

Miyachi Europe GmbH

Lindberghstraße 1
D-82178 Puchheim

Tel.: +49 89 839403 0

Fax: +49 89 839403 10

Email: contact@mec.miyachi.com

www.miyachieurope.com

Autor: Jörg Kundrat – Leiter Entwicklung, Produktion, Technischer Kundendienst

Widerstandsschweißanwendungen in der Elektronik, Elektro- und Feinwerktechnik.

1. Einleitung

Der ständig steigende Einsatz hoch beanspruchter elektronischer Geräte und Komponenten im Kraftfahrzeug erfordert immer häufiger den Einsatz bisher nicht oder nur selten angewandter Kontaktierverfahren [1]. Waren bis vor einigen Jahren die am häufigsten eingesetzten Verfahren das Weichlöten und Crimpen, so stoßen diese Verfahren auf Grund stetig steigender Leistungsdichte in den Geräten heute an ihre Grenzen.

Weichlötverbindungen sind zuverlässig bis ca. 125 °C einzusetzen, Crimpverbindungen unterliegen der Alterung mit über die Lebensdauer steigendem Übergangswiderstand.

Ähnliches gilt auch für zahlreiche elektronische Geräte mit zunehmender Funktionsdichte bei gleichzeitiger Reduzierung von Raum und Gewicht z.B. Portable elektronische Geräte.

Ausgehend von diesen Randbedingungen werden in den letzten Jahren immer häufiger Kontaktierverfahren eingesetzt, die folgende Anforderungen an die Kontaktstelle erfüllen:

- geringer elektrischer Widerstand,
- hohe Temperaturbelastbarkeit,
- hohe mechanische Festigkeit,
- gute Korrosionsbeständigkeit.

Die Eigenschaften dürfen sich über den gesamten Produktlebenszyklus nur in engen Toleranzen ändern. Diese Anforderungen werden vom Widerstandsschweißen in hohem Maße erfüllt.

2. Anwendungen

Widerstandsschweißen in der Fahrzeugindustrie

Der Produktlebenszyklus entspricht, je nach Fahrzeugklasse, einer Gesamtfahrstrecke von 300 000 bis 500 000 km, in Ausnahmefällen noch deutlich darüber (z.B. Taxibetrieb), oder einer Betriebsdauer von 10 bis 15 Jahren. Hinzu kommt die Forderung nach geringem Bauraum bei gleich hoher Integration, was unmittelbar zur Temperaturzunahme durch höhere Leistungsdichte führt.

Abhängig von der Funktion des Gerätes, finden sich höchst unterschiedliche Randbedingungen für die Ausführung der Kontaktstellen. Während Sensoren nur sehr geringe Signalströme abgeben und dementsprechend nur kleine Leiterquerschnitte erfordern, benötigen Elektromotoren in elektronischen Servolenkungen im Spitzenbereich Stromstärken von einigen 100 A (Bild 1), Starter sind gar mit einigen Kiloampère, wenn auch nur kurzzeitig, zu bedienen. Hierbei soll die Verlustwärme ein Minimum betragen, die Forderung nach Zuverlässigkeit der Verbindung ist obligatorisch. Dies erfordert entsprechend hohe Querschnitte.

Ähnlich hohe Anforderungen gelten für Aktoren z.B. Schmelzsicherungen, Airbag-Zünder (Bild 2) oder Explosionszünder. Dabei muss der elektrische Widerstand zwischen den beiden Schweißpunkten innerhalb sehr enger Toleranzen liegen. Gleich hohe Zuverlässigkeitsforderungen gelten auch für Magnetspulen, die meist aus lackisolierten Kupferdrähten von 0,025 mm Durchmesser aufwärts eingesetzt werden (Bild 3).

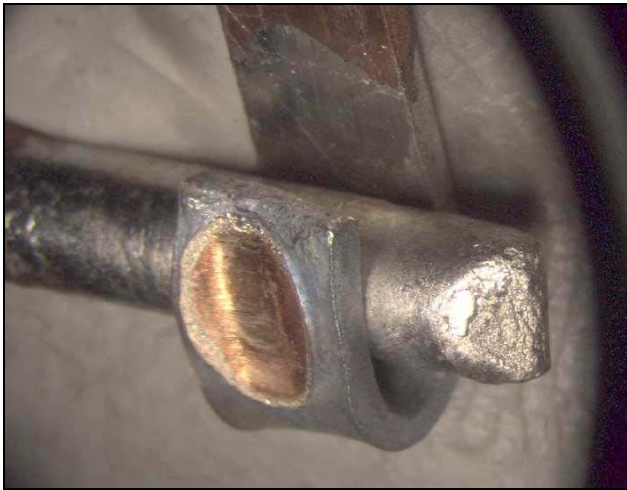


Bild 1. Hochstromanwendung - Drosseldraht.
Durchmesser 3mm.

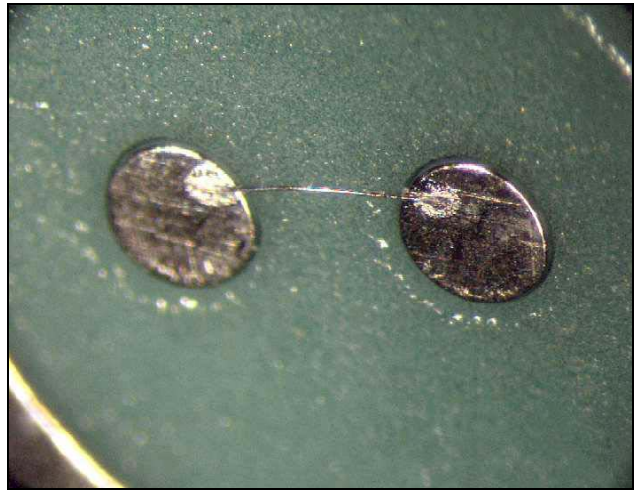


Bild 2. Mikroanwendung – Airbagzünderdraht
Durchmesser 24µm.



Bild 3. Anwendung Schweißen Kupferlackdrähte -
Lackisolierter Kupferdraht an Vierkantstift.
Drahtdurchmesser 70µm.

Diese Anforderungen schränken die möglichen einzusetzenden Werkstoffe zwangsläufig stark ein. In Frage kommen in erster Linie Kupfer oder Kupfer-Basis-Legierungen. Sie stellen in vielen Fällen einen guten Kompromiss zwischen hoher elektrischer Leitfähigkeit und ausreichender mechanischer Festigkeit dar. Die elektrische Leitfähigkeit ($\lambda_{el.}$) technisch reinen Kupfers (z.B. E-Cu58) beträgt etwa 58 MS/m. Somit stellt E-Cu58 den zweitbesten elektrischen Leiter dar, nur übertroffen von Silber, mit 62 MS/m.

Die im Vergleich zu z.B. Stahl relativ geringe Zugfestigkeit von etwa 300 N/mm², lässt sich durch verschiedene Legierungsbestandteile steigern. So erzielt man zum Beispiel durch Zulegieren von 0,15% Sn eine Festigkeitssteigerung auf bis zu 490 N/mm², bei Zulegieren von 6% Sn gar 720 N/mm². Allerdings erkauft durch die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit auf etwa 50 MS/m bzw. 9 MS/m. Die elektrische Leitfähigkeit von CuSn6 ist damit gleich wie die von S235 (alte Bezeichnung St37). CuSn0,15, mit bis zu 490 N/mm² und einer elektrischen Leitfähigkeit von ungefähr 50 MS/m, stellt allerdings für viele Anwendungen einen guten Kompromiss dar.

Widerstandsschweißen in der Feinwerktechnik und Elektrotechnik/Elektronik

Ausgehend von den Qualitätsanforderungen für elektrische Kontaktierungen für sicherheitsrelevante Verbindungen in der Fahrzeugtechnik wie:

- Reproduzierbarkeit des Fügeprozesses,
- Zuverlässigkeit der Verbindung,
- Möglichkeiten der Prozessüberwachung,

ergeben sich weitere sinnvolle Anwendungen für das Widerstandsschweißen. So werden mechanisch hochbelastbare Hartmetallwerkzeuge (Bild 4) hergestellt. Ebenso werden Antennen aus sehr dünnen

Kupferlackdrähten mit Anschlussflächen auf organischem Trägermaterial verbunden (Bild 5), um damit sicherheitsrelevante Informationen in einem extrem großen Temperaturbereich sicher zu übertragen. In der Lampenindustrie hingegen werden hochschmelzende Metalle verbunden, ohne Risse im sehr empfindlichen Sintermetall zu verursachen (Bild 6). Schmelzschweißverfahren sind in solchen Applikationen deutlich unterlegen, denn der Erstarrungsvorgang der Schmelze ist oft sehr problematisch und führt zu Versprödung und Rissen.

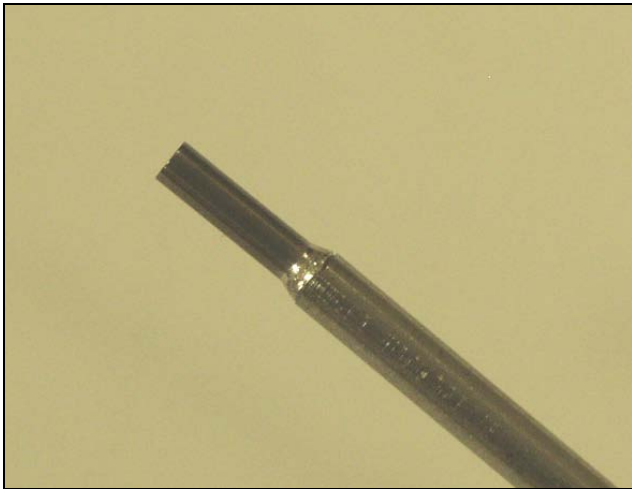


Bild 4. Anwendung Feinwerktechnik – Zahnbohrer mit Hartmetallaufsatz.

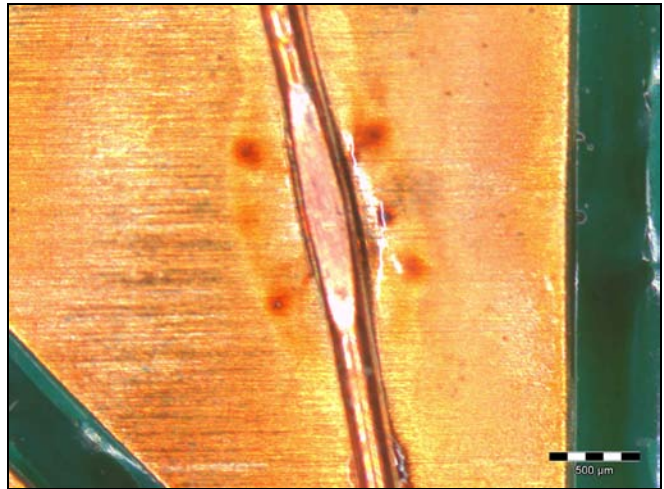


Bild 5. Anwendung Elektronik – Geschweißter Kupfer-Lackdraht Durchmesser 50µm.

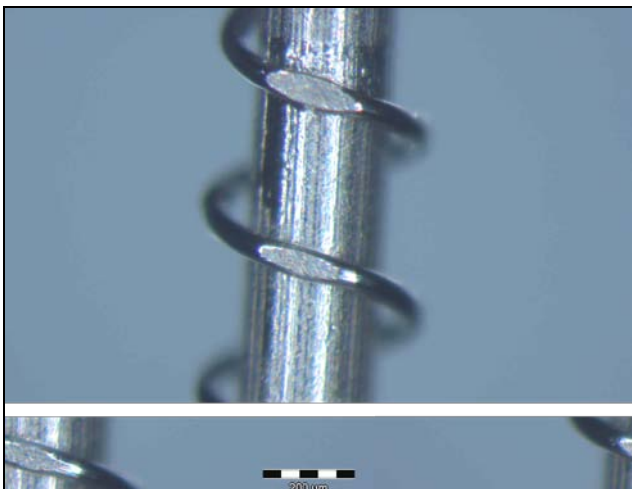


Bild 6. Anwendung Lampenherstellung – Wolframdraht Durchmesser 60µm – Elektrode für Entladungslampe.

3. Verfahrensgrundlagen

Während die gute elektrische Leitfähigkeit des Kupfers für den Betrieb der Produkte einen großen Vorteil darstellt, ist sie für die Fertigung durch Widerstandsschweißen eher von Nachteil. Wie die Bezeichnung Widerstandsschweißen bereits aussagt, entsteht die Wärme an der Fugestelle durch Widerstandserwärmung. Im Unterschied zum Widerstandsschweißen von Stahl sind die Widerstände jedoch meist wesentlich geringer; ebenso die mechanische Festigkeit/Warmfestigkeit der Teile, während die Wärmeleitfähigkeit bedeutend größer ist. In der spezifischen Wärmekapazität besteht nur ein geringer Unterschied. Dieser nivelliert sich weitgehend, wenn man die unterschiedliche Dichte der Materialien berücksichtigt, dann kann für gleiche Teilegeometrie die Wärmekapazität als gleich angesehen werden. Entsprechend dieser Materialunterschiede, bestehen zwischen dem Widerstandsschweißen von Kupfer und Stahl einige wesentliche Unterschiede.

	R _{p0.2} [MPa] ($\vartheta=20^{\circ}\text{C}$)	R _{p0.2} [MPa] ($\vartheta=300^{\circ}\text{C}$)	λ_{el} [MS/m] ($\vartheta=20^{\circ}\text{C}$)	λ_{th} [W/mK] ($\vartheta=20^{\circ}\text{C}$)	C _p [J/kgK] ($\vartheta=20^{\circ}\text{C}$)
E-Cu58	≈180	≈55	≈58	≈400	≈390
S235 (St37)	≈235	≈155	≈9	≈80	≈470

Tabelle 1: Einige Materialdaten von Kupfer und Stahl

4. Thermisches Gleichgewicht

Unterschied zum Schweißen von Stahl

Wie aus Tabelle 1 zu erkennen ist, bestehen zwischen Kupfer und Stahl deutliche Unterschiede in der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit des Kupfers beträgt etwa das 6-fache, die Wärmeleitfähigkeit rund das 5-fache, gegenüber unlegiertem und niedrig legiertem Stahl.

Dies führt beim Widerstandsschweißen von Kupfer dazu, dass die Wärmeentwicklung durch Joule'sche Wärme an der Fügestelle aufgrund des geringen Übergangswiderstands wesentlich geringer ist als beim Schweißen von Stahl.

Der formale Zusammenhang ist: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ [J]

Außerdem führt die hohe Wärmeleitfähigkeit des Materials dazu, dass die Wärme sehr schnell in die Umgebung abfließt und das Material auch weiter entfernt von der eigentlichen Schweißstelle erwärmt wird. Aus diesem Grund wählt man beim Widerstandsschweißen Zeiten, die etwa eine Größenordnung unterhalb derer beim Widerstandsschweißen von Stahl liegen. Ein Großteil der Wärmeentwicklung beim Widerstandsschweißen von Kupfer resultiert aus dem Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Fügepart. Die üblicherweise beim Schweißen von Kupfer eingesetzten Elektrodenwerkstoffe Wolfram (W), Molybdän (M) und Titan-Zirkon-Molybdän (TZM, 0.5% Ti, 0.08% Zr, 0.02% C, Rest Mo) weisen weit höhere spezifische Widerstände auf als das zu schweißende Grundmaterial. Dies führt zu relativ starker Erwärmung an der Kontaktstelle zwischen Elektrode und Werkstück. Diese Wärme wird durch Wärmeleitung in das Werkstück übertragen und liefert einen erheblichen Anteil an der zur Herstellung der Verbindung notwendigen Energie. Beim Schweißen von Stahl entsteht die Erwärmung primär durch den hohen Übergangswiderstand an der Fügestelle und hohen Materialwiderstand der Fügepartner.

Verbindungsarten

Aufgrund der Unterschiede der entstehenden Temperaturhöchstwerte und der meist geringen Abmessungen der Teile, ist die Bildung einer Schmelze beim Widerstandsschweißen von gut leitfähigen Werkstoffen nur bedingt möglich (Bild 7). Die Bildung einer Schmelze ist nicht zwingend notwendig.

Die Schweißverbindung wird im teilplastischen Zustand der Werkstoffe erzeugt (Diffusionsschweißung, Oberflächenschweißung). Dabei ist zu beachten, dass die Oberflächen nicht nur für die Kontaktwiderstände der Wärmeentstehung sondern viel mehr für die Ausbildung der metallurgischen Schweißverbindung von Bedeutung sind. Werden beispielsweise stark oxidierte Metalle miteinander verschweißt, können diese Oxide sich nicht in der Schmelze entmischen, sondern lagern sich bei dieser Diffusionsschweißung genau an der Schweißebene an, mit dem Ergebnis, dass die dynamische Belastbarkeit der Verbindung drastisch sinkt, obwohl durch oxidierte Oberflächen eigentlich ein höherer Kontaktwiderstand, folglich also höhere Temperaturen erzeugt werden. Oberflächen- und Überzugsspezifikationen sind aus diesem Grund sehr wichtig und entscheiden häufig über die Schweißbarkeit.

Hauptvorteil einer Diffusionsschweißung ist die meist höhere dynamische Festigkeit wegen der geringeren Fügepartemperatur und damit geringeren metallurgischen Kerbwirkung.

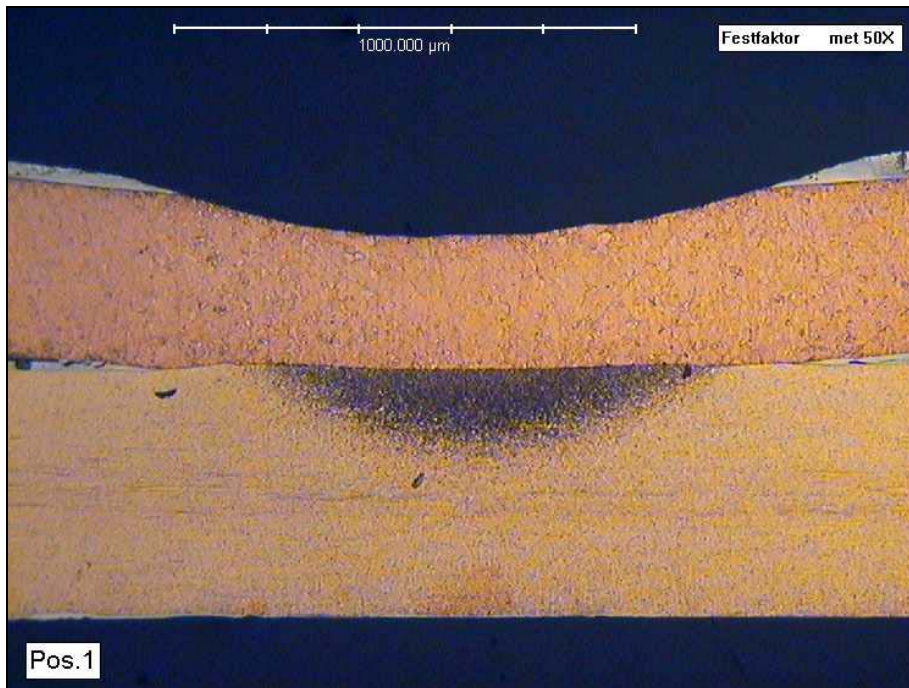


Bild 7. Schliffbild. Punktschweißverbindung.
 Unterer Werkstoff CuSn6 verzinkt 2 – 5 µm, oberer Werkstoff E-Cu58 verzinkt 2 – 4 µm.

5. Dynamische Einflussgrößen

Der 3-dimensionale Prozess

Beim Widerstandsschweißen handelt es sich um einen Fertigungsprozess, der durch die elektrische, mechanische und zeitliche Dimension beschrieben wird. Die vierte Dimension stellt das Material dar, auf das die Schweißanlage aber bis dato keinen Einfluss nehmen kann. Das bedeutet für die Reproduzierbarkeit des Prozesses, dass die dynamische Stabilität der einzelnen elektrischen und mechanischen Prozessparameter sehr wichtig ist. Unkontrollierte elektrische wie auch mechanische Schwingungen während des Prozesses verändern die Wärmeentstehung und auch die Wärmeleitung und sind aus diesem Grund durch Prozessregelung zu vermeiden oder durch Monitoring zumindest zu erkennen.

Aktive Regelung der mechanischen Achse des Schweißprozesses

Während die elektrische Dimension nur relevant ist, solange der Schweißstrom fließt, haben die mechanischen Parameter vor, während und nach dem Fließen des Schweißstromes Einfluss auf die Verbindungsqualität. Sie beeinflussen die Kontaktbedingungen, die für die Wärmeentstehung und die Wärmeableitung verantwortlich sind. Im ersten Prozessschritt müssen die Schweißelektroden schnellstmöglich die Bauteile konstant miteinander kontaktieren, um reproduzierbare elektrische und thermische Bedingungen herzustellen. Besonders bei den meist weichen Werkstoffen ist die Anfangsdeformation nach Applikation der Schweißkraft erheblich. Danach wird der Schweißstrom freigegeben, was zu einem mechanischen „Störimpuls“ führt. Schwingt nun das mechanische System aufgrund ungünstiger Feder-Masse-Verhältnisse, können reproduzierbare Startbedingungen des Prozesses negativ beeinflusst werden. Ebenfalls können durch den elektromechanischen Einfluss des Schweißstromes Schwingungen am Elektrodensystem auftreten. Letzter Prozessschritt ist das Zurückfahren der Elektroden. Die Nachhaltezeit hat Einfluss auf die Abkühlgeschwindigkeit der Fügepartner und somit auf die metallurgischen Eigenschaften der Verbindung. Bei allen Prozessschritten wird deutlich, dass schnelle geregelte Geräte unbestreitbaren Vorteil gegenüber passiven, unregelmäßigen Schweißanlagen haben, besonders unter Berücksichtigung der kurzen Prozesszeit wegen der meist schnellen indirekten Abkühlung der Bauteile. Inverterstromquellen für die schnelle Regelung der elektrischen Parameter sowie servoelektrische Schweißzangen (Bild 8) als steife, aktive mechanische Achse sind in der Praxis bestens bewährt und Stand der Technik [2, 3].

Es wird in Grundprinzipien der Konstruktion von Schweißköpfen unterschieden:

- Mechanisch
 - Fußbetätigung mit Federsystem
 - Nockenbetätigung mit Federsystem
 - Pneumatisch zugestellt mit Federsystem
 - Motorisch zugestellt mit Federsystem

- Pneumatisch
 - o Direkt pneumatisch
 - o Drucksteuerung über Proportionalventil
- Servomotorisch
- Elektromagnetisch
- Piezo-elektrisch

Bei allen Grundprinzipien ist es wichtig, die dynamische Elektrodenkraft zu stabilisieren. Für die Elektrodenbewegung bedeutet diese Anforderung ein trägheitsarmes Beschleunigungsverhalten oder Nachsetzverhalten. Je größer diese Beschleunigung für die jeweilige Schweißapplikation sein muss, desto größer ist der Einfluss der zu beschleunigenden Masse. Aus diesem Grund werden hochwertige Schweißköpfe mit extrem leichten Elektrodensystemen ausgerüstet, um kritische Schweißungen besser zu beherrschen. Der Einfluss der bewegten Masse auf die zuvor beschriebenen Schwingungseffekte ist analog. Diese Schwingungen lassen sich nur durch eine Verringerung der Masse und Vergrößerung der Steifigkeit des Systems minimieren.



Bild 8. Servoschweißzange.

6. Prozessüberwachung und -beurteilung

100% Kontrolle

Besonders bei Verbindungen in der Elektronik, Elektro- und Feinwerktechnik ist die Prozessanalyse und Prozessüberwachung ein wichtiger Bestandteil der Qualitätsbewertung, denn jede Schlechtschweißung hat einen möglichen Komplettausfall einer ganzen Baugruppe zur Folge. Dies trifft bei Kleinteilen besonders zu, wenn die gesamte Verbindung nur aus einem einzigen Schweißpunkt besteht. Ziel ist ganz besonders für diese Anwendungen die Null-Schweißfehler-Produktion.

Für die Bewertung wird für jede Prozessdimension mindestens ein Parameter überwacht. Die Wärmeeinbringung soll durch Monitoring der elektrischen Parameter wie Strom, Spannung oder abgeleitete Größen sichergestellt werden. Der mechanische Prozessparameter Kraft beschreibt die thermische und elektrische Kontaktierung. Die Differenz aus Wärmeeinbringung und Wärmeableitung an der Schweißstelle wird über den Einsinkweg indirekt abgeleitet und stellt bei dynamischer Reproduzierbarkeit eine 100%-ige Prozessüberwachung dar.

Grafische Auswertung und Analyse

Unterschiedliche grafische Darstellungen der Prozessparameter ergeben detaillierte Informationen:

- Dynamischer Prozessverlauf (Prozesseinzelbewertung) (Bild 9),
- Verlaufsanzeige SPC-Runchart (Trend) (Bild 10),
- Histogramm (Stabilität, Analyse systematischer Fehler) (Bild 11).

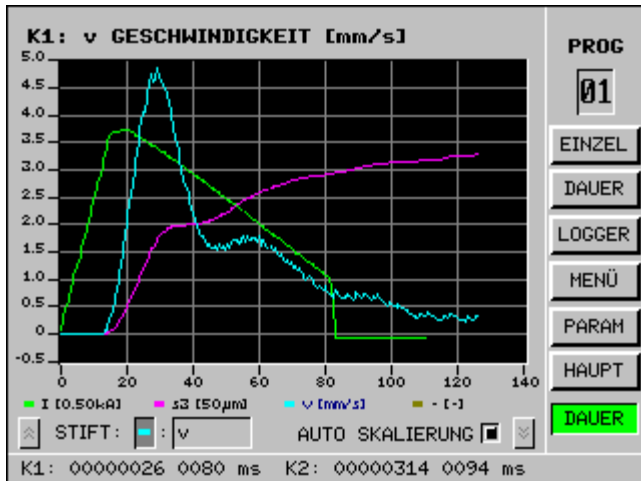


Bild 9. Kurvenverläufe.

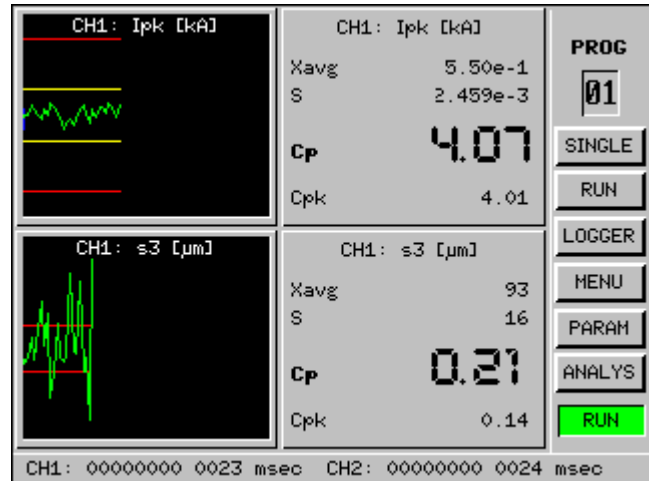


Bild 10. SPC-Runchart.

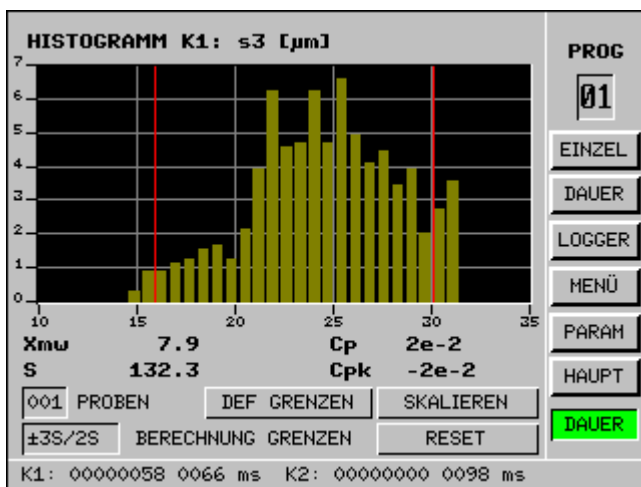


Bild 11. Histogramm.

Beispielsweise können zu progressive Einsinkwegverläufe als beschleunigte Bewegungen während des Schweißvorganges erkannt werden und das Profil des Schweißstromes daraufhin angepasst werden. Andererseits können Nebenmaxima in der Normalverteilung der Energie einen störenden Nebenschluss an der Schweißstelle aufdecken. Hilfreich ist auch die Möglichkeit, durch sichtbare Veränderung der Prozessparameter auf dem SPC-Runchart rechtzeitig Gegenmaßnahmen einzuleiten, bevor es zu fehlerhaften Teilen kommt.

Statisches und dynamisches Monitoring

Bei der Prozessüberwachung wird nach statisch und dynamisch unterschieden. Statisches Monitoring ist das Vergleichen der gemessenen numerischen Prozessparameter mit den eingestellten Limits. Hingegen ist das dynamische Monitoring das Vergleichen jedes einzelnen Punktes eines Kurvenverlaufs. Diese Hüllkurvenüberwachung stellt somit die Kombination aus quantitativer und qualitativer Überwachung dar. Hauptziel ist das Finden und Markieren von Teilen deren Prozessparameter ungewünschte Schwingungen oder Schwankungen während des kurzen Prozesses aufweisen und somit nicht dem definierten Prozessverlauf entsprechen (Bild 12).

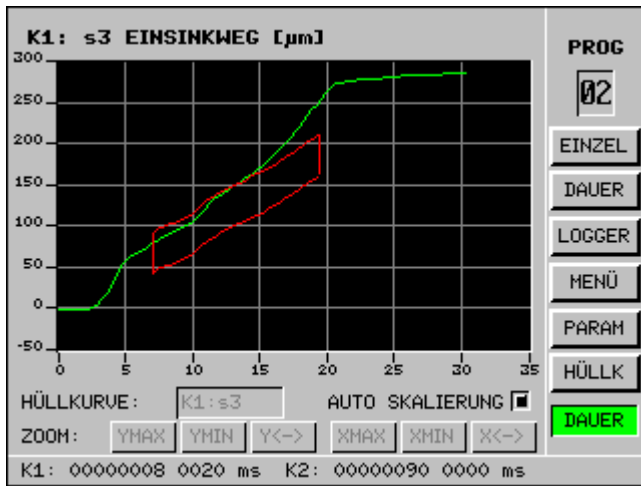


Bild 12. Schlechtsschweißung – Wegverlauf außerhalb Hüllkurve.

Interaktionen bei Erreichen der Grenzwerte

Zusätzlich zur Regelung der elektrischen und mechanischen Parameter auf gewisse Sollwertkurven hin sind Regelungen sinnvoll, die interaktiv auf das Verletzen von eingestellten Grenzwerten reagieren. Dabei kann bei Erreichen einer Grenze der Prozessablauf verändert oder gestoppt werden. Zu einem regelrechten Qualitätssprung hat vor einiger Zeit die „wegabhängige Stromabschaltung“ verholfen. Neueste Interaktionen wie zum Beispiel APC zielen auf die Stabilisierung der Anfangsbedingungen des Prozesses [4].

7. Trend

Der Trend der Prozesstechnik geht zu adaptiv geregelten Prozessen. Sicher werden zukünftige Geräte durch Feedbackinformationen über die Qualität der geschweißten Teile sich selbst optimieren oder zumindest Fehlerquellen aufdecken. Wichtig aber bleibt bei all der Komplexität des Prozesses die intuitiv leichte Bedienbarkeit und einfache Beschreibbarkeit.

8. Schrifttum

- [1] Schmitz G. und Lindner, K.: Mikrofügetechnik – Stand und Ausblick. DVS-Berichte Band 225, S. 1. Düsseldorf 2003
- [2] Greitmann, M., Volz, O., Stamm, R., Kundrat, J., Böhmert, E. und Mittler, B.: Untersuchung zur Eignung von piezoelektrischen Aktoren als Nachsetzelemente für die Widerstandsschweißtechnik. Schweißen und Schneiden, 53 (1), S.10-19. Düsseldorf 2001.
- [3] Schmid-Dörnte, J., Kundrat, J. und Böhmert, E.: Der Servoschweißkopf – Dynamik im Schweißprozess, Regelbarkeit der Servoantriebes. DVS-Berichte Band 189, S.127-130. Düsseldorf 1998.
- [4] Putting Active Part Conditioner (APC) to Work. Unitek Newsletter, Volume 4/No.2. Monrovia, CA 2001.

Miyachi Europe GmbH

Lindberghstraße 1
D-82178 Puchheim

Tel.: +49 89 839403 0
Fax: +49 89 839403 10
Email: contact@mec.miyachi.com
www.miyachieurope.com



