Schlussbericht

Titel: Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kon-

densatorentladungsschweißen unter

Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung

und des Nachsetzverhaltens der Elektroden

IGF-Nr.: 18.987 BR

Forschungseinrichtung: Technische Universität Dresden

Institut für Fertigungstechnik

Professur für Fügetechnik und Montage

01062 Dresden

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

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Max-Martin Ketzel

weitere Autoren: Dr.-lng. Jörg Zschetzsche

Dr.-Ing. Martin Hertel

Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben "Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden" (IGF-Nr. 18.987 BR/DVS-Nr. 04.069) verfolgte drei wesentliche Ziele:

- Vertiefung des Prozessverständnisses des Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen)
- Ermittlung des Einflusses von Start- und Randbedingungen
- Bewertungskriterien von Nachsetzeinheiten

Zum Erreichen der Ziele wurden an verschiedenen KE-Schweißmaschinen zunächst Untersuchungen an einer grundlegenden Buckelgeometrie und später an Fügeelementen und einer Schulterbuckelgeometrie durchgeführt. Insgesamt wurden innerhalb der Projektlaufzeit über 1000 Schweißversuche durchgeführt und ausgewertet. Durch Widerstandsmessungen während des Kraftaufbaus konnten Aussagen über die Einflüsse der Auftreffgeschwindigkeit der Elektroden auf das Buckelbauteil und der Elektrodenkraft zu Beginn des Schweißprozesses auf den Übergangswiderstand getroffen werden. Es wurde festgestellt, dass bei zunehmender Elektrodenkraft, die Auftreffgeschwindigkeit kaum Einfluss auf den sich einstellenden Widerstand hat. Außerdem zeigt der Widerstand ein reziprok proportionales Verhalten gegenüber der Elektrodenkraft. Bei der Durchführung von Schweißversuchen wurde der Fügeprozess im Detail durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet. Dabei wurden makroskopisch (mit bloßem Auge) und mikroskopisch (durch die Vergrößerung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen) die entstandenen Spritzer bewertet. Eine Einordnung in "Mikro"- und "Makro"-Spritzer war möglich, wobei die "Mikro"-Spritzer als prozessrelevant und die "Makro"-Spritzer als nicht prozessrelevant, aber meist unvermeidbar, eingeschätzt wurden. Durch die Auswertung der Geschwindigkeit der "Mikro"-Spritzer wurde die Entstehung von Metalldampf, der für die Aktivierung der Buckeloberfläche notwendig ist, nachgewie-Ebenfalls konnte durch prozessbegleitende Messdatenaufzeichnungen Leistungsdichten nachgewiesen werden, die eine Metalldampfbildung hervorrufen. Durch die zerstörende Prüfung (ZP) der Schweißproben konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Ladeenergie der KE-Schweißmaschine und Anbindungsfläche bzw. Abzugskraft festgestellt werden. Durch Variationen von zwei entscheidenden Parametern der Nachsetzeinheit (Masse und Kraft) wurde der Einfluss der Nachsetzbewegung untersucht. Es zeigt sich, dass eine flachere Federkennlinie und geringere Masse die Beschleunigung der Nachsetzeinheit erhöhen. Dadurch wird die Metalldampfbildung früher abgebrochen, da die bereits aktivierten Bereiche schneller aufeinandergepresst werden und Stoffschluss entsteht, was wiederum den Widerstand verringert. Eine Verbesserung des Spritzerverhaltens durch eine höhere Beschleunigung der Nachsetzeinheit wird vermutet, konnte aber nicht nachgewiesen werden.

Die Ziele des Vorhabens wurden erreicht.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben (IGF-Nr. 18.987 BR / DVS-Nr. 04.069) 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 Studienund Abschlussarbeiten zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben:

Technische Universität Dresden	
Sebastian Lauer	Projektarbeit zum Fachpraktikum
Nicolas Stocks	Projektarbeit zum Forschungspraktikum
Christoph Türke	Diplomarbeit
Benjamin Balke	Projektarbeit zum Forschungspraktikum

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

Unser Dank gilt:

Dr. Georg Emeis (Projektpate)	HIE SCHWEISS-SYSTEME GmbH			
Hans-Jürgen Rusch,				
Nicolas Stocks,	Harms & Wende GmbH & Co. KG			
Ralf Bothfeld				
Dr. Wenqi Zhang	SWANTEC Software and Engineering ApS			
Thomas Nett	conntronic GmbH			
Klaus-Dieter Czekalla	Glamatronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH			
Daniel Roxel	Giarriati offic Scriwells- und Affiagentechnik Giribh			
Bernd Rödder				
Stephan Löcherbach	NIMAK GmbH			
Torben Laumann				
Dr. Tillmann Höfer	Daimler AG			
Helmut Braun	Robert Bosch AG			

Carsten Trippe	BENTELER Automobiltechnik GmbH
Katarzyna Giantsios	Technologie-Institut für Metall & Engineering GmbH
Mathias Sarunsky, Robert Gessler Nico Lehmann	Porsche Leipzig GmbH
Manuel Wieland	ARO Welding Technologies
Claus Petersmann	Adient Ltd. & Co. KG
Chris Frohwein	Volkswagen AG
Jürgen Drees	Drees Industrietechnik GmbH
Jörg-Felix Maier	Voestalpine Automotive Components
Henning Schuster	Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH
Axel Schneider	Kapkon GmbH
Uwe Schäfer	HWH QST GmbH

Inhaltsverzeichnis

Zι	ısam	menf	assung	2
D	anks	agung	J	4
In	halts	verze	ichnis	6
Αŀ	bild	ungs\	verzeichnis	9
Τá	abelle	enver	zeichnis	16
Αŀ	okürz	zungs	verzeichnis	17
Ve	erzei	chnis	der Formelzeichen	18
1	Wis	ssens	chaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .	22
	1.1	Anla	ss für den Forschungsantrag	22
	1.2	Aus	gangssituation	23
2	Sta	nd de	er Technik	24
	2.1	Kon	densatorentladungsschweißen	24
	2.2	Verf	ahrenstechnische Grundlagen	25
	2.3	Kon	taktwiderstände	29
	2.4	Mas	chinentechnik des KE-Schweißens	32
	2	2.4.1	Mechanischer Teil der Kondensatorschweißanlage	33
	2	2.4.2	Elektrischer Teil der Kondensatorentladungsschweißanla	ge36
	2.5	Proz	essbeschreibung des Schweißablaufs	38
	2.6	Para	meter und Einstellgrößen	40
3	For	schu	ngsziel	45
4	Ein	geset	zte Anlagentechnik	47
	4.1	Vers	uchanlagen zum Kondensatorentladungsschweißen	47
	4.2	Mes	stechnik zur Datenerfassung beim KE-Schweißen	48
	4	4.2.1	Strommessung	48
	4	4.2.2	Spannungsmessung	48
	4	4.2.3	Wegmessung	53

		4.2.4	Kraftı	messung	55
	4.3	Chr	omatis	sch konfokale Mikroskopie zur	
		Obe	erfläche	entopographiemessung	57
5	Ve	erwen	dete Pr	robenmaterialien	59
6	Uı	ntersu	chung	en der dynamischen Vorgänge	62
	6.1	Dyn	amisch	he Vorgänge beim Kraftaufbau	62
		6.1.1	Versu	uchsdurchführung	62
		6.1.2	Ergeb	onisse der Widerstandsmessung	65
		6.1.3	Ergeb	onisse der Verformungssimulation und Bauteilvermessun	g 67
	6.2	Dyn	amisch	he Vorgänge beim Schweißvorgang	70
		6.2.1	Versu	uchsaufbau und Durchführung	70
		6.2.2	Aufba	au Simulationsmodell	72
		6.2.3	Ausw	vertung und Diskussion der Ergebnisse	74
		6	.2.3.1	Einzelbuckel	74
		6	.2.3.2	Schulterbuckel	87
		6	.2.3.3	Fügeelemente	90
		6	.2.3.4	Weitere Simulationsergebnisse	95
		6	.2.3.5	Einfluss der Nachsetzeinheit auf den Schweißprozess	97
	6.3	Ver	allgem	neinerung der Ergebnisse	.108
7	G	egenü	berste	llung der Ergebnisse mit Zielsetzungen	.114
8	Er	läuter	ung zu	ır Verwendung der Zuwendungen	.116
9	W	issens	chaftli	ch-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der	
	Fc	orschu	ngserg	gebnisse für kleine und mittlere Unternehmen	.117
1() Bi	sherig	e Verö	offentlichungen zu den Forschungsergebnissen	.118
	10.	1 Fach	ntagun	gen, Kolloquien, Fachbeiträge	.118
	10.	2 Stud	dien- u	nd Abschlussarbeiten	.119
1.	1 т.,	onefo.	-m 0 m	ahman	120

11.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen	120
11.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende	122
11.3 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	124
12 Literaturverzeichnis	126
13 Anhang	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung der verschiedenen Widerstandsschweißverfahren im Sinne der DIN 1910-100 [12]
Abbildung 2: Charakteristisches Mikroschliffbild zweier Fügepartner mit einseitiger Buckelgeometrie beim Kondensatorentladungsschweißen [14]
Abbildung 3: Typische Stromformen gebräuchlicher Schweißstromquellen beim konduktiven Widerstandspressschweißen [11]
Abbildung 4: Definitionwichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [13] 28
Abbildung 5: Links: Widerstände und Verfahrenscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [16], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [21] 29
Abbildung 6: C-Gestell mit pneumatischen Antriebsystem (links) [26] und Portalgestell mit hydraulischem Antriebssystem [27]
Abbildung 7: Aufbau einer KE-Schweißanlage in Portalgestellausführung mit Schweißkraft F und elektrodynamischer Kraft F_D [13]33
Abbildung 8: Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts) [13]
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket
Abbildung 10: Prinzipschaltbild einer Kondansatorentladungsschweißanlage [13]36
Abbildung 11: Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen mit einer Buckelgeometrie [13]39
Abbildung 12: Unterschiedlicher Schweißstromverlauf bei gleicher Ladeenergie aber verschiedenen Transformatorübersetzungsverhältnissen [7] 42
Abbildung 13: Temperaturverlauf bi einem Transformatorübersetzungsverhältnis von 200:1 (a) und 400:1 (b) an der Fügestelle und im Abstand von 1,5 mm [7]
Abbildung 14: Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [13]44

Abbildung 15: gemessene Spannungen, ohne Bauteil	50
Abbildung 16: fehlerbehaftete und induzierte Spannungswerte beim KE-Schweißen	52
Abbildung 17: Wegmessung mit Lasertriangulator	55
Abbildung 18: Verifizierung der gemessenen Elektrodenbewegung mittels Motion Tracking in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	55
Abbildung 19: a) piezoelektrischer Kraftaufnehmer CLP/62kN b) Ladungsverstärker CMD600-P	56
Abbildung 20: Distanzmessung mit dem chromatisch-konfokalen Verfahren [37]	58
Abbildung 21: links: technische Zeichnung der Einzelbuckelgeometrie mit Blech; recht: Einzelbuckel und Blech jeweils aus S235	59
Abbildung 22: Geometrie Schulterbuckel (Ring) und Subtrat (Pin)	50
Abbildung 23: 3D-Modelle der verwendeten Schweißmuttern, a) Ringbuckelmutter b) Segmentbuckelmutter	51
Abbildung 24: Schematischer Ablauf des KE-Schweißens, nach [13]	52
Abbildung 25: exemplarische Darstellung der aufgezeichneten Messwerte eine Sekunde nach Beginn der Messung6	54
Abbildung 26: erreichter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der erreichten Elektrodenkraft, Aufsetzgeschwindigkeit 5 mm·s ⁻¹	56
Abbildung 27: erreichter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der erreichten Elektrodenkraft bei Materialkombination weich-hart	56
Abbildung 28: Darstellung des Modells für die Finite-Elemente-Analyse mit Werkzeug und Werkstücken im Simulationsprogramm simufact.forming 12.0.3	58
Abbildung 29: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen der Verformungssimulation - MK. weich-weich	59
Abbildung 30: chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK WH bei 9,1 kN, Eindruck nicht messbar	59
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Untersuchungen	70

Abbildung					Bewertung				71
Abbildung					eoaufnahme 				72
Abbildung 3	34: Mo	odellierung	g des St	romflu	sses bei der	Einzelbu	ıckelgeome	trie	74
Abbildung 3	35: Scl	nweißbere	ich Einz	elbuck	el MK: weich	– weich	l	•••••	76
Abbildung 3	36: Scl	hweißbere	ich Einz	elbuck	el MK: weich	– hart		•••••	77
Abbildung 3	37: Scl	hweißbere	ich Einz	elbuck	el MK: hart -	weich		•••••	77
Abbildung 3	38: Scl	nweißbere	ich Einz	elbuck	el MK: hart -	hart	•••••	•••••	78
Abbildung 3	_				F=10kN, E= s: vor dem Ä				78
Abbildung 4					und Wärmee au einer tecl		0	-	79
Abbildung 4	zum	markierte	en Zeitp	unkt m	inks: Hochge nit markierte	n Mikro	spritzern; r	echts:	81
Abbildung 4	Wer	kstattversı	uch	eingetr	er verschwe etene Rir ften Probe	ngschwe	ißung, r	echts:	83
Abbildung			_		über Ladee	_			83
Abbildung 4	44: Mi	kroschliff (einer Ri	ngschw	veißung, F=1	3,2 kN <i>E</i>	=500Ws	•••••	84
Abbildung 4	45: Sir	nulationsn	nodell b	ei 9 kN	$(\sigma_{Vmax} = 550$	MPa)		•••••	85
Abbildung					wärmung d				86
Abbildung 4	47: Scl	nweißbere	ich Sch	ulterbu	ickel, MK: we	eich - we	ich		88
Abbildung 4	48: Rir	ngbreitenv	vachstu	m durc	h Ladeenerg	gie, MK: v	weich – wei	ch	88
Abbildung	Füge	ezone	beim .	Sch	erlauf nach ulterbuckel 	(Anr	nahme	hoher	89

Abbildung 50: Simulierte Widerstandserwärmung der Teilwiderstände beim
Schulterbuckel90
Abbildung 51: Schweißbereich M8-SBM auf HX26092
Abbildung 52: Wachstumskurve M8 auf HX26092
Abbildung 53: Messdaten des Kopfzugversuches der in Tabelle 9 dargestellten Versuche94
Abbildung 54: Simulation der M8-SBM auf HX260 bei verschiedenen, angenommenen Kontaktwiderständen (bei 0,5 ms)
Abbildung 55: Einfluss der Kontaktierung der oberen Elektrode
Abbildung 56: Einfluss der Kontaktierung der unteren Elektrode
Abbildung 57: Schweißstrom über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 1750Ws98
Abbildung 58: Elektrodenkraft über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 1750Ws98
Abbildung 59: Elektrodenweg über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 1750Ws99
Abbildung 60: Schweißbereiche mit veränderlichen Federpaketen bei EB, $m_{\rm NE} \approx 100{\rm kg}$
Abbildung 61: Vereinfachtes Model einer Nachsetzeinheit
Abbildung 62: Elektrodenkraft und Elektrodenweg der Querschliffe 104
Abbildung 63: Vergleich der Kraftverläufe bei verschiedenen Federsteifigkeiten, oben: mit leichter Nachsetzeinheit, unten: mit schwerer Nachsetzeinheit
Abbildung 64: Vergleich der verschiedenen Schweißbereiche bei variierten NE – SBM-M8 auf HX260 107
Abbildung 65: Vergleich Schweißstrom – Nimak – SBM-M8 auf HX260 – 2250Ws
Abbildung 66: Vergleich Elektrodenkraft – Nimak – SBM-M8 auf HX260 – 2250Ws
Abbildung 67: Vergleich Elektrodenweg – Nimak – SBM-M8 auf HX260 – 2250Ws

Abbildung 68: Vergleich 1 der Versuche bei NIMAK, SBM - HX260	111
Abbildung 69: Vergleich Elektrodenkräfte der Nimak-Versuche mit Maschin (TUD)-Versuche – E =2250Ws, F \approx 15kN	
Abbildung 70: Vergleich Elektrodenwege der Nimak-Versuche mit Maschin (TUD)-Versuche – E =2250Ws, F \approx 15kN	
Abbildung 71: Endwiderstand über Elektrodenkraft in Abhängikeit Aufsetzgeschwindigkeit	
Abbildung 72: Endwiderstand über Elektrodenkraft in Abhängikeit Materialkombination	
Abbildung 73: Endwiderstand über Auftreffgeschwindigkeit in Abhängigkeit Elektrodenkraft	
Abbildung 74: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen Verformungssimulation - MK WH	
Abbildung 75: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen Verformungssimulation – MK HW	
Abbildung 76: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen Verformungssimulation - MK HH	
Abbildung 77: Chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK HH 9,3kN, Eindruck nicht messbar	
Abbildung 78: Chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK WW 9,1 kN, Eindruck ≈0,3 mm	
Abbildung 79: Chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK HW 9,1 kN, Eindruck ≈0,35 mm	
Abbildung 80: Berechnete Temperatur- und Stromdichteverteilung 0,4ms na dem Start der Kondensatorentladung	
Abbildung 81: Schweißbereich Schulterbuckel, MK: weich - hart	137
Abbildung 82: Schweißbereich Schulterbuckel, MK: hart – weich	137
Abbildung 83: Schweißbereich Schulterbuckel, MK: hart - hart	138
Abbildung 84: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: weich - hart	138
Abbildung 85: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: hart - weich	139

Abbildung 86: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: hart - hart – weich	
	139
Abbildung 87: Schweißbereich M8-SBM auf HX340	140
Abbildung 88: Schweißbereich M8-SBM auf 22MnB5	140
Abbildung 89: Schweißbereich M10-RBM auf HX260	141
Abbildung 90: Schweißbereich M10-RBM auf HX340	141
Abbildung 91: Schweißbereich M10-RBM auf 22MnB5	142
Abbildung 92: Wachstumskurve SBM-M8 auf HX340	142
Abbildung 93: Wachstumskurve SBM-M8 auf 22MnB5	143
Abbildung 94: Wachstumskurve RBM-M10 auf HX260	143
Abbildung 95: Wachstumskurve RBM-M10 auf HX340	144
Abbildung 96: Wachstumskurve RBM-M10 auf 22MnB5	144
Abbildung 97: Schweißstrom über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 2250Ws	145
Abbildung 98: Elektrodenkraft über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 2250Ws	145
Abbildung 99: Elektrodenweg über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 2250Ws	146
Abbildung 100: Querschliff EB ungeätzt - F =7kN, E =450Ws, 3 Tellerfedern: k =6,1kN/mm	146
Abbildung 101: Querschliff EB ungeätzt - F =7kN, E =450Ws, 6 Tellerfedern: k =2,9kN/mm	147
Abbildung 102: Querschliff EB ungeätzt - F =7kN, E =450Ws, 12 Tellerfedern: k =1,7kN/mm	147
Abbildung 103: Querschliff EB geätzt - F =7kN, E =450Ws, 3 Tellerfedern: k =6,1kN/mm	148
Abbildung 104: Querschliff EB geätzt - F =7kN, E =450Ws, 6 Tellerfedern: k =2,9kN/mm	148
Abbildung 105: Querschliff EB geätzt - F =7kN, E =450Ws, 12 Tellerfedern: k =1.7kN/mm	149

Abbildung 106: Nachsetzeinheit mit m=8kg149
Abbildung 107: Schweißstrom bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg 150
Abbildung 108: Elektrodenweg bei SBM-M8, F=14kN, E=2025Ws, m=100kg 150
Abbildung 109: Nachsetzweg bei SBM-M8, F=14kN, E=2025Ws, m=100kg 151
Abbildung 110: Zylinderweg bei SBM-M8, F=14kN, E=2025Ws, m=100kg 151
Abbildung 111: Vergleich der verschiedenen Schweißbereiche bei variierten NE – RBM-M10 auf HX340152
Abbildung 112: Schweißstrom bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg 153
Abbildung 113: Elektrodenweg bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100k 153
Abbildung 114: Nachsetzweg bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100k 154
Abbildung 115: Zylinderweg bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100k 154
Abbildung 116: Vergleich Schweißströme der Nimak-Versuche mit Maschine 2 (TUD)-Versuche – 2250Ws, <i>F</i> ≈15kN155
Abbildung 117: Vergleich Elektrodenwege der Nimak-Versuche mit Maschine 2 (TUD)-Versuche – <i>E</i> =2250Ws, <i>F</i> ≈15kN – Darstellung über 90 Sekunden156
Abbildung 118: Vergleich 2 der Versuche bei NIMAK, SBM - HX260 156
Abbildung 119: Vergleich Schweißströme der Nimak-Versuche mit Maschine 2 (TUD)-Versuche – 2250Ws, <i>F</i> ≈19kN157
Abbildung 120: Vergleich Elektrodenkräfte der Nimak-Versuche mit Maschine 2 (TUD)-Versuche – $E=2250\mathrm{Ws},F\approx19\mathrm{kN}157$
Abbildung 121: Vergleich Elektrodenwege der Nimak-Versuche mit Maschine 2 (TUD)-Versuche – $E=2250\mathrm{Ws},F\approx19\mathrm{kN}158$
Abbildung 122: Vergleich Elektrodenwege der Nimak-Versuche mit Maschine 2 (TUD)-Versuche – <i>E</i> =2250Ws, <i>F</i> ≈19kN – Darstellung über 90 Sekunden158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenndaten der verwendeten KE-Schweißmaschinen	47
Tabelle 2: Verwendete Materialien für grundlegende Untersuchungen	59
Tabelle 3: Verwendete Materialien für natürlichen Buckel (Schulterbuckel)	60
Tabelle 4: Einstellparameter und Werkstoffe	63
Tabelle 5: Ergebnisse des Meißeltests	74
Tabelle 6: Rechnerische Abschätzung der Volumenexpansion (mit Werten aus [44], [45])	80
Tabelle 7: Volumen und auf das Volumen bezogener Maximalwärmestrom der einzelnen Teilwiderstände beim Einzelbuckel	86
Tabelle 8: Zusammenstellung verschiedener Anforderungen an Schweißverbindungen der vorgestellten Fügeelementen	91
Tabelle 9: Vergleich zwischen Segmentbuckelmutter und Ringbuckelmutter (Werte aus exemplarischen Versuchen mit HX340)	93
Tabelle 10: Anordnung und Federkennwerte der verwendeten Federpakete	99
Tabelle 11: Messwerte in Querschliffen der EB10	00

Abkürzungsverzeichnis

EB Einzelbuckelgeometrie

KE-Schweißen Kondensatorentladungsschweißen

MK Materialkombination/Werkstoffkombination

NE Nachsetzeinheit

PA Projektbegleitender Ausschuss

PTFE Polytetraflourethylen

RBM Ringbuckelmutter

SBM Segmentbuckelmutter

WEZ Wärmeeinflusszone

ZP zerstörende Prüfung

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
а	Absenkweg	mm
$A_{ m E}$	Elektrodenkontaktfläche	mm ²
$A_{ m F}$	Fügefläche	mm ²
$A_{ m L}$	Querschnittfläche eines Leiters	mm ²
A_{s}	scheinbare Kontaktfläche	mm ²
A_{t}	tragende Kontaktfläche	mm ²
$A_{ m w}$	wirksame Kontaktfläche	mm ²
$b_{ m f}$	Breite des nicht angebundenen Bereichs	μm
ECR	theoretischer Kontaktwiderstand	$\Omega \cdot m^2$
$F_{\mathbf{k}}$	Abzugskraft	N
$F_{ m p}$	Presskraft	N
$h_{ m WEZ}$	Höhe der WEZ	μm
I	Intensität (sichtbares Licht)	$\frac{W}{m^2}$
I	Stromstärke (allgemein)	A
I_{eff}	Effektivstrom	A
I_p	Spitzenstrom	A

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
k	Federkonstante	$\frac{kN}{mm}$
K	Oberflächenzustand	-
l_L	Länge eines Leiters	m
М	molare Masse (allgemein)	$\frac{g}{mol}$
$M_{ m Fe}$	molare Masse von Eisen	$\frac{g}{mol}$
P	Druck in der Fügezone	$\frac{N}{mm^2}$
P	Leistung (allgemein)	W
ġ	Leistungsdichte (allgemein)	$\frac{W}{m^2}$
Q	Wärmemenge	J
R	elektrischer Widerstand	Ω
$R_{ m E}$	Engewiderstand	Ω
R_G	universelle Gaskonstante	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot mol \cdot K}$
R_{ges}	Gesamtwiderstand	Ω
$R_{ m K}$	Kontaktwiderstand	Ω
t	Zeit	S
T	Temperatur	K

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
t_0	Anfangszeit	S
$T_{ m b,Fe}$	Siedetemperatur unlegierter Stahl	
$t_{ m h}$	Schweißzeit (KE-Schweißen)	S
t_I	Stromflusszeit	S
$t_{ m p}$	Stromanstiegszeit	S
$t_{ m w}$	Schweißzeit (allgemein)	S
U	Spannung (allgemein)	V
$U_{ m behaf}$	fehlerbehaftete Spannung	V
U_{frei}	fehlerfreie Spannung	V
$U_{ m i}$	induzierte Spannung	V
U_R	Spannung über einen Widerstand	V
V	Volumen (allgemein)	m^3
V_{f}	Volumen im festen Zustand	m^3
V_{g}	Volumen im gasförmigen Zustand	m^3
Δx	Federweg	mm
λ_{\min}	minimale Wellenlänge	m
λ_{max}	maximale Wellenlänge	m
λ_I	Wellenlänge der größten Intensität	m

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$\sigma_{ m S}$	Streckgrenze des weicheren Materials	$\frac{N}{mm^2}$
ϑ	Temperatur	°C
$ ho_{ ext{Fe}}$	Dichte unlegierter Stahl	$\frac{g}{cm^3}$
$ ho_R$	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \cdot \frac{mm^2}{m}$

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

1.1 Anlass für den Forschungsantrag

Das KE-Schweißen ist ein Widerstandspressschweißverfahren, das vorwiegend für das Buckelschweißen eingesetzt wird. Mit Spitzenströmen bis zu 1000kA bei Schweißzeiten von ca. 10ms können Ringbuckel bis 200mm Durchmesser verschweißt werden. Die Schweißverbindung entsteht, indem ein oder mehrere Buckel durch einen Stromimpuls konduktiv erwärmt und gleichzeitig durch Krafteinwirkung verformt werden. Wesentliche Vorteile des KE-Schweißens sind neben der kurzen Prozesszeit die geringe notwendige elektrische Anschlussleistung, der hohe Wirkungsgrad und die geringe thermische Belastung der Werkstücke und Werkzeuge. Der Prozess ist durch eine sehr hohe Dynamik gekennzeichnet und läuft ereignisgesteuert ab. Ein aktives Eingreifen in den Prozessablauf ist mit sehr hohem Aufwand verbunden und deshalb nicht üblich. Die Reproduzierbarkeit ist unter der Voraussetzung, dass die Toleranzen der Buckelgeometrie in engen Grenzen liegen und dass die Maschine ein sehr gutes Nachsetzverhalten aufweist, sehr hoch [1-3]. Zur Qualitätssicherung werden oft repräsentative Werte bzw. zeitliche Verläufe der wichtigsten Prozessparameter, wie Speicherenergie, Anpresskraft, Stromstärke und Absenkweg überwacht [4-6]. Trotzdem werden bei nahezu allen Anwendungen ZP als zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahme angewandt. Üblich sind Belastungsprüfungen zur Ermittlung mechanischer Kennwerte, die Bewertung der Bruchflächen sowie metallographische Untersuchungen [4, 7]. Die Bewertung von Makroschliffen ist problematisch, weil sich meist keine Schweißlinse ausbildet, sondern eine Grenzfläche sichtbar ist, die nicht eindeutig auf die Ausbildung einer Schweißverbindung schließen lässt. Beim Auftreten von Fehlteilen wird, insbesondere bei sicherheitsrelevanten Teilen, die gesamte Fertigung von der vorhergehenden Prüfung an als Ausschuss gewertet. Über die Ursachen der Fehler, die einzuhaltenden Randbedingungen sowie deren Grenzen, herrscht meist Unklarheit.

Die Einstellung der Prozessparameter erfolgt anhand von Erfahrungswerten und wird durch Bewertung des Prozessergebnisses validiert. Es wird hingenommen, dass beim KE-Schweißen aufgrund der sehr hohen Stromstärke immer Spritzer auftreten,

die z.B. bei Gewindeträgern zu Ausschuss führen können. Der Entstehungsmechanismus ist jedoch ungeklärt. Somit kann keine Strategie zur Vermeidung von Spritzern abgeleitet werden.

Die Qualität der Schweißverbindung hängt neben dem Verlauf der elektrischen Parameter wesentlich vom Verlauf der mechanischen Parameter Kraft und Elektrodenweg ab. Die Kraftsysteme der Schweißanlagen können das Aufrechterhalten einer ausreichenden Elektrodenkraft und das schnelle Nachsetzen der Elektroden in der Regel nicht gewährleisten. Deshalb werden Nachsetzeinheiten (Polymer- oder Tellerfedern oder elektromagnetische Systeme) eingesetzt. Über die Art der zu verwendenden Nachsetzeinheit (NE) sowie die Grenzwerte des Krafteinbruchs während des Schweißens existieren keine Richtlinien, vielmehr wird auf die Erfahrung des jeweiligen Maschinenherstellers vertraut. Letztlich entscheidet das Schweißergebnis.

1.2 Ausgangssituation

Ausgangspunkt sind die Ergebnisse von Vorversuchen, bei denen sehr hohe Leistungsdichten auftraten. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ließen die Entstehung von Metalldampfbildung vermuten.

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 [8]. 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 [9]. Während das Verfahren bereits seit 1940 im nordamerikanischen Schrifttum bekannt ist, erscheint eine der ersten deutschsprachigen Veröffentlichungen im Jahr 1960 von F. Früngel [10].

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 [11].

Das Kondensatorentladungsschweißen gehört zur Gruppe der konduktiven Widerstandsschweißverfahren, wird aber im Sinne von DIN 1910-100 [12] nicht durch einen eigenständigen Schweißprozess charakterisiert. Es stellt eine besondere Form des Buckelschweißens dar, findet aber auch vereinzelt als Widerstandspunktschweißen Anwendung [13].

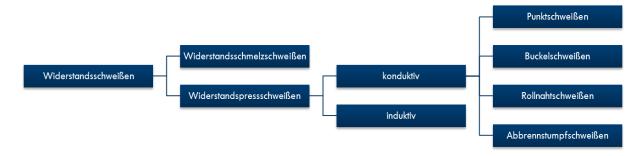


Abbildung 1: Klassifizierung der verschiedenen Widerstandsschweißverfahren im Sinne der DIN 1910-100 [12]

Aus heutiger Sicht dominiert das Buckelschweißen, das heißt ein Fügeteilpartner besitzt eine buckelähnliche Kontur, um den Stromfluss auf die Berührungsfläche zu

konzentrieren [11]. Beim Widerstandspunktscheißen wird die notwendige Stromkonzentration dagegen durch die Geometrie der Elektrodenspitze realisiert. Während das Widerstandspunktschweißen vermehrt Einsatz im Karosseriebau oder bei dem Fügen von dünnen Folien findet, wird das Kondensatorentladungsschweißen unter anderem in großer Vielfalt im Getriebebau bei unterschiedlichen Werkstoff- und Wanddicken-Kombinationen genutzt, um Gewicht, Energie und Ressourcen einzusparen [14].

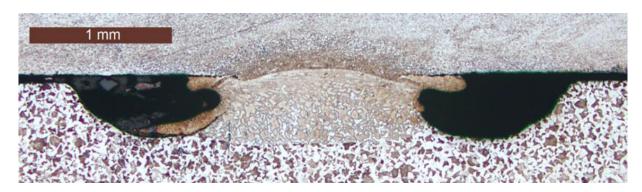


Abbildung 2: Charakteristisches Mikroschliffbild zweier Fügepartner mit einseitiger Buckelgeometrie beim Kondensatorentladungsschweißen [14]

2.2 Verfahrenstechnische Grundlagen

Die grundlegende Wirkweise teilt das KE-Schweißen mit anderen konduktiven Widerstandspressschweißprozessen. Das stoffschlüssige Fügen der Werkstücke passiert hierbei unter gleichzeitiger Anwendung von Kraft und Wärme. Die dafür erforderliche Wärme entsteht innerhalb der Werkstücke durch einen elektrischen Stromfluss, d.h. durch die Energie bewegter Ladungsträger, die zu einer Widerstandserwärmung am elektrischen Widerstand der Schweißzone führt [1]. Sowohl die Einwirkung der Kraft, als auch die Übertragung des elektrischen Stroms auf die Werkstücke findet durch Kontakt mit Elektroden statt, zwischen denen der Stromfluss konduktiv, also durch die Leitfähigkeit der Fügepartner, zustande kommt. Die beim Schweißen zwischen den Elektroden entstehende Wärmemenge Q ergibt sich nach dem ersten loulschen Gesetz zu:

$$Q = \int_{t=t_0}^{t=t_w} I^2(t) R_{ges}(t) dt$$
 (1)

Daraus ist ersichtlich, dass die den Werkstücken zugeführte Wärme von der Stromflusszeit t, der Stromstärke I sowie dem elektrischen Gesamtwiderstand im

Schweißstromkreis R_{ges} abhängt. Es ist aber zu beachten, dass nicht die gesamte Wärme an der Schweißstelle zur Verfügung steht. Ein Teil der Wärme geht durch Ableitung in die Bauteile und in die Elektroden sowie durch Wärmestrahlung für die Verbindungsbildung verloren. Die Höhe der Verlustwärme ist im Wesentlichen abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der Werkstückmaterialien, deren Geometrie und der Stromflusszeit [15]. Daher ist es sinnvoll, die Stromflusszeit gering zu halten und die erforderliche Wärmemenge über entsprechend höhere Schweißströme einzubringen [16]. Die resultierende Wärmemenge an der Schweißstelle muss ausreichen, um unter Einwirkung der Elektrodenkraft eine schmelzflüssige Phase zwischen den Werkstücken zu bilden. Sobald der Stromfluss wieder abklingt, setzt das Abkühlen und Erstarren der Schmelze ein und es entsteht eine stoffschlüssige Verbindung.

Innerhalb der konduktiven Widerstandspressschweißprozesse unterscheidet sich das Kondensatorentladungsschweißen von anderen Verfahren durch die Art der Schweißstromquelle und deren Stromform. Charakteristisch für das KE-Schweißen ist ein einzelner, kurzer, hoher Stromimpuls von bis zu 1000 kA, der aus der transformierten Entladung eines Kondensators erzeugt wird [17]. Die folgende Abbildung zeigt den Stromverlauf beim Kondensatorentladungsschweißen (hier mit KES-Impuls bezeichnet) sowie die charakteristischen Stromverläufe anderer Schweißstromquellen.

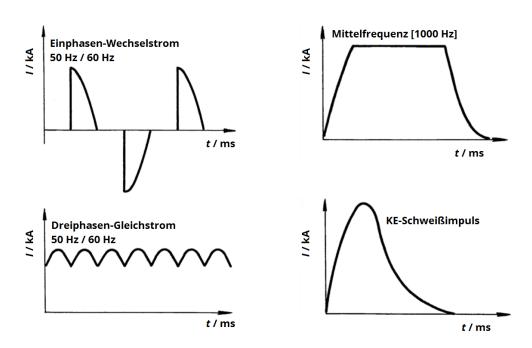


Abbildung 3: Typische Stromformen gebräuchlicher Schweißstromquellen beim konduktiven Widerstandspressschweißen [11]

Im Gegensatz zu herkömmlichen Wechsel- oder Gleichstromquellen wird die Energie zur Ausbildung der Schweißverbindung nicht direkt dem Netz entnommen, sondern in Kondensatoren zwischengespeichert. Darin liegt auch der wesentliche Unterschied zu Wechselstromquellen mit Phasenanschnittsteuerung, die theoretisch ähnlich kurze Schweißzeiten ermöglichen [18]. Während bei den Wechselstromquellen der Schweißstrom I und die Schweißzeit t_w vorgegeben wird, wird beim Kondensatorentladungsschweißen die Ladespannung und damit, in Verbindung mit den Kondensatoren, die Ladeenergie festgelegt. Das bedeutet, dass gemäß Gleichung (1) bei vorgegebenem Strom die an die Schweißstelle abgegebene Wärme der Wechselstromquelle direkt vom elektrischen Gesamtwiderstand im Schweißstromkreis der Werkstücke abhängt, wohingegen die Ladeenergie beim KE-Schweißen allein durch die gespeicherte Energie im Kondensator bestimmt wird. Schwankende Übergangswiderstände haben so einen geringeren Einfluss auf die Güte der Schweißverbindung als bei herkömmlichen Schweißstromquellen. [19]

Die im Kondensator gespeicherte Energie des elektrischen Feldes in Form der Ladungsmenge Q_{el} lässt sich durch die Wahl der Kapazität C sowie die Regelung der Ladespannung U einstellen.

$$Q_{el} = CU \text{ mit } Q_{max} < CU_{max} \tag{2}$$

Je höher die Ladespannung am Kondensator ist, desto mehr Ladung und Energie hat der Kondensator gespeichert. Allerdings ist die Aufladung nach oben durch die Durchschlagsspannung U_{max} des Kondensators begrenzt. Mehr Ladung erfordert dann eine größere Kapazität. Allgemein gilt für die im Kondensator gespeicherte Energie:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \tag{3}$$

Eine vergleichende Betrachtung der Literatur offenbart widersprüchliche Angaben bezüglich der Defintition der Schweißzeit einer KE-Schweißung. Teilweise wird die Schweißzeit als die Zeit mit dem Erreichen von 80% bis zum Abfall auf 50% des Spitzenstroms bzw. als Zeit zwischen den Integrationsgrenzen definiert [17][20]. Das DVS-Merkblatt 2911 [13] 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_I Stromflusszeit, Zeit bis zum Abfall des Schweißstromes auf 5% des Spitzenstroms
- I_{eff} Effektivwert des Schweißstromes, berechnet sich aus dem Integral der Stromstärke über der Schweißzeit

Der Zeitpunkt t_0 wird beim Überschreiten der Triggerschwelle (5% des Maximalwertes der Stromstärke-Skala) festgelegt. Diese Festlegung dient hauptsächlich zur schnellen Auswertung von Stromkurven z.B. für in die Schweißmaschine integrierte Messtechnik (da der Spitzenstrom erst nach der Schweißung bekannt ist). Für die Auswertung der Messdaten sollte ein geeigneterer Trigger-/Startpunkt festgelegt werden. Abbildung 4: zeigt eine schematische Zuordnung der genannten Kenngrößen.

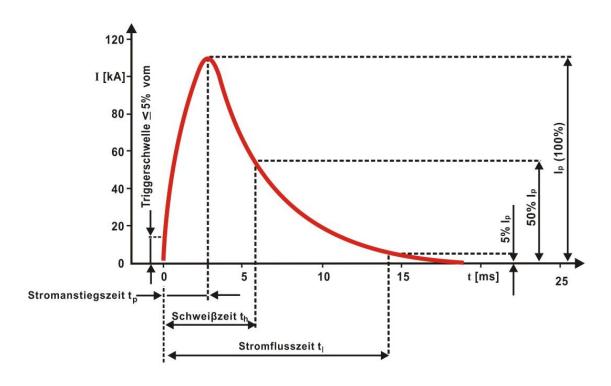


Abbildung 4: Definition wichtiger Kenngrößen anhand des Stromverlaufes [13]

Der Schweißstrom erzeugt die zum Fügen notwendige Wärme durch die Joule'sche Erwärmung an den Widerständen der Schweißstelle, die eine Reihenschaltung verschiedener Widerstände darstellen. Die Summe der Teilwiderstände R_i addieren sich zum Gesamtwiderstand R_{ges} . Da der die Widerstände durchfließende Strom in der

Reihenschaltung aller Teilwiderstände identisch ist (vgl. Abbildung 5), teilt sich die eingebrachte Wärmemenge entsprechend dem Verhältnis der Teilwiderstände auf.

Eine Besonderheit beim Buckelschweißen ist die Stromdichtekonzentration an der Fügestelle durch die Buckelgeometrie. Im Vergleich zum Widerstandspunktschweißen, bei dem die Elektroden zusätzlich zur Einleitung des Stromes ebenfalls für die Konzentration der Stromdichte sorgen. Dadurch werden großflächige Elektroden eingesetzt, wodurch die Erwärmung an den Elektrodenkontaktflächen reduziert und der Elektrodenverschleiß verringert wird.

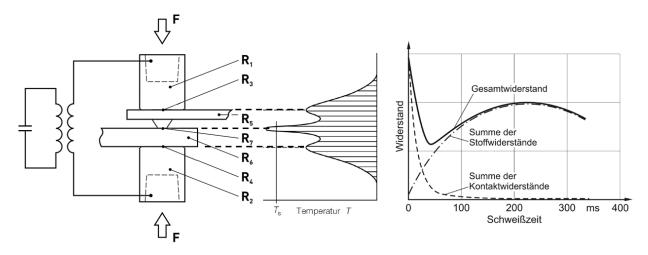


Abbildung 5: Links: Widerstände und Verfahrenscharakter beim Widerstandsbuckelschweißen; Mitte: Temperaturverteilung nach [16], rechts: Widerstandsverlauf über der Stromflusszeit nach [21]

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 Finiten-Elemente-Analyse (siehe Kapitel 3.4) und der entsprechenden Messgrößen wichtig (siehe Kapitel 3.2). In der DIN EN ISO 18594 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. [29]

Der Stoffwiderstand resultiert aus den Zusammenstößen zwischen den durch die Spannung beschleunigten Elektronen des Leiters mit den Atomen des Leiters. Die freien Elektronen werden dadurch wieder abgebremst, was der Hemmung des Elektronenflusses gleich kommt. Der Stoffwiderstand ist abhängig von der Länge des durchflossenen Leiters, der Querschnitt der stromdurchflossenen Fläche und dem Werkstoff. Für einen homogenen, linearen Leiter mit dem Querschnitt A_L und der Länge I_L gilt die Gleichung:

$$R = \rho(\vartheta) \cdot \frac{l_{\rm L}}{A_{\rm L}} \tag{4}$$

Die materialabhängige Proportionalitätskonstante ρ_R heißt spezifischer elektrischer Widerstand oder Resistivität. Diese ist temperaturabhängig. Durch die direkte Proportionalität zwischen dem Stoffwiderstand eines Leiters und dem spezifischen elektrischen Widerstand wird in Gleichung (4) deutlich, dass auch der Stoffwiderstand temperaturabhängig ist. Somit nimmt der elektrische Widerstand von metallischen Leitern mit steigender Temperatur zu. Die physikalische Ursache ist die zunehmende Schwingbewegung, die Atome und Moleküle in jedem Stoff abhängig von ihrer Temperatur ausführen. Bei höheren Intensitäten steigt die statistische Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßens von freien Elektronen und Atomen an. Das hat zur Folge, dass das Fließen eines Stromes mit steigender Temperatur immer weiter behindert wird und der Widerstand steigt. [22, 23]

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 $\Delta R = R_{\rm K}$ 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 $F_{\rm P}$ aufeinander gepresst, berühren sie sich nicht, wie auf den ersten Blick anzunehmen, auf der ganzen scheinbaren Kontaktfläche $A_{\rm S}$, 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 At genannt, besteht im Falle einer technisch sauberen Oberfläche ein elektrischer Kontakt. Bei der Betrachtung der verwendeten Elektroden aus Kupferlegierungen und den zu verarbeitenden Blechen aus unlegierten oder höherfesten Stahl wird schnell deutlich, dass hierbei nicht von einer technisch sauberen Oberfläche gesprochen werden kann. Viel mehr befinden sich über dem Grundwerkstoff verschiedene Schichten nichtmetallischer Atome und Moleküle, wie zum Beispiel in Passivierungsschichten gebundene Sauerstoffatome. Auch andere Schichten aus Staubteilchen oder ähnlichen Verunreinigungen können die Stromleitung behindern. Somit bleiben von der tragenden Kontaktfläche nur kleine Flächenbereiche übrig, die aus reinen metallischen Berührungsflächen beste-Die Summe dieser Bereiche, auch a-spots (aus dem Englischen: asperity=Unebenheit) genannt, bildet die sogenannte wirksame Kontaktfläche Aw. Die Widerstandserhöhung durch die a-spots wird Engewiderstand R_E genannt. Dieser entsteht durch die Einschnürung der Strombahnen in den Berührungsflächen, vergleichbar der Spannungsüberhöhung in einem gekerbten 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

Der Fremdschichtwiderstand RF 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:

$$R_{\rm K} = R_{\rm E} + R_{\rm F} \tag{5}$$

Dies gilt allerdings nicht mehr für den Fall $R_{\rm F} \gg R_{\rm E}$, da unter diesen Bedingungen Enge- und Fremdschichtwiderstand nicht mehr voneinander unabhängig sind. [24, 25]

2.4 Maschinentechnik 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 6 und Abbildung 7).





Abbildung 6: C-Gestell mit pneumatischen Antriebsystem (links) [26] und Portalgestell mit hydraulischem Antriebssystem [27]

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 Kraftrichtung geneigt und dadurch die Krafteinwirkung auf die Fügeteile ungleichmäßig verteilt. Das hat insbesondere beim Schweißen von Ringbuckeln größeren Durchmessers negative Auswirkungen. [13]

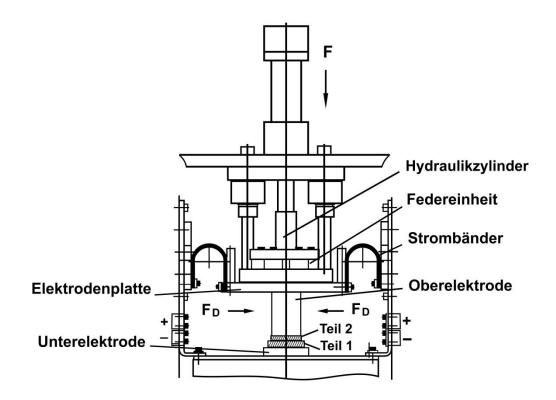


Abbildung 7: Aufbau einer KE-Schweißanlage in Portalgestellausführung mit Schweißkraft F und elektrodynamischer Kraft FD [13]

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 dünne, bandförmige Leiter aus Kupfer. Die Unterelektrode ist fest gelagert, wohingegen die Oberelektrode durch

Anpressen den Schweißdruck erzeugt. Daher wird die Stromübertragung zur Oberelektrode durch eine Kontaktplatte realisiert. Um die ohmschen Verluste der Strombänder möglichst gering zu halten, müssen die Leiter entsprechend niederohmig sein [28]. Dies wird durch eine möglichst große Querschnittsfläche und eine geringe Länge der Leiter erreicht. Außerdem sind alle Kontaktstellen versilbert, um eine schlechtere Leitfähigkeit infolge von Oxidation zu verhindert [7]. Der Stromkreis 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 [29]. In und um die Leiter bzw. Leiterschleife bildet sich dabei ein magnetisches Feld. Zusätzlich zur Aufbiegung macht sich insbesondere auf der offeeine elektromagnetische von C-Gestellen Verdrängung Schweißergebnis bemerkbar. Die wirkende elektrodynamische Lorentz-Kraft FD überlagert sich mit der Schweißkraft und beansprucht so die Elektroden und deren Führung und das Schweißgut wird nach außen gedrängt. Das Portalgestell wirkt mit seiner geometrisch symmetrischen Anordnung diesem Effekt entgegen [13, 27].

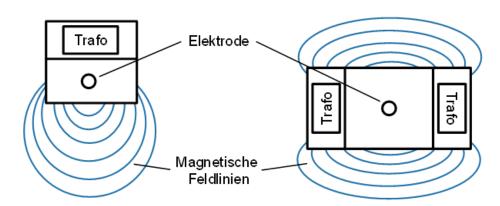


Abbildung 8: Qualitative Darstellung der magnetischen Feldlinien am C-Gestell (links) und Portalgestell (rechts) [13]

Die Schweißqualität beim Widerstandsbuckelschweißen wird neben den Prozessparametern Schweißstrom, Elektrodenkraft stark durch das Nachsetzverhalten beeinflusst. Während des Schweißimpulses wird der Schweißbuckel in sehr kurzer Zeit abgeschmolzen. Die beweglichen Oberelektroden der Anlage müssen in kürzester Zeit um den Betrag des Abschmelzweges nachsetzen. Bricht die Schweißkraft 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. Besonders während der Anfänge des Widerstandsbuckelschweißens war das nicht ausreichende Nachsetzverhalten der Maschinen lange Zeit problematisch [15]. Das servomotorische, pneumatische oder hydraulische Kraftsystem alleine würde zu träge reagieren und wird deshalb um Nachsetzsysteme, die vom eigentlichen Krafterzeugungssystem abgekoppelt sind, erweitert. Abbildung 9 stellt schematisch die Wirkungsweise dar und verdeutlicht die Notwendigkeit einer dynamischen Nachsetzeinheit im Kondensatorentladungsschweißprozess. Im ersten Schritt befinden sich beide Fügebauteile zwischen der Ober- und der fest eingespannten Unterelektrode. Die Nachsetzeinheit ist als ein Federpaket mit zwei parallel geschalteten Federn dargestellt und zwischen der Oberelektrode und der als blauer Kasten abstrahierten Krafteinheit angeordnet.

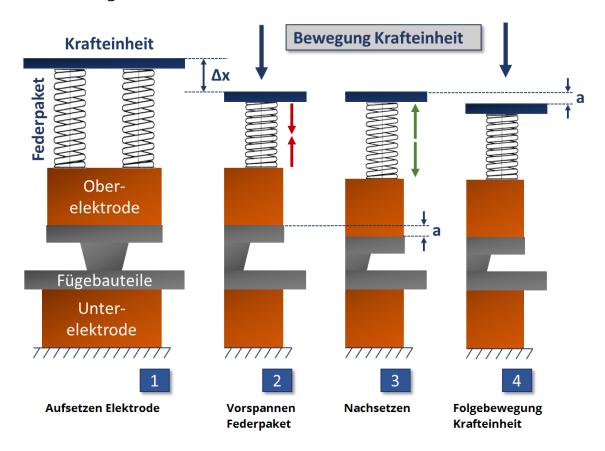


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Nachsetzeinheit mit Federpaket

Im nächsten Schritt wird von der Krafteinheit die voreingestellte Schweißkraft in das System eingeleitet. Das Federpaket wird soweit um den Federweg Δx gestaucht, bis

die resultierende Federkraft der Schweißkraft entspricht. Der Einsinkweg der Elektroden wird in dieser schematischen Darstellung vernachlässigt. Zwischen dem zweiten und dritten Schritt wird der Buckel aufgeschmolzen und bewegt sich innerhalb von wenigen Millisekunden um den Betrag des Absenkweges α in Kraftrichtung nach unten. Der dritte Schritt zeigt deutlich, dass die träge Krafteinheit der Abschmelzbewegung nicht folgen kann und auf derselben Höhe verbleibt. Das vorgespannte und weitaus dynamischere Federpaket setzt dem abschmelzenden Buckel schnell, im Idealfall synchron mit der Abschmelzbewegung, nach und verringert bzw. eliminiert den Krafteinbruch. Der mechanische Kontakt zwischen den Fügebauteilen und den Elektroden bleibt erhalten. Im letzten Schritt folgt die Krafteinheit der Buckelbewegung. In modernen Anlagen wird die Nachsetzeinheit über Stahlfederpakete oder Elastomere realisiert. Neuste Maschinentechnik ermöglicht das Nachsetzen mit einem elektromagnetischen Bewegungseinheit [30]. [7]

2.4.2 Elektrischer Teil der Kondensatorentladungsschweißanlage

Der elektrische Aufbau einer KE-Schweißanlage wird anhand eines allgemeinen Prinzipschaltbildes in Abbildung 10 dargestellt. Eine Vielzahl elektrischer Bau-gruppen ist nötig, um den beim KE-Schweißen charakteristischen Stromverlauf zu realisieren. Hinzu kommt eine Schweißsteuerung und Überwachung.

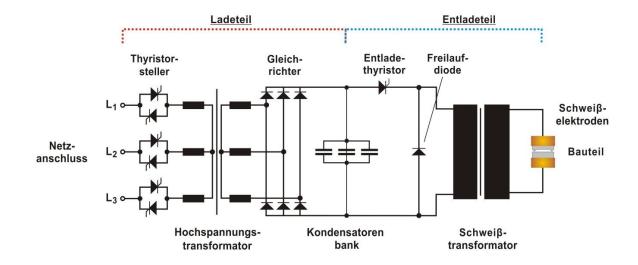


Abbildung 10: Prinzipschaltbild einer Kondensatorentladungsschweißanlage [13]

KE-Schweißanlagen werden üblicherweise an 400 V Drehstrom betrieben, wobei die eigentliche Schweißung galvanisch vom Netz getrennt abläuft [13]. 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 Ladeenergie geladen. Diese bestimmt sich nach Gl. (3) durch die Kapazität des Kondensators und der Ladespannung, sodass die Schweißsteuerung die vorgegebene Ladeenergie über die Messung der Spannung am Kondensator regelt. Die Steuerung beeinflusst dabei die gespeicherte Energie durch den Ladestrom des Kondensators. Dazu regelt sie den aus dem Netz entnommenen Strom mit einem 3-Phasen-Tyristorsteller, der den Effektivwert des Stroms durch Phasenanschnittsteuerung verändert (siehe Abbildung 10, Thyristorsteller). Der anschließende Ladetransformator hat die Aufgabe, die netzseitige Spannung bis auf den maximalen Wert der Ladespannung am Kondensator zu transformieren (siehe Abbildung 10, Hochspannungstransformator). Im letzten Schritt wird der Ladestrom gleichgerichtet (siehe Abbildung 10, Gleichrichter). Sobald die vorgegebene Ladeenergie im Kondensator erreicht ist, reduziert die Schweißsteuerung den Ladestrom soweit, dass die Menge an Energie nur noch stabilisiert wird. Der Kondensator besteht dabei bspw. aus einem oder mehreren parallel geschalteten Metallfolienkondensatoren mit hoher Spannungsfestigkeit und niedriger Selbstinduktion (siehe Abbildung 10, Kondensatorbank) [7]. Zur Sicherheit verfügen die KE-Schweißanlagen über eine gesonderte Entladestufe, die bei Bedarf für eine geregelte Entladung des Kondensators ohne entsprechende Schweißanwendung sowie dauerhaft für eine kontinuierliche Langzeitentladung sorgt [11]. Bevor der eigentliche Schweißprozess mit dem Entladen des Kondensators beginnt, prüft die Schweißsteuerung, ob die Istwerte der Ladeenergie und der Elektrodenkraft bzw. der eingestellten Vorkraft den geforderten Sollwerten entsprechen. Bei positiver Prüfung sendet die Schweißsteuerung einen Auslöseimpuls an einen Entladethyristor (siehe Abbildung 10, Entladethyristor), sodass sich der Kondensator über den Schweißtransformator (siehe Abbildung 10, Schweißtransformator) entlädt [7]. Dabei ergibt sich das Übersetzungsverhältnis ü 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 [13]. Dabei beschreibt ü das Verhältnis der Wicklung N_1 zu N_2 des Schweißtransformators [7]. Die folgende Formel zeigt die Zusammenhänge zwischen der Übersetzung, den Wicklungszahlen und den elektrischen Kennwerten:

$$\ddot{\mathbf{u}} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \tag{6}$$

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. Das genaue Transformatorübersetzungsverhältnis ist von den elektronischen Komponenten abhängig, die vom Hersteller verbaut worden sind und kann durch Umschalten bzw. Umklemmen verändert werden [17]. Der Schweißtransformator ist dabei möglichst induktions- und streuungsarm aufgebaut und besteht sekundärseitig aus nur wenigen Windungen [19, 29]. Im Sekundärstromkreis befinden sich die Elektroden mit den zu verschweißenden Bauteilen, sodass der Entladestrom über die Schweißstelle fließt.

Da die Kondensatorentladungsschweißanlagen in ihrer Anschaffung aufgrund ihres Aufbaus teurer als Schweißanlagen mit herkömmlichen Schweißstromquellen sind, wird KE-Schweißen vor allem in der Massenfertigung eingesetzt [21]. Die höheren Investitionskosten der Anlage werden durch niedrige laufende Kosten des Kondensatorentladungsschweißen wieder ausgeglichen [7, 13]. Dazu tragen vor allem geringere Energiekosten durch effiziente Ladeenergiesteuerung, geringe Netzanschlussleistung sowie ein möglicher Entfall der Elektrodenkühlung bei [15]. Außerdem wirken sich der geringe Elektrodenverschleiß, hohe Schweißgeschwindigkeit und wenig Nacharbeit bzw. Ausschuss durch reproduzierbare Schweißqualität positiv auf die Kosten aus. Die hohe Wirtschaftlichkeit führt dazu, dass KE-Schweißen zunehmend mit anderen Schweißverfahren wie z.B. Diffusionsschweißen, Strahlschweißen oder Rührreibschweißen in den Wettbewerb tritt. [11]

2.5 Prozessbeschreibung des Schweißablaufs

Nachdem die Teile in die Aufnahme eingelegt werden, arbeitet die Schweißsteuerung ereignisgesteuert folgende Schritte ab: Um ein zu hartes Aufsetzen der Elektroden auf die Fügeteile zu verhindern, arbeitet die KE-Schweißanlage mit einer voreingestellten Vorkraft. Bei Pneumatik-/Hydraulikantrieben muss diese Vorkraft größer sein, als die Losbrechmomente der beweglichen Teile. Sind die Elektroden geschlossen, schaltet die Steuerung von Vor- auf Schweißkraft und das Antriebssystem passt die Elektrodenkraft entsprechend an. Wenn die Kondensatorenbank den notwendigen Ladezustand erreicht hat, zündet die Steuerung den Entladethyristor, woraufhin

der eigentliche Schweißprozess beginnt. Die entsprechenden Phasen sind in der Abbildung 11 schematisch dargestellt.

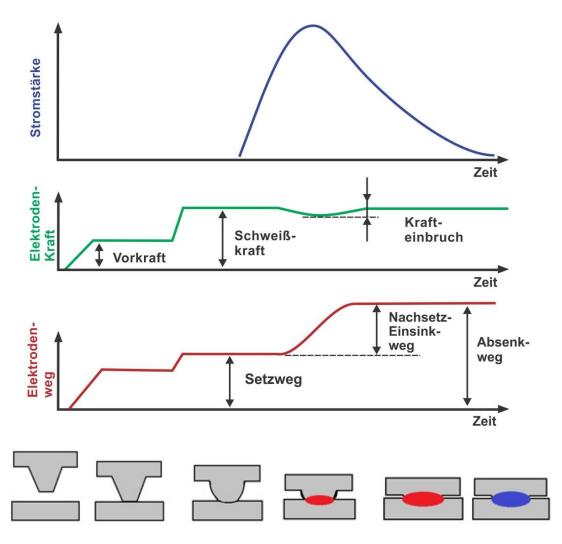


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Schweißablaufes beim KE-Schweißen mit einer Buckelgeometrie [13]

Zu Beginn des Schweißvorgangs ist die Wärmeeinwirkung auf den Buckel so groß, dass sich die Elektroden unter Wirkung der Schweißkraft beginnen zu bewegen. Die Erwärmung des Bauteils und die damit verbunden Abnahme der Festigkeit zieht ein Absinken der Schweißkraft nach sich. Die Größe dieses Krafteinbruchs ΔF und dessen Dauer hängt von der Massenträgheit der Krafteinheit bzw. des Schweißkopfes einerseits und von der Leistungsfähigkeit der Nachsetzeinheit andererseits ab. Zum Zeitpunkt $t_{\rm p}$ erreicht der Schweißstrom seinen Maximalwert und bei $t_{\rm h}$ 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 den Einsinkweg gleichgesetzt [9, 13]. 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. [13]

In der Prozessbeschreibung wird eine Einpulsschweißung betrachtet. Wie beim konventionellen Widerstandsschweißen kann auch das KE-Schweißen mit mehreren Pulsen durchgeführt werden. Wenn das Bauteil gezielt erwärmt werden soll, insbesondere um Spannungen abzubauen, kann dies nach erneutem Laden des Kondensators durch einen weiteren Anlassimpuls geschehen. Dabei bleiben die Elektroden mit der beaufschlagten Schweißkraft geschlossen und die Kondensatorenbank wird zyklisch nachgeladen und der Entladethyristor neu gezündet. Neuste Weiterentwicklungen in der KE-Maschinentechnik ermöglichen das mehrpulsige Schweißen ohne erneutes Nachladen des Kondensators sowie das vorzeitige Abbrechen der Kondensatorentladung [31].

2.6 Parameter und Einstellgrößen

Beim KE-Schweißen hängen der Schweißprozess und somit auch das Schweißergebnis von diversen Einflussgrößen und Parametern ab. Die wichtigsten Einstellgrößen sind die Schweißkraft, die Ladeenergie und das Transformatorübersetzungsverhältnis, welche im Folgenden näher erläutert werden.

Der Betrag der Schweißkraft richtet sich nach der Anzahl der Buckel, deren Geometrie und dem Werkstoff der zu verschweißenden Teile. Sie sollte mindestens so groß sein, dass Spritzer weitestgehend vermieden werden. Die Intensität der zulässigen Spritzer hängt von den jeweiligen Qualitätsanforderungen an die Schweißaufgabe ab. Dabei ist zu beachten, dass Oberflächenspritzer (verursacht durch eine zu kleine

Kontaktkraft der Elektroden auf den Fügeteilen) zu einem erhöhten Verschleiß der Elektroden führen. Eine zu große Schweißkraft verringert den Kontaktwiderstand und somit auch die Wärmeeinbringung. Im Extremfall reicht die Ladeenergie nicht aus, um die Bauteile zu verschweißen. Zu große Schweißkräfte bergen zudem die Gefahr in sich, die Buckel vor dem Schweißprozess unzulässig zu verformen, was auch bei einem harten Aufsetzen der Elektrode auf das Fügebauteil passieren kann [13]. Um die Schweißkraft während des Schweißprozesses aufrecht zu erhalten, muss das Kraftsystem um eine Nachsetzeinheit erweitert werden. Eine gezielte Beeinflussung des Nachsetzverhaltens ist durch die Variation der Federpakete mit entsprechenden Federkennlinien realisierbar.

Die eingestellte Ladeenergie bestimmt u.a. den Strom, der die Schweißstelle erwärmt und muss in Bezug auf die gewählte Schweißkraft abgestimmt sein. Die Ladeenergie und -kraft sind wichtige Dimensionierungsgrößen, die besonders bei der Maschinenauswahl herangezogen werden. Erste Anhaltspunkte für den Wert der Ladeenergie ergeben sich ebenso wie die Werte für die Schweißkraft aus einer empirischen Erhebung und basieren meist auf Erfahrungswerten der Anlagenhersteller. [14]

Da das KE-Schweißen und dessen Vorteile gerade darauf basieren, dass der Schweißstrom einen impulsartigen Verlauf mit hohem Spitzenstrom und kurzer Schweißdauer aufweist, hängt das Schweißergebnis direkt von der Kurvenform des Stroms ab. Die bereits genannten Einflussfaktoren sowie deren Abstimmung aufeinander nehmen daher direkt durch die Ladeenergie und indirekt durch die Schweißkraft mit entsprechender Auswirkung auf den Kontaktwiderstand Einfluss auf die Schweißstromkurve. Entscheidend für das stoffschlüssige Fügen der Fügepartner ist, dass die Form und die Höhe des Stromflusses zu einer geeigneten Wärmeeinbringung im Schweißbereich führen, ohne dass es zu erhöhter Spritzerbildung oder steigender Aufhärtung kommt. Dies hängt davon ab, wie steil der Stromanstieg ist, welche maximale Stromhöhe erreicht wird und wie schnell der Strom wieder abklingt, weshalb die Charakteristik der Schweißung sowie der daraus resultierende Temperaturverlauf im Schweißbereich und der Wärmeeinflusszone (WEZ) hinreichend durch die Größen $t_{\rm p}$, $I_{\rm p}$ und $t_{\rm h}$ beschrieben sind. So nehmen $t_{\rm p}$ und $t_{\rm h}$ bei gleicher Ladeenergie aber flacherem Stromverlauf zu, $I_{\rm p}$ hingegen nimmt ab. Abbildung 12 zeigt diesen Zusammenhang anhand von zwei durch verschiedene Transformatorübersetzungen unterschiedlich verlaufenden Schweißstromkurven.

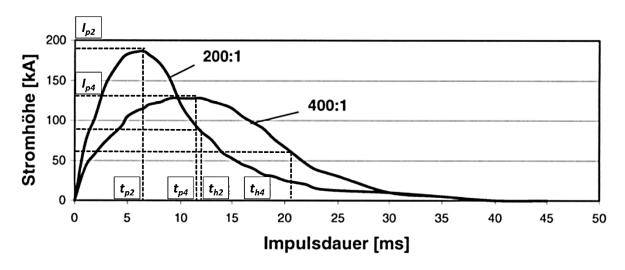


Abbildung 12: Unterschiedlicher Schweißstromverlauf bei gleicher Ladeenergie aber verschiedenen Transformatorübersetzungsverhältnissen [7]

Die Messung der Temperaturverläufe dieser Stromkurven in [7] ergibt, dass der steilere Stromanstieg auch zu einem etwa dreimal schnelleren Anstieg der Temperatur im Schweißbereich führt, wodurch die eingebrachte Wärme weniger Zeit hat, aus der Fügezone in das Bauteil abzufließen. In Folge dessen wird gegenüber dem flacheren Verlauf ein höherer Anteil der eingebrachten Energie zum Aufschmelzen und stoffschlüssigen Fügen der Fügepartner aufgewendet und die WEZ wird insgesamt kleiner [11]. Da der Spitzenstrom I_p des steileren Stromverlaufs ebenfalls höher als der des flachen Verlaufs ist, ist davon auszugehen, dass im Schweißbereich insgesamt eine deutlich höhere Temperatur erreicht wird. Im Gegensatz dazu erreicht aber die Temperatur in einem Abstand von 1,5mm zur Fügezone nur einen um etwa 100 K höheren Spitzenwert als der Temperaturverlauf der flacher verlaufenden Stromkurve an der gleichen Messposition. Bei der Auswertung der Härteverläufe in der WEZ zeigt sich dabei, dass der Temperaturverlauf des steileren Stroms dort zu einer geringeren Aufhärtung führt [7]. Den genannten Vorteilen eines steilen Stromanstiegs steht dabei die Gefahr vermehrter Spritzerbildung durch ein zu schnelles Erhitzen des Materials in der Fügezone gegenüber. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn der Schweißstrom schneller ansteigt, als die Nachsetzeinheit den Absinkweg der Bauteile ausgleicht. Abbildung 13 zeigt den Temperaturverlauf der beiden Stromverläufe im Schweißbereich sowie 1,5 mm davon entfernt, wobei die Messung im Schweißbereich ab 1600°C zur Zerstörung des eingesetzten Thermoelements geführt hat, sodass die Abkühlung dort nicht gemessen werden konnte.

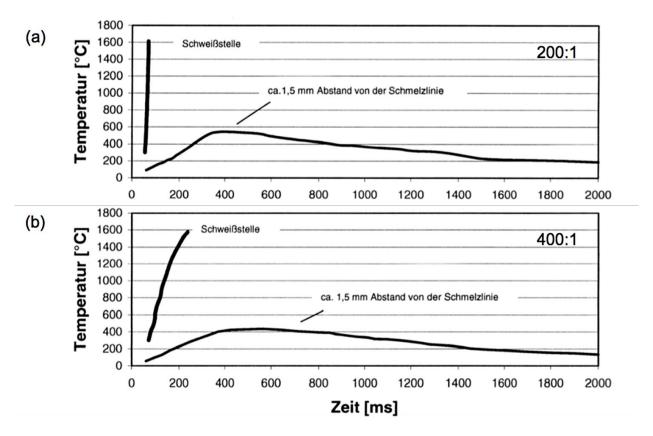


Abbildung 13: Temperaturverlauf bi einem Transformatorübersetzungsverhältnis von 200:1 (a) und 400:1 (b) an der Fügestelle und im Abstand von 1,5 mm [7]

Daraus folgt, dass sich die zum Verschweißen notwendige Höhe der Ladeenergie je nach resultierendem Schweißstromverlauf und somit unterschiedlichem Temperaturverlauf sowie Wärmestrom aus der Fügezone in das umgebende Material stark unterscheiden. Je steiler der Stromanstieg dabei ist, desto niedriger ist die zur Herstellung einer fehlerfreien Schweißverbindung erforderliche maximale Stromhöhe. Ein flacherer Verlauf hingegen erfordert für ein vergleichbares Schweißergebnis einen deutlich höheren Spitzenstrom, der nur durch eine nochmals deutlich höhere Ladeenergie erreicht wird. [7]

Die bereits genannten 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. Abbildung 14 fasst diese Unterteilung in einer Übersicht zusammen. Es gilt zu beachten, dass durch die Komplexität des Prozesses alle Einstellgrößen untereinander in Wechselwirkung stehen und deshalb in Abhängigkeit zueinander betrachtet werden müssen.



Abbildung 14: Einstellgrößen an einer Kondensatorentladungsschweißanlage [13]

Forschungsziel 45

3 Forschungsziel

Dieses Forschungsvorhaben verfolgte drei wesentliche Ziele:

- Erkenntnisgewinn zu den dynamischen Vorgänge beim Kraftaufbau
- Vertiefung des Prozessverständnisses beim KE-Schweißen
- Einfluss der Nachsetzeinheit auf den Schweißprozess

Das erste Ziel dient der Erforschung des Ausgangszustandes vor dem Schweißprozess. Vor allem die Widerstandsverhältnisse in der Fügezone tragen maßgeblich zur Verteilung der einzubringenden, in dem Kondensator zwischengespeicherten Energie. bei. Durch Variationen bei der Kraftaufbringung z.B. durch Höhe der Elektrodenkraft oder der Auftreffgeschwindigkeit in Verbindung mit Messungen des Übergangswiderstandes können Aussagen zur Beeinflussung der Widerstände in der Fügezone ermittelt werden. [10]

Das zweite 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 treten bei fast allen Schweißungen Spritzer auf, die allerdings bei Anwendern auf wenig Akzeptanz stoßen, allgemein vom Prozessverständnis eines Widerstandsschweißprozesses ausgegangen ist, bei dem qualitativ hochwertige Schweißungen ohne Spritzer erzielt werden können. Eigene Voruntersuchungen zeigen jedoch weitere Effekte, die von diesem Prozessverständnis abweichen. Durch Versuche, begleitet von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Simulationen zur ortsaufgelösten Bestimmung von Temperatur und Stromdichteverteilung, sollen die physikalischen Vorgänge ermittelt und beschrieben werden. Zur Verallgemeinerung der Erkenntnisse werden Untersuchungen an fertigungsnahen Bauteilen und Untersuchungen an anderen KE-Schweißanlagen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) durchgeführt.

Das dritte Ziel ist die Ermittlung des Einflusses des Nachsetzverhaltens der Maschine auf den Prozess. Nicht allein die elektrischen Eigenschaften der Schweißmaschine sondern ebenfalls die mechanischen Eigenschaften beeinflussen das Schweißergebnis. So werden Spritzer u.a. durch zu niedrige Kräfte während des Schweißens bzw. durch den Abfall der Elektrodenkraft aufgrund der Festigkeitsabnahme und damit verbundener Nachsetzbewegung verursacht [10, 13]. Mit den im zweiten Ziel gewonnenen Erkenntnissen soll ein Rückschluss auf die Anforderungen an die

Forschungsziel 46

Nachsetzeinheit erarbeitet werden.

Die drei Forschungsziele werden durch eine Kopplung von umfassenden Schweißbereichsermittlungen mit unterschiedlichen Materialkombinationen und Buckelvarianten verbunden mit der Auswertung der prozessbegleitend aufzunehmenden Parameter sowie der Erstellung eines eigenen Simulationsmodells erfüllt.

4 Eingesetzte Anlagentechnik

4.1 Versuchsanlagen zum Kondensatorentladungsschweißen

In dem durchgeführten Projekt kommen zwei verschiedene Schweißmaschinen zum Einsatz. Diese Maschinen werden mit Maschine 1 und Maschine 2 bezeichnet. In Tabelle 1 sind die Leistungsdaten der Maschinen ersichtlich. Beide Maschinen wurden von PA-Mitgliedern zur Verfügung gestellt.

Tabelle 1: Kenndaten der verwendeten KE-Schweißmaschinen

	Maschine 1	Masch	ine 2	
Kondensatoren	eine C-Bank	A/B	A & B	
Kapazität	14,2 mF	8,1 mF	16,2 mF	
max. Ladespannung	1300V	1300	1300V	
max. Ladeenergie	12kJ	6,8 kJ	13,6kJ	
Transformator- übersetzungen	20 / 30 20 / 30		30	
Sekundärspannung	45 V / 30 V	45V /	30V	
$t_{ m p}$	1,8 ms / 2,7 ms	1,7ms / 2,6ms	2,4ms / 3,6ms	
$t_{ m h}$	4,1 ms / 6,7 ms	4,1 ms / 6,1 ms	6,2ms / 8,1ms	
max. Elektrodenkraft 30kN		30kN		
Federkonstante (Stan- dard) der Nachsetzeinheit	2,4kN/mm	4kN/mm 2,9kN/mm		
Masse der Nachsetzeinheit	≈30 kg		≈100 kg	

Л	0
4	o

Kraftaufbringung	Servo-elektrisch	pneumatisch
Gestellart	C-Gestell	C-Gestell

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 ±10 mV und ±50 V gewählt werden. Ebenso stehen Messkarten zur Verfügung mit einem Messbereich von ±0,5 mV bis ±10 V und Messkarten mit einem Messbereich von ±20 V und ±1400 V.

4.2.1 Strommessung

Beim KE-Schweißen werden Schweißstromstärken bis zu 1000kA erreichen. Die verwendeten KE-Maschinen befinden sich in einer unteren Leistungskategorie und erreichen bis zu 200kA Spitzenstromstärke. Für die Messung der Stromstärken werden Rogowskimessspulen (Rogowskigürtel) mit nachgestelltem Integrator genutzt [32]. 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 Widerständezurückzuführen sind (Abbildung 5). 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 [33]. Im Falle der Berechnung des Widerstandes mit dem fehlerbehafteten Spannungswert würden zu Beginn des Schweißens bis zu 70-fach höhere Widerstandswerte ermittelt werden, welche wiederum zu einer Fehlinterpretation des Prozessverlaufs führen. Jedoch ist die korrekte Interpretation sowohl für wissenschaftliche Untersuchungen, als auch für eine parametergestützte Prozessüberwachung notwendig. Die Induktion einer Spannung im Messkreis ist von der Änderung des Magnetfeldes und der Induktivität des Messkreises abhängig. Durch das Einlegen von Bauteilen zwischen die Elektroden und die damit verbundene Elektrodenbewegung kann die Fläche zwischen den Spannungsabgriffen und somit die Induktivität des Messkreises auch durch Verdrillen der Kabel nicht komplett eliminiert werden. In diesem Zusammenhang war es notwendig, eine Methode für die nachträgliche Korrektur der induktiven Störspannung abzuleiten.

Um die Höhe des Fehlers der Spannungsmessung zu bestimmen, werden zunächst Messungen ohne Bauteil durchgeführt, bei denen die Entladung der gespeicherten Ladeenergie bei aufeinander gefahrenen Elektroden ausgelöst wird. Es wird davon ausgegangen, dass dabei kaum Erwärmung im Sekundärstromkreis durch die niedrigen ohmschen Stoff- und Kontaktwiderstände auftritt und sich diese folglich kaum verändern. Die Elektrodenspannung wird mit zwei Messleitungspaaren abgegriffen. Für die Spannungsabgriffe werden starre, isolierte Einzeladern mit einem Querschnitt von 1,5 mm² gewählt. Diese werden so angeordnet, dass die eine Spannungsmessleitung bei geschlossenen Elektroden nahezu keine Fläche (fehlerfreie Spannungsmessung $U_{\rm frei}(t)$ und die andere eine Fläche von etwa 90mmx50mm (fehlerbehaftete Spannungsmessung $U_{behaf}(t)$) einschließt. Es werden zwei verschiedene Spannungsverläufe registriert, Abbildung 15. Der Verlauf der fehlerfreien Spannungsmessung ist proportional zur Stromstärke, wogegen die fehlerbehafteten Spannungswerte die beschriebene Spannungsüberhöhung zu Beginn aufweisen. Die senkrechte Strichlinie kennzeichnet den Zeitpunkt des Strommaximums. Die induzierte Spannung $U_i(t)$ in der Messleitung lässt sich mit der Gleichung (7) bestimmen.

$$U_{\rm i}(t) = L \cdot \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

Um den Messfehler zu berechnen, muss die Induktivität L der Leiterschleife bekannt sein. Diese kann auf zwei verschiedene Arten ermittelt werden. Einerseits über die geometrischen Abmessungen der Leiterschleife und andererseits über die Ermittlung der induzierten Spannung zu einem diskreten Zeitpunkt der Messung. Die erste Möglichkeit ist durch die mangelnde Genauigkeit bei der Messung der geometrischen Größen der Leiterschleife und der unbekannten Permeabilität der Leiterschleife bei eingelegtem Werkstück ungeeignet [4].

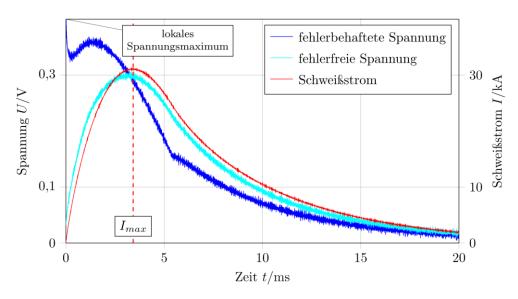


Abbildung 15: gemessene Spannungen, ohne Bauteil

Zur Anwendung der zweiten Möglichkeit muss beachtet werden, dass das Verhältnis zwischen ohmschem und induktivem Anteil der gemessenen Spannung zu jedem Zeitpunkt der Messung unterschiedlich ist. Beim der Kurzschlussmessung Stromfluss ohne Bauteil kann davon ausgegangen werden, dass der ohmsche Widerstand zwischen den Spannungsabgriffen stets konstant ist, da durch den geringen elektrischen Widerstand des Kupferwerkstoffs und den geringen Kontaktwiderstand der aufeinandergepressten Elektroden kaum Wärme durch den Schweißstrom entsteht. Die Induktivität kann nun zu einem beliebigen Zeitpunkt der Messung durch das Subtrahieren der über dem ohmschen Widerstand U_R durch den Schweißstrom abfallenden Spannung von dem gemessenen, fehlerbehafteten Spannungswert und über den Stromanstieg zum gleichen Zeitpunkt ermittelt werden (Gleichung (8)).

$$L = U_{\rm i}(t) \cdot \left(\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\right)^{-1} = \left(U_{\rm behaf}(t) - U_R(t)\right) \cdot \left(\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\right)^{-1} \tag{8}$$

Der fehlerbehaftete Spannungswert erreicht direkt zu Beginn der Messung ein lokales (manchmal auch absolutes) Maximum. Zugleich ist die Stromstärke im Vergleich zum Maximalstrom sehr gering und weist den höchsten Gradienten auf. Die über einem ohmschen Widerstand abfallende Spannung ist proportional zur Stromstärke. Damit ist bei geringen Stromstärken auch die ohmsche Spannung U_R gering. Bei hohen Stromänderungsgeschwindigkeiten ist wiederum die induzierte Spannung U_i hoch. Weil U_R viel kleiner als U_i ist, kann U_R am Anfang der Spannungsmessung vernachlässigt und die Induktivität berechnet nach Gleichung (9) berechnet werden.

$$L = U_{\text{behaf}}(t=0) \cdot \left(\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}\right)^{-1} \tag{9}$$

Die Ermittlung des Stromstärkeanstiegs $\frac{dI}{dt}$ ist ohne eine Glättung der Messwerte nicht möglich. Dafür wird ein gleitender Durchschnitt von fünf aufeinanderfolgenden Werten gebildet. Diese Funktion wird doppelt für die Messwerte angewandt. Es ergibt sich kaum eine Verschiebung der geglätteten Werte im Vergleich zu den tatsächlichen Werten. Wird der Berechnungsbeginn zeitsynchron zu Beginn der Kondensatorentladung gewählt, kann der maximale Stromanstieg ausreichend genau bestimmt werden. Der ideale Weg zur Bestimmung des Stromanstieges ist die Berechnung über die Gleichung des elektrischen Schwingkreises. Dies ist allerdings nur möglich, wenn alle Maschinenparameter bekannt sind. Allerdings kann eine Bestimmung nicht durchgeführt werden, da die Induktivität des Sekundärkreises bei unterschiedlich großen (ferritischen) Stahlbauteilen und somit auch die Induktivität des Sekundärkreises der KE-Maschine verschieden sind. Bei bekannter Induktivität der Messleitung kann nun nach Gleichung (7) zu jedem beliebigen Zeitpunkt die induzierte Spannung berechnet und vom fehlerbehafteten Spannungswert abgezogen werden. [34]

Das Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt.

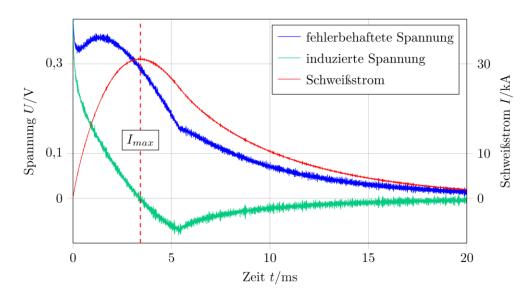


Abbildung 16: fehlerbehaftete und induzierte Spannungswerte beim KE-Schweißen

Der Verlauf der korrigierten Spannungswerte ist fast identisch mit dem Verlauf der fehlerfreien Spannungsmessung (Abbildung 17). Die Abweichung beträgt maximal 4 %, bezogen auf das Spannungsmaximum, und tritt zu Beginn der Messung auf. Sie kann auf die nicht ausreichend genaue Bestimmung des Stromanstiegs zum Zeitpunkt t=0 durch die Messung und Glättung der Stromkurve sowie den nicht berücksichtigten induktiven Spannungsanteil in der fehlerfreien Spannungsmessung zurückgeführt werden. Zum Zeitpunkt $t(I_{\rm max})$ (durch Strichlinie gekennzeichnet) gilt ${\rm d}I/{\rm d}t=0$ (notwendiges Kriterium für globales Maximum [6]). Damit ist auch die induzierte Spannung gleich null und es kommt zum Schneiden der fehlerbehafteten und der korrigierten/fehlerfreien Spannung. Dies ist als Bestätigung der Betrachtungen anzusehen.

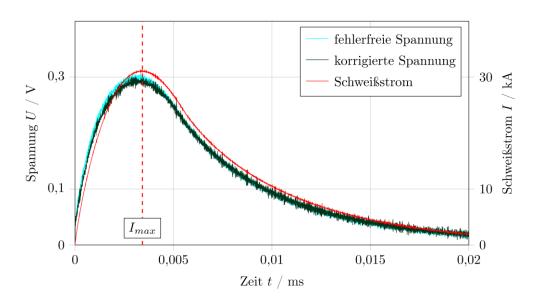


Abbildung 17: fehlerfeie und korrigierte Spannung beim KE-Schweißen

Mit der entwickelten Methode ist es möglich, den systematischen Messfehler, der durch die Induktion von Spannungen in den Messleitungen infolge der hohen Stromstärkeänderungen während des Schweißprozesses hervorgerufen wird, analytisch zu bestimmen und das Spannungssignal zu korrigieren. Nur so kann der Widerstandsverlauf zur Interpretation der Parameterverläufe korrekt bestimmt werden. [35, 36]

4.2.3 Wegmessung

Zur Wegmessung standen zu Beginn Lasertriangulatoren zur Verfügung. Diese werden in das o.g. Messsystem eingebunden, indem das ausgegebene, analoge 10Volt Spannungssignal direkt gemessen wird. Während der ersten Versuche des Projektes wird festgestellt, dass sowohl die axiale Auflösung sowie die zeitliche Auflösung ungeeignet für die Messung des schnellen KE-Prozesses sind. Die axiale Auflösung betrug dabei ca. 20 µm (begrenzt durch die Quantisierung des D/A-Wandlers des Lasertriangulators). Für Abschmelzwege <0,1 mm führt dies zu einen Messfehler von 20%, allein durch die Schwankungsbreite der letzten Digitalstelle (last significant bit) (vgl. Abbildung 18). Der zeitliche Verzug wird durch den Vergleich von Wegmessung und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen festgestellt. So zeigen die Aufnahmen einen zeitlichen Versatz vom Einsetzen einer Bewegung im Video zur Messwertänderung in der Messung des Lasertriangulators von ca. 2 ms. Zur Verbesserung der Wegmessung werden potentiometrische Wegaufnehmer eingesetzt. Dieser wird 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 nahezu verzögerungsfrei aufgezeichnet werden. Ein einfacher Vergleich mit den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigt keine Verzögerung. Zur Verifizierung der Wegmessung wird der Weg der Elektrode durch Motion-Tracking der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelt. Ein Vergleich der Messdaten zeigt nahezu keinen zeitlichen Verzug der Messdaten (Abbildung 19). Die verbliebenen Abweichungen zwischen optischer Erfassung und Wegmessung ist vernachlässigbar klein.

Die axiale Genauigkeit ist durch die direkte Verarbeitung der Spannung über dem veränderlichen Widerstands des potentiometrischen Wegaufnehmers nur noch vom Messbereich des Sensors, der Speisespannung und der Auflösung des Messgerätes abhängig. Für den Elektrodenweg wird ein Sensor mit dem Messbereich von 25 mm genutzt. Bei einem Messbereich von ±10V ergibt sich eine theoretische Auflösung von 3,3 nm. Bei den für die Nachsetzeinheit verwendeten Sensor mit dem Messbereich 50 mm beträgt die theoretische Auflösung 6,6 nm. Kalibriert werden die Wegaufnehmer mit Endmaßen.

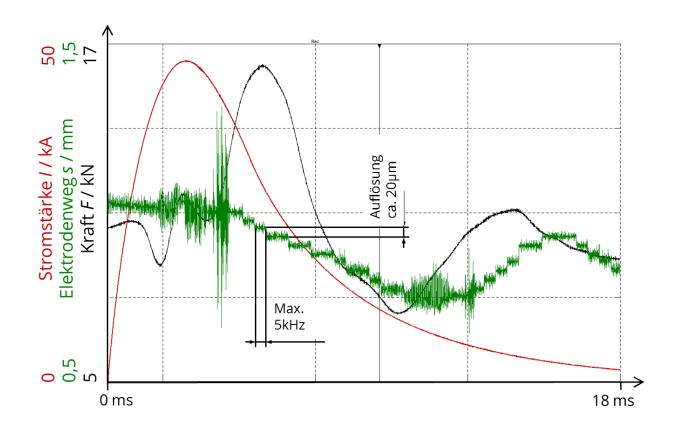


Abbildung 18: Wegmessung mit Lasertriangulator

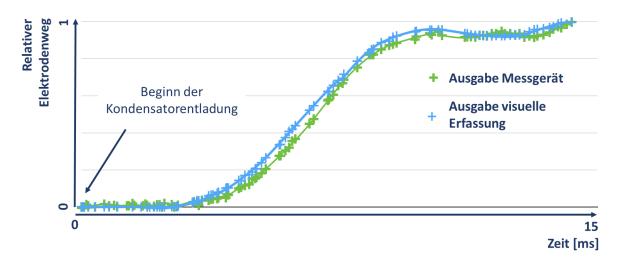


Abbildung 19: Verifizierung der gemessenen Elektrodenbewegung mittels Motion Tracking in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

4.2.4 Kraftmessung

Die Kraftmessung erfolgt mit einem piezoelektrischen Aufnehmer (Abbildung 20). Dieser ist zwischen unterer Polplatte und Maschinengestell elektrisch isoliert zum Schweißstromkreis eingebaut. Der Sensor befindet sich in einer Linie mit dem Kraftantrieb der Maschine und den Elektroden. Beim Einbau wird der Sensor mit ca. 10kN vorgespannt. Das Signal des Sensors wird über einen Ladungsverstärker in ein Spannungssignal umgewandelt und mit dem o.g. Messsystem aufgezeichnet.

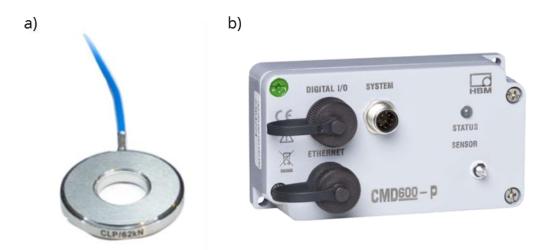


Abbildung 20: a) piezoelektrischer Kraftaufnehmer CLP/62kN b) Ladungsverstärker CMD600-P

Nach dem Einbau wird das Kraftmesssystem mit einem geeichten Stahlmessbügel kalibriert.

Bei der Kraftmessung sind mehrere Probleme aufgetreten. Zunächst haben sich im Verlauf des Projektes die Schrauben der Sensoraufnahme gelöst, sodass die Vorspannung absank und die Kalibrierung unexakt wird. Diese wird in regelmäßigen Abständen erneuert. Des Weiteren werden stets durch den Schweißprozess angeregte Maschinenschwingungen gemessen. Diese überlagern sich mit den wahren, in der Fügeebene herrschenden Kräften und der Lorentzkraft, die die Polplatten auseinander drückt und damit die Kraft in der Fügeebene abmindert, jedoch die Kraft auf den Sensor erhöht. Durch die hohe Masse der Polplatte kann die Bewegung bei der Verformung des Kraftsensors auch nur verzögert stattfinden, wodurch ebenfalls eine Verzögerung der gemessenen Werte stattfindet. Eine Quantifizierung dieser Messfehler ist nicht möglich, da eine Kraftmessung nahe an der Fügezone mit den vorhandenen Mitteln nicht möglich ist.

4.3 Chromatisch konfokale Mikroskopie zur Oberflächentopographiemessung

Bei einem Konfokalmikroskop handelt es sich um eine besondere Form eines Lichtmikroskops. Im Gegensatz zu einem normalen Lichtmikroskop wird nicht das gesamte Präparat beleuchtet, sondern nur ein kleiner Teil davon. Dies geschieht, indem der von der Lichtquelle ausgesendete Strahl durch eine Lochblende eingeschränkt und dann durch eine Objektivlinse auf das Präparat fokussiert wird. Bei einem chromatisch-konfokalen Mikroskop wird eine chromatische Linse verwendet. Diese bricht das Licht chromatisch, das heißt abhängig von seiner Wellenlänge aufgrund des zunehmenden Brechungsindex bei sinkender Wellenlänge. Das Licht der Beleuchtungsquelle wird in seine verschiedenen Farbanteile aufgespalten, die sich somit auf unterschiedlichen Abständen vor der Objektivlinse fokussieren. Allein das farbige Licht, das seinen Fokuspunkt genau auf der Oberfläche des Präparats hat, wird nach der Reflektion nicht durch die Diskriminationslochblende oder wie in Abbildung 21 durch eine sehr kleine Punktfläche eines Glasfaserkopplers vom Photodetektor ferngehalten. Durch die Messung der Wellenlänge kann der Abstand des Präparats zur Linse ermittelt werden. Zusätzlich zu der Höhe kann die Intensität unabhängig des Abstands zwischen Mikroskop und Präparat gemessen werden. Diese ist abhängig des Reflexionsgrades der Oberfläche am Punkt der Messung.

Für die Messung von Elektrodenoberflächen und von Blechoberflächen steht das Konfokalmikroskop CHRocodile E von "Precitec GmbH & Co. KG", das mit dem chromatisch-konfokalen Verfahren arbeitet, zur Verfügung. [37, 38]

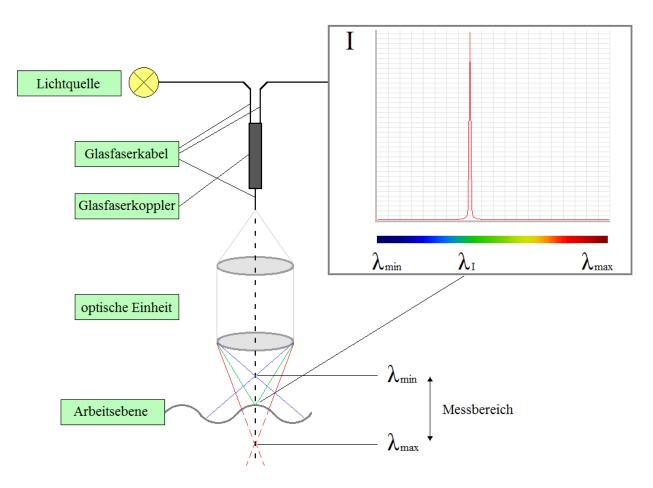


Abbildung 21: Distanzmessung mit dem chromatisch-konfokalen Verfahren [38]

5 Verwendete Probenmaterialien

Grundlegende Untersuchungen werden an einer Einzelbuckelgeometrie (EB) durchgeführt. Die Abmaße sind in Abbildung 22 ersichtlich.

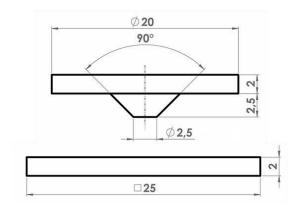




Abbildung 22: links: technische Zeichnung der Einzelbuckelgeometrie mit Blech; rechts: Einzelbuckel und Blech jeweils aus S235

Es werden die Werkstoffe *S235* (Baustahl) und *42CrMo4* (Vergütungsstahl) für die Buckel sowie *S235* und *22MnB5* für das Gegenstück ausgewählt, sodass sich vier Materialkombinationen (MK) ergeben (vgl. Tabelle 2).

abelle 2. Verwerladet Materialen für grandiegende Ontersachungen				
Material- kombination	ww	WH	HW	нн
Buckel	S235 (W)	S235 (W)	<i>42CrMo4</i> , gehärtet (H)	42CrMo4, gehärtet (H)
Blech	S235 (W)	22MnB5, pressgehärtet (H)	S235 (W)	22MnB5, pressgehärtet (H)

Tabelle 2: Verwendete Materialien für grundlegende Untersuchungen

Die Änderung des harten Blechwerkstoffs von 42CrMo4 zu 22MnB5 wurde mit dem PA abgestimmt. Die Bezeichnung setzt sich aus den Abkürzungen für die Härtezuordnung zusammen, wobei das Buckelmaterial stets zuerst genannt wird. Somit steht WW für weichen Buckel und weiches Blech, WH für weichen Buckel und hartes Blech usw. Die Härte des S235 beträgt im Mittel 298HV1, die des 42CrMo4 362 HV1.

Für die anwendungsorientierten Buckel werden eine natürliche Schulterbuckelverbindung und geprägte Schweißmuttern verwendet. Die Geometrie der Schulterbuckel ist in Abbildung 23 dargestellt. Bei dieser Buckelform wird der Strom beim Schweißen an der dünnen Berührungslinie der Ringkante an der Schräge des Pins konzentriert.

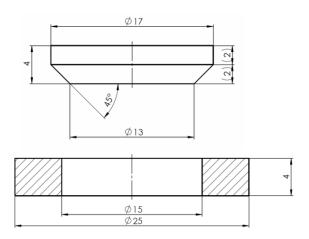


Abbildung 23: Geometrie Schulterbuckel (Ring) und Substrat (Pin)

Wie bei der Einzelbuckelgeometrie werden verschiedene Härtegrade ausgewählt (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Verwendete Materialien für natürlichen Buckel (Schulterbuckel)

Material- kombination	ww	WH	HW	нн
Ring (Buckel)	S235 (W)	S235 (W)	42CrMo4,	42CrMo4,
` '		42CrM o 4	gehärtet (H)	gehärtet (H)
Substrat (Pin)	S235 (W)	42CrMo4, gehärtet (H)	S235 (W)	<i>42CrMo4</i> , gehärtet (H)
(F111)		genartet (H)		genartet (11)

Die Fügeelemente für die Schweißversuche werden von einem PA-Mitglied bereitgestellt. Es stehen M10-Ringbuckelmuttern (RBM) und M8-Segmentbuckelmuttern (SBM) zur Verfügung (Abbildung 24). Der Ringbuckel der M10-Mutter hat einen Ringdurchmesser von 14mm und eine Aufstandsbreite von 0,5mm.

Die 3 Segmentbuckel der M8-Mutter haben einen Ringdurchmesser von 16mm, eine Aufstandsbreite von 1mm und eine Segmentlänge von rund 14mm (Bogenlänge).

Als Substrat werden drei verschiedene Blechsorten verwendet: HX260+Z, HX340+Z und 22MnB5+AS. Alle drei Blechsorten werden in der fertigungsrelevanten Dicke 2,5 mm und der Probengröße 29x29 mm² verwendet.

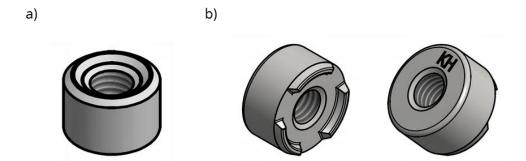


Abbildung 24: 3D-Modelle der verwendeten Schweißmuttern, a) Ringbuckelmutter b) Segmentbuckelmutter

6 Untersuchungen der dynamischen Vorgänge

Der KE-Schweißprozess kann in 2 separate Vorgänge unterteilt werden (Abbildung 25):

Kraftaufbau:

Der Kraftaufbau erfolgt in zwei Phasen, dem Aufbau der Vorkraft und unmittelbar folgend, dem Aufbau der Schweißkraft.

Schweißen:

Nach dem Aufbringen der Schweißkraft wird die zweite Phase, das Schweißen, eingeleitet. Durch Zünden des Entladethyristors wird die Kondensatorbatterie über den Schweißtransformator entladen. Es entsteht ein Stromfluss durch den Buckel.

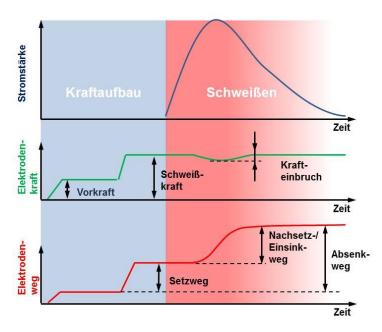


Abbildung 25: Schematischer Ablauf des KE-Schweißens, nach [13]

Diese Vorgänge werden getrennt betrachtet.

6.1 Dynamische Vorgänge beim Kraftaufbau

6.1.1 Versuchsdurchführung

Ziel der Untersuchungen ist es, den Verlauf des Kontaktwiderstands während des Kraftaufbaus in Abhängigkeit von der Kraft, der Auftreffgeschwindigkeit und vom Werkstoff zu ermitteln. Dazu werden in Maschine 1 (vgl. Kapitel 4.1) Übergangswiderstandsmessungen durchgeführt, um die Vorgänge zu charakterisieren. Die

Messung des Übergangswiderstandes erfolgt durch die Einleitung eines Messstromes an die Elektroden und die Messung der abfallenden Spannung zwischen den Elektroden. Der Messstrom wird berührungslos mit einem aktiven LEM-Wandler gemessen. Die Ausgangsspannung wird mit dem o.g, Messsystem aufgezeichnet. Die Kalibrierung der Messstrommessung erfolgte im Vorfeld der Versuche mit einem Shunt. Damit der Messstrom sich an den Elektroden nicht aufteilt und ein Teil über die niederohmige Sekundärseite des Schweißtransformators der KE-Schweißmaschine fließt, wird der untere Elektrodenhalter mit einer PTFE-Folie von der Polplatte isoliert.

Für die Auswahl der Parameter werden zunächst stichprobenartig Schweißversuche durchgeführt, um einen Schweißbereich einzugrenzen. Mit diesen Ergebnissen werden die in Tabelle 4 ersichtlichen Einstellparameter festgelegt. Die mit AlSi beschichteten Bleche werden vor den Versuchen sandgestrahlt, um den Einfluss der Oberflächenbeschichtung zu minimieren. Für die Materialkombination HH müssen höhere Kräfte eingestellt werden als bei den Materialkombinationen mit mindestens einem weichen Fügepartner.

Tabelle 4: Einstellparameter und Werkstoffe

Materialkombi- nation	ww	WH	HW	нн
Buckel	S235 (W)	S235 (W)	42CrMo4, gehärtet (H)	42CrMo4, gehärtet (H)
Blech	S235 (W)	22MnB5+AS150, pressgehärtet, gestrahlt (H)	S235 (W)	22MnB5+AS150, pressgehärtet, gestrahlt (H)
Kraft	klein: 5,0 kN, mittel: 8,5 kN, hoch: 12,0 kN		8,5 kN; 12,0 kN; 17,0 kN	

Auftreffge-	klein: 8 mm/s; mittel: 35 mm/s; hoch: 50 mm/s
schwindigkeit	

Aus den beschriebenen Parametern ergibt sich eine Versuchsmatrix von $4 \times 3 \times 3 = 36$. Jede Versuchsvariante wird dreimal durchgeführt, sodass insgesamt 108 Versuche ausgeführt werden. Während der Messung wird der zeitliche Verlauf der Kraft F, des Stroms I und der Elektrodenspannung U aufgezeichnet. Der Messstrom von 50 A wird beim Erreichen einer Elektrodenkraft von 1 kN für 4 s eingeschaltet. In Abbildung 26 ist die erste Sekunde einer Messung zu sehen. Der Messstrom bleibt nach kurzer Einschwingzeit (ca. 50 ms) konstant. Die Kraft steigt linear an. Die Unstetigkeit während des Kraftanstiegs ist durch ein Lagerspiel der Krafteinheit zu erklären. Die Unstetigkeit war bei allen Messungen identisch und hat somit keinen Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Untersuchungen. Der Widerstand zeigt ein annähernd reziprok proportionales Verhalten gegenüber der aufgebrachten Elektrodenkraft, d.h. mit steigender Kraft sinkt der gemessene Widerstand. Nach Erreichen der Kraft tritt keine weitere Änderung des Übergangswiderstands auf.

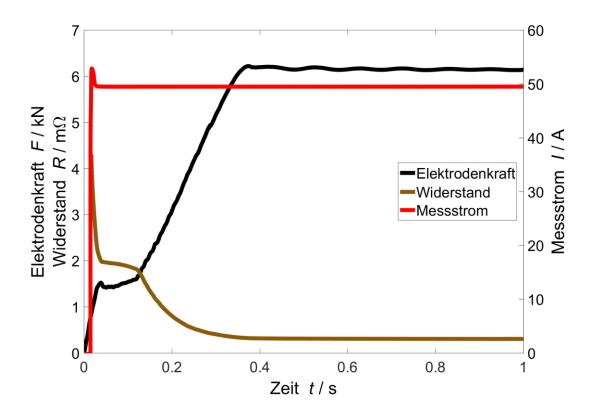


Abbildung 26: exemplarische Darstellung der aufgezeichneten Messwerte eine Sekunde nach Beginn der Messung

Jeweils eine Probe der Messungen mit dem Standard- bzw. kleinem Vorschub von 8 mm/s und alle Proben mit einer Kraft von 8,5 kN werden vor und nach dem Versuch chromatisch-konfokal vermessen. Dadurch kann die plastische Verformung des Buckels bestimmt werden. Zusätzlich werden Verformungssimulationen mit der Software simufact.forming durchgeführt. Daraus kann auf die Kontaktflächenvergrößerung und die Verteilung der mechanischen Spannung in der Fügefläche geschlossen werden.

6.1.2 Ergebnisse der Widerstandsmessung

Zur Auswertung werden die erreichte Kraft und der erreichte Widerstand in der letzten Sekunde vor Abschalten des Messstromes durch Mittelung der Messwerte (20000 Messwerte bei 20kHz Abtastfrequenz) berechnet. Die Ergebnisse wiederholender Versuche werden ebenfalls gemittelt. Die Ergebnisse unterschiedlichen Abhängigkeiten zueinander in Kapitel A.1 abgebildet. In Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die erreichten Kontaktwiderstände bei unterschiedlichen Materialkombinationen und Auftreffgeschwindigkeiten über der erreichten Kraft exemplarisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Widerstand mit zunehmender Kraft geringer abfällt und einem Grenzwert entgegenstrebt. Dieser Grenzwert kann theoretisch nur so groß sein, wie die Summe aller Stoffwiderstände von $R_{\rm ges}$. In diesem Fall wäre der gesamte Kontaktwiderstand durch die Elektrodenkraft eliminiert. Allerdings kann durch die Elektrodenkraft nur die tragende Kontaktfläche der scheinbaren Kontaktfläche angeglichen werden, sodass im Verhältnis dazu auch die wirksame Kontaktfläche steigt, jedoch können der Engewiderstand nur unvollständig und der Fremdschichtwiderstand gar nicht eliminiert werden.

Weiterhin ist zu erkennen, dass bei höheren Kräften der Einfluss der Auftreffgeschwindigkeit sinkt und ebenso bei höheren Auftreffgeschwindigkeiten, der Einfluss der Elektrodenkraft sinkt. Die Ursache liegt darin, dass bei geringen Kräften die kinetische Energie der Bewegungseinheit für die Ausbildung der Kontaktfläche maßgeblich ist. Dieser Effekt verringert sich mit zunehmender Kraft.

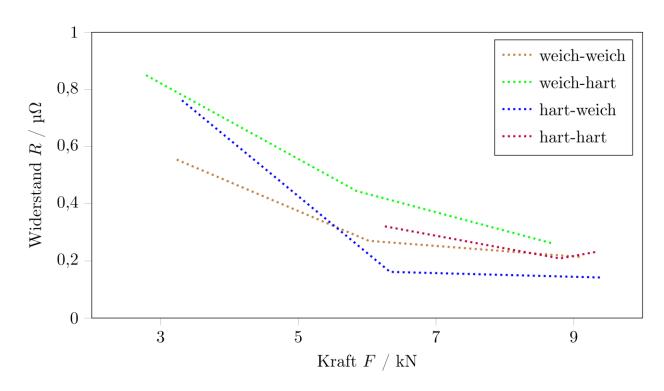


Abbildung 27: erreichter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der erreichten Elektrodenkraft, Aufsetzgeschwindigkeit 5 mm·s⁻¹

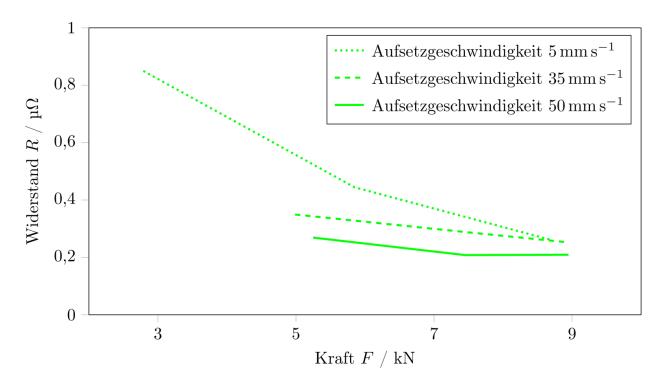


Abbildung 28: erreichter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der erreichten Elektrodenkraft bei Materialkombination weich-hart

Abbildung 73 zeigt, dass auch der unterschiedliche Kontaktwiderstand einzelner Materialkombinationen durch eine hohe Aufsetzgeschwindigkeit ausgeglichen werden kann. Grund dafür ist die höhere Verformungsarbeit bei höherer kinetischer Energie der Bewegungseinheit im Vergleich zum langsamen eher statischen Kraftaufbau.

6.1.3 Ergebnisse der Verformungssimulation und Bauteilvermessung

Die Simulation der Verformung erfolgt mit dem Programm simufact.forming. Die rotationssymetrischen Einzelbuckel werden als Halbschnittmodell aufgebaut. In Abbildung 29 ist der Aufbau des Modells dargestellt. Die Elektroden werden als nicht deformierbare Werkzeuge ausgeführt. Während die Unterelektrode fest eingespannt ist, wird der Oberelektrode eine Pressenfunktion zugeordnet. Die Kraftaufbringung erfolgt quasistatisch und wird durch eine maximale Pressenkraft begrenzt. Das Anfangsnetz für beide Bauteile wird mit einer Maschenweite von 0,1 mm ausgeführt. In der Fügezone wird das Netz um ein 3-fach detaillierteres Netz erweitert, um die Vorgänge möglichst genau abzubilden. Die Materialdaten für S235 und 42CrMo4 werden aus der Materialdatenbank der Software entnommen. Die Materialkennwerte für den pressgehärteten Werkstoff 22MnB5 werden über eine Fließkurve implementiert. Da in dem Modell keine Temperaturabhängigkeiten erfasst werden, sind die Materialkennwerte bei Raumtemperatur ausreichend. Unterschiedliche Oberflächenzustände werden nicht berücksichtigt.

Eine für die Untersuchung relevante Ausgabegröße ist die Vergleichsspannung. Es handelt sich hierbei um die Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungshypothese (von Mises-Vergleichsspannung). Des Weiteren können die Kontaktfläche und die Verformung des Blechs und des Buckels ermittelt werden.

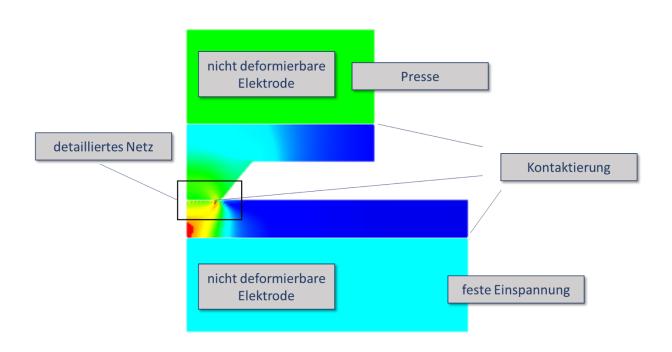


Abbildung 29: Darstellung des Modells für die Finite-Elemente-Analyse mit Werkzeug und Werkstücken im Simulationsprogramm simufact.forming 12.0.3

In Abbildung 30 sind exemplarisch die Ergebnisse der Spannungssimulationen für die MK WW dargestellt. Die Ergebnisse für die anderen Materialkombinationen sind in Kapitel A.2 abgebildet. Die Materialkombinationen WW und HW zeigen am Rand der scheinbaren Kontaktfläche eine Erhöhung der Vergleichsspannung. Bei WW steigen die Vergleichsspannungen mit steigenden Elektrodenkräften an, jedoch verringert sich die Differenz zwischen Vergleichsspannungsmaximum und –minimum. Bei HW steigen die Spannungen mit steigender Kraft kaum an, der Bereich der Spannungsüberhöhung wird jedoch breiter. Besonders hohe Spannungen stellen sich bei der MK HH ein. Bei kleinen Kräften existiert die Spannungsüberhöhung am Rand noch, bei höheren Kräften stellt sich ein gleichmäßiger, hoher Spannungsverlauf über die gesamte Kontaktfläche ein. Bei der Kombination WH gibt es keine Spannungsüberhöhung am Rand. Der weiche Buckel nimmt die komplette Verformung auf und die Spannungen sind über die Kontaktfläche konstant. Dass es kaum Verformung im harten Blech bei der MK WH gibt, zeigt auch die chromatisch-konfokale Vermessung des Blechs bei 9,1 kN (Abbildung 31).

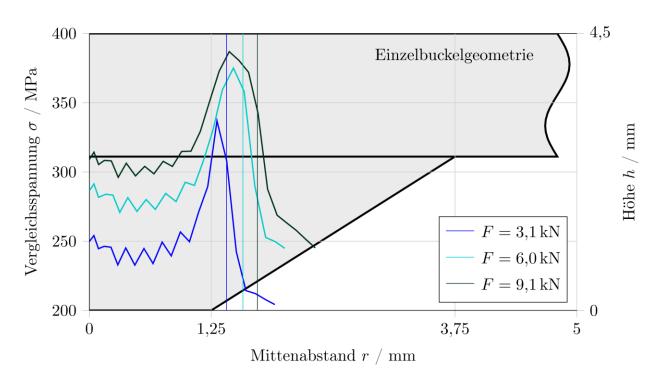


Abbildung 30: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen der Verformungssimulation – MK: WW – EB im Halbschnitt, Berührungsende mit vertikaler Linie markiert

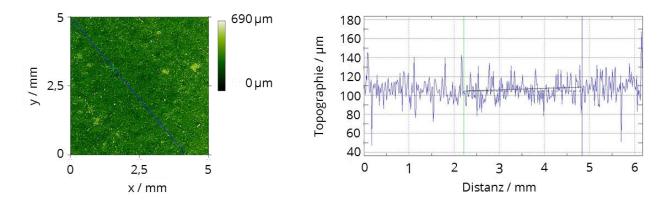


Abbildung 31: chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK WH bei 9,1 kN, Eindruck nicht messbar

Auch bei der MK HH erfolgt die Verformung nur im Buckel (Abbildung 78). Bei den Verbindung WW wird hauptsächlich und bei der Verbindung HW ausschließlich das Blech verformt. Zu erkennen ist dies an den ähnlichen Eindringtiefen des Buckels in das weiche Blech (Abbildung 79 & Abbildung 80).

6.2 Dynamische Vorgänge beim Schweißvorgang

6.2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Schweißversuche an der Einzelbuckelgeometrie werden an Maschine 1 durchgeführt. Es werden für alle Materialkombinationen Schweißbereiche erstellt. Die Auswahl der Einstellparameter ist in Abbildung 32 schematisch dargestellt. Der Versuchsablauf (für alle Schweißbereiche im Projekt) ist in Abbildung 32 dargestellt. Danach werden zunächst stichprobenartig der Einfluss der Nachsetzeinheit und der Einfluss der Transformatorübersetzung ermittelt. Im weiteren Verlauf des Projektes werden tiefergehende Untersuchungen zum Einfluss der Nachsetzeinheit durchgeführt. Zur Bewertung der Schweißverbindung werden die geschweißten Proben mit einem Prüfmeißel im Sinne der DIN EN ISO 10447 [39] zerstörend geprüft. Dadurch werden die Proben voneinander abgehoben, sodass sie durch die auftretende Kopfzugbeanspruchung zerstört werden.

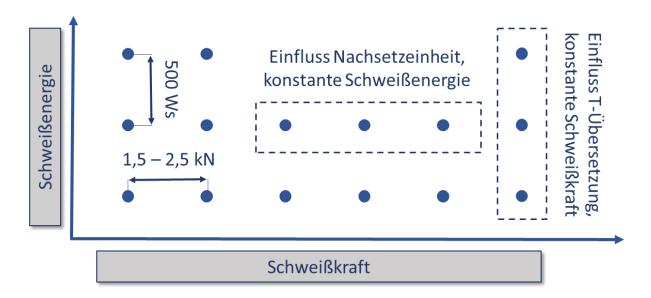


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Untersuchungen

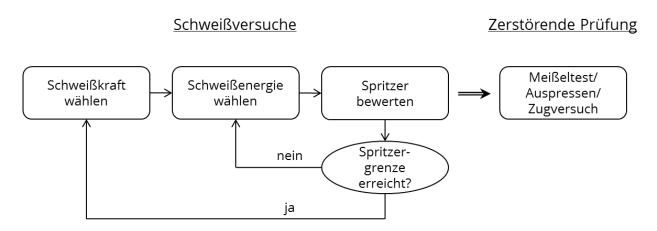


Abbildung 33: Versuchsablauf und Bewertung beim Erstellen von Schweißbereichen

Die Schweißversuche der fertigungsnahen Probengeometrien (Schulter, Ring- und Segmentbuckel) werden an Maschine 2 durchgeführt. Auch für diese werden Schweißbereiche ermittelt. Zur Bewertung der Schulterbuckel-Verbindungen werden diese mit einer Presse zerstört und die Bruchfläche bewertet. Die Muttern mit Ring- und Segmentbuckel werden mittels Kopfzugprüfung zerstörend geprüft. Der Prüfaufbau orientiert sich an der DIN EN ISO 14272 [40] und dem DVS/EFB Merkblatt 3480-1 [41], da es kein veröffentlichtes Regelwerk für die Prüfung von Schweißmuttern gibt. Der Durchmesser des Niederhalters ist 2mm größer als der Außendurchmesser der zu prüfenden Schweißmutter. Eine in die Mutter eingeschraubte Gewindestange bringt die Prüfkraft mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/min auf die Schweißverbindung auf. Aufgezeichnet wird der Verlauf der Kraft, damit verbunden die maximale Kraft (Abzugsakraft) und der Weg bei der Kraftaufbringung. Weg und Kraft werden beim Anfahren einer Kraft von 10 N gleich null gesetzt.

Zusätzlich zur ZP wird während des Schweißens subjektiv das Spitzerverhalten durch Einteilung in 4 Spritzerklassen bewertet. Dazu werden Videoaufnahmen vom Prozess aufgenommen. Die Spritzerklassen lassen sich wie folgt beschreiben:

- Spritzerklasse 0: keine sichtbaren Spritzer
- Spritzerklasse 1: kaum sichtbare Spritzer / wenige Funken
- Spritzerklasse 2: deutlich sichtbare Spritzer, die den Boden nicht erreichen
- Spritzerklasse 3: sehr viele Spritzer, die teilweise länger als 1s nachglühen

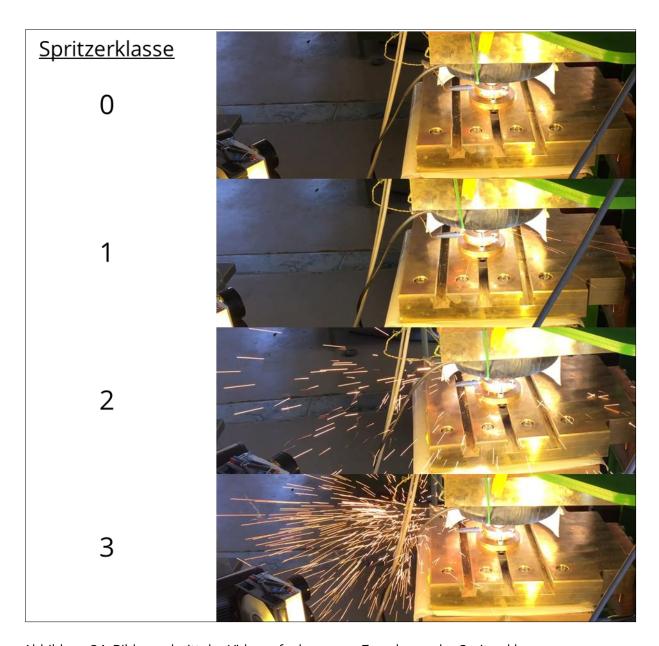


Abbildung 34: Bildausschnitt der Videoaufnahmen zur Zuordnung der Spritzerklasse

Während der Schweißbereichsuntersuchungen werden alle Versuche mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen begleitet.

6.2.2 Aufbau Simulationsmodell

Die Vorgänge während des Schweißens innerhalb der Fügezone sind ortsaufgelöst messtechnisch und optisch nicht erfassbar. Zunächst wird ein Modell mit der kommerziell erhältlichen Software SORPAS® aufgebaut. Die Software ermöglicht keine Unterscheidung zwischen dem MF-Buckelschweißen und dem KE-Buckelschweißen. Die Software bietet lediglich die Möglichkeit, eine sehr abstrahierte Stromform über

Eingabe der in Kapitel 2.1 genannten Kenngrößen einzugeben. Ebenfalls ist es möglich, den Stromverlauf etwas genauer über mehrere ansteigende und abfallende Flanken vorzugeben. Die Simulationsergebnisse sind nur ungenügend zur Beschreibung des Prozesses geeignet.

Deshalb wird zur Vertiefung des Prozessverständnisses ein eigenes Simulationsmodell aufgebaut. Die Diskretisierung erfolgt über die Finite Volumen Methode. Zur Einsparung von Rechenzeit werden bei rotationssymetrischen Bauteilen 2D-Halbschnittmodelle angewendet. Zur Visualisierung kann nach der Berechnung der Ergebnisse rotatorisch ausgetragen werden. Zur Berechnung der thermischen Vorgänge wird die Energieerhaltungsgleichung, das heißt die Joule'sche Erwärmung an Stoff und Kontaktwiderständen, die Ladungsträgererhaltungsgleichung, das heißt die Stromdichteverteilung in den Bauteilen in Abhängigkeit der Stoff- und Kontaktwiderstände und temperaturabhängige Stoffeigenschaften implementiert. Als Kontaktwiderstand werden die gemessen Werte (Kapitel 6.1.2) angenommen. Die örtliche Verteilung des Kontaktwiderstandes wird über Gleichung (10) ermittelt. Der dafür notwendige Druck in der Fügezone P wird aus den Simulationsergebnissen aus Kapitel 6.1.3 entnommen. Die Streckgrenze des weicheren Partners $\sigma_{\rm S}$ ist bekannt und die Dicke d der Kontaktschicht wird stets mit 0,05 mm angenommen [42].

$$ECR(T, P) = 3d\left(\frac{\sigma_S}{P}\right)^K \left(\frac{\rho_{R1}(T) + \rho_{R2}(T)}{2}\right)$$
(10)

Über den Oberflächenzustand K kann der Wert des theoretischen Kontaktwiderstandes an den gemessenen Kontaktwiderstand angepasst werden.

Da das Modell nicht in der Lage ist, Verformungen und Bewegungen abzubilden, sind Abweichungen zwischen Modell und Realität nach Eintreten der Nachsetzbewegung der Elektroden zu erwarten. Die Simulation bringt aber Erkenntnisse zur Stromdichteverteilung und zum Erwärmungsverhalten in der Fügezone bis zum Beginn des Nachsetzens.

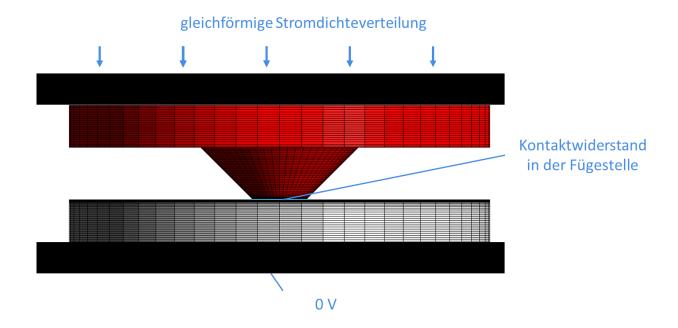


Abbildung 35: Modellierung des Stromflusses bei der Einzelbuckelgeometrie

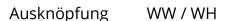
6.2.3 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

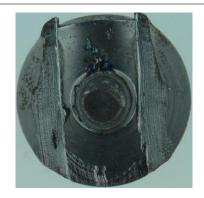
6.2.3.1 Einzelbuckel

Bei der ZP der Einzelbuckel sind mehrere Ergebnisse möglich. Diese sind in Tabelle 5 dargestellt:

Tabelle 5: Ergebnisse des Meißeltests

Ergebnis	Vorkommen	Beispiel	Beschreibung
Ring- schweißung	WW / WH / HW / HH		Anbindung am Rand des Buckels, Scher- bruch durch Fügezone





Materialversagen im Blechbauteil

Sprödbruch HW / HH



sprödes Materialversagen durch das Buckelmaterial

unvollständige Anbindung

HW / HH



Mischung zwischen Ringschweißung und Sprödbruch, z.T. Scherbruch durch Schweißverbindnung, z.T. Sprödbruch durch Buckelmaterial

Zur Darstellung der Schweißbereiche wird die eingestellte Ladeenergie über der erreichten Elektrodenkraft aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 36, Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 zu sehen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Elektrodenkraft die Belastbarkeit sowie die Spritzerneigung ab- und mit steigender Ladeenergie die Belastbarkeit und die Spritzerneigung zunehmen. In Abbildung 40 ist der Querschliff einer Parameterkombination dargestellt, die zu einer Ringschweißung führt. Im ungeätzten Zustand ist im Schliff deutlich ein nicht angebundener Bereich in der Mitte der Fügezone zu sehen. Der Bildausschnitt des ungeätzten Mikroschliffbildes zeigt deutlich den angebunden und den nicht angebundenen Bereich in der Fügezone. In dem geätzten

Bildausschnitt ist die klare Trennung zwischen den Materialien der Fügepartner erkennbar. Auch an den verschweißten Stellen ist keine Vermischung sichtbar; folglich hat sich keine Schweißlinse während des Schweißprozesses ausgebildet. Die Ergebnisse der Simulation der Stromdichteverteilung und der damit einhergehenden Erwärmung zeigt Abbildung 41. Die Stromdichte erhöht sich durch die geometrische Form des Buckels am Rand der Fügezone auf einen Wert von $> 10^{12} \cdot \frac{A}{mm^2}$, wohingegen in der Mitte der Fügezone lediglich Stromdichten von $\approx 10^8 \cdot \frac{A}{mm^2}$ herrschen. Dieser Effekt kann durch das entstehende Magnetfeld weiter verstärkt werden, wird aber nicht simulativ abgebildet.

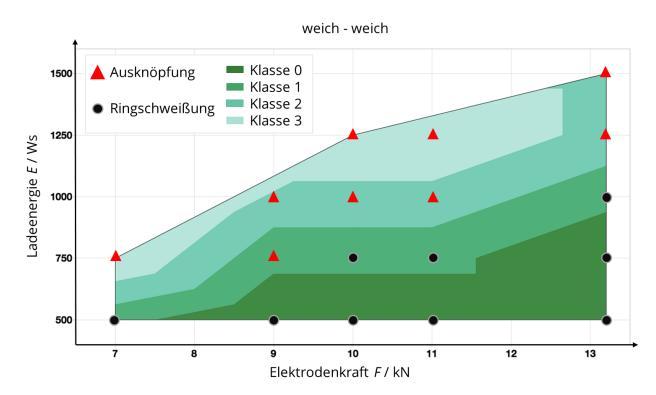


Abbildung 36: Schweißbereich Einzelbuckel MK: weich – weich

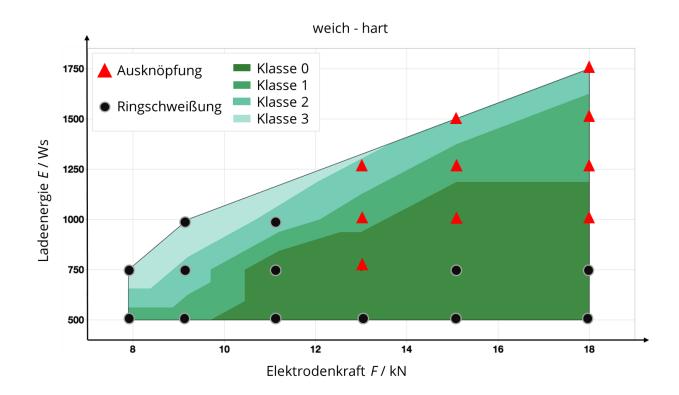


Abbildung 37: Schweißbereich Einzelbuckel MK: weich – hart

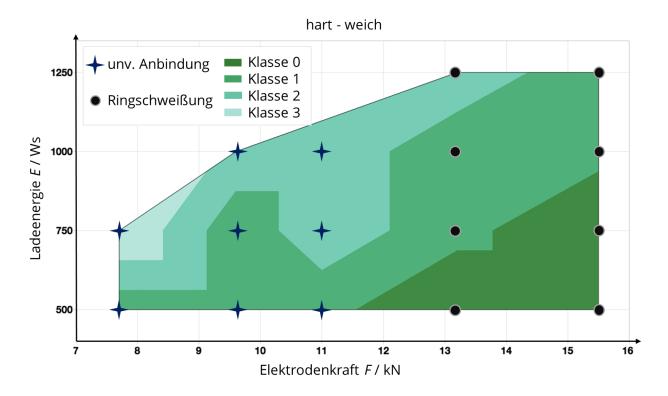


Abbildung 38: Schweißbereich Einzelbuckel MK: hart – weich

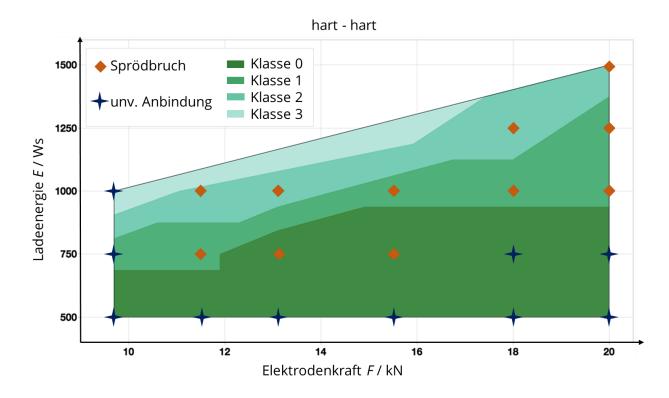


Abbildung 39: Schweißbereich Einzelbuckel MK: hart – hart

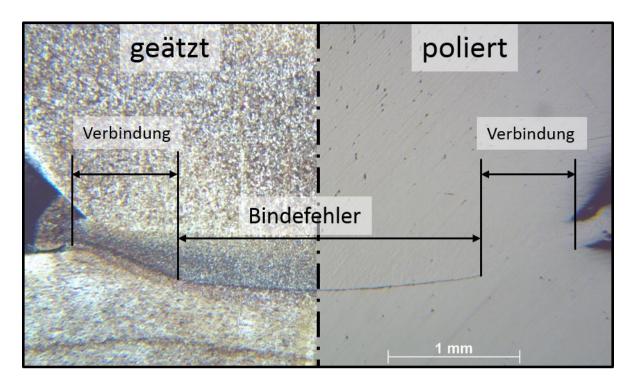


Abbildung 40: Querschliff einer Probe mit F=10kN, E=750Ws MK: weich - weich, links: nach dem Ätzen, rechts: vor dem Ätzen

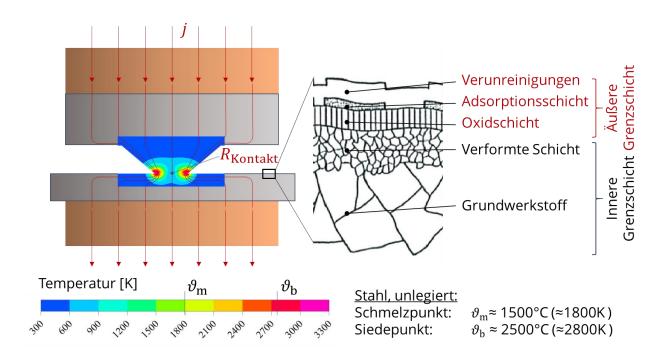


Abbildung 41: Links: Stromlinienverlauf und Wärmeentwicklung (nach 0,4ms) im Einzelbuckel; rechts: Aufbau einer technischen Oberfläche [43]

Durch die sehr hohen Stromstärke- und Stromdichtegradienten sind die örtlichen und die zeitlichen Temperaturunterschiede sehr hoch. Die lokal in Bereichen hoher elektrischer Stromdichte und hohen elektrischen Widerstands entstehende Wärme kann innerhalb der kurzen Schweißzeiten kaum in die umgebenden Bereiche abgeleitet werden. Dadurch entsteht ein hoher Temperaturgradient zwischen dem Randbereich und dem Inneren der Fügestelle. Die Simulation zeigt, dass aufgrund des Stromdichteunterschiedes am Rand des Einzelbuckels die Verdampfungstemperatur des Grundmaterials (Baustahl) bereits überschritten wird, wenn im Inneren die Solidustemperatur noch nicht erreicht ist. Durch die Überschreitung des Siedepunktes verdampft Metall, beginnend am äußeren Rand der Fügestelle. Über eine Abschätzung kann eine Aussage über die Volumenvergrößerung des Metalls getroffen werden (Tabelle 6). Die Berechnung erfolgt unter der Annahme, dass das verdampfende Metall am Rand unter Atmosphärendruck steht.

Tabelle 6: Rechnerische Abschätzung der Volumenexpansion (mit Werten aus [44], [45])

Bezeichnung	Formel / Wert
molare Masse von Eisen	$M_{\rm Fe} = 55,85 \frac{\rm g}{\rm mol}$
universelle Gaskonstante	$R_{\rm G} = 8.314510 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{mol} \cdot \text{K}}$
Siedetemperatur unlegierter Stahl	$T_{\rm b,Fe} = 2770~{\rm K}$
Dichte unlegierter Stahl (Raumtemperatur)	$\rho_{\rm Fe} = 7.85 \frac{\rm g}{\rm cm^3}$
Volumen von Eisen bei Raum- temperatur (fest)	$V_{ m f}=rac{m}{ ho_{ m Fe}}$
Stoffmenge	$n_{\mathrm{Fe}} = \frac{m}{M_{\mathrm{Fe}}}$
Druck des Metalldampfes	$p_{ m b,Fe}=1~{ m bar}=10^5~{ m Pa}$
Volumen von Eisen bei Siede- temperatur (gasförmig)	$V_{ m g} = rac{n_{ m Fe} \cdot R_{ m G} \cdot T}{p_{ m b,Fe}}$
Verhältnis der Volumen	$\frac{V_{\rm g}}{V_{\rm f}} = \frac{\boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{T}_{\rm b,Fe} \cdot \boldsymbol{\rho}_{\rm Fe}}{M_{\rm Fe} \cdot \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{p}_{\rm b,Fe}} \approx 33\ 000$

Bei Eisen wird das Volumen durch die Expansion beim Verdampfen um ca. das 33000-fache vergrößert (Vergleich Gasvolumen bei Verdampfungstemperatur mit Festkörpervolumen bei Raumtemperatur). Dies führt zu einer starken Beschleunigung des Metalldampfes nach außen. Oberflächenschichten (äußere Grenzschicht, Abbildung 41), die die Verbindungsbildung verhindern, werden aus der Fügeebene geschleudert und die Neubildung von Oxiden wird durch die reduzierende Wirkung des heißen Metalldampfes verhindert. Außerdem wird vorhandene Schmelze mitgerissen und herausgeschleudert. Die Verbindung entsteht, wenn die durch den Metalldampf aktivierten Oberflächen durch die Schweißkraft aufeinandergepresst werden. Die Atome der Fügepartner nähern sich dann auf einen Abstand kleiner der

Gitterkonstante der Elementarzelle (einige 10⁻⁷mm) an und es bildet sich eine stoffschlüssige Verbindung (Metallbindung zwischen den Fügepartnern) aus. Die plastische Verformung des Buckels während des Nachsetzens der Elektroden kann zusätzlich zur Vergrößerung der Anbindungsfläche führen. [46]

Bei allen Schweißungen ist zu beobachten, dass kurz vor Erreichen des Strommaximums ein stoßartiger Auswurf von Mikrospritzern auftritt (Abbildung 42). Die Geschwindigkeit der Mikrospritzer kann anhand des zurückgelegten Weges mehrerer Spritzer innerhalb zweier, aufeinanderfolgender Bilder und der Bildfrequenz auf ca. 50 m/s (180 km/h) abgeschätzt werden. Diese hohen Geschwindigkeiten sind nur mit der Metallverdampfung, einhergehend mit der oben beschriebenen Volumenexpansion, erklärbar.

In Abbildung 42 ist weiterhin ersichtlich, dass bei der KE-Schweißung eine sehr hohe Leistung umgesetzt wird. Wird diese Leistung P auf die Größe der Fügefläche A bezogen, kann eine durchschnittliche (über die Querschnittsfläche gemittelte) Leistungsdichte \dot{q} zu jedem Zeitpunkt des Schweißvorgangs berechnet werden. Zum Zeitpunkt der maximalen Leistung ergibt sich für das beschriebene Beispiel:

$$\dot{q} = \frac{\hat{P}}{A} \approx 3 \cdot 10^6 \, \frac{W}{cm^2} \tag{11}$$

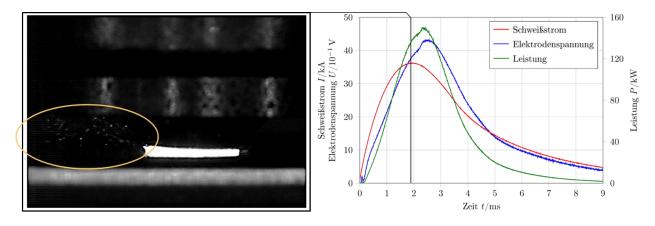


Abbildung 42: E=1000Ws und F=13,2kN, links: Hochgeschwindigkeitsaufnahme zum markierten Zeitpunkt mit markierten Mikrospritzern; rechts: Parameterverlauf

Es wird eine durchschnittliche Leistungsdichte erreicht, die beim Laserschweißen bereits zu der Bildung einer Dampfkapillare führt [21]. Dabei wird die erhöhte

Stromdichte am Rand des Buckels, wie oben beschrieben (Abbildung 41), vernach-Mit der erhöhten Stromdichte am Rand des Buckels können lässigt. Ringschweißungen (Abbildung 40) erklärt werden. Komplett verschweißte Fügeflächen beruhen auf einem weiteren physikalischen Effekt. Aufgrund der sehr kurzen Schweißzeit trägt die Wärmeleitung nicht wesentlich dazu bei, die noch nicht aktivierten Bereiche der Fügezone zu erwärmen. Der am Rand unter Atmosphärendruck entweichende Metalldampf verringert jedoch die elektrisch leitende Kontaktfläche, da er sehr geringe elektrische Leitfähigkeit aufweist [47]. Die Stromlinien verlagern sich dadurch zunehmend in die Mitte der Fügestelle. Dies führt dort zur Erhöhung der Stromdichte und damit verbunden zur Metallverdampfung und Oberflächenaktivierung. Die Aktivierung der Oberfläche durch den entstehenden Metalldampf findet folglich von außen nach innen bis zur Mitte des Buckels statt. Dieser Vorgang wird unterbrochen, wenn durch die ohmsche Erwärmung der Fügepartner, einhergehend mit Erweichung und Verdampfung des Werkstoffs, die Schweißkraft abfällt, wodurch die Nachsetzeinheit eine Beschleunigung erfährt und die Schweißkraft durch die Nachsetzbewegung wieder aufgebaut wird. Dann werden die aktivierten Bereiche aufeinander gepresst sowie vorhandene Schmelze und stark erweichtes Material aus der Fügezone gepresst. Es entsteht eine elektrisch leitende Verbindung, wodurch die Stromdichte abnimmt. Die Nachsetzeinheit beschleunigt umso mehr, je größer der Kraftabfall der Schweißkraft ist, da dadurch die zum Beschleunigen benötigte Kraftdifferenz (vom Bauteil übertragbare Kraft zu Federvorspannkraft) steigt. Die Verdampfung kann bei größeren Stromanstiegsgeschwindigkeiten weiter voranschreiten, da schneller höhere Stromstärken erreicht werden. Ohne Änderungen der Maschine können höhere Stromanstiegsgeschwindigkeiten, verbunden mit höheren Stromstärken, durch Erhöhung der Ladeenergie erreicht werden, da die Stromanstiegszeit identisch bleibt bei gleichzeitigem Anstieg des Maximalstromes [31].

Die Ringschweißung entsteht demnach dann, wenn die Metalldampfbildung nicht bis in die Mitte der Fügeebene vorgedrungen ist und die Oberflächen nur im Randbereich aktiviert werden. Eine Ausknöpfung wird erzeugt, wenn eine genügend große Fläche beim Schweißvorgang angebunden wird. Dieser Fall kann auch dann eintreten, wenn eine genügend große Ringschweißung entstanden ist. Zum Nachweis wird die mittlere Ringgröße bei den Parametern F=13,2kN und E=500Ws / 750Ws / 1000Ws / 1250Ws ermittelt. Für die Vermessung werden die ausgebrochenen Ringflächen gemessen (Mittelwert aus zwei Messungen der Ringbreite). Bei der entstandenen Ausknöpfung wird nach dem Werkstattversuch ein Querschliff der

Probe angefertigt und in diesem die Anbindungsbreite der festgestellten Ringschweißung gemessen (vgl. Abbildung 43). Die Ergebnisse der gemessenen Ringbreiten sind in Abbildung 44 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Energie die Ringbreite nahezu linear ansteigt. Diese Ergebnisse sollten bei der Gestaltung für Schweißbuckeln betrachtet werden. Die Aufstandsfläche muss so groß sein, dass der Metalldampf in der zur Verfügung stehenden Schweißzeit diese komplett aktivieren kann.

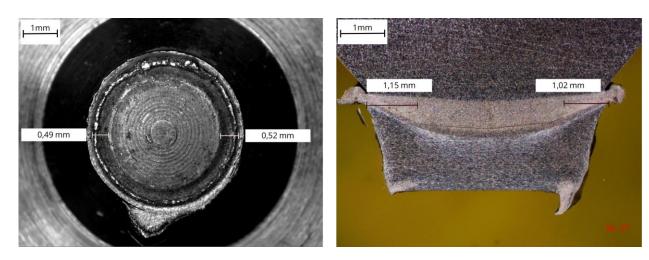


Abbildung 43: Beispiel der Vermessung der verschweißten Ringbreite, links: im Werkstattversuch eingetretene Ringschweißung, rechts: Querschliff einer ausgeknöpften Probe

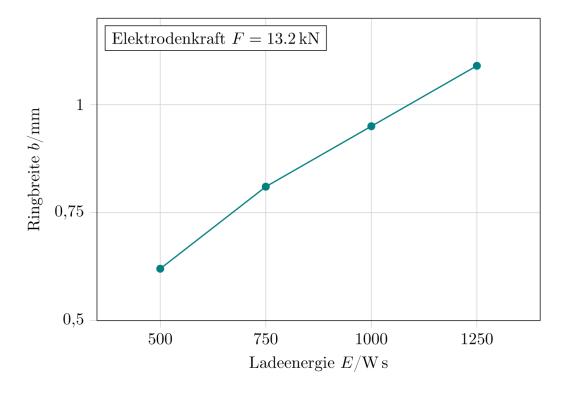


Abbildung 44: Verschweißte Ringbreite über Ladeenergie, Einzelbuckel MK: weich-weich

Bei der MK HW konnte keine Verbindung erzielt werden, bei der reines Materialversagen des Buckels oder des Bleches auftrat. Bei höheren Kräften werden nur noch Ringschweißungen erzeugt, die sehr wenig Festigkeit aufweisen. Im Bereich kleinerer Kräfte werden unvollständige Anbindungen erzeugt. Im Querschliff sind 2 Risse (1 und 2, Abbildung 45) sichtbar. Reißt der Buckel entlang der mit Nummer 1 gekennzeichneten Linie im Bereich der Wärmeeinflusszone, ist eine duktile Bruchfläche zu erkennen. Dies sind die durch den Schweißprozess verbundenen Flächen; es handelt sich um Ringschweißungen. Kommt es am Riss Nummer 2 zum Rissfortschritt, entsteht der Bruch innerhalb der Wärmeeinflusszone. Diese ist durch den Schweißprozess aufgrund der sehr schnellen Erwärmungs- und Abkühlraten aufgehärtet. Härtemessungen ergeben im Bereich des wärmebeeinflussten Bereiches Härten von ca. 1050HV0,1. Bei unvollständigen Anbindungen hat die ringförmige Verbindung eine höhere Festigkeit bzw. kann mehr Verformung aufnehmen, als der versprödete Bereich des Buckels. Der Riss breitet sich bei schlagartigen Belastung (Meißeltest) aus, kann aber auch zur Schweißverbindung hin laufen. Somit entsteht das Bruchbild der unvollständigen Anbindung (vgl. Tabelle 5). Bei höheren Elektrodenkräften wird das Blech sehr stark verformt, da dieses allein die Verformung aufnimmt (vgl. Kapitel 6.1.3). Dadurch wird die scheinbare Kontaktfläche zwischen Blech und Buckel stark vergrößert. Zusätzlich dazu sind im Randbereich die Vergleichsspannungen sehr hoch (vgl. Abbildung 46 & Abbildung 76), was zu einer Erhöhung der tatsächlichen Kontaktfläche führt. Dadurch werden die Stromlinien während des Schweißens in den äußeren Randbereich der Fügeebene verlagert.

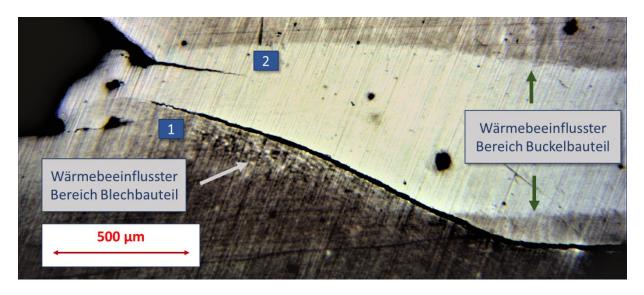


Abbildung 45: Mikroschliff einer Ringschweißung, F=13,2kN E=500Ws

Die Verbindung entsteht nur am Rand. Die Ringschweißung versagt, bevor das spröde Versagen des Buckels eintreten kann. Bei weiterer Energiesteigerung kommt es zu starken Verschleiß der unteren Elektrode, da das Blech beim Aufbringen der Kraft so verformt wird, dass nur noch das Blech direkt unter dem Buckel Kontakt mit der Elektrode hat. Die Verkleinerung des Blech-Elektrode-Kontaktes führt zu einer Erwärmung an der genannten Stelle, welche wiederum zum Elektrodenverschleiß führt. Die Werkstoffkombination kann somit aufgrund der starken Verformung sowie der Aufhärtung des Buckels nicht empfohlen werden.

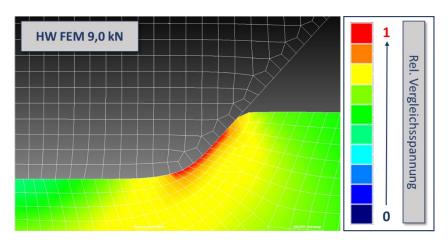


Abbildung 46: Simulationsmodell bei 9kN (σ_{Vmax}=550 MPa), EB-Buckelspitze im Halbschnitt

Bei der MK HH treten die gleichen Effekte wie bei der MK HW auf mit dem Unterschied, dass sich das Blech nicht verformt, sondern die Verformung allein vom Buckel aufgenommen wird. Dadurch werden im hohen Kraftbereich nicht ausschließlich Ringschweißungen erzeugt. Vollständige Anbindungen haben stets einen Sprödbruch im Buckel zur Folge. Die im Buckel gemessene Härte beträgt ebenfalls ≈1050HV0,1. Auch diese Materialkombination kann aufgrund der starken Aufhärtung nicht empfohlen werden. Forschungsergebnisse außerhalb dieses Projektes zeigen, dass mit einer geeigneten Wärmeführung eine Ausknöpfung erzeugt werden kann. Dies ist jedoch mit konventionellen KE-Schweißen nur bedingt möglich. [48]

Der Einfluss des Kontaktwiderstandes lässt sich mit Hilfe der Simulation abschätzen. Zum Zeitpunkt von ca. 0,7ms erreicht der in der Kontaktzone entstehende Wärmestrom sein Maximum. Beim Vergleich der Wärmeströme scheint die Erwärmung des Kontakts nur einen geringen Einfluss auf die Schweißung zu haben. Wird der Wärmestrom auf das Volumen bezogen (vgl. Tabelle 7), in dem der Wärmestrom entsteht und direkt wirkt, zeigt sich der Einfluss deutlich.

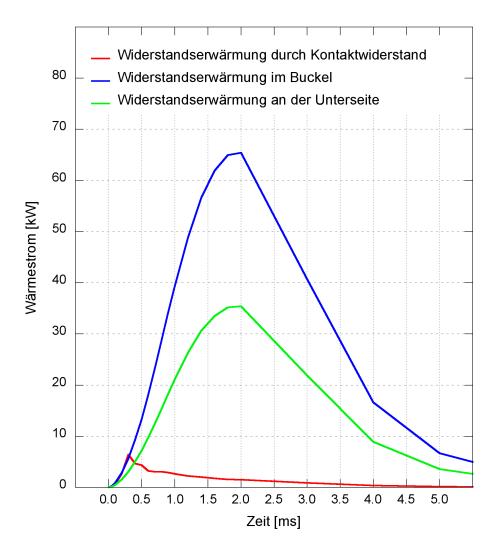


Abbildung 47: Simulierte Widerstandserwärmung der Teilwiderstände beim Einzelbuckel

Tabelle 7: Volumen und auf das Volumen bezogener Maximalwärmestrom der einzelnen Teilwiderstände beim Einzelbuckel

Bereich	Volumen V/mm²	$\frac{\dot{Q}_{\mathrm{max}}}{V}/\mathrm{kW}$	
Buckel	645,25	25,50	
Unterseite	628,32	0,10	
Kontaktzone	0,25	0,06	

Es ist zu beachten, dass für das Volumen der Unterseite/ des Blechs zur Vereinfachung der Simulation ein rotationssymetrisches Teil statt dem in der Realität

verwendeten quadratischen Blechzuschnitt angenommen wird. Für das Volumen der Kontaktzone wird eine Kontaktschichtdicke von 0,05 mm angenommen (vgl. Gleichung (10)). Die Maximalwerte des auf das Volumen bezogenen Wärmestroms sind in der Kontaktzone um 2 Größenordnungen größer als die im Buckelvolumen. Dies zeigt den starken Einfluss des Kontaktwiderstands auf den Prozessverlauf. Nach dem Abfallen des Kontaktwiderstandes sorgen die Stoffwiderstände für weiteres Erwärmen der Fügestelle.

6.2.3.2 Schulterbuckel

Zur Auswertung der Schulterbuckelversuche wird die Fügeverbindung durch Auspressen zerstört. Die entstandenen Bruchflächen werden mit dem Mikroskop vermessen. Aus zwei gegenüberliegenden Ringbreiten wird ein mittlerer Wert gebildet. Für die Bewertung der Ringbreite werden keine Qualitätsanforderungen gestellt. Mit den Ergebnissen werden Schweißbereichsdiagramme erstellt (Abbildung 48, Abbildung 82, Abbildung 83, Abbildung 84). Bei dieser Buckelgeometrie ist es möglich, hohe Festigkeiten bei geringer Spritzerausbildung zu erzeugen. Um das Wachstum der Ringbreiten zu visualisieren, werden die Ringbreiten für jede Kraftstufe über der Ladeenergie aufgetragen. Da trotz gleicher eingestellter Kraft die tatsächlich erreichte Kraft kurz vor Schweißbeginn leicht variiert, ist die mittlere Schweißkraft angegeben (Abbildung 49, Abbildung 85, Abbildung 86, Abbildung 87). Die angebundene Ringbreite (angebundene Fläche) wächst linear mit der eingestellten Ladeenergie. Aus den ermittelten Werten werden durch Regression lineare Kurven ermittelt. Diese unterscheiden sich bei unterschiedlichen Kraftstufen nur gering in Anstieg und Höhe. Allerdings sinkt mit steigender Kraft die Spritzerneigung, sodass bei Schulterbuckelverbindungen mit großen Schweißkräften gearbeitet werden sollte.

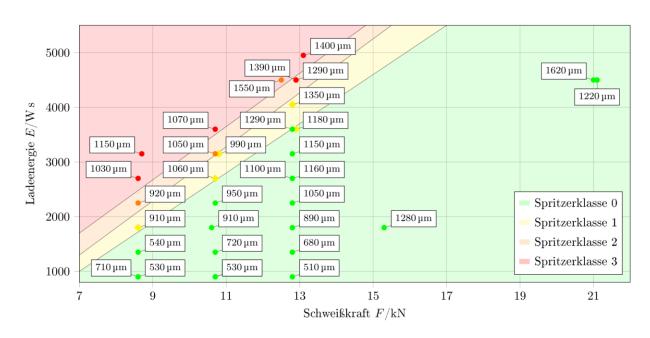


Abbildung 48: Schweißbereich mit Ringbreiten der Fügeverbindung der Schulterbuckelgeometrie, MK: WW

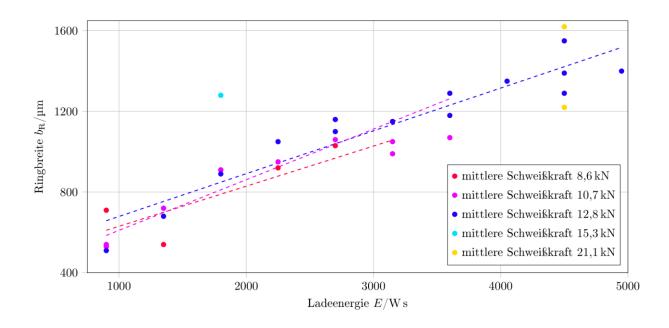


Abbildung 49: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: WW

Da die Simulation keine Verformung abbilden kann, wird die nach dem Schweißen ermittelte Ringbreite als Kontaktbereich angenommen. Des Weiteren muss für den Kontaktwiderstand eine Annahme getroffen werden, da keine Kontaktmessungen oder Verformungssimulationen durchgeführt werden konnten. Die Simulation wird

für die Schweißung mit 12,8kN Elektrodenkraft und 3150Ws durchgeführt. In der Simulation wird ohne Kontaktwiderstand in den Bauteilen die Schmelztemperatur nicht erreicht. Bei einem niedrigen, auf die Fläche bezogenen Kontaktwiderstand (1·10⁻⁹Ω/mm²) wird eine Maximaltemperatur größer Schmelz- aber kleiner Siedetemperatur erreicht. Nur bei einem hohen, auf die Fläche bezogenen Kontaktwiderstand (2·10⁻⁹Ω/mm²) wird die Verdampfungstemperatur erreicht. Das Temperaturmaximum befindet sich bei dieser Geometrie stets in der Mitte der Fügeebene, da die Erhöhung der Stromdichte am Rand weniger stark auftritt (Abbildung 50). Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme zeigt keine Makrospritzer und nur sehr wenige Mikrospritzer. Diese treten erst nach dem Strommaximum auf und sind etwas größer im Vergleich zu Mikrospritzern beim Einzelbuckel. Unter Berücksichtigung der Simulationsergebnisse kann angenommen werden, dass in der Mitte der Fügezone etwas Metalldampf entsteht und beim Austritt aus der Fügezone zusätzlich zu Oxidschichten und Verunreinigungen etwas geschmolzenes Material mitreißt. Weiterhin zeigt die Simulation, dass nach dem Strommaximum der Wärmestrom durch den Schweißstrom kleiner ist als der Wärmestrom, der von der Fügestelle in das Material der Bauteile geht. Die Fügezone wird sehr schnell wieder kalt.

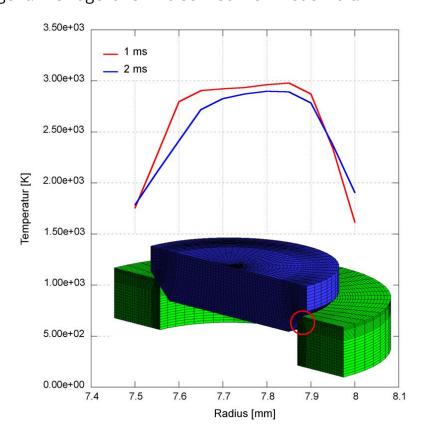


Abbildung 50: Simulierter Temperaturverlauf nach 1 ms bzw. 2 ms in der Fügezone beim Schulterbuckel (Annahme hoher Kontaktwiderstand)

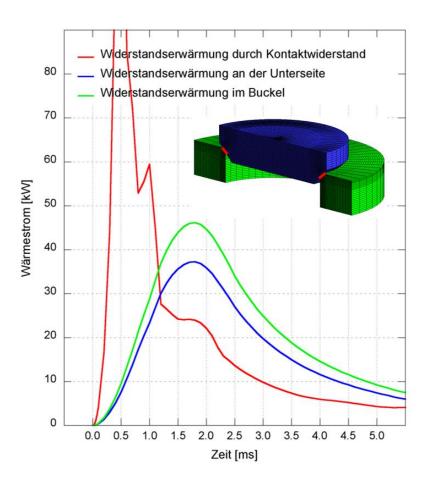


Abbildung 51: Simulierte Widerstandserwärmung der Teilwiderstände beim Schulterbuckel

6.2.3.3 Fügeelemente

Zur Erstellung der Schweißbereiche wird die Abzugskraft im Kopfzugversuch ermittelt. Dabei werden Weg und Kraft aufgezeichnet. Als Qualitätskriterium wird die maximale Abzugskraft herangezogen. Es gibt keine einheitlichen Bewertungsmaßstäbe für die erforderliche Abzugskraft, da je nach Anwender unterschiedliche Vorgaben getroffen werden (vgl. Tabelle 8). Unterschiede zwischen Segmentbuckelmutter und Ringbuckelmutter werden nicht getroffen. Zum Teil sind die Anforderungen abhängig von den Blechdicken. Die Anforderungen an das Gewinde sind wesentlich höher als die Anforderungen an die Schweißverbindung. Zur Bewertung werden die jeweils höchste und niedrigste Anforderung herangezogen.

Tabelle 8: Zusammenstellung verschiedener Anforderungen an Schweißverbindungen der vorgestellten Fügeelementen

Anforderung	Kraft	M8 (SBM)	M10 (RBM)
Zeichnung Hersteller	$F_{ m max,Gewinde}$	42,5 kN	67,3kN
OEM 1	$F_{ m k}$	<u>3,0 kN</u>	<u>4,0 kN</u>
OEM 2	$F_{ m k}$	3,6 kN	6,6 kN
OEM 3	$F_{ m k}$	4,0 kN	<u>8,0 kN</u>
DVS Entwurf	$F_{ m k}$	<u>5,5 kN</u>	7,5 kN

Durch die verschiedenen Mutterntypen und die unterschiedlichen verwendeten Blechmaterialien ergeben sich 12 Schweißbereiche (Abbildung 52, Abbildung 88 – Abbildung 92). Weiterhin werden die Wachstumskurven analog zu Kapitel 6.2.3.2 erstellt, jedoch unter Verwendung der Abzugskraft (Abbildung 53).

Um die angeforderten Festigkeiten zu erreichen, muss die Oberflächenbeschichtung aus der Fügezone beseitigt werden, damit eine Schweißverbindung zwischen dem Stahl des Fügeelements und den Stahl des Bleches entsteht. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass zunächst Zink aus der Fügezone austritt (erkennbar an einen kleinen schwarzen Rauch, der nicht leuchtet). Danach treten die bereits beschriebenen Mikrospritzer auf, gefolgt von Makrospritzern.

Es können keine genügend feste Verbindungen erzeugt werden, ohne dass makroskopische Spritzer auftreten, die der Spritzerklasse 1 zugeordnet werden können. Bei den Segmentbuckelmuttern entstehen mehr Spritzer als bei den Ringbuckelmuttern. Das wird damit begründet, dass wegen der kleineren Fügefläche der Segmentbuckelmutter (vgl. Tabelle 9) eine höhere Festigkeit der Schweißverbindung benötigt wird, um die gleiche Abzugskraft zu erreichen. Das Verhältnis zwischen Ladeenergie und Fügefläche ist zur Betrachtung jedoch nicht sinnvoll, da Segmentbuckel im Vergleich zu Ringbuckeln sowohl in radialer Richtung als auch in Umfangsrichtung ungleiche Stromdichteverteilungen aufweisen.

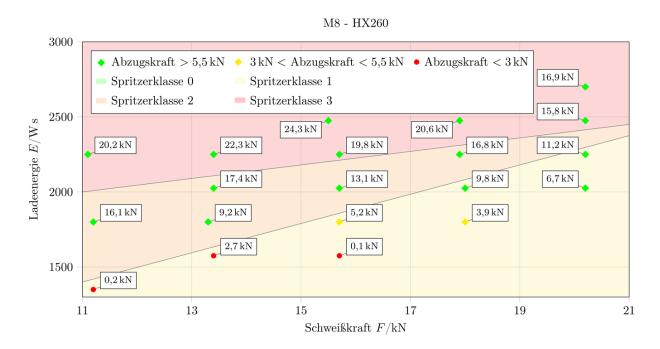


Abbildung 52: Schweißbereich M8-SBM auf HX260

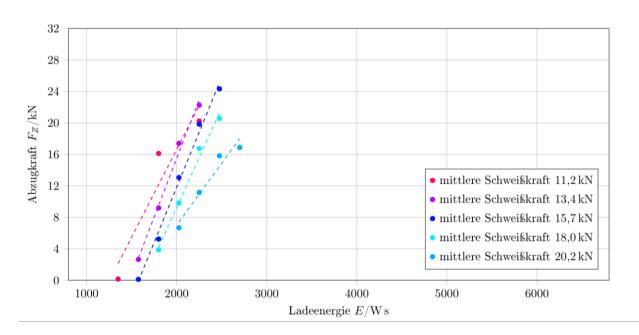


Abbildung 53: Wachstumskurve M8 auf HX260

Weiterhin wird festgestellt, dass Segmentbuckelmuttern durch das größere Verhältnis zwischen Elektrodenkontaktfläche zu Fügefläche (bzw. Aufstandsfläche) ein geringerer Verschleiß in der Kontaktzone zur Elektrode auftritt, was wiederum auf einen geringeren Verschleiß der Elektrode schließen lässt. Früngel verlangt in [10] ein Flächenverhältnis von 3:1. Dieses wird bei der RBM aufgrund des großen Kernloches nicht erreicht (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Vergleich zwischen Segmentbuckelmutter und Ringbuckelmutter (Werte aus exemplarischen Versuchen mit HX340)

Eigenschaft	M8-SBM	M10-RBM
Schweißkraft	17,9kN	17,1 kN
Ladeenergie	2475Ws	5850Ws
Abzugskraft	31,7 kN	34,6 kN
Spritzer	mehr	weniger
Oberflächenverschleiß	kleiner	größer
Elektrodenkontaktfläche A _E	155 mm²	116 mm²
Fügefläche A _F	27 mm²	42 mm²
Flächenverhältnis	57:10	28:10
Verformungsarbeit im statischen Zugversuch	415J	95J
Dichtschweißung	nicht möglich	möglich

In Abbildung 54 sind die Messdaten der Zugversuche der in Tabelle 9 genannten Versuche dargestellt. Der Weg im Zugversuch von Kraftaufbringung bis zum Bruch ist bei den SBM rund viermal so groß wie bei den RBM. Das Integral unter den gemessenen Kurven ergibt die Verformungsarbeit (statisch) und ist bei der SBM ebenfalls mehr als viermal größer als bei der RBM. Der Vergleich der linearen Trendlinien der

Wachstumskurven zeigt einen flacheren Anstieg bei den RBM. Das bedeutet, dass zur Steigerung der Abzugkraft für die SBM weniger Energie benötigt wird. Dadurch wird allerdings auch der Schweißbereich eingeschränkt, da in einem schmalen Energiebereich bei steilem Anstieg der Wachstumskurve die Qualität der Verbindung stark schwankt.

Die ersten sichtbaren Erwärmungszeichen bei den Segmentbuckelmuttern treten an den Randbereichen der Buckelgeometrien auf. Dies zeigen auch die Ergebnisse der Simulation (Abbildung 55). Weiterhin wird deutlich, dass bei höheren Widerständen die Differenz zwischen Erwärmung im Inneren zum Äußeren der Fügefläche geringer ist. Dies bestätigen auch die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von M8-SBM auf HX260 im Vergleich zu den Aufnahmen von M8-SBM auf 22MnB5. Der pressgehärtete Stahl weist durch die Aluminium-Silizium-Beschichtung einen höheren Kontaktwiderstand auf und zeigt eine gleichmäßigere Erwärmung.

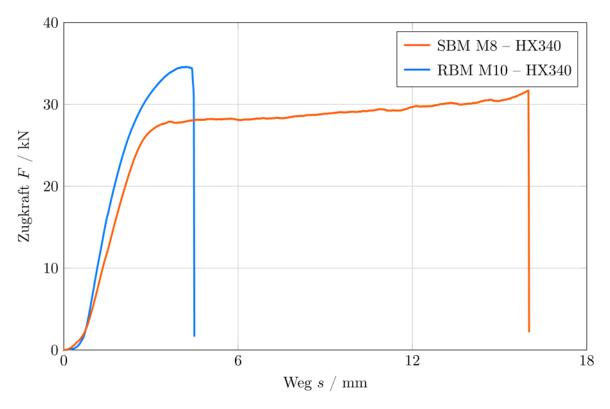


Abbildung 54: Messdaten des Kopfzugversuches der in Tabelle 9 dargestellten Versuche

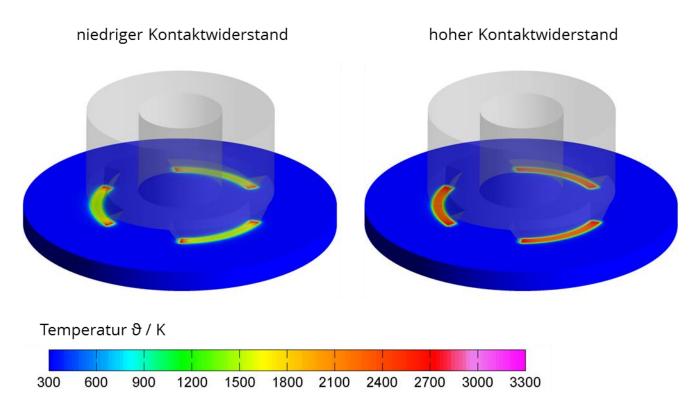


Abbildung 55: Simulation der M8-SBM auf HX260 bei verschiedenen, angenommenen Kontaktwiderständen (bei 0,5 ms)

Dies bestätigen auch die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von M8-SBM auf HX260 im Vergleich mit Aufnahmen von M8-SBM auf 22MnB5.

Der Vergleich zwischen RBM und SBM zeigt Vor- und Nachteile für beide Mutterntypen. Anhand der genannten Eigenschaften muss je nach Anwendungs- und Anforderungsfall entschieden werden, welcher Typ eingesetzt wird.

6.2.3.4 Weitere Simulationsergebnisse

Mit dem Simulationsmodell wird der Einfluss der Kontaktierung der Elektroden an die Bauteile untersucht. Die Simulationen erfolgen mit dem Modell der RBM. Zunächst wird die Kontaktierung der oberen Elektrode mit der Mutter betrachtet. Ein Vergleich zwischen Kontaktierung mit einer flachen Elektrode von oben mit der Kontaktierung einer ringförmigen Spannzange an der Seitenfläche des Fügeelements zeigt keinerlei Einfluss auf die Stromdichteverteilung in der Fügezone (Abbildung 56).

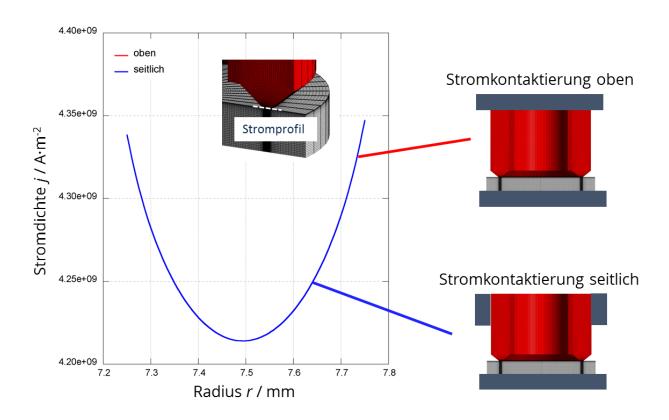


Abbildung 56: Einfluss der Kontaktierung der oberen Elektrode

Der Vergleich zwischen drei verschiedenen Kontaktierungsarten zwischen unterer Elektrode und Blech zeigt, dass nur die Kontaktierung seitlich an den Blechbauteilen einen sehr geringen Einfluss auf die Ausbildung des Stromdichteprofils hat (Abbildung 57). Jedoch ist dieser Unterschied zu gering um daraus einen Nutzen ziehen zu können.

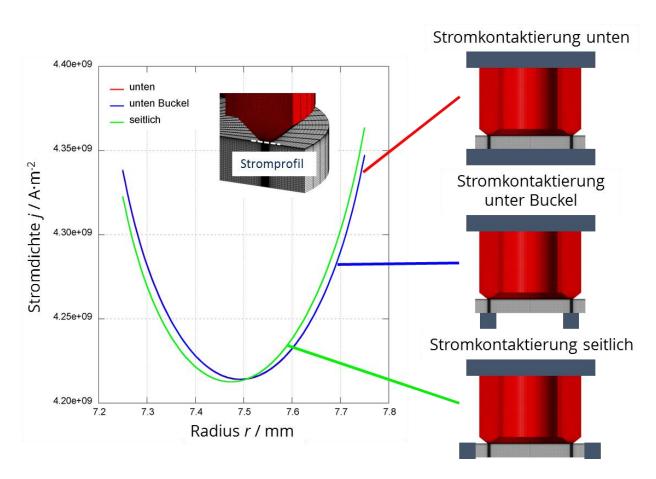


Abbildung 57: Einfluss der Kontaktierung der unteren Elektrode

6.2.3.5 Einfluss der Nachsetzeinheit auf den Schweißprozess

Die Untersuchungen werden auf Maschine 2 durchgeführt. Zunächst wird das Ver-Standardnachsetzeinheit untersucht. Dazu werden aus dem Schweißbereich der SBM-M8 auf HX260 (Abbildung 52) die Versuche mit 1750Ws ausgewertet. Abbildung 58 zeigt die verschiedenen Schweißstromverläufe der Versuche. Der Unterschied der charakteristischen Werte der Stromformen bei verschiedenen Schweißkräften aber gleicher Ladeenergie ist annähernd null, obwohl das Schweißergebnis stark variiert. Dieses Verhalten ist typisch für KE-Schweißungen. In Abbildung 59 sind die Kraftverläufe der genannten Versuche dargestellt. Aufgrund der unter 4.2.4 aufgeführten Probleme sind nur geringe Änderungen im Verlauf der Proben zu erkennen. Deutlich wird ein größerer Kraftabfall zum Zeitpunkt th bei kleineren Kräften. Dies ist auf einen höheren Widerstand der Fügeebene zurückzuführen. Aufgrund der größeren Wärmeentwicklung, einhergemehr Erweichung und Metallverdampfung, beschleunigt

Nachsetzeinheit die Elektrode mehr. Die größere Beschleunigung ist in Abbildung 60 ersichtlich.

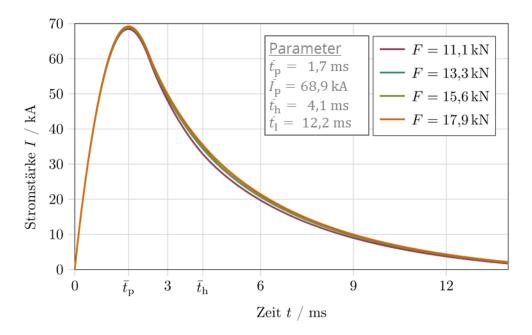


Abbildung 58: Schweißstrom über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 1750Ws

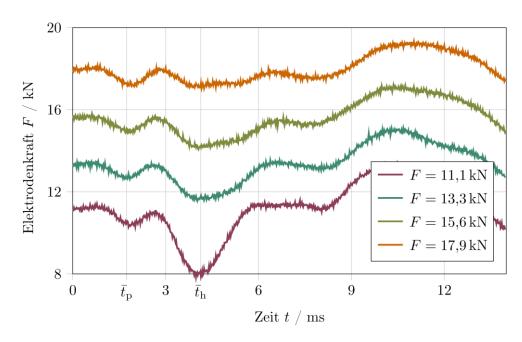


Abbildung 59: Elektrodenkraft über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 1750 Ws

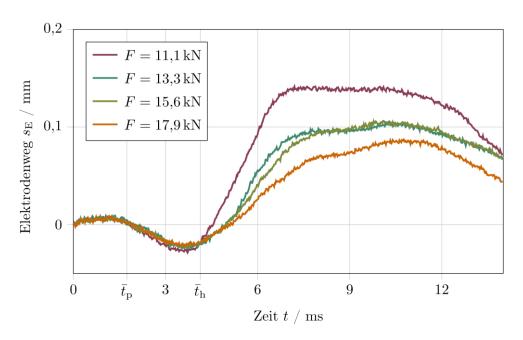


Abbildung 60: Elektrodenweg über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 1750 Ws

Die gleichen Ergebnisse zeigen die Versuche mit einer Ladeenergie von 2250Ws (vgl. Abbildung 98, Abbildung 99, Abbildung 100)

Zur Änderungen der Eigenschaften der NE werden die bewegte Masse und die Feder der NE variiert. Das Standardfederpaket besteht aus 6 Tellerfedern in Reihenschaltung. Für die Versuche wird die Aufnahme der Tellerfedern derart umgebaut, dass diese auch 3 bzw. 12 Tellerfedern in Reihenschaltung aufnehmen können. Die gemessenen Federkonstanten sind in Tabelle 10 ersichtlich. Die Masse der Nachsetzeinheit beträgt ≈100 kg.

Tabelle 10: Anordnung und Federkennwerte der verwendeten Federpakete

	3 Tellerfedern	6 Tellerfedern	12 Tellerfedern
Anordnung			
Federkonstante k	6,1 kN/mm	2,9 kN/mm	1,7 kN/mm

Es werden einzelne Kraftstufen aus den Schweißbereichen experimentell untersucht. Die Referenzmessungen mit dem Standardtellerpaket werden wiederholt.

Abbildung 61 zeigt die Schweißbereiche bei unterschiedlichen Federsteifigkeiten. Die veränderte Federsteifigkeit hat keinen großen Einfluss auf die Spritzerklasse oder die erreichte Festigkeit. Es werden jeweils für die Parametersätze F=7kN mit E=450Ws und F=11kN mit E=850Ws Schliffe angefertigt. Bei der Untersuchung wird zunächst ein Bild im ungeätzten Zustand aufgenommen, da in diesem Zustand Bindefehler deutlich sichtbar sind. Danach werden Aufnahmen im geätzten Zustand angefertigt. Diese werden genutzt, um die Höhe der Wärmeeinflusszone zu bestimmen. Abbildung 101, Abbildung 102 und Abbildung 103 zeigen die Querschliffe mit 7kN Schweißkraft und 450Ws Ladeenergie im ungeätzten Zustand; Abbildung 104, Abbildung 105 und Abbildung 106 im geätzten Zustand. In Tabelle 11 sind die ermittelten Messwerte für die Breite des nicht angebundenen Bereiches $b_{\rm f}$ und die Größe der WEZ $h_{\rm WEZ}$ angegeben.

Tabelle 11: Messwerte in Querschliffen der EB

		F=7kN, E=450Ws		F=11kN, E=850Ws	
$\frac{m_{NE}}{\mathrm{kg}}$	$\frac{k}{\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}}$	$\frac{b_{\mathrm{f}}}{\mu\mathrm{m}}$	$\frac{h_{ m WEZ}}{\mu m m}$	$\frac{b_{\mathrm{f}}}{\mathrm{mm}}$	h _{WEZ} mm
8	1,7	2810	430	2950	750
	2,9	2710	470	2600	760
	6,1	2220	480	2870	830
100	1,7	2730	500	1572	890
	2,9	2590	530	1400	970
	6,1	1100	590	2050	860

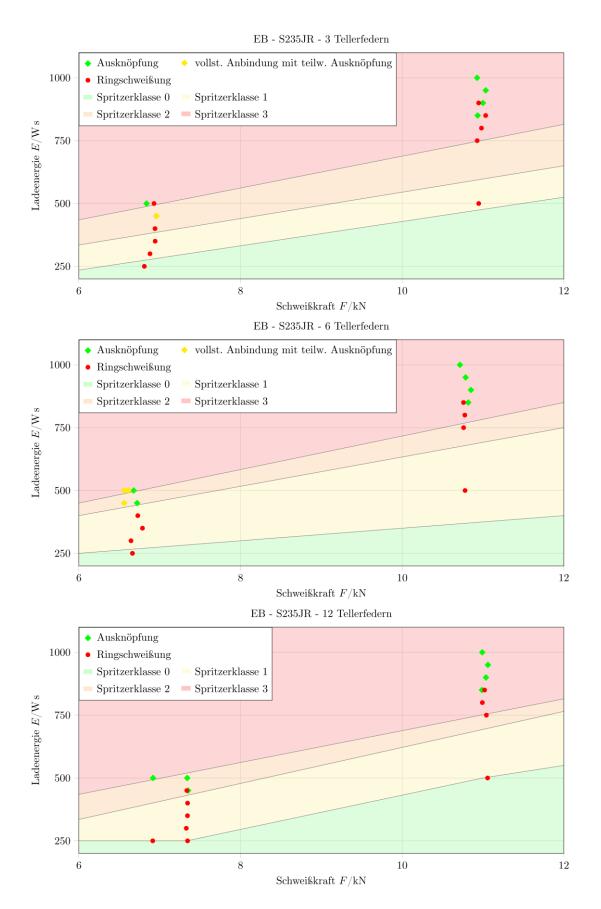


Abbildung 61: Schweißbereiche mit veränderlichen Federpaketen bei EB, $m_{\rm NE} \approx 100\,{\rm kg}$

Bei den Versuchen mit 7kN ist zu erkennen, dass bei steigender Federsteifigkeit die Breite des nicht angebundenen Bereichs sinkt und damit der angebundene Bereich steigt. Außerdem wird die Höhe der WEZ bei steigender Federsteifigkeit größer. Der gleiche Einfluss zeigt sich mit sinkender Masse der Nachsetzeinheit. Die Versuche mit 11kN zeigen Abweichungen von diesem Verhalten. Für die Versuche mit reduzierter Masse der Nachsetzeinheit wird eine neukonstruierte Aufnahme der Feder eingesetzt. Diese wird in den Arbeitsraum der Maschine eingebaut, wodurch sich der Abstand der Polplatten ungefähr verdoppelt. Dies hat einen großen Einfluss auf die Stromform, da sich durch die Vergrößerung des Sekundärkreises die Induktivität erhöht und dadurch der Stromanstieg reduziert wird. Die Versuche mit leichterer Nachsetzeinheit weisen dadurch eine um 0,4ms größere Stromanstiegszeit und einen um ≈15% reduzierten Spitzenstrom auf. Diese Änderung hat ebenfalls einen Einfluss auf die Verbindungsbildung, kann jedoch nicht vermieden werden.

Die für die theoretische Betrachtung wird die Nachsetzeinheit auf einen einfachen Feder-Masse-Schwinger reduziert (Abbildung 62). Mit den Größen

- *t* Zeit,
- F Elektrodenkraft,
- s Elektrodenweg,
- F₀ Elektrodenkraft zum Zeitpunkt t=0,
- s₀ Elektrodenweg zum Zeitpunkt t=0,
- *k* Federkonstante der Nachsetzeinheit,
- *m* Masse der Nachsetzeinheit,

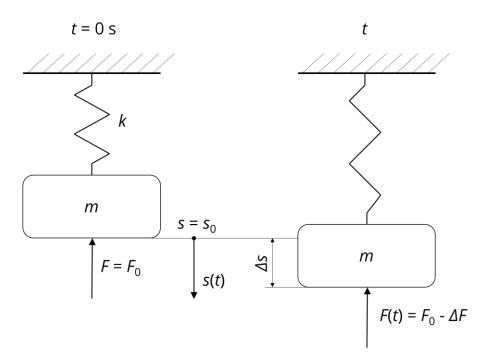


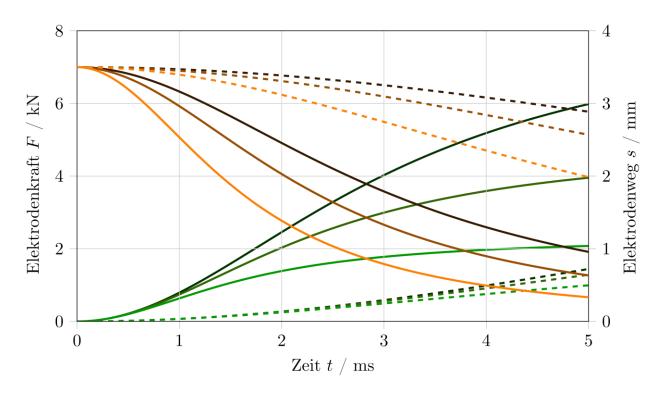
Abbildung 62: Vereinfachtes Model einer Nachsetzeinheit

dem zweiten Newton'schen Gesetz und der Bewegungsgleichung für eine Masse unter Einfluss einer konstanten Kraft sowie dem Hooke'schen Gesetz für Federsysteme [45] kann für die Elektrodenkraft und den Elektrodenweg der zeitliche Verlauf beschrieben werden. Unter der Annahme, dass die Beschleunigung aus dem Stillstand beginnt und die Gegenkraft aus dem Schweißbuckel schlagartig auf null absinkt, gilt:

$$F(t) = \frac{F_0}{1 + \frac{k}{2 \cdot m} \cdot t^2} \tag{12}$$

$$s(t) = \frac{F_0}{2 \cdot \frac{m}{t^2} + k} \tag{13}$$

Mit F_0 =7kN können die zeitlichen Verläufe von Elektrodenweg und Elektrodenkraft bestimmt werden, die bei den Versuchen, die metallographische ausgewertet werden, theoretisch auftreten (Abbildung 63).



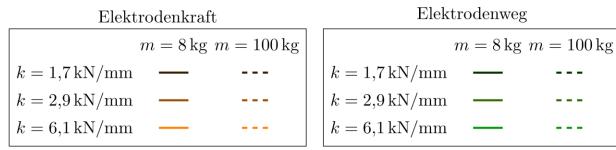


Abbildung 63: Elektrodenkraft und Elektrodenweg der Querschliffe

Es ist zu erkennen, dass sowohl eine kleinere Masse als auch eine kleinere Federsteifigkeit ein schnelleres Nachsetzen ermöglicht. Der Einfluss der Federsteifigkeit auf den Nachsetzweg steigt bei der Verringerung der Masse. Die Kraft, die von der nachsetzenden Elektrode aufgebracht werden kann und somit zur Verbindungsbildung zur Verfügung steht sinkt mit steigender Masse und steigender Federsteifigkeit.

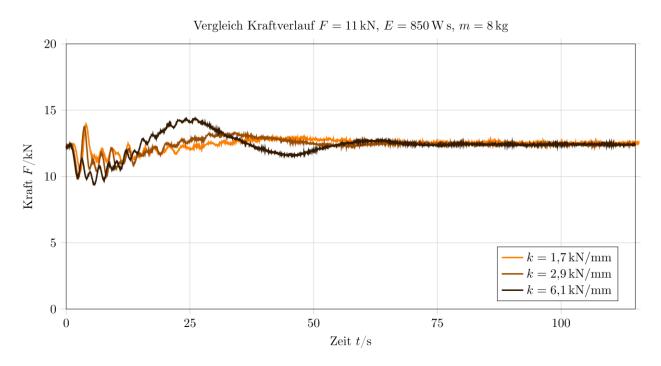
Die Schlussfolgerung aus den Querschliffen und der theoretischen Betrachtung lautet, dass eine größere Anbindungsfläche bei kleiner Beschleunigung der Nachsetzeinheit entsteht. Dies resultiert aus dem beschriebenen Prozessablauf. Wenn die Elektrode das Buckelbauteil beschleunigt und die aktivierten Oberflächen aufeinander presst, fließt der Schweißstrom über die neuen stoffschlüssigen Bereiche (außen). Die Bildung des Metalldampfes schreitet nicht weiter in Richtung der Mitte der Fügezone voran. Die neu entstandenen, stoffschlüssigen Bereiche weisen

keinen Kontaktwiderstand mehr auf, weshalb dort der Wärmestrom gering ist. Die Stromdichte nimmt außerdem ab, da die Metalldampfbildung erst kurz vor Strommaximum beginnt und der Schweißstrom während der Nachsetzbewegung bereits wieder abnimmt. Weiterhin ist zu vermuten, dass durch die höheren Elektrodenkräfte (bei gleichem Abschmelzweg), welche bei höheren Beschleunigungen der Nachsetzeinheit vorliegen, der Elektrodenverschleiß und die Spritzerneigung sinken. Andererseits führt eine zu geringe Beschleunigung zu mehr Spritzern und höherem Elektrodenverschleiß.

Eine Optimierung der Nachsetzeinheit durch die reine Anpassung der Beschleunigung kann entweder zugunsten der Spritzerneigung oder der Verbindungsbildung durchgeführt werden. Denkbar wäre ein zeitgesteuertes Nachsetzen, sodass die Metalldampfbildung so weit wie nötig fortschreiten kann, Spritzer durch übermäßiges Verdampfen jedoch durch rechtzeitiges und schnelles Nachsetzen verhindert werden. Einfacher erscheint die Anpassung des Schweißstromes an die Mechanik der Schweißmaschine. Neuste Maschinenentwicklungen bieten dafür Ansätze [31].

Der zeitliche Verlauf der Kraft ist in Abbildung 64 dargestellt. Die Reduzierung der Masse führt zu deutlich kleineren Schwingungsamplituden. Dies resultiert aus der oben beschriebenen langsameren Beschleunigung, bevor die Elektrodenkraft wieder über die Fügezone auf die untere Elektrode wirkt. Außerdem wird beim erneuten Aufbau der Kraft eine höhere Masse abgebremst, was zu größeren Trägheitskräften führt. Der Einfluss der Federsteifigkeit ist im Vergleich dazu sehr gering. Allerdings hat die Federsteifigkeit bei kleiner Masse einen großen Einfluss auf die Frequenz der Schwingung.

Der Einfluss der Nachsetzeinheit wird ebenfalls an den SBM-M8 untersucht. Abbildung 65 zeigt die durchgeführten Versuche als Schweißbereiche. Das Spritzerverhalten nimmt bei sinkender Masse ab und wird von der Federsteifigkeit kaum beeinflusst. Die Parameterverläufe der Versuche mit einer Schweißkraft von $F \approx 14,5\,\mathrm{kN}$ und einer Ladeenergie von $E = 2025\,\mathrm{Ws}$ bei $m = 100\,\mathrm{kg}$ zeigen, dass die Schweißstromverläufe kaum beeinflusst werden (Abbildung 108). Der zeitliche Verlauf des Elektrodenweges zeigt, dass nach dem Beruhigen aller Schwingungen annähernd gleiche Wege erreicht werden.



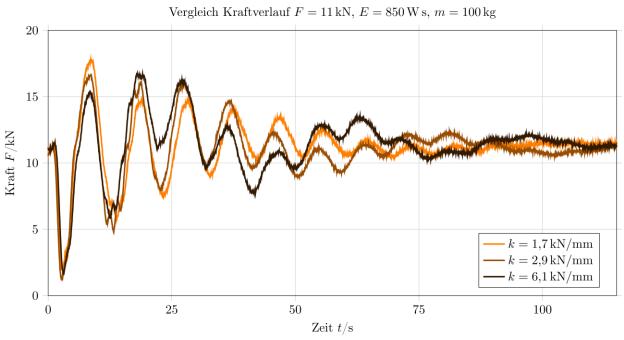


Abbildung 64: Vergleich der Kraftverläufe bei verschiedenen Federsteifigkeiten, oben: mit leichter Nachsetzeinheit, unten: mit schwerer Nachsetzeinheit

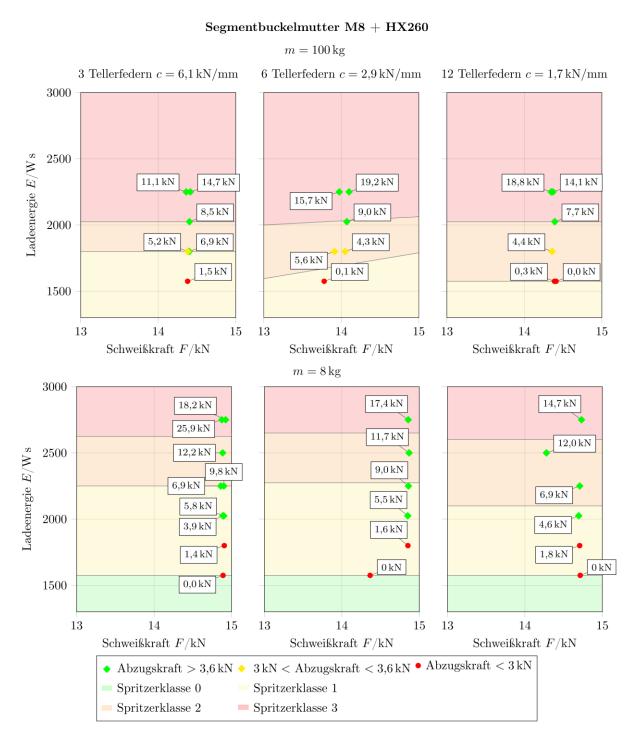


Abbildung 65: Vergleich der verschiedenen Schweißbereiche bei variierten NE – SBM-M8 auf HX260

Der Verlauf des Nachsetzweges zeigt bis 50ms nach Schweißbeginn ein Nachsetzen (Abbildung 110). Die Federpakete mit der kleinsten und mit der größten Federkonstante weisen sehr ähnliches Verhalten auf. Dies lässt auf keine Systematik schließen. Die Versuche mit $k=2,9\,\mathrm{kN/mm}$ weichen ab. Es wird vermutet, dass es durch ständigen Wechsel der Tellerfederpakete zu einem leichten Verklemmen der Federn kommen kann und dadurch das Nachsetzverhalten beeinflusst wird.

Aus dem Elektrodenweg, der gegen das feste Maschinengestell (Weg zwischen oberer und unterer Elektrode) gemessen wird, und dem Nachsetzweg, dem Weg zwischen Nachsetzeinheit (= oberer Elektrode) und Pneumatikzylinder kann der Weg des Pneumatikzylinders bestimmt werden. Abbildung 111 zeigt, dass der Pneumatikzylinder nach ca. 10ms beginnt, der Nachsetzbewegung der Elektroden zu folgen. Bei hoher Federsteifigkeit erfolgt das Nachsetzen eher aus dem pneumatischen Aktor, da weniger Federweg zurückgelegt wird; bei niedriger Federsteifigkeit folgt der Aktor langsamer. Ein Pneumatikzylinder kann damit langsamere Nachsetzeinheiten ausgleichen.

Gleiche Ergebnisse zeigt der Vergleich von RBM-M10 (Abbildung 108 bis Abbildung 116). Bei diesem Vergleich weichen die Versuche mit $k=2,9\,\mathrm{kN/mm}$ und $m=100\,\mathrm{kg}$ von den anderen ab, da eine andere Mutterncharge verwendet werden muss.

6.3 Verallgemeinerung der Ergebnisse

Zur Verallgemeinerung der Ergebnisse werden Schweißversuche bei einem PA Mitglied durchgeführt. Die Schweißversuche beschränken sich auf EB HH, SBM-M8 + HX260, RBM-M8 + HX260 und Schulterbuckel WW und WH. SBM-M8 + HX260 Versuche werden ausführlich ausgewertet. Es werden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Parameteraufzeichnungen vorgenommen. Für die Versuche stehen zwei Maschinen zur Verfügung. Beide sind elektrisch baugleich, unterscheiden sich jedoch in der Art der Nachsetzeinheit. Zunächst werden die Versuche mit einer elektromagnetischen Nachsetzeinheit durchgeführt (Maschine 3). Die Zustellbewegung wird dabei über einen Elektro-Servomotor realisiert und die Kraft geregelt über einen Elektromagneten aufgebracht. Die Versuche werden mit einer konventionellen Nachsetzeinheit wiederholt, die mit Elastomerfedern ausgestattet ist (Maschine 4). Die Masse und Federkennwerte der Nachsetzeinheit konnten nicht bestimmt werden. Die Auswahl der Schweißparameter orientiert sich an den bereits durchgeführten Versuchen an Maschine 1 und 2.

Bei allen Versuchen ist in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Austritt von Mikrospritzern als Nachweis der Metallverdampfung zu erkennen. Ebenfalls bestätigt sich, dass bei steigenden Elektrodenkräften die Festigkeit der Verbindung sinkt und bei steigenden Ladeenergien die Festigkeit steigt.

Den Vergleich der Versuche mit 2250Ws und steigenden Elektrodenkräften zeigen Abbildung 66, Abbildung 67 und Abbildung 68. Der Schweißstrom ändert sich ebenfalls kaum mit veränderlicher Kraft. Der Unterschied bei Schweißkraft 10,7kN entsteht durch übermäßige Metallverdampfung aufgrund des hohen Kontaktwiderstandes. Dadurch wird während des Prozessverlaufes der Widerstand der Fügezone so groß, dass er merkbar den Stromverlauf beeinflusst. Die Verläufe der Elektrodenkraft unterscheiden sich ebenfalls kaum. Bei diesen Versuchen ist der Kraftsensor zwischen magnetischer Bewegungseinheit und Polplatte angebracht, sodass die Trägheit der Polplatte die Kraftmessung verfälscht. Der hohen Grad der Metallverdampfung ist dennoch im Verlauf erkennbar (*F*=10,7kN). Der Elektrodenwegverlauf zeigt eine höhere Beschleunigung bei kleineren Schweißkräften aufgrund der größeren Wärmeentwicklung in der Fügezone. Die Auswertungen stimmen mit den in Kapitel 6.2.3 gewonnenen Erkenntnissen überein.

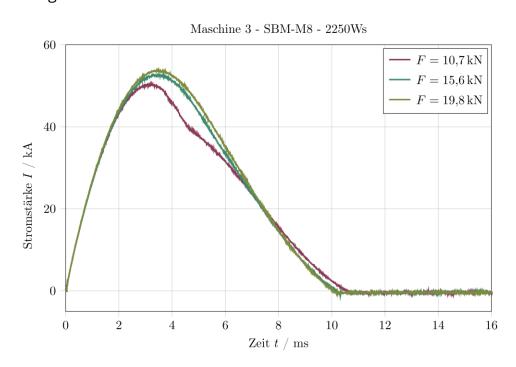


Abbildung 66: Vergleich Schweißstrom - Maschine 3 - SBM-M8 auf HX260 - 2250Ws

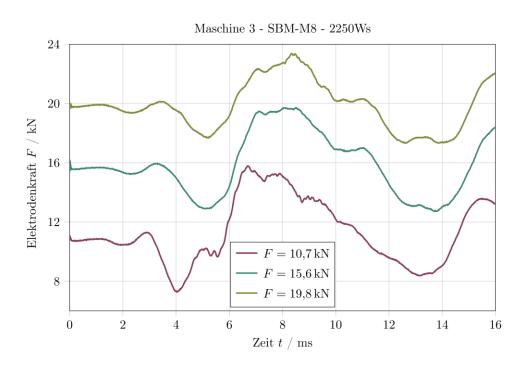


Abbildung 67: Vergleich Elektrodenkraft - Maschine 3 - SBM-M8 auf HX260 - 2250Ws

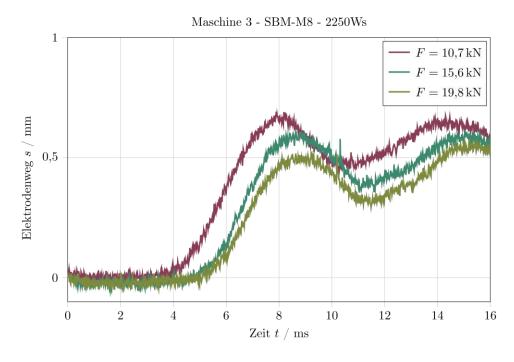


Abbildung 68: Vergleich Elektrodenweg - Maschine 3 - SBM-M8 auf HX260 - 2250Ws

Weiterhin werden die Versuche der Maschinen 3 und 4 untereinander mit den vorangegangenen Versuchen verglichen. Abbildung 69 zeigt einen Teilausschnitt aus den erstellten Schweißbereichen. Die Schweißkraft ist bei den Versuchen an der Maschine mit Elastomerfederpaket um ca. 2kN kleiner trotz identischer Einstellung. Der

Verlauf der Schweißströme (Abbildung 117) zeigt einen deutlich langsameren Stromanstieg der Maschinen 3 und 4 im Vergleich zu Maschine 2. Die charakteristischen Werte von Maschine 3 und 4 sind:

 t_p =3,5 ms I_p =53,3 kA t_h =6,7 ms t_l =9,7 ms

Untereinander weisen die beiden Maschinen keinen großen Unterschied auf.

Der Vergleich der Elektrodenkräfte (Abbildung 70) zeigt ein größeres Absinken bei Maschine 2 als bei den Maschinen 3 und 4. Der Unterschied des anfänglichen Absinkens der Elektrodenkraft zwischen magnetischer NE und NE mit Elastomerfedern ist sehr klein, jedoch fällt die Kraft bei den Elastomerfedern langsamer. Des Weiteren zeigt diese NE auch weniger Überschwingen und Nachschwingen im Kraftverlauf.

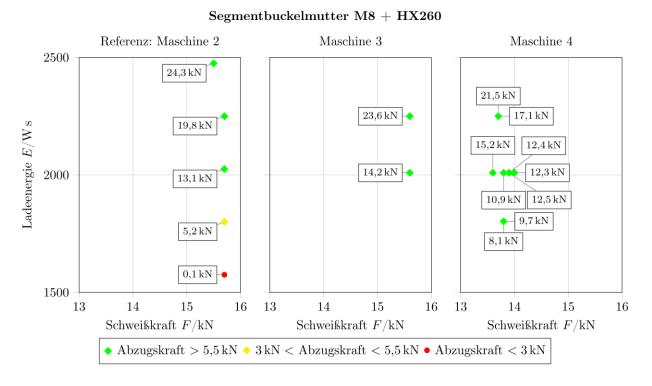


Abbildung 69: Vergleich 1 der Versuche bei PA Mitglied, SBM - HX260

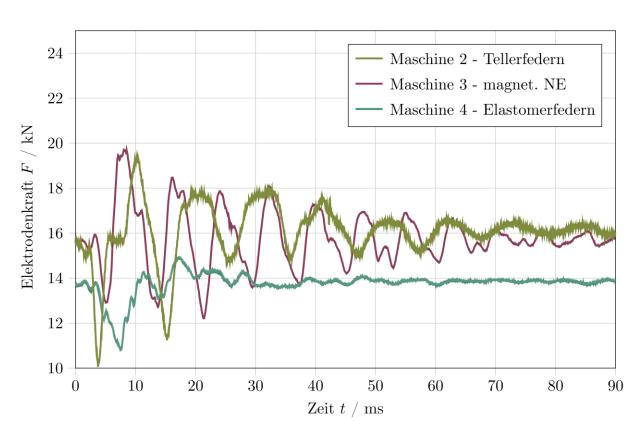


Abbildung 70: Vergleich Elektrodenkräfte von Maschine 2 bis 4 – E=2250Ws, F≈15kN

Im Elektrodenweg (Abbildung 71, Abbildung 118) ist erkennbar, dass Maschine 2 (TUD) eher jedoch weniger nachsetzt. Der Grund sind die deutlich kürzeren charakteristischen Zeiten des Stromverlaufs. Die Metallverdampfung findet schneller statt und weniger Wärme wird in die angrenzenden Bereiche abgeleitet, wodurch diese weniger weich werden und sich weniger stark verformen. Ein Zusammenhang zwischen dem Absinkweg der Elektroden und der Festigkeit der Verbindung ist hier nicht zu erkennen. Die Beschleunigungen der Maschinen 3 und 4 ist gleich, die geringeren Schwingungen der Elastomerfedern zeigt der Elektrodenweg ebenfalls.

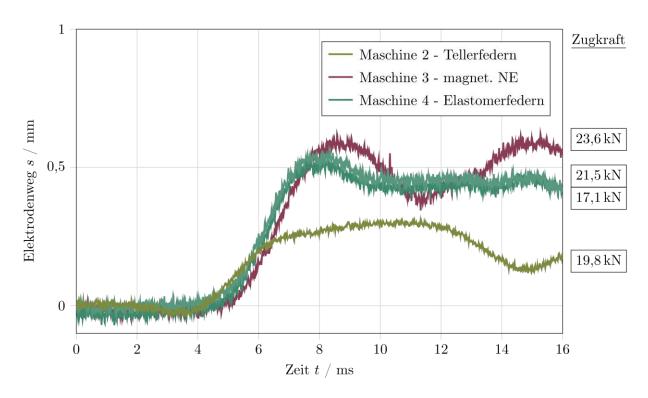


Abbildung 71: Vergleich Elektrodenwege von Maschine 2 bis 4 − E=2250Ws, F≈15kN

Der Vergleich der Versuche mit F≈19kN und 2250Ws zeigt die gleiche Ergebnisse (Abbildung 119, Abbildung 120, Abbildung 121, Abbildung 122, Abbildung 123).

7 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Zielsetzungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "" (IGF-Nr.: 18.456 BR, DVS-Nr.: 04.062) mit einem Bewilligungszeitraum vom 01.01.2016 – 31.12.2017 wurden grundlegende, physikalische Vorgänge in der Fügezone beim Kondensatorentladungsschweißen wissenschaftlich untersucht. Die Untersuchungen beinhalteten die Analyse des dynamischen Verhaltens der Fügezone beim Kraftaufbau und die dynamischen Vorgänge beim Schweißvorgang. Die erforschten Erkenntnisse zum Kraftaufbau können Anlagenherstellern bei der Wahl geeigneter Parameter bei der Vorschubgeschwindigkeit der Maschine helfen und Anwendern die Findung der Parameterauswahl für den Schweißprozess erleichtern.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden durch die festgelegten Schritte des Arbeitsplans erreicht.

Das erste Forschungsziel, die Ermittlung des Einflusses der kinetischen Energie wurde mit den in Abschnitt 6.1 dargestellten Mitteln erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass höhere Vorschubgeschwindigkeiten einen vereinheitlichenden Einfluss auf die Übergangswiderstände haben. Durch die Erhöhung der Auftreffgeschwindigkeit kann die Taktzeit eines Schweißhubes verringert werden. Außerdem können Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien bei höheren Auftreffgeschwindigkeiten ausgeglichen werden. Dies bietet den Vorteil, dass nach Chargenwechsel dennoch ähnliche Widerstandsverhältnisse vor dem Schweißen vorherrschen und dadurch das Ergebnis der Schweißung weniger stark variiert.

Das zweite Forschungsziel konnte durch grundlegende Untersuchungen an einer Einzelbuckelgeometrie erfüllt werden. Diese erfolgten experimentell und simulativ. Es zeigt sich, dass die Verbindungsbildung entgegen dem Stand der Technik nicht durch Aufschmelzen und Vermischen der Grundwerkstoffe in der Fügezone stattfindet, sondern dass sich durch die sehr hohen Erwärmungsgeschwindigkeiten Metalldampf bildet und dieser die Oberfläche aktiviert. Durch die Elektrodenkraft werden die aktivierten Oberflächen aneinandergepresst und es entsteht eine stoffschlüssige Verbindung. Die Verallgemeinerung der Erkenntnisse konnten durch Versuche an fertigungsrelevanten Bauteilen an den beschriebenen Versuchsanlagen und zusätzlich mit externen Versuchen bei einem Teilnehmer des PA erreicht werden. Es zeigen sich bei allen Versuchen die Merkmale der Metallverdampfung. Somit konnte das neue Prozessverständnis bestätigt werden.

Das dritte Forschungsziel konnte durch die gezielte Betrachtung der Nachsetzeinheit als Feder-Masse-System erfüllt werden. Durch theoretische Betrachtungen und experimentellen Versuchen einschließlich der Variation von Feder und Masse sowie die Verwendung einer magnetischen Nachsetzeinheit konnten die Vorgänge beim Nachsetzen ermittelt werden und daraus Empfehlungen abgeleitet werden.

8 Erläuterung zur Verwendung der Zuwendungen

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.

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

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

Die Erkenntnisse zum Erwärmungsverhalten beim KE-Schweißen stehen potentiellen Nutzern durch die Veröffentlichungen zur Verfügung. Aufgabe der Hersteller ist es, die Erkenntnisse in der Maschinenentwicklung zu übertragen.

Mit den im Projekt erarbeiteten Kenntnissen können die Vorteile der KE-Technik gegenüber der MF-Invertertechnik dargelegt werden und zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

10 Bisherige Veröffentlichungen zu den Forschungsergebnissen

10.1 Fachtagungen, Kolloquien, Fachbeiträge

Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe; Hertel, Martin; Ketzel, Max-Martin; Mathiszik, Christian; Rusch, Hans-Jürgen (2016): Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte. In: Widerstandsschweißen Sondertagung in Duisburg, Bd. 326. DVS Media GmbH. Düsseldorf: DVS Media GmbH (DVS Berichte, 326), S. 223–229.

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

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

Ketzel, Max-Martin; Stock, Nicolas; Hertel, Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe (2017): Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim KE-Schweißen. In: DVS Congress 2017. Große Schweißtechnische Tagung: DVS-Studentenkongress: Vorträge der Veranstaltungen in Düsseldorf vom 26. bis 29. September 2017, Bd. 337. DVS Congress; Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren; DVS-Studentenkongress; Schweißen & Schneiden; Weltleitmesse Schweißen & Schneiden. Düsseldorf: DVS Media GmbH (DVS Berichte, Band 337, CD-ROM), S. 126–131.

Stocks, Nicolas; Ketzel, Max-Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe (2017): Optimierungspotentiale beim Kondensatorentladungsschweißen durch maschinendynamische Auslegung der Nachsetzeinheit. In: DVS Congress 2017. Große Schweißtechnische Tagung: DVS-Studentenkongress: Vorträge der Veranstaltungen in Düsseldorf vom 26. bis 29. September 2017. DVS Congress; Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren; DVS-Studentenkongress; Schweißen & Schneiden; Weltleitmesse Schweißen & Schneiden. Düsseldorf: DVS Media GmbH (DVS Berichte, Band 337, CD-ROM), S. 73–77.

Ketzel, Max-Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe (2017): Auswirkungen des Kraftaufbaus beim Widerstandsschweißen auf den Kontaktwiderstand. In: 37. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS Media GmbH, S. 52–55.

10.2 Studien- und Abschlussarbeiten

Lauer, Sebastian: Buckelschweißen von Stahlteilen mittels Kondensatorentladungsschweißen. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik. Interdisziplinäre Projektarbeit. 2016-11-11

TÜRKE, Christoph: *Experimentelle Untersuchung der Vorgänge beim Kraftaufbau an Einzelbuckeln*. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik. Diplomarbeit. 2017-04-20

STOCKS, Nicolas Stefan: *Experimentelle Untersuchung der dynamischen Vorgänge beim Kondensatorentladungsschweißen an einer* Einzelbuckelgeometrie. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik. Projektarbeit zum Forschungspraktikum. 2017-03-13

Balke, Benjamin: *Maschinendynamische Untersuchungen einer KE-Maschine*: *Einfluss der Nachsetzeinheit auf das Schweißverhalten*. Dresden, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage. Projektarbeit zum Forschungspraktikum. 2018-04-20

11 Transfermaßnahmen

11.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
A: Informationen an die Unternehmen des PA	Fachliche Betreuung, Berücksichtigung der Belange der Praxis (KMU); gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	1. PA: 08.06.2016 2. PA: 06.12.2016 3. PA: 21.06.2017 4. PA: 13.12.2017
Technologietransferzen-	Forschungsarbeiten, ge- zielte Ansprache potenziell interessierter	
C: 4 geplante Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses sowie 1 Zwischenbericht / 2 Zwischenpräsentationen vor dem FA 4 jeweils 1. und 2. HJ ab 01/2016	sion von Zwischenergebnissen und Informationstransfer zu	PA: siehe Maßnahme A FA4: 26.4.2016, 02.11.2016, 04.05.2017 29.11.2017
D: Projektgespräche mit den PA-Mitgliedern an der Forschungseinrichtung oder bei den Unternehmen	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen	

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
E: Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.5 "Kondensatorentladungsschweißen" im Ausschuss für Technik des DVS	Arbeitsblätter und Nor-	12/2016, 06/2017,
Fachtagungen und Messen		standsschweißen 2016
		37. Assistentenseminar Fügetechnik 2016 [50]
		IIW Intermediate Meeting 2017
		Kolloquium KE-Schweißen Bad Salzuflen 2017
		3. conntronic Technologie- tag 2017
		IIW Annual Assembly 2017
		Große Schweißtechnische Tagung [51]
G: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	·	Fortlaufend während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
Lehre oder berufliche Wei- terbildung, Studien-	tion von zukünftigen Ingenieuren und Anwen-	

11.2 Geplante Transfermaßnahmen nach Laufzeitende

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
Technologietransferzen-	Forschungsarbeiten, ge-	Fortlaufend
Forschungsinformations- systeme der Hochschulen; ebenso auf den Universi- tätsseiten	•	
D: Projektgespräche mit	Transfer und Diskussion	Fortlaufend

D: Projektgespräche mit Transfer und Diskussion Fortlaufend den PA-Mitgliedern an den von Zwischenergebnissen Forschungseinrichtungen oder bei den Unternehmen

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
E: Präsentationen in der FA4 Arbeitsgruppe AG V 3.5 "Kondensatorentladungsschweißen" im Ausschuss für Technik des DVS	nisse in Merkblätter, Arbeitsblätter und Nor-	06/ 2018
F: Veröffentlichung auf Fachtagungen und Messen (z. B. Große Schweißtechnische Tagung, regionale Schweißtechnische Fachtagungen, Sondertagungen Schweißen)	national und regional, ge- winnen von	-
G: Beratung von Herstellern schweißtechnischer Ausrüstungen	·	Fortlaufend auf Anfrage
H: Wissenschaftliche Publikation in Fachzeitschriften	Information von potenziel- len Anwendern, vor allem KMU, national	
Weiterbildungsveranstal-	persönlichen und industri- ellen (KMU) Mitglieder des DVS, bereits schon im Ar-	Fortlaufend auf Anfrage

Maßnahme	Ziel	Zeitraum
J: Erstellen eines ausführlichen Abschlussberichtes und Veröffentlichung auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung	breitung der	2. Quartal 2018
K: Wissenschaftliche Publikation der Forschungsergebnisse im Rahmen einer Dissertation	breitung der	voraussichtlich 2019
L: Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre oder berufliche Weiterbildung, Studien-/Diplom- bzw. Bachelor-/Masterarbeiten	tion von zukünftigen Ingenieuren und Anwen- dern (z.B.	

11.3 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.

- [1] Merkblatt DVS 2905. Mai 2001. Buckelschweißen von Stählen
- [2] ACHATZ, S.: Kondensatorentladungsschweißen-Technologie und Einsatzmöglichkeiten auch unter extremen Randbedingungen, Bd. 213. In: Widerstandsschweissen: Neue Werkstoffe - Herausforderungen für das Widerstandsschweissen; Vorträge der gleichnamigen Sondertagung in Duisburg am 17. und 18. Mai 2001. Düsseldorf: Verlag für Schweissen und Verwandte Verfahren, DVS-Verlag, 2001 (DVS-Berichte, 213), S. 105–108
- [3] ACHATZ, S.; REVERCHON, G.: Kondensator-Entladungsschweißen Klassiker mit neuem Elan. In: Blech in Form (2006), Nr. 4, S. 70–73
- [4] Merkblatt DVS 2915-1. März 1979. Gütesicherung beim Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen - Grundlagen
- [5] EMEIS, Georg; ECKER, J.: Möglichkeiten der fertigungsbegleitenden Prozessüberwachung beim Kondensatorentladungsschweißen. In: Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (Hrsg.): *Treffpunkt Widerstandsschweißen*: *Vorträge der gleichnamigen Sondertagung in Duisburg am 05. und 06. Mai 2010; [21. DVS-Sondertagung Widerstandsschweissen 2010; Tagungsband]*. Duisburg: GSI SLV Duisburg, 2010
- [6] FLEMMIG, Daniel: Praktische Anwendung der KE-Schweißtechnik. In: DVS Media GmbH (Hrsg.): *Treffpunkt Widerstandsschweißen: Vorträge der gleichnamigen Sondertagung in Duisburg am 11. und 12. Juni 2013.* Düsseldorf: DVS Media, 2013
- [7] PETERSMANN, Claus: Kondensator-Impuls-Schweißen höher kohlenstoffhaltiger, randschichtgehärteter Einsatzstähle am Beispiel eines Pkw-Sitzbeschlages. Aachen, RWTH Aachen, Institut für Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Dissertation. 2004
- [8] Piersig, Wolfgang: Geschichtlicher Überblick zur Entwicklung der Metallbearbeitung : Beitrag zur Technikgeschichte (8). München : GRIN Verlag GmbH, 2010
- [9] CRAMER, Heidi: Widerstandsschweißen von höherkohlenstoffhaltigen Stählen mit sehr kurzer Wärmeeinbringung: AiF-Nr. 2037/00 DVS-Nr. 4.027. München, Oktober 2003
- [10] 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

[11] KRÜGER, U.: Kondensator-Entladungsschweißen für vielfältige Schweißaufgaben. In: *Jahrbuch Schweißtechnik 2013*. Düsseldorf: DVS Media, 2012 (Jahrbücher), S. 200–211

- [12] Deutsche Norm DIN 1910-100:2008-02. Februar 2008. *Schweißen und verwandte Prozesse Begriffe Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzung zu DIN EN 14610:2005*
- [13] Merkblatt DVS 2911. April 2016. Kondensatorentladungsschweißen Grundlagen, Verfahren und Technik
- [14] Stocks, Nicolas Stefan: *Optimierung der Buckelgeometrie zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften beim Kondensatorentladungsschweißen*. Projektarbeit zum Fachpraktikum. Dresden, 30.04.2016
- [15] MATTHES, Klaus-Jürgen (Hrsg.); RICHTER, Erhardt (Hrsg.): Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen; mit 130 Tafeln. 4., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2009
- [16] FRITZ, A. Herbert; SCHULZE, Günter: *Fertigungstechnik*. Vierte, neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1998 (Springer-Lehrbuch)
- [17] Merkblatt DVS 2904. Mai 2010. Steuerungen und Leistungsteile für das Widerstandsschweißen
- [18] PFEIFER, Lorenz: Fachkunde des Widerstandsschweißens. Essen: Girardet, 1969
- [19] FRÜNGEL, Frank B.; KNÜTEL, Walter: Kurzzeitschweißen mit transformierter Kondensatorentladung. In: Schweißen und Schneiden 17 (1965), Nr. 9, S. 503–504
- [20] Dreyer, W.; Duderstadt, F.; Hömberg, D.: *Finite-Element-Simulation des Kondensa-tor-Impuls-Schweißens*. In: *Technische Mechanik* 19 (1999), Nr. 4, S. 331–340
- [21] DILTHEY, Ulrich: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1*: *Schweiß- und Schneid-technologien*. 3., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (VDI-Buch)
- [22] 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. 12., korrigierte Aufl. Wiebelsheim: AULA-Verl., 2006
- [23] HERING, Ekbert; MARTIN, Rolf; GUTEKUNST, Jürgen: *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer*. 2. Aufl. 2012. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012 (VDI-Buch)

[24] Holm, Ragnar: *Die technische Physik der elektrischen Kontakte*. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1941 (Technische Physik in Einzeldarstellungen 4)

- [25] KNOBLAUCH, Günter: *Steckverbinder*: *Systemkonzepte und Technologien*; *mit 47 Tabellen*. 2., neu bearb. Aufl. Renningen: expert-Verl., 2002 (Kontakt & Studium 558)
- [26] CONNTRONIC PROZESS- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK GMBH: *CD Schweißmaschine L Serie*. URL https://www.conntronic.com/ct-standardmaschinen Überprüfungsdatum 2018-03-13
- [27] *GLAMAtronic Schweiß- und Anlagentechnik GmbH*. URL http://www.glamatronic.de/Energiebereich25-160kjoule.php Überprüfungsdatum 2018-03-13
- [28] CLAUSERT, Horst; WIESEMANN, Gunther; HINRICHSEN, Volker; STENZEL, Jürgen: *Grundgebiete der elektrotechnik 1: Gleichstromnetze, Operationsverstärkerschaltungen, elektrische und magnetische Felder.* 10., überarb. Aufl., 2008
- [29] BÜTTNER, Wolf-Ewald: Grundlagen der Elektrotechnik: Band 1. 2., verb. Aufl., 2006
- [30] NIMAK GMBH: *magnetic DRIVE*. URL www.nimak.de. Aktualisierungsdatum: 2018-03-13
- [31] RUSCH, Hans-Jürgen: Neue Möglichkeiten der Prozessgestaltung beim KE-Schweißen. In: *Widerstandsschweißen: Vorträge der gleichnamigen 23. Sondertagung in Duisburg am 29. und 30. Juni 2016.* Als Manuskript gedruckt. Düsseldorf: DVS Media, 2016 (DVS-Berichte, 326), S. 201–210
- [32] Merkblatt DVS 2908. April 2006. *Messen beim Punkt-, Buckel- und Rollennaht-schweißen*
- [33] Brunst, Walter: *Das elektrische Widerstandsschweißen*. Heidelberg : Springer, 1952
- [34] RUSCH, Hans-Jürgen: *Gleichungen für Anstieg KE-Strom zum Zeitpunkt t=0*. E-Mail. 2016-07-14. KETZEL, Max-Martin (Adressat)
- [35] Ketzel, Max-Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe: *Eliminierung von Spannungs-messfehlern infolge hoher veränderlicher Ströme*. In: *Schweißen und Schneiden* 68 (2016), Nr. 11, S. 730–734
- [36] Ketzel, Max-Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe: *Elimination of voltage measu*ring errors as a consequence of high variable currents in resistance welding. In: Welding and Cutting 16 (2017), Nr. 3, S. 164–168

[37] Deutsche Norm DIN EN ISO 25178-602. Januar 2011. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde

- [38] PRECITEC GMBH. URL http://www.precitec.de/fileadmin/_processed_/csm_CHRocodileE_pz_de_1peak_20130426_03_f2967710f5.png – Überprüfungsdatum 2018-03-20
- [39] Deutsche Norm DIN EN ISO 10447:2007-09. Mai 2015. Widerstandsschweißen Prüfung von Schweißverbindungen Schäl- und Meißelprüfung von Widerstandspunkt- und Buckelschweißverbindungen
- [40] Deutsche Norm DIN EN ISO 14272:2016-11. November 2016. Widerstandsschweißen – Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen – Probenmaße und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunktund Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln
- [41] Merkblatt DVS/EFB 3480-1. Dezember 2007. Prüfung von Verbindungseigenschaften Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen
- [42] WAN, Zixuan; WANG, Hui-Ping; WANG, Min; CARLSON, Blair E.; SIGLER, David R.: Numerical simulation of resistance spot welding of Al to zinc-coated steel with improved representation of contact interactions. In: International Journal of Heat and Mass Transfer 101 (2016), S. 749–763
- [43] Pejko, Michal: *Fügbarkeitsbetrachtungen von Press-Presslöt-Verbindungen*. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2009. Dresden: TUDpress Verl. der Wiss, 2010 (Dresdner fügetechnische Berichte 19)
- [44] FISCHER, Ulrich: *Tabellenbuch Metall*. 44., neu bearb. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2008 (Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe)
- [45] Erbrecht, Rüdiger: Das große Tafelwerk: Ein Tabellen- und Formelwerk für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht bis zum Abitur; [Formelsammlung für die Sekundarstufe I und II; für das Abitur empfohlen]. 1. Aufl., 14. Dr. Berlin: Cornelsen Volk-und-Wissen-Verl., 2011
- [46] Ruge, Jürgen; Wohlfahrt, Helmut: *Technologie der Werkstoffe*: *Herstellung Verarbeitung Einsatz*. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007
- [47] Braunbek, Werner: Über die elektrische Leitfähigkeit komprimierter Metalldämpfe. In: Z. Physik (Zeitschrift für Physik) 97 (1935), 7-8, S. 482–495

[48] Ketzel, Max-Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe: Verbesserte Verbindungseigenschaften durch "Multi Capacitor Source". Poster. Bad Salzuflen, 28.03.2017

- [49]ZSCHETZSCHE, JÖRG; FÜSSEL, Uwe; HERTEL, Martin; KETZEL, Max-Martin; MATHISZIK, Christian; RUSCH, Hans-Jürgen: Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte, Bd. 326. In: *Widerstandsschweißen Sondertagung in Duisburg*. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2016 (DVS Berichte, 326), S. 223–229
- [50] Ketzel, Max-Martin; Zschetzsche, Jörg; Füssel, Uwe: Auswirkungen des Kraftaufbaus beim Widerstandsschweißen auf den Kontaktwiderstand. In: *37.*Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2017, S. 52–55
- [51] KETZEL, Max-Martin; STOCK, Nicolas; HERTEL, Martin; ZSCHETZSCHE, Jörg; FÜSSEL, Uwe: Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim KE-Schweißen, Bd. 337. In: DVS Congress 2017: Große Schweißtechnische Tagung: DVS-Studentenkongress: Vorträge der Veranstaltungen in Düsseldorf vom 26. bis 29. September 2017. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2017 (DVS Berichte, Band 337, CD-ROM), S. 126–131
- [52] LAUER; SEBASTIAN: Buckelschweißen von Stahlteilen mittels Kondensatorentladungsschweißen. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik. Interdisziplinäre Projektarbeit. 2016-11-11
- [53] TÜRKE, Christoph: Experimentelle Untersuchung der Vorgänge beim Kraftaufbau an Einzelbuckeln. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Fertigungstechnik. Diplomarbeit. 2017-04-20
- [54] Stocks, Nicolas Stefan: Experimentelle Untersuchung der dynamischen Vorgänge beim Kondensatorentladungsschweißen an einer Einzelbuckelgeometrie. Projektarbeit zum Forschungspraktikum. Dresden, 13.03.2017
- [55] Balke, Benjamin: *Maschinendynamische Untersuchungen einer KE-Maschine*: *Einflussder Nachsetzeinheit auf das Schweißverhalten*. Dresden, Technische Universität Dresden, Professur Fügetechnik und Montage. Projektarbeit zum Forschungspraktikum. 2018-04-20

13 **Anhang**

A.1 Dynamische Untersuchungen beim Kraftaufbau

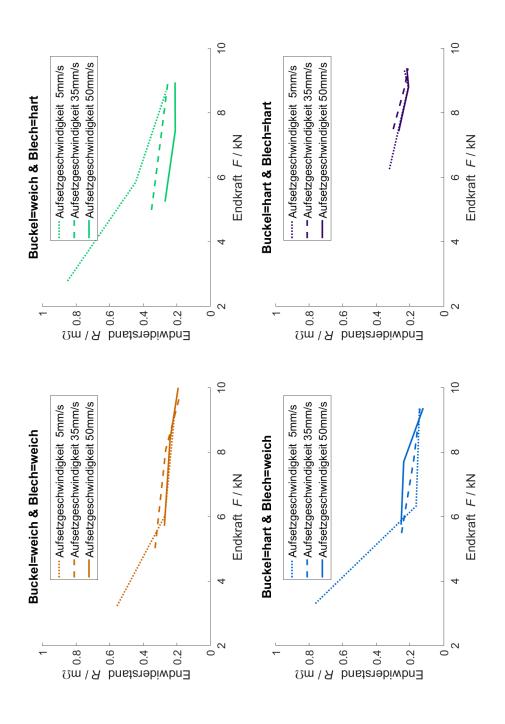


Abbildung 72: Endwiderstand über Elektrodenkraft in Abhängigkeit der Aufsetzgeschwindigkeit

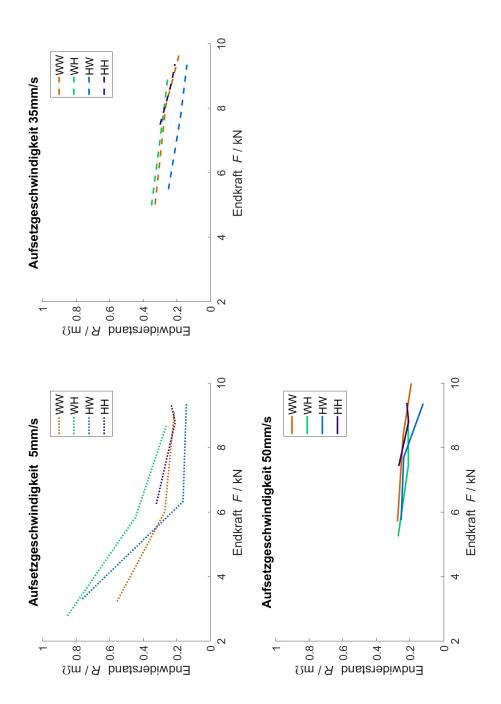


Abbildung 73: Endwiderstand über Elektrodenkraft in Abhängigkeit der Materialkombination

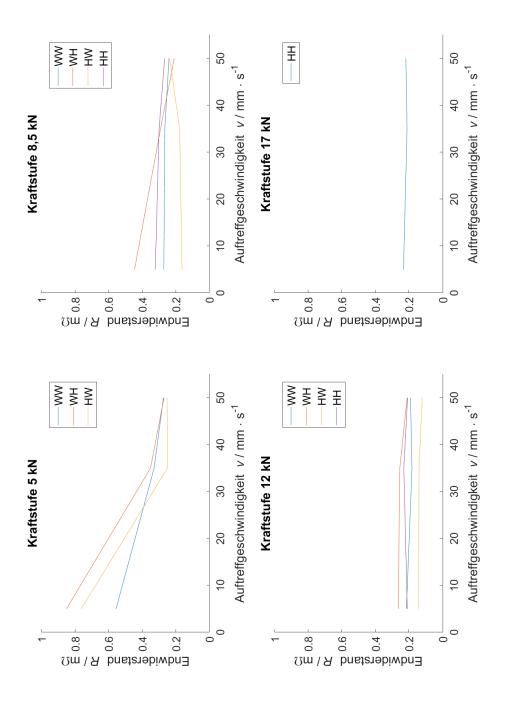


Abbildung 74: Endwiderstand über Auftreffgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Elektrodenkraft

A.2 Ergebnisse Verformungssimulation

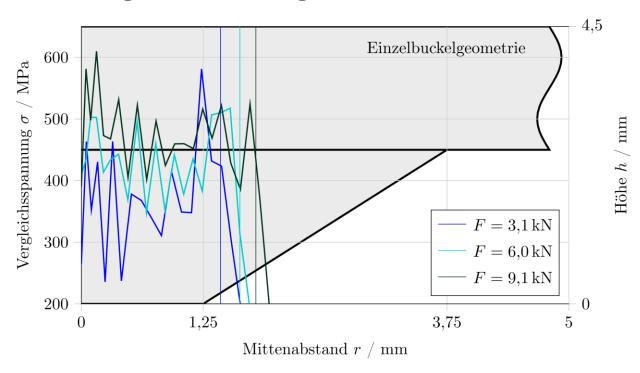


Abbildung 75: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen der Verformungssimulation - MK WH – EB im Halbschnitt, Berührungsende mit vertikaler Linie markiert

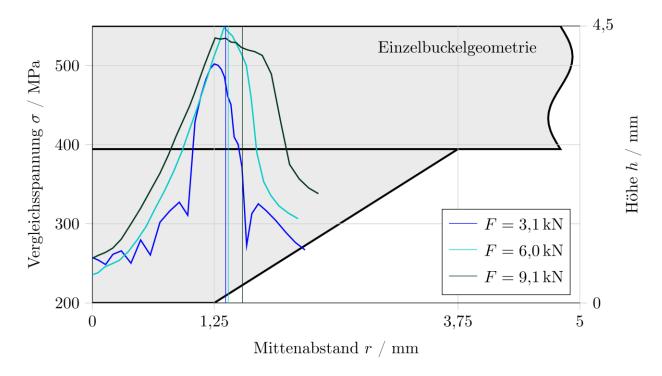


Abbildung 76: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen der Verformungssimulation – MK HW – EB im Halbschnitt, Berührungsende mit vertikaler Linie markiert

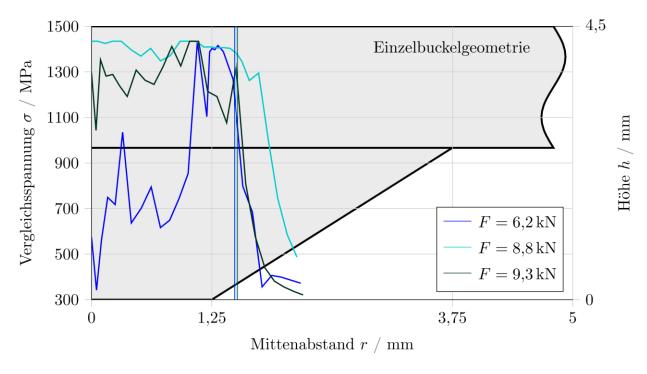


Abbildung 77: Vergleichsspannung in den Kontaktelementen der Verformungssimulation - MK HH – EB im Halbschnitt, Berührungsende mit vertikaler Linie markiert

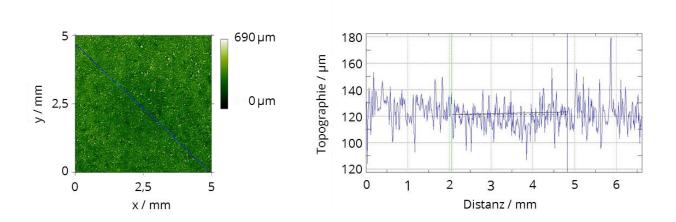


Abbildung 78: Chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK HH bei 9,3kN, Eindruck nicht messbar

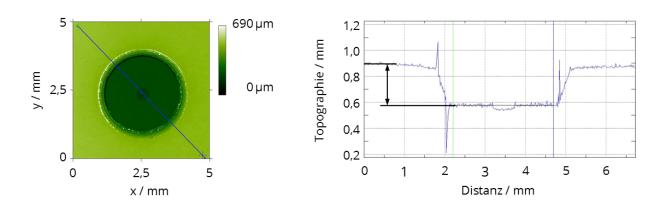


Abbildung 79: Chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK WW bei 9,1 kN, Eindruck ≈0,3 mm

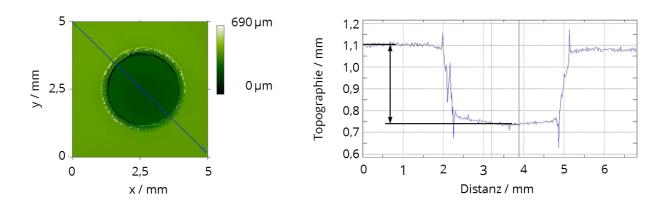


Abbildung 80: Chromatisch-konfokale Oberflächentopographie MK HW bei 9,1 kN, Eindruck \approx 0,35 mm

A.3 Ergebnisse Prozesssimulation

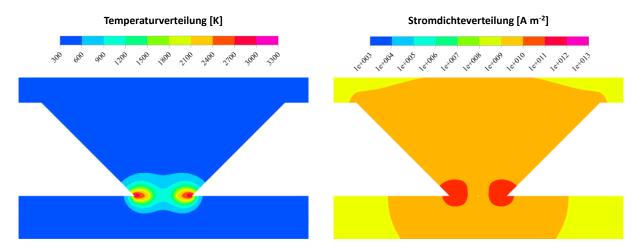


Abbildung 81: Berechnete Temperatur- und Stromdichteverteilung 0,4ms nach dem Start der Kondensatorentladung

A.4 Ergebnisse der dynamischen Schweißversuche

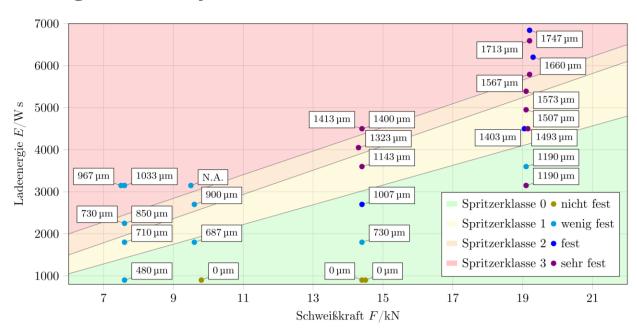


Abbildung 82: Schweißbereich mit Ringbreiten der Fügeverbindung der Schulterbuckelgeometrie, MK: WH

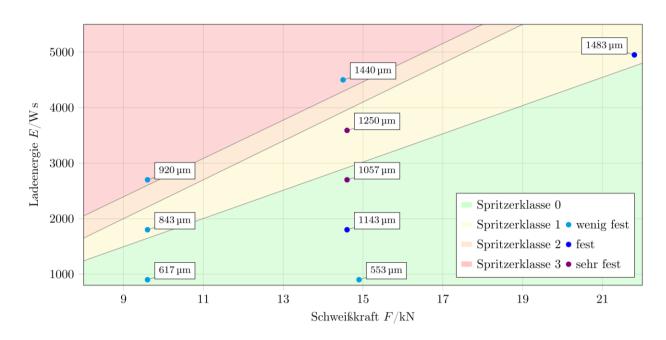


Abbildung 83: Schweißbereich mit Ringbreiten der Fügeverbindung der Schulterbuckelgeometrie, MK: HW

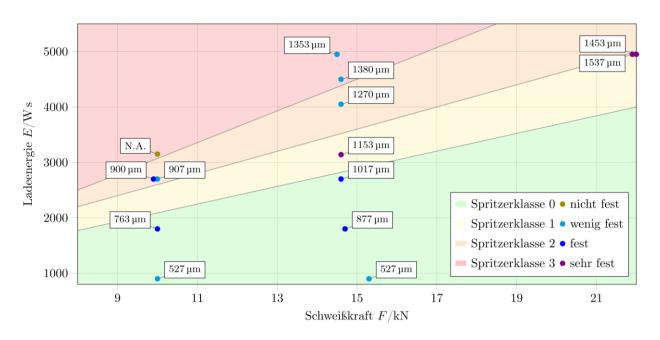


Abbildung 84: Schweißbereich mit Ringbreiten der Fügeverbindung der Schulterbuckelgeometrie, MK: HH

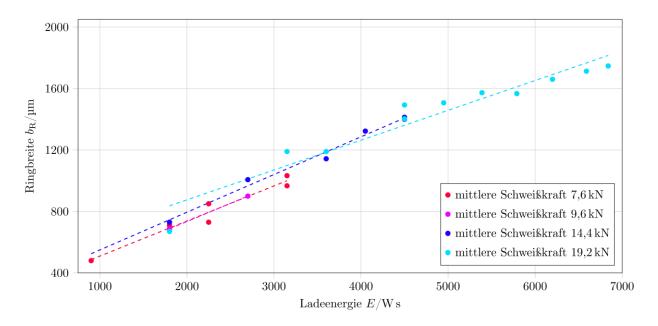


Abbildung 85: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: WH

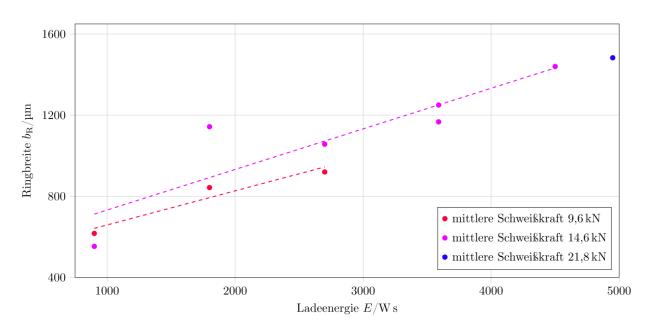


Abbildung 86: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: HW

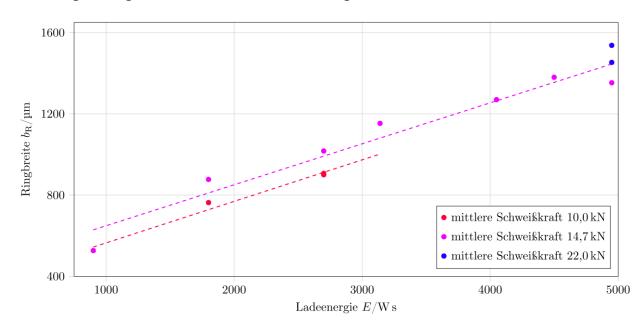


Abbildung 87: Ringbreitenwachstum durch Ladeenergie, MK: HH

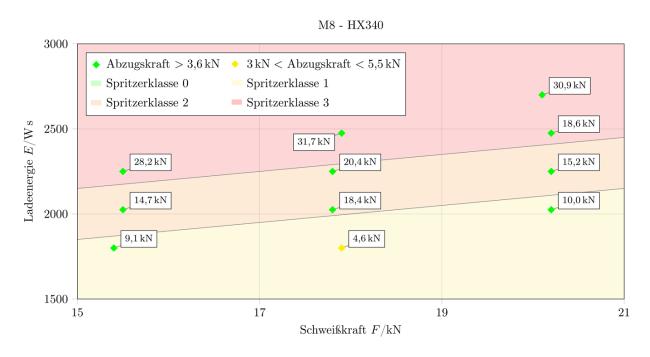


Abbildung 88: Schweißbereich M8-SBM auf HX340

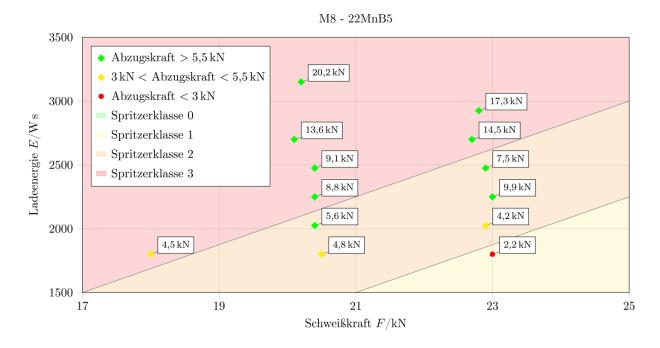


Abbildung 89: Schweißbereich M8-SBM auf 22MnB5

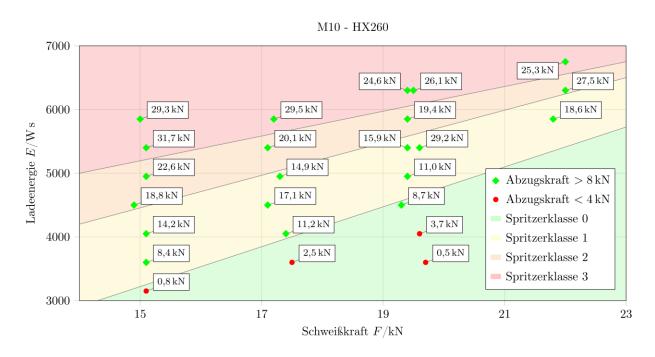


Abbildung 90: Schweißbereich M10-RBM auf HX260

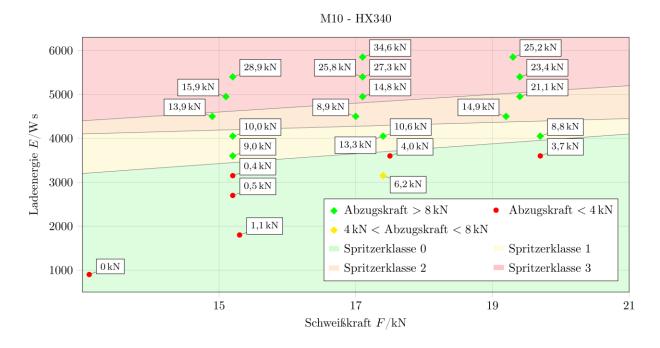


Abbildung 91: Schweißbereich M10-RBM auf HX340

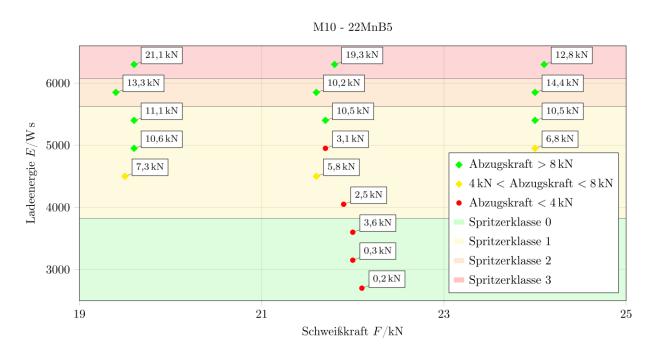


Abbildung 92: Schweißbereich M10-RBM auf 22MnB5

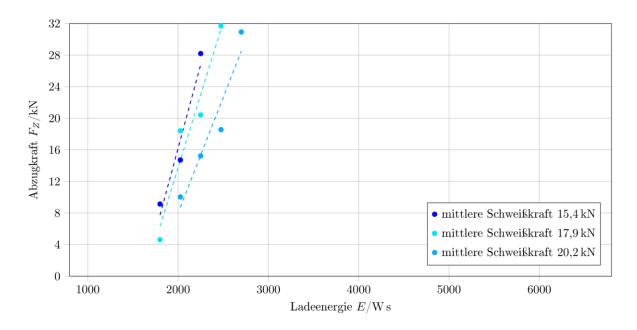


Abbildung 93: Wachstumskurve SBM-M8 auf HX340

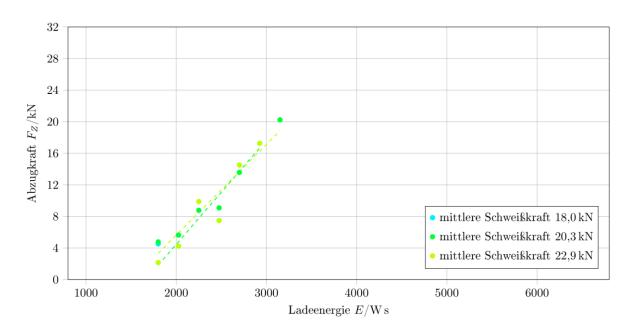


Abbildung 94: Wachstumskurve SBM-M8 auf 22MnB5

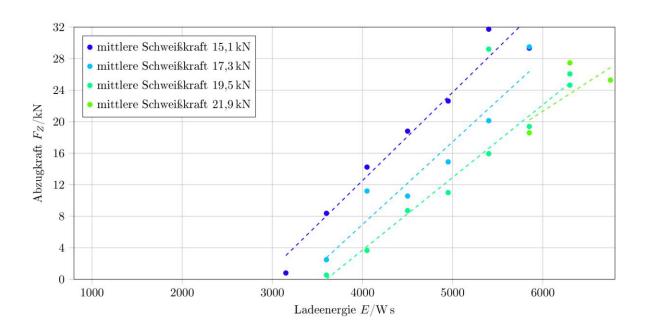


Abbildung 95: Wachstumskurve RBM-M10 auf HX260

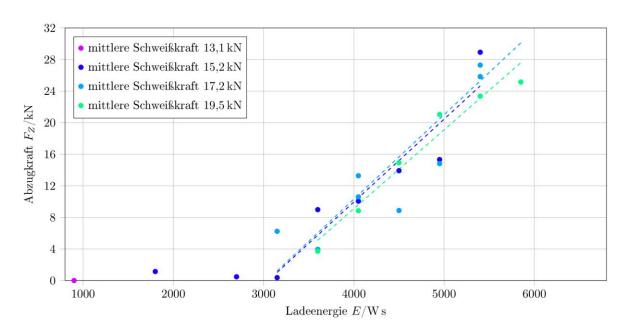


Abbildung 96: Wachstumskurve RBM-M10 auf HX340

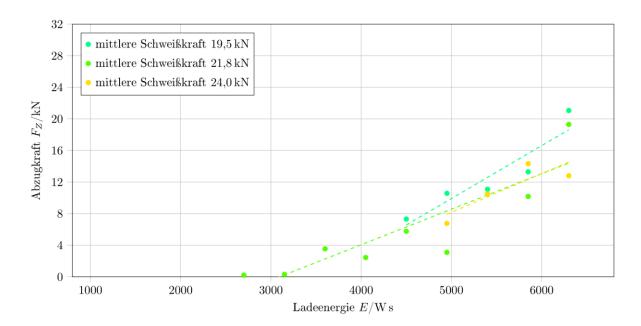


Abbildung 97: Wachstumskurve RBM-M10 auf 22MnB5

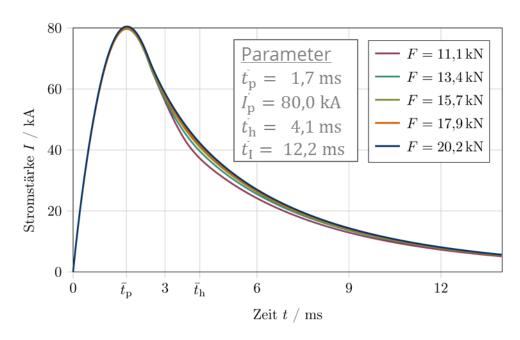


Abbildung 98: Schweißstrom über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 2250 Ws

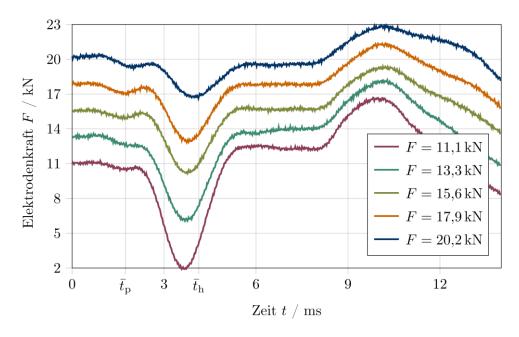


Abbildung 99: Elektrodenkraft über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 2250 Ws

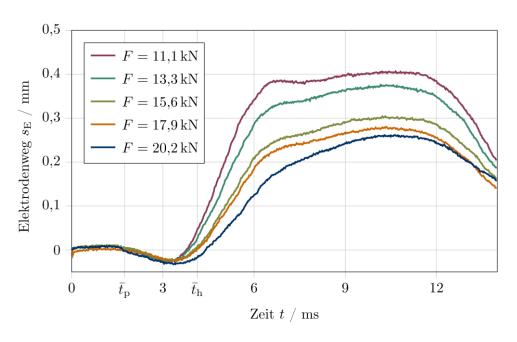


Abbildung 100: Elektrodenweg über Zeit – SBM-M8 auf HX260 mit Ladeenergie 2250Ws

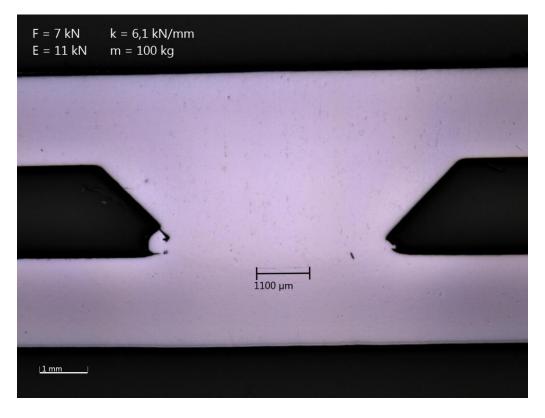


Abbildung 101: Querschliff EB ungeätzt - F=7kN, E=450Ws, 3 Tellerfedern: k=6,1kN/mm

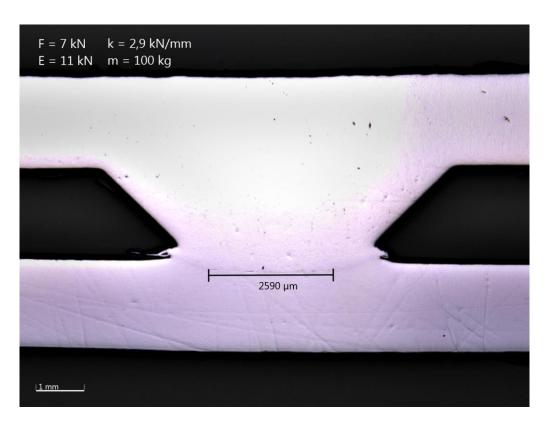


Abbildung 102: Querschliff EB ungeätzt - F=7kN, E=450Ws, 6 Tellerfedern: k=2,9kN/mm

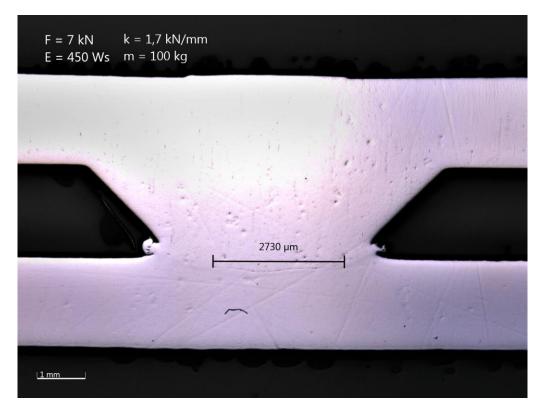


Abbildung 103: Querschliff EB ungeätzt - F=7kN, E=450Ws, 12 Tellerfedern: k=1,7kN/mm



Abbildung 104: Querschliff EB geätzt - F=7kN, E=450Ws, 3 Tellerfedern: k=6,1kN/mm

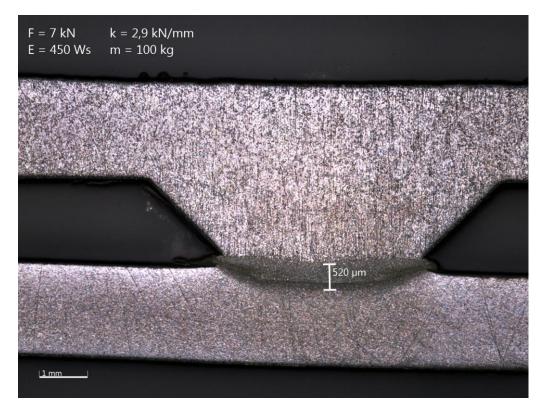


Abbildung 105: Querschliff EB geätzt - F=7kN, E=450Ws, 6 Tellerfedern: k=2,9kN/mm



Abbildung 106: Querschliff EB geätzt - F=7kN, E=450Ws, 12 Tellerfedern: k=1,7kN/mm



Abbildung 107: Nachsetzeinheit mit m=8kg

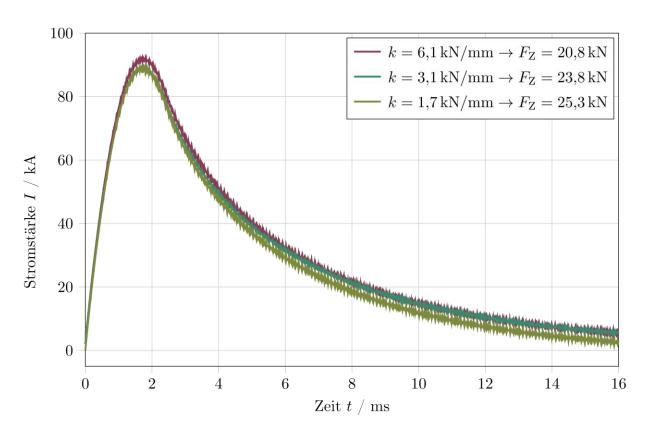


Abbildung 108: Schweißstrom bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg

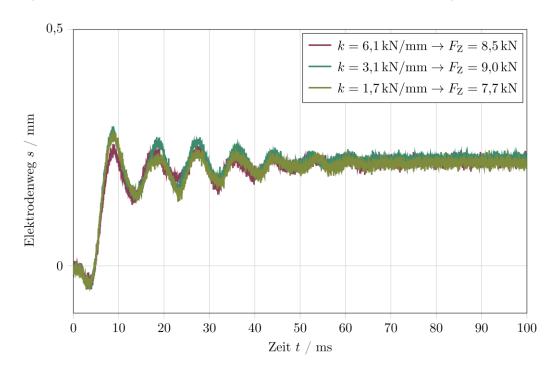


Abbildung 109: Elektrodenweg bei SBM-M8, F=14kN, E=2025Ws, m=100kg

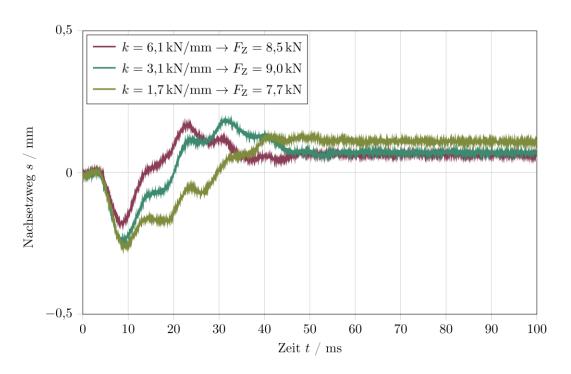


Abbildung 110: Nachsetzweg bei SBM-M8, F=14kN, E=2025Ws, m=100kg

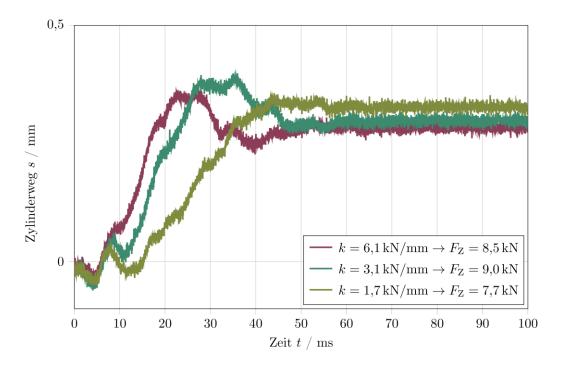


Abbildung 111: Zylinderweg bei SBM-M8, F=14kN, E=2025Ws, m=100kg

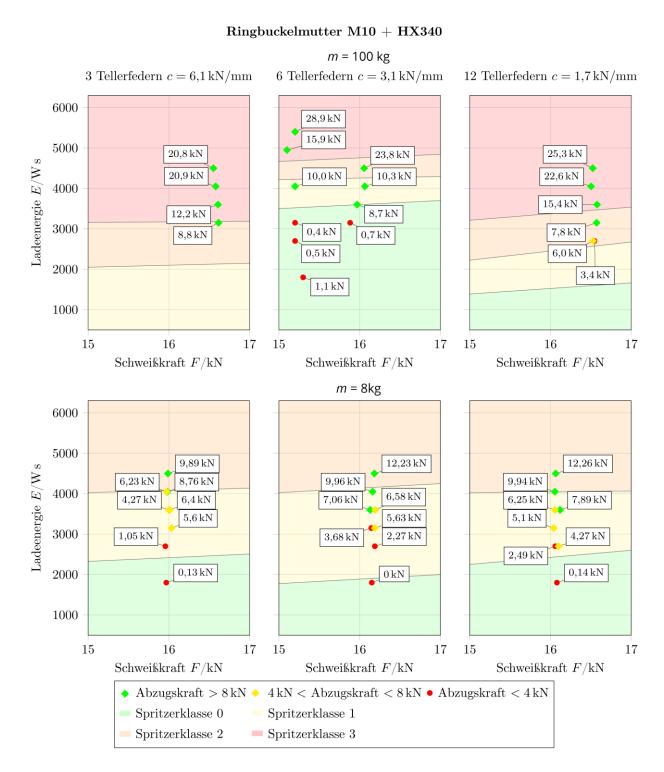


Abbildung 112: Vergleich der verschiedenen Schweißbereiche bei variierten NE – RBM-M10 auf HX340

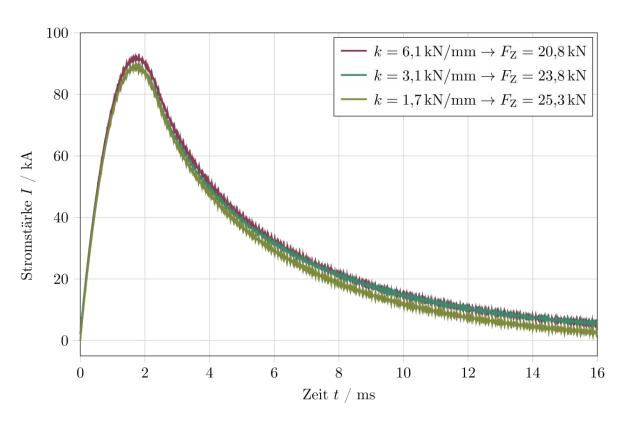


Abbildung 113: Schweißstrom bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg

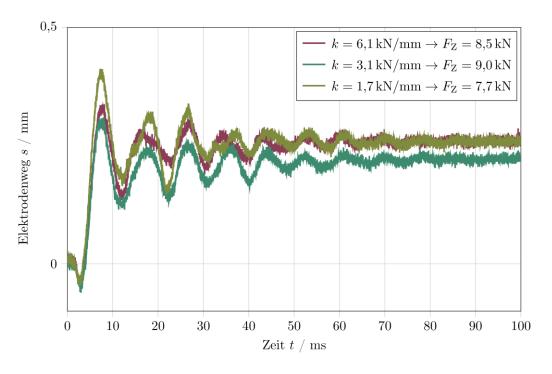


Abbildung 114: Elektrodenweg bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg

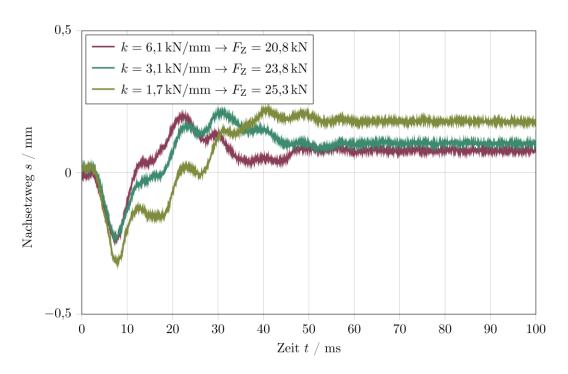


Abbildung 115: Nachsetzweg bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg

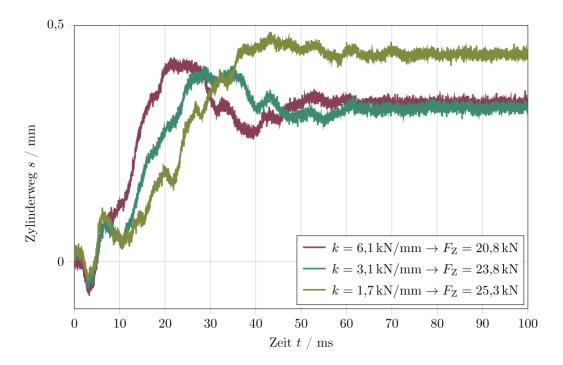


Abbildung 116: Zylinderweg bei RBM-M10, F=16,5kN, E=4500Ws, m=100kg

A.5 Ergebnisse der Verallgemeinerung

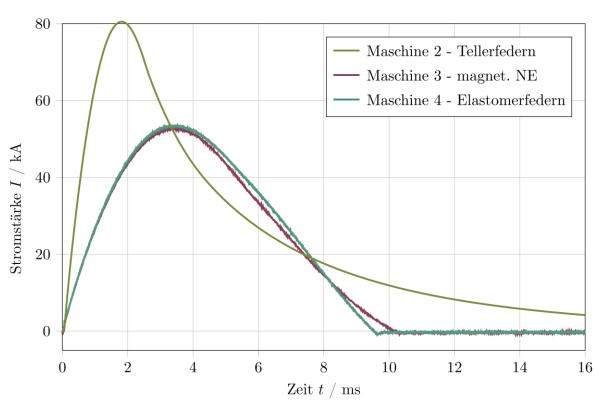


Abbildung 117: Vergleich Schweißströme von Maschine 2 bis 4 – 2250Ws, $F \approx 15 \, \text{kN}$

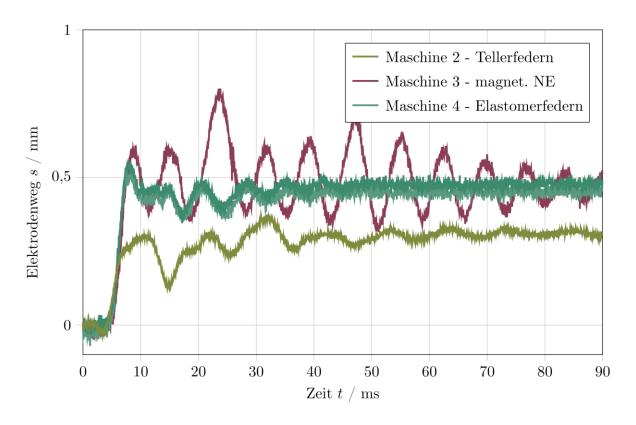


Abbildung 118: Vergleich Elektrodenwege von Maschine 2 bis 4 − *E*=2250Ws, *F*≈15kN − Darstellung über 90 Sekunden

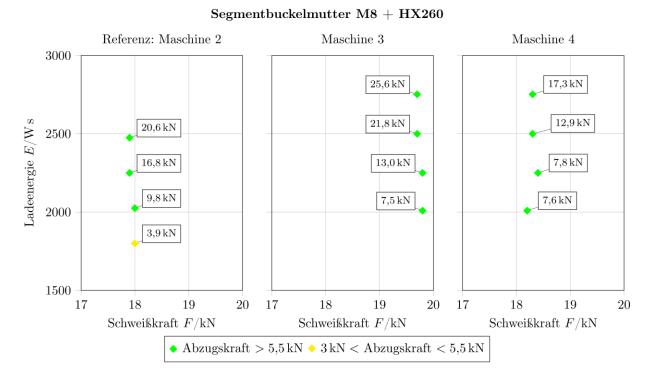


Abbildung 119: Vergleich 2 der Versuche bei NIMAK, SBM - HX260

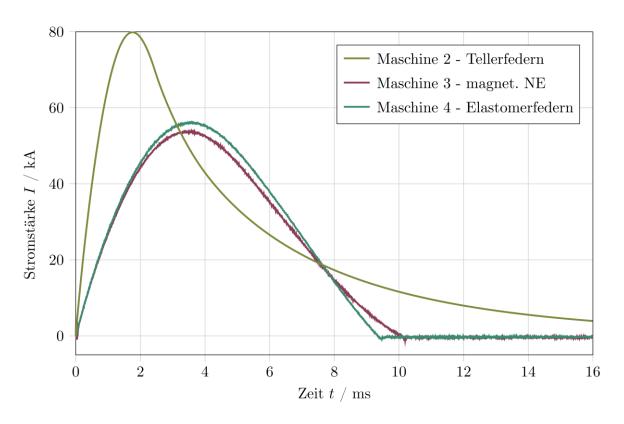


Abbildung 120: Vergleich Schweißströme von Maschine 2 bis 4 – 2250Ws, F≈19kN

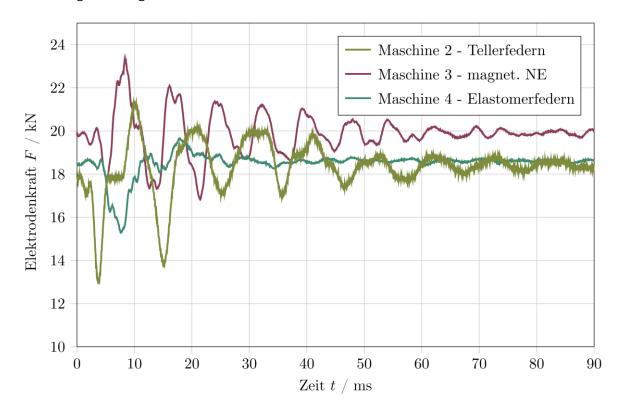


Abbildung 121: Vergleich Elektrodenkräfte von Maschine 2 bis 4 – E=2250Ws, F≈19kN

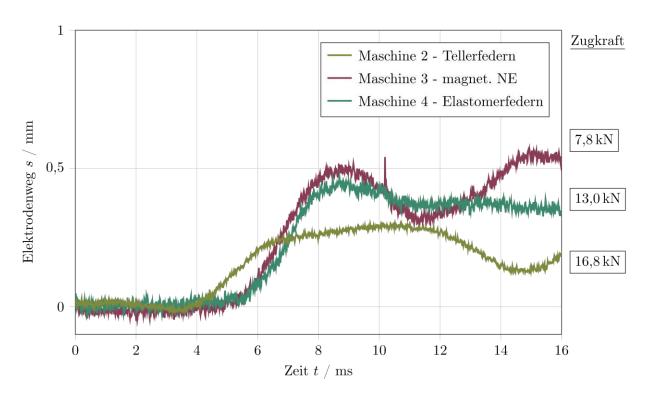


Abbildung 122: Vergleich Elektrodenwege von Maschine 2 bis 4 – E=2250Ws, F≈19kN

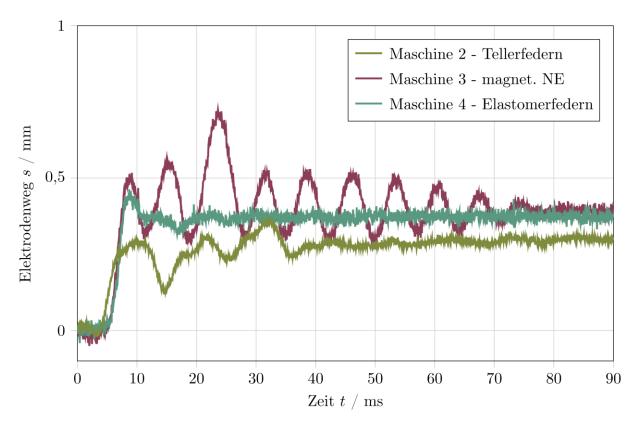


Abbildung 123: Vergleich Elektrodenwege von Maschine 2 bis 4 − *E*=2250Ws, *F*≈19kN − Darstellung über 90 Sekunden