. Die Krafteinleitung entsteht an der Oberseite der Elektrode. Die Kraft  $F$  wird als Druck  $p$  in Abhängigkeit der Elektrodengeometrie angegeben (siehe Gleichung 1). Der Radius  $r_1$  entspricht dem Außenradius (= 10 mm) und  $r_2$  dem Innenradius (= 7,5 mm) der Schweißelektrodenkappe [48].

$$p = \frac{F}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} \quad \text{Gleichung 1}$$

Zwischen Elektrode und Ringbuckel, Ringbuckel und Blech sowie Blech und Elektrode wird jeweils eine Kontaktzone definiert, die das Verhalten der Kontaktfläche (keine Verbindung zwischen Buckel und Blech; Verschiebung möglich) definiert (siehe Abbildung 17). Um das Modell statisch zu bestimmen, wird die Verschiebung  $s$  in  $y$ -Richtung an der Unterseite der Unterelektrode gesperrt (Verhalten eines Loslagers). Mit Gleichung 2 wird die Bewegungsgleichung der transienten Strukturdynamik beschrieben, wo  $M$  die Masse-,  $D$  die Dämpfungs- und  $K$  die Steifigkeitsmatrix ist. Der Verschiebungsvektor  $x$  stellt in seiner 1. Ableitung  $\dot{x}$  die Geschwindigkeit und in seiner 2. Ableitung  $\ddot{x}$  die Beschleunigung dar. Eine transiente Strukturanalyse bestimmt das dynamische Verhalten unter der Wirkung von zeitabhängigen Lasten ( $L(t)$ ).

$$L(t) = M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) + Kx(t) \quad \text{Gleichung 2}$$

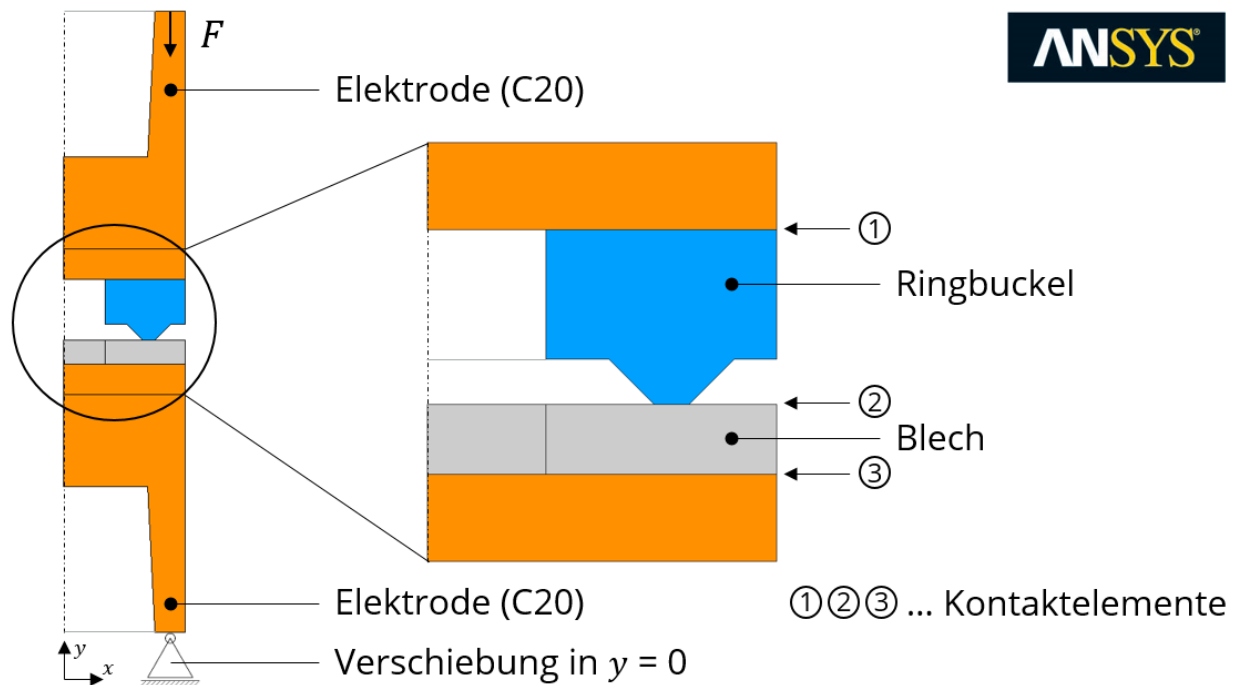


Abbildung 17: Aufbau des FE-Modells

Abbildung 18 zeigt beispielhaft die Verteilung der Von-Mises-Spannung für einen Buckelwinkel 45-45, einer Buckelringbreite von 0,5mm und einer Elektrodenkraft von 15kN. Zu erkennen ist eine symmetrische Verteilung der Von-Mises-Spannung im Kontaktbereich. Im inneren und äußeren Bereich der Kontaktfläche kommt es zur Erhöhung der Von-Mises-Spannung. Dies deutet auf einen höheren Kontaktdruck in diesen Bereichen der Fügezone hin.

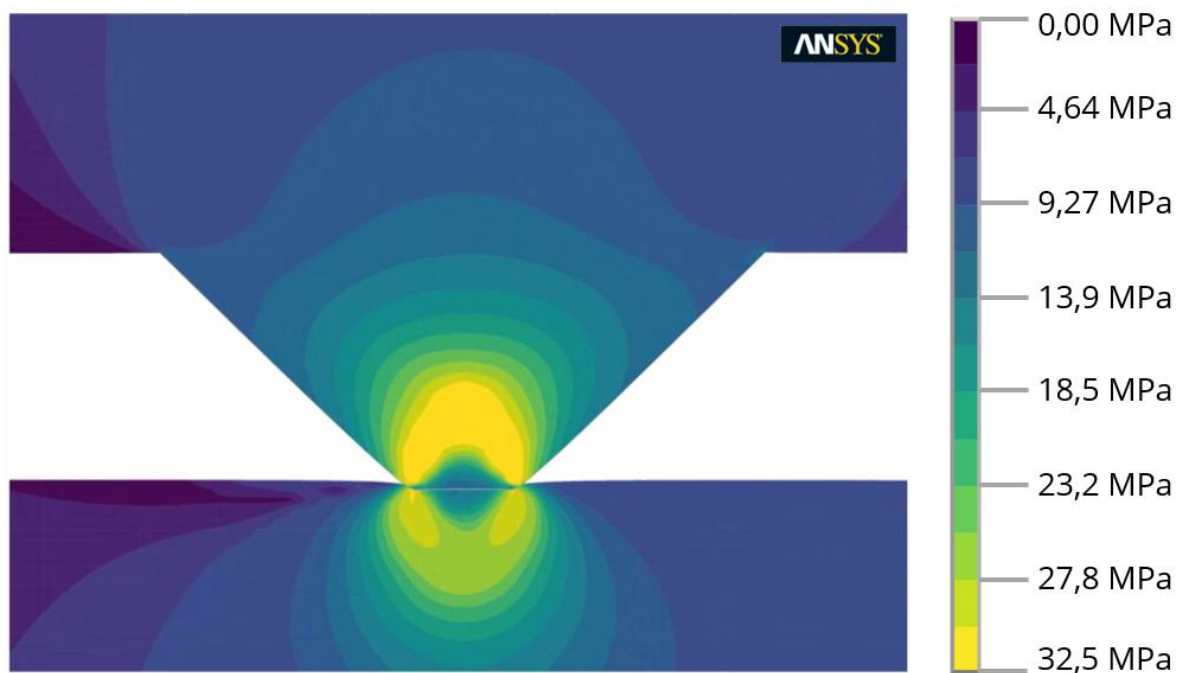
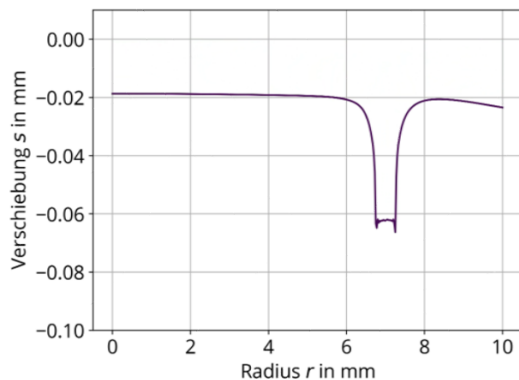


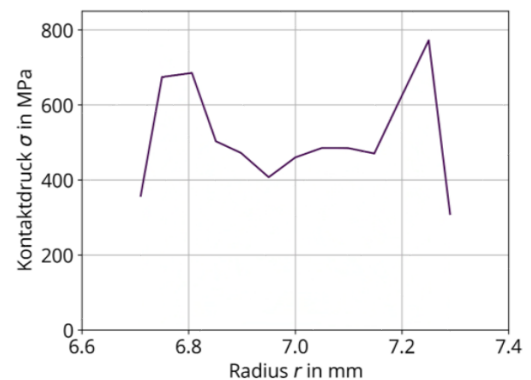
Abbildung 18: Von-Mises-Spannung der numerischen Simulation

In Abbildung 19a wird die Verschiebung  $s$  der Elemente nach dem Aufbringen der Elektrodenkraft dargestellt. Es stellt somit die plastische Verformung des Buckels in das Blech dar. Diese Verschiebung wird anschließend mit den experimentellen Eindrücken verglichen. In Abbildung 19b ist der Kontaktdruck  $\sigma$  über den Radius dargestellt. Zu erkennen sind die inneren und äußeren Erhöhungen des Kontaktdrucks  $\sigma$  innerhalb der Kontaktfläche. Die lokale Erhöhung des Kontaktdrucks führt zum Herabsenken des Kontaktwiderstandes. Dies hat zur Folge, dass eine Kontakterwärmung in diesen Bereichen beginnt.





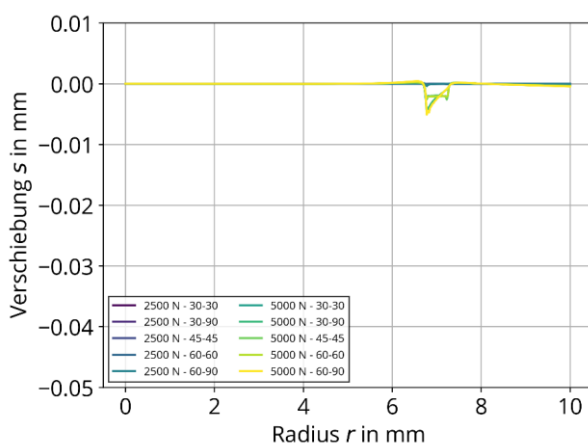
(a) Verschiebung  $s$



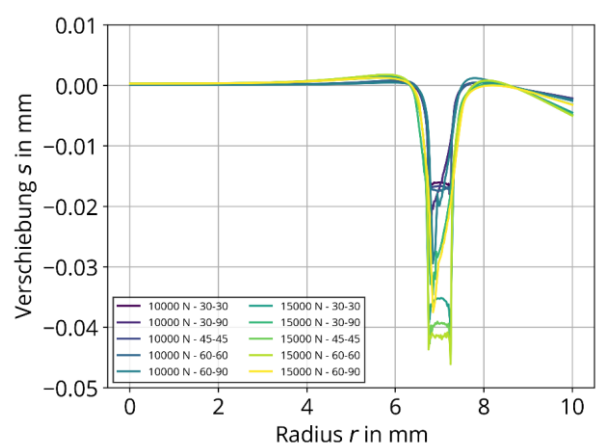
(b) Kontaktdruck  $\sigma$

Abbildung 19: Verschiebung des Buckels und Kontaktdruck im Kontaktbereich (15kN, 45°-45°)

Zusammenfassend sind in Abbildung 20 die Verschiebung  $s$  aller Versuche dargestellt. In der FE-Simulation führen die starken Deformationen des Buckelwinkels 90-90 zu einer starken Verzerrung des Netzes, womit keine Konvergenz erreicht wird und kein Vergleich stattfindet. Zu erkennen sind bei symmetrischen Buckelwinkel gleichmäßige Buckeleindrücke und bei unsymmetrischen sind ungleichmäßige erkennen. Dies führt zu einer beginnenden Kontakterwärmung im Bereich des größten Eindrucks (Innenseite des Buckels). Es ist vorstellbar, dass somit eine Beeinflussung der Spritzerneigung möglich ist.



(a) Verschiebung  $s$  (2,5kN bis 5,0kN)



(b) Verschiebung  $s$  (10kN bis 15kN)

Abbildung 20: Numerische Verschiebung aller Versuche

In Abbildung 21 ist der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Buckeleindrucks und des Übergangswiderstands  $R_t$  dargestellt. Untersucht wird ein Ringbuckel, der auf ein Blech gedrückt wird. Die Materialien werden vorab in einem Ultraschallbad mit Aceton gereinigt. Das Messsystem erfasst bis zu acht Kanäle synchron mit einer Samplerate von 200kHz pro Kanal. Bei diesem Versuchsaufbau werden folgende Kenngrößen gemessen:

- Elektrodenkraft  $F$
- Elektrodenverschiebung  $s$
- Messstrom  $I$  für Gesamtwiderstand  $R_{ges}$  / Systemwiderstand  $R_s$
- Spannungsabfall  $U$  zwischen den Elektroden

In Abbildung 22 ist eine Beispielmessung des Versuchsaufbaus. Die gemessene Elektrodenkraft  $F$  dient als Eingangsgröße für das FE-Modell.

Mit Aufbringen der Elektrodenkraft  $F$  entsteht ein Buckeleindruck im Blech, der mit einer chromatisch-konfokalen Abstandsmessung gemessen wird. Die Höhenauflösung des Konfokalmikroskops beträgt  $3\mu\text{m}$ . Der Buckeleindruck stellt eine plastische Verformung dar, die auch in einer FE-Simulation berechnet und verglichen werden kann.

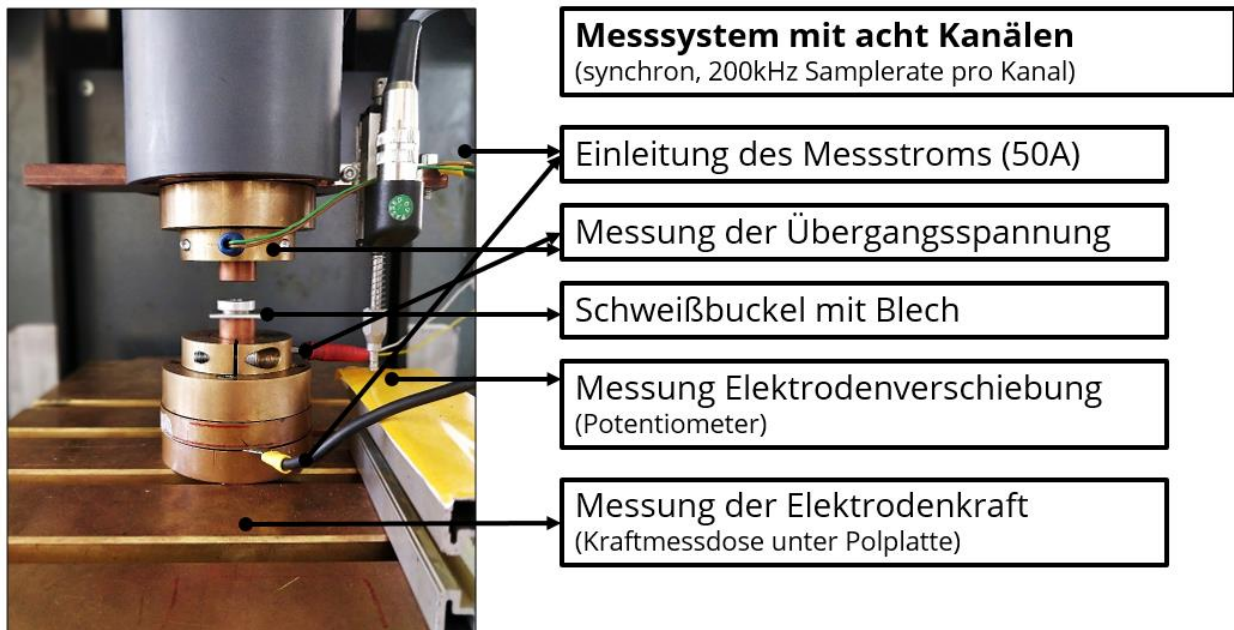


Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Messung des Übergangswiderstandes

Die Ermittlung des Übergangswiderstandes  $R_t$  dient zur experimentellen Untersuchung unterschiedlicher Buckelgeometrien. Die Durchführung erfolgte nach [20] mit einstellendem Messstrom einer Gleichstromquelle von min. 10 A, aber max. 100 A. Mit einem Messstrom von 50 A konnte die Messauflösung im Vergleich zu 10 A erhöht werden, ohne eine signifikante Erwärmung festzustellen. Zur Bestimmung des Übergangswiderstandes  $R_t$  wird der Systemwiderstand  $R_s$  (ohne Bauteil, mit Referenzblech nach [49]) jeder Kombination erfasst und anschließend vom Gesamtwiderstand subtrahiert (Mittelwert über 20 s).

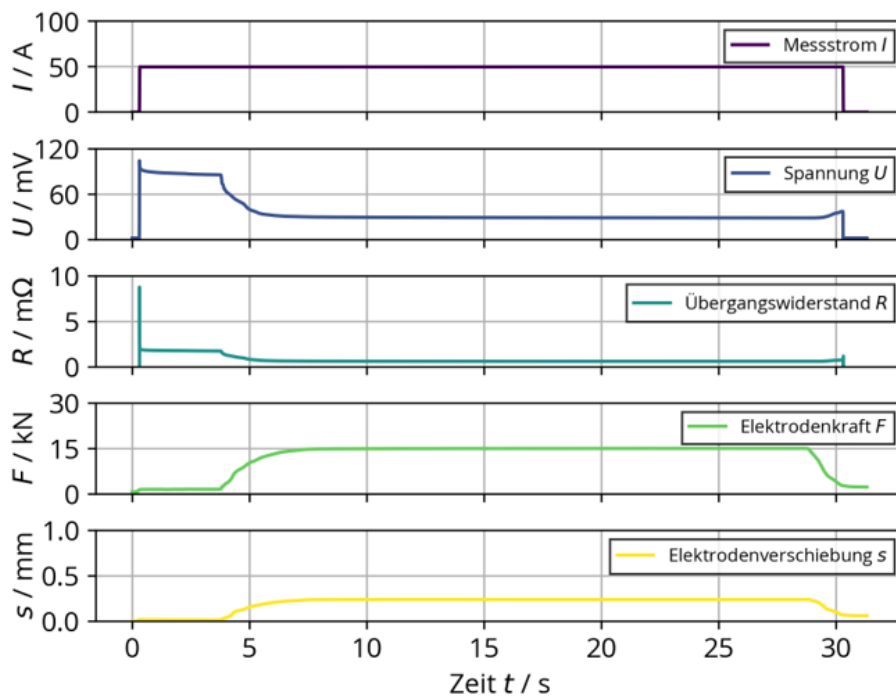


Abbildung 22: Beispielmessung zur Ermittlung des Übergangswiderstandes

Mit zunehmender Kraft  $F$  werden geringere Übergangswiderstände  $R_t$  erwartet, da eine größere Kontaktfläche entsteht und der Engwiderstand  $R_E$  geringer wird, da sich die scheinbare und damit auch die wirksame Berührungsfläche vergrößern. In Abbildung 23 sind die gemittelten Übergangswiderstände  $R_t$  unterschiedlicher Buckelwinkel bei variierenden Kraftstufen dargestellt. Es ist folgende Charakteristik zu erkennen:

1. Mit zunehmender Schweißkraft  $F$  sinkt der Übergangswiderstand  $R_t$
2. Mit zunehmender Schweißkraft  $F$  sinkt die Streuung des Übergangswiderstands  $R_t$ .
3. Ein Einfluss des Buckelwinkels  $\alpha_1 - \alpha_2$  ist nicht erkennbar.

Ein Einfluss des Buckelwinkels  $\alpha_1 - \alpha_2$  ist nicht erkennbar. Bei Betrachtung der ersten Aussage ist festzustellen, dass für die Kombinationen 30-30, 60-60 und 90-90 ein abweichendes Verhalten festzustellen ist. Als Ursache wird die geringe Anzahl der Versuche angenommen. Die Streubereiche überschneiden sich. Es ist davon auszugehen, dass bei einer höheren Versuchsanzahl die genannte Charakteristik eintritt. Für die Kombination 90-90 gilt dies nicht. Aufgrund der Buckelgeometrie kommt es zu großen, nicht reproduzierbaren Deformationen. Da bei geringeren Kraftstufen

(2,5 kN und 5,0 kN) hohe Streuungen auftreten, werden für die Simulation die Ergebnisse der hohen Kraftstufen (10,0 kN und 15,0 kN) herangezogen.

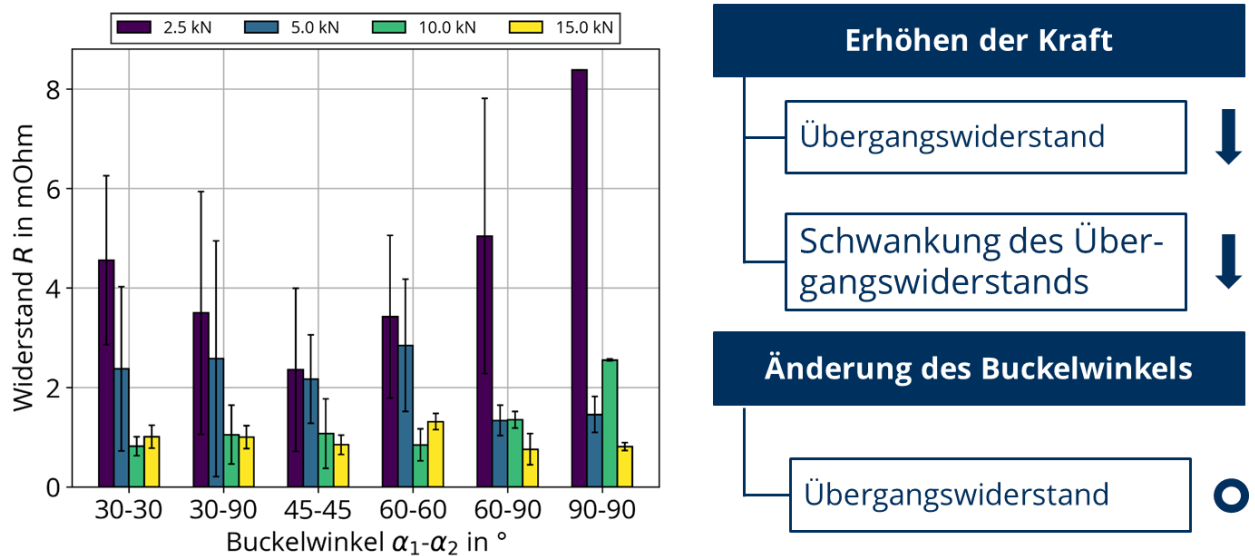


Abbildung 23: Übergangswiderstand in Abhängigkeit der Kraft und des Buckelwinkels

Um den Einfluss des Buckelwinkels mit der FE-Simulation zu untersuchen, muss diese durch die plastische Verformung des Bleches validiert werden. Der Buckeleindruck aus den Versuchen des Übergangswiderstandes  $R_t$  wird mit einem chromatisch-konfokalen-Mikroskop ausgewertet (Messdauer: 20 Minuten pro Teil; Messdaten: 250,000). In Abbildung 24 ist eine Beispielmessung ersichtlich. Der Buckeleindruck ist über den Umfang nicht konstant. Ursache ist die Bauweise der KE-Maschine. Durch das C-Gestell entstehen Aufbiegungen, die Auswirkungen auf den Buckeleindruck haben. Um den Buckeleindruck zu ermitteln, wird der Höhenunterschied  $\Delta h$  von vier Profilschnitten ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $135^\circ$ ) berechnet.

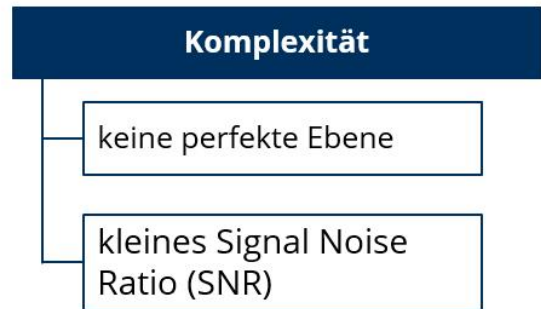
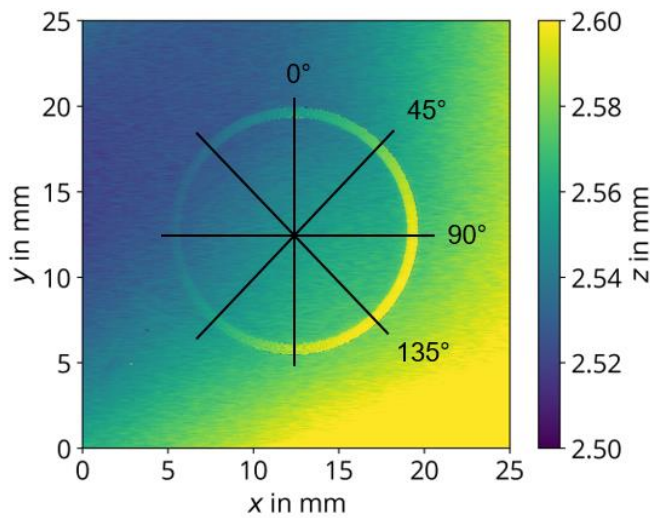


Abbildung 24: Beispiel einer Konfokalmessung des Buckeleindrucks

Ein Profilschnitt aus Abbildung 24 ist in Abbildung 25 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Buckeleindruck  $s$  zur Ebene ausgerichtet werden muss, um den maximalen Buckeleindruck  $s$  auszuwerten. Die Ebene wird an drei Punkten ausgerichtet unter Anwendung des Strahlensatzes.

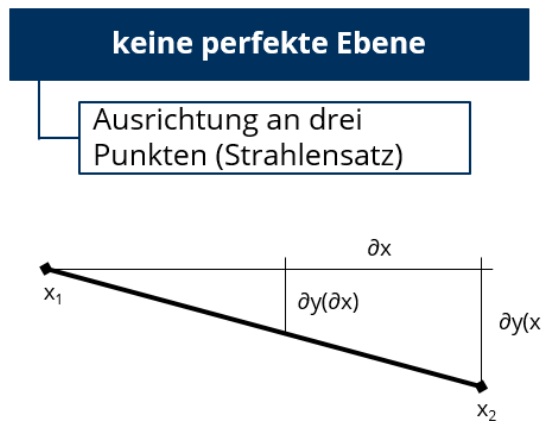
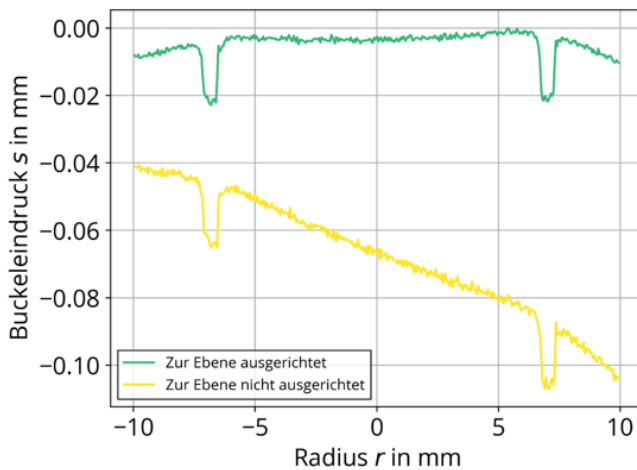


Abbildung 25: Ausrichtung des Buckeleindrucks

Der Höhenunterschied  $\Delta h$  der FE-Simulation wird zum Zeitpunkt  $t$  ( $F = 0\text{ N}$ ) (Endzeitpunkt des FE-Modells, nach Entlastung) ermittelt, um die plastische Verformung darzustellen. In Abbildung 26 sind die Buckeleindrücke  $s$  und die Höhenunterschiede  $\Delta h$  der FE-Simulation gegenübergestellt.

Hier ist festzustellen, dass:

- der Höhenunterschied  $\Delta h$  mit steigender Schweißkraft  $F$  zunimmt,
- die tatsächlichen Eindrücke im Blech unabhängig vom Buckelwinkel sind,
- die simulierten Eindrücke im Blech abhängig vom Buckelwinkels sind und
- die FE-Simulation um ca. das Zweifache abweicht.

Eine Abhängigkeit des Buckelwinkels ist nur in der Simulation ersichtlich. Dort ist ein Unterschied zwischen symmetrischen und asymmetrischen Buckelgeometrien festzustellen. Durch die höhere radiale Verformung bei asymmetrischen Buckelgeometrien entsteht eine größere Kontaktfläche. Dadurch wird der Druck  $p$  in der Kontaktfläche reduziert. Dies führt zu einem geringeren Buckeleindruck. Bei den symmetrischen Buckeln wird ein höherer Buckeleindruck bei steileren Winkeln (60-60) erzeugt. Die projizierte Fläche des eingedrückten Buckelanteils ist bei gleichem Einsinken des Buckels in das Blech bei steilerem Winkel kleiner. Dadurch ist der Druck  $p$  in der Kontaktfläche größer. Dies führt zu einem höheren Buckeleindruck. Dieser Effekt ist ebenfalls bei asymmetrischen Buckelgeometrien zu erkennen.

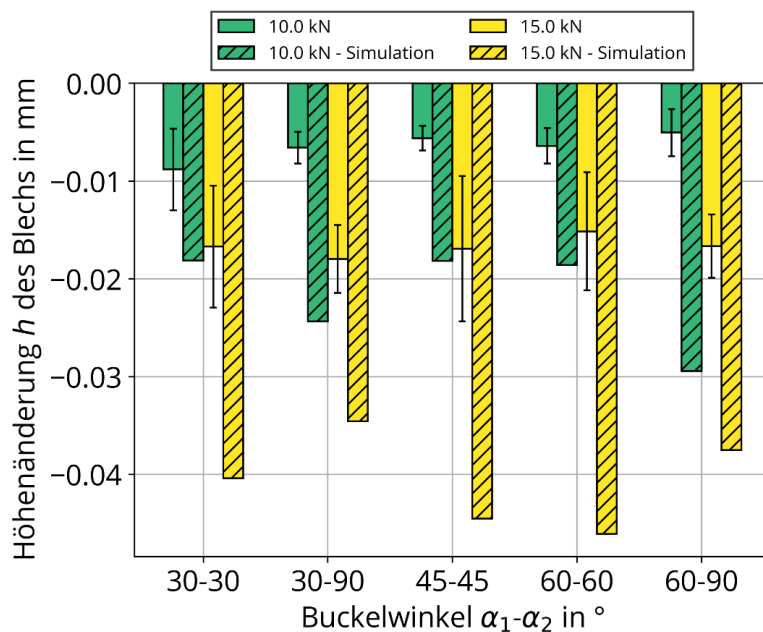


Abbildung 26: Höhenunterschied des Buckeleindrucks für variierende Buckelwinkel (Simulation und Experiment)

Mit einem flachen, symmetrischen Buckel (30-30) werden die geringsten Verformungen in Buckel und Blech erzeugt. Dies konnte bei Schweißversuchen (vgl. Abschnitt

6.1.2) bestätigt werden. Deshalb werden für weitere Versuche der symmetrische Buckelwinkel 30-30 verwendet.

In einer weiteren Versuchsreihe wird die Buckelringbreite  $b$  untersucht (siehe Tabelle 1). Der Buckelwinkel  $\alpha_1 - \alpha_2$  ist konstant (30-30). In Abbildung 1 Abbildung 27 ist der Übergangswiderstand  $R_t$  in Abhängigkeit der Schweißkraft  $F$  und der Ringbuckelbreite  $b$  abgebildet. Es ist eine ähnliche Charakteristik wie bei den variierenden Buckelwinkel  $\alpha_1 - \alpha_2$  zu erkennen:

1. Mit zunehmender Schweißkraft  $F$  sinkt der Übergangswiderstand  $R_t$ .
2. Mit zunehmender Schweißkraft  $F$  sinkt die Streuung des Übergangswiderstand  $R_t$ .
3. Ein Einfluss der Buckelringbreite  $b$  ist aufgrund der Streuung nicht zu erkennen.

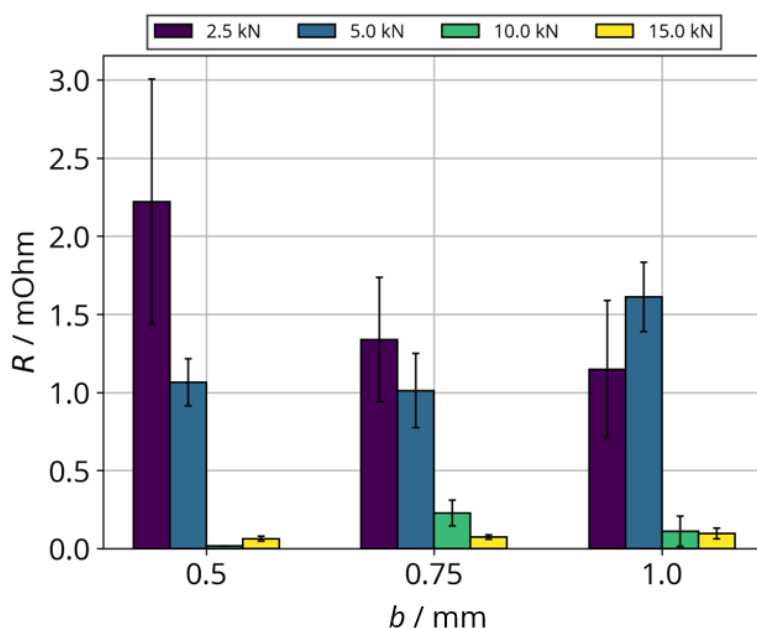


Abbildung 27: Übergangswiderstand mit variierender Buckelringbreite

Auffällig hierbei ist die Buckelringbreite mit  $b = 0,5\text{mm}$ . Diese Geometrie entspricht exakt dem Versuch mit dem Buckelwinkel  $\alpha_1 - \alpha_2 = 30 - 30$  aus Abbildung 23. Die Übergangswiderstände  $R_t$  sind für die unterschiedlichen Kraftstufen deutlich reduziert. Der Versuchsaufbau ist unverändert, die Materialcharge und der zeitliche Ablauf des Experiments sind gleich. Die Ringbuckel wurden allerdings mit unterschiedlichen Herstellungsparameter (CNC-Einstellung, Werkzeug) hergestellt.



Abbildung 28 befinden sich die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchen der Höhenunterschiede für das Experiment und die FE-Simulation. Im Gegensatz zu den variierenden Buckelwinkeln ist hier auffällig, dass:

- die FE-Simulation eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment zeigt und
- der Buckeleindruck von der Buckelringbreite  $b$  abhängt.

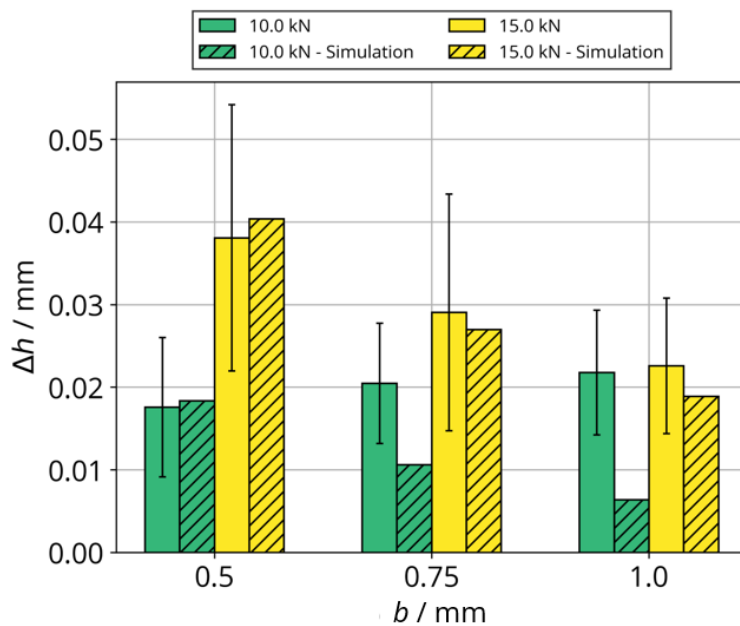


Abbildung 28: Höhenunterschied des Buckeleindrucks für variierende Buckelwinkel (Experiment und Simulation)

Eine große Buckelringbreite minimiert die Buckelverformung. Erste Schweißversuche zeigen, dass dann die Aktivierung der Kontaktflächen bei größeren Buckelringbreite nicht ausreichend stattfindet. Eine Empfehlung der Buckelringbreite  $b$  kann daher nur im Zusammenhang mit der Schweißaufgabe getroffen werden (vgl. Abschnitt 6.1.2).

Die FE-Simulation zeigt, dass aufgrund der kleineren radialen Verformung bei symmetrischen Buckeln eine geringere Kontaktfläche entsteht. Der Druck  $p$  in der Fügezone und somit der Eindruck des Buckels steigt. Innerhalb der symmetrischen Buckel ist bei steileren Winkeln zu erkennen, dass der Buckeleindruck steigt. Das Forschungsprojekt IGF-Nr. 18.987 [1] arbeitete heraus, dass bei hohen Verformungen im Blech keine zufriedenstellende Schweißverbindung erzeugt werden kann. Des Weiteren ist festzustellen, dass mit zunehmender Kontaktfläche der Einsinkweg des

Buckels sinkt. Eine Empfehlung einer geringeren Verformung (analog zur ersten Versuchsanordnung) kann in Anbetracht des Schweißverhaltens nicht erfolgen, da die Kontaktsituation stark beeinflusst wird. Es ist davon auszugehen, dass eine ausreichende Aktivierung über die gesamte Kontaktfläche mehr Energie erfordert.

### 6.1.2 Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden an Maschine 1 durchgeführt. Aufgrund der großen Variation des Zündzeitpunktes (vgl. Kap. 4.1.1) konnte die Versuchsdurchführung nicht systematisch erfolgen. Jedoch reichen die erzielten Ergebnisse aus, um die Variation der Buckelwinkel für die Schweißignung zu beurteilen. In den Abbildungen 62, 66, 70, 74 und 78 sind die Änderungen von Kraft und Wegsignal während der Schweißung in Verbindung mit dem Schweißergebnis im Querschliff dargestellt. Die (Schweiß-)kraft zu Beginn der Schweißung ist über den Querschliff angegeben. In Tabelle 5 sind die Erkenntnisse zusammengefasst.

Tabelle 5: Buckelverformung und Buckeleindringung in Blech in Abhängigkeit zum Buckelwinkel

<b>Winkel (vgl. Abbildung 15)</b>	<b>Buckelverformung</b>	<b>Buckeleindringung</b>
30° – 30°	gering	gut
45° – 45°	mäßig	mäßig
60° – 60°	stark	gering
30° – 90°	sehr stark	gering
60° – 90°	sehr stark	gering

Aufgrund der schlagartigen Erweichung von Aluminiumlegierungen während der Erwärmung ist mit einer starken Verformung zu rechnen. Ein spitzer Buckel neigt zusätzlich zu einer hohen Verformung aufgrund der geringen Steifigkeit. Die symmetrische Buckelgeometrie mit den Winkeln 30° – 30° zeigen die geringsten Verformungen und besten Schliffbilder. Der geringere Kraftverlust durch hohe Verformungen ist auch in den Kraftverläufen zu erkennen (vgl. Abbildungen 63, 67, 71, 75 und 79). Deshalb wird dieser symmetrische, stumpfe Buckel empfohlen.

Die Untersuchung der Buckelringbreite des Buckels wurde an Maschine 2 durchgeführt. Die Zündung der Kondensatorentladung erfolgt nach dem Kraftaufbau (statisch, ohne Kraftanstieg). Es wurden Schweißbereichsdiagramme für die in Tabelle 2 angegebenen Buckelgeometrien (Schritt 2) erstellt (nach dem dargestellten Schema in Abbildung 82). Maschine 2 verfügt über 2 Kondensatorbänke, die über die Steuerung separat geladen und gezündet werden können. Beide haben die gleiche Kapazität. Somit verdoppelt sich die Kapazität bei gleichzeitiger Nutzung beider Kondensatorbänke. Allerdings vergrößert sich bei Erhöhung der Kapazität auch die Stromanstiegszeit und die Schweißzeit (vgl. Kapitel 2.6). Bei der Schweißbereichsdiagrammerstellung wurde als unteres Kriterium eine Zugfestigkeit von 0,5 kN gewählt. Die obere Grenze ist erreicht, wenn es zur explosionsartigen Verdampfung der Aluminiumbauteile kommt. Diese ist verbunden mit meist vollständiger Zerstörung der Aluminiumoberflächen und sehr starken Elektrodenverschleiß. Zunächst wurde der Schweißbereich mit den Zeiten  $t_p=1,9\text{ms}$  und  $t_h=5,4\text{ms}$  ( $C=8\text{mF}$ ) aufgenommen. Selbst bei maximaler Energie bei maximaler Ladespannung  $1300\text{V}$  ( $\epsilon_{50} \approx 2,9 \frac{\text{kWs}}{\mu\Omega}$ ) wurde die obere Grenze nicht erreicht. Die Energie wurde danach durch Verdopplung der Kapazität erhöht. Die untere Grenze wurde danach nicht erneut untersucht. Die Ladeenergie wurde gleichmäßig auf beide Kondensatoren aufgeteilt. Die charakteristischen Zeiten betragen mit doppelter Kapazität  $t_p=2,9\text{ms}$  und  $t_h=6,7\text{ms}$  ( $C=16\text{mF}$ ). Die Schweißbereiche sind in den Abbildungen 83 bis 87 dargestellt. Der Schweißbereich mit der längeren Schweißzeit wurde für die Buckelringbreite 1 mm nicht aufgenommen, da während der Erstellung vorübergehend Maschine 2 ausfiel. Während der Reparatur zeigte sich die fehlende Relevanz dieser Buckelgeometrie.

Für die Beurteilung der Buckelgeometrie wurden Querschliffe angefertigt. Die Position und die verwendeten Parameter der Querschliffe sind in Abbildung 29 dargestellt. In Abbildung 30 zeigt die Makroschliffe der ausgewählten Proben. Es ist zu erkennen, dass mit größer werdender Buckelringbreite die Größe der Unregelmäßigkeiten in der Schweißverbindung zunimmt. Während bei einer Buckelringbreite von 0,5 mm nur ein sehr schmaler Bereich nicht angebunden ist, lassen sich bei den Buckelringbreiten 0,75 und 1 keine angebundenen Bereiche erkennen. Das Wachstum der Unregelmäßigkeiten lässt sich darauf zurückführen, dass die Schweißzeit mit steigender Buckelringbreite nicht ausreicht, um eine vollständige Entgasung des entstehenden Metaldampfes zu gewährleisten. Daraus lässt sich eine zusätzliche

Empfehlung für die Gestaltung von Schweißbuckel für das Aluminiumschweißen ableiten. Die Buckelringbreite sollte möglichst klein sein, um vollständiges Entgasen während des Schweißprozesses zu ermöglichen.

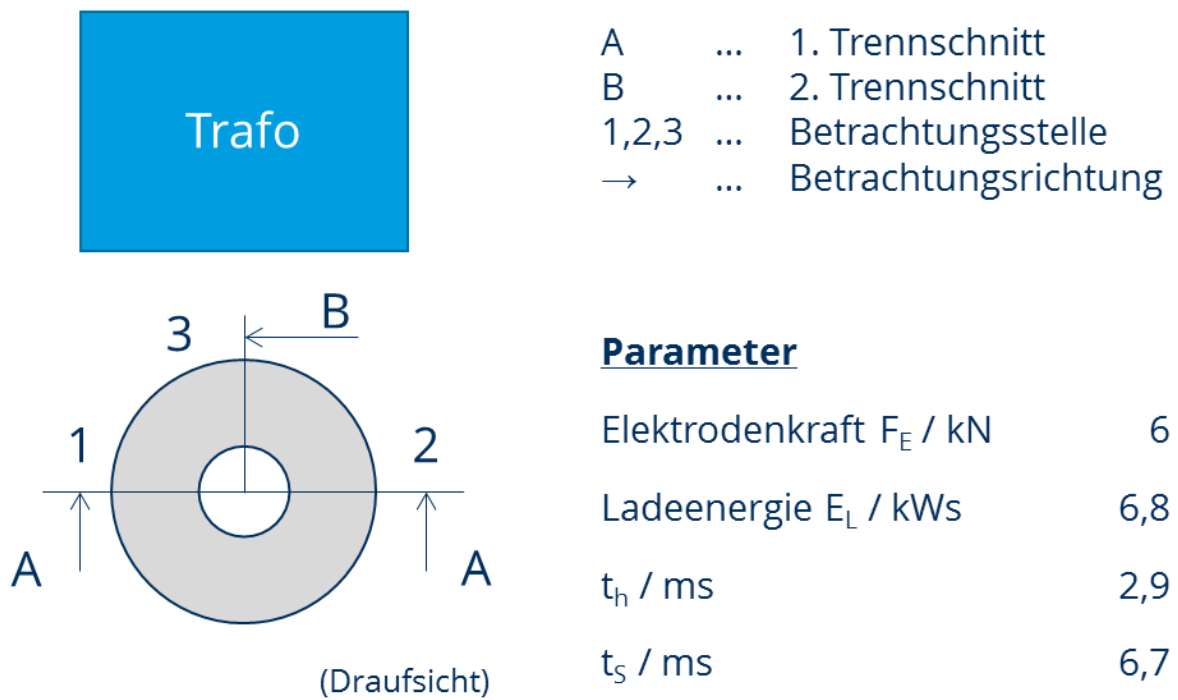


Abbildung 29: Erstellung der Querschliffe zur Untersuchung der Buckelringbreite

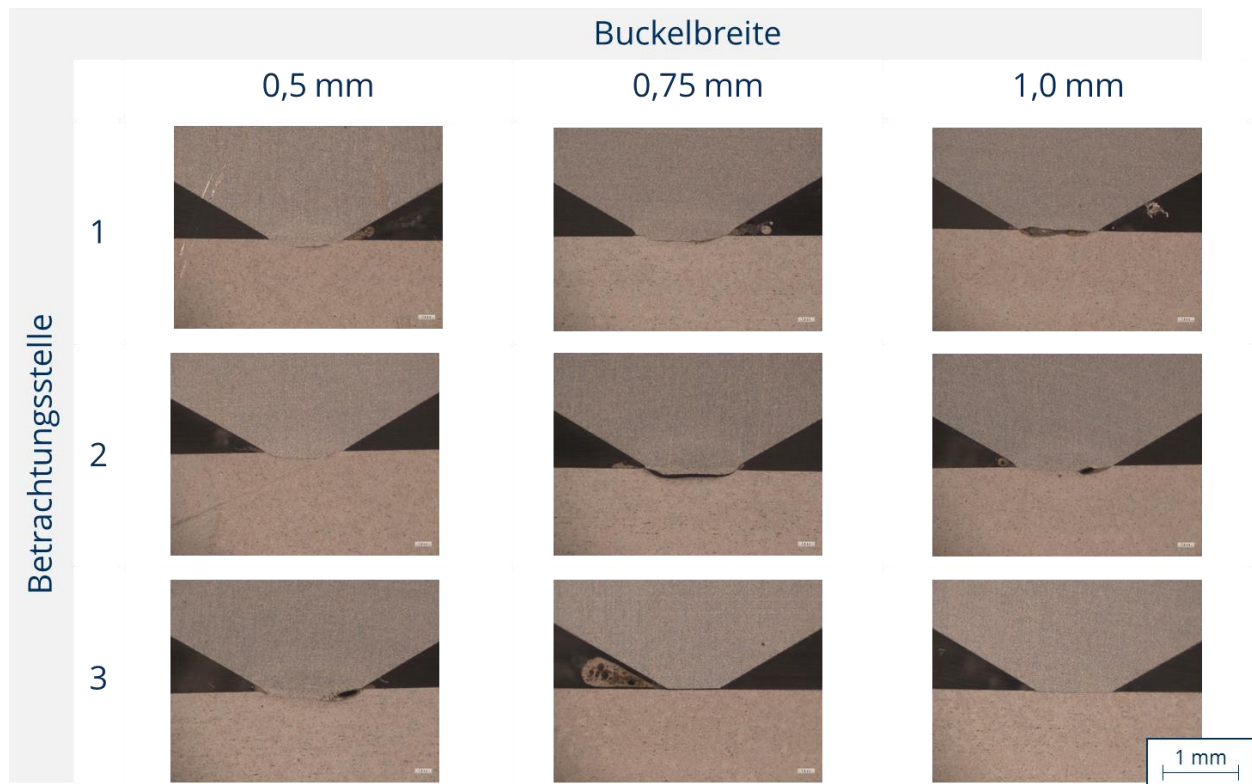


Abbildung 30: Querschliffe der Buckelgeometrien an drei Betrachtungsstellen

Zur weiteren Auswertung der Versuche zur Ermittlung einer geeigneten Buckelgeometrie wurden neben den lichtmikroskopischen Untersuchungen (Abbildung 30) auch REM-Untersuchungen (Abbildung 31) angestellt. Da die Schliffbilder sehr unterschiedliche Ergebnisse je nach Schnittebene zeigen, wurden für alle weiteren Versuche Kopfzugprüfungen durchgeführt.

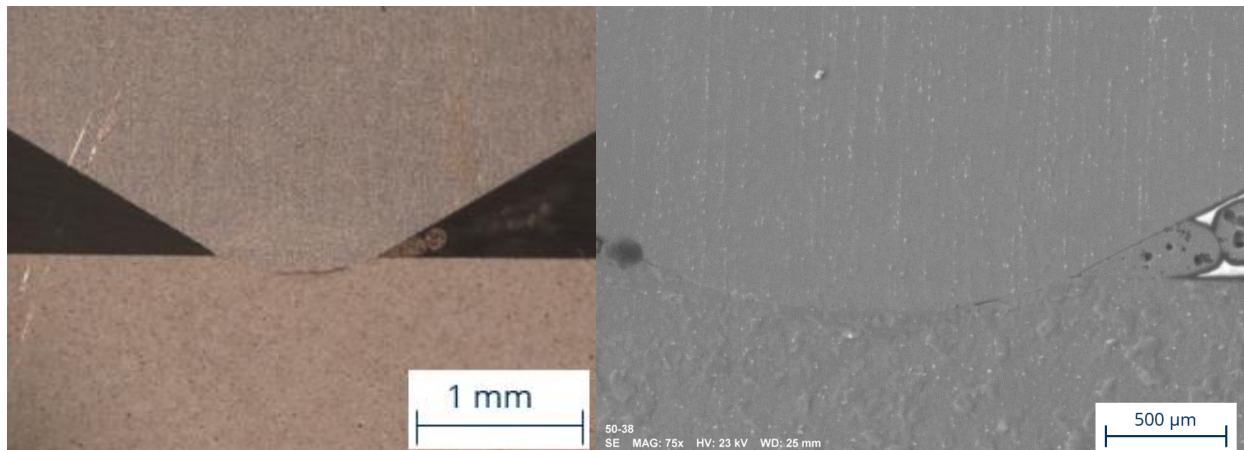


Abbildung 31: Links: Lichtmikroskopische Aufnahme, Rechts: REM-Aufnahme – Buckelgeometrie Winkel 30°/30° Buckelringbreite 0,5 mm

Es ist zu erkennen, dass beim KE-Buckelschweißen auch bei Aluminiumlegierungen keine Linse ausgebildet wird. Der im Lichtmikroskop dunkle Bereich in der Fügeebene ist im REM als Anbindung erkennbar. Vermutlich ist in der Schliffebene keine Verbindung vorhanden, jedoch in einer anderen Ebene wurde eine Verbindung ausgebildet. Die EDX-Analyse (Abbildung 95) zeigt, dass der Blechwerkstoff eine stärkere Oxidschicht mit mehr Sauerstoffatomen ausbildet. Dies ist dem höheren Magnesiumsanteil zuzuschreiben. Die wichtigste Erkenntnis aus der EDX-Analyse ist die Herkunft des ausgetretenen Spritzers. Dieser zeigt die gleiche Zusammensetzung wie das Blechmaterial. Weiterhin wurden die Bruchflächen nach den Kopfzugversuchen im Lichtmikroskop und im REM (Abbildung 32) untersucht. Es ist zu erkennen, dass die Fläche in matte und glänzende Bereiche eingeteilt werden können. Die REM- und EDX-Analyse (Abbildung 96) zeigt, dass die Trennung immer durch den Buckel geht.

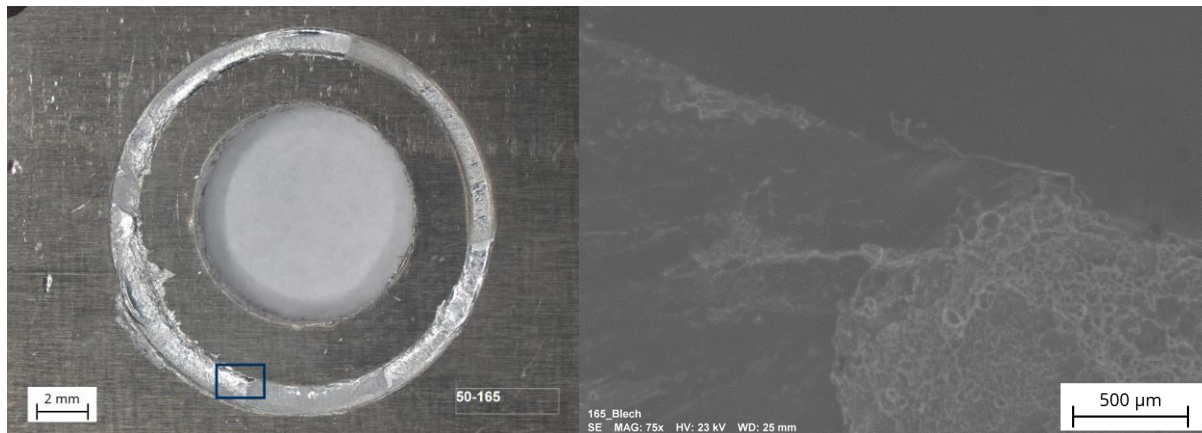


Abbildung 32: Bruchfläche nach Kopfzugprüfung, links: Lichtmikroskop, rechts: REM

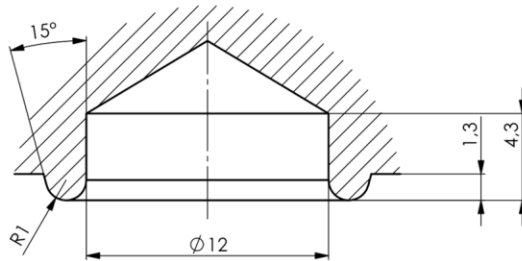
Als empfohlene Buckelgeometrie wird aus den Untersuchungen ein symmetrischer Buckelwinkel von  $120^\circ$  ( $30^\circ - 30^\circ$  zur Blechebene) mit einer Buckelringbreite von 0,5 mm empfohlen.

Für Versuche mit Langbuckeln wurde diese Geometrie übertragen. Das Buckelprofil wird linear 20 mm ausgetragen.

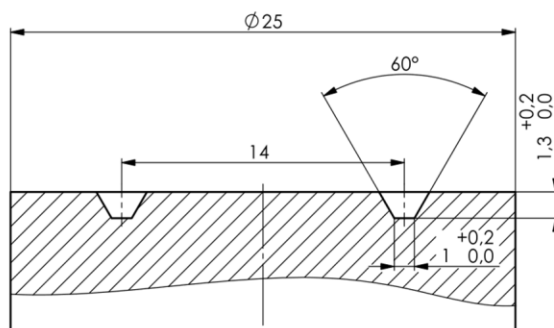
## 6.2 Geprägte Buckel

Nach der Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2.7) wurden zwei Buckelgeometrien ausgewählt. Ein flacher und ein steiler Buckel. Es wurde zum Prägen für beide Buckel der gleiche Stempel mit unterschiedlichen Matrizen gewählt. Die Zeichnungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Der Ringdurchmesser wurde so gewählt, dass dieser mit den Massivbuckeln übereinstimmt. Die Flankenwinkel wurden gewählt, da die Ergebnisse zur Buckelgeometrie von Massivbuckeln (Kap. 0) den Aussagen aus der Literatur widersprechen (vgl. Kapitel 2.7). Die Stempelform wurde nach [12] ausgelegt. Geprägt wurde mit einem pneumohydraulischen Wandler (bis 70 kN) in C-Gestellausführung.

## Stempel



## Matrize steil



## Matrize flach

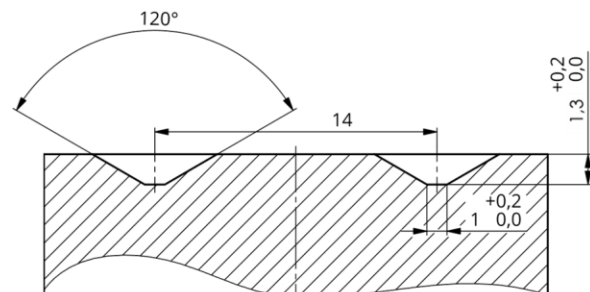


Abbildung 33: Stempel und Matrizen zu Prägen von Ringbuckeln

Die geprägten Buckel wurden im Querschnitt vermessen (Abbildung 88, Abbildung 89). Das Profil der Buckel wurde stichprobenartig im 3D-Lichtmikroskop untersucht. Es zeigen sich, dass sich alle Maße der Buckel im Toleranzbereich von  $\pm 0,1$  mm befinden. Zur Untersuchung der Buckel wurden zunächst Schweißbereichsdiagramme erstellt (Maschine 2). Zur Bewertung der Verbindung wurde eine Torsionsprüfung nach [50] durchgeführt. Aufgrund der teilweise auftretenden Verformung des geprägten Bleches, konnten nicht alle Proben in die Vorrichtung zur Torsionsprüfung eingespannt werden. Als Bewertungskriterium dienen weiterhin das Entstehen einer Verbindung (ohne Belastungsprüfung) und die explosionsartige Verdampfung des Grundwerkstoffs. Weiterhin wurde starker Verschleiß an Elektroden und Bauteile als kritisch eingestuft. Die Schweißbereiche sind in den Abbildungen 90 bis 94 dargestellt. Mit steigender Ladeenergie steigt auch das ertragbare Torsionsmoment. Jedoch zeigt sich der Prozess als sehr instabil. Eine genauere Untersuchung mit Druckmessfolien und Hochgeschwindigkeitskinematografie zeigt, dass die Kraftwirkung auf die Bauteile nicht symmetrisch erfolgt, trotz Einbau eines Säulenführungsgestells. Das erneute Ausrichten der Elektroden brachte keine Verbesserung. Die Schiefstellung und die Toleranz der Buckel sorgen für die Instabilität



des Prozesses. Es zeigt sich jedoch, dass die Geometrie mit dem spitzen Buckelwinkel und damit steiferen Buckel zu einem leicht vergrößerten Schweißfenster führt. Außerdem zeigt die steifere Buckelgeometrie deutlich höhere Belastbarkeiten der entstandenen Verbindungen. Für geprägte Buckel wird also eine möglichst steife Geometrie empfohlen.

## 7 Einfluss des kraftgesteuerten Auslösens der Entladung

### 7.1 Versuche an Maschine 1

Die durchgeführten Untersuchungen an Maschine 1 wurden bereits in Kapitel 0 beschrieben. Aufgrund der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Probleme kann kein systematischer Vergleich zwischen verschiedenen Parametern durchgeführt werden. Alle Versuche wurden mit einer Ladeenergie von 3200Ws (entspricht  $\epsilon_{50} \approx 1,1 \frac{\text{kWs}}{50\mu\Omega}$ ) durchgeführt. Dennoch können aus den gewonnenen Daten Erkenntnisse gewonnen werden:

In den Abbildungen 64, 68, 72, 76 und 80 sind Stromverlauf und Spannungsverlauf nach Korrektur (vgl. Kap. 4.2.2) dargestellt. Versuche, die zur explosionsartigen Verdampfung führten, sind nicht dargestellt, da diese in der gewählten Achsenkonfiguration nicht sinnvoll dargestellt werden kann. (Bei schlagartiger Verdampfung steigt die Spannung auf über 25V an.) Nach den Spannungsverläufen können die Versuche in 3 Klassen eingeteilt werden:

- Spannungsverlauf stetig, Stromverlauf zeigt typischen Verlauf einer Schwingung im Kriechfall
- Spannungsverlauf deutlich unstetig (aber  $U_{\text{max}} < 5\text{V}$ ), Stromverlauf noch stärker gedämpft
- Spannungsverlauf stark unstetig ( $U_{\text{max}} \gg 5\text{V}$ ), Stromfluss zeitweise unterbrochen

Ein Vergleich der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigt wiederum eine mögliche Einteilung in 4 Klassen:

- keine sichtbaren Spritzer
- eine Spritzerphase: es treten Spritzer aus der Fügeebene direkt zum Beginn der Entladung aus
- zwei Spritzerphasen: es treten Spritzer aus Phase 1 auf, zusätzlich gibt es eine weitere Phase in der Nähe des Strom Maximums ggf. treten zeitgleich Spritzer zwischen den Elektroden und Bauteil auf
- schlagartige Metallverdampfung: kurz nach Auftreten von starken Spritzern zwischen den Bauteilen oder Bauteilen und Elektroden reißt der Kontakt ab, Der Stromfluss wird stark verringert und ein Lichtbogen, der zur Zerstörung der Elektroden und der Bauteile führt, zündet. Dies geschieht innerhalb von einem Bildwechsel (20000 fps)

Ein Vergleich der Klassen von den Parametern und den Klassen der HG-Aufnahmen zeigt, dass bei stetigen Spannungsverläufen keine Spritzer oder nur eine Spritzerphase auftreten. Bei einem unstetigen Spannungsverlauf mit Maximalspannungen unter fünf Volt treten zwei Spritzerphasen auf. Eine explosionsartige Verdampfung ist verbunden mit Maximalspannungen deutlich größer fünf Volt.

Alle Versuche werden mit der gleichen Ladeenergie ausgeführt. Der variable Parameter ist der Zeitpunkt der Zündung und damit die Kraft bei Schweißbeginn. Der Übergang zwischen den Phasen ist fließend und kann nicht genau festgelegt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt. In den Abbildungen 65, 69, 73, 77 und 81 sind die Versuche in Abhängigkeit der Kraft beim Zünden dargestellt. Diese sind in Abbildung 34 zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass für Fügeelemente relevante Kopfbzugkräfte ( $> 2,5 \text{ kN}$ , vgl. [1]) nur erreicht werden, wenn mindestens 2 Spritzerphasen auftreten. Im Bereich der explosionsartigen Verdampfung können teilweise ausreichend gute Verbindungen entstehen. Bei diesen sind aber die Bauteile ebenfalls stark beschädigt. Die Notwendigkeit der zweiten Spritzerphase bestätigt das in [1] erarbeitete Prozessverständnis zum KE-Schweißen. Durch die schnelle und starke Erhitzung ist die Reinigung und Aktivierung der Fügeflächen möglich, sodass eine Verbindung beim Aufeinanderpressen der Bauteile entstehen kann.

Tabelle 6: Einteilung in Spritzerphasen mit Ergebnis der zerstörenden Prüfung

<b>Kraft beim Zünden</b>	<b>Spritzerbereich</b>	<b>Entstandene Verbindung (Abzugskraft)</b>	
9 – 16 kN	keine Spritzer	0 kN → keine Verbindung	
	eine Spritzerphase	2 von 8 Proben 2 x 0,5 kN & 1 x 0,7 kN	5 von 8 Proben 0 kN
4 – 9 kN	zwei Spritzerphasen	4,8 kN & 4 kN	
0 – 4 kN	explosionsartige Metallverdampfung	2 von 6 Proben 4,8 kN & 4 kN	4 von 6 Proben 0 kN

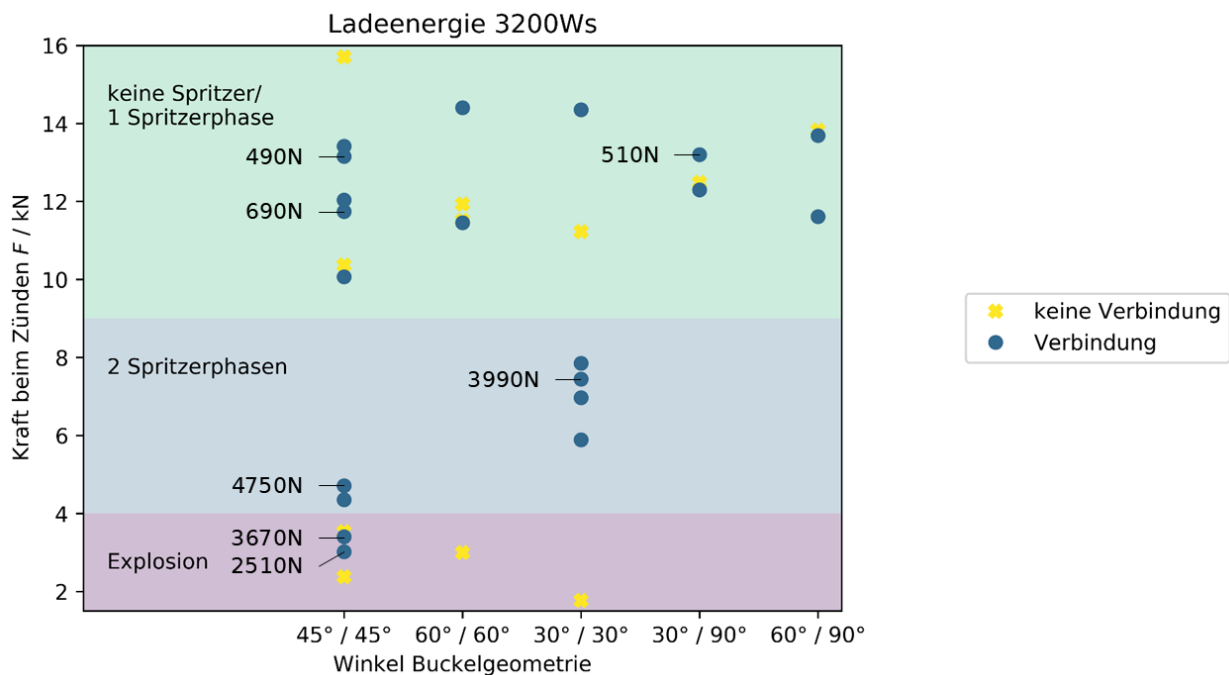


Abbildung 34: Zündkraft über Winkel der Buckelgeometrie mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- wenn keine Kopfzugkraft angegeben, Querschliff angelegt

Der Einfluss der Anstiegsgeschwindigkeit auf den Schweißprozess kann aufgrund der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Problematik nicht systematisch untersucht werden.

Von jedem Versuch wird die Kraftanstiegsgeschwindigkeit im Zündzeitpunkt ermittelt. Bei ähnlicher Schweißkraft (bzw. Zündkraft), d.h. die Werte unterschieden sich nicht mehr als 0,5kN, konnte nur ein Versuchspaar mit unterschiedlicher Buckelgeometrie gefunden werden. Diese sind in Abbildung 35 dargestellt. Die Kraftanstiegsgeschwindigkeiten haben ein Verhältnis von ungefähr 1:2. Bei beiden Versuchen konnten keine Verbindung erzeugt werden. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass beim höheren Kraftanstieg keine Spritzer auftreten. Beim niedrigeren Kraftanstieg ist jedoch eine Spritzerphase zu erkennen. Die Reduzierung der Spritzer kann durch die höhere Kraftanstiegsgeschwindigkeit bedingt sein.

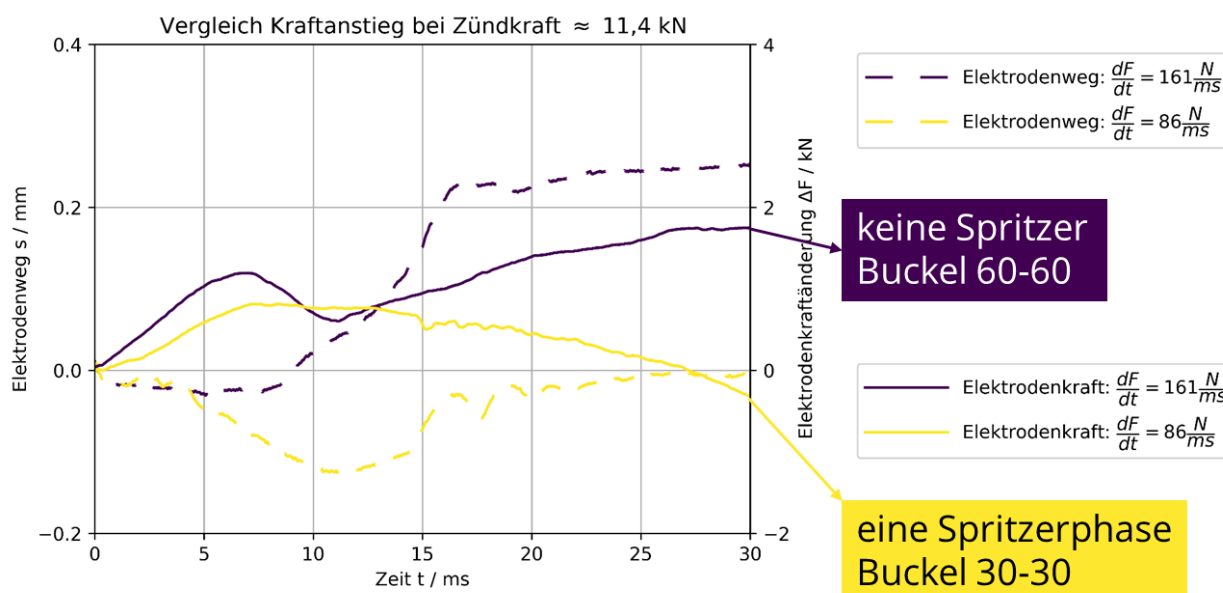


Abbildung 35: Vergleich der Kraftanstiege bei ähnlicher Zündkraft an Maschine 1

## 7.2 Versuche an Maschine 2

Da auf Maschine 2 unterschiedliche Kraftanstiegsgeschwindigkeiten durch die Nutzung verschiedener Federn in der Nachsetzeinheit erreicht wurden, wird zunächst statisch der Einfluss der Nachsetzeinheit ausgewertet (Abbildung 36). Jeder Versuch wurde fünffach durchgeführt. Aufgetragen sind Mittel-, Minimal- und Maximalwert. Die Streuung der Kopfzugkräfte ist bei gleichen Versuchsparametern sehr hoch.

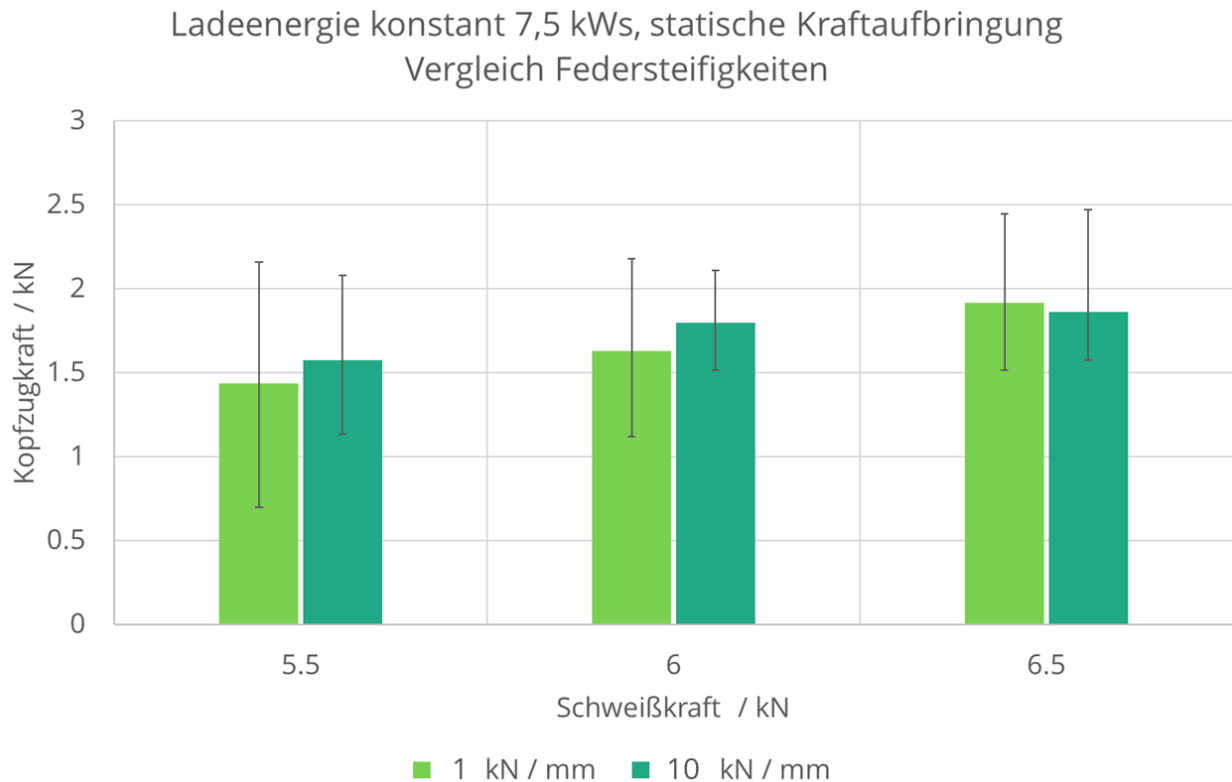


Abbildung 36: Einfluss der Federsteifigkeit bei statischer Kraftaufbringung auf die ertragbare Kopfzugkraft –  $L_E=7,5\text{ kWs}$  –  $t_h=2,9\text{ ms}$  –  $t_l=6,7\text{ ms}$

Die Änderung der Mittelwerte durch den Austausch der Feder liegt eindeutig im Bereich der Streuung, sodass der Einfluss der Federkennwerte vernachlässigt werden kann.

Der Grund der hohen Streuung wird in der Oxidschicht gesehen, die sich nach der spanenden Bearbeitung nach einigen Wochen unterschiedlich aufgebaut haben könnte. Auch die Oxidschicht der Bleche kann unterschiedlich ausgeprägt sein. Um dies zu untersuchen, werden Versuche mit gebeizten und passivierten Proben durchgeführt. Die verwendeten Parameter sind:  $L_E=7,5\text{ kWs}$  –  $t_h=2,9\text{ ms}$  –  $t_l=6,7\text{ ms}$  –  $c=10\text{ kN/mm}$ . Das Vorgehen der Probenvorbereitung ist in Tabelle 7 beschrieben. Die Versuche erfolgten innerhalb von 12 Stunden nach der Oberflächenvorbehandlung. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 37.

Tabelle 7: Arbeitsschritte beim Oberflächenvorbehandeln

Arbeitsschritt	Medium	Temperatur	Zeit
Vorreinigen im Ultra-Aceton schallbad		Raumtemperatur	120s
alkalisches Beizen	Natronlauge	40 - 50°C	120s
saures Beizen	Salpetersäure	Raumtemperatur	5s
Passivieren	Alodine 2040	30 - 40°C	90s

Es ist zu erkennen, dass durch den einheitlichen und dünneren Aufbau der Oxidschicht die Schwankungen nicht reduziert werden konnten. Allerdings wurde durch die Verminderung des Kontaktwiderstandes die ertragbare Kopfbzugkraft im Mittel um mindestens 0,5kN reduziert. Deshalb werden weiter Versuche an Maschine 2, 3 und 4 mit Proben ohne zusätzliche Oberflächenvorbehandlung durchgeführt.

Die Versuche werden mit den Parametern aus Abbildung 97 durchgeführt. Jeder Parametersatz wird nach der statischen Untersuchung – zur Ermittlung der Schweißbereiche – mit den erreichbaren 10N/ms und 15N/ms fünf Mal durchgeführt. Die Auswertung erfolgt für veränderliche Ladeenergien und konstanter Schweißkraft/Auslösekraft (Abbildung 38) und für konstante Ladeenergien und veränderlicher Schweißkraft/Auslösekraft (Abbildung 39). Die Streuung der Versuche ist erneut sehr hoch.

Im Vergleich zu den statischen Versuchen weisen die Versuche im Kraftanstieg schlechtere Kopfbzugkräfte auf. Allerdings ist die Kopfbzugkraft der Versuche mit 15N/ms höher als die Kopfbzugkraft mit 10N/ms. Ein eindeutiger Trend ist also nicht erkennbar. Die Versuche mit 5,5kN Schweißkraft und 8,5kWs Ladeenergie konnten nicht ausgewertet werden, da es dabei bei allen durchgeführten Versuchen zur schlagartigen Metallverdampfung kam.

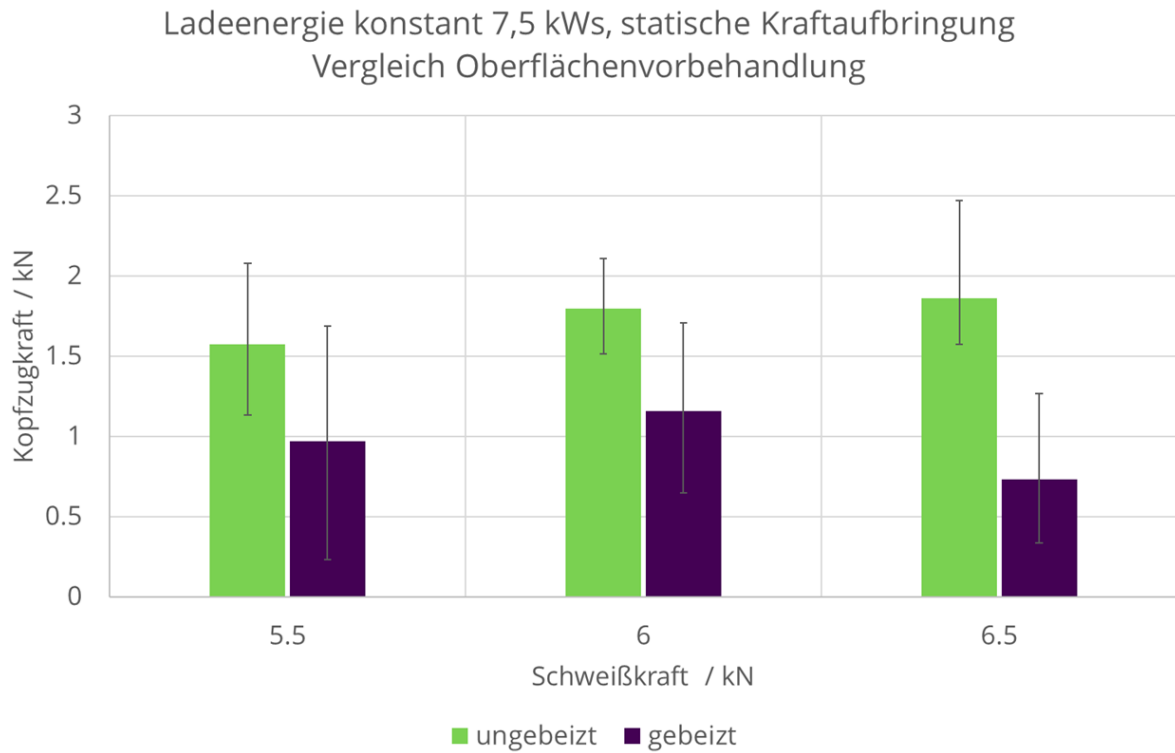


Abbildung 37: Einfluss der Oberflächenvorbehandlung bei statischer Kraftaufbringung auf die ertragbare Kopfzugkraft -  $L_E=7,5\text{kWs}$  -  $t_n=2,9\text{ms}$  -  $t_f=6,7\text{ms}$  -  $c=10\text{kN/mm}$

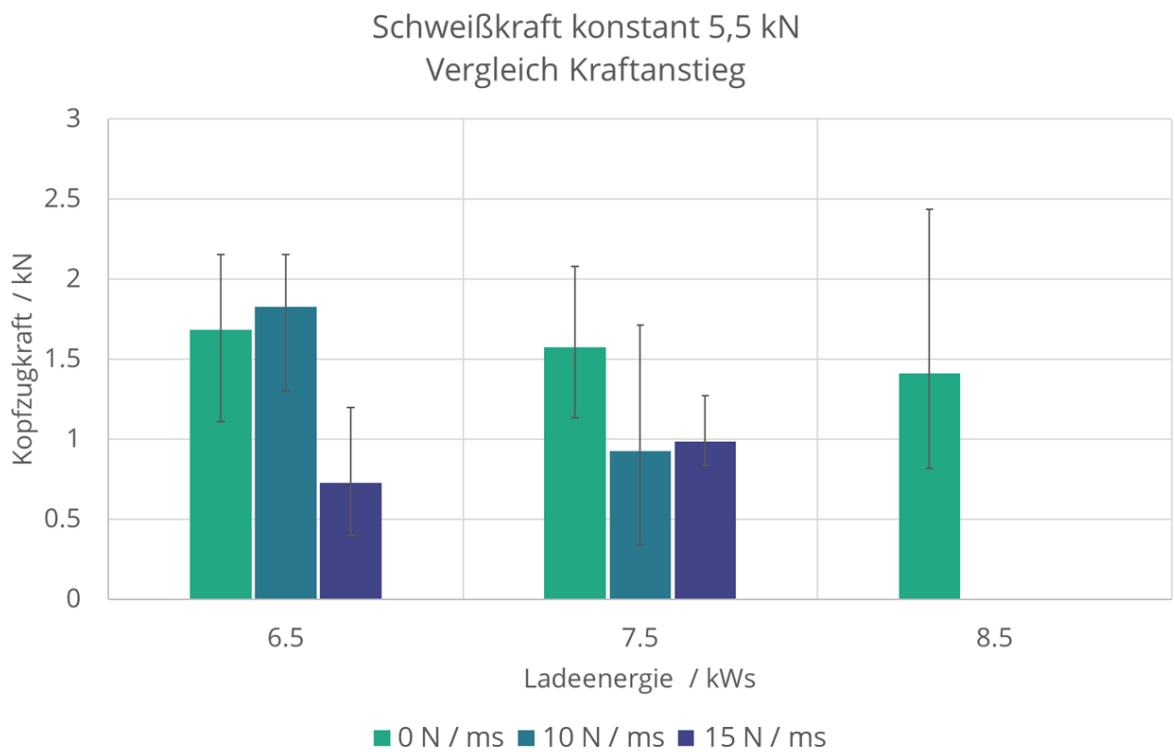




Abbildung 38: Kopfzugkraft über Ladeenergie bei verschiedenen Kraftanstiegszeiten und gleicher Schweißkraft

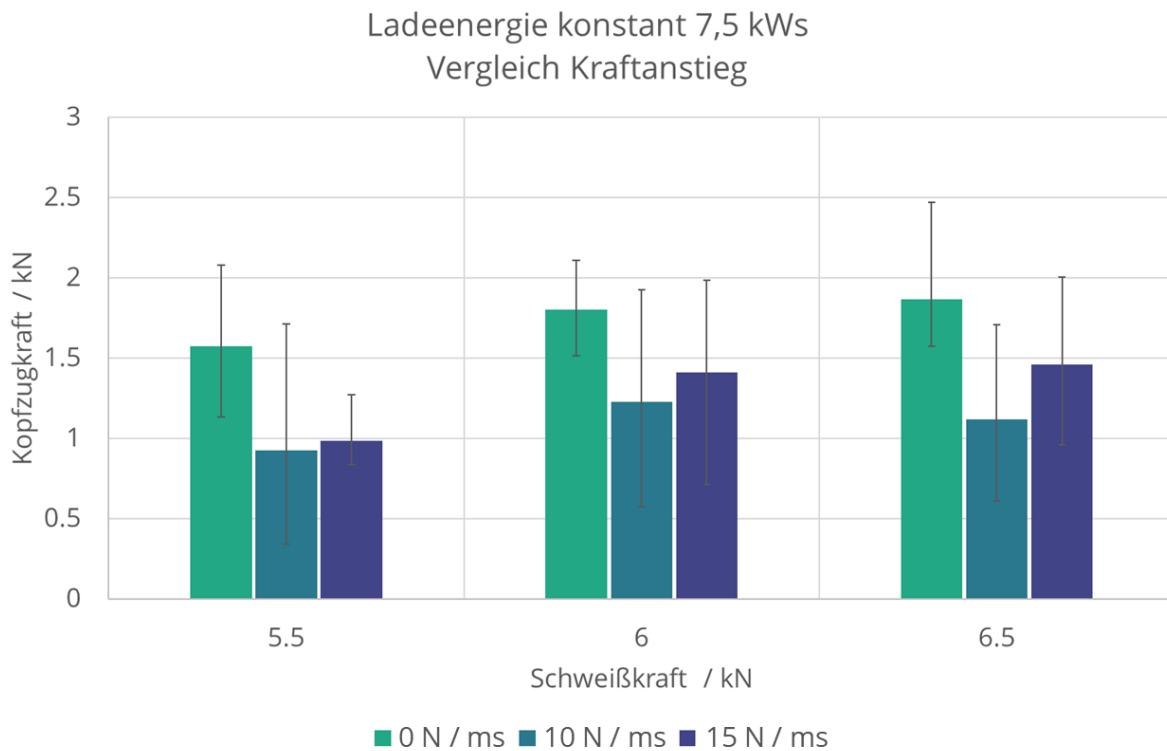


Abbildung 39: Kopfzugkraft über Schweißkraft bei verschiedenen Kraftanstiegszeiten und gleicher Ladeenergie

Die Parameterverläufe der Versuche werden untersucht (Abbildung 40). Dabei zeigt sich, dass zwischen den statischen Versuchen und den Versuchen mit Kraftanstieg ein Unterschied des gemessenen Kraftabfalls zwischen Schweißkraft und des ersten lokalen Kraftminimums existiert. Dieser wird für weitere Auswertungen herangezogen und der Kopfzugkraft gegenübergestellt (Abbildung 41). Es ist zu erkennen, dass ein Zusammenhang zwischen Kraftabfall und Kopfzugkraft gibt. Eine lineare Korrelation zeigt das Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,36$  und weist damit auch hier eine hohe Varianz auf.

Der Einfluss der Kraftanstiegsgeschwindigkeit lässt sich aufgrund der geringen realisierbaren Kraftanstiegsgeschwindigkeiten nicht weiter auf Maschine 2 untersuchen. Jedoch kann die These aufgestellt werden, dass bei höherem Kraftabfall durch das Schweißen die Kopfzugkraft höher ist. Der Kraftabfall darf jedoch nicht so weit abfallen, dass es zur explosionsartigen Metallverdampfung kommt.

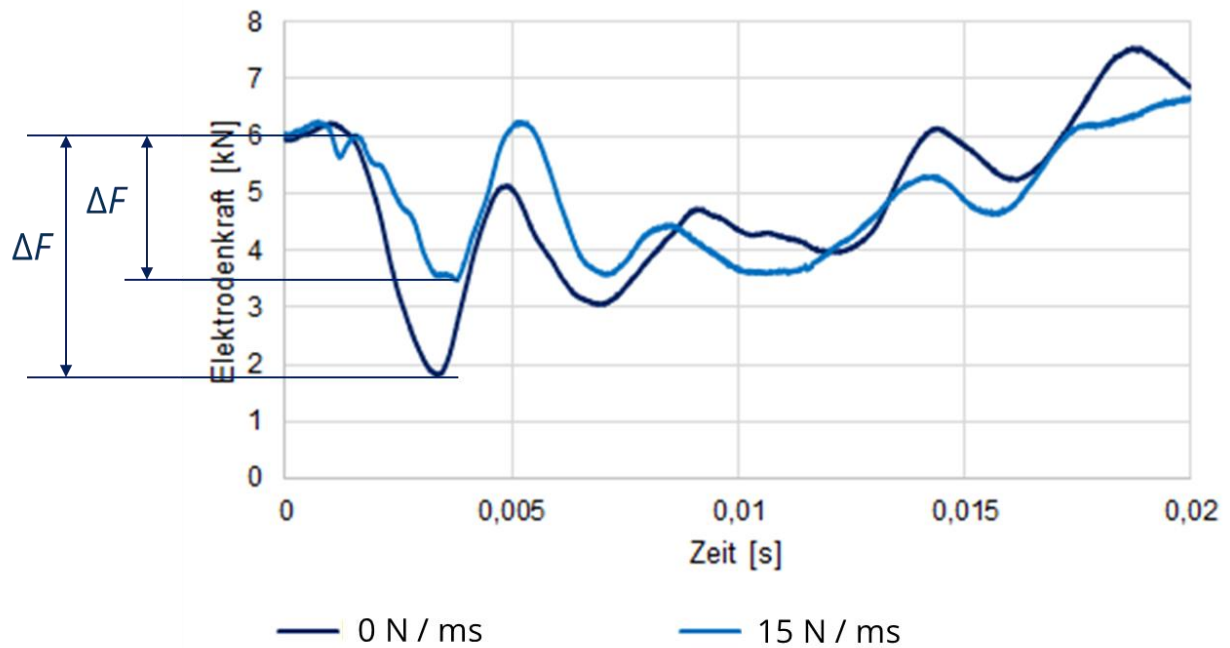


Abbildung 40: Beispiel der Auswertung des Kraftabfall

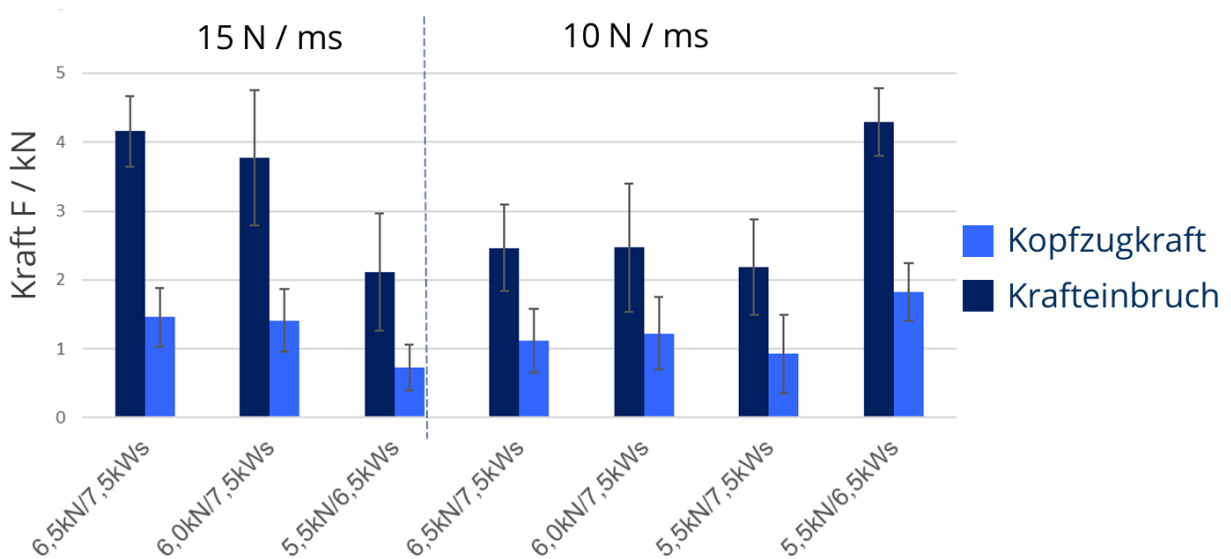


Abbildung 41: Kopfzugkraft und Kraftabfall über den gewählten Versuchsparametern (Schweißkraft/Ladeenergie)

Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen bei Proben mit einer Kopfzugkraft  $\geq 2$  kN ebenfalls zwei Spritzerphasen wie in Kap. 7.1 beschrieben.

## 7.3 Versuche an Maschine 3

### 7.3.1 Ringbuckel

An Maschine 3 wurde zunächst statisch für zwei Schweißkräfte (8,5 kN und 22 kN) eine geeignete Ladeenergie ausgewählt, indem bei konstanter Schweißkraft die Ladeenergien schrittweise erhöht wurden. Bei 8,5 kN ergibt sich so eine verwendete Ladeenergie 6,5 kWs (entspricht  $\epsilon_{50} \approx 3,5 \frac{\text{kWs}}{50 \mu\Omega}$ ) und bei 22 kN von 13 kWs (entspricht  $\epsilon_{50} \approx 7,8 \frac{\text{kWs}}{50 \mu\Omega}$ ). Zur Untersuchung der Kraftanstiegsgeschwindigkeit wird der Schweißablauf so geregelt, dass der Schweißkopf mit dem Eigengewicht der magnetischen NE auf den Bauteilen aufsetzt. Dann wird die Vorkraft von 6 kN bzw. 20 kN aufgebracht. Diese Kraft wird dann in den gewählten Zeiten (50 ms, 100 ms und 200 ms) um 5 kN erhöht. Die Schweißung wird bei 8,5 kN bzw. 22 kN ausgelöst. Die möglichen Abläufe sind in Abbildung 51 und Abbildung 52 dargestellt. Die resultierenden Kraftverläufe mit den Stromverläufen zeigen die Abbildungen 54 bis 60. Automatisiert ausgewertet werden die Auslösekraft (entspricht der Schweißkraft), der Kraftanstieg (als Differenz der gemessenen Kraft zwischen dem Auslösezeitpunkt und einer Millisekunde davor – vgl. Abbildung 57), die resultierende Kopfzugkraft und der auftretende Kraftabfall. Die Werte sind in den Abbildungen 42 und 43 dargestellt. Für jeden Einstellparametersatz wurden mindestens drei Versuche durchgeführt. Dargestellt sind die Mittelwerte und die Spanne zwischen maximalen und minimalen Wert. Das Auslösen der Entladung folgt bei der eingestellten Kraft. Es ist zu erkennen, dass diese Steuerung innerhalb eines Parametersatzes sehr gut funktioniert. Bei der Schweißkraft 22 kN wurden zusätzlich zwei statische Versuche durchgeführt, allerdings führte einer der beiden Versuche zu schlagartigen Metallverdampfung.

Die Kraftanstiegszeit hat einen geringen Einfluss auf die Schweißkraft (Kraft beim Auslösen). Diese schwankt um  $\approx 1$  kN. Auch bei diesen Versuchen auf Maschine 3 ist zu sehen, dass bei höheren Kraftanstiegsgeschwindigkeiten kleinere Kopfzugkräfte resultieren. Allerdings sinkt die Streuung der Kopfzugkräfte deutlich bei höheren Kraftanstiegsgeschwindigkeiten. Das bedeutet, dass eine höhere Kraftanstiegsgeschwindigkeit zu stabilerem Prozessverhalten führt.

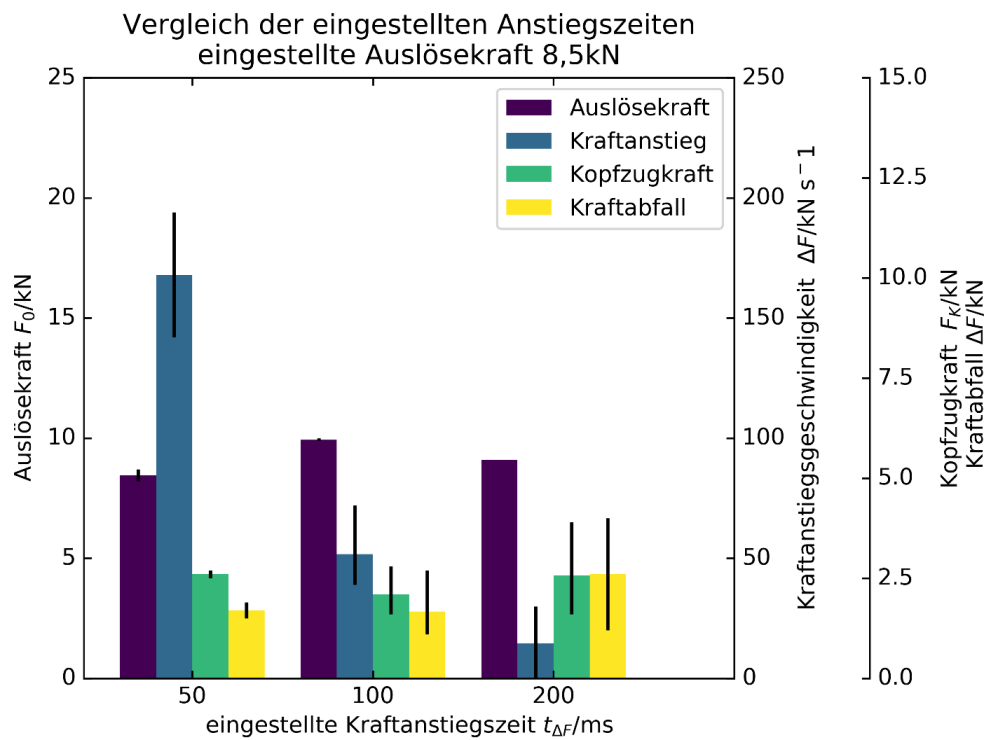


Abbildung 42: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Kraftanstiegszeiten für eine Kraftänderung von 5 kN bei einer Schweißkraft von 8,5 kN

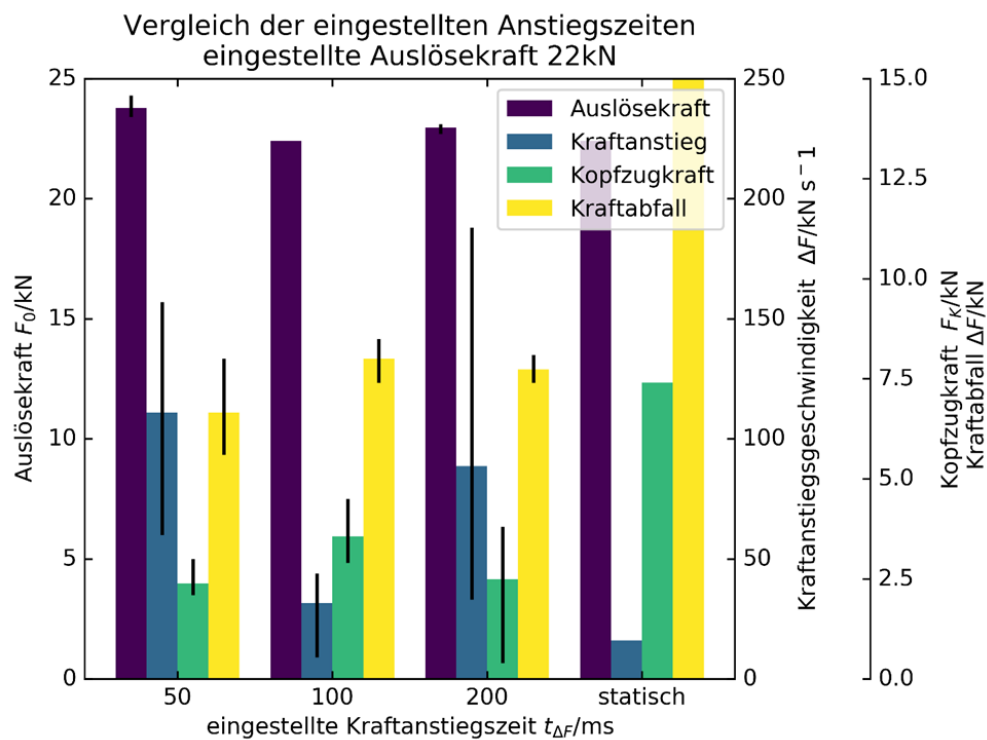


Abbildung 43: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Kraftanstiegszeiten für eine Kraftänderung von 5 kN bei einer Schweißkraft von 22 kN

Weiterhin wurde Versuche durchgeführt mit einer eingestellten Kraftanstiegszeit von 200ms zwischen 20 und 25kN, 13kWs Ladeenergie (entspricht  $\epsilon_{50} \approx 7,8 \frac{kWs}{50\mu\Omega}$ ) mit gesteuerter Auslösezeit nach Beginn des Kraftanstiegs. Der eingestellte Kraftverlauf ist in Abbildung 60 dargestellt. Die resultierenden Kraftkurven mit Stromverläufen, synchronisiert auf den Zündzeitpunkt, zeigt Abbildung 61. Die Ergebnisse werden wie oben beschrieben aufbereitet (Abbildung 44). Hier ist erneut erkennbar, dass die Regelung der Maschine dem vorgegebenen Kraftprofil nicht ideal folgt, jedoch das erzeugte Kraftprofil sehr wiederholgenau ist (nahezu keine Abweichung zwischen den einzelnen Kräften zum Zeitpunkt des Auslösens). Dadurch variieren die Kraftanstiegszeiten von -90N/ms bis +150N/ms um den eingestellten Wert von 25N/ms bei unterschiedlichen Auslösezeiten. Ein Zusammenhang zwischen Kraftanstiegszeit und Kopfzugkraft kann hier nicht erkannt werden. Eine geringere Streuung (wie oben beschrieben) bei hohen Kraftanstiegsgeschwindigkeiten ist hier nicht ersichtlich. Ein Unterschied der Kraftverläufe während des Schweißprozesses ist nicht erkennbar. Allein die Werte der Amplituden variieren.

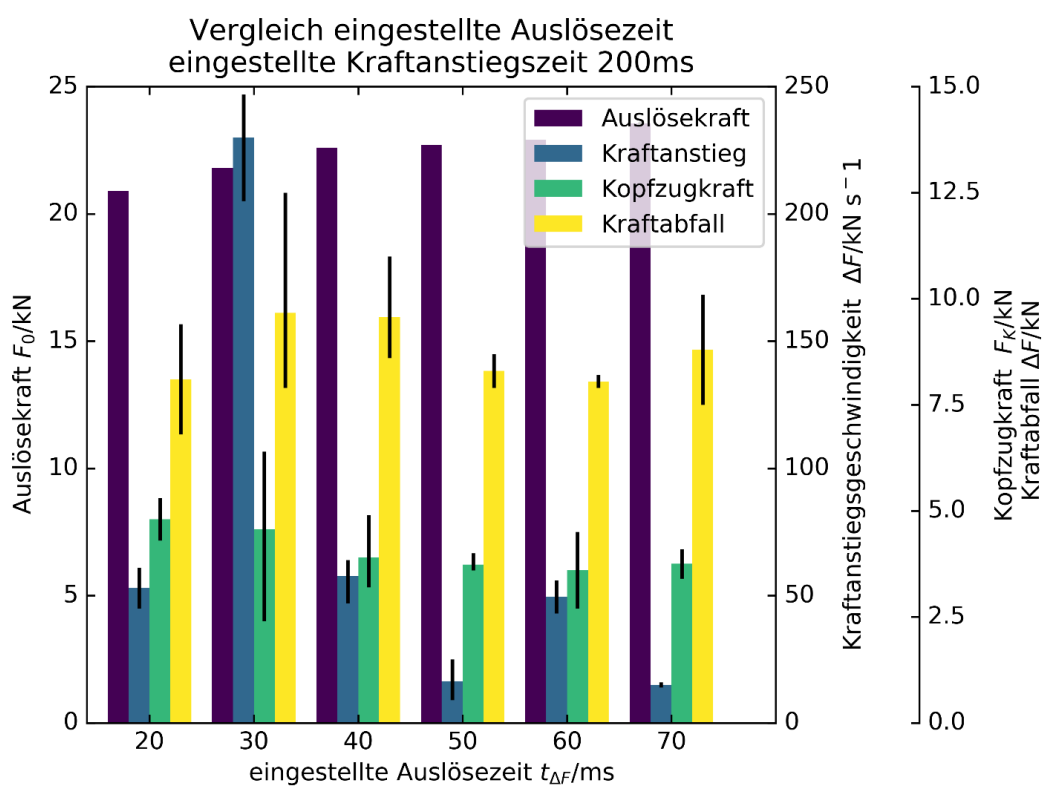


Abbildung 44: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Auslösezeiten für eine Kraftänderung von 20kN auf 25kN

In Kapitel 7.2 wurde der Effekt genannt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Kopfbzugkraft und dem Kraftabfall nach dem Zünden des Schweißstromes besteht. Dies wird für beide Parametersätze (6,5kWs und 13kWs) separat ausgewertet. Ein Zusammenhang ist bei beiden Parametersätzen feststellbar. Aus der Korrelation wurden Versuche, die zur schlagartigen Verdampfung führten, ausgeschlossen. Somit ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß für die Korrelation für  $R^2=0,51$  (für 6,5kWs – Abbildung 98) bzw.  $R^2=0,67$  (für 13kWs – Abbildung 99). Um den Einfluss der Schweißkraft auf die Abhängigkeitsuntersuchung zu eliminieren, wird der Kraftabfall auf die Schweißkraft bzw. Zündkraft bezogen (s. Abbildung 45). Versuche, die zur schlagartigen Metallverdampfung führten, sind aus der Korrelationsberechnung ausgenommen. Außerdem wurde für diese Versuche der Wert  $F_{\min}$  angetragen. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,74$  zeigt eine hohe Korrelation der Werte. Außerdem konnte ein enger Übergangsbereich festgestellt werden, ab dem es zur schlagartigen Metallverdampfung kommt. Bei der verwendeten Ringbuckelgeometrie (Fügefläche  $\approx 22 \text{ mm}^2$ , Kontaktfläche  $\approx 278 \text{ mm}^2$ ) darf die Kraft während des Schweißprozesses nicht unter 5kN absinken, um einen stabilen Prozessverlauf zu gewährleisten. Bei höheren Schweißkräften kann der Kraftabfall höher werden, bevor diese Grenze überschritten wird. Damit wird auch die resultierende Kopfbzugkraft höher.

Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen bei nahezu allen Proben zwei Spritzerphasen (vgl. Kap. 7.1). Jedoch ist bei hier im Spannungsverlauf das Auftreten der zweiten Spritzerphase nicht erkennbar.

### 7.3.2 Langbuckel

Weiterhin wurden an Maschine 3 Versuche mit Langbuckeln durchgeführt. Statt der Versuche bei 8,5kN Schweißkraft und 6,5kWs wurden Versuche mit 14kN Schweißkraft, von 10 auf 15kN ansteigend, durchgeführt. Die Ergebnisse werden analog zu den Ringbuckeln ausgewertet (Abbildung 101, Abbildung 102 und Abbildung 103). Es zeigt sich auch hier, dass eine hohe Anstiegsgeschwindigkeit zu einer geringeren Kopfbzugkraft führt. Auch die Streuung wird nicht durch eine höhere Kraftanstiegsgeschwindigkeit reduziert. Die Abhängigkeit ist zuverlässig mit ähnlich hohen Bestimmtheitsmaßen (0,62 und 0,76). Ebenfalls kann eine gute Korrelation zwischen auf die Zündkraft bezogenem Kraftabfall und der Kopfbzugkraft nachgewiesen werden. Der Übergangsbereich konnte nicht genau bestimmt werden, da es nur einmal zu schlagartigen Metallverdampfung kam.

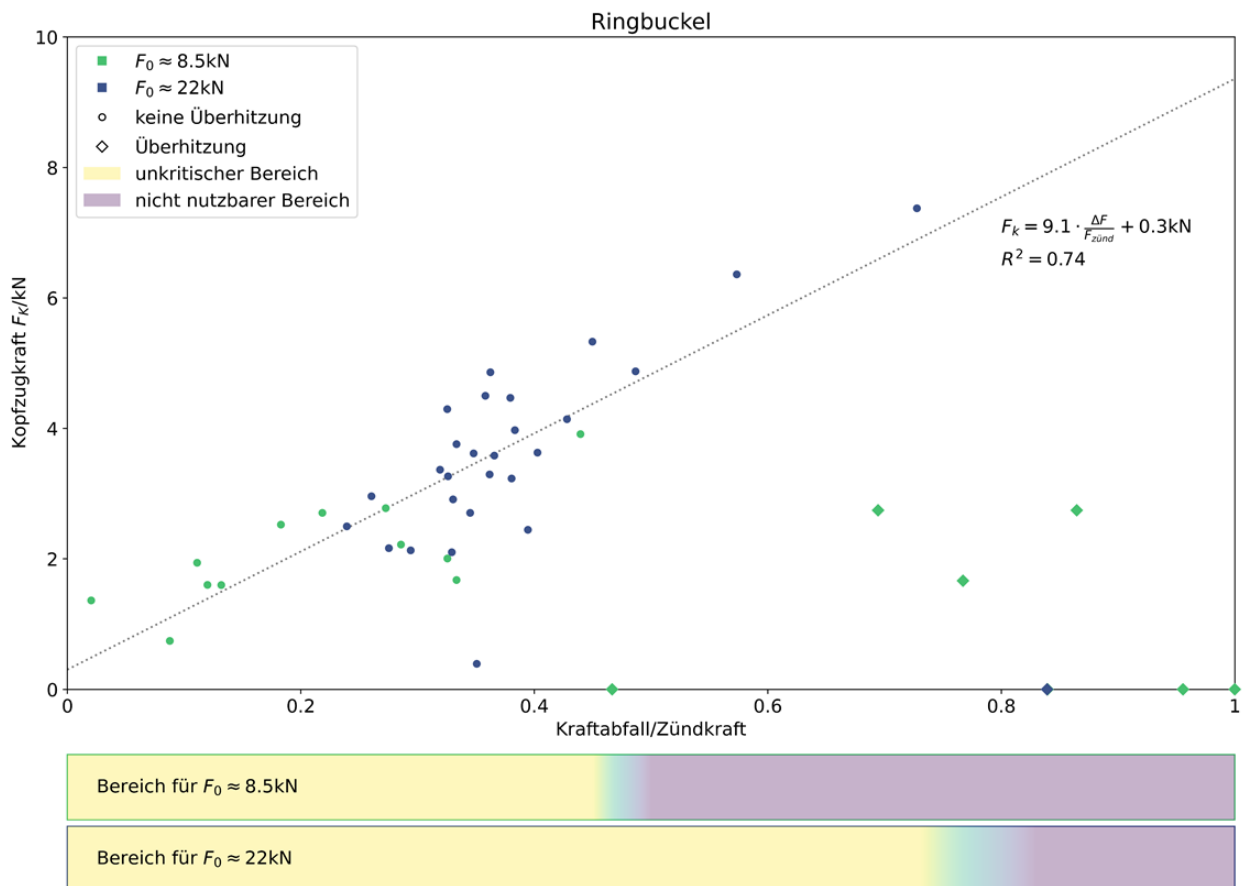


Abbildung 45: Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 3, Ringbuckel

Bei der Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigt sich der Vorteil des Langbuckels. In [1] wurde gezeigt, dass die Erwärmung des Buckels aufgrund der geometrischen Form, die die Stromdichte der Fugeebene bedingt, am Rand der Buckelgeometrie beginnt. Dieser Effekt tritt im Querschnitt der Buckelgeometrie auf, aber auch im Längsschnitt der Langbuckel zeigt sich dieser Effekt. Bei zwei Versuchen mit gleichem Parametersatz, aber um  $90^\circ$  gedreht eingelegten Proben, zeigen die Aufnahmen den Erwärmungsbeginn durch austretende Spritzer (Abbildung 46, Pfeile markieren die Stellen). Vor allem auf der rechten Seite ist der Effekt erkennbar. Durch die Erwärmung von außen nach innen reißt der Kontakt zwischen Buckel und Blech nicht ab, da in der Mitte ein noch nicht (so stark) erwärmter Steg vorhanden ist. Dieser wird beim Nachsetzen stark verformt und die aktivierten Bereiche am äußeren Rand werden aufeinandergepresst. Das Auftreten dieses Effektes spricht für die Nutzung von Segmentbuckeln.

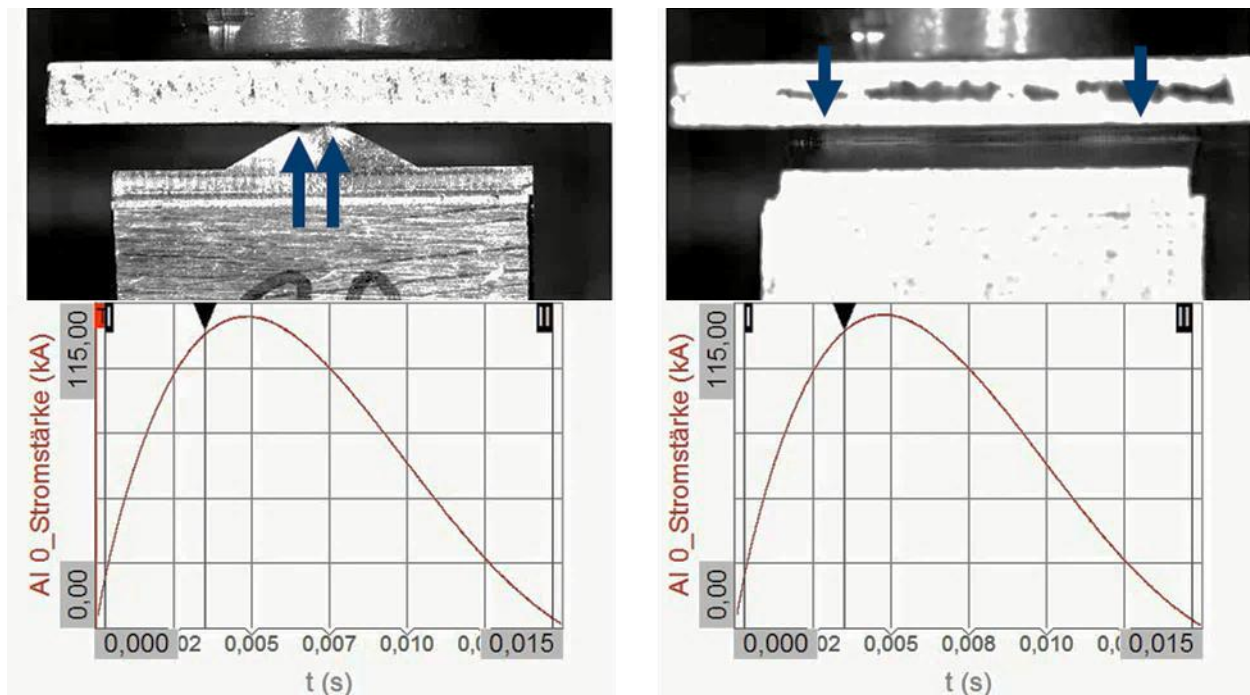


Abbildung 46: Momentaufnahme aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zweier Versuche mit gleichen Versuchsparametern jedoch unterschiedlichen Blickwinkeln

## 7.4 Versuche an Maschine 4

Wie bereits beschrieben (vgl. Kap. 4.1.4) wurden keine Versuche im Kraftanstieg durchgeführt, da nur ein Kraftanstieg  $< 10 \text{ N/ms}$  möglich war. Dennoch wurde der Prototyp einer Nachsetzeinheit mit pneumatischen Balgzylinder untersucht. Dazu wurden Schweißbereiche mit Ring- und Langbuckeln aufgenommen. Bei Balgzylinder ist der Anstieg der Kraft-Weg-Kennlinie abhängig von der Balgzylinder-Höhe und vom Innendruck.

### 7.4.1 Ringbuckel

Ein Schweißbereich, bei einem Zylinderhub von 75 mm, wurde mit vier Schweißkräften aufgenommen (Abbildung 47). Zur Untersuchung des Einflusses des Arbeitsbereiches von dem verwendeten Balgzylinder wurde der Zylinderhub auf 95 mm erhöht und weitere Versuche durchgeführt (Abbildung 104). Ein Vergleich (Abbildung 48) zeigt, dass sich die Versuche mit veränderten Zylinderhub in den ersten Schweißbereich einreihen, das heißt es ist kein Einfluss zu erkennen. Die weiteren Auswertungen werden wie in Kap. 7.3 beschrieben durchgeführt.



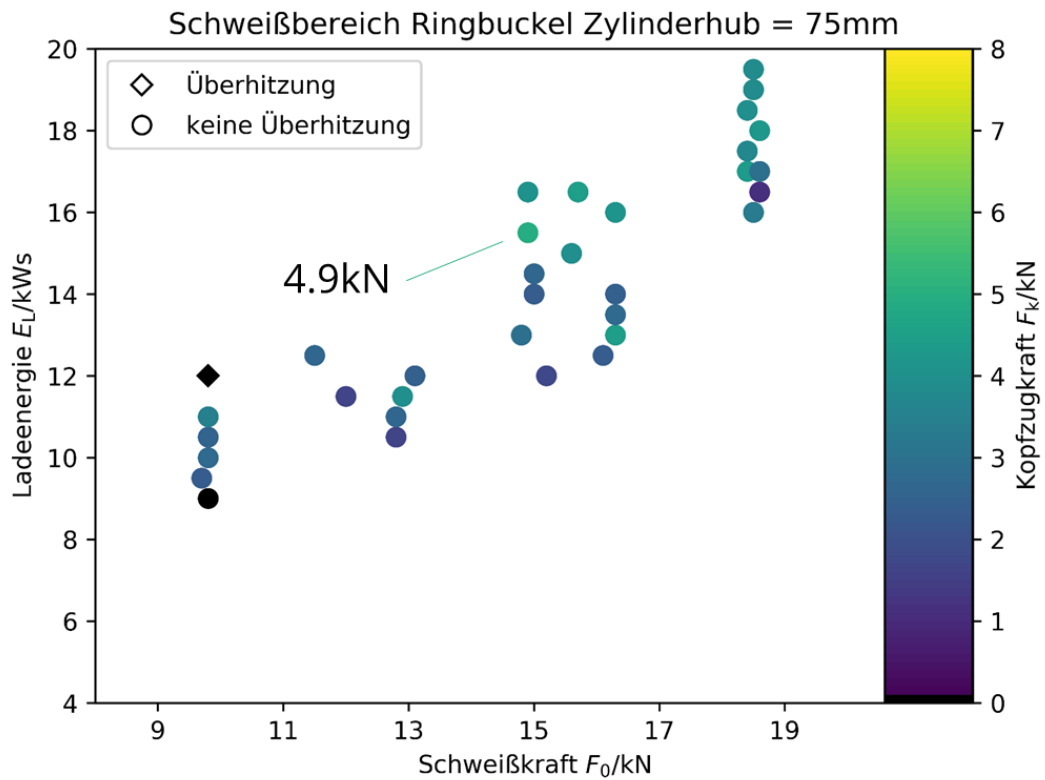


Abbildung 47: Schweißbereich Maschine 4 mit Zylinderhub 75 mm – Ringbuckel

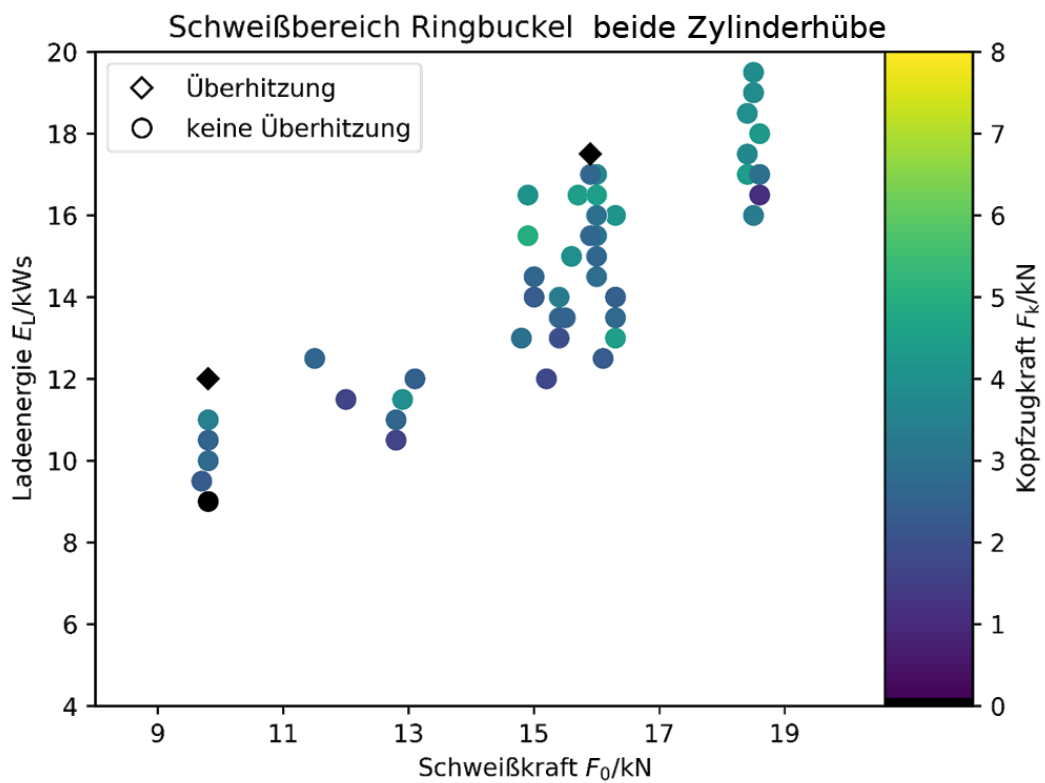


Abbildung 48: Schweißbereich Maschine 4 mit beiden Zylinderhüben – Ringbuckel

Die Ergebnisse sind in den Abbildung 105 und Abbildung 106 dargestellt. Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Tendenzen können bestätigt werden, jedoch ist das Bestimmtheitsmaß deutlich kleiner. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei der Schweißbereichserstellung unterschiedliche Ladeenergien eingestellt wurden. Es ist weiterhin im Schweißbereich zu erkennen, dass die höchste Kopfzugfestigkeit nicht bei maximal möglicher Ladeenergie auftritt, sondern bei etwas niedrigeren Energien (höchste erreichte Kopfzugkraft ist in den einzelnen Schweißbereichen markiert, z-B. Ringbuckel:  $E_L = 15500 \text{ Ws}$  entspricht  $\epsilon_{50} \approx 5,0 \frac{\text{kWs}}{50\mu\Omega}$ ). Durch die vermehrte Spritzerbildung wird zu viel Material aus der Fügeebene ausgetragen, was zu einer verminderten Verbindung führt.

Auch bei dieser Maschine war das Auftreten einer zweiten Spritzerphase erkennbar, welche auch am Spannungsverlauf identifiziert werden konnte.

#### 7.4.2 Langbuckel

Auch für die Langbuckel wurde ein Schweißbereich erstellt. Da in Kapitel 7.4.2 gezeigt wurde, dass der Zylinderhub keinen signifikanten Einfluss hat, wurde dieser Schweißbereich (Abbildung 49) weiter mit dem Zylinderhub 95mm aufgenommen. Auch hier wird die höchste Kopfzugkraft nicht bei maximaler, sondern bei einer etwas geringeren Ladeenergie erreicht. Auch ist in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen die beschriebene Stützwirkung des Langbuckels ersichtlich. Weiterhin ist die Stützwirkung in Abbildung 108 erkennbar. Die Kraft kann während des Prozesses um 90% abfallen, ohne dass es zur schlagartigen Metallverdampfung durch Kontaktabriss kommt, da der Buckel in der Mitte der linearen Ausdehnung noch für ausreichenden Kontakt sorgt.

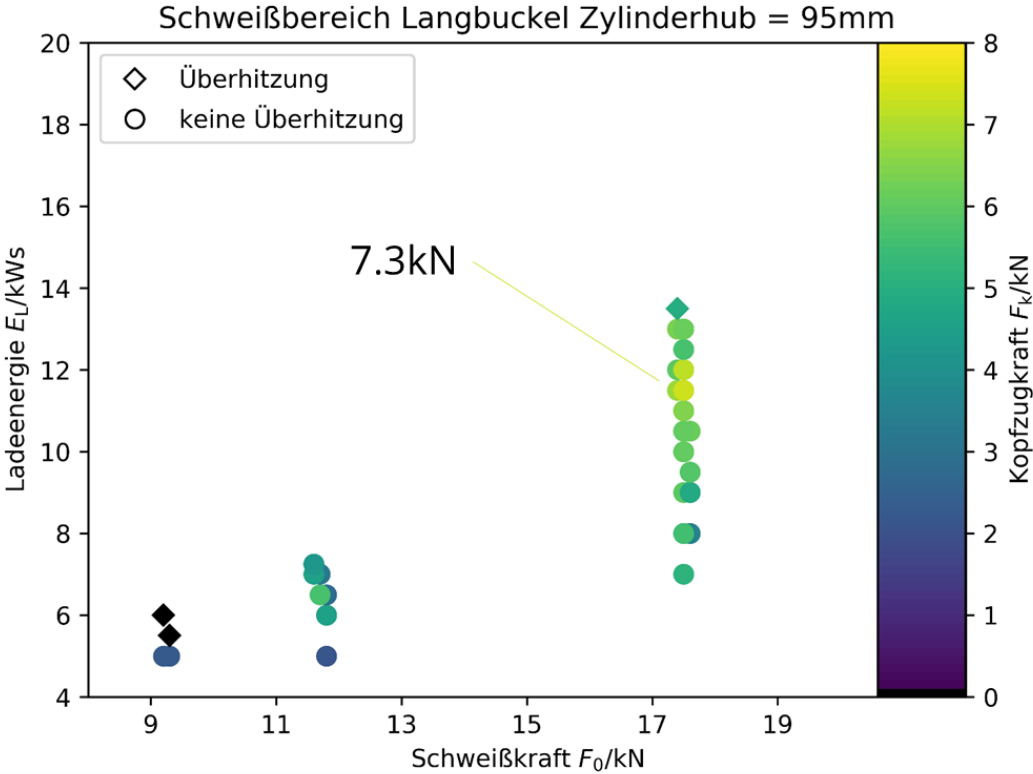


Abbildung 49: Schweißbereich Maschine 4 mit Zylinderhub 95mm – Langbuckel

## 8 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung“ (IGF-Nr.: 19.899 BR, DVS-Nr.: 04.075) mit einem Bewilligungszeitraum vom 01.01.2018 – 31.12.2019 wurde das Kondensatorentladungsschweißen von Aluminiumbuckeln wissenschaftlich untersucht. Die Untersuchungen beinhalteten geeignete Buckelgeometrien und die Koordination von mechanischen und elektrischen Prozessverläufen.

Die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben [1] konnten in diesem Vorhaben bestätigt und angewandt werden. Für die Verbindung kann eine zweite Spritzerphase (mikroskopische Spritzer, mit bloßem Auge nicht sichtbar) im Prozessablauf günstig sein. Dadurch kann die Aktivierung der Fügeflächen weiter verbessert werden. Allerdings zeigte sich, dass ein zu hohes Maß an Spritzern die Festigkeit der Verbindung wegen des großen Materialverlusts verschlechtert.

Im Forschungsvorhaben wurden Empfehlungen für geeignete Buckelgeometrien für das Aluminiumbuckelschweißen erarbeitet. Zu bevorzugen sind stumpfe Buckel mit einer schmalen Buckelringbreite, um die auftretende Verformung zu reduzieren und die Entgasung in der Fügeebene zu ermöglichen. Weiterhin sind Segmentbuckel oder linear ausgetragene Buckel zu bevorzugen, da eine Stützwirkung des Buckelinneren den Schweißprozess positiv beeinflusst.

Eine ausreichend genaue Kraftanstiegsgeschwindigkeit wurde an keiner der vier verwendeten Versuchsmaschinen verschiedener Hersteller (jeweils für das Projekt präparierte Prototypen) erreicht, trotz der vom Fachausschuss 4 geforderten Auflage, dass kraft- „getriggerte[s] Auslösen des Schweißstroms [...] als gelöst [gilt]“.

Dennoch konnten Erkenntnisse zum kraftgesteuerten Auslösen gewonnen werden. So zeigt sich bei hoher Kraftanstiegsgeschwindigkeit eine reduzierte Spritzerbildung, eine geringere Elektrodenbelastung und ein geringerer Kraftabfall. Jedoch wurde festgestellt, dass bei geringeren Kraftabfällen ebenfalls die ertragbare Kopfzugkraft der Verbindung sinkt. Außerdem konnten für die verwendeten Geometrien Grenzwerte festgelegt werden, auf den die Elektrodenkraft maximal abfallen darf. Diese Erkenntnis kann den Herstellern dienen, ihre Steuerungen zu verbessern. Es ist notwendig, die Regelkreise so schnell auszulegen, dass sie innerhalb der kurzen KE-

Schweißzeit auf Änderungen reagieren können und Kraftprofile zuverlässig und wiederholbar einhalten können.

## **9 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen und 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.

Die Verwendung der Zuwendungen für das wissenschaftlich-technische Personal an der Forschungseinrichtung, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik, Professur für Fügetechnik und Montage, erfolgte entsprechend dem Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes mit 24 PM in Vollzeit. Während der Projektlaufzeit wurden antragsgemäß keine Geräte (Einzelansatz B des FP) angeschafft und keine Leistungen Dritter (Einzelansatz C des FP) in Anspruch genommen. Für die experimentellen Untersuchungen wurde das durch die PA-Mitglieder zur Verfügung gestellte Versuchsmaterial verwendet und notwendiges, weiteres Probenmaterial unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte beschafft.

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

## 10 **Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Forschungsergebnisse für kleine und mitt- lere 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.

Die Erkenntnisse zum notwendigen Bewegungsablauf und die festgestellten Probleme der Antriebseinheiten dienen Maschinenherstellern und Anlagenbauern als Grundlage für Weiterentwicklungen, um mit optimierten Bewegungs- und Krafteinheiten die Schweißmöglichkeit von Aluminiumlegierungen zu verbessern und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern.

## 11 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

### 11.1 Fachtagungen, Kolloquien, Fachbeiträge

- Ketzler, Max-Martin (2018): Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung. Numerische und experimentelle Untersuchung zur Buckelgeometrie. Berichterstattung zum laufenden Projekt. öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 der AGV3 des DVS e.V. Düsseldorf, 26.11.2018.
- Ketzler, Max-Martin (2019): Buckelschweißen von Aluminiumlegierungen mittels Kondensatorentladungsschweißen mit veränderlicher Kraft und kraftgesteuertem Auslösen der Entladung. Einfluss des kraftgesteuerten AuslöSENS der Entladung. Berichterstattung zum laufenden Projekt. öffentliches Kolloquium des Fachausschuss 4 der AGV3 des DVS e.V. Düsseldorf, 26.11.2019.

### 11.2 Studien- und Abschlussarbeiten

- Natusch, Erik (2019): KE-Buckelschweißen von Aluminiumbauteilen. Diplomarbeit. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden. Professur Fügetechnik. (ein Zusammenarbeit der Professur Fügetechnik der Hochschule für Technik und Wirtschaft und der Professur Fügetechnik und Montage der Technischen Universität Dresden) [51]
- Dieckmann, Markus (2019): Übergangswiderstandsmessung an Aluminiumlegierungen. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Dresden. Professur Fügetechnik und Montage. [52]
- Theuring, Lucas (2019): Bewertung des Einflusses des Zündzeitpunktes in Abhängigkeit von der Kraft beim KE-Schweißen von Aluminiumlegierungen. Forschungsarbeit zum Fachpraktikum. Technische Universität Dresden, Dresden. Professur Fügetechnik und Montage. [53]



## 12 Transfermaßnahmen

### 12.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>A:</b> Informationen an die Unternehmen des PA	Fachliche Betreuung, Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU); gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	1. PA: 06.06.2018 2. PA: 12.12.2018 3. PA: 05.06.2019 4. PA: 11.12.2019
<b>B:</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
<b>C:</b> 4 geplante Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie 1 Zwischenbericht / 2 Zwischenpräsentationen vor dem FA 4 jeweils 1. und 2. HJ ab 01/2018	Darstellung und Diskussion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu den Unternehmen	PA: siehe Maßnahme A FA4: 12.06.2018 26.11.2018 26.06.2019 26.11.2019
<b>D:</b> Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungseinrichtung oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>E:</b> Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.5 „Kondensatorentladungs-schweißen“ im Ausschuss für Technik des DVS	Übernahme der Ergebnisse in Merkblätter, Arbeitsblätter und Normen	Jährlich (06/2018, 12/2018, 06/2019, 12/2019)
<b>F:</b> Beratung von Herstellern schweißtechnischer Aus-rüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend während der Projektlaufzeit
<b>G:</b> 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 06/2020  Akademische Arbeiten: s. Dieckmann, Theuring, Natusch

## 12.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>A:</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

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>B:</b> Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an den Forschungseinrichtungen oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	Fortlaufend
<b>C:</b> Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.5 „Kondensatorentladungs-schweißen“ im Ausschuss für Technik des DVS	Übernahme der Ergebnisse in Merkblätter, Arbeitsblätter und Normen	12/ 2020
<b>D:</b> Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen mit Fachbeitrag in Tagungsband	Informieren potenzieller Anwender, vor allem KMU, national und regional, gewinnen von Multiplikatoren	Große Schweißtechnische Tagung 2020
<b>E:</b> Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Fortlaufend auf Anfrage
<b>F:</b> 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
<b>G:</b> Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes und Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	2. Quartal 2020

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
<b>H:</b> Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	Dokumentation und Verbreitung der Forschungsergebnisse	voraussichtlich 2021
<b>I:</b> 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 06/2020

### 12.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

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

Eine weite Verbreitung der Forschungsergebnisse an KMU ist über die schon getätigten bzw. noch beabsichtigten Konferenzvorträge, Fachbeiträge in Zeitschriften und Tagungsbände sowie die Einbindung in die akademische Ausbildung an den Universitäten gegeben. Die Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (sowohl KMU als auch Großunternehmen) und auch weitere Firmen haben durch die Veröffentlichungen Zugriff auf die Forschungsergebnisse. Auch die Online-Veröffentlichungen auf den Internetseiten der Forschungseinrichtungen lassen erwarten, dass sich weitere KMU bei den Forschungseinrichtungen melden, um Forschungsergebnisse abzurufen und in die Praxis zu überführen. Eine Übernahme der Ergebnisse in Arbeitsblätter/Technische Regelwerke/Normen durch Zuarbeit bei der Überarbeitung von DVS-Merkblättern ist auf Anfrage vorstellbar und wird gerne unterstützt.

Die vorgeschlagenen und aktualisierten Transfermaßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen sind in

sich schlüssig, so dass von einer erfolgreichen Realisierung der noch geplanten Maßnahmen ausgegangen wird.

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] FÜSSEL, U. ; KETZEL, Max-Martin ; ZSCHETZSCHE, Jörg: *Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden : Schlussbericht IGF-Nr. 18.987 BR/DVS-Nr. 04.069* : Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage, 2018
- [2] FRÜNGEL, Frank B.: *Das Kondensator-Impulsschweißen : Wirkungsweise und Vorteile des Verfahrens - Physikalische Grundlagen - Durchführung des Verfahrens - Verwendete Schweißelektroden - Maschinelle Ausrüstung*. In: *Schweißen und Schneiden* 12 (1960), Nr. 1, S. 14–18
- [3] ACHATZ, S. ; REVERCHON, G.: *Kondensator-Entladungsschweißen – Klassiker mit neuem Elan*. In: *Blech in Form* (2006), Nr. 4, S. 70–73
- [4] GEBLER, R. ; TEGTMEIER, A. ; JÜTTNER, S.: Herausforderungen beim Widerstandspunktschweißen von Aluminiumblechen im Automobilbau. In: *DVS Congress 2016 : Große Schweißtechnische Tagung, DVS Studentenkongress : Vorträge der Veranstaltungen in Leipzig am 19. und 20. September 2016*. Düsseldorf : DVS Media, 2016 (DVS-Berichte, Band 327), S. 382–386
- [5] LANDGREBE, D. ; HEIDRICH, J. ; RIEDEL, F.: Potenzial des Kondensatorimpulsschweißens für schwer schweißbare Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. In: *DVS Congress 2016 : Große Schweißtechnische Tagung, DVS Studentenkongress : Vorträge der Veranstaltungen in Leipzig am 19. und 20. September 2016*. Düsseldorf : DVS Media, 2016 (DVS-Berichte, Band 327), S. 353–359
- [6] Merkblatt DVS 2911. April 2016. *Kondensatorentladungsschweißen – Grundlagen, Verfahren und Technik*
- [7] Merkblatt DVS 2930. Juli 2016. *Gestaltung von Buckelschweißwerkzeugen*
- [8] Deutsche Norm DIN 8519. Mai 1996. *Buckel für das Buckelschweißen von Stahlblechen. Langbuckel und Ringbuckel*
- [9] Deutsche Norm DIN EN 28167. Juli 1992. *Buckel zum Widerstandsschweißen*
- [10] Merkblatt DVS 2936. Dezember 2006. *Widerstandsbuckelschweißen von Aluminiumwerkstoffen von 0,35 bis 3,5 mm Einzeldicke*
- [11] PIERSIG, Wolfgang: *Geschichtlicher Überblick zur Entwicklung der Metallbearbeitung : Beitrag zur Technikgeschichte (8)*. München : GRIN Verlag GmbH, 2010

- [12] CRAMER, Heidi: *Widerstandsschweißen von höherkohlenstoffhaltigen Stählen mit sehr kurzer Wärmeeinbringung* : AiF-Nr. 2037/00 DVS-Nr. 4.027. München, Oktober 2003
- [13] KRÜGER, U.: Kondensator-Entladungsschweißen für vielfältige Schweißaufgaben. In: *Jahrbuch Schweißtechnik 2013*. Düsseldorf : DVS Media, 2012 (Jahrbücher), S. 200–211
- [14] Deutsche Norm DIN 1910-100:2008-02. Februar 2008. *Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzung zu DIN EN 14610:2005*
- [15] MATTHES, Klaus-Jürgen (Hrsg.); RICHTER, Erhardt (Hrsg.): *Schweißtechnik : Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen ; mit 130 Tafeln*. 3., verb. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2006
- [16] FRITZ, A. Herbert (Hrsg.); SCHULZE, Günter (Hrsg.): *Fertigungstechnik*. Berlin : Springer, 2010 (Springer-Lehrbuch 0)
- [17] Merkblatt DVS 2904. Mai 2010. *Steuerungen und Leistungsteile für das Widerstandsschweißen*
- [18] RUSCH, Hans-Jürgen: *Prozesstechnische Anforderungen und elektrotechnisches Design von Kondensatorentladungsmaschinen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage. Dissertation. 2018
- [19] DILTHEY, Ulrich: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 : Schweiß- und Schneidtechnologien*. 3., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (VDI-Buch)
- [20] Norm DIN EN ISO 18594. Juni 2007. *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollnahtschweißen - Verfahren für das Bestimmen des Übergangswiderstands von Aluminium - und Stahlwerkstoffen*
- [21] HAGMANN, Gert: *Grundlagen der Elektrotechnik : Das bewährte Lehrbuch für Studierende der Elektrotechnik und anderer technischer Studiengänge ab 1. Semester ; mit 4 Tabellen, Aufgaben und Lösungen*. 15., durchges. und korrigierte Aufl. Wiebelsheim : Aula-Verl., 2011
- [22] HERING, Ekbert (Hrsg.); MARTIN, Rolf (Hrsg.); GUTEKUNST, Jürgen (Hrsg.); KEMPKE, Joachim (Hrsg.): *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer*. 4., aktualisierte und verbesserte Auflage. Berlin : Springer Vieweg, 2018 (VDI-Buch)
- [23] HOLM, Ragnar: *Die technische Physik der elektrischen Kontakte*. Berlin : Verlag von Julius Springer, 1941 (Technische Physik in Einzeldarstellungen 4)

- [24] KNOBLAUCH, Günter ; HEINISCH, Tilman ; HENZLER, Magnus ; JUNCK, Herbert ; KATZIER, Helmut ; KNOLL, Ralf ; MOSEDALE, Gwillem ; PAULI, Peter ; RÖMER, Michael ; ULBRICHT, Helmar ; PREMIERLANI, Romeo: *Steckverbinder : Theorie der Kontakte, neue Technologien, Produkte und Management-Konzepte*. 5., durchgesehene Auflage. Tübingen : expert, 2019
- [25] CONNTRONIC PROZESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK GMBH: *CD Schweißmaschine - L Serie*. URL <https://www.conntronic.com/ct-standardmaschinen> – Überprüfungsdatum 2020-02-03
- [26] GLAMATRONIC SCHWEIß- UND ANLAGENTECHNIK GMBH: *Lieferprogramm Energiebereich 25-160kj*. URL <http://www.glamatronic.de/Energiebereich25-160kjoule.php> – Überprüfungsdatum 2020-02-03
- [27] CLAUSERT, Horst ; WIESEMANN, Gunther: *Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder : Mit 5 Tabellen*. 9. Aufl. München : Oldenbourg, 2005 (Grundgebiete der Elektrotechnik / von Horst Clausert; Gunther Wiesemann ; 1)
- [28] BÜTTNER, Wolf-Ewald: *Grundlagen der Elektrotechnik*. 2., verb. Aufl. München : Oldenbourg, 2006
- [29] NIMAK GMBH: *magneticDrive : The Weldolution*. URL [https://www.nimak.de/fileadmin/Dokumente/Prospekte/Automation/NIMAK\\_magneticDRIVE\\_d.pdf](https://www.nimak.de/fileadmin/Dokumente/Prospekte/Automation/NIMAK_magneticDRIVE_d.pdf) – Überprüfungsdatum 2020-02-03
- [30] PETERSMANN, Claus: *Kondensator-Impuls-Schweißen höher kohlenstoffhaltiger, rand-schichtgehärteter Einsatzstähle am Beispiel eines Pkw-Sitzbeschlages*. Aachen, RWTH Aachen, IFS. Dissertation. 2004
- [31] FRÜNGEL, Frank ; KNÜTEL, Walter: *Kurzzeitschweißen mit transformierter Kondensatorentladung*. In: *Schweißen und Schneiden* 17 (1965), Nr. 9, S. 503–504
- [32] STOCKS, Nicolas Stefan: *Optimierung der Buckelgeometrie zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften beim Kondensatorentladungsschweißen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Professur Füge-technik und Montage. Projektarbeit zum Fachpraktikum. 2016-04-30
- [33] Merkblatt DVS 2920-1. Juli 2017. *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlblechen bis 3 mm mit metallischen Überzügen - Teil 1: Überblick*
- [34] Merkblatt DVS 2919. September 2001. *Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von Stahlblechen und -bändern mit Aluminiumüberzügen*



- [35] Internationale Norm ISO 8167. November 1989. *Projections for resistance welding*
- [36] Deutsche Norm DIN EN ISO 16432. September 2007. *Widerstandsschweißen - Verfahren zum Buckelschweißen von niedriglegierten Stählen mit oder ohne metallischem Überzug*
- [37] DILTHEY, Ulrich ; DICKERSBACH, Jörg ; BOHLMANN, Hans-Christian: *Optimierung der Buckelgeometrie zum Schweißen mit Kondensatorimpulsstrom*. In: *Schweißen und Schneiden* 50 (1998), Nr. 1, 11-12,14,16-17
- [38] Merkblatt DVS 2944. Juli 2017. *Widerstandsbuckelschweißen an NE-Metallen und Werkstoffpaarungen für Kleinteile*
- [39] NEEF, Dieter: *Das Festigkeitsverhalten von Kondensator-Impuls-Schweißverbindungen eines Stahlbleches St37 unter Verwendung verschiedener Buckelformen*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Diplomarbeit. 2.1966
- [40] DEBAR, Rudolf: Die Aluminiumlegierungen. In: DEBAR, Rudolf (Hrsg.): *Die Aluminium-Industrie*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 1925, S. 170–246
- [41] Merkblatt DVS 2908. April 2006. *Messen beim Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen*
- [42] BRUNST, Walter: *Das elektrische Widerstandsschweißen*. Heidelberg : Springer, 1952
- [43] KETZEL, Max-Martin ; ZSCHETZSCHE, Jörg ; FÜSSEL, Uwe: *Eliminierung von Spannungsmessfehlern infolge hoher veränderlicher Ströme*. In: *Schweißen und Schneiden* 68 (2016), Nr. 11, S. 730–734
- [44] KETZEL, Max-Martin ; ZSCHETZSCHE, Jörg ; FÜSSEL, Uwe: *Elimination of voltage measuring errors as a consequence of high variable currents in resistance welding*. In: *Welding and Cutting* 16 (2017), Nr. 3, S. 164–168
- [45] EICHHORN, F. ; EMONTS, M. ; LEUSCHEN, B.: *Buckelschweissen von Aluminiumwerkstoffen mit unterschiedlichen Buckelarten*. In: *Aluminium* 58 (1982), Nr. 8, S. 451–457
- [46] EICHHORN, F. ; EMONTS, M. ; LEUSCHEN, B.: *Untersuchungen zum Buckelschweissen von Aluminiumwerkstoffen des Blechdickenbereiches 1-3,5 mm*. Hannover, 1982 (Report-Nr. DFB--15)
- [47] EMONTS, M.: *Beitrag zum Widerstandspunkt- und Buckelschweissen von Aluminiumwerkstoffen unter besonderer Berücksichtigung der Stromform*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, ISF. Dissertation. 1983

- 
- [48] Deutsche Norm DIN EN ISO 5821. April 2010. *Widerstandsschweißen - Punktschweiß-Elektrodenkappen*
- [49] Merkblatt DVS 2929-1. August 2014. *Messung des Übergangswiderstands – Grundlagen, Messmethoden und -einrichtungen*
- [50] Deutsche Norm DIN EN ISO 17653. August 2012. *Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Torsionsversuch an Widerstandspunktschweißverbindungen (ISO 17653:2012);*
- [51] NATUSCH, Erik: *KE-Buckelschweißen von Aluminiumbauteilen*. Dresden, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Professur Fügetechnik. Diplomarbeit. 2019
- [52] DIECKMANN, Markus: *Übergangswiderstandsmessung an Aluminiumlegierungen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage. Diplomarbeit. 2019
- [53] THEURING, Lucas: *Bewertung des Einflusses des Zündzeitpunktes in Abhängigkeit von der Kraft beim KE-Schweißen von Aluminiumlegierungen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage. Forschungsarbeit zum Fachpraktikum. 2019

## A Anhang

### A.1 Materialdaten und Buckeluntersuchung

#### A.1.1 Gesprächsprotokoll – Telefonat: M.-M. Ketzel mit Markus Tuchtfeld 25.01.2018 – ca. 16:30 Uhr

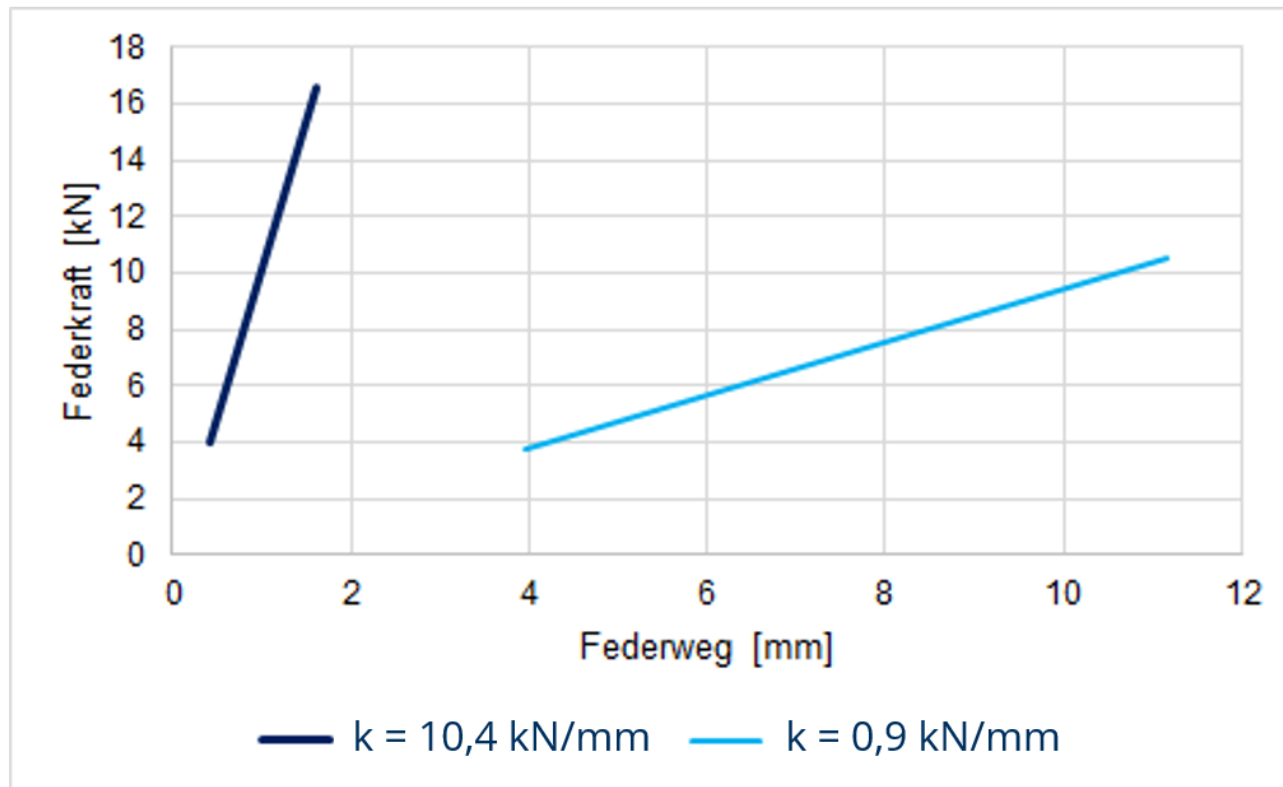
- Vorausgegangen war eine Mail mit den Fragestellungen:
  - welche Blechkombinationen können bei Buckelschweißverbindungen aus Aluminiumbauteilen sinnvoll eingesetzt werden
  - Bei welchen Bauteilen werden Fügeelemente eingesetzt (mech. Fügen)
  - Ziel: Festlegung der Materialdickenkombinationen für das Forschungsvorhaben
- Bei Blech-Blechverbindungen werden vor allem artgleiche Kombinationen eingesetzt
- Mögliche Verbindungen (Blech-Blech):
  - Strukturbauteil-Strukturbauteil AW-6000er + AW-6000er jeweils  $1,5 \leq t \leq 2,0$  (2,4)
  - Strukturbauteil-Strukturbauteil AW-5000er + AW-5000er jeweils  $1,5 \leq t \leq 2,0$  (2,4)
  - Strukturbauteil-Außenhaut AW6000er (t=s.o.) + AW-6000er  $0,9 \leq t \leq 1,2$  Buckel in Strukturbauteil
  - Strukturbauteil-Außenhaut AW5000er (t=s.o.) + AW-6000er  $0,9 \leq t \leq 1,2$  Buckel in Strukturbauteil
  - Hintergrund: 5000er ist umformtechnisch besser zu verarbeiten, kann aber als Außenhautblech wegen Streifen durchs umformen nicht angewendet werden
- Anwendung von Fügeelementen nur an Strukturbauteilen
- 5000er Strukturbauteil wie oben
- 7000er werden kaum eingesetzt (einzig bekannter Anwendungsfall ist Chevrolet Corvette)
- Wenn 7000er dann als Verstärkungsbauteil, eingesetzte Dicke schwer abzuschätzen
- Empfehlung: 1,7 – 2,0

## A.2 Maschinenkenndaten

Tabelle 8: Kenndaten der verwendeten KE-Schweißmaschinen

	<b>Maschine 1</b>	<b>Maschine 2</b>		<b>Maschine 3</b>	<b>Maschine 4</b>
Kapazität	1,2mF	8,0mF	16,0mF	9,0mF	17,8mF
max. Ladespannung	3200V	1300V		3200V	1500V
max. Ladeenergie	6,1kj	6,8kj	13,6kj	46kj	20kj
$t_p$	7,2ms	1,9ms	2,9ms	4,6ms	2,8ms
$I_p$	97 – 103kA	69 – 106kA	105 – 134kA	100 – 160kA	108 – 158kA
$t_h$	13,2ms	5,4ms	6,7ms	9,9ms	6,8ms
eingesetzte Elektrodenkraft	2 – 19kN	4,5 – 6,5kN		5 – 25kN	9 – 19kN
Kraftaufbringung	Kurbelantrieb	Pneumatikzylinder		Elektroservomotor + Magnetantrieb	Elektroservomotor

Art der Nachsetzeinheit	Elastomerfederpaket	Elastomerfeder	Magnetantrieb	Balgzylinder
Gestellart	C-Gestell	C-Gestell	Portal	C-Gestell



realisierbare  
Kraftanstiege:

— 15 N/ms  
— 10 N/ms

Abbildung 50: Federkennlinien der eingesetzten Federn in Maschine 2

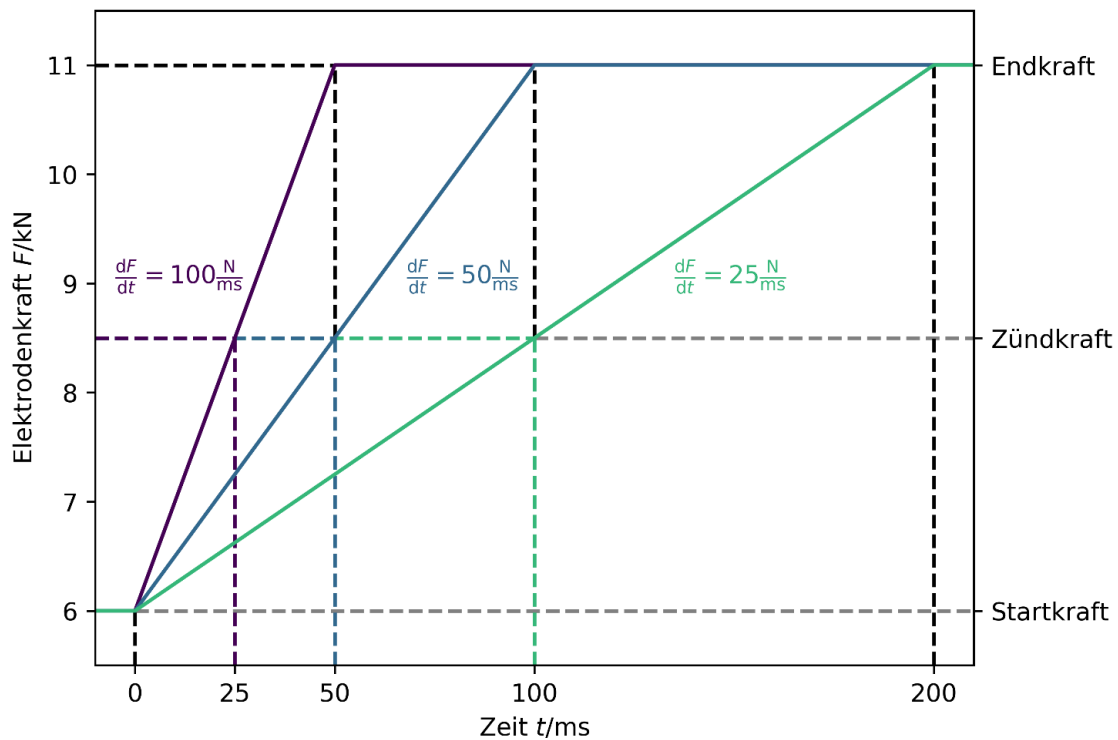


Abbildung 51: Drei verwendete Kräfteinstellung an Maschine 3 bei Zündkraft 8,5 kN

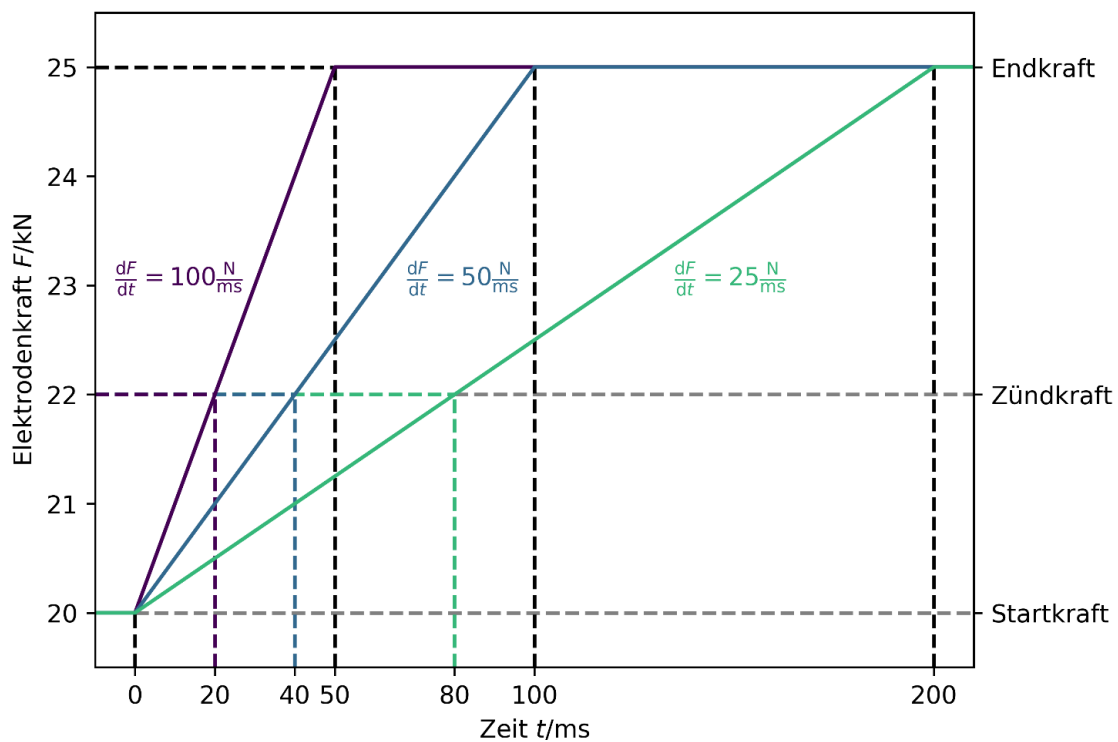


Abbildung 52: Drei verwendete Kräfteinstellung an Maschine 3 bei Zündkraft 22 kN

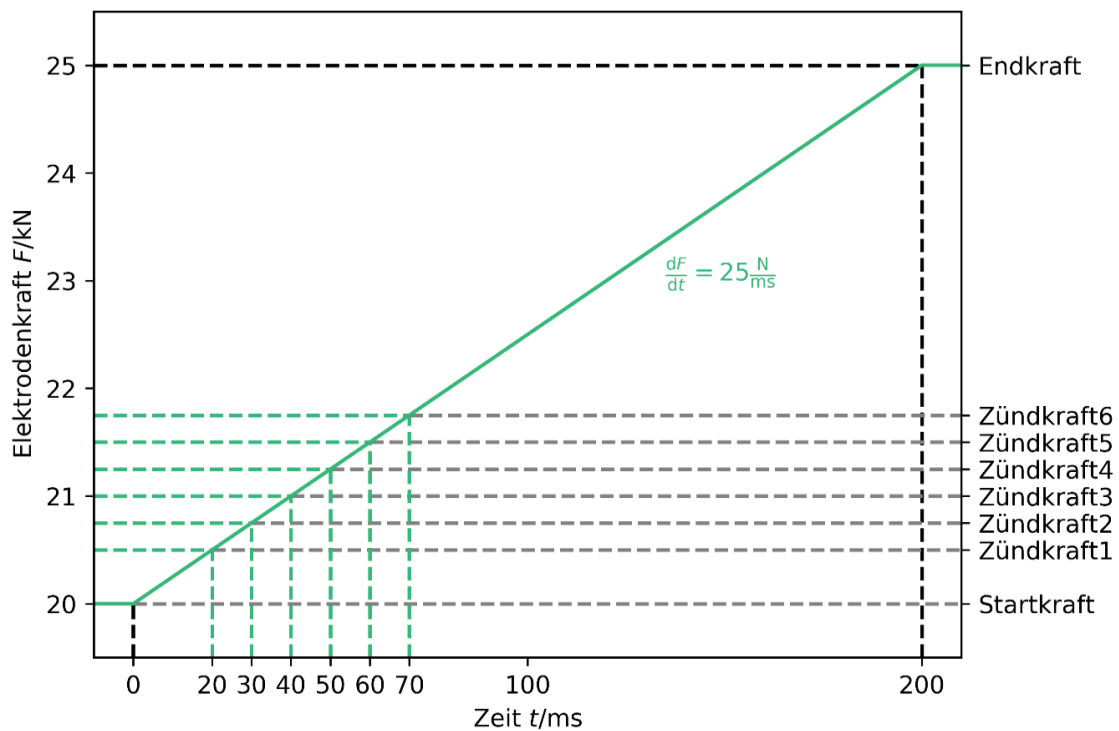


Abbildung 53: Verwendete Krafteinstellung an Maschine 3 bei Krafterhöhung von 20 auf 25 kN in 50 ms

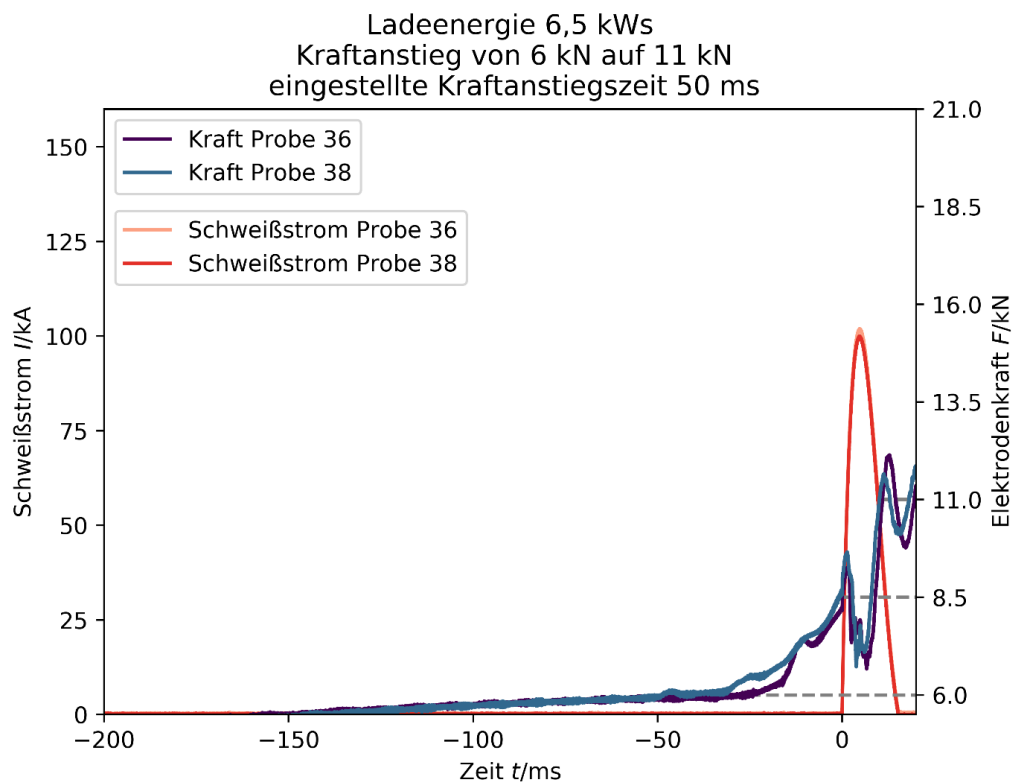


Abbildung 54: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 100 N/ms

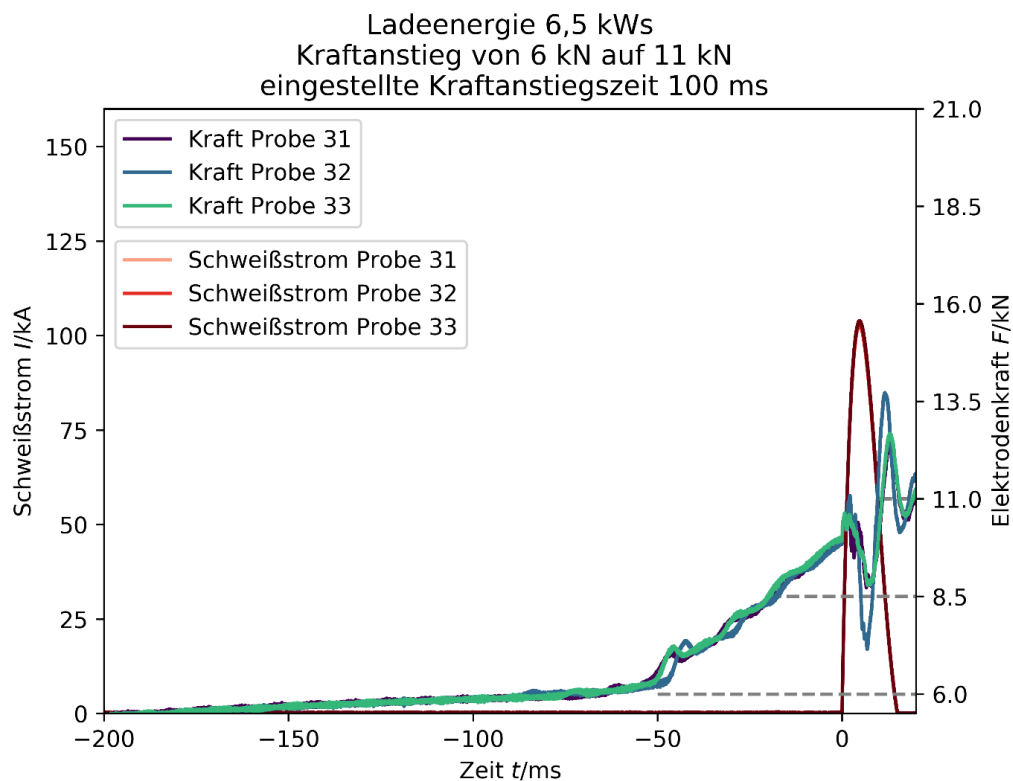


Abbildung 55: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 50N/ms

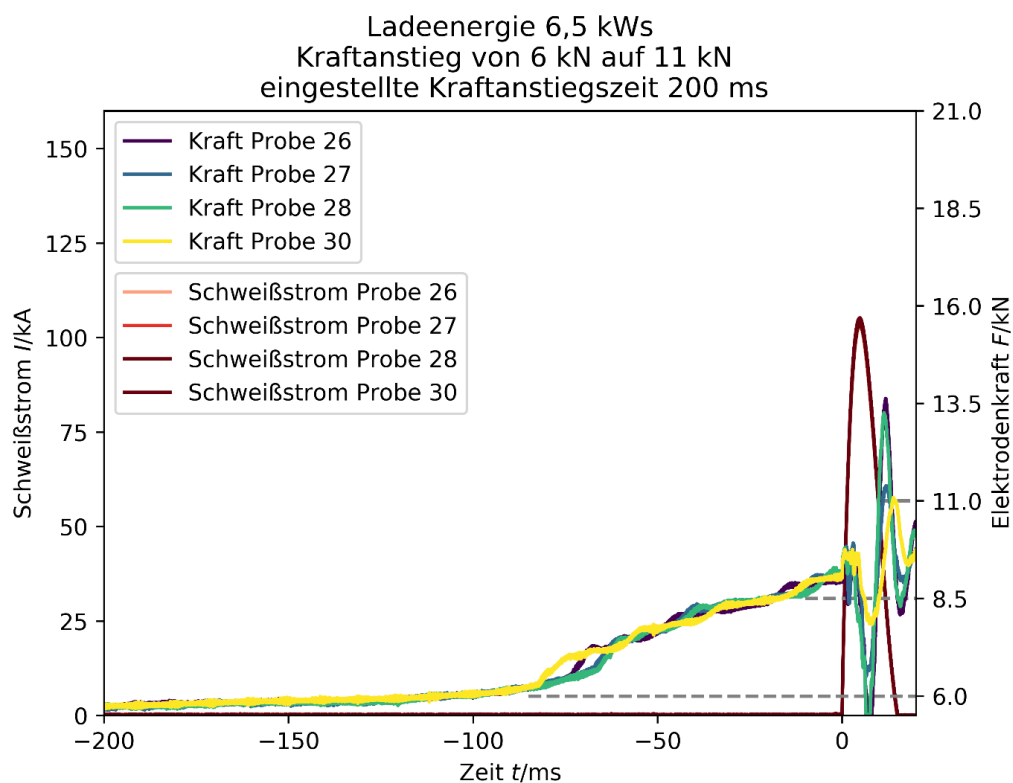


Abbildung 56: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 25N/ms



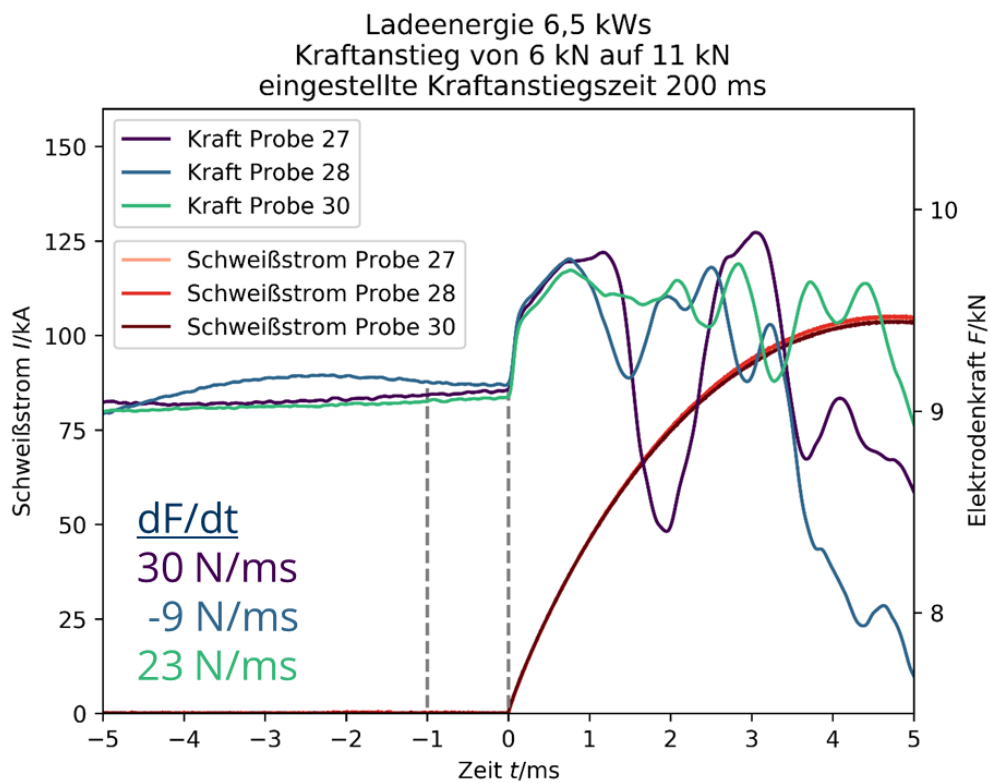


Abbildung 57: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 25 N/ms. Auswertung 1 ms

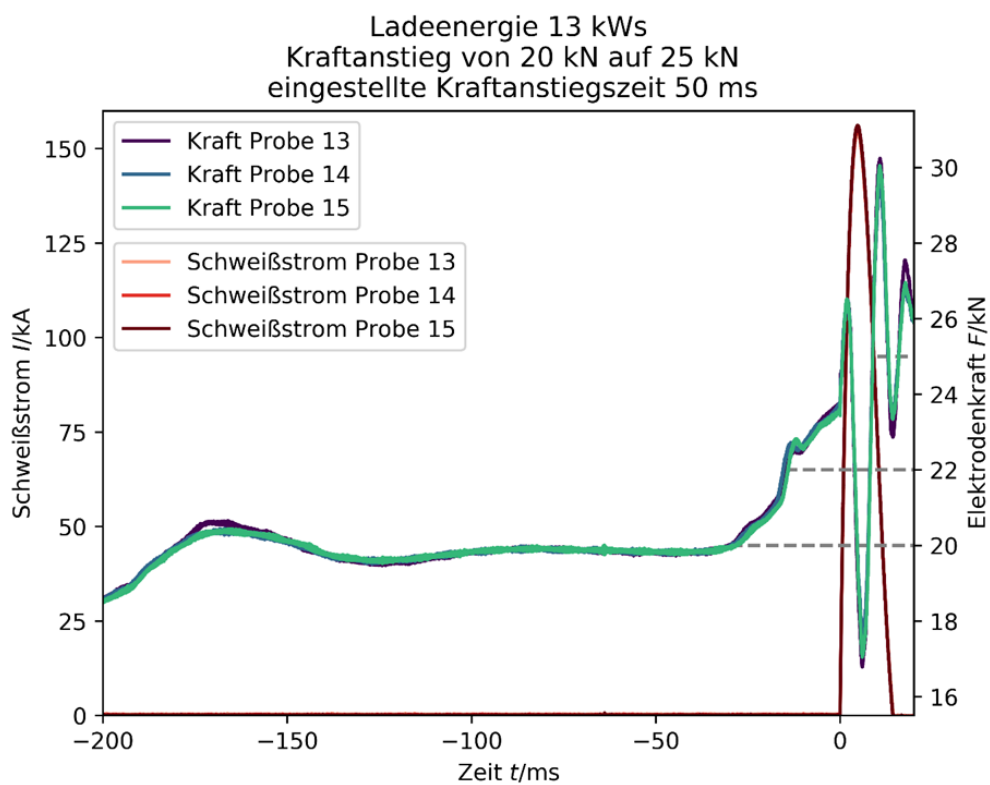


Abbildung 58: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 100 N/ms

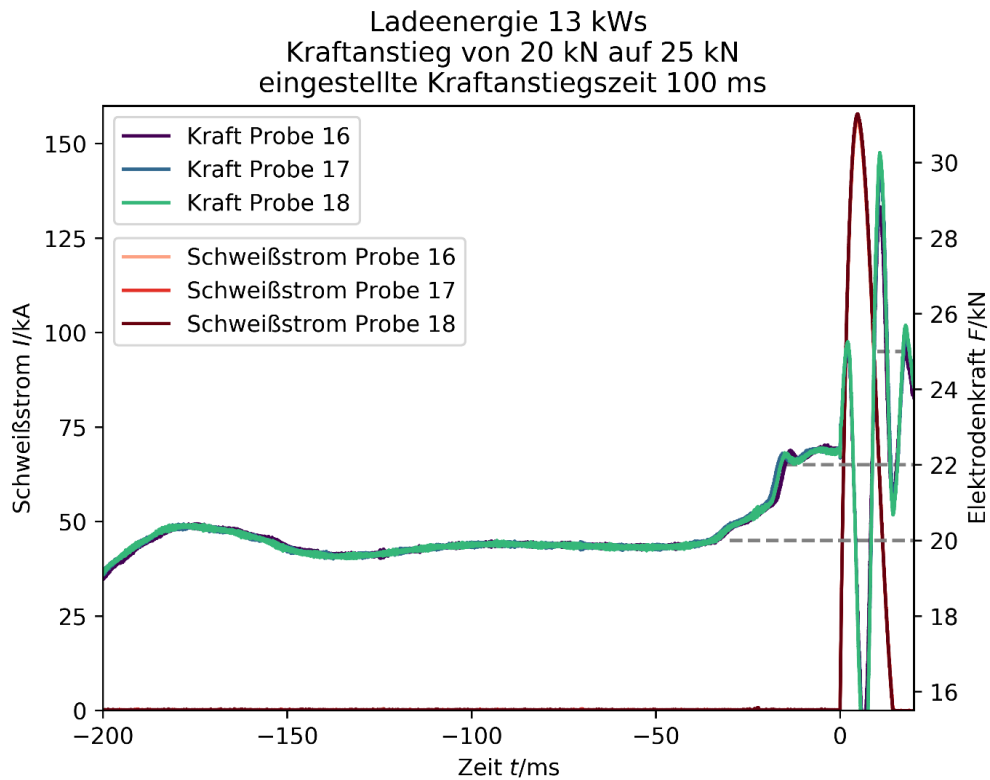


Abbildung 59: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 50 N/ms

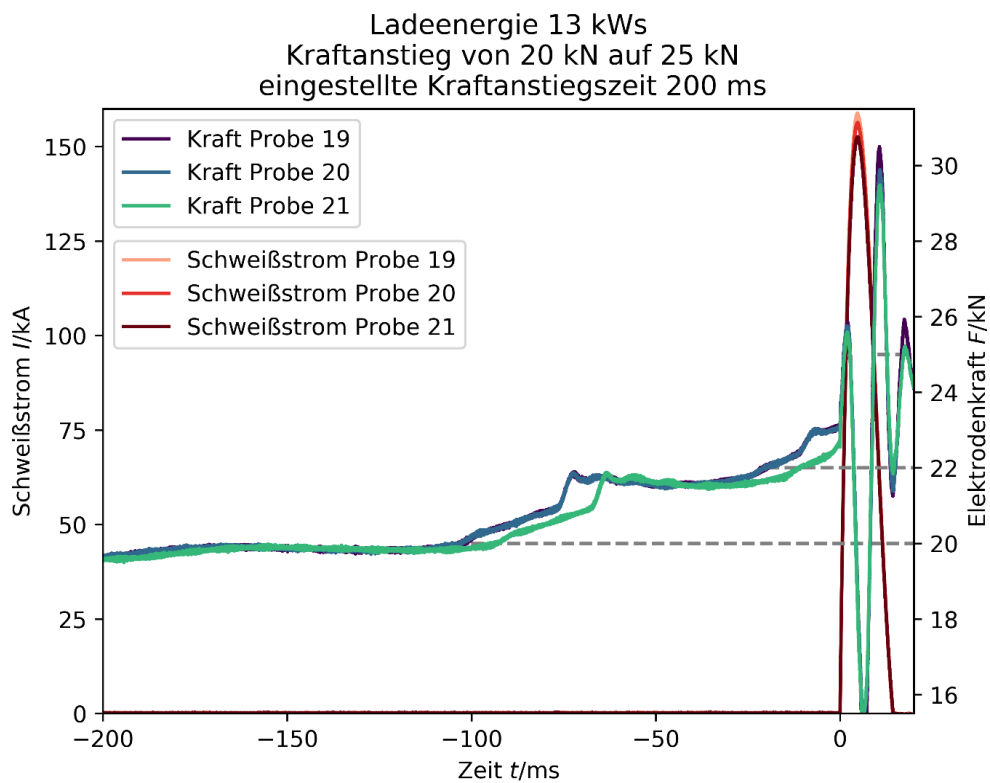


Abbildung 60: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegsgeschwindigkeit 100 N/ms

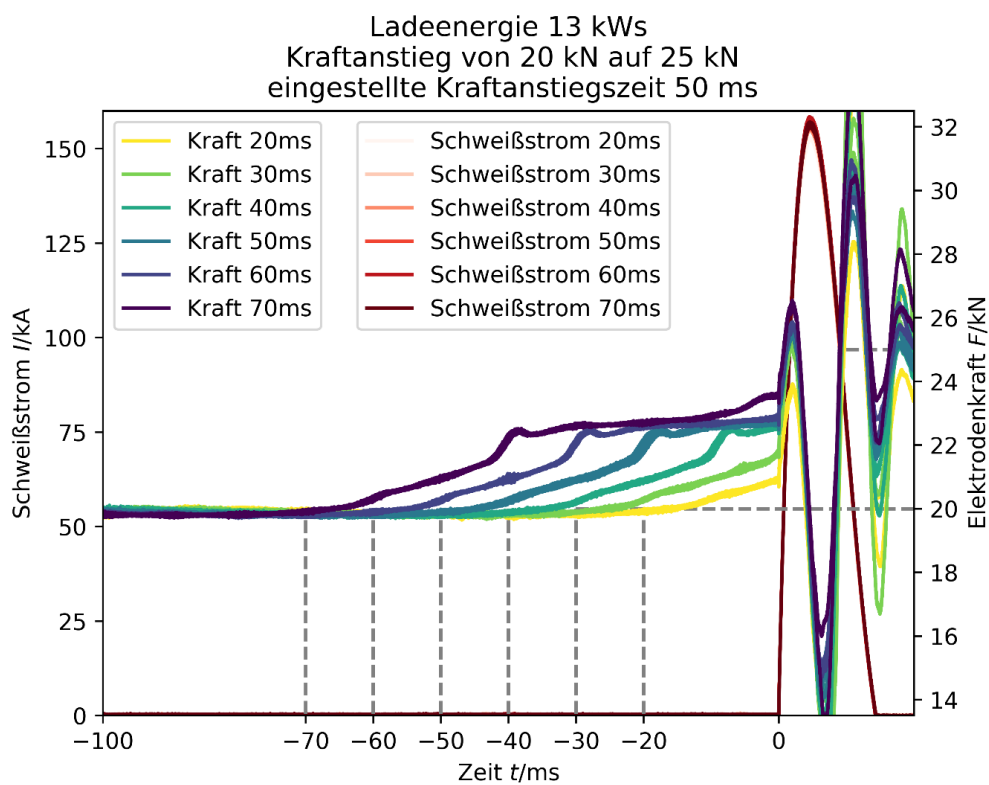


Abbildung 61: Ausgewählte Versuche mit Kraftanstiegszeit 50 ms – verschiedene Zündzeitpunkte

A.3 Auswertung Schweißversuche

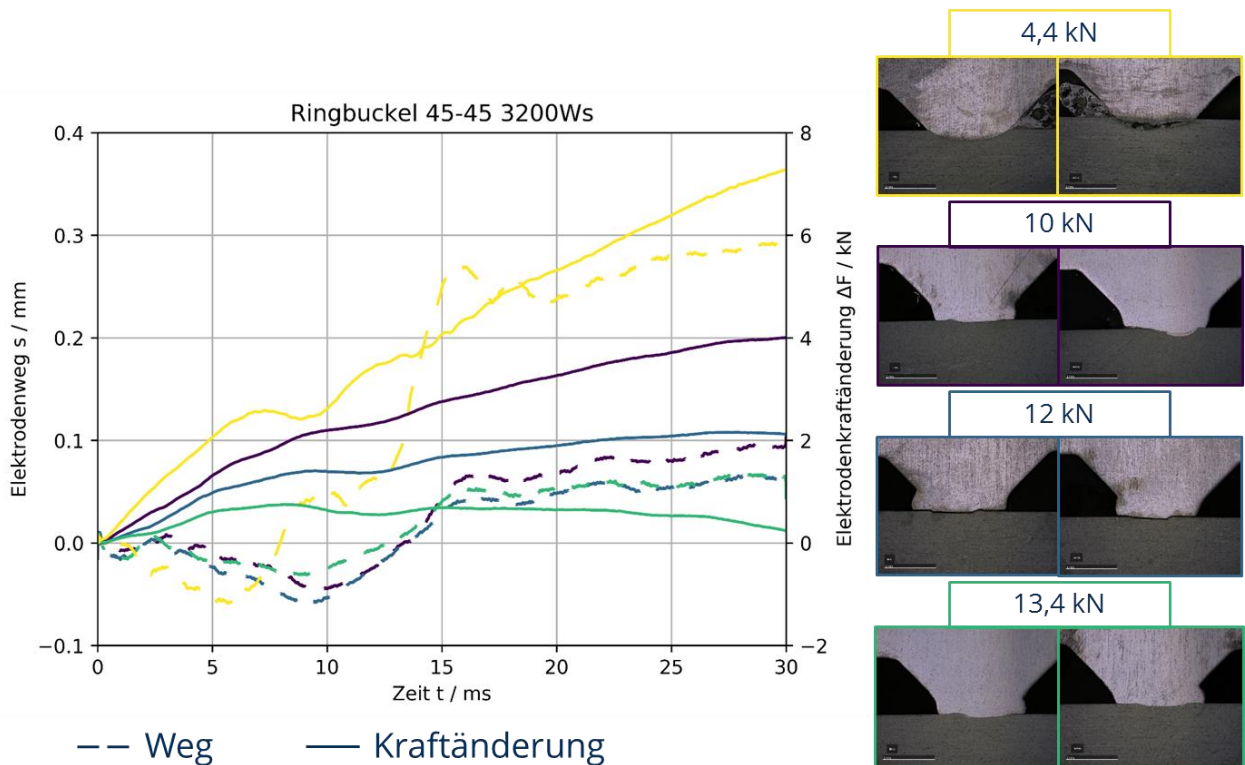


Abbildung 62: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45°

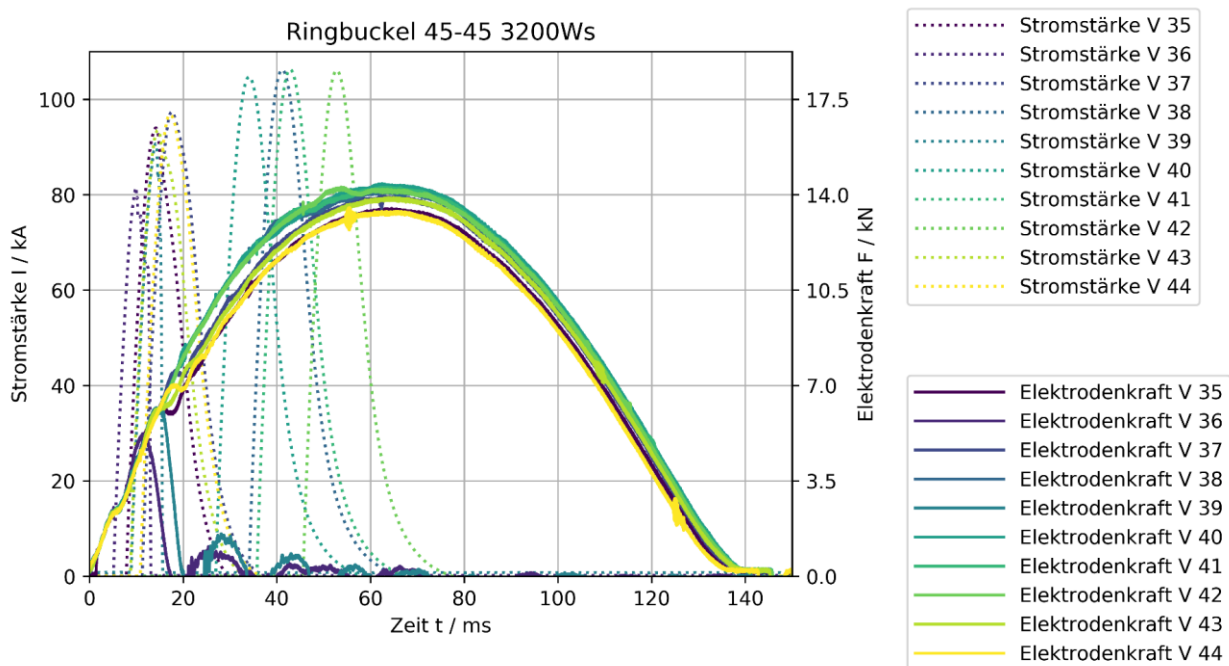


Abbildung 63: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45°

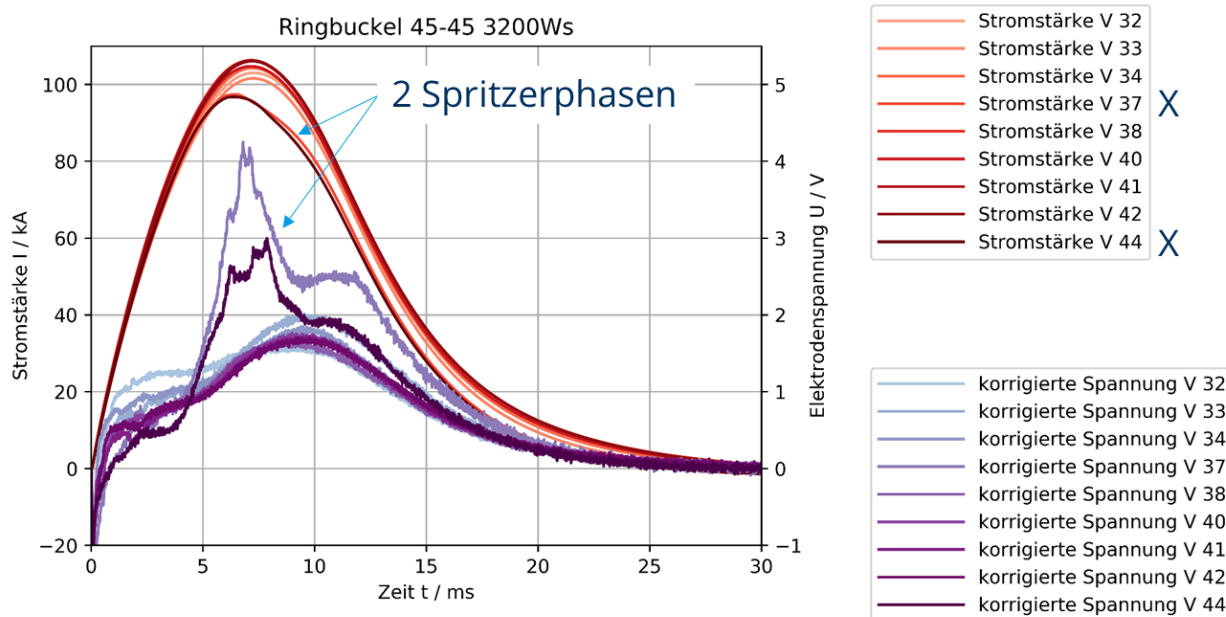


Abbildung 64: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45°

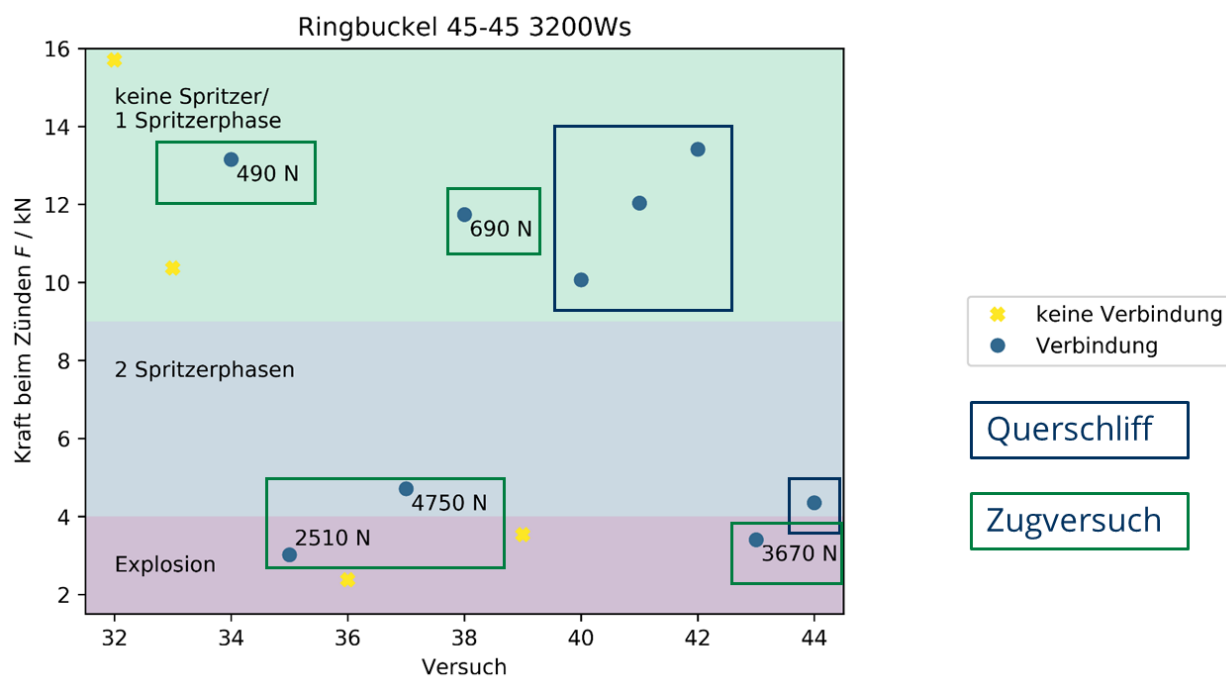


Abbildung 65: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 45°/45°

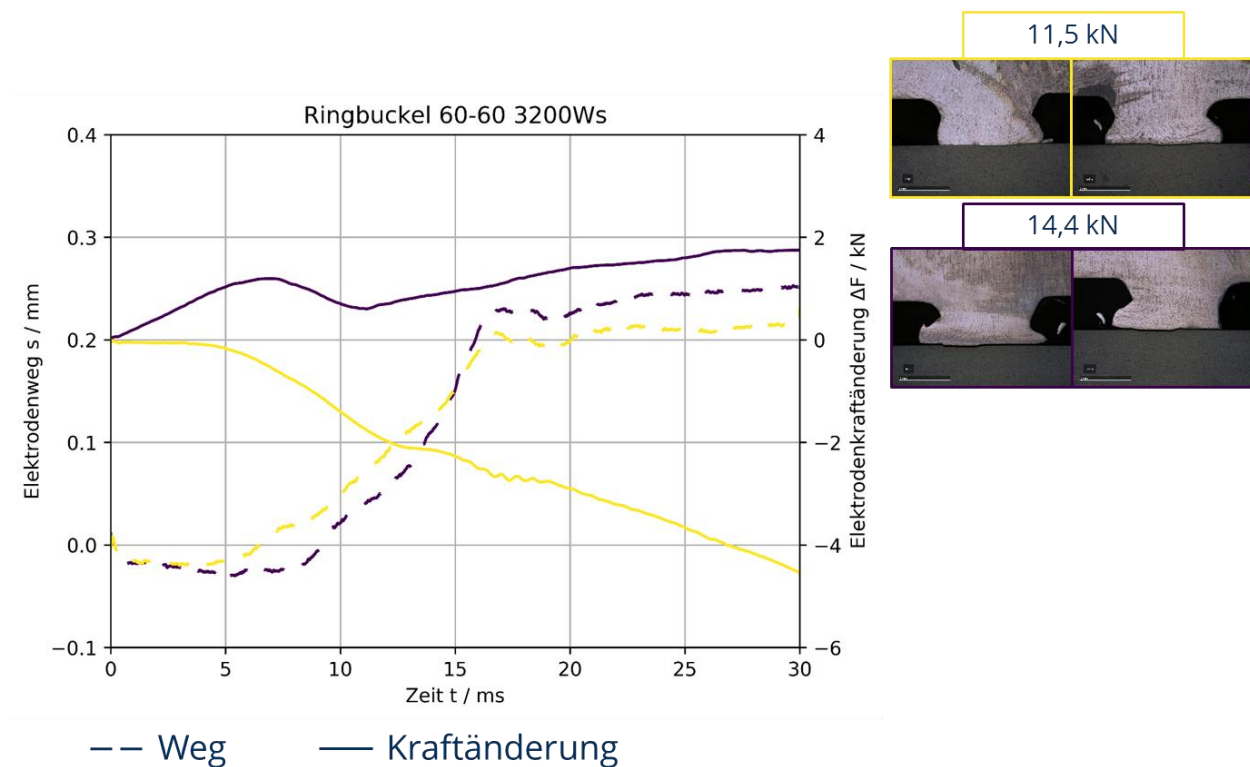


Abbildung 66: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60°

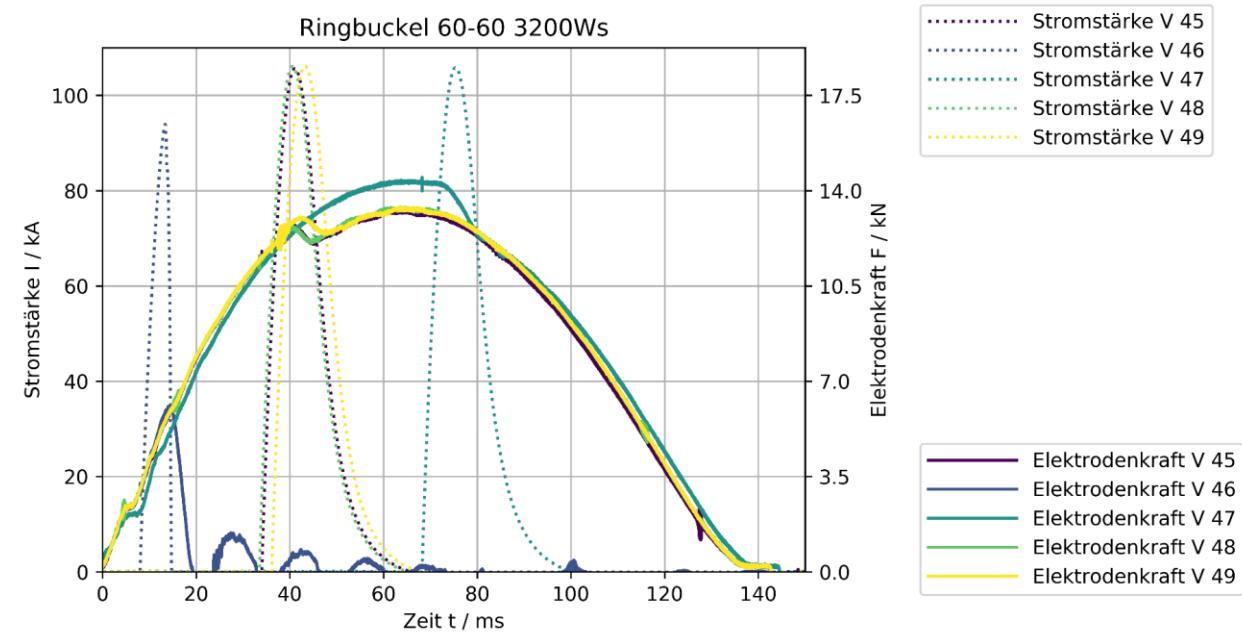


Abbildung 67: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60°

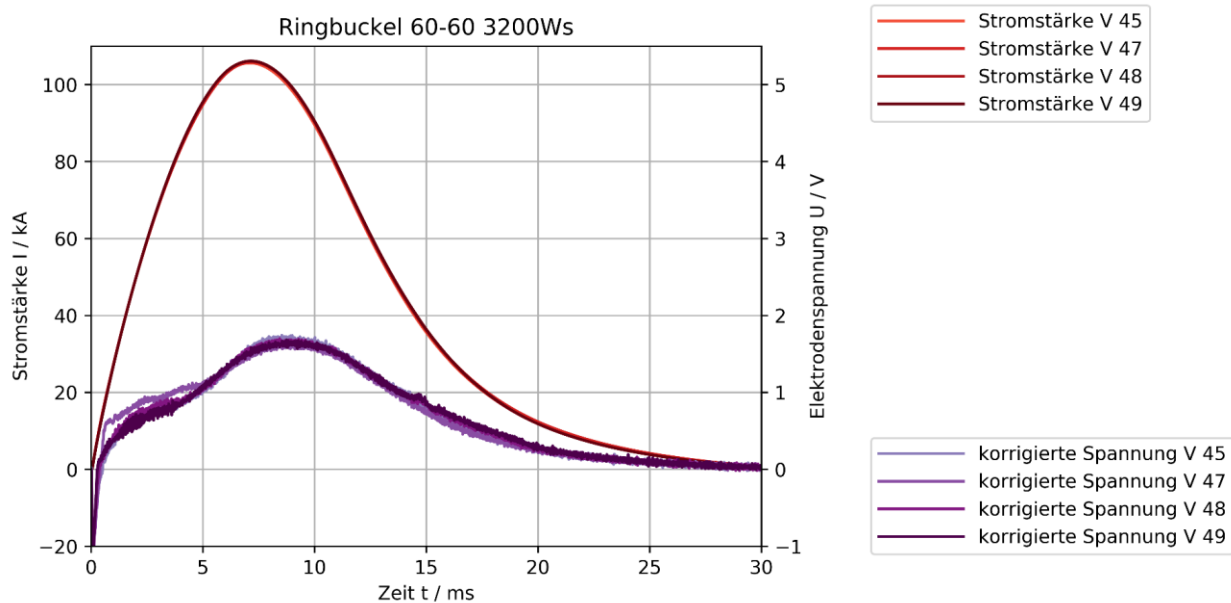


Abbildung 68: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60°

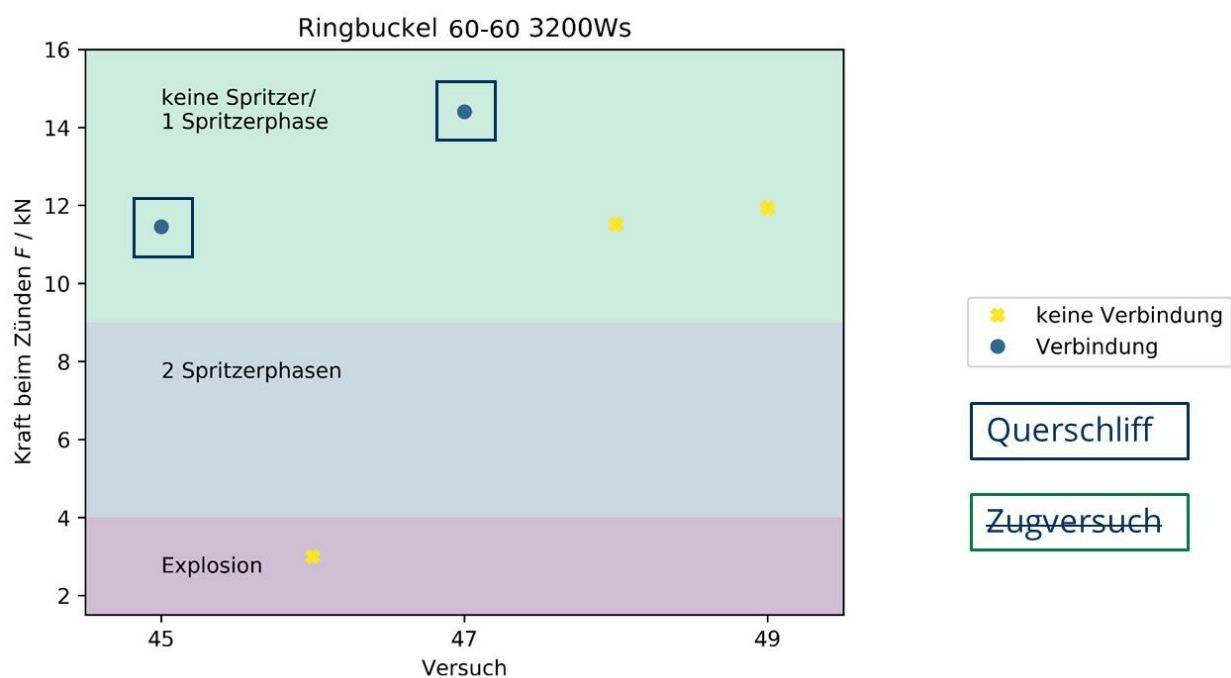


Abbildung 69: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/60°

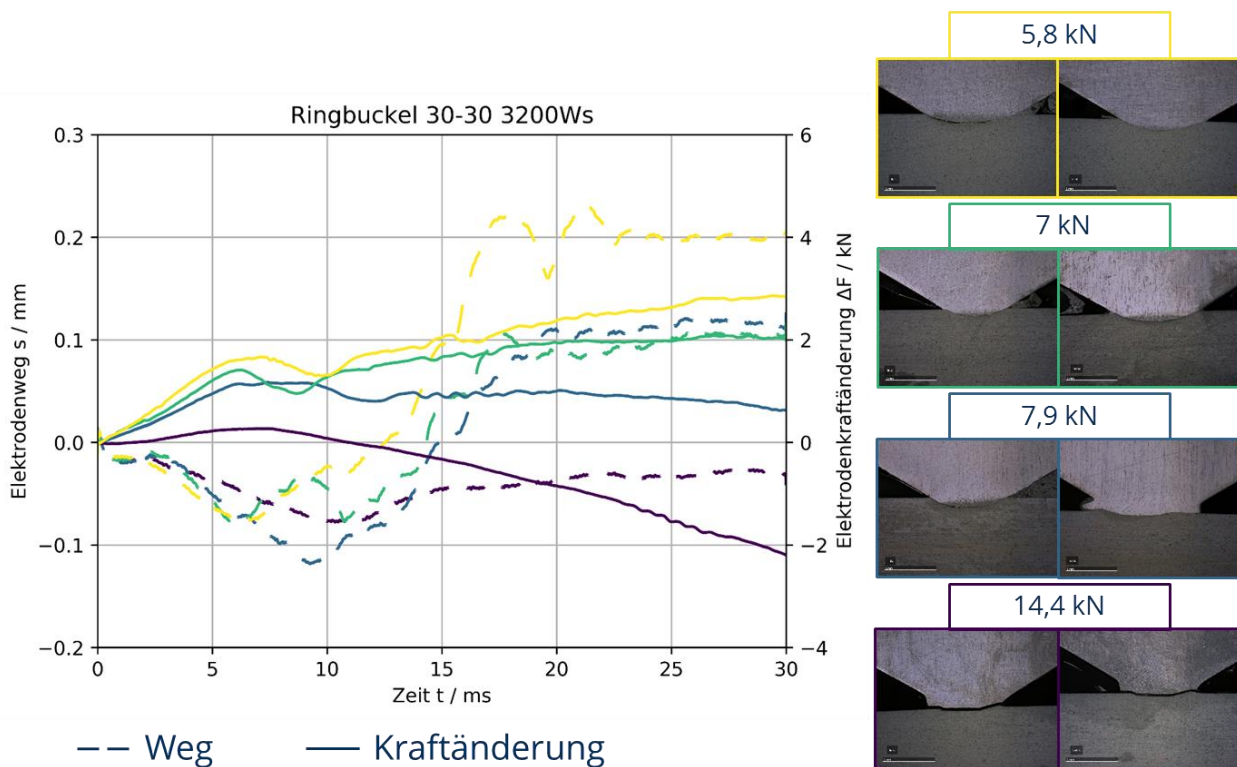


Abbildung 70: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°

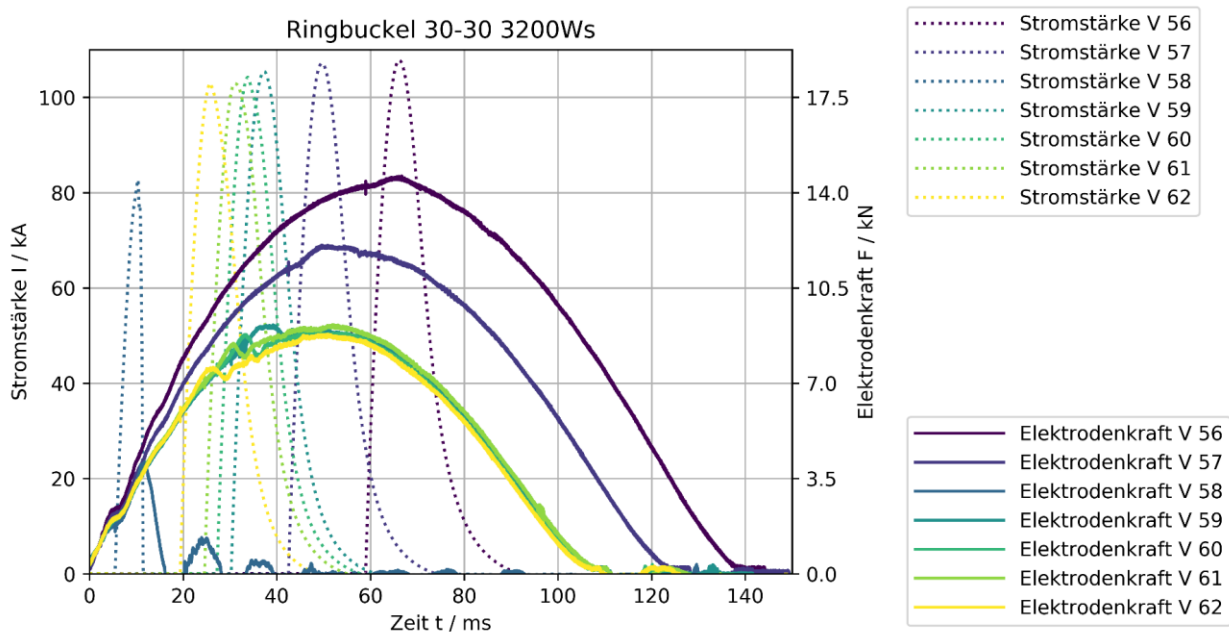


Abbildung 71: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°



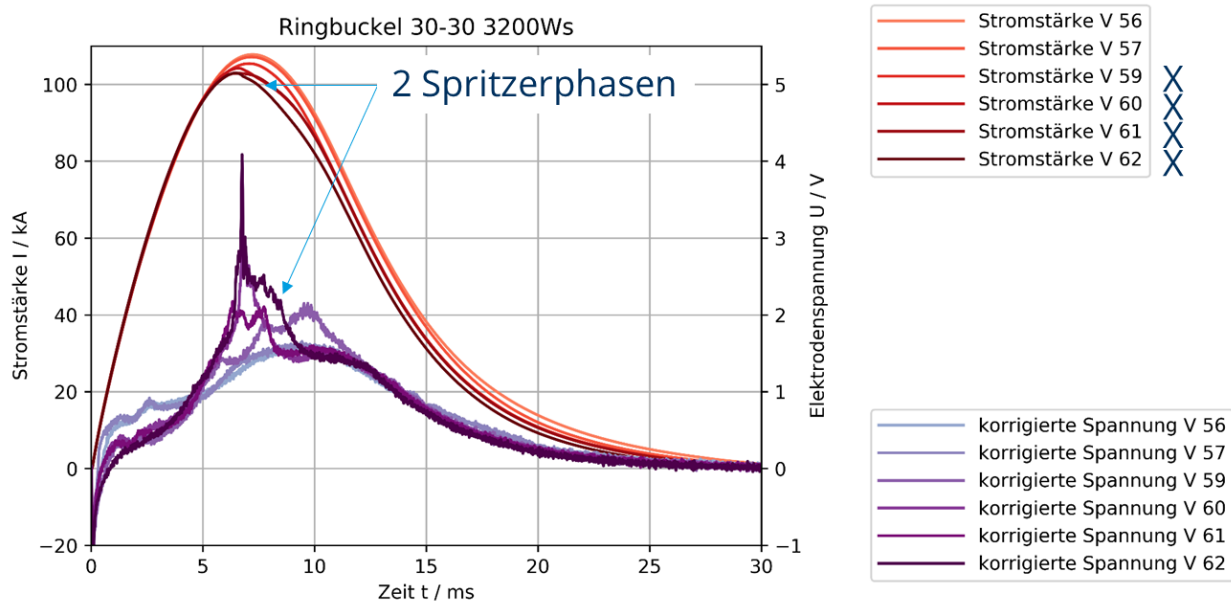


Abbildung 72: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°

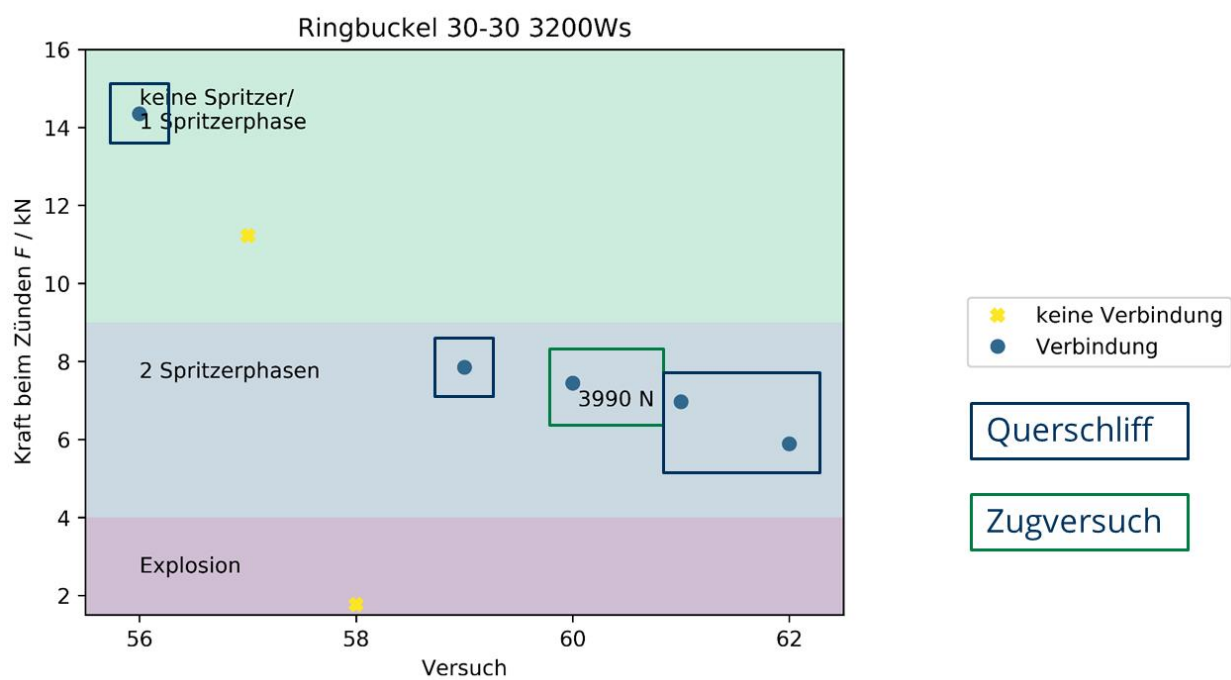


Abbildung 73: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/30°

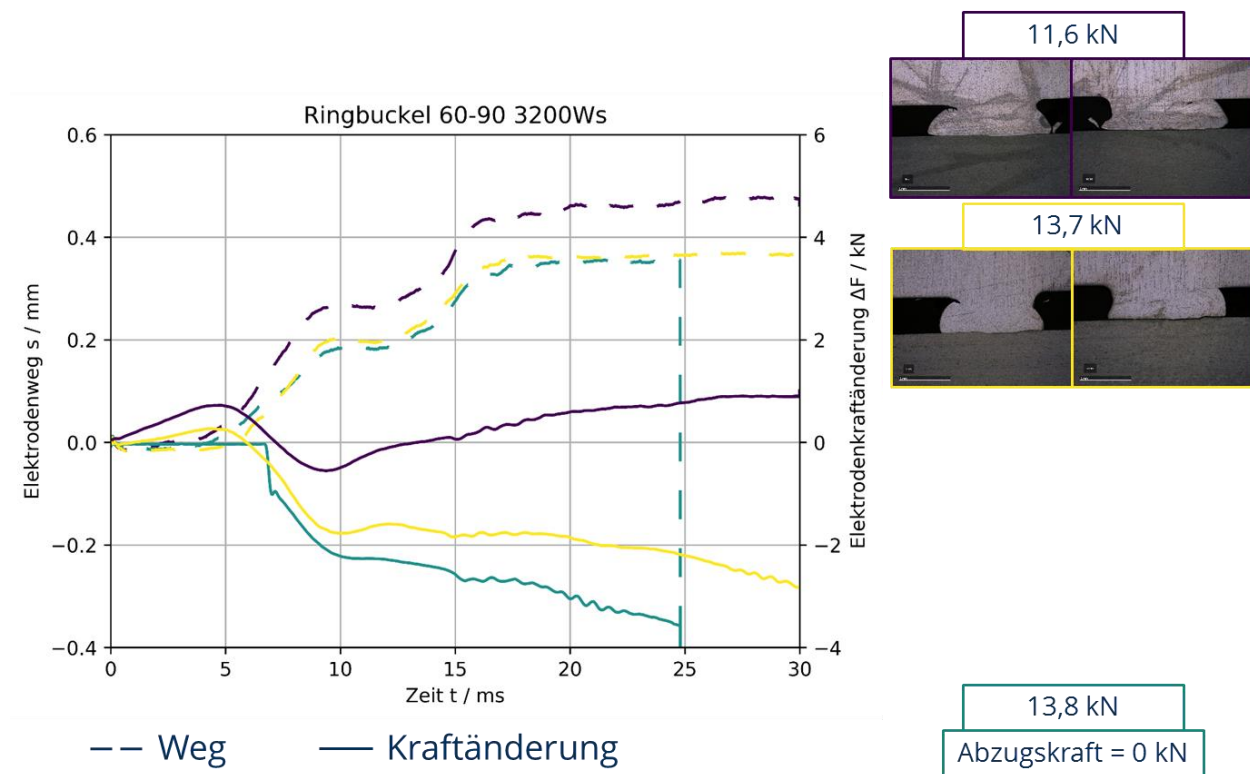


Abbildung 74: Weg- und Kraftänderung an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°

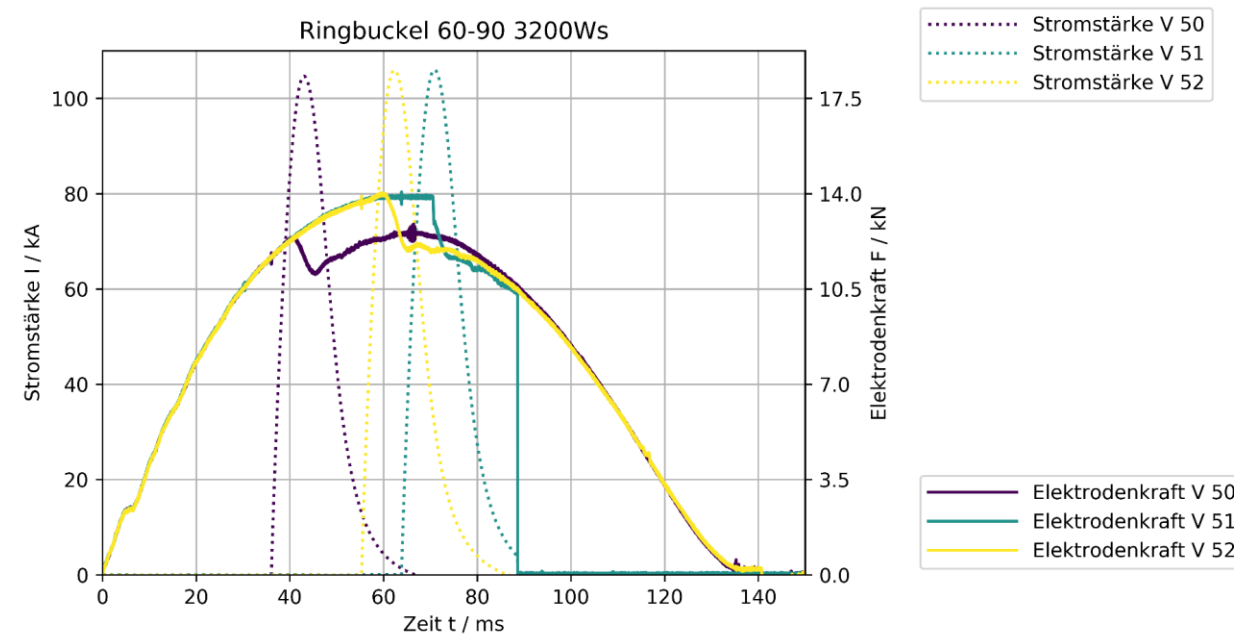


Abbildung 75: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°

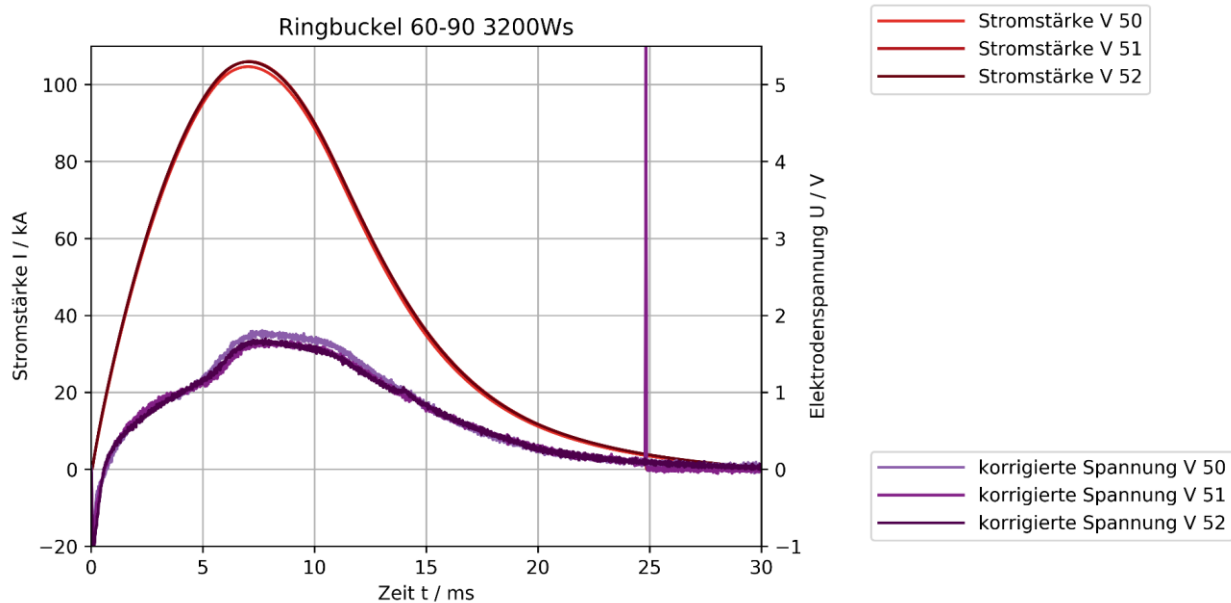


Abbildung 76: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°

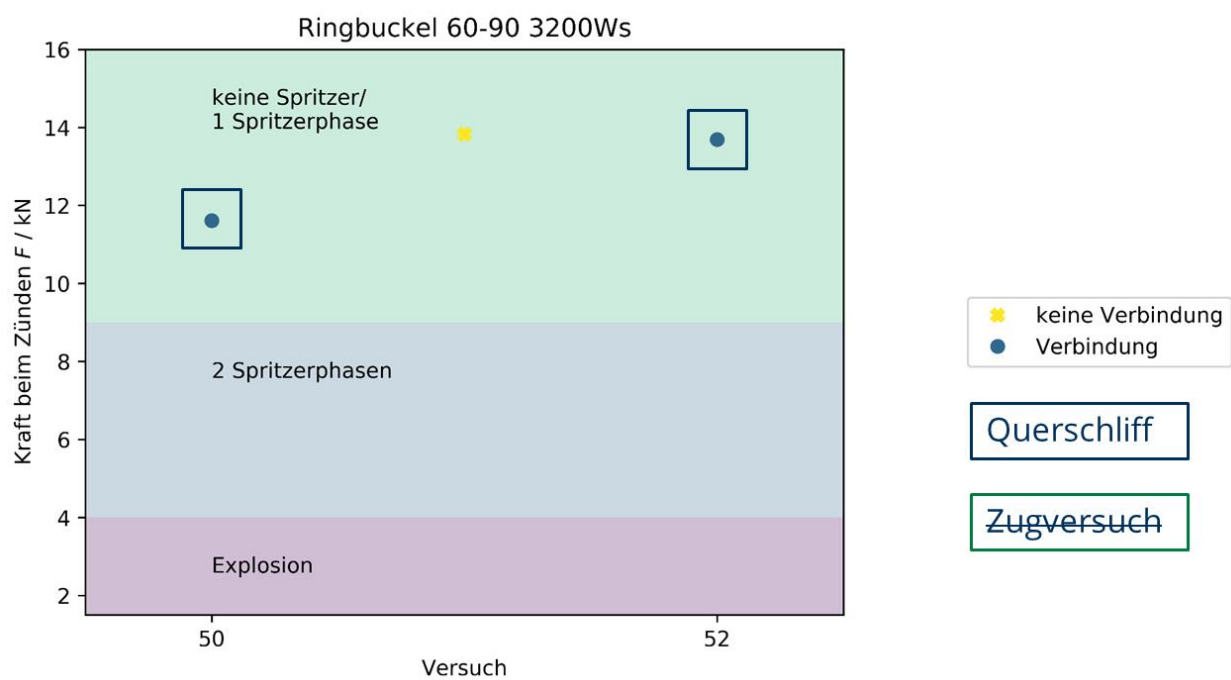


Abbildung 77: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 60°/90°

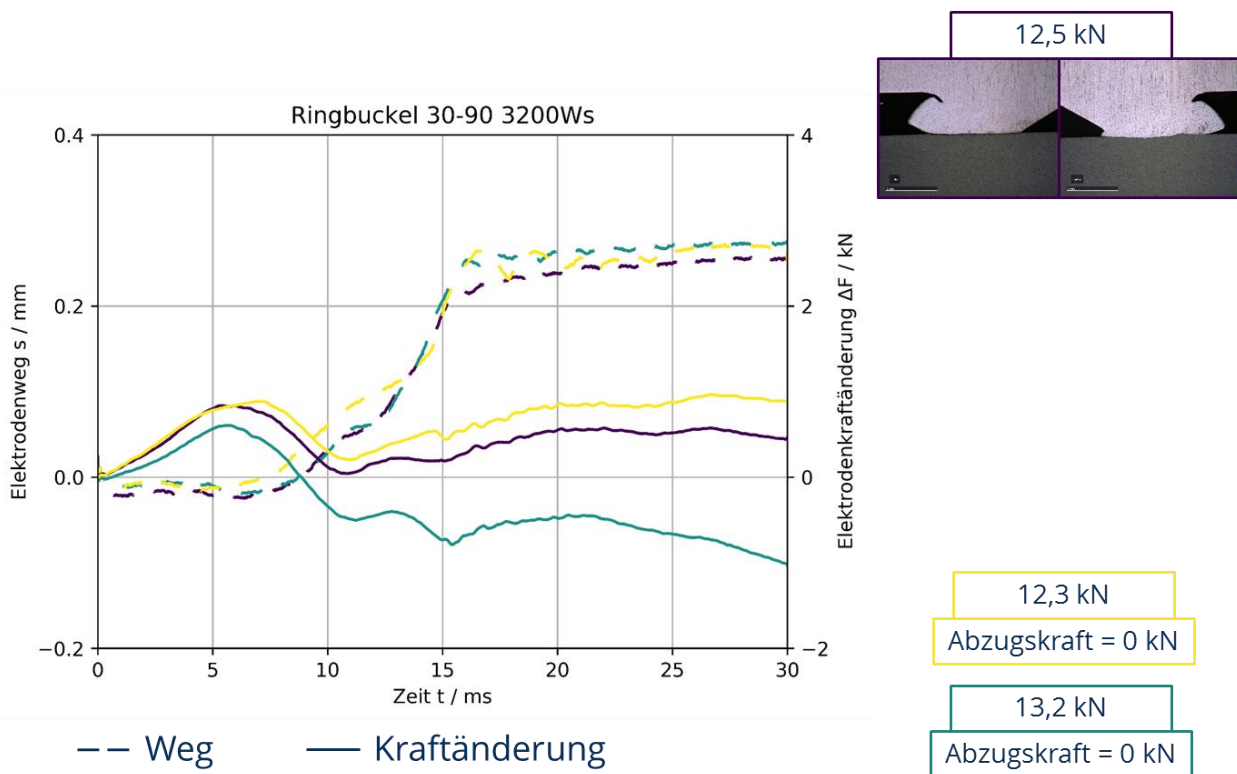


Abbildung 78: Weg und Kraftverläufe an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln  $30^\circ/90^\circ$

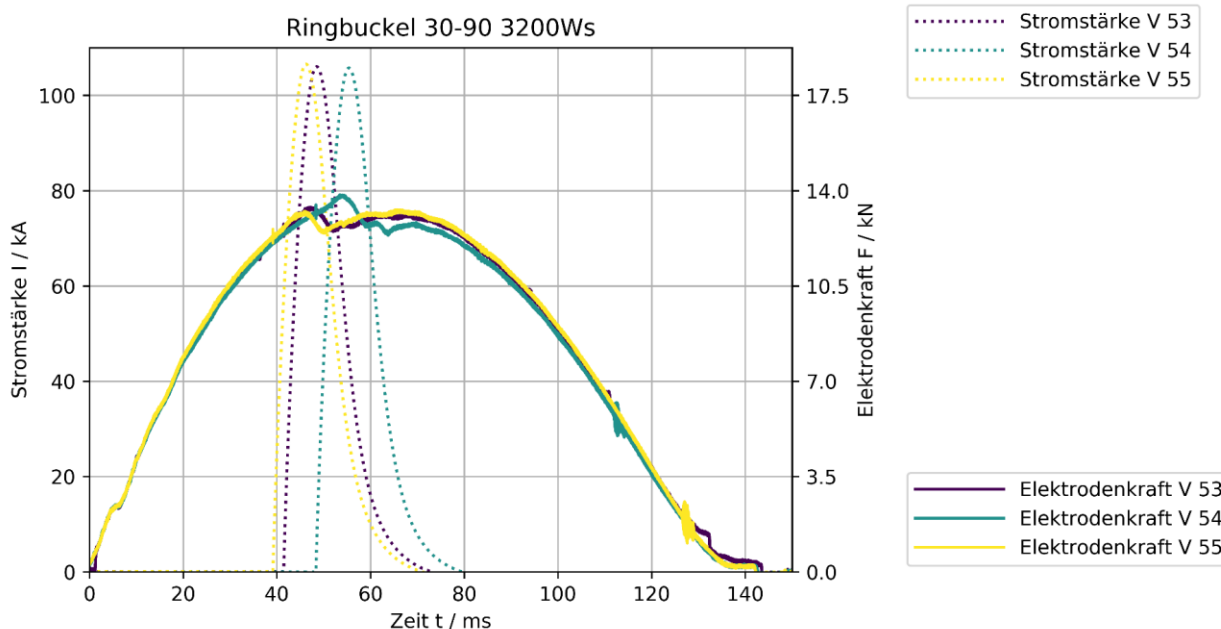


Abbildung 79: Kraft- und Stromverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln  $30^\circ/90^\circ$

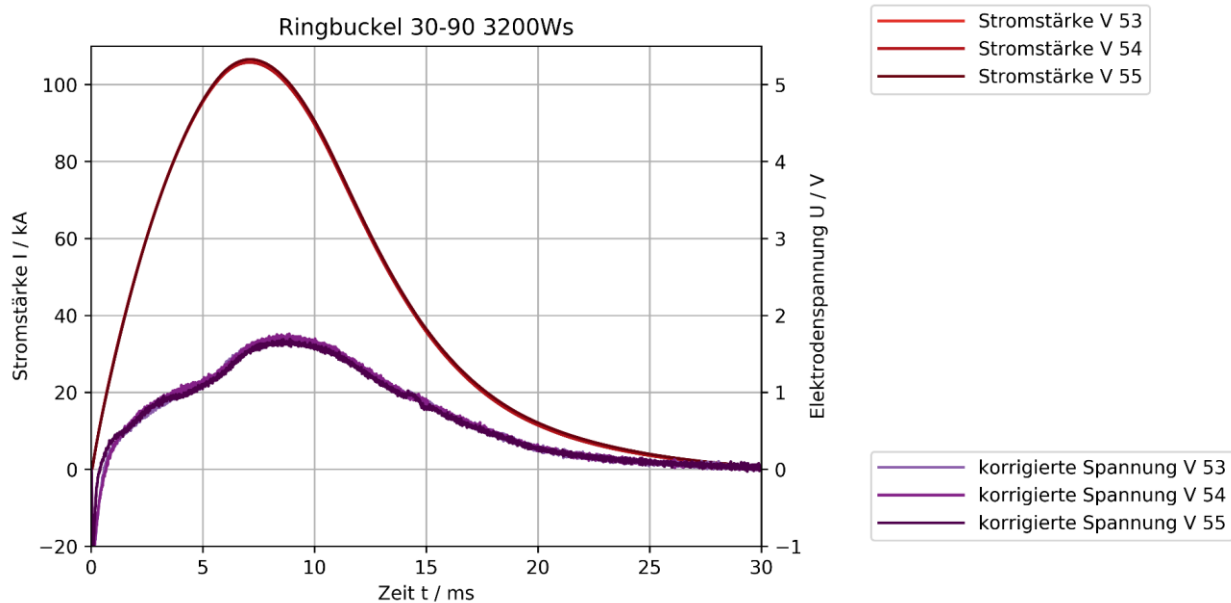


Abbildung 80: Strom- und Spannungsverlauf an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/90°

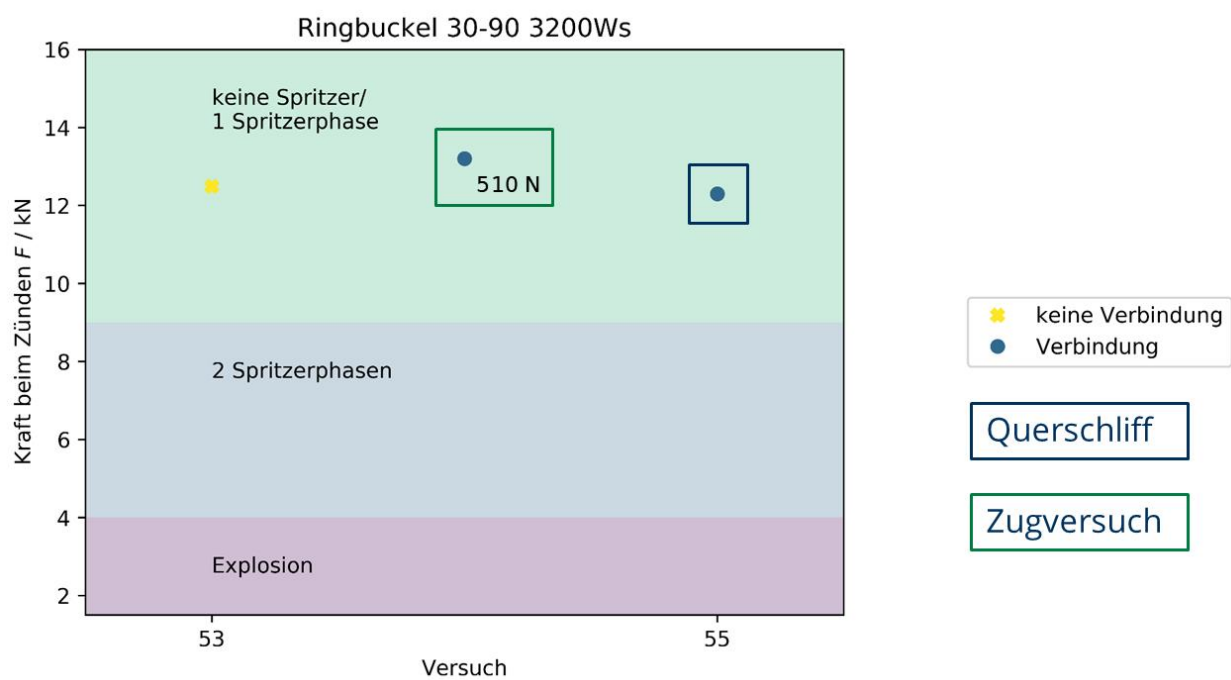


Abbildung 81: Zündkraft über Versuchsnummer mit Spritzerbereichen und Ergebnis der ZP an Maschine 1- Ringbuckel mit Flankenwinkeln 30°/90°

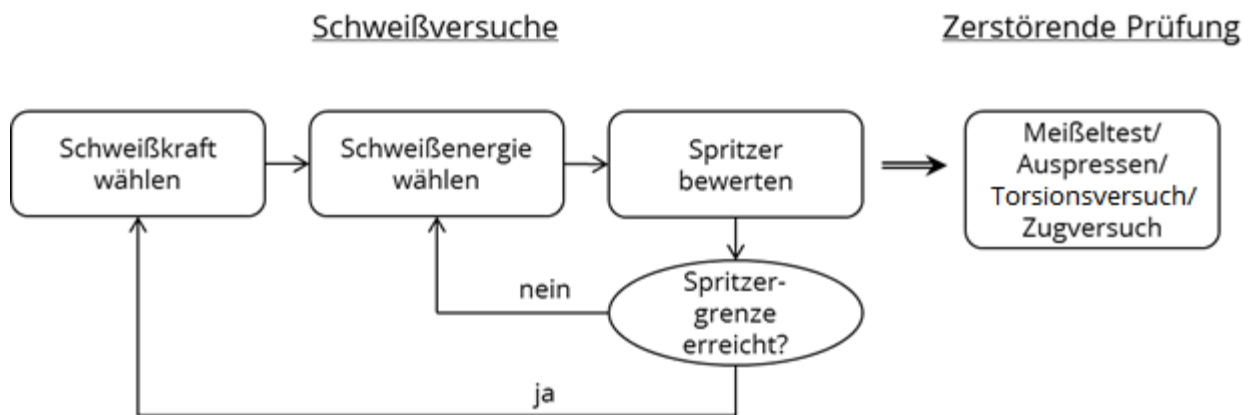


Abbildung 82: Allgemeiner Ablauf Erstellung Schweißbereich

## Buckelringbreite 0,5mm - C = 8mF

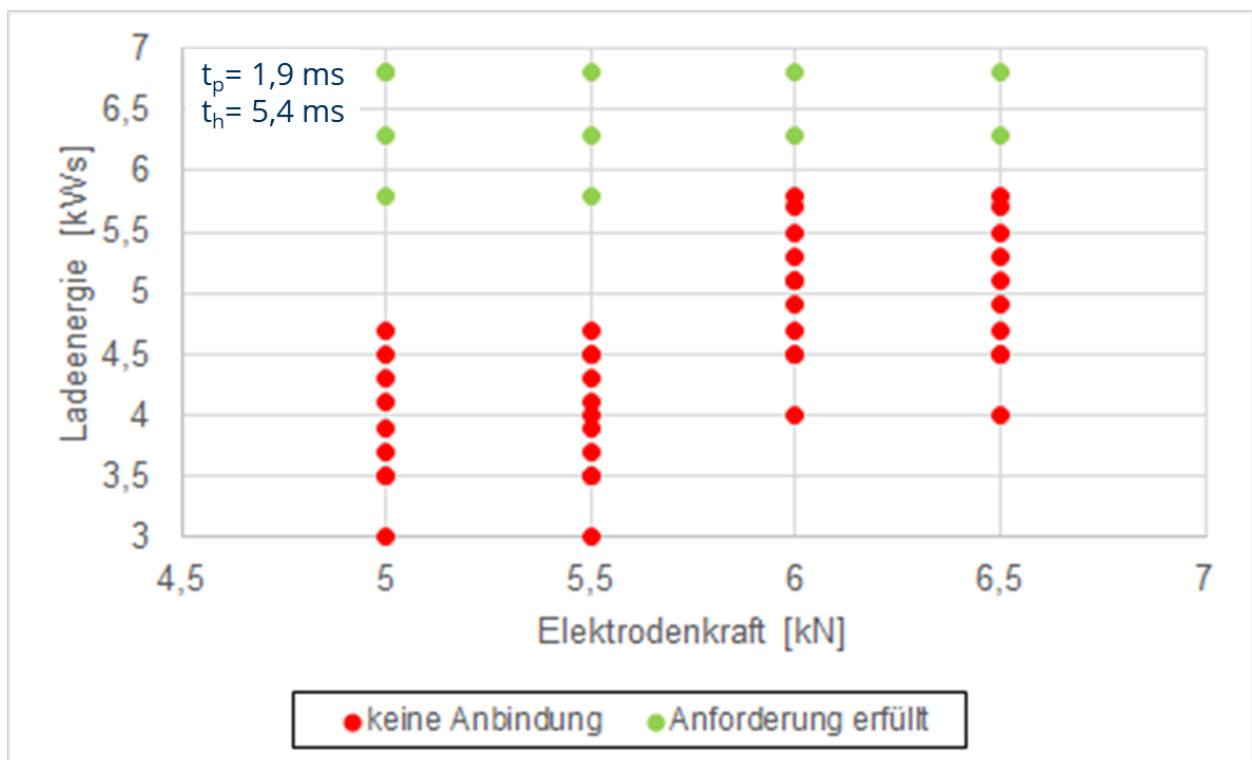


Abbildung 83: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,5mm - kurze Schweißzeit

## Buckelringbreite 0,5mm - C = 16mF

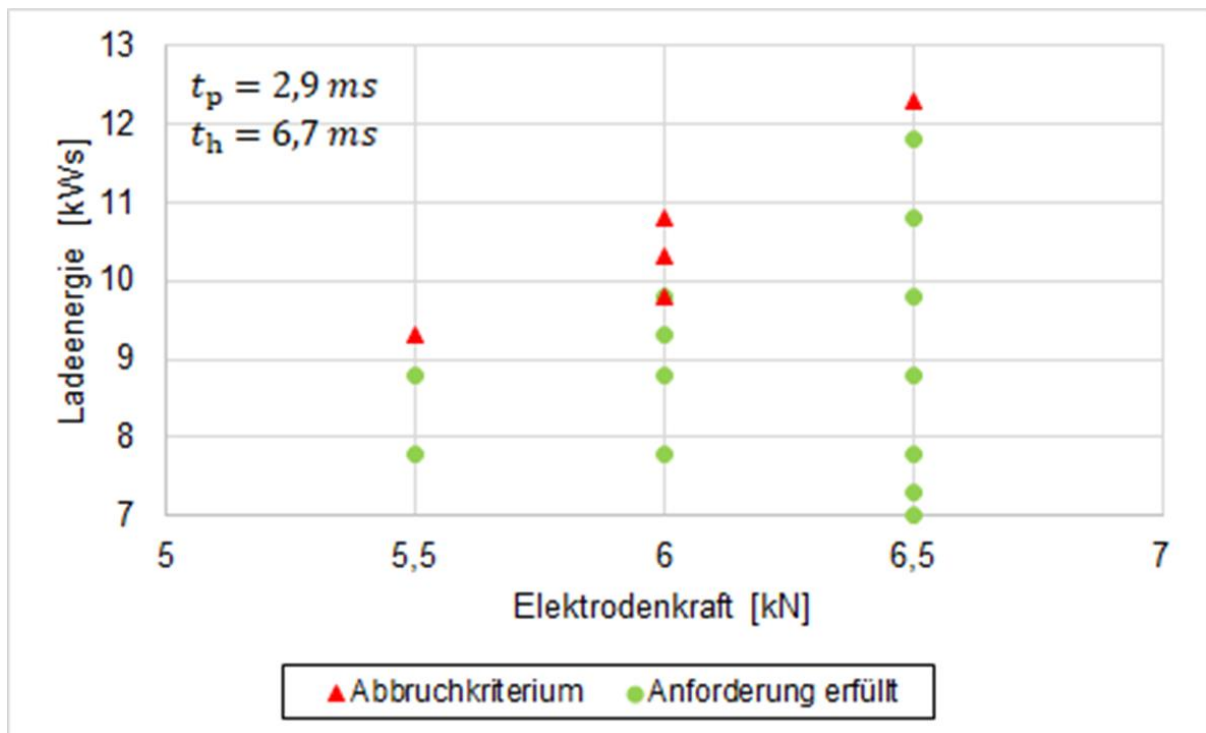


Abbildung 84: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,5 mm - lange Schweißzeit

## Buckelringbreite 0,75mm - C = 8mF

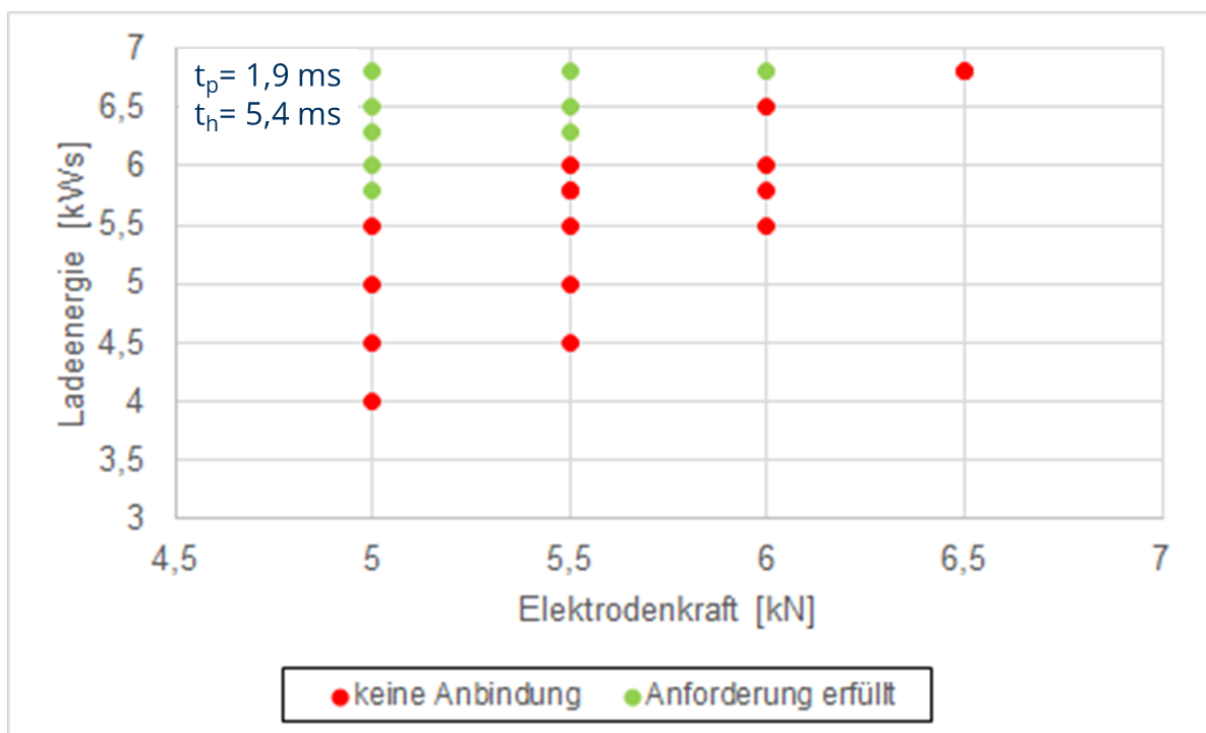


Abbildung 85: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,75 mm - kurze Schweißzeit

## Buckelringbreite 0,75mm - C = 16mF

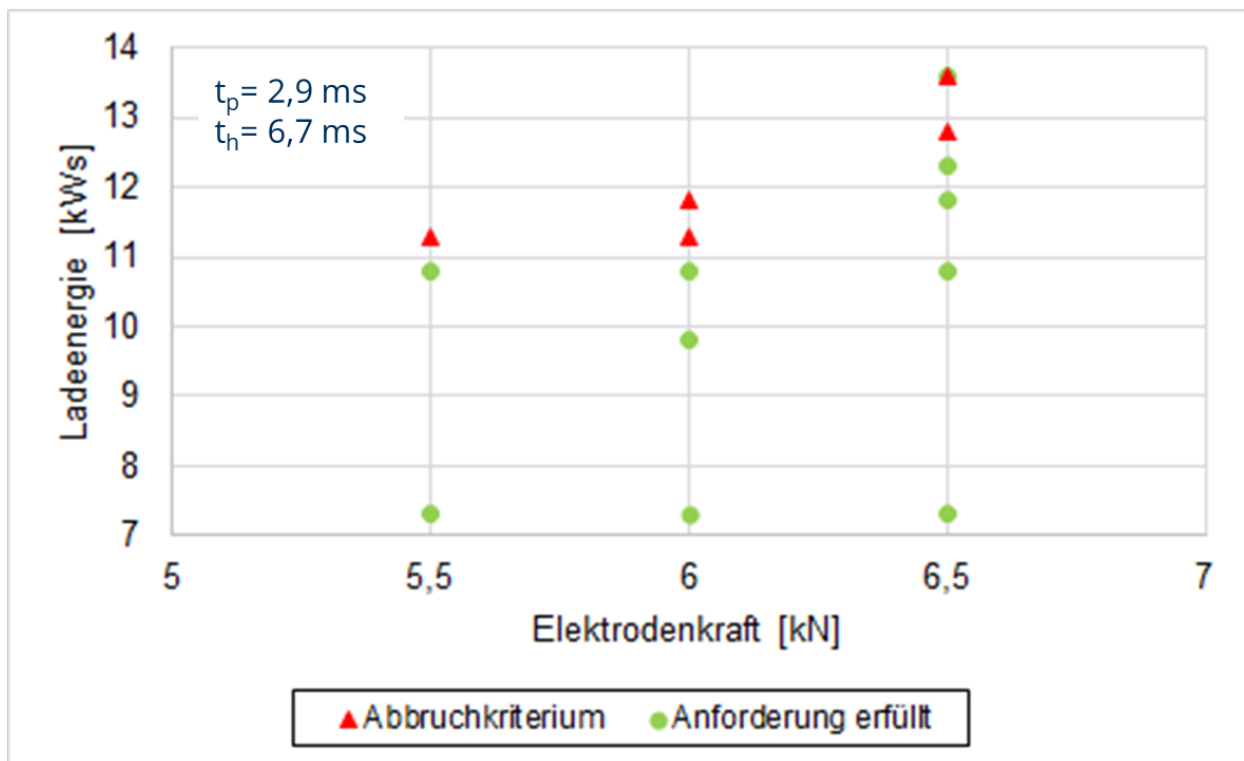


Abbildung 86: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 0,75 mm - lange Schweißzeit

## Buckelringbreite 1,0mm - C = 8mF

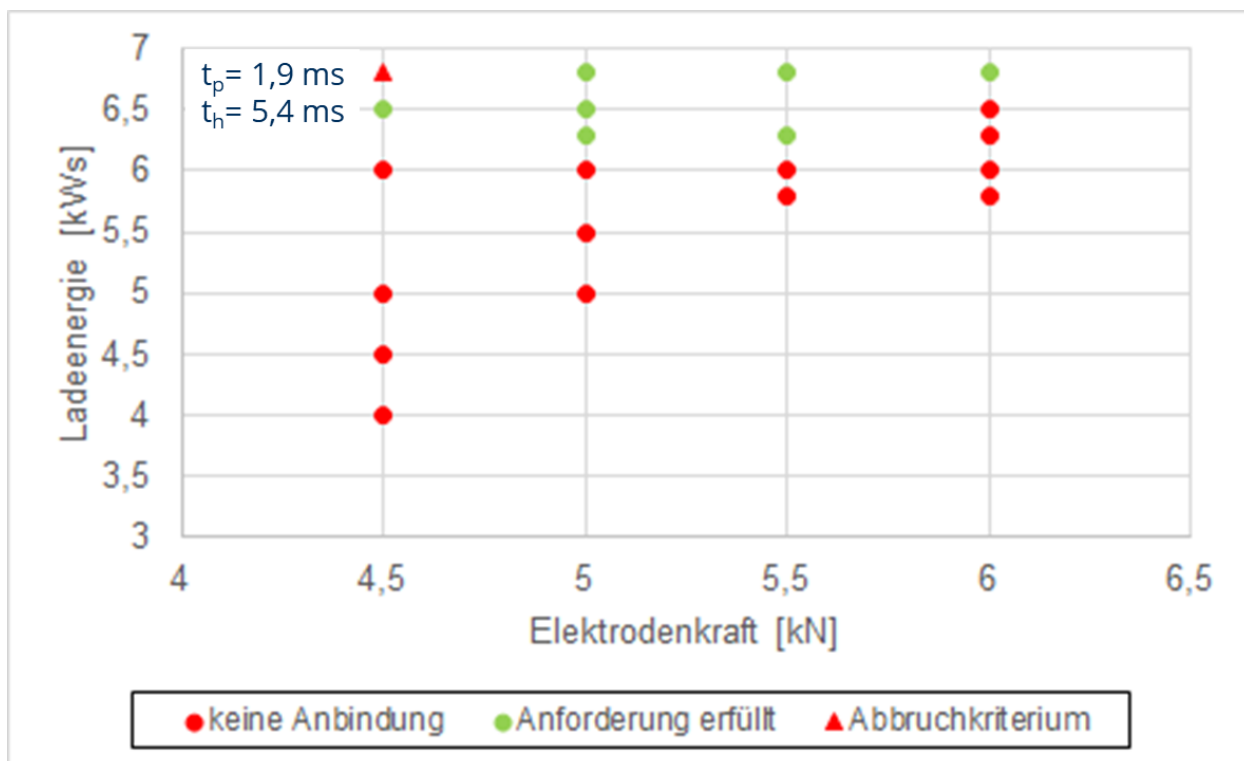




Abbildung 87: Schweißbereich Maschine 2 Buckelringbreite 1 mm - kurze Schweißzeit

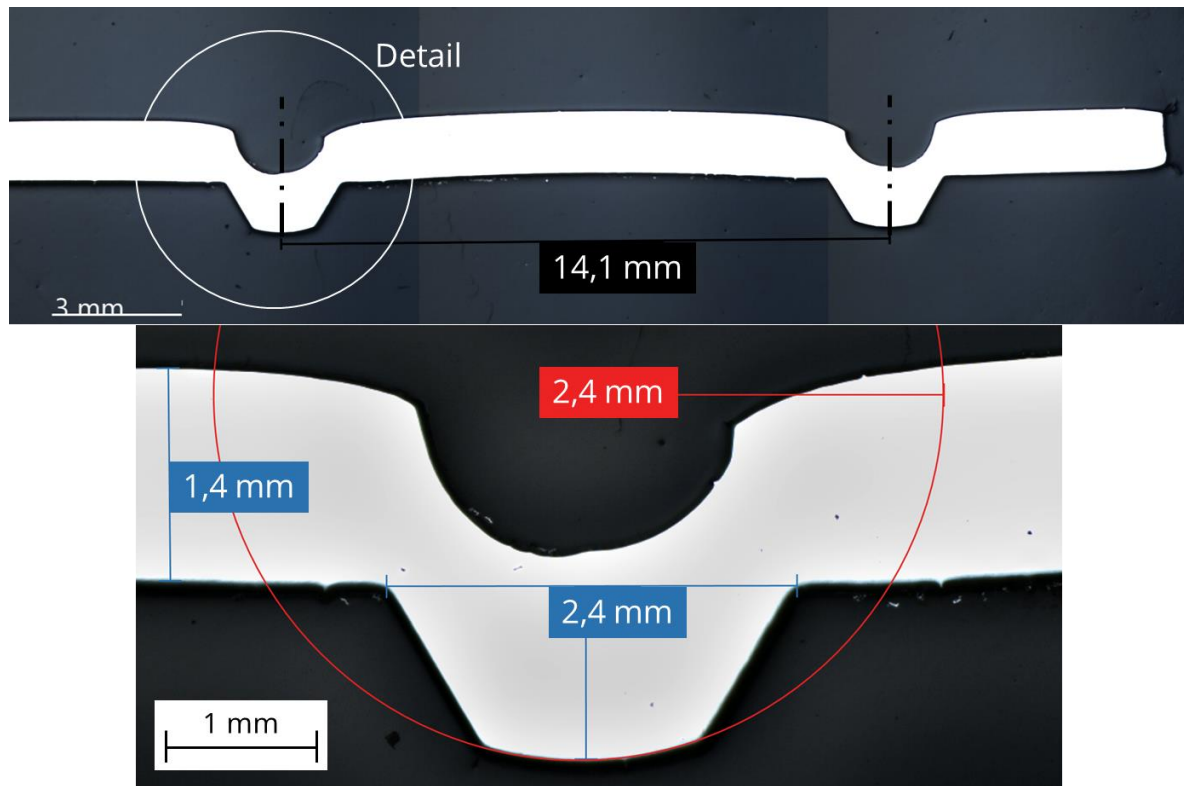


Abbildung 88: Querschliff geprägter Buckel – spitzer Buckelwinkel

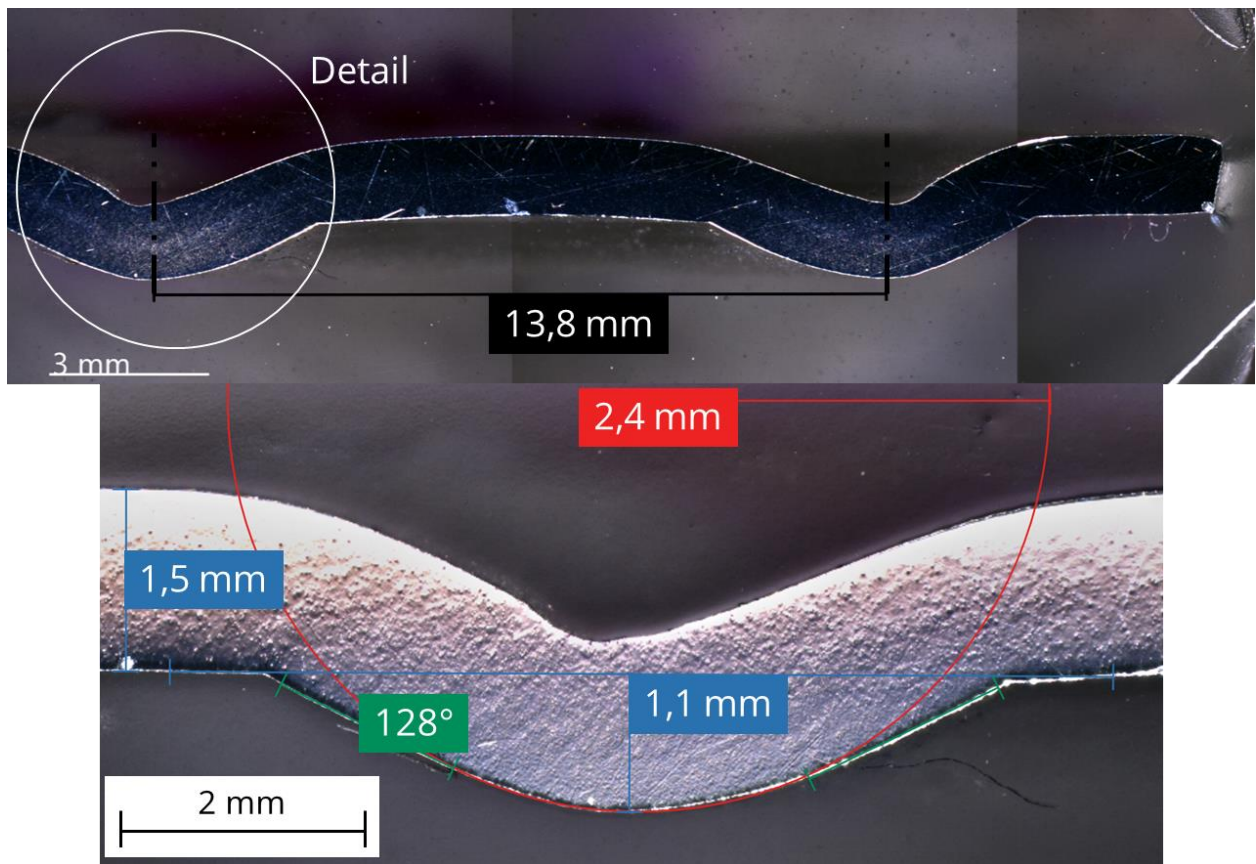


Abbildung 89: Querschliff geprägter Buckel – stumpfer Buckelwinkel

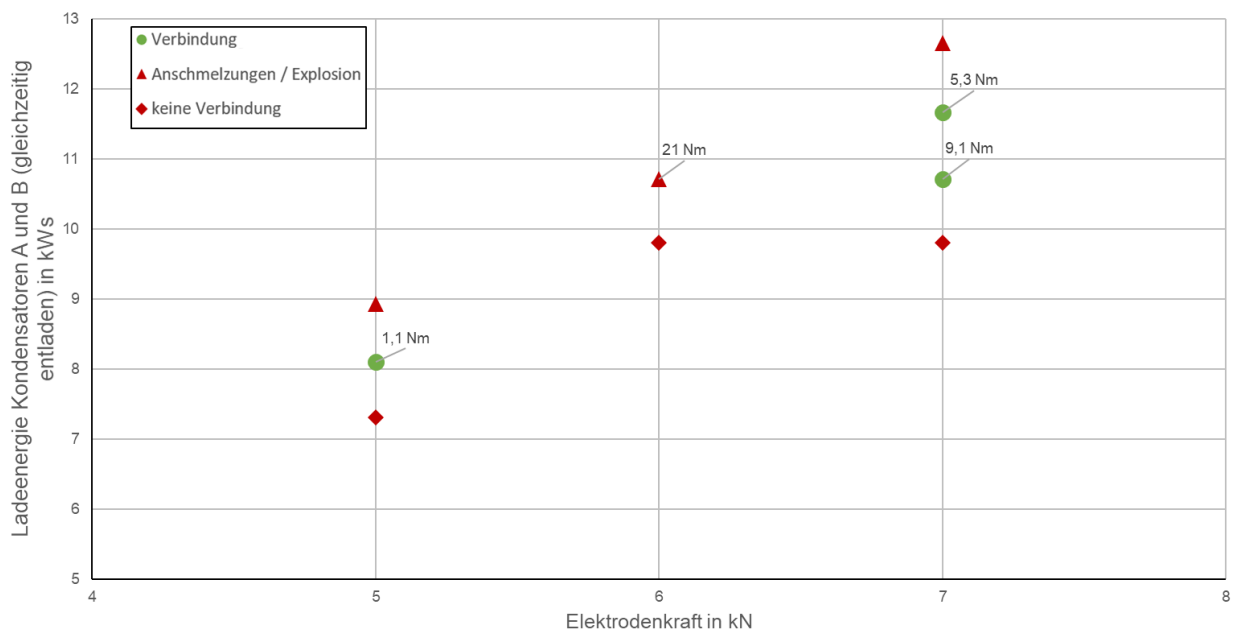


Abbildung 90: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, spitzer Buckelwinkel, Federsteifigkeit  $c \approx 1 \text{ kN/mm}$

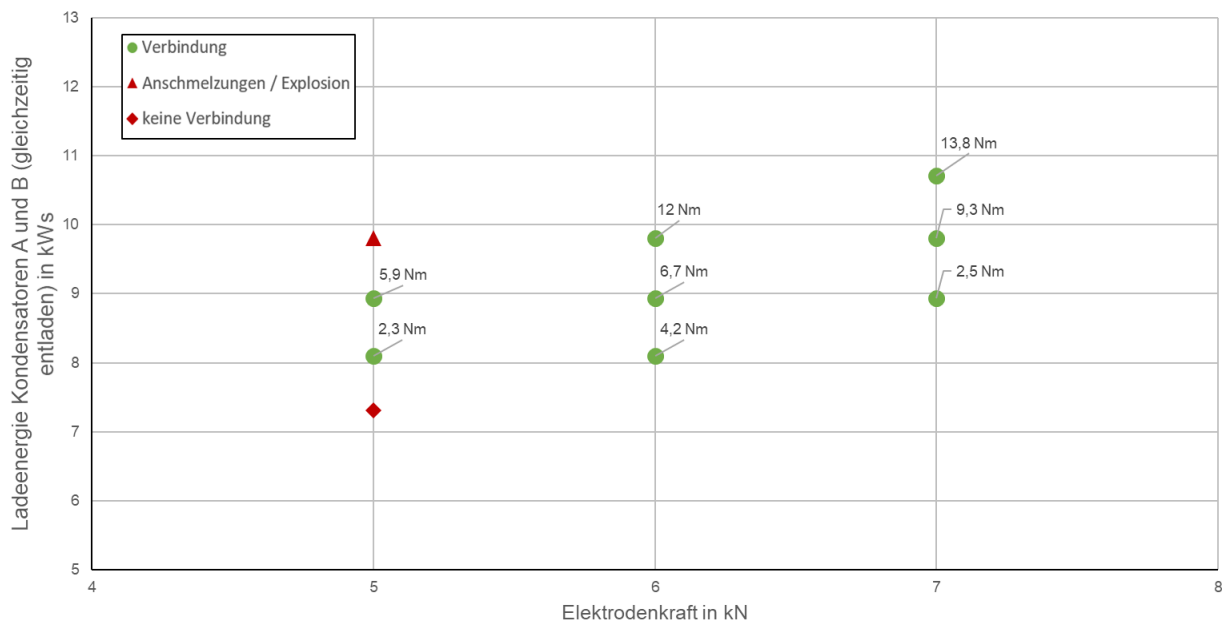


Abbildung 91: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, spitzer Buckelwinkel, Federsteifigkeit  $c \approx 2 \text{ kN/mm}$

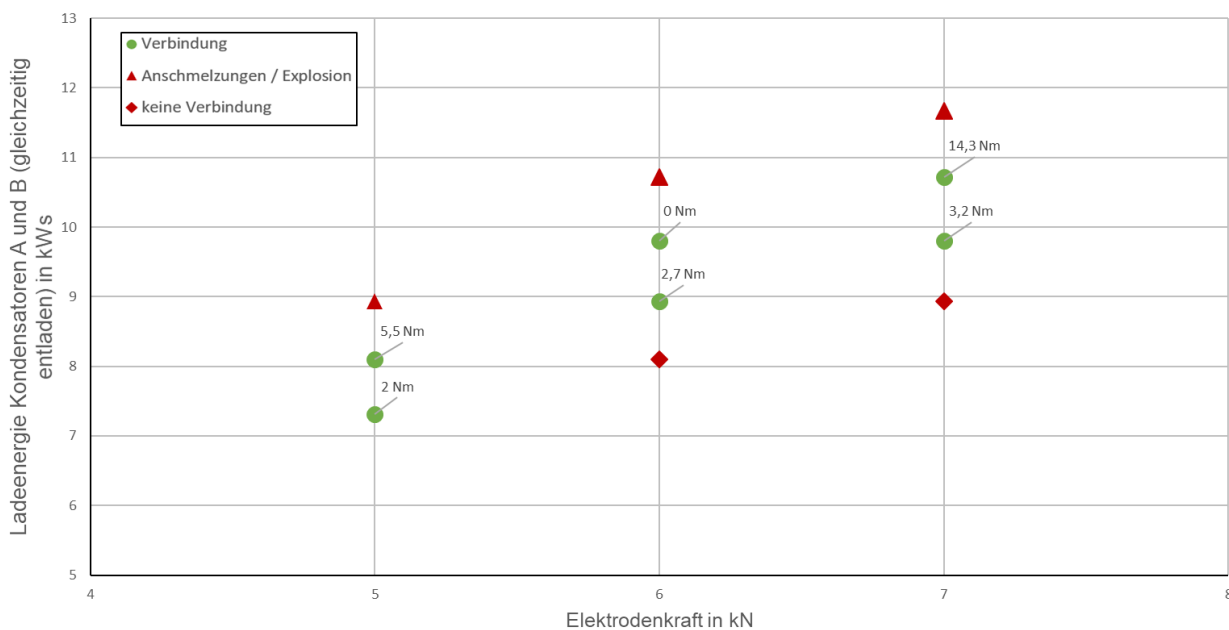


Abbildung 92: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, spitzer Buckelwinkel, Federsteifigkeit  $c \approx 10 \text{ kN/mm}$

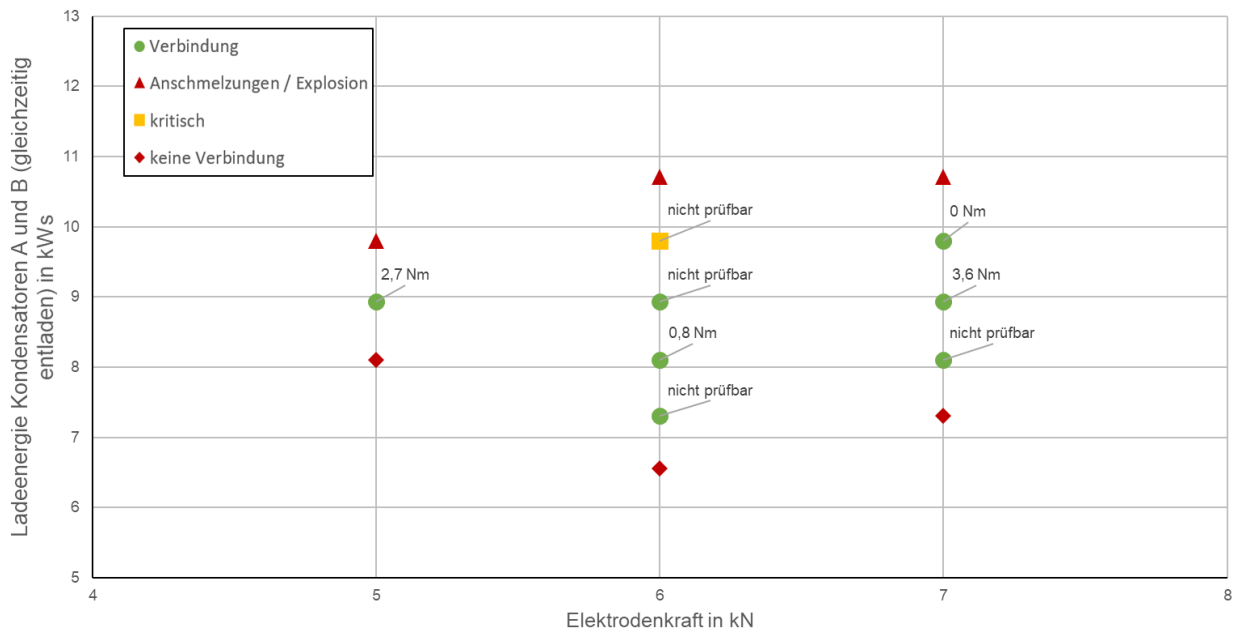


Abbildung 93: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, stumpfer Buckelwinkel, Federsteifigkeit  $c \approx 1 \text{ kN/mm}$

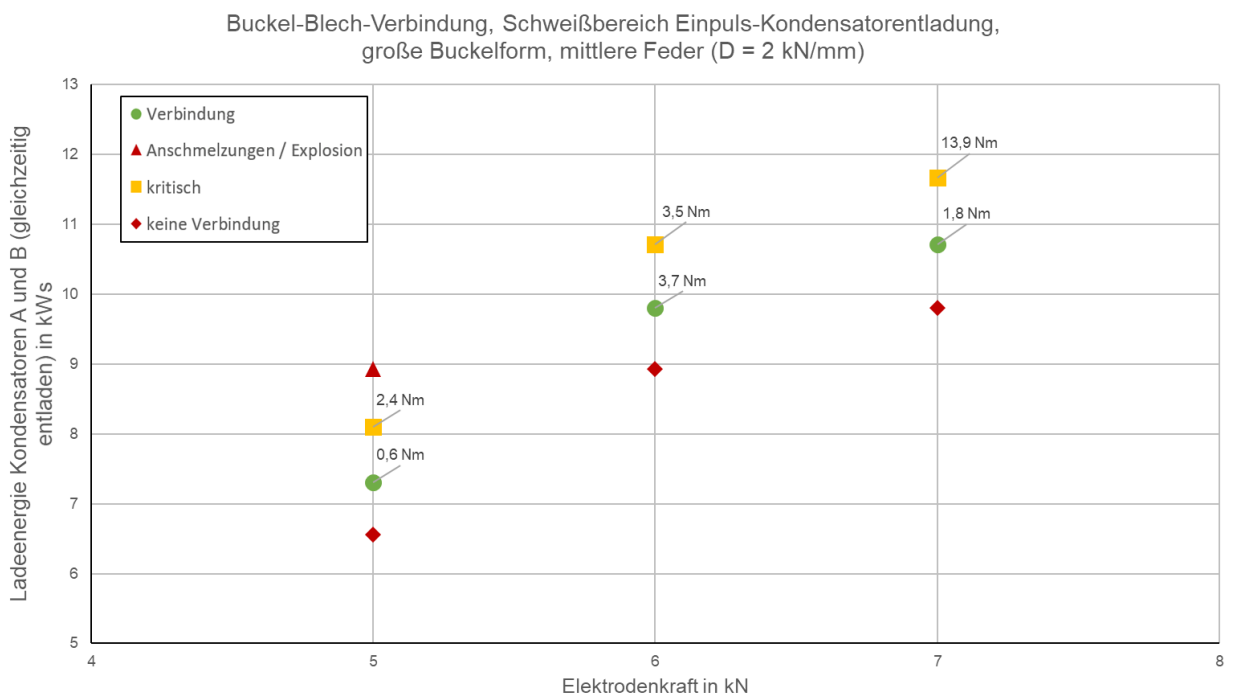


Abbildung 94: Buckel-Blech-Verbindung, Schweißbereich, stumpfer Buckelwinkel, Federsteifigkeit  $c \approx 2 \text{ kN/mm}$

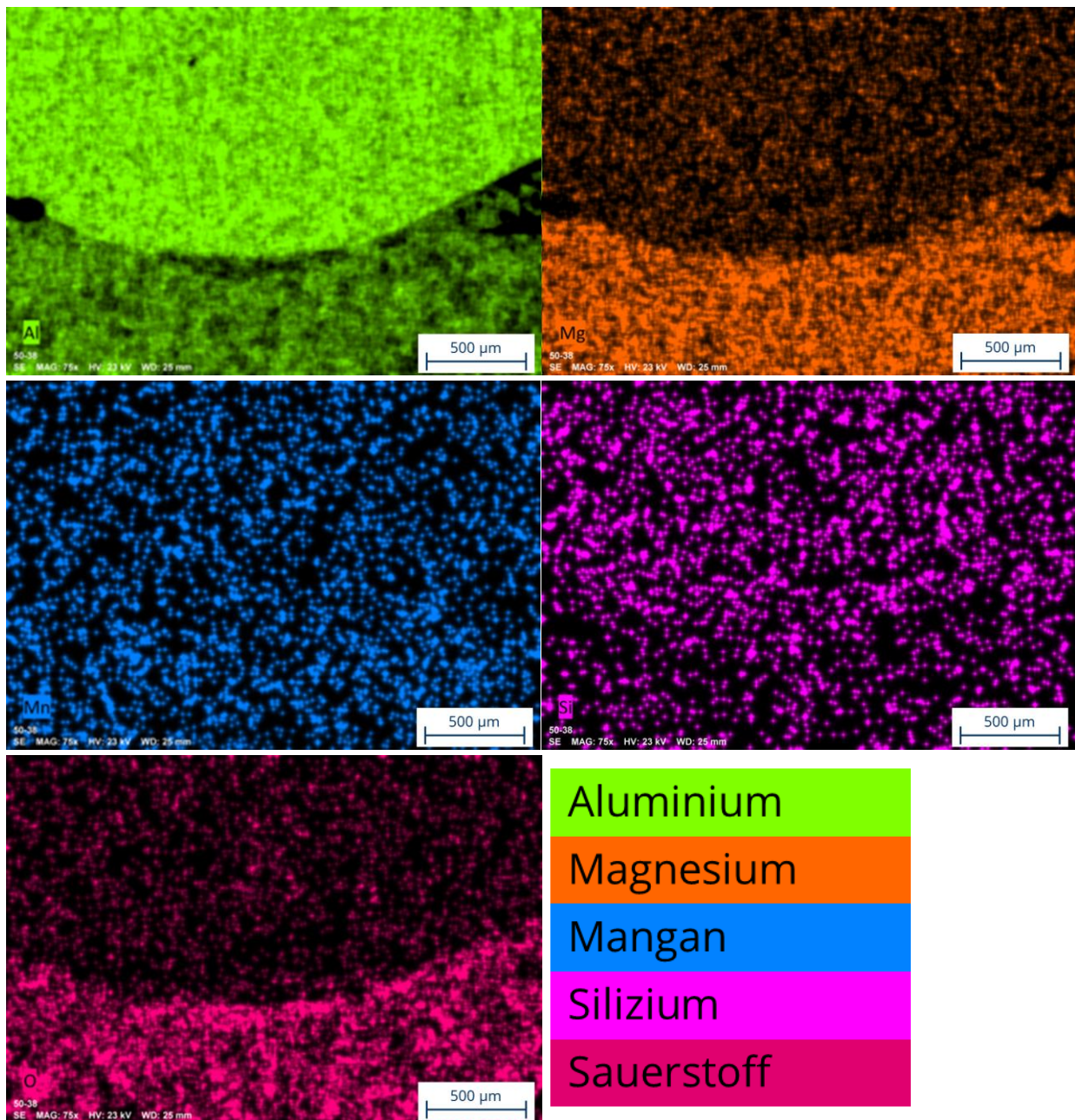


Abbildung 95: EDX-Analyse im Querschliff

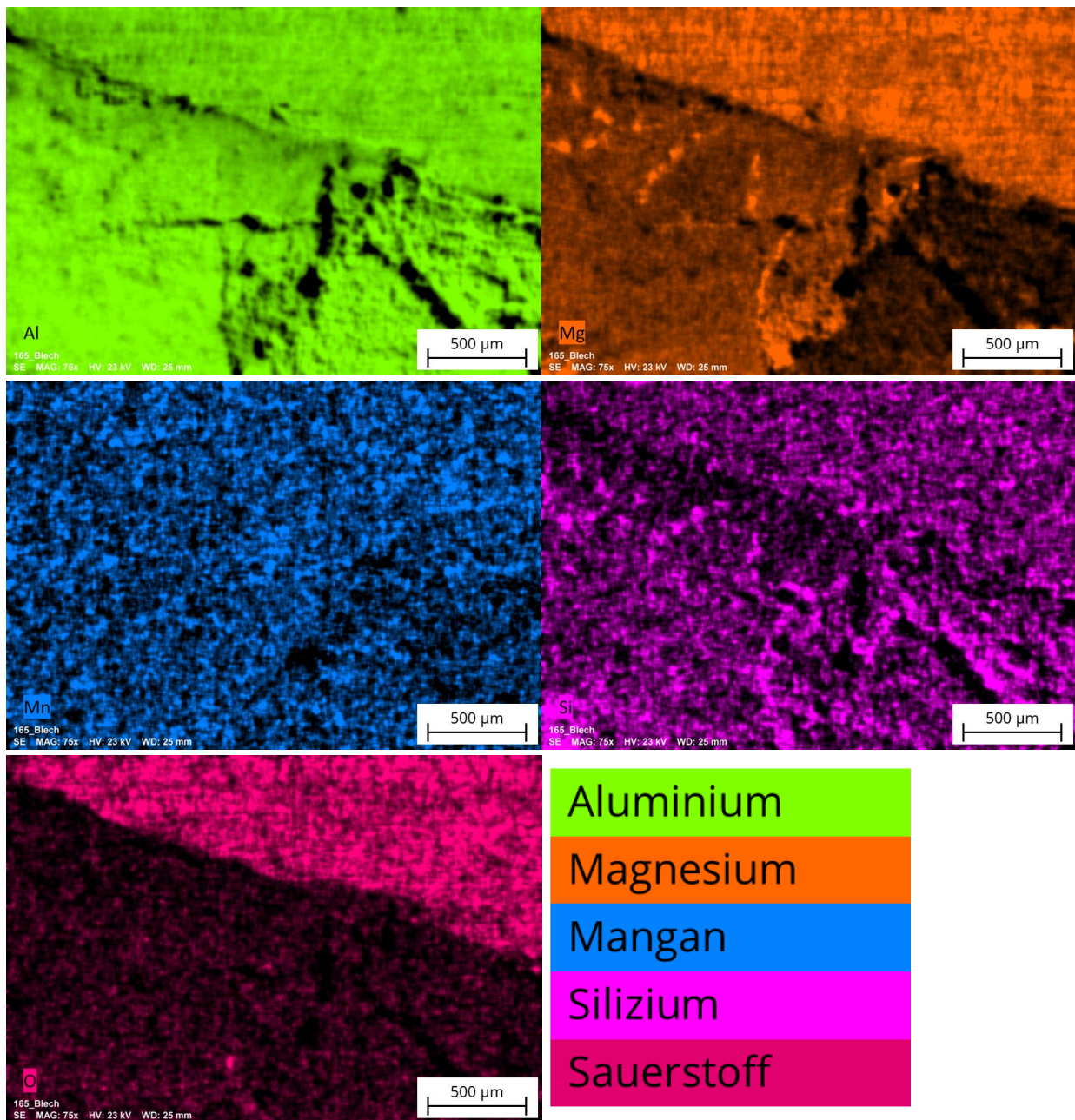


Abbildung 96: EDX-Analyse der Bruchfläche

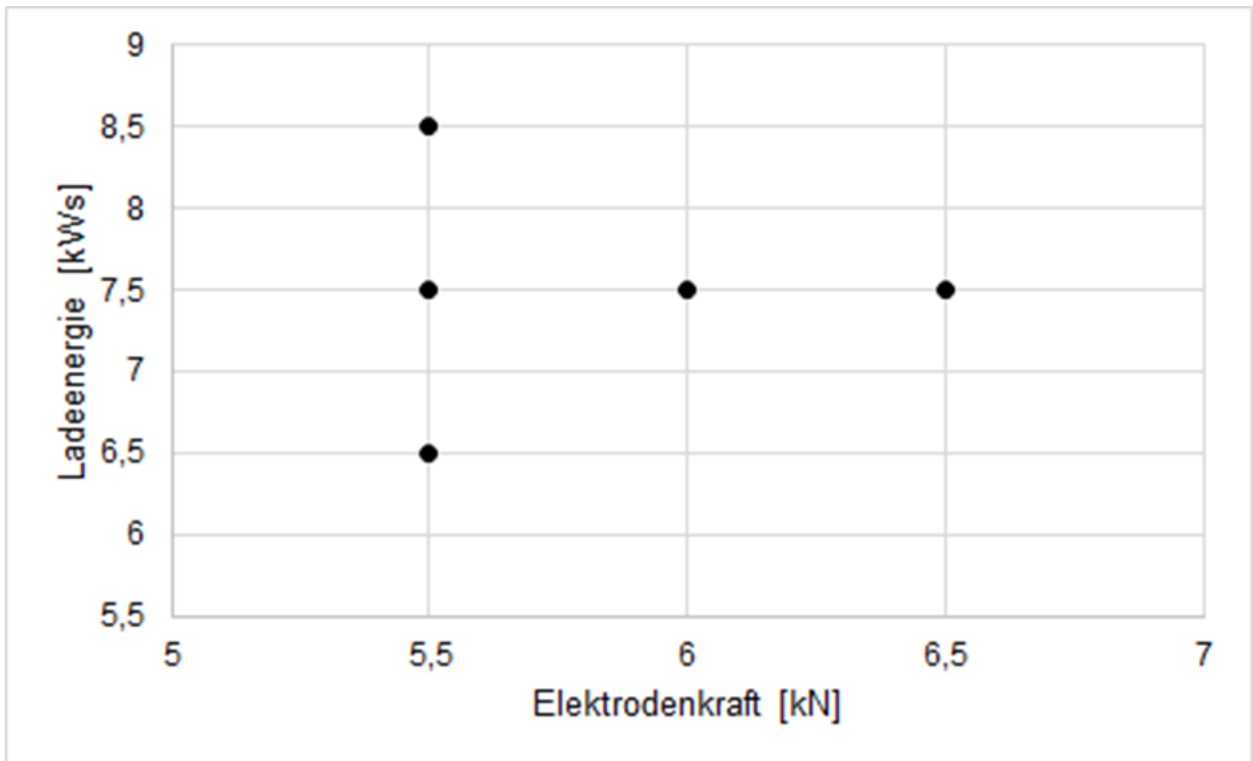


Abbildung 97: Parameter des Versuchsplan

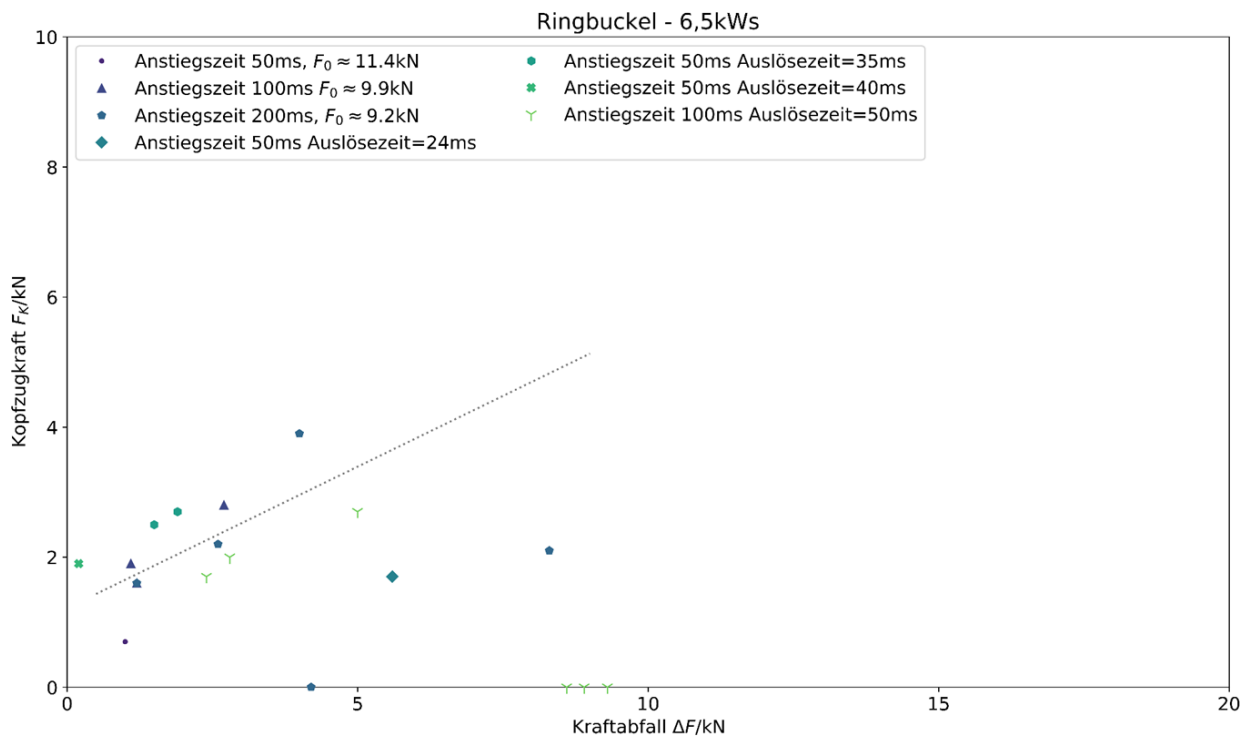


Abbildung 98: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 3 bei 6,5kWs,  $R^2=0,51$

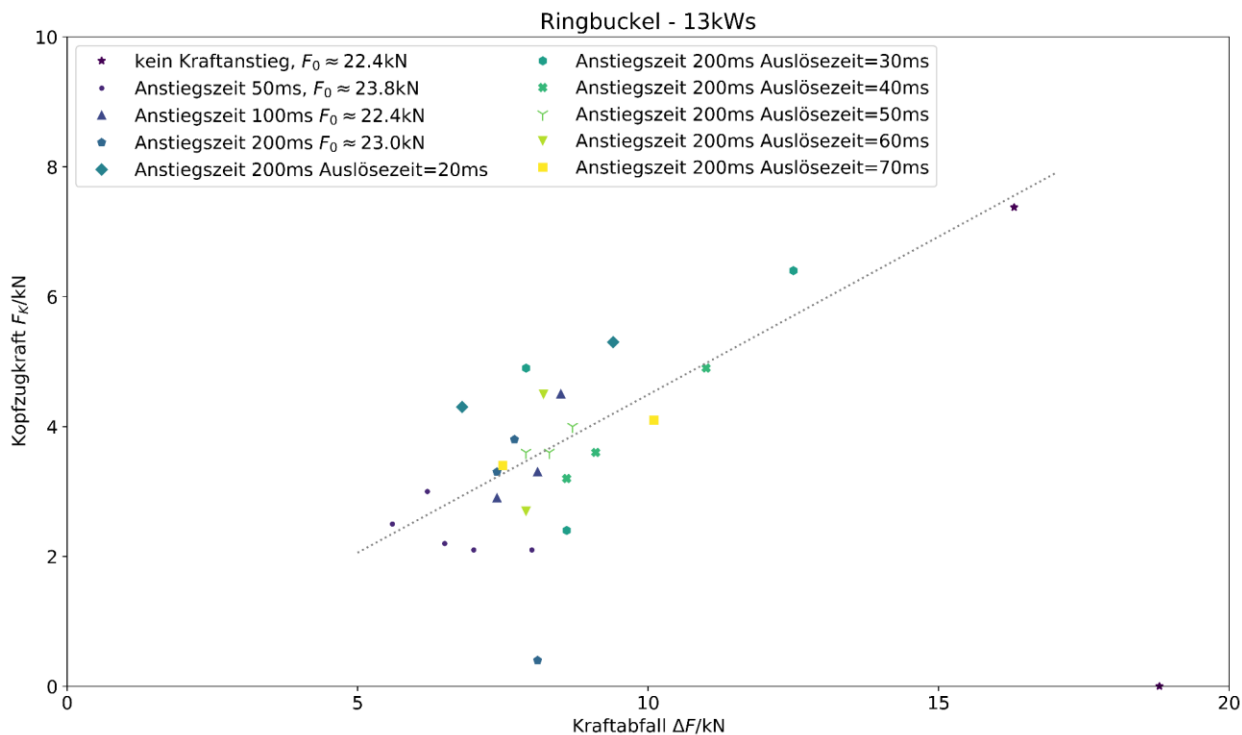


Abbildung 99: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 3 bei 13kWs,  $R^2=0,67$

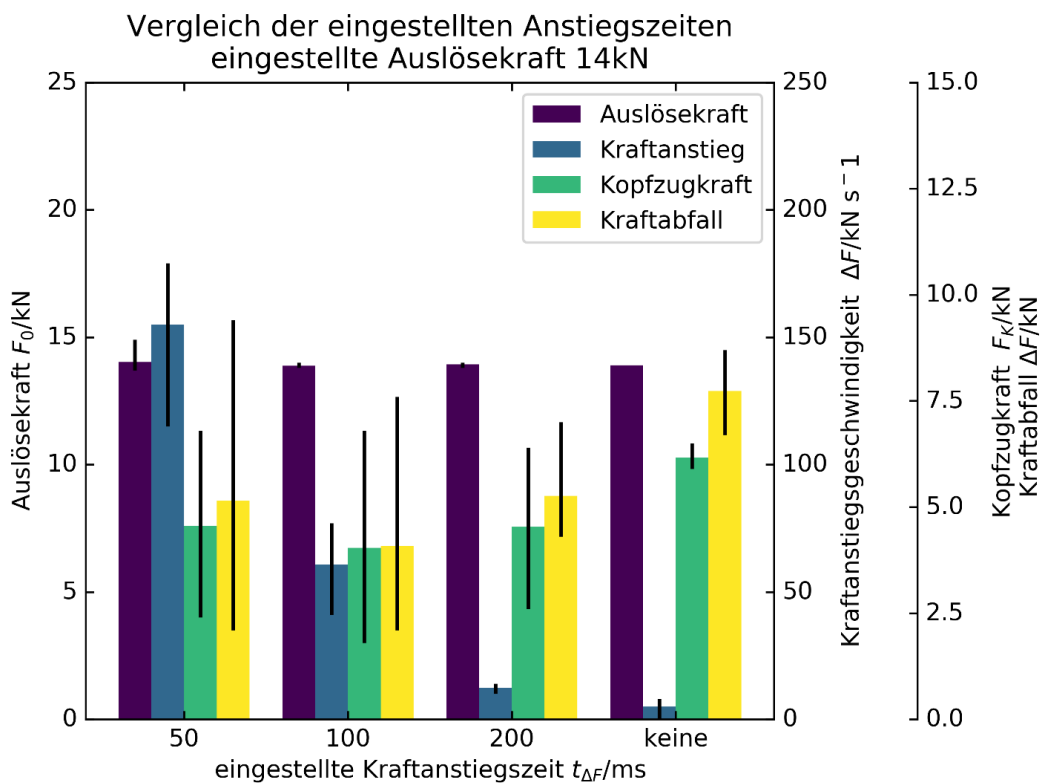


Abbildung 100: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Auslösezeiten für eine Kraftänderung von 10kN auf 15kN - Langbuckel



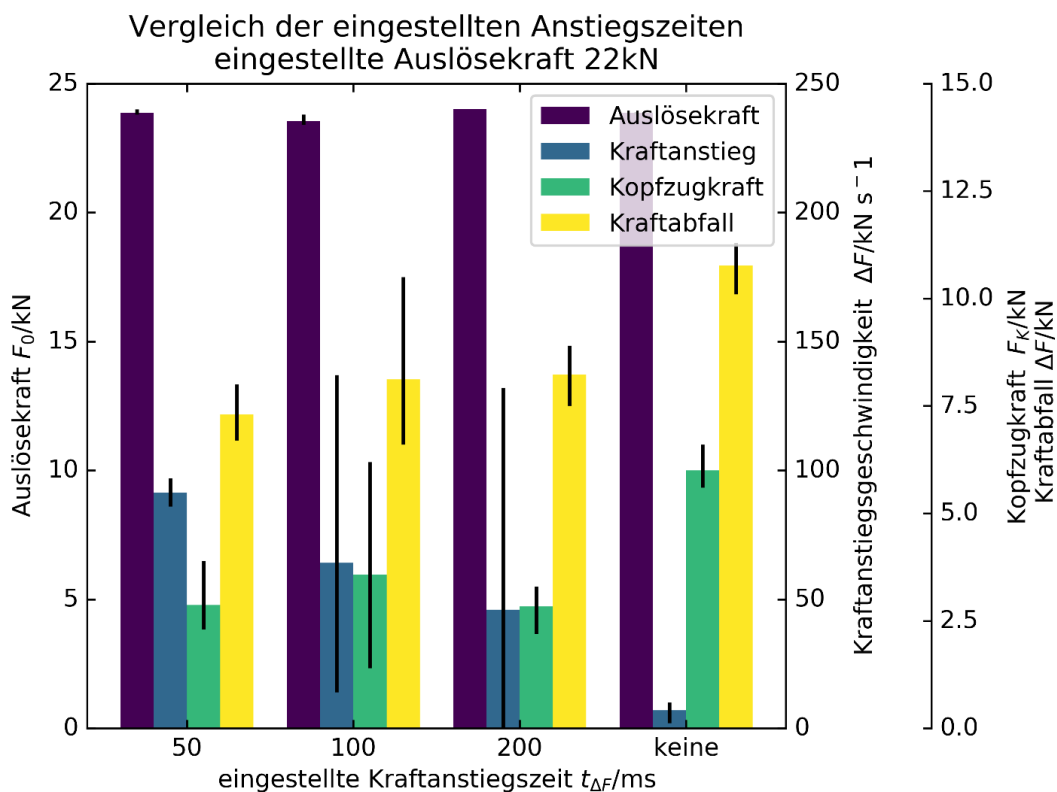


Abbildung 101: Ergebnisse des Vergleichs der eingestellten Auslösezeiten für eine Kraftänderung von 20kN auf 25kN - Langbuckel

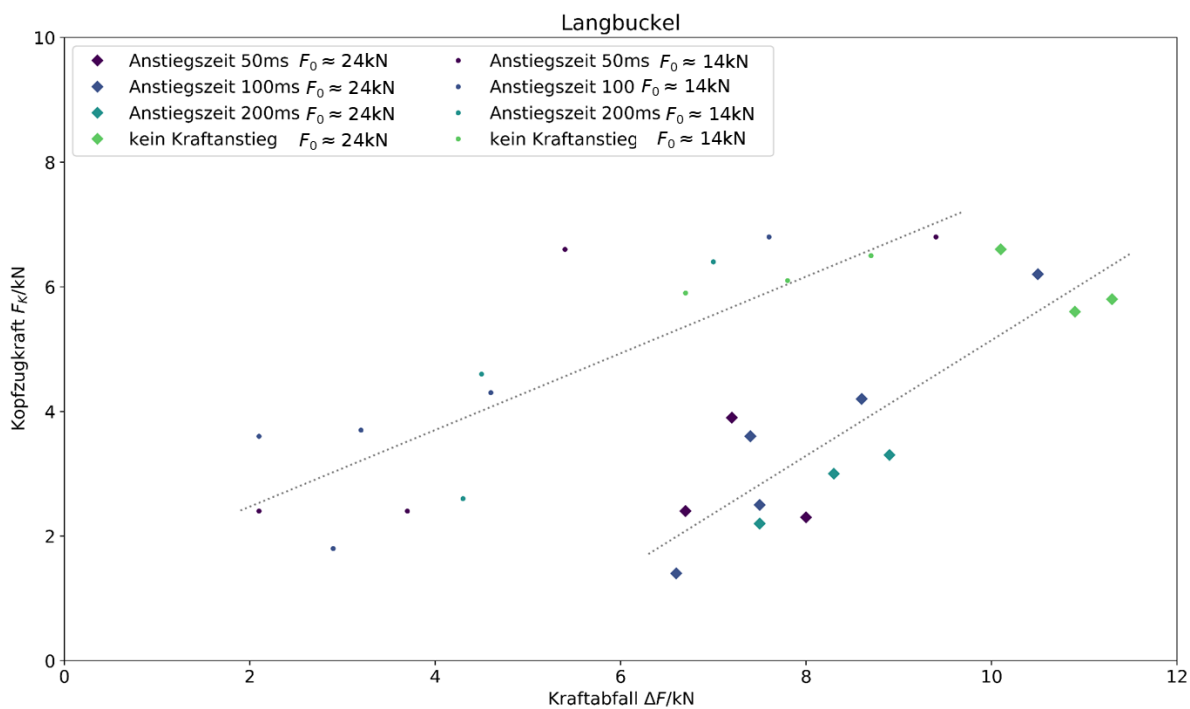


Abbildung 102: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 3 bei 5,4kW und 13kW mit Bestimmtheitsmaßen  $R^2=0,62$  und  $R^2=0,76$  - Langbuckel

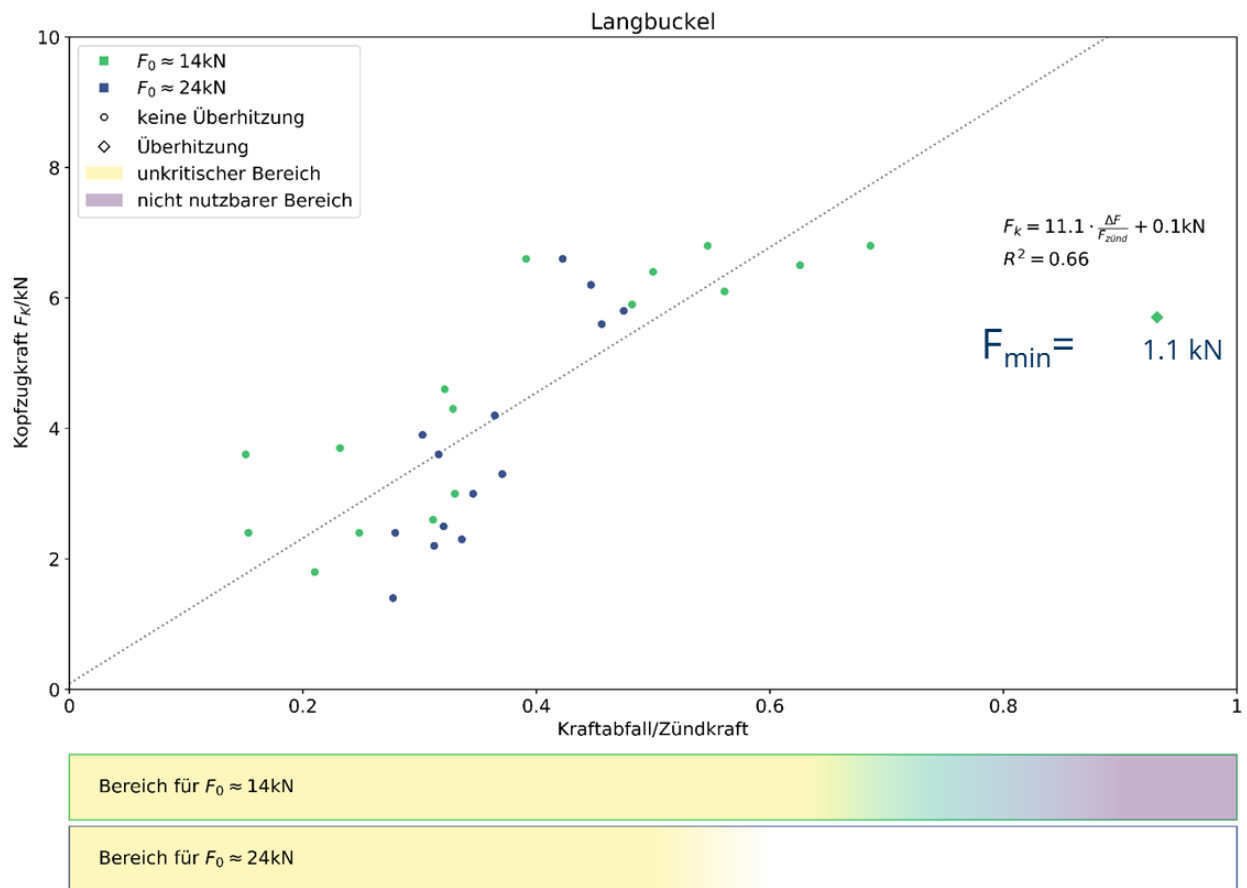


Abbildung 103: Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 3, Langbuckel

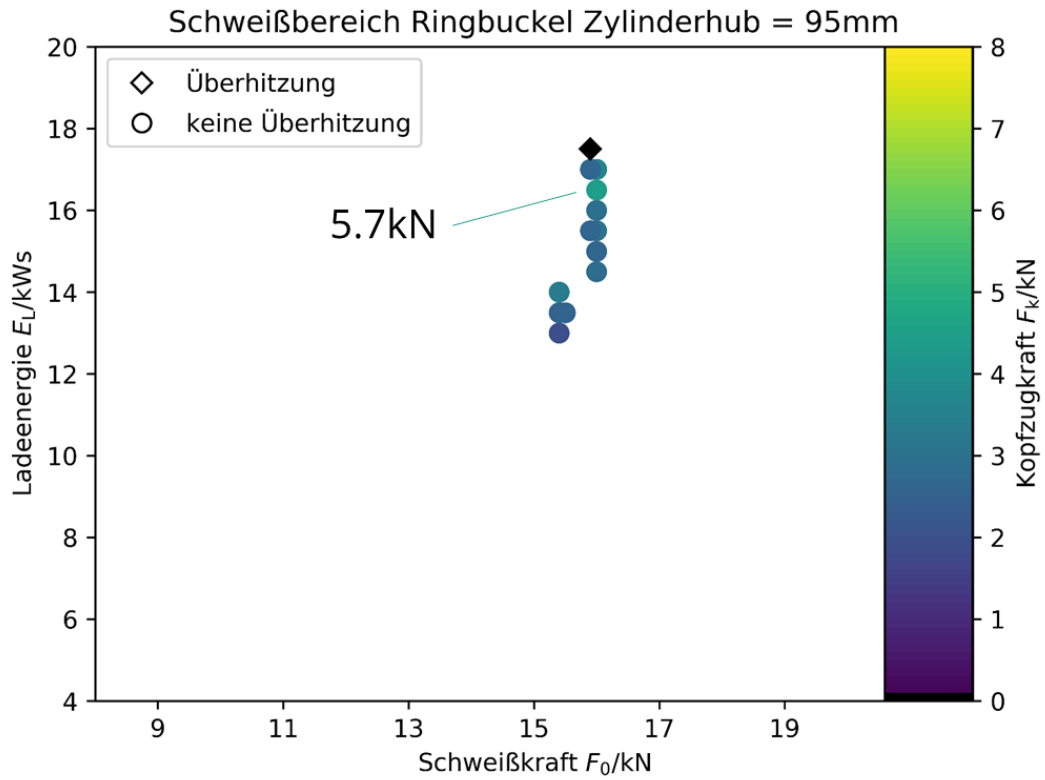


Abbildung 104: Schweißbereich Maschine 4 mit Zylinderhub 75 mm – Ringbuckel

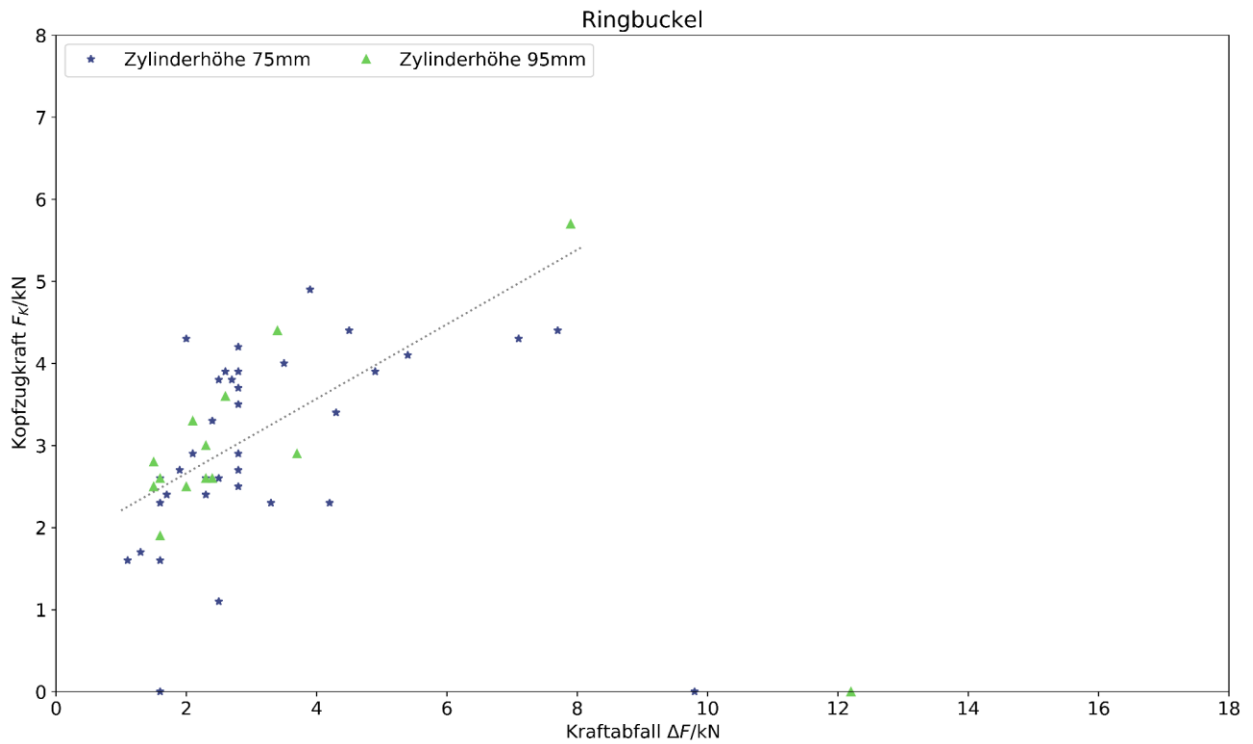


Abbildung 105: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 4 mit  $R^2=0,46$  – Ringbuckel

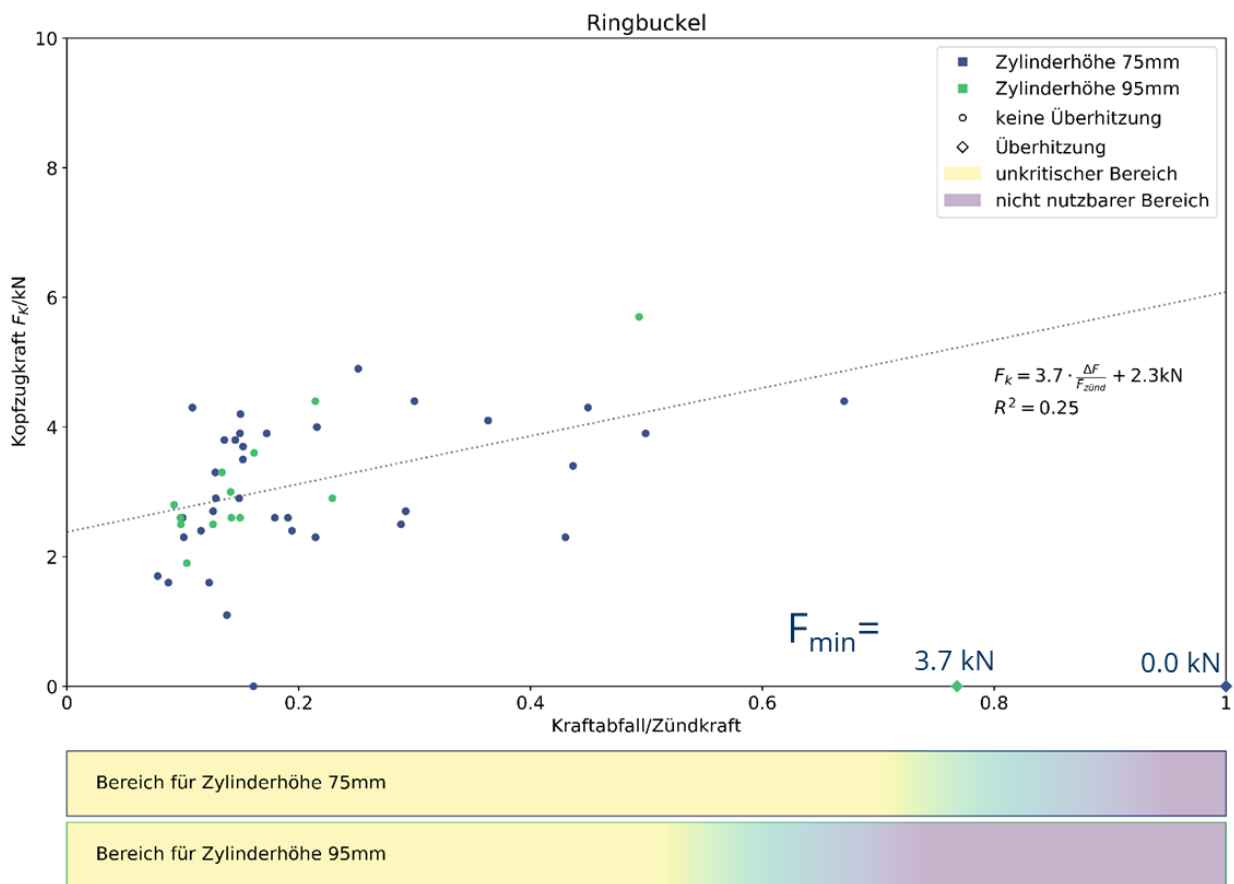


Abbildung 106: Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 4, Ringbuckel

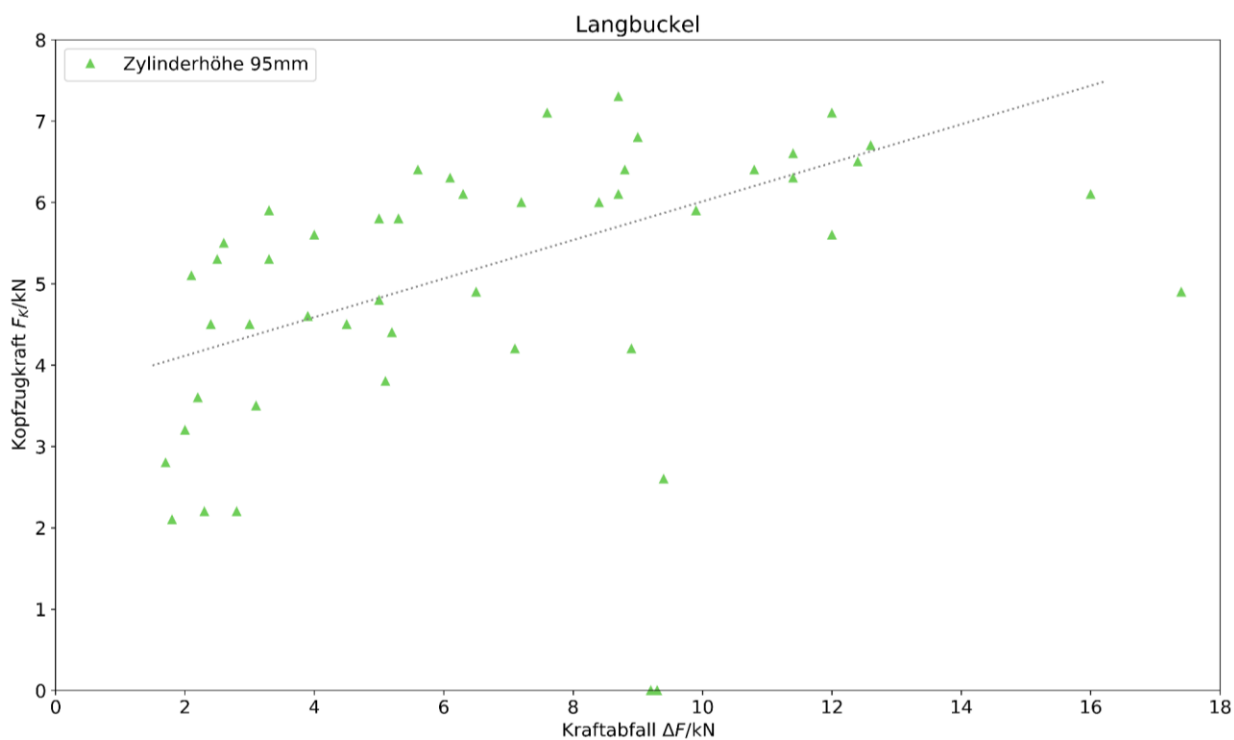


Abbildung 107: Kopfzugkraft über Kraftabfall an Maschine 4 mit  $R^2=0,38$  – Langbuckel

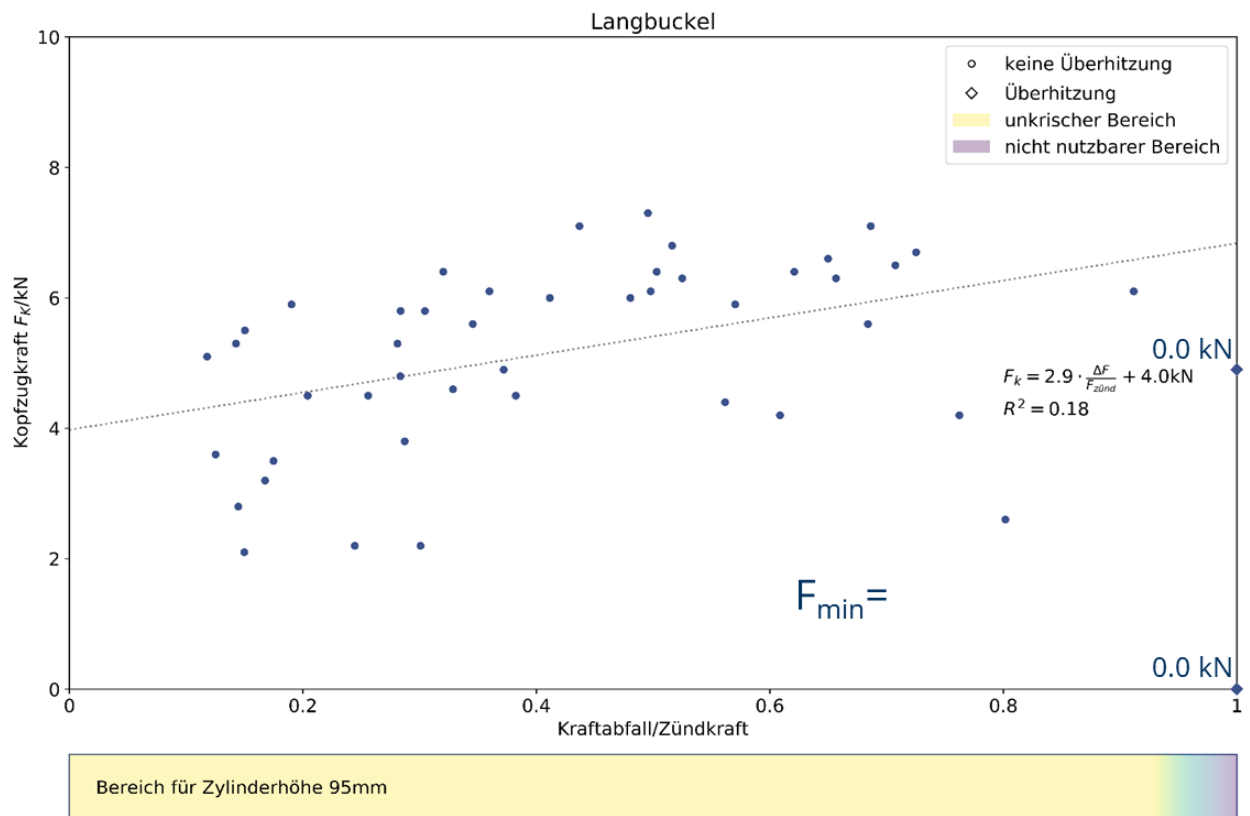


Abbildung 108: Kopfzugkraft über Kraftabfall bezogen auf Schweißkraft – Maschine 4, Langbuckel