

IGF-Nr.: 19.878 BR Entwicklungen und Untersuchungen von Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit hoher Wärmestromdichte

V. Schreiber, N. Mitzschke, M. Dieckmann, S. Jüttner, Magdeburg

Das Widerstandspunktschweißen stellt ein sehr kosten- und energieeffizientes Schweißverfahren für den Dünnblechbereich dar. Um die Energieeffizienz zu erhöhen und den Wärmeeintrag in das Bauteil zu vermindern, wäre beim Widerstandsschweißen eine Verkürzung der Schweißzeit notwendig. Diese Verkürzung der Schweißzeit erfordert eine höhere Stromstärke und eine geringere stromübertragende Kontaktfläche, die bisher nur beim Buckelschweißen von Fügeelemente wie Schweißmuttern auf Blechen genutzt wird. Im Allgemeinen kann dieser Ansatz auch auf andere Anwendungen des Widerstandsschweißens übertragen werden, wobei die Herausforderung in den fehlenden Qualitätskriterien für eine ausreichende Verbindungseigenschaft liegen. Ohne diese können insbesondere Zulieferer aus der mittelständischen Industrie das Kurzzeitschweißen mit entsprechend konzentrierter Energieeinbringung nicht anwenden.

Im Rahmen des Beitrags wird eine Methode zur Erstellung von Prozessfenstern auf Basis der statistischen Versuchsplanung dargestellt. Weiter werden Qualitätskriterien für die Bewertung von Kurzzeitschweißungen vorgestellt, bei denen kein Schmelzbad vorhanden ist. Außerdem muss bei dieser Prozessführung auch die obere Qualitätsgrenze neu definiert werden, welche bisher durch die Spritzergrenze gebildet wurde. Die Verbindungseigenschaften unterschiedlicher Blech-Fügeelementkombinationen werden vorgestellt.

1 Einführung

Das Widerstandsschweißen ist eines der dominierenden Fügeverfahren im Karosseriebau. Primär treten Blech-Blech-Verbindungen auf, die durch 2000 – 5000 Schweißpunkte gefügt werden [1]. Zusätzlich finden circa 50 Blech-Funktionselement-Verbindungen im Fahrzeug ihre Anwendung [2]. Um eine energetische Einsparung beim Fügen zu erreichen, kann die Schweißzeit beim Widerstandsschweißen verkürzt werden. Die empfohlene Schweißzeit laut dem SEP 1220-2 beträgt 380 ms [3]. Um eine Reduzierung der Schweißzeit zu kompensieren, muss die Energieeinbringung konzentriert werden. Dies kann durch Reduzierung der Kontaktflächen oder durch Steigerung des Schweißstromes erfolgen. Dadurch treten positive Effekte, wie die Verringerung des Wärmeeintrages in das Blech auf. Ein weiterer Vorteil ist die Verringerung der thermischen Belastung der Elektrodenkappen, wodurch sich längere Standzeiten erzielen lassen. Ein negativer Effekt, der auftreten kann, ist die fehlende Ausbildung einer Schweißlinse, die sich aufgrund der kurzen Schweißzeit und hohen Stromkonzentration erklären lässt. Dies ist problematisch, da konventionell als Bewertungskriterium für die Güte der Schweißung die Schweißlinse benötigt wird [4]. Diese linsenfreen Schweißungen können dennoch den Anforderungen genügen. Zusätzlich treten Spritzer auf, welche nach gängigem Regelwerk ebenfalls nicht zulässig sind. Das vorliegende Forschungsvorhaben beschäftigte sich mit den Schweißen von Funktionselementen mit kurzen Schweißzeiten zwischen 20 – 60 ms und hoher Wärmestromdichte und der Untersuchung von Qualitätskriterien. Für diese kurzen Schweißzeiten existiert aktuell keine Abgrenzung [5].

2 Material und Methodik

Um Qualitätskriterien ermitteln zu können, ist es notwendig die Prozessgrenzen zu definieren. Dafür werden durch zerstörende Prüfung, entsprechend den Kriterien aus gültigen Werksnormen des Automobilbaus, ermittelt und bewertet. Dabei findet die Bewertung der Funktionselemente an der unteren Qualitätsgrenze anhand der Mindestkopfzugkraft und des Mindestdrehmomentes statt. Die obere Qualitätsgrenze wird durch die Erfüllung der Funktion des Elementes, d. h. der Gewindegängigkeit, bestimmt. Zusätzlich wird das Auftreten von Spritzern klassifiziert und dokumentiert. Die Einteilung erfolgt in Anlehnung an das IGF-Vorhaben 18.987 BR „Erwärmungsverhalten der Kontaktzone beim Kondensatorentladungsschweißen unter Berücksichtigung der dynamischen Stromänderung und des Nachsetzverhaltens der Elektrode“.

Um den experimentellen Aufwand zur Ermittlung der Schweißbereiche zu verringern, wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of experiments, DoE) gewählt. Die Planung und Auswertung erfolgte mithilfe der Software Minitab 18. In Bild 1 sind die experimentellen Parameter dargestellt und der schematische Aufbau der DoE. Die gewählte Form der DoE entspricht einem vollfaktoriellen Versuchsplan mit insgesamt 27 Parameterkombinationen. Auf Basis der Ergebnisse der DoE wird eine Vorhersage der Schweißbereiche getroffen. Zusätzlich zu den Schweißungen der DoE-Versuche werden die existierenden Schweißbereiche ermittelt und mit den Prognosen verglichen. Dabei werden neben den Kopfzugkräften, den Drehmomenten auch die Prozessdaten in die Untersuchung einbezogen.

Parameter	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Schweißstrom I_S /kA	8	15	22
Elektrodenkraft F_E /kN	3	4	5
Schweißzeit t_S /ms	20	40	60

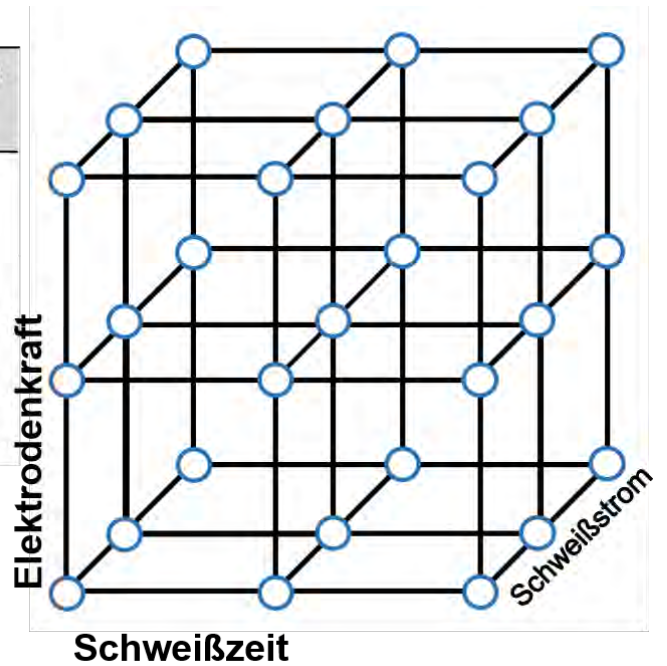


Bild 1. Veranschaulichung einer statistischen Versuchsplanung (DoE) mit den gewählten Parametern für die Versuche für CR340LA und CR440Y780T

Die Versuche fanden an einer C-Ständerschweißanlage der Firma NIMAK GmbH statt. Die Anlage verfügt neben einem für das Kurzzeitschweißen optimierten MFDC-Inverter mit angepasster Steuerung über ein Kraftsystem, welches aus einem elektromotorischen Antrieb für die Zustellung und einer elektromagnetischen Krafteinheit verfügt. Dies erlaubt eine schnelle Nachregelung der Kraft beim Schweißen. Die verwendete Basiselektrode ist eine Sonderelektrode mit gefedertem Zentrierstift. Dieser ist auf das Innengewinde des jeweiligen Funktionselementes abgestimmt und dient der Positionierung. Die Kopfelektrode ist eine flache Elektrode. Bild 2 zeigt den experimentellen Aufbau zusammen einer Explosionsdarstellung des Aufbaus.

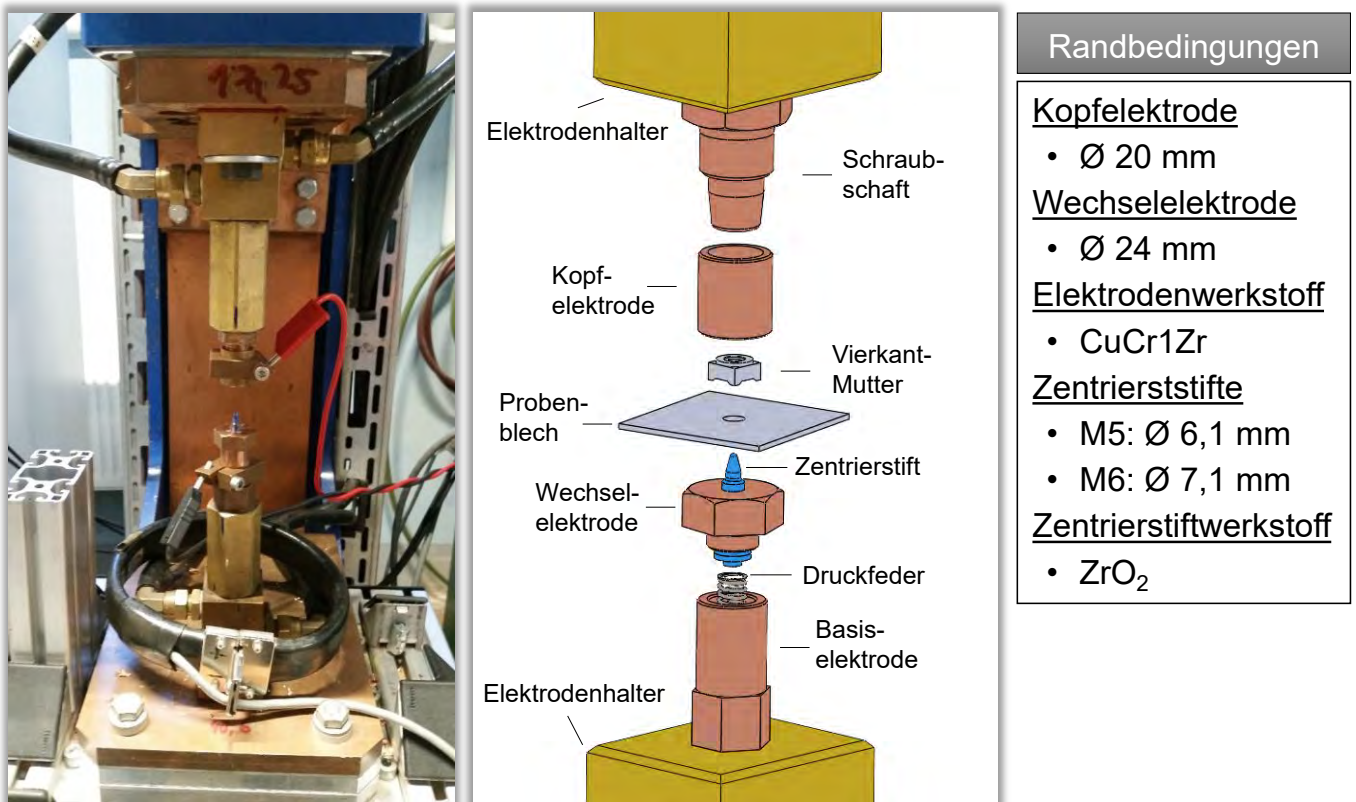


Bild 2. Experimenteller Aufbau inklusive Explosionsdarstellung der Sonderelektrode

Die verwendeten Versuchswerkstoffe und ihre Geometrie sind in Tabelle 1 dargestellt. Es handelt sich dabei um Werkstoffe, welche im Automobilbau Verwendung finden. Der Werkstoff 22MnB5+AS150 durchlief das Presshärten mit 6 Minuten Ofenverweildauer bei einer Temperatur von 900 °C. Alle Blechwerkstoffe wurden in Form von Schweißproben nach SEP 1220-2 in 45 x 45 mm zugeschnitten und wiesen zusätzlich eine Öffnung in Größe des Dorns auf. Die Blechwerkstoffe hatten alle eine Dicke von 1,5 mm. Die Muttern bestehen aus einem einfachen Baustahl für beide Vierkanmmuttern. Die Funktionselemente des Typs M6 waren zusätzlich verzinkt.

Tabelle 1. Übersicht über die verwendeten Versuchswerkstoffe

	Grundwerkstoff	Beschichtung	Geometrie
Blechwerkstoff	CR340LA	GI50/50	45 x 45 mm
Blechwerkstoff	CR440Y780T	GI50/50	45 x 45 mm
Blechwerkstoff	22MnB5	AS150	45 x 45 mm
Funktionselement M5	Niedriglegierter Stahl	Unbeschichtet	Nach DIN 928
Funktionselement M6	Niedriglegierter Stahl	Verzinkt	Nach DIN 928

3 Ergebnisse

Zunächst zeigte sich, dass von den beiden Kriterien für die untere Grenze des Schweißbereiches das Mindestdrehmoment früher erreicht wird als die Kopfzugkraft. Dies war bei allen untersuchten Materialkombinationen der Fall, weswegen die Mindestkopfzugkraft als sensitiver Faktor in den folgenden Untersuchungen, als Maß für die Erfüllung der Mindestanforderung genutzt wurde.

Die Entwicklung der Kopfzugkraft über den Schweißstrom ist in Bild 3 exemplarisch für den 22MnB5 dargestellt. Zusätzlich sind die Grenzen des Schweißbereiches und die aufgetretenen Spritzer mit der jeweiligen Spritzerklasse hinterlegt. Die Kopfzugkraft steigt bei allen Werkstoffen mit dem Schweißstrom. Ähnliches lässt sich bei den Spritzern beobachten. Die Spritzerklasse steigt in Abhängigkeit des Schweißstromes. Außerdem führen Spritzer der Klasse 2 und 3 zu einer eingeschränkten Gewindegängigkeit. Insbesondere Spritzer der Klasse 3 traten am Ende des Schweißbereiches auf. Die Streuung der Kopfzugkraft nahm mit steigender Spritzerklasse zu. Im Bereich der oberen Grenze des Schweißbereiches beginnt diese zu stagnieren. Bei beschichteten Schweißmuttern existierten keine spritzerfreien Schweißungen innerhalb des Schweißbereiches. Hingegen konnte dies bei unbeschichteten Muttern beobachtet werden.

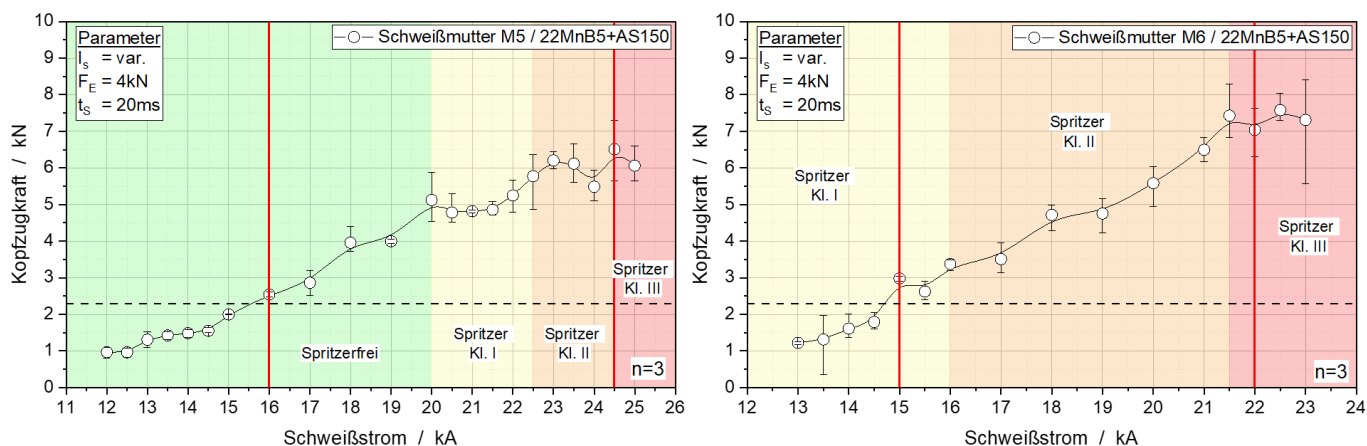


Bild 3. Korrelation der Spritzerklasse mit der erreichbaren Kopfzugkraft für das unbeschichtete Funktionselement M5 und das beschichtete M6 mit dem Werkstoff 22MnB5+AS150 pressgehärtet bei 900 °C und 6 Minuten Ofenverweilzeit.

Bei den Untersuchungen der aufgezeichneten Prozessgrößen stellten sich die Energie und Leistung als ein geeignetes Qualitätskriterium heraus. In Bild 4 ist ein Vergleich der Energie und Leistung im Vergleich zur Kopfzugkraft in Abhängigkeit des Schweißstroms. Es zeigt sich, dass Energie und Leistung ein ähnliches Verhalten wie die Kopfzugkraft aufweisen. Dies war bei allen untersuchten Blechwerkstoffen der Fall. Insgesamt wiesen die Werte für die Energie und Leistung eine geringe Streuung auf. An der unteren Grenze des Schweißbereiches liegen ähnliche Leistungswerte für die beschichteten und unbeschichteten Funktionselemente vor. Im Falle des 22MnB5 weisen diese die größte Abweichung, sowohl an der unteren Grenze des Schweißbereiches, als auch an der oberen Grenze auf. Bei den anderen untersuchten Werkstoffkombinationen wichen diese deutlich geringer voneinander ab. Der Unterschied zwischen den Funktionselementen besteht im Wesentlichen aus einer Zinkbeschichtung für M6. Es

kann geschlussfolgert werden, dass der Einfluss der Oberflächenbeschichtung des Funktionselements auf die Leistung nicht vorhanden oder äußerst gering ist.

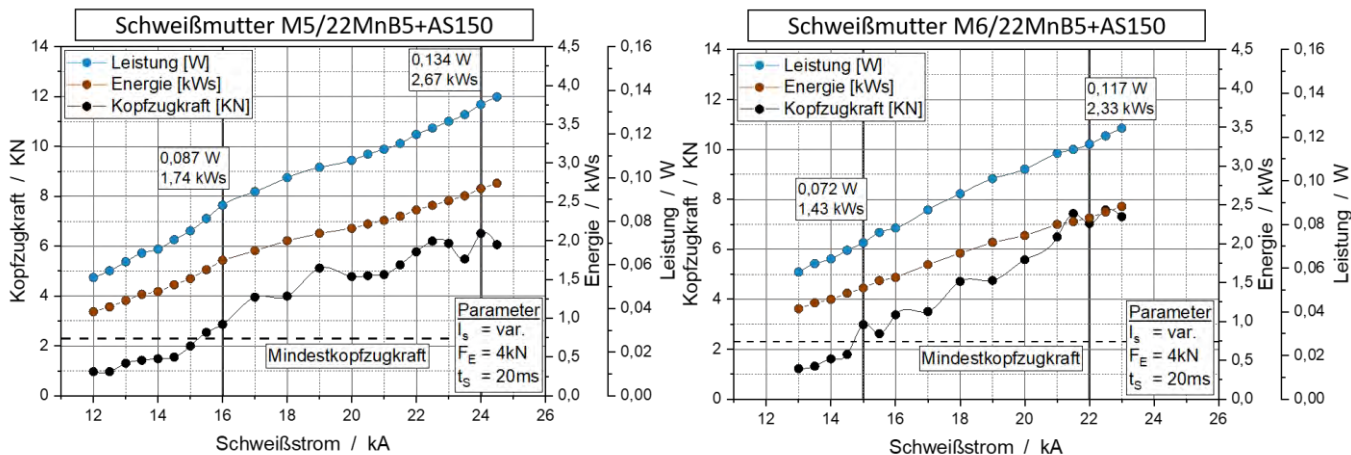


Bild 4. Entwicklung von Energie und Leistung im Vergleich zur Kopfzugkraft über den Schweißstrom für das unbeschichtete Funktionselement M5 und das beschichtete Funktionselement M6 mit dem Werkstoff 22MnB5, pressgehärtet bei 900 °C und 6 Minuten Ofenverweilzeit.

Neben der Leistung zeigte sich der Elektrodenweg als eine geeignete Qualitätsgröße. Es können verschiedene charakteristische Merkmale des Elektrodenwegs ausgewertet werden. Dabei zeigte sich das Maximum des Elektrodenwegs während des Schweißprozesses bzw. das maximale Einsinken der Elektroden während des Schweißens als besonders geeignet. Bild 5 zeigt für den Werkstoff 22MnB5. Das Wegmaximum der Elektrode verhält sich bei allen untersuchten Werkstoffen ähnlich wie die Kopfzugkraft. Diese zeigen auch ein annähernd lineares Verhalten. Die Werte für den Beginn und das Ende des Schweißbereiches waren jedoch von Werkstoff zu Werkstoff unterschiedlich. Für 22MnB5 lag der Beginn des Schweißbereiches bei etwa 520 µm, für CR340LA bei 450 µm und für CR440Y780T bei 470 µm. Der Unterschied zwischen den beiden Funktionselementen, also M5 und M6 ist ebenfalls sehr gering. Der Fall trat sowohl an der unteren als auch der oberen Schweißbereichsgrenze auf. Somit ist auch hier der Einfluss der Beschichtung des Funktionselementes äußerst gering beziehungsweise nicht vorhanden.

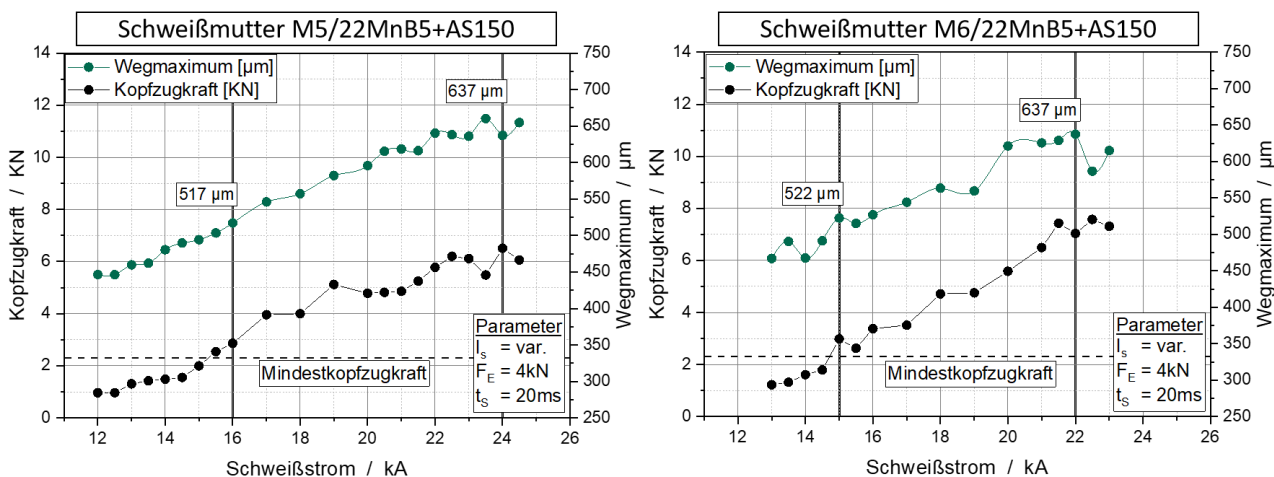


Bild 5. Vergleich des Wegmaximums mit der Kopfzugkraft über den Schweißstrom für das unbeschichtete Funktionselement M5 und das beschichtete Funktionselement M6 mit dem Werkstoff 22MnB5 pressgehärtet bei 900 °C und 6 Minuten Ofenverweilzeit.

Ziel der statistischen Versuchsplanung ist eine Reduktion des Probenumfangs bei einer hinreichend genauen Vorhersage der Schweißbereiche. Bild 6 zeigt einen Vergleich der Vorhersage auf Basis der statistischen Versuchsplanung mit den realen Schweißbereichen. Die Prognose auf Basis der Kopfzugkraft bildet eine ausreichende Genauigkeit der Schweißbereiche. Die Abweichung zu den realen Schweißbereichen beträgt ±2 kA. Eine Verbesserung der Vorhersage konnte durch die Verwendung der Leistung als Kriterium erreicht werden. Die Abweichung zu den

realen Bereichsgrenzen ist äußerst gering und beträgt in einzelnen Fällen ± 1 kA. Ähnlich genaue Vorhersagen ließen sich für die anderen Materialkombination erstellen.

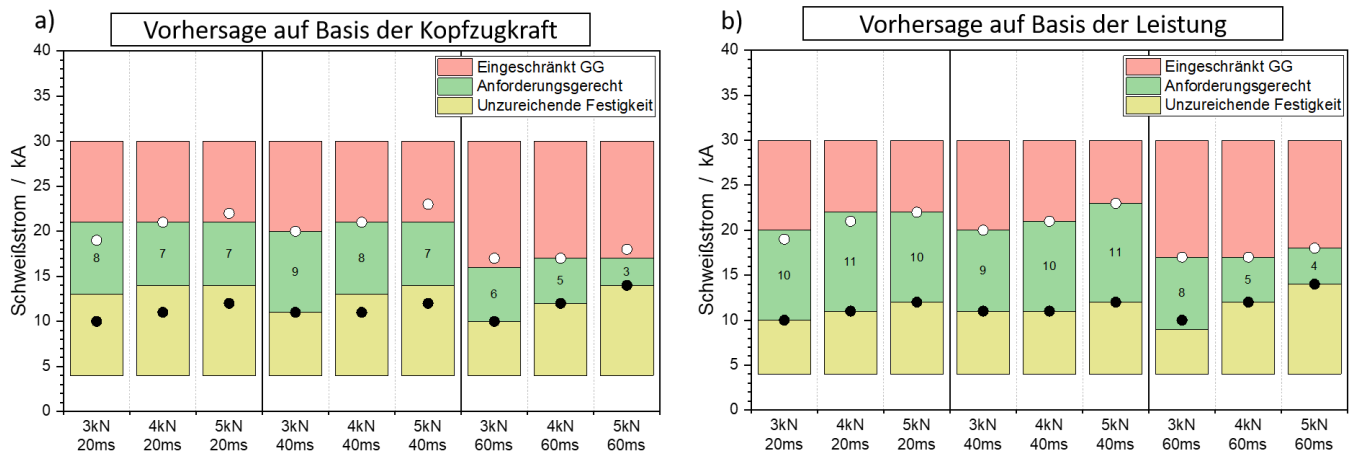


Bild 6. Vergleich der Vorhersage der Schweißbereiche mit den realen Schweißbereichsgrenzen von M6 mit CR440Y780T – GI50/50 a) auf Basis der Kopfzugkraft b) auf Basis der Leistung – schwarzer Punkt reale untere Grenze des Schweißbereichs, weißer Punkt reale obere Grenze des Schweißbereichs.

4 Zusammenfassung

Beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit hoher Wärmestromdichte besteht die Herausforderung in der abschließenden Bewertung der Schweißverbindung. Durch das Fehlen einer Schmelzlinse und dem Auftreten von Spritzern sind diese nach gängigen Regelwerken nicht zulässig. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Untersuchung, dass die Anforderung an die Festigkeit erfüllt werden. Auch führen Spritzer nicht automatisch zur eingeschränkten Gewindgängigkeit. Dies ist für Spritzer der Klassen 1 und 2 der Fall. Dies konnte sowohl bei linsenfremen als auch bei Schweißungen mit Linse beobachtet werden. Die Kopfzugfestigkeit nahm mit dem Schweißstrom zu. Ebenfalls stieg die Spritzerklasse an. Eine zunehmende Streuung der Kopfzugkraft kann mit Zunahme der Spritzerklasse beobachtet werden.

Im Rahmen des Projektes wurden die elektrischen und mechanischen Prozessgrößen untersucht. Leistung, Energie und das Wegmaximum der Elektrode erwiesen sich als geeignet, um anhand deren Verlauf signifikante Punkte zu identifizieren. Diese können als Qualitätsgrößen zur Steuerung und Überwachung des Prozesses weiter genutzt werden. Die Daten der Leistung weisen eine geringe Streuung auf. Ein Einfluss der Beschichtung des Funktionselementes ist nicht erkennbar.

Das Wegmaximum der Elektrode zeigt ebenfalls eine Eignung als Qualitätsgröße. Es existiert kein Einfluss der Beschichtung des Funktionselementes auf das Messsignal. Das Wegmaximum zeigt außerdem charakteristische Größen für den jeweiligen Werkstoff und für die obere und untere Grenze des Schweißbereiches.

Die Methode der statistischen Versuchsplanung (DoE) hat sich als ein geeignetes Werkzeug zur Bestimmung bzw. Vorhersage von Schweißbereichen bewährt. Die Genauigkeit der Vorhersage mit ± 2 kA ist hervorragend. Insbesondere, wenn die Anzahl an eingesparten Versuchen in Betracht gezogen werden. Ein durchschnittlicher Schweißbereich nach SEP 1220-2 benötigt ca. 80 Schweißungen. Somit sind alleine für die 9 Parameterkombination, dargestellt in Bild 6 circa 720 Schweißversuche notwendig, wohingegen die DoE insgesamt 189 Schweißungen benötigt. Darüber hinaus können aus der DoE auch eine Vorhersage über Schweißbereiche mit anderen Parameterkombination extrahiert werden.

5 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr.: 19.878 BR / DVS-Nr.: 04.067 „Entwicklungen und Untersuchungen von Qualitätskriterien beim Kurzzeitwiderstandsschweißen mit hoher Wärmestromdichte“ der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Schrifttum

- [1] DVS – Deutscher Verband für Schweißen (Hrsg.): DVS-Technikreport 2017. Organisation und Schwerpunktthemen der Abteilung „Forschung und Technik“ im DVS. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2017
- [2] Böhme, D.: Widerstandsschweißen von höherkohlenstoffhaltigen Stählen mit sehr kurzer Wärmeeinbringung: Bericht 5128/2003, SLV, 2003.
- [3] SEP 1220-2:2011-08. Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die Fügeignung von Feinblechen aus Stahl – Teil 2: Widerstandspunktschweißen
- [4] DIN EN ISO 14327:2004-06: Widerstandsschweißen – Verfahren für das Bestimmen des Schweißbereichsdiagramms für das Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen. Beuth-Verlag, 2004
- [5] DVS-Merkblatt 2902-4:2001-10: Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke - Grundlagen, Vorbereitung und Durchführung. DVS-Media, 2001