

Kritische Buckelschweißungen

Dr. Hans-Jürgen Rusch und Nicolas Stocks

Eine der häufigsten Anwendungen des Buckelschweißens ist das Schweißen von Funktionselementen, auch häufig als Mutternschweißen bezeichnet. Bei der Beurteilung der Schweißergebnisse bleiben oftmals die Bedingungen, unter denen diese zustande gekommen sind, unbeachtet. Besonders bei kritischen Buckelschweißungen sind aber unbedingt die Voraussetzungen für den Schweißvorgang, aber auch die Art und Weise der Prüfung in die Beurteilung einzubeziehen.

Inhalt

1	Indikatoren einer kritischen Buckelschweißung	1
2	Beispiel kritische Schweißaufgabe	2
3	Versuchsbedingungen.....	3
4	Schweißen der realen Bauteile	4
5	Verfrühte Abrisse einzelner Buckel.....	5
6	Schweißen mit Portalmaschine	7
7	Literatur	9
	Anhang	10

1 Indikatoren einer kritischen Buckelschweißung

Eine Buckelschweißung ist als kritisch einzuschätzen, wenn entsprechende Bedingungen gegeben sind:

1. Die Schweißung erfolgt in unmittelbarer Nähe zu einer Konstruktionskante des Trägerbauteils und/oder das Trägerbauteil besitzt eine ungleichmäßige Oberflächenkontur.
2. Bei Rundmuttern mit Segmentbuckeln ergibt sich keine Möglichkeit, die Mutter lageorientiert einzulegen und somit die Buckel immer in einer identischen Position auszurichten. In Verbindung mit dem Kriterium Nr. 1. ergeben sich somit (in der Regel) von Schweißung zu Schweißung veränderte Bedingungen.
3. Die Geometrie des geschweißten Bauteils verhindert das normgerechte Prüfen. Insbesondere konstruktiv bedingte, von der Senkrechten abweichende Zug-/Druckbelastungen bei der Kopfzugprüfung beeinträchtigen das Prüfergebnis nicht unwesentlich. Werden zudem Rundmuttern verschweißt, lassen sich die erzielten Resultate der Kopfzugprüfung kaum über eine Drehmomentprüfung verifizieren.
4. (Durch vorangehende Bearbeitungsschritte) werden die Löcher, auf die Muttern zu schweißen sind, deformiert und weichen von der Kreisform ab. Oftmals werden diese Deformationen durch große Toleranzen nicht selten toleriert. Da die aufzuschweißenden Muttern aber enge Toleranzen besitzen, besteht immer die Gefahr von exzentrischem Aufschweißen und von partiellen Randschweißungen.
5. Besitzt die Mutter auch noch einen Spritzerschutzring, ergeben sich zusätzlich Gefahren durch unkontrollierte Nebenschlüsse. Besonders die Probleme lt. 4. begünstigen Nebenschlüsse mit unregelmäßigen Stromableitfähigkeiten.

Die Auswirkungen dieser negativen Bedingungen sollen im Folgenden an einem Beispiel beschrieben werden, das alle fünf Indikatoren in sich vereint.

2 Beispiel kritische Schweißaufgabe

Verschweißt wird eine M8-Rundmutter mit drei Segmentbuckeln und einem Ring zum Spritzerschutz lt. Zeichnung im Bild 1.

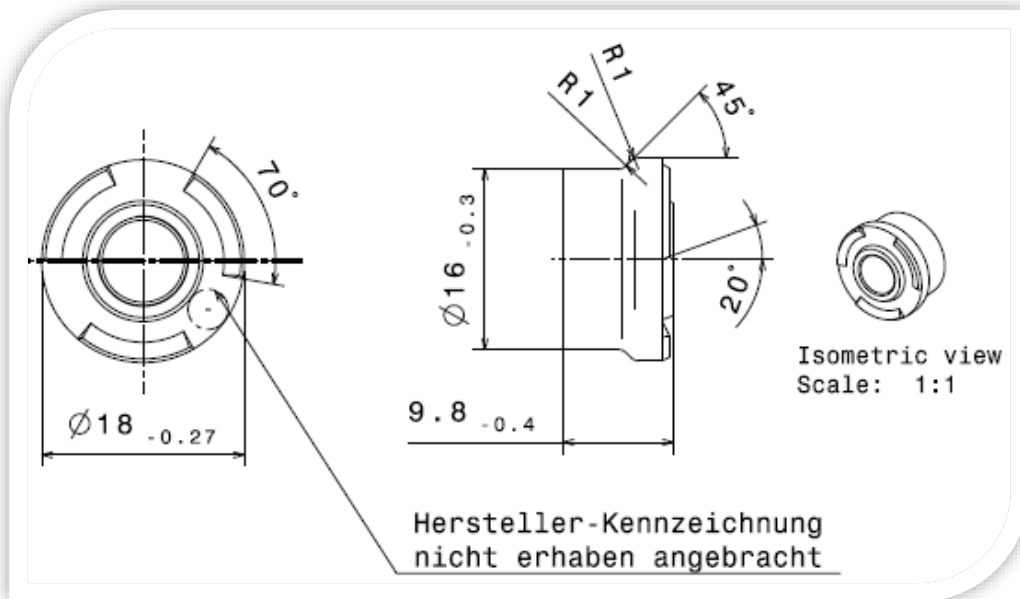


Bild 1: Auszug aus der Zeichnung der geschweißten Mutter.

Die Mutter wird auf die Lasche einer Baugruppe aus hochfestem Stahl S690 in unmittelbarer Nähe einer Biegekante aufgeschweißt, wie Bild 2 zeigt. Nur durch den Einsatz spezieller Elektroden lässt sich die Schweißung realisieren. In der Serienfertigung lässt sich die Ausrichtung der Buckel zur Biegekante nicht kontrollieren. Einige Stichversuche haben gezeigt, dass Schweißungen mit einem parallelen Buckel zur Biegekante bessere Festigkeitswerte ergeben, als Schweißungen mit einer Buckellücke in Richtung der Biegekante.



Bild 2: In der Beispielschweißaufgabe wird die Mutter unmittelbar neben einer Biegekante geschweißt.

Da es sich um eine Rundmutter handelt, ist die Qualität der Schweißung durch einen Kopfzugversuch nachzuweisen, weil Drehmomentprüfungen nur mit hohem Aufwand durchführbar sind. Als Mindestkopfzugkraft wird vom Anwender des Bauteils der Wert von $F_{KZmin} = 5,5$ kN gefordert. Der Hersteller, der die Mutter in Serie durchführt, geht davon aus, wenn bei durchgeführten Kopfzugprüfungen die Ergebnisse nicht unter den Grenzwert $F_{KZGrenz} = 10,0$ kN absinken, der Mindestwert F_{KZmin} bei keiner

Schweißung unterschritten wird.

Für die Prüfung wird in den dargestellten Versuchen ein besonders dünnwandiger Niederhalter (gehärtet, Wandstärke 1,4 mm) eingesetzt, der beim Drücken die Mutter aufnimmt, um mit der Beeinträchtigung durch die Biegekante überhaupt eine annähernd senkrechte Kräfteinbringung zu gewährleisten.

Das Loch, auf dem die Mutter aufgesetzt wird, besitzt eine ovale Form mit den Durchmessern von rund 11,2 mm und 10,8 mm, womit die Toleranz von $-0/+0,5$ mm bei 10,8 mm formal eingehalten wird. Bei einem Durchmesser des Spritzerschuttrings von 10,6 ... 10,7 mm sind so sporadische Nebenschlüsse unausweichlich.

3 Versuchsbedingungen

Geschweißt wurde mit einer Mehrkondensator-Maschine mit C-Gestell (vgl. im Anhang Bild A1), die vier Kondensatoren (C.A = 11,4 mF, C.B = 5,7 mF, C.G = 1,6 mF, C.H = 0,8 mF) besitzt, von denen aber nur C.G und C.A genutzt wurden. Der Transformator besaß ein Übersetzungsverhältnis von $\ddot{u} = 20$.

Um die Schweißparameter zu ermitteln, wurden die Muttern auf ebene Probebleche geschweißt. Im Ergebnis sollte die Kopfzugkraft möglichst weit oberhalb von $F_{KZGrenz}$ liegen. Der Schweißstromverlauf wurde so gewählt, dass die Basis des Mutterngewindes (der Teil der Mutterinnenseite vor den Gewindegängen, der auf das Blech aufgeschweißten Seite) bei 75 % aller Proben nach dem Schweißen entsprechend Bild 4 keine Spritzerrückstände verzeichneten. Damit waren nur bei 25 % der Proben das untere Qualitätskriterium aus /1/ (Bild 10) „einwandfreie Gewindegängigkeit“ zugelassen, was eine höhere Sicherheit gegenüber Gewindebeeinträchtigungen bedeutet. Im Ergebnis der Probeschweißungen ergaben sich die Anfangsladespannungen $U_{OC,G}$ und $U_{OC,A}$, die Zündverzögerung zwischen beiden Kondensatorentladungen $t_{\ddot{u}v}$ und die Elektrodenkraft F_S :

$$U_{OC,G} = 1.250 \text{ V}$$

$$U_{OC,A} = 790 \text{ V}$$

$$t_{\ddot{u}v} = 1,4 \text{ ms}$$

$$F_S = 16,0 \text{ kN}$$

Diese Parameter führen zu einem Stromverlauf entsprechend links im Bild 3 (nur eine Kennlinie, da der Strom weitestgehend unverändert bleibt) und die Kraft-Weg-Verläufe (zwei Kennlinien, um die Streuung anzudeuten) entsprechend rechts im Bild 3:

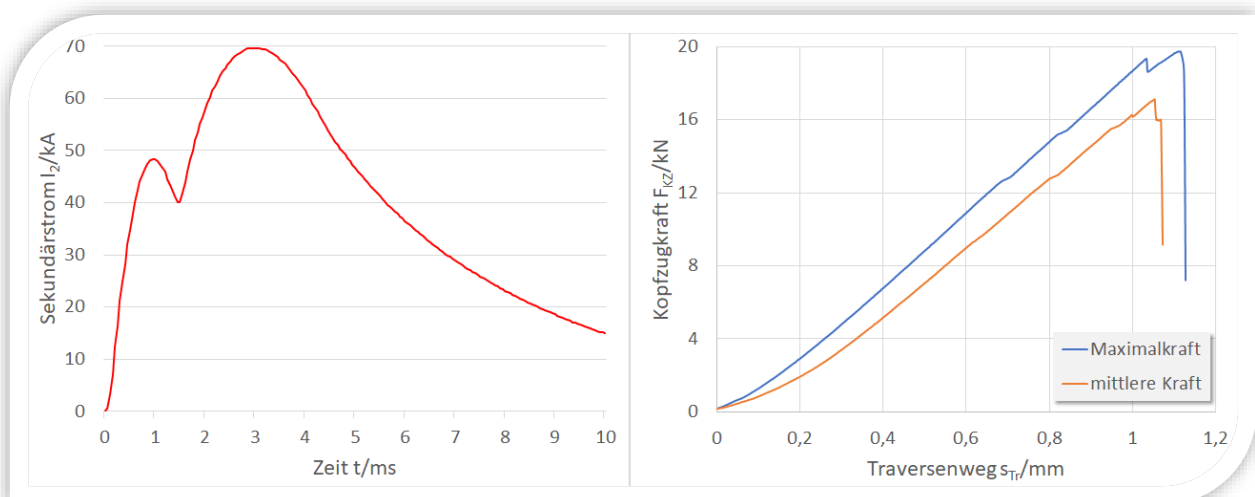


Bild 3: Verläufe des Schweißstroms und ausgewählter Kopfzugkräfte der Probeschweißungen auf ebenen Probestreifen.

Entsprechend des Stromverlaufs werden in der Schweißstelle im ersten Puls eine spezifische Energie von $\epsilon_{50P1} = 106,5 \text{ Ws}/50 \mu\Omega$ und im zweiten Puls $\epsilon_{50P2} = 750,5 \text{ Ws}/50 \mu\Omega$ umgesetzt.

Wie sich später noch zeigen wird, reicht die Messung der maximal erreichten Kopfzugkraft für die vollständige Analyse eines Schweißvorgangs keinesfalls aus.

Die Aufzeichnung des Kraft-Weg-Diagramms ist unumgänglich.

Die beiden Kurven im Bild 3 rechts zeigen einen annähernd kontinuierlichen Verlauf, abgesehen von geringen Krafrückgängen (bei rund 13,0 kN bzw. 15,5 kN in beiden Kurven), die lediglich auf ungleichmäßige Dehnungen zurückzuführen sind, aber keinesfalls auf den Abriss eines Buckels hindeuten. Beide Kurven beweisen, dass beim Schweißen der Mutter auf ebene Probebleche (die das senkrechte Einwirken der Kraft während der Kopfzugprüfung ermöglichen) die drei Buckel annähernd gleichmäßig abreißen.

4 Schweißen der realen Bauteile

Eine kurze Überprüfung der Schweißparameter zeigte, dass die realen Bauteile mit unveränderten Werten geschweißt werden sollten, da auch in diesem Fall das oben definierte Qualitätskriterium wiederum erfüllt wurde. Die von Spritzerrückständen freie Gewindebasis zeigt die fotografierte Probe im Bild 4.



Bild 4: Verschweißte Mutter mit sauberer Mutternbasis und Schweißspuren auf der Unterseite des Bauteils.

Das Bild zeigt aber auch einige blanke Stellen im Umfeld des Bohrloches, die auf Abdrücke der Unter-elektrode zurückzuführen sind. Diese Erscheinung ist ein Zeichen für die unebene Oberfläche des zu schweißenden Bauteils, die eine verstärkte Elektrodenabnutzung bedingt. In solchen Situationen ist zu entscheiden, ob die Oberfläche des Bauteils um die Schweißstelle (ggf. oben und unten) nachgearbeitet oder ob ein höherer Elektrodenverschleiß in Kauf genommen wird. Sicherlich ist Letzteres meistens mit den geringeren Kosten verbunden.

Geschweißt wurden zehn Proben C1 bis C10 mit identischen Parametern. Um die nachfolgende Diskussion einzuordnen:

Die erzielten Ergebnisse lagen deutlich oberhalb der geforderten Mindestkopfzugkraft F_{KZmin} , ohne jegliche Ansätze von Beeinträchtigungen des Gewindes durch Spritzer!

Da auch die Grenzkraft $F_{KZGrenz}$ im Wesentlichen erreicht und überschritten wurde, könnten die Parameter für die Serienfertigung eingesetzt werden! Dennoch bleiben Unsicherheiten, die im Folgenden beleuchtet werden sollen, um eine noch höhere Prozesssicherheit zu erzielen.

Bei der Kopfzugprüfung zeigte sich ein anderes Verhalten, als die Schweißungen auf den ebenen

Probleblechen.

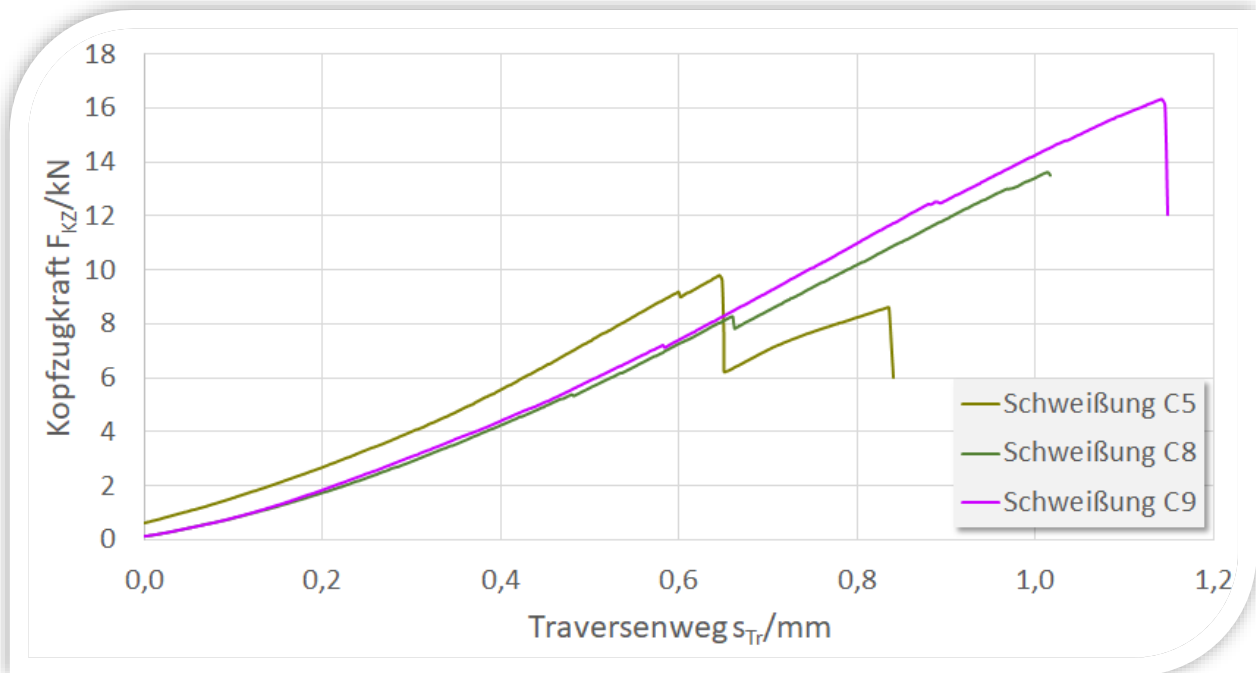


Bild 5: Kraft-weg-Verläufe von ausgewählten Schweißungen auf Originalbauteilen.

Die exemplarisch dargestellten Kurven zeigen Krafterückgänge während des Kraftanstiegs beim Kopfzugversuch. An diesen Stellen waren bei der Prüfung deutliche Versagens-Knackgeräusche zu hören, die das Abreißen eines einzelnen Buckels markieren.

5 Verfrühte Abrisse einzelner Buckel

Ein frühzeitiger Buckelabriss schwächt die Verschweißung der Mutter auf dem Bauteil. Je nachdem, wann der Buckel abreißt und welche Grundfestigkeit die Schweißung aufweist, ergeben sich unterschiedliche Kopfzugkräfte. Besonders drastisch zeigt sich die verringerte Festigkeit bei der Schweißung C5. Die grafische Darstellung von allen zehn Schweißungen verdeutlicht die Auswirkung dieser Erscheinung im folgenden Bild 6:

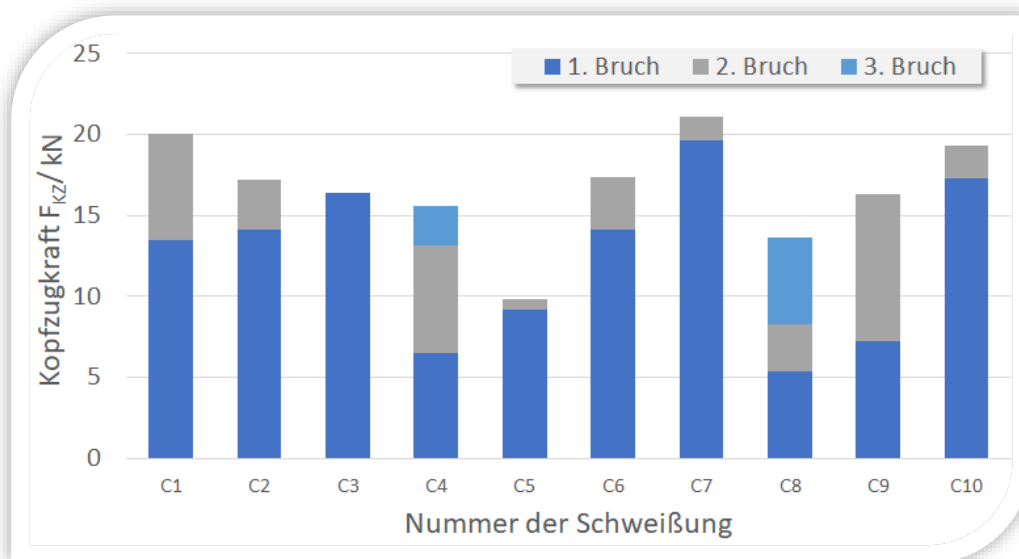


Bild 6: Kraft-Weg-Verläufe von ausgewählten Schweißungen auf Originalbauteilen.

Ausschließlich bei der Schweißung C3 rissen alle Buckel gleichzeitig ab. Da diese Schweißung nicht die größte Kopfbzugkraft erzielte, müssen unterschiedliche Grundfestigkeiten vorliegen. Daneben gab es sieben Schweißungen mit vorzeitigem Abriss eines Buckels und zwei Schweißungen, bei dem alle drei Buckel einzeln abgerissen sind.

Für den Abriss einzelner Buckel kommen zwei Ursachen infrage: Entweder führt die unebene Oberfläche des Bauteils zu ungleichmäßigen Schweißungen oder während der Kopfbzugprüfung wird mit einer von der Senkrechten abweichenden Krafteinwirkung gearbeitet (weil das Bauteil ungeachtet des speziellen Niederhalters keine völlig waagerechte Auflage ermöglicht).

Um die wahren Ursachen für die ungleichmäßigen Kopfbzugkräfte zu ermitteln, werden die Ergebnisse einzelner Parameter der Prozessüberwachung ausgewertet:

- Aufsetzposition (in mm) der Elektrode vor der Schweißung
- Durchschlagweg (in mm) der Oberelektrode von der Aufsetzposition bis zum ersten lokalen Minimum
- Zeitpunkt, zu dem das Durchschlagminimum erreicht wird und
- der Mittelwert der Elektrodenspannung während der Schweißung.

In /2/ werden die Parameter detailliert beschrieben. Wie die aufgelisteten Parameter in der folgenden Tabelle zeigen, ergeben sich (entgegen der üblichen Erwartungen) keine eindeutigen Beziehungen zwischen der ermittelten Kopfbzugkraft und den Überwachungsparametern.

Schweißung	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Kopfbzugkraft [kN]	20,1	17,2	16,4	15,5	9,8	17,4	21,1	13,7	16,3	19,3
Aufsetzposition [mm]	7,13	7,03	7,13	7,18	7,08	7,11	7,13	7,10	7,08	7,05
Durchschlagweg [mm]	0,62	0,57	0,61	0,63	0,59	0,64	0,69	0,62	0,60	0,65
Zeitpunkt Durchschlagmin. [ms]	6,45	6,15	6,25	6,15	6,55	6,20	6,15	6,20	6,40	6,30
Spannungsmittelwert [V]	8,15	7,91	8,17	8,27	7,96	8,23	8,81	8,34	8,01	8,43

Die Schwankungen der Aufsetzposition zwischen 7,03 und 7,18 mm (Normalwert liegt bei 7,10 mm) weisen auf eine relativ unebene Oberfläche der geschweißten Bauteile hin.

Erfahrungsgemäß muss mit relativ kleinen Kopfbzugkräften gerechnet werden, wenn

- ein geringer Durchschlagweg,
- eine lange Zeit bis zum Durchschlagminimum und
- ein kleiner Spannungsmittelwert

gemessen werden.

Die Schweißung C5 erfüllt diese Bedingungen, was auf die geringe Kopfbzugkraft hindeutet. Aber auch die Schweißungen C2 und C9 würden ebenfalls nach dem Muster detektiert werden, haben aber höhere Kopfbzugkräfte ergeben. Bei der Schweißung C9 riss der erste Buckel bereits bei 7,2 kN ab, die relativ hohe Maximalkopfbzugkraft wurde mit zwei Buckel erreicht. Bei der Schweißung C2 verhält es sich umgekehrt, der erste Buckel reißt erst bei 14,1 kN, während die verbliebenen beiden dann noch bis 17,2 kN halten. Die hohe Kopfbzugkraft von C7 erklärt sich wiederum aus dem entgegengesetzten Verhältnis der Kriterienkombination.

Die Schweißungen C2, C9 und C5 zeigen bei der Überwachung ein identisches Verhalten, ergeben aber dennoch deutlich unterschiedliche Kopfzugkräfte. Also besteht noch ein weiterer Einflussfaktor – die Richtung in der die Kraft bei der Kopfzugprüfung einwirkt. Die geschweißte Probe lässt sich durch die konstruktiv vorhandene Biegekante (auch mit dem dünnwandigen Niederhalter) nicht exakt waagrecht in die Prüfvorrichtung einlegen. Damit weicht die während der Kopfzugprüfung aufgebracht Kraft von der Senkrechten ab, sodass die drei Buckel unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt sind.

Damit überlagern sich im Ergebnis zwei unterschiedliche Einflüsse:

1. die während der Schweißung erzielte Festigkeit (die nicht direkt messbar ist) und
2. die (nicht unter vorschriftsmäßigen Bedingungen) ermittelte Kopfzugkraft.

Da das Prüfverfahren das Prüfergebnis beeinflusst, lässt sich der Schweißvorgang an sich nur bedingt überwachen. Schwankungen der Kopfzugkräfte, wie sie bei den Versuchen C1 bis C10 aufgetreten sind, lassen sich somit nicht detektieren.

In dieser Situation gibt es mehrere Handlungsoptionen:

- a) Das Ergebnis von C5 wird auch 10,0 kN aufgerundet, sodass auch diese Schweißung den Grenzwert $F_{KZGrenz}$ erreicht und die Parameter werden für den Serieneinsatz benutzt.
- b) Es sind weitere Probeschweißungen auszuführen, um festzustellen, ob C5 ein Ausnahmeergebnis ist und ansonsten die Schweißungen oberhalb von $F_{KZGrenz}$ liegen. Völlige Sicherheit kann aber nur mit immensem Aufwand gewonnen werden, sollen auch noch unterschiedliche Einflüsse (wie Chargenwechsel der Bauteile und Muttern) kontrolliert werden.
- c) Mit der C-Gestell-Maschine die Schweißenergie zu erhöhen, empfiehlt sich nicht, da dadurch die Gefahr von Spritzern im Gewinde wächst. Es ergibt sich aber die Möglichkeit, Schweißungen mit einer Portalmaschine auszuführen. Das Schweißen ohne die störenden Einflüsse von Magnetfeldänderungen, einer ungleichmäßigen Kraftereinwirkung (bedingt durch die Aufbiegung des Ständers) und der Lorenzkraft führen in vielen Fällen zu besseren Ergebnissen.

Im Folgenden werden die Steigerungen der Verbindungsfestigkeit dargestellt, die sich aus der Anwendung einer Portalmaschine entsprechend Möglichkeit c) ergeben.

6 Schweißen mit Portalmaschine

Geschweißt wurde auch in diesem Fall mit einer Mehrkondensator-Maschine, die allerdings einen Portalrahmen besitzt (vgl. im Anhang Bild A2). Die vier Kondensatoren besitzen identische Kapazitäten wie die zuvor eingesetzte Maschine mit C-Gestell (C.A = 11,4 mF, C.B = 5,7 mF, C.G = 1,6 mF, C.H = 0,8 mF), von denen ebenfalls wiederum nur C.G und C.A zum Einsatz kamen. Um hinsichtlich der Stromanstiegszeiten vergleichbare Verhältnisse zur C-Gestell-Maschine zu erhalten, wurde an den beiden (parallel geschalteten) Transformator das Übersetzungsverhältnis von $\ddot{u} = 30$ eingestellt.

Die Parameterwahl erfolgte wiederum nach dem oben beschriebenen Qualitätskriterium. Wie das folgende Bild zeigt, lässt die Portalmaschine unter diesen Bedingungen höhere Ströme zu. Somit wird der Schweißstelle eine größere spezifische Energie zugeführt: Im ersten Puls mit $\epsilon_{50P1} = 177,0 \text{ Ws}/50 \mu\Omega$ eine Steigerung um 66,2 % und im zweiten Puls mit $\epsilon_{50P2} = 960,3 \text{ Ws}/50 \mu\Omega$ um 28 %. Dadurch wird eine deutlich intensivere Aktivierung der Oberflächen erreicht und die Plastizität der Buckel während der Pressphase durch höhere Temperaturen verbessert.

Die Stromkurve ergibt sich aus den Parametern:

$$U_{0C,G} = 1.150 \text{ V}$$

$$U_{0C,A} = 650 \text{ V}$$

$$t_{ÜVZ} = 1,4 \text{ ms}$$

$$F_s = 15,0 \text{ kN}$$

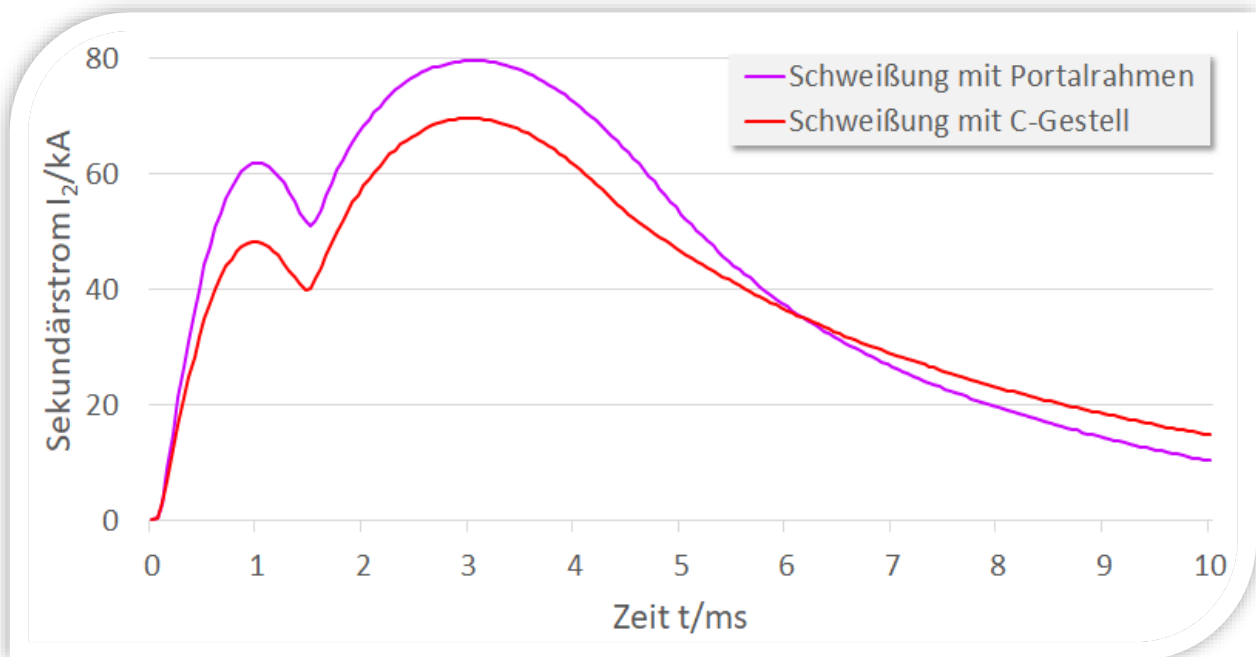


Bild 7: Vergleich der Stromverläufe bei C-Gestell (vgl. oben) und beim Portalrahmen.

Um die Wirkung der Portalmaschine und der höheren spezifischen Energie zu verdeutlichen, werden die Ergebnisse der Kopfzugprüfung der zusätzlichen zehn Probeschweißungen P1 bis P10 in das Diagramm des Bildes 6 hinzugefügt:

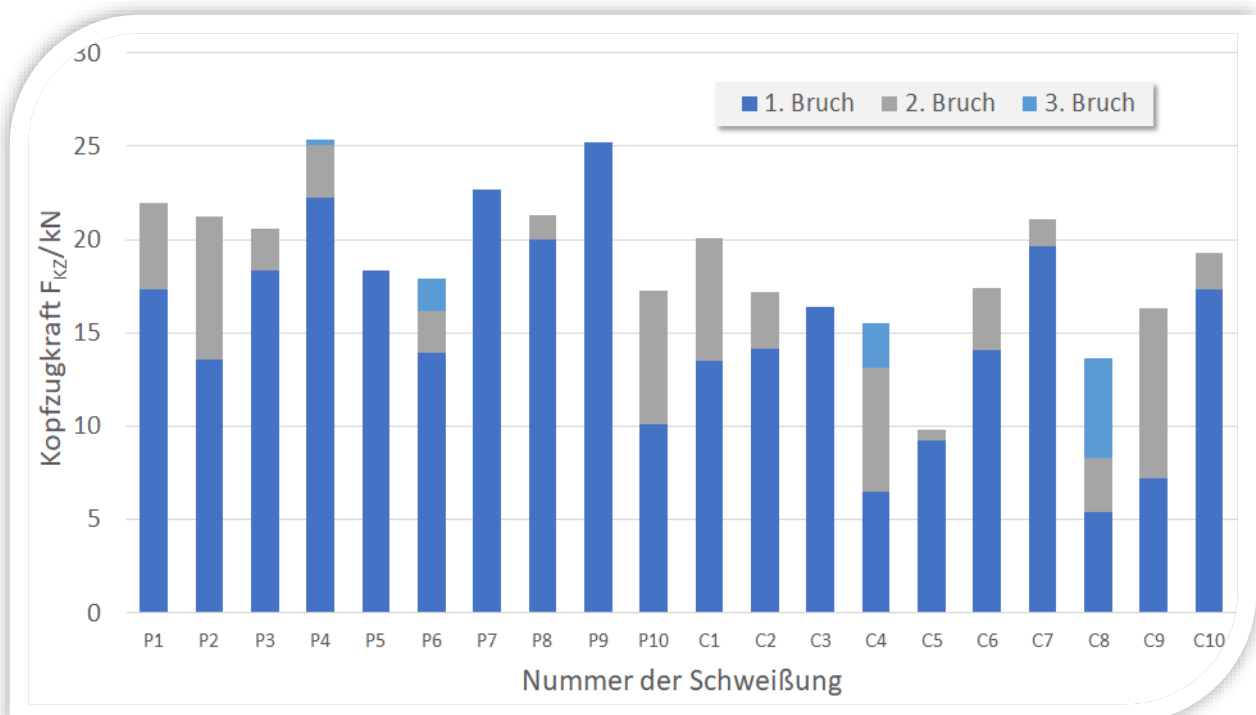


Bild 9: Kraft-Weg-Verläufe von ausgewählten Schweißungen auf Originalbauteilen mit der Portal-Maschine P1 bis P10 im Vergleich zu den Schweißungen auf der C-Gestell-Maschine.

Die Ergebnisse sind eindeutig! Bei den Schweißungen mit der Portalmaschine ergeben sich zunächst deutlich höhere Kräfte, bei denen der erste Buckel abreißt:

Werte in kN	... ersten Buckelabriss		... zweiten Buckelabriss		Erzielte Maximalkraft	
	C-Rahmen	Portal	C-Rahmen	Portal	C-Rahmen	Portal
Mittelwerte Kopfbzugkräfte bis ...	12,34	18,17	3,95	4,01	16,67	21,18
Standardabweichung					3,27	2,81

Die mittlere Prüfkraft, bei der der erste Buckel abreißt, konnte um annähernd 50 % auf 18,2 kN gesteigert werden. Bei diesem hohen Wert halten die verbleibenden beiden Buckel noch weitere 4 kN. Dadurch konnte die durchschnittliche Maximalkraft auf 21,18 kN erhöht werden, während der kleinste Wert mit 17,3 kN deutlich oberhalb des geforderten Grenzwerts $F_{KZGrenz} = 10$ kN liegt.

Auch beim Schweißen mit der Portalmaschine bestätigen die Schwankungen in der Aufsetzposition mit Werten zwischen 7,05 und 7,26 mm noch einmal die Unebenheit der Bauteiloberfläche.

Mit den gewählten Parametern kann auf einer Portalmaschine die Schweißaufgabe mit sehr hoher Sicherheit geschweißt werden! Schweißungen mit zu kleinen Kopfbzugkräften unterhalb von $F_{KZGrenz}$ sind nicht zu erwarten – ausgenommen bei extremen Störeinflüssen (falsche Muttern, Mutter verkehrt herum eingelegt, deformierte Buckel, ...), die aber von der Prozessüberwachung detektiert werden.

Des Weiteren lässt sich verallgemeinern: **Nur eine kontinuierlich verlaufende Kraft-Weg-Kurve des Kopfbzugversuchs deutet auf einen ordnungsgemäßen Schweißprozess bei ordnungsgemäßer Kopfbzugprüfung hin!** Das vorzeitige Abreißen einzelner (Segment-)Buckel wird in erster Linie durch konstruktive Schwachpunkte des Basisbauteils oder des aufzuschweißenden Funktionselements bzw. durch eine nicht senkrecht einwirkende Kraft während des Kopfbzugversuches ausgelöst.

7 Literatur

/1/ Wagner, P.: Untersuchungen zum Anschweißen von Widerstandsschweißmuttern an Bleche aus höher- bis höchstfesten Werkstoffen. Schlussbericht für den Zeitraum: 01.06.05 bis 31.05.07. München, SLV-München, 2007. (AiF-Nr. 14.435) - Abschlussbericht.

/2/ Rusch, H.-J.; Stocks, N.: KE-Mehr-Puls-Schweißen von Anschweißmuttern auf 22MnB5 + AS150. Oyten, Fügetechnisches Versuchszentrum (FtVZ) der Kapkon GmbH, 2018. (I/18) - Forschungsbericht.

Anhang



Bild A1: C-Gestell-Maschine, die als Standard für die Schweißversuche eingesetzt wird.



Bild A2: Portal-Maschine, die als Alternative für zusätzliche Schweißversuche eingesetzt wurde.