

Auswirkungen elektrischer und mechanischer Einflussgrößen auf den Fügeprozess und die Verbindungsqualität beim KE-Mutterschweißen

F. Demmer, N. Stocks, Bad Salzuflen, J. Zschetzsche, U. Füssel, Dresden

Abstract

Das Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen) wird vorwiegend für das Buckelschweißen eingesetzt. Der Stoffschluss erfolgt durch Oberflächenaktivierung mittels kurzzeitiger Metallverdampfung. Unter Verwendung des pressgehärteten Werkstoffs 22MnB5+AS150 und Vierkant-M8-Schweißmuttern wird der Einfluss der elektrischen und der mechanischen Kennwerte von KE-Maschinen auf den Fügeprozess und die Verbindungsqualität eruiert. Um die Verbindungsqualität zu überprüfen und den Anforderungen der Praxis zu genügen, wird die Kopfzugkraft als Vergleichsgröße ermittelt. Zusätzlich werden Kriterien genannt, anhand derer Schweißungen unterschiedlicher Maschinen verglichen werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass der Fügeprozess maßgeblich durch den elektrischen Teil der KE-Maschine beeinflusst wird.

1 Kondensatorentladungsschweißen zum Fügen von Funktionselementen

Das Kondensatorentladungsschweißen (KE-Schweißen) zählt zu den ältesten Widerstandsschweißverfahren. In der Normung ist es trotz seiner stark abweichenden Charakteristik keiner eigenen Untergruppe zugeordnet. Vornehmlich wird das KE-Schweißen dem Buckelschweißen und teils dem Widerstands-Punktschweißen zugeordnet [1], [2]. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird das KE-Schweißen als Buckelschweißverfahren zum Mutterschweißen verwendet. Neben dem Mutterschweißen wird das KE-Schweißen für zahlreiche andere Aufgaben eingesetzt, u.a. zur sicheren Befestigung von Funktionselementen wie Blechhaltern oder Bolzen.

Die notwendige Energie in Verbindung mit sehr kurzen Stromanstiegszeiten (wenige Millisekunden) und hohen Stromstärken wird mittels Kondensatorentladung bereitgestellt [6]. Übliche Schweißzeiten liegen unter 20 Millisekunden [3]. Die kurze Stromflusszeit und die Verwendung von hohen Spitzenströmen (bis zu mehreren 100 kA) sorgen im Vergleich zu Mittelfrequenz- und AC-Schweißen für geringere Wärmeableitungen durch lokal begrenzte, sehr hohe Erwärmungsgeschwindigkeiten. Die buckelähnliche Kontur dient der Konzentration des Stromflusses an der Berührungsfläche [4], [5]. Das KE-Buckelschweißen wird als Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte (KShW) mit Metaldampfbildung charakterisiert. Bei den auftretenden Leistungsdichten oberhalb von 10^6 W/cm² tritt Metallverdampfung auf und inhibierende, native oxidische Grenzschichten werden entfernt. Beim Zusammenpressen der Fügepartner wird der Buckel lokal plastisch verformt, die aktivierten Oberflächen vereinen sich zur stoffschlüssigen Verbindung. Die Metallverdampfung beginnt am äußeren Rand der Fügestelle, da dort die höchsten Leistungsdichten vorherrschen. Infolge der einhergehenden Volumenexpansion wird der Metaldampf beschleunigt. Die Bewegung der Elektroden und der Bauteile drücken die Grenzschichten, Schmelze und teigiges Material in Form einer Wulst aus der Fügeebene heraus [7]–[10]. Umgeben von einer schmalen Wärmeeinflusszone verbinden sich die Fügepartner flächig [11]. Der KE-Mutterschweißprozess ist spritzerbehaftet. Zum einen entstehen Mikrospritzer, welche aus der Metallverdampfung und der damit einhergehenden Oberflächenaktivierung hervorgehen. Zum anderen entstehen bei Energieüberschuss und Überhitzung der Fügezone Makrospritzer. [3] Üblich ist es, den KE-Schweißprozess mit einem Puls auszuführen. Innerhalb dieses charakteristischen Pulses erfolgt sowohl die Aktivierung der Oberflächen als auch das Einbringen der notwendigen Schweißenergie. Aufgrund der konstruktiven Begebenheiten der Maschine ist die Beeinflussung des Schweißstroms lediglich durch das Verändern der Ladeenergie der einen Kondensatorbank und die Variation der Anpresskraft möglich. Die Wärme kann während des Aktivierens und des Einbringens der Schweißenergie nicht unabhängig voneinander gesteuert werden. Daraus resultieren entweder eine zu geringe Aktivierung der Oberflächen oder eine Überhitzung der Fügezone mit Materialauswurf als Makrospritzer. Das eine führt zu Bindefehlern, das andere dazu, dass das Gewinde der Funktionselemente in Mitleidenschaft gezogen wird und Nacharbeit zwingend notwendig ist [7], [11].

Das Mehrpulsverfahren mit Multi Capacitor Source (MCS) [2], [3], [7], [11] ist besonders für das Fügen von Funktionselementen auf höchstfesten Blechwerkstoffen geeignet. Das MCS ist ein technisches System, welches parallel verschaltete Kondensatoren mit unterschiedlichen Kapazitäten für den KE-Schweißprozess nutzt. Infolgedessen kann der Sekundärstromverlauf in mehrere Pulse aufgeteilt werden, die ohne Pause aneinandergereiht werden können [6], [12]. Auf der Grundlage des beschriebenen Prozessverständnisses zum KShW können zum Beispiel Initialpulse zur Oberflächenaktivierung und -konditionierung anforderungsgerecht mit thermisch gekoppelten Stütz- und Presspulsen zur Einbringung der notwendigen Fügeenergie zu einer Kombipulsfolge vereint werden. Voraussetzung für die bessere Verbindungsbildung ist die Oberflächenkonditionierung, wie beispielsweise bei Werkstoffen mit AlSi-Beschichtungen. Untersuchungen zeigen, dass der Initialpuls die Oberflächenbeschichtung im Bereich der Buckelaufstandsfläche weitestgehend entfernt. Dementsprechend kann der Einfluss der Beschichtung auf die Schweißleistung deutlich reduziert werden [13].

2 Versuchsrandbedingungen

Die Untersuchungen wurden mit zwei Gestellbauformen durchgeführt: eine Kondensatorentladungsschweißanlage mit C-Gestell und ein Portalrahmen. Beide Anlagen der Fa. Kapkon GmbH weisen eine maximale Ladespannung von 1300 V auf. Aus der Begrenzung der Ladespannung auf 1300 V ergeben sich im Vergleich zu den üblichen 3200 V mehrere Vorteile. Dazu zählen höhere Spitzenströme und kürzere Stromanstiegszeiten bei identischer Ladeenergie sowie geringere Anforderungen an die Qualifikation des elektrotechnischen Fachpersonals, da Gleichspannungen bis 1500 V zur Niederspannung

zählen. Der Fügeprozess läuft dynamischer ab, weshalb dem Charakter des KShW mehr entsprochen wird. [14] Zusätzlich sind beide Versuchsanlagen mit einem MCS-System ausgestattet. Die elektrischen Betriebsverhalten der Anlagen wurden entsprechend [6] ermittelt. Der Kraftaufbau erfolgt jeweils servo-elektrisch, das Nachsetzen über Tellerfedern als Federsäule. Die technischen Daten sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Technische Daten der Versuchsmaschinen

Maschine	Kapazität /mF	Übersetzungsverhältnis Schweißtransformator	Maschinenwiderstand /mΩ	Maschineninduktivität /μH	Nachsetzeinheit und -masse
C-Gestell	A 10,69 B 5,23 G 1,48 H 0,67	20	86	240	V1: $c = 5,6$ kN/mm; $m = 48$ kg V2: $c = 3,3$ kN/mm; $m = 48$ kg
	Portalrahmen	A 11,83 B 6,42 G 1,6 H 0,78	20	54	126
		30	102	298	

Die Prozessdokumentation erfolgt über die Schweißsteuerung PrimusKE mit einer Abtastrate von 20 kHz. Für die Messung der Stromstärke wird sekundärseitig am Stromband ein Rogowskigürtel pro Schweißtransformator verwendet. Die Spannungsmessung erfolgt an den Polplatten und wird nach [15] korrigiert.

Als Fügeelemente werden Vierkant-DIN 928 – M8 – St-Schweißmuttern verwendet. Der Blechwerkstoff ist aus 1,9 mm starkem, borlegiertem, pressgehärteten Vergütungsstahl 22MnB5+AS150. Bei 930 °C verweilen die Bauteile 6 Minuten im Rollenherdofen. Dargestellt ist das Blech mit zugehöriger Mutter in Abbildung 1.



Abbildung 1: Blech aus 22MnB5+AS150 (markiert, mit Schweißmutter DIN 928 – M8 – St und Kegelstift)

Die Verbindungsqualität wird, wie in der Praxis üblich, anhand der Kopfzugkraft bewertet. Für die Versuche steht eine kalibrierte Zugprüfmaschine DARTO PM50 mit einer Kraft von maximal 50 kN zur Verfügung. Die Messdaten werden mittels integriertem Programm aufgezeichnet und als Kraft-Weg-Verlauf ausgegeben. Für die Ermittlung von Kopfzugkräften liegt keine normativ-einheitliche Regelung vor [3]. Der verwendete Versuchsaufbau orientiert sich an DVS Merkblatt 3480-1 [16] (vgl. Abbildung 2). Der Ablauf und die Vorgaben orientieren sich an [3]. Die Schweißmutter wird über eine Schraube und eine Hülse mittels Druckkraft vom Blechbauteil getrennt. Die Differenz des Eckenmaßes e_{Mutter} und des Innendurchmessers d_{Innen} der Hülse beträgt im Versuchsaufbau 3 mm, Abbildung 2. Da es sich um eine quasistatische Festigkeitsprüfung handelt, erfolgt die Kräfteinleitung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min bis zum Bruch [3].

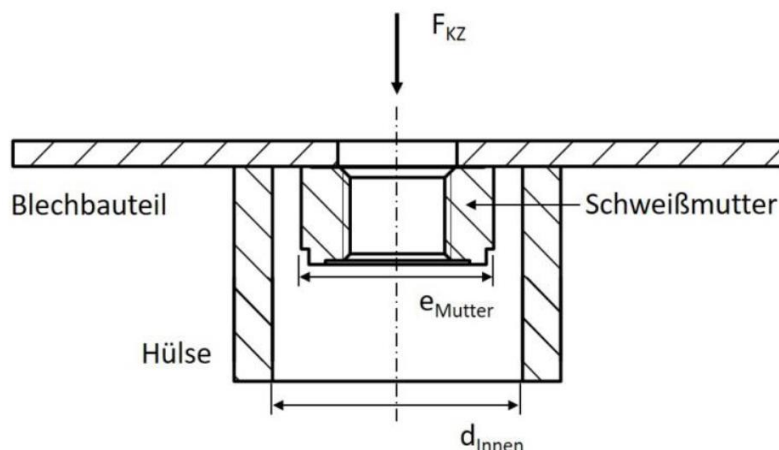


Abbildung 2: Schematische Anordnung einer Ausdrückvorrichtung zur Überprüfung der Kopfzugkraft [3]

Um den Einfluss der in Abbildung 3 genannten elektrischen und mechanischen Maschinengrund- und Einstellgrößen auf die Fügequalität zu ermitteln, werden diese gezielt variiert. Die Maschinengrundgrößen hängen von der KE-Maschine ab, sind bauartbedingt und nicht variabel einstellbar. Jedoch kann der Einfluss der elektrischen Maschinengrundgrößen durch die Einstellungsmöglichkeiten am MCS-System und die Veränderung des Schweißtransformatorübersetzungsverhältnisses untersucht werden. Der Einfluss der mechanischen Maschinengrundgrößen wird bspw. durch eine versteifende Konstruktion am C-Gestell in Form einer Säulenführung oder die Variation der Nachsetzeinheit durch Anpassung des Federpakets untersucht. Die Einstellgrößen können beliebig im vom Hersteller vorgesehenen Rahmen verändert werden.

Elektrische Einheit

- **Maschinengrundgrößen**
 - Kapazität der Kondensatorbank C
 - Maschinenwiderstand R_{Ma}
 - Maschineninduktivität L_{Ma}
 - Schweißtransformatorübersetzungsverhältnis \ddot{u}
- **Einstellgrößen**
 - Ladespannung U_0
 - Mehrkondensatortechnik MCS
 - Zündverzögerung Z_V

Mechanische Einheit

- **Maschinengrundgrößen**
 - Massen, Federn, Dämpfer
 - Kräfteinheit
 - Nachsetzverhalten
- **Einstellgrößen**
 - Anpresskraft F

Abbildung 3: Variations- und Einstellmöglichkeiten KE-Schweißanlage entsprechend [1], [6], [17]

3 Versuchsplanung und -vorbereitung

Die Versuche sind als ceteris-paribus-Untersuchung durchzuführen. Aus diesem Grund werden entsprechend Abbildung 3 einzelne Parameter verändert und jeweils der Einfluss auf die Kopfzugkraft überprüft. Um die Prozessstabilität statistisch abzusichern, erfolgen die Untersuchungen mit einem Prüfumfang von jeweils sieben Proben [18]. Ausgewertet und dargestellt werden nur die Einstellmöglichkeiten, bei denen keine Spritzeranhaftungen im Gewinde auftreten. Da der Wirkungsgrad der Maschine unberücksichtigt bleibt, darf die Ladeenergie der Kondensatoren nicht als Bezugsgröße verwendet werden. Auf Grundlage von [6] erfolgt die Berechnung der spezifischen Fügeenergie ϵ_{50} , welche als Maß der Schweißstelle zugeführten Energie definiert ist. Diese bezieht sich auf einen angenommenen Widerstand von $50 \mu\Omega$. Unter Verwendung gleicher spezifischer Fügeenergien ϵ_{50} können die Schweißungen mit unterschiedlichen Maschinengrundgrößen und Einstellgrößen verglichen werden. Folglich wird eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Maschinen ermöglicht. Die entsprechende Versuchsplanung hinsichtlich der veränderten Größen ist Tabelle 2 zu entnehmen. Abbildung 4 zeigt die Versuchsanlagen.



Abbildung 4: Versuchsanlage C-Gestell PrimKoM18 MCS (links), Säulenführung Maschinenversteifung C-Gestell PrimKoM18 MCS (mittig) und Portalrahmen PrimKoM P18 MCS (rechts)

Tabelle 2: Maschinengrundgrößen und Einstellgrößen über die verschiedenen Versuche

	veränderte Größe	Übersetzungsverhältnis Schweißtransformator	Anpresskraft /kN	Initialpuls ϵ_{50} / (Ws/50 $\mu\Omega$)	Zündverzögerung /ms (% Stromabfall Spitzenstrom Initialpuls)	Presspuls ϵ_{50} / (Ws/50 $\mu\Omega$)	Nachsetzeinheit / (kN/mm)
elektrische Maschinengrund- und Einstellgröße	Kondensatorladespannung (C-Gestell)	$\ddot{u} = 20$	15	C.G 58	1,4 (80 %)	V1: C.A 265 V2: C.A 316 V3: C.A 356 V4: C.A 376	3,3
	Zündverzögerung MCS (C-Gestell) Variante 1	$\ddot{u} = 20$	12	C.G 58	V1: 1,4 (80 %) V2: 1,7 (72 %) V3: 2 (62 %) V4: 2,2 (60 %) V5: 2,8 (41 %) V6: 4,2 (30 %) V7: 15 (0 %)	C.A 265	3,3
	Zündverzögerung MCS (C-	$\ddot{u} = 20$	12	variabel, da gleicher Strom	V1: 1,4 (80 %) V2: 1,7 (73 %)	variabel, da gleicher Strom	3,3

	Gestell Variante 2			von 34,424 kA	V2: 2 (64 %) V3: 2,2 (62 %) V4: 2,8 (50 %) V5: 4,2 (32 %)	von 41,92 kA	
	Kapazität der Kondensatorbank (C-Gestell)	$\ddot{u} = 20$	12	C.G 58	1,4 (80 %)	gleiche ϵ_{50} : V1: C.A 265 V2: C.B 265	3,3
	Übersetzungsverhältnis, Maschinenwiderstand, -induktivität (C-Gestell)	V1: $\ddot{u} = 20$ V2: $\ddot{u} = 30$	12	C.G 58	V1: 1,4 (80 %) V2: 2 (80 %)	C.A 265	3,3
mechanische Maschinen- grund- und Einstellgröße	Anpresskraft (C-Gestell)	$\ddot{u} = 20$	V1: 10 V2: 12 V3: 15	C.G 58	1,4 (80 %)	C.A 265	3,3
	Versteifung des Systems	C-Gestell: $\ddot{u} = 20$ Portalrahmen: $\ddot{u} = 30$	12	C.G 58	1,4 (80 %)	C.A 265	C-Gestell: 5,6 Portalrahmen: 5,3
	Nachsetzverhalten (C-Gestell)	$\ddot{u} = 20$	12	C.G 58	1,4 (80 %)	C.A 265	V1: 5,6 V2: 3,3

3.1 Durchgeführte Schweißversuche und Ergebnisse

3.1.1 Elektrische Einflussgrößen - Einstellgrößen

Ladespannung/ Kondensatorenergie/ spezifische Fügeenergie ϵ_{50} :

Die Steigerung der Ladespannung führt zu einer Steigerung der Kondensatorladeenergie und resultiert dementsprechend sekundärseitig in einer Steigerung der spezifischen Fügeenergie ϵ_{50} . Dieser Zusammenhang ist Abbildung 5 zu entnehmen, welche linksseitig die spezifische Fügeenergien ϵ_{50} des Presspulses von 265 Ws/50 $\mu\Omega$ bis 376 Ws/50 $\mu\Omega$ und den jeweiligen Mittelwert der erzielten Kopfzugkraft zeigt. Anhand der Sekundärstromverläufe wird ersichtlich, dass die Stromanstiegszeit bis zum Erreichen des sekundärseitigen Spitzenstroms konstant bleibt. Folglich steigt die Stromanstiegsge-
schwindigkeit in Richtung höherer Energien als Quotient des sekundärseitigen Spitzenstroms und Stromanstiegszeit (vgl. Abbildung 5, rechts). Der schnellere Stromanstieg und die Steigerung der spezifischen Fügeenergie ϵ_{50} führen zu höheren Kopfzugkräften (vgl. Abbildung 5, links). So wird diese von durchschnittlich 8,12 kN auf 14,17 kN gesteigert. Zu beachten ist jedoch, dass die Steigerung mit einer Zunahme der Makrospritzer und des Elektrodenverschleißes einhergeht. Deshalb sind die Grenzen des Fügeprozesses zu beachten, sodass dieser stabil, reproduzierbar und mit abschätzbarem Elektrodenverschleiß abläuft.

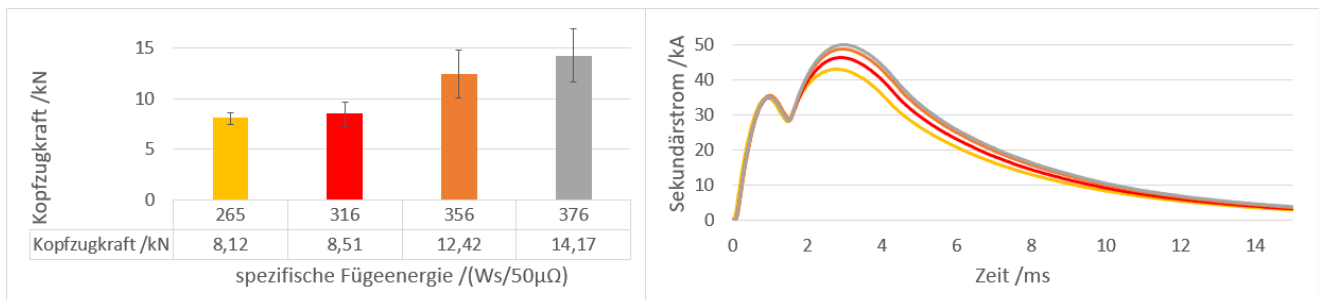


Abbildung 5: Einfluss Variation der Anfangsladespannung Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren, Anpresskraft 15 kN), Einfluss auf die Kopfzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

Zündverzögerung MCS:

Die Ermittlung des Einflusses der Zündverzögerung ist nicht trivial. Variante 1 (vgl. Abbildung 6) zeigt die Verwendung von gleichbleibenden spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} sowohl von Initialpuls als auch Presspuls. Um dies zu erreichen, muss mit größer werdender Zündverzögerung die Kondensatorladeenergie des Initialpulses verringert werden. Dem folgend wird der Spitzenstrom des Initialpulses verringert (vgl. Abbildung 6, rechts). Wie die Ergebnisse der erzielten Kopfzugkräfte zeigen, ist der Mittelwert bei einer Zündverzögerung von 1,4 ms mit 10,27 kN am höchsten. Mit größer werdender Zündverzögerung nimmt der Mittelwert der Kopfzugkraft auf 7,98 kN ab (bei 15 ms Zündverzögerung). Das Auftreten von Makrospritzern während des Fügeprozesses steigt ab Zündverzögerungen von 2,2 ms deutlich an.

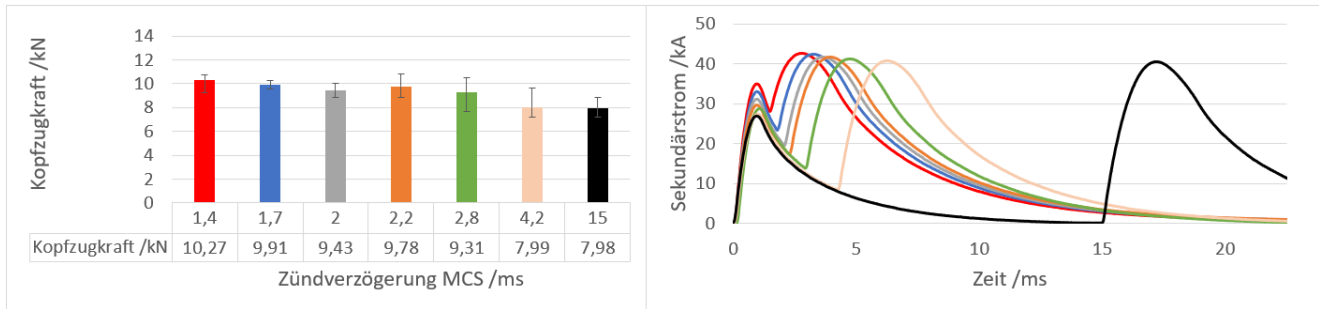


Abbildung 6: Einfluss Variation der Zündverzögerung zwischen Initialpuls und Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren, spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} , Anpresskraft 12 kN), Einfluss auf die Kopfzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

Variante 2 (vgl. Abbildung 7) zeigt die Variation der Zündverzögerung bei gleichbleibendem Spitzenstrom von sowohl Initialpuls als auch Presspuls. Dem folgend steigt die spezifische Fügeenergie ϵ_{50} des Initialpulses an. Um mit dem Presspuls gleichbleibende spezifische Fügeenergien ϵ_{50} und Spitzenströme zu erreichen, wird die Kondensatorladeenergie entsprechend reduziert. Die Mittelwerte der Kopfzugkräfte zeigen, dass das Maximum von 10,27 kN bei einer Zündverzögerung von 1,4 ms erzielt wird. Kürzere Zündverzögerungen sind in der Versuchskonstellation ohne Löschen der Initialkapazität nicht möglich. Mit längerer Zündverzögerung nimmt der Mittelwert der Kopfzugkraft ab, das Auftreten von Makrospritzern während des Fügeprozesses steigt an. Das Schweißen mit einer Zündverzögerung von 15 ms ist nicht sinnvoll und aufgrund der starken Spritzerbildung nicht möglich.

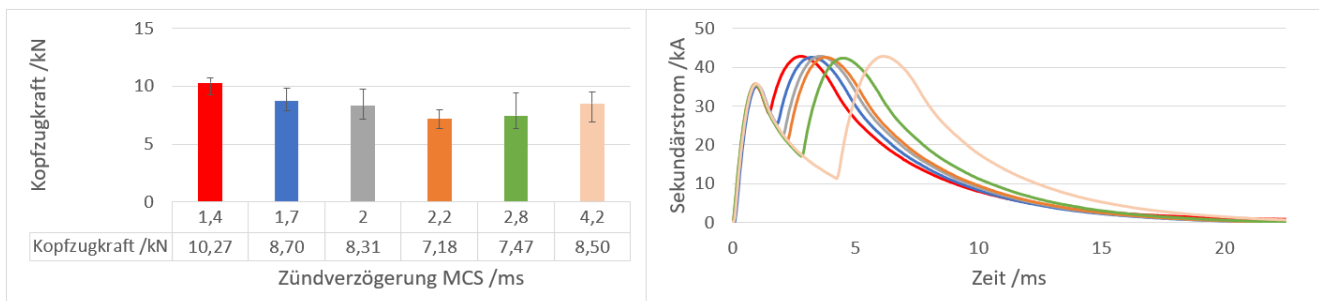


Abbildung 7: Einfluss Variation der Zündverzögerung zwischen Initialpuls und Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren, sekundärseitiger Spitzenströme, Anpresskraft 12 kN), Einfluss auf die Kopfzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

3.1.2 Elektrische Einflussgrößen - Maschinengrundgrößen

Kapazität der Kondensatorbank:

Kondensatoren mit kleineren Kapazitäten für den Presspuls ergeben bei gleichen spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} höhere sekundärseitige Spitzenströme, die in kürzerer Stromanstiegszeit erreicht werden (vgl. Abbildung 8, rechts). Dies zeigt die Verwendung des kleineren Kondensators G.B im Vergleich zum Kondensator G.A. Der schnellere Stromanstieg bei gleicher spezifischer Fügeenergie ϵ_{50} bewirkt eine Steigerung der durchschnittlichen Kopfzugkraft von 10,27 kN auf 15,14 kN (vgl. Abbildung 8). Zu beachten ist jedoch, dass der Fügeprozess mit kleinerer Kapazität und gleicher spezifischer Fügeenergie ϵ_{50} dynamischer wirkt. Neben mehr Makrospritzern während des Schweißens kann dies aus den Wegdaten von Oberelektrode und Nachsetzeinheit entnommen werden, deren Amplituden deutlich höher ausfallen. Weiter ist in Abbildung 8 die Auswirkung des kleineren Kondensators G.B mit geringerer spezifischer Fügeenergie ϵ_{50} bei gleichem Spitzenstrom wie der größere Kondensator G.A ersichtlich. Dieser ist als *G. B. Ip. 5,23 mF* eingezeichnet und erreicht eine durchschnittliche Kopfzugkraft von lediglich 5,97 kN. Es wird ersichtlich, dass sowohl der Spitzenstrom als auch die eingebrachte Energie maßgebend für die Kopfzugkraft sind. Als Begründung wird postuliert, dass die Zeit, in der die gleiche spezifische Fügeenergie ϵ_{50} in eine vergleichbare Verbindungsfläche eingebracht wird, geringer ist. Dem folgend läuft die Erwärmung schneller ab, was die Kopfzugkraft der Verbindung erhöht. Es gilt zu beachten, dass das mechanische System in der Lage sein sollte, der Dynamik des Schweißstromverlaufs zu folgen.

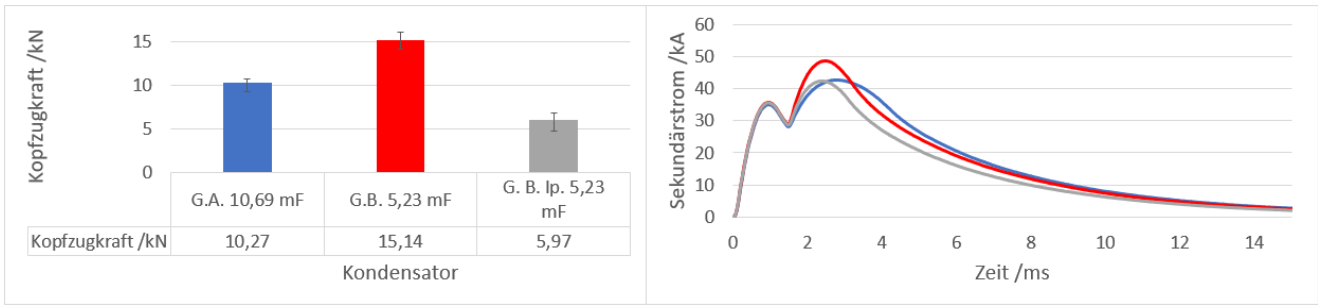


Abbildung 8: Einfluss Variation der Kapazität des Presspuls (Verwendung verschiedener Kondensatoren, Anpresskraft 12 kN), Einfluss auf die Kopfzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

Maschinenwiderstand, Maschineninduktivität, Schweißtransformatorübersetzungsverhältnis:

Entsprechend Tabelle 1 geht mit der Erhöhung des Übersetzungsverhältnisses des Schweißtransformators einer KE-Maschine eine Erhöhung sowohl des Maschinenwiderstands als auch der -induktivität einher. Dieses Zusammenspiel bewirkt bei der Verwendung gleicher Kapazitäten und identischer spezifischer Fügeenergien ϵ_{50} beider Pulse längere Stromanstiegszeiten bei geringeren Spitzenströmen (vgl. Abbildung 9, rechts). Für die Fügeaufgabe bedeutet dies eine Verminderung der erzielten Kopfzugkraft von durchschnittlich 10,27 kN ($\ddot{u} = 20$) auf 7,26 kN ($\ddot{u} = 30$) (vgl. Abbildung 9, links). Die Verwendung des kleineren Übersetzungsverhältnisses $\ddot{u} = 20$ geht während des Fügens mit mehr Makrospritzern im Vergleich zu $\ddot{u} = 30$ einher.

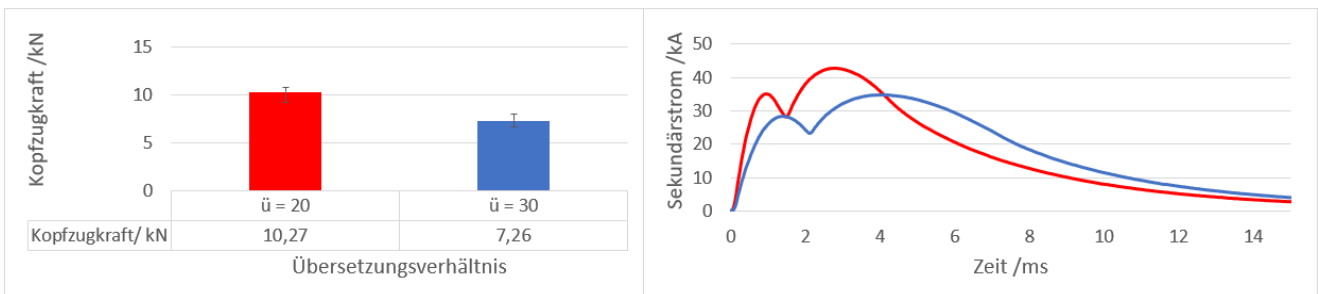


Abbildung 9: Einfluss Veränderung des Übersetzungsverhältnisses des Schweißtransformators bei gleichen spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} von sowohl Initialpuls als auch Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren, Anpresskraft 12 kN), Einfluss auf die Kopfzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

3.1.3 Mechanische Einflussgrößen - Einstellgrößen

Anpresskraft:

Die aufgezeichneten Sekundärstromverläufe bei Variation der Anpresskraft (vgl. Abbildung 10, rechts) stützen die Aussage aus [19], wonach die Anpresskraft einen zu vernachlässigenden Einfluss auf den Sekundärstromverlauf ausübt. Dem folgend verlaufen diese bei gleicher spezifischer Fügeenergie ϵ_{50} nahezu deckungsgleich. Als Begründung ist die geringfügige Veränderung des Sekundärstromverlaufs bei Variation des Widerstands zu nennen. Im Gegensatz zum Sekundärstromverlauf hat der Widerstand als Faktor im Jouleschen Gesetz (vgl. [20]) direkten Einfluss auf die Wärmemenge. Auch die Deformation des Buckels wird maßgebend durch die Anpresskraft beeinflusst [3]. Wie die Untersuchung zeigt, übt die Anpresskraft einen enormen Einfluss auf die erzielte Kopfzugkraft aus (vgl. Abbildung 10, links). Für die gewählte Fügeaufgabe geht mit einer Steigerung der Anpresskraft eine Verminderung der erzielten Kopfzugkraft von durchschnittlich 13,87 kN (10 kN Anpresskraft) zu 8,12 kN Kopfzugkraft (15 kN Anpresskraft) einher (vgl. Abbildung 10, links). Zu beachten gilt, dass eine Reduzierung der Anpresskraft mit einer Zunahme von Makrospritzern während des Schweißens einhergeht.

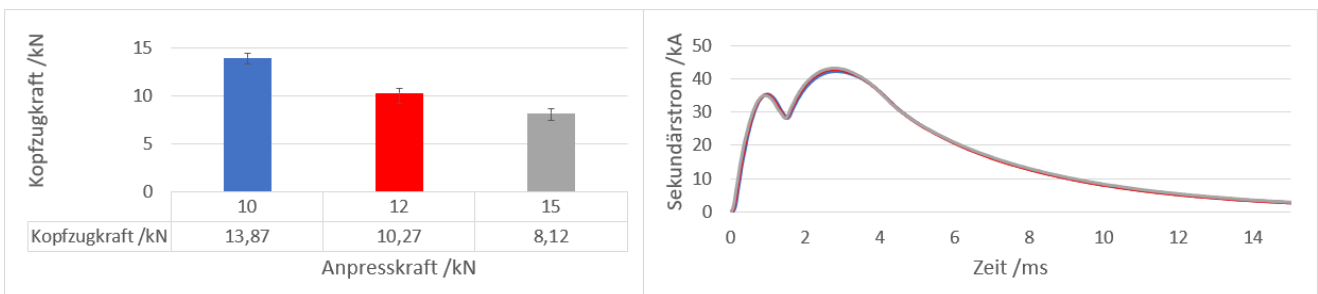


Abbildung 10: Einfluss Veränderung der Anpresskraft bei gleichen spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} von sowohl Initialpuls als auch Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren), Einfluss auf die Kopfzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

3.1.4 Mechanische Einflussgrößen – Maschinengrundgrößen

Versteifung des Systems:

Entsprechend der Erläuterung hinsichtlich der Anpresskraft verändert die Variation des mechanischen Systems nicht den Sekundärstromverlauf (vgl. Abbildung 11, rechts). Der Unterschied in den Verläufen von C-Gestell und Portalrahmen ist den unterschiedlichen elektrischen Leistungskreisen zuzuordnen. Entsprechend Tabelle 1 fallen die Maschinenwiderstände und -induktivitäten beim Portalrahmen $\ddot{u} = 30$ und C-Gestell $\ddot{u} = 20$ ähnlich aus, weshalb die Sekundärstromverläufe bei gleichen spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} ebenfalls ähnlich ausfallen. Die Kopfbzugkräfte liegen auf einem ähnlichen Niveau von 10 kN (vgl. Abbildung 11, links). Zu einer möglichen direkten Beeinflussung kann aufgrund der Lage der Mittelwerte im jeweiligen Schwankungsintervall der anderen keine genaue Aussage getroffen werden. Die Untersuchung zeigt, dass die Säulenführung bei gleichen Anpresskräften einen geringfügig höheren Widerstand in der Fügezone erzielt, was aus der gemessenen Spannung abgeleitet werden kann. Zusammenfassend lässt sich aus der Untersuchung schlussfolgern, dass die Versteifung im untersuchten Kraftbereich einen untergeordneten Einfluss auf die Kopfbzugkraft ausübt.

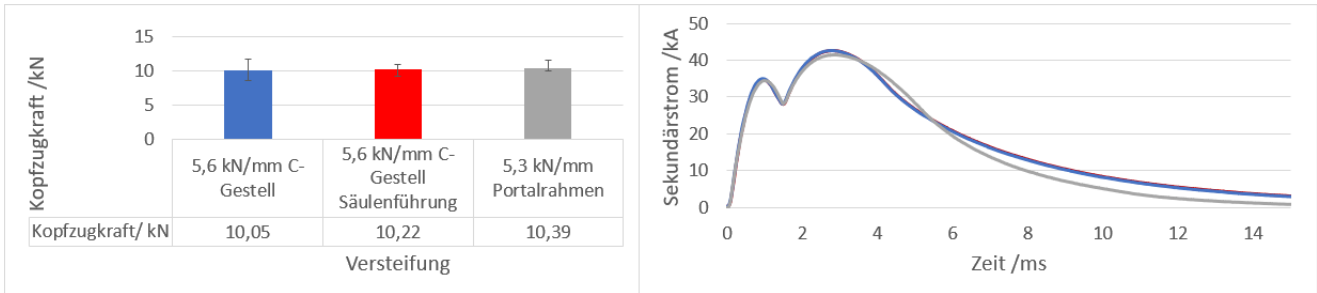


Abbildung 11: Einfluss Versteifung der Gestellbauform bei gleichen spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} sowohl von Initialpuls als auch Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren), Einfluss auf die Kopfbzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

Nachsetzverhalten:

Die Sekundärstromverläufe fallen bei Variation der Federsteifigkeit der Nachsetzeinheit identisch aus (vgl. Abbildung 12, rechts). Die Kopfbzugkräfte liegen auf einem ähnlichen Niveau von 10 kN (vgl. Abbildung 12, links). Zu einer möglichen direkten Beeinflussung kann aufgrund der Lage der Mittelwerte im jeweiligen Schwankungsintervall des anderen keine genaue Aussage getroffen werden. Wird jedoch von den Mittelwerten der erzielten Kopfbzugkräfte ausgegangen, so scheint die Verwendung von flacheren Federkennlinien die Kopfbzugkraft geringfügig zu steigern (vgl. [21]).

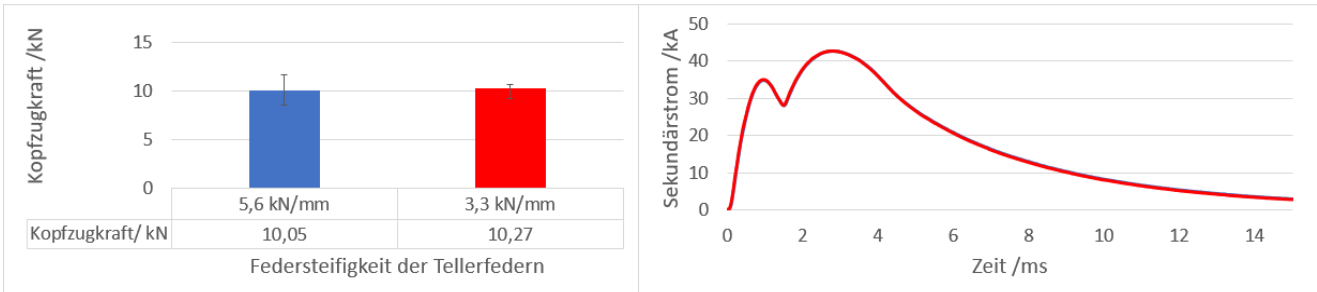


Abbildung 12: Einfluss Veränderung der Federsteifigkeit der Nachsetzeinheit bei gleichen spezifischen Fügeenergien ϵ_{50} sowohl von Initialpuls als auch Presspuls (Verwendung gleicher Kondensatoren), Einfluss auf die Kopfbzugkraft (links), Einfluss auf den Sekundärstromverlauf (rechts)

3.2 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung zeigt, dass der Fügeprozess und die Verbindungsqualität maßgeblich durch die Konstruktion des elektrischen Leistungskreises der KE-Maschine beeinflusst werden. Die Verwendung von 1300 V-Ladetechnik in Verbindung mit geringen Schweißkondensatorübersetzungsverhältnissen, die durch besonders kurze Stromanstiegszeiten bei hohen Spitzenströmen charakterisiert sind, erzielen höchste Fügequalitäten. Dies wird damit begründet, dass die Zeit, in der die gleiche spezifische Fügeenergie ϵ_{50} in eine vergleichbare Verbindungsfläche eingebracht wird, geringer ist. Dem folgend ist die Leistungsdichte in der Fügezone höher.

Das MCS-System unter Anwendung der Kombipulsfolge ist prädestiniert dazu, die Elektrik auf die Mechanik anzupassen. Die in der Fügezone eingebrachte Energie wird in einen Initialpuls zur Oberflächenaktivierung und -konditionierung sowie einen Presspuls zur Einbringung der notwendigen Fügeenergie aufgeteilt.

In zukünftigen Untersuchungen ist die Prozessbeschreibung um eine Größe zu erweitern, welche die Dynamik des Fügeprozesses beschreibt. Als Grundlage könnte die spezifische Energie ϵ_{50} herangezogen werden, die bezogen auf ein bestimmtes Zeitintervall in einer festgelegten Fläche unter definierter Anpresskraft umgesetzt wird.

4 Schrifttum

- [1] DVS Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.: *Merkblatt 2911, Kondensatorentladungsschweißen - Grundlagen, Verfahren und Technik*. Düsseldorf : DVS Media, 2016.
- [2] H.-J. Rusch und N. Stocks: *Vom Nutzen des Querdenkens*. In: 24. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen. Düsseldorf : DVS Media, 2019.
- [3] N. Stocks: *Kondensatorentladungsschweißen mit Mehrkondensatorsystemen (MCS) (Diplomarbeit)*. Technische Universität Dresden, 2017.
- [4] A. Henning, K. Krekeler und A. Meyer: *Untersuchungen zum Buckelschweißen von Stahlblechen unter Verwendung verschiedener Buckeltypen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 1966.
- [5] U. Krüger: *Kondensator-Entladungsschweißen für vielfältige Schweißaufgaben*. In: Jahrbuch Schweißtechnik 2013. Düsseldorf : DVS Media, 2012.
- [6] H.-J. Rusch: *Prozesstechnische Anforderungen und elektrotechnisches Design von Kondensatorentladungsmaschinen (Dissertation)*. Technische Universität Dresden, 2018.
- [7] N. Stocks, H. Rusch, M. Ketzler, J. Zschetzsche und U. Füssel: *Prozessführung durch Mehrpulsverfahren beim Fügen von höchstfesten, beschichteten Werkstoffen*. In: DVS Congress 2018. Düsseldorf : DVS Media, 2018.
- [8] M.-M. Ketzler, N. Stocks, M. Hertel, J. Vinz, J. Zschetzsche, und U. Füssel : *Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim KE-Schweißen*. In: DVS Berichte, Band 337, DVS Congress 2017. Düsseldorf : DVS Media, 2017.
- [9] J. Zschetzsche, U. Füssel, M. Hertel, M.-M. Ketzler, C. Mathiszik, und H.-J. Rusch: *Kurzzeitschweißen mit hoher Wärmestromdichte*. In: 23. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen. Düsseldorf : DVS Media, 2016.
- [10] N. Stocks, H.-J. Rusch, A. Maisuradze und U. Füssel: *Einfluss des Bindemechanismus auf die Verbindungsfestigkeit*. In: DVS Berichte, Band: 355, DVS Congress 2019. Düsseldorf : DVS Media, 2019.
- [11] H.-J. Rusch und N. Stocks: *KE-Mehr-Puls-Schweißen von Anschweißmuttern auf 22MnB5 + AS150*. Forschungsberichte des Fügetechnischen Versuchszentrums, Kapkon GmbH, Bad Salzuflen, 2018.
- [12] H.-J. Rusch: *Neue Möglichkeiten der Prozessgestaltung beim Widerstandsschweißen*. In: 23. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen. Düsseldorf: DVS Media, 2016.
- [13] N. Stocks, H.-J. Rusch: *Prozesssicherheit beim Fügen von Funktionselementen an pressgehärtete , höchstfeste Werkstoffe trotz unterschiedlicher Ofenverweilzeiten*. In 24. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen. Düsseldorf: DVS-Media, 2019.
- [14] H.-J. Rusch: *Mythen des Kondensatorentladungsschweißens WAHR oder FALSCH?* In: DVS Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.: *Schweißen und Schneiden 71, Heft 11*, 2019.
- [15] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche und U. Füssel: *Eliminierung von Spannungsmessfehlern infolge hoher veränderlicher Ströme*. In: DVS Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.: *Schweißen und Schneiden 68*. Düsseldorf : DVS Media, 2016.
- [16] DVS Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.: *Merkblatt 3480-1, Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen*. Düsseldorf : DVS Media, 2007.
- [17] F. Demmer: *Einfluss der Gestellbauform auf den Fügeprozess und die Verbindungsqualität beim Kondensatorentladungsschweißen mit Mehrkondensatorsystemen (KE-MCS) (Diplomarbeit)*. Technische Universität Dresden, 2020.
- [18] SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt München. *Bericht 5140/2007 Untersuchungen zum Anschweißen von Widerstandsschweißmuttern an Bleche aus höher- bis höchstfesten Werkstoffen*. SLV Münche - Niederlassung der GSI mbH, München, 2007.
- [19] H.-J. Rusch: *Parameter- und Prozessüberwachung von KE-Maschinen*. Forschungsbericht III/2019, Kapkon GmbH, Bad Salzuflen, 2019.
- [20] U. Dilthey: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien*, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [21] M.-M. Ketzler, J. Zschetzsche und U. Füssel: *Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektroden*. Dresden : AIF (IGF-Nr.: 18.987 B), 2018.