



# Widerstandsschweißen von Kleinteilen

Credé Elektronik GmbH  
Hanauerstr. 12  
75181 Pforzheim

Autor : Marcel Credé

Pforzheim, 21.01.2010

Inhaltsverzeichnis:

1. Vorwort
2. Einführung in die Grundlagen
  - 2.1. Die elektrischen Widerstände als maßgebliche Größen
  - 2.2. unterschiedliche Verfahren zur Stromerzeugung
    - 2.2.1. Wechselstrom Quelle
    - 2.2.2. Dreiphasen-Gleichrichtung
    - 2.2.3. Kondensatorentladung
    - 2.2.4. Mittel-/Hochfrequenz
    - 2.2.5. Transistor geregelter Gleichstrom
  - 2.3. Sekundär/Primärregelung und deren Unterschiede
3. Parameterveränderung und deren Wirkung
  - 3.1. Stromregelung, Spannungsregelung, Leistungsregelung
  - 3.2. Druck
  - 3.3. Regelgröße
  - 3.4. Zeit / Impuls
  - 3.5. Abschaltart Zeit oder Weg
  - 3.6. Überwachungen
4. Polarität
5. Nachsetzverhalten
6. Werkstoffe und Oberflächen
  - 6.1. Werkstoffe
  - 6.2. Oberflächenveredelung
7. Elektrodenmaterialien
8. Elektrodengeometrie
9. Schweißköpfe
  - 9.1. Punktschweißkopf
  - 9.2. Schweißzange
  - 9.3. Spaltschweißkopf
  - 9.4. Kompaktierwerkzeug
10. Widerstandsschweißungen, deren Geometrie und Auslegung im Schweißbereich
  - 10.1. Punktschweißen
  - 10.2. Kreuzschweißung
  - 10.3. Buckelschweißen mit Schweißwarzen
  - 10.4. Buckelschweißen mit Schweißwellen
  - 10.5. Spaltschweißen
  - 10.6. Schweißen mit Schweißgabeln (Hot Staking)
  - 10.7. Schweißen mit Schweißblaschen
  - 10.8. Kompaktierung

- 11. Geometrie von Kunststoffen um den Schweißbereich
- 12. Einflüsse auf den Schweißprozess und die Prozessfähigkeit
  - 12.1. Verschmutzungen der Elektrode
    - 12.1.1. Öle/Fette von Stanzprozessen
    - 12.1.2. Passivierung / Theolen
    - 12.1.3. Kunststoffe im Schweißbereich
  - 12.2. Stanzgrat
  - 12.3. Positionsveränderungen / Toleranzen
  - 12.4. Materialhärte
  - 12.5. Oxidationen / Lagerzeiten
- 13. Prozessvalidierung und deren Umfang bis zur DOE
- 14. Prozessbegleitende QS
  - 14.1. Zug- / Druckprüfung
  - 14.2. Torsionprüfung
  - 14.3. Schälversuch
  - 14.4. Schliffbilder
- 15. Fertigungsbegleitende Visualisierung und Chargendokumentation
- 16. Literaturverzeichnis und Quellen

## 1. Vorwort

Dieses Handbuch dient zur Unterstützung des Maschinenbedieners und des Einrichters, es soll ihm die physikalischen Grundlagen erklären und so das Verständnis für den Schweißprozess schulen, damit er auftretende Probleme besser erkennt und Ursachen für diese Probleme schneller beseitigen kann.

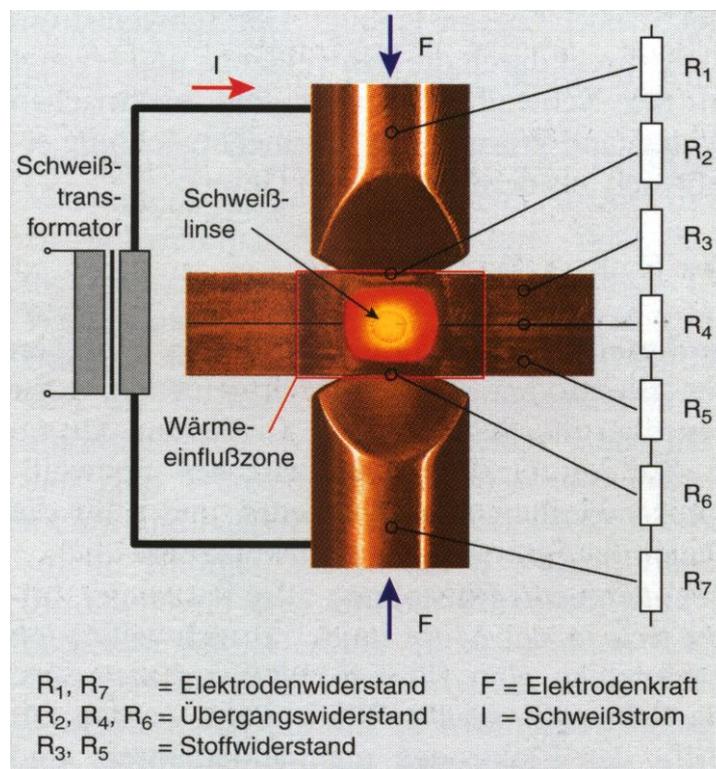
In den Kapiteln 10-12 sind auch konstruktive und Prozesstechnische Überlegungen gezeigt, die den Maschinenbediener für ev. Optimierungsprozesse betreffen aber auch gezielt die Konstrukteure ansprechen soll. Hier kann durch eine sinnvolle Konstruktion und Auslegung des Schweißbereiches bereits bei der Planung über die Prozessfähigkeit und die Ausschussquote entschieden werden.

## 2. Einführung in die Grundlagen

### 2.1 Die elektrischen Widerstände als maßgebliche Größen

Wie der Name Widerstandsschweißtechnik bereits verrät geht es im wesentlichen um die elektrischen Widerstände der Teile, sowie um die Übergangswiderstände.

Durch diese elektrischen Widerstände wird zusammen mit dem eingestellten Strom so viel Hitze erzeugt, dass das Material flüssig wird und sich miteinander verbindet.



(Abb. 1) Widerstandsverhalten und Schweißlinse

In der Abbildung 1 wird Ihnen veranschaulicht, wie viele Widerstände im Schweißbereich vorhanden sind. Diese sind zum einen temperaturabhängige Materialwiderstände (R1,R3,R5,R7) und zum anderen Übergangswiderstände (R2,R4,R6).

Ziel ist es die Hitze und damit die Schweißlinse zwischen den zu verbindenden Teilen zu erzeugen und während des gesamten Serienprozesses konstant zu halten.

Die Schweißlinse wird sich immer dort ausbilden, wo der durchschnittliche Widerstand am höchsten ist, die Konstanz für den Serienprozess kann dann eingehalten werden, wenn die Widerstände ebenfalls konstant gehalten werden können.

Damit muss dies die höchste Priorität für den Schweißprozess haben.

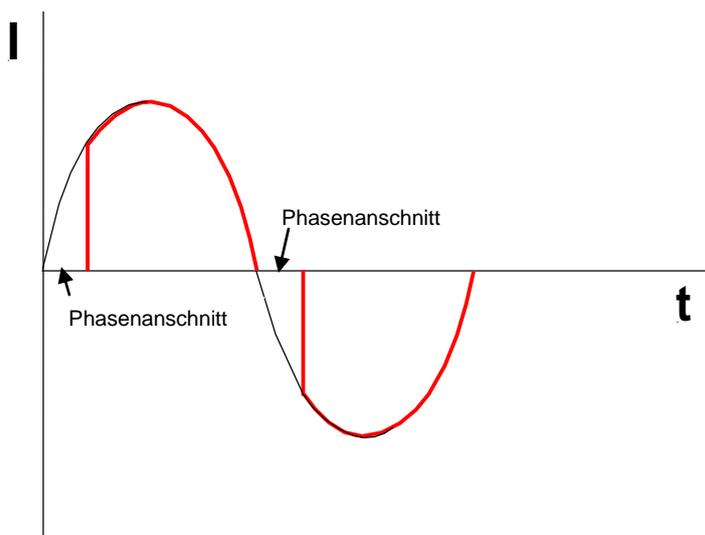
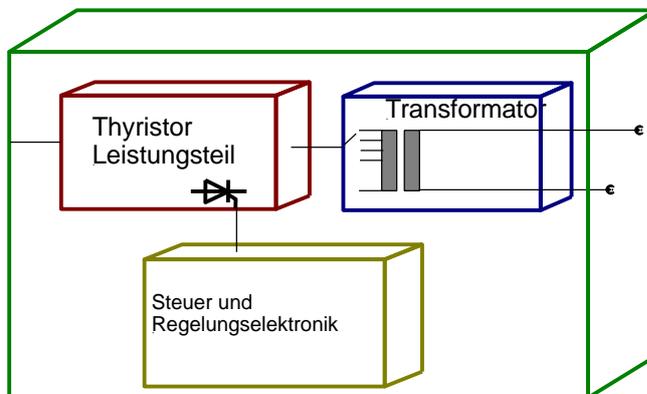
Im Umkehrschluss bedeutet dies: wenn eine Schweißverbindung plötzlich nicht mehr die selbe Qualität besitzt, liegt das im allgemeinen nicht an der Schweißmaschine sondern an einer Veränderung des Widerstandsnetzwerkes, was letztlich dazu führt, das die Schweißlinse nicht mehr zwischen den zu verbindenden Teilen ist.

Welche Problem hier in der Anwendung entstehen und welche Möglichkeiten vorhanden sind um diesen zu begegnen werden wir Ihnen in diesem Handbuch schildern. Letztlich muss es immer ein zusammen Spiel aus einer guten Konstruktion/Auslegung des Schweißbereiches und einem Serienprozess sein, der die vorhandenen Widerstände möglichst nicht oder nur in geringem Maße verändert.

## 2.2 unterschiedliche Verfahren zur Stromerzeugung

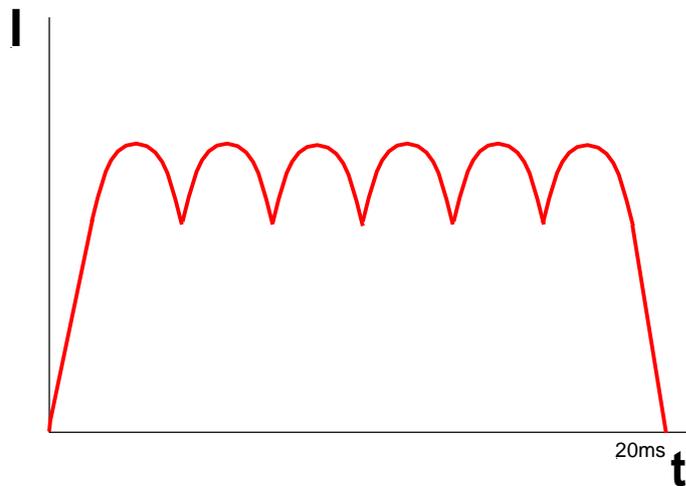
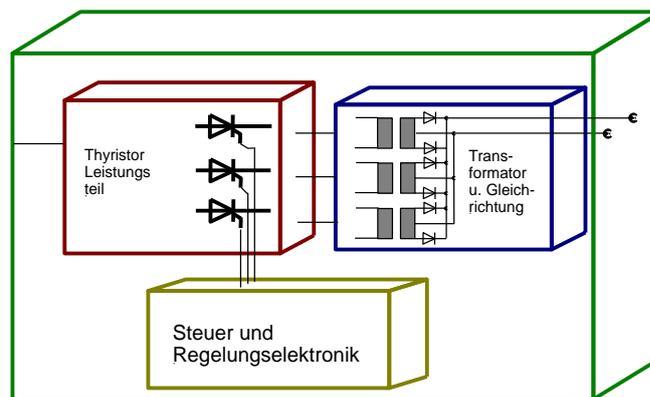
### 2.2.1 Wechselstrom Quelle

Wechselstromsteuerungen für einphasigen Netzanschluß stehen für die Anfänge der Widerstandsschweißtechnik. Auch heute noch ist eine starke Nachfrage nach Widerstandsschweißmaschinen mit Wechselstromtechnik vorhanden. Diese Steuerungen arbeiten netzsynchron und entnehmen die Energie unmittelbar aus dem Netz. Daher muß das Netz gut geregelt und in der Lage sein die Energie zu liefern. Die Leistungseinstellung erfolgt einerseits durch eine feine Abstufung der Sekundärspannung, andererseits stufenlos durch Phasenanschnitt. Der Anwendungsbereich liegt bei unkomplizierten und leicht schweißbaren Teilen, bei denen keine exakte Regelung der Schweißenergie notwendig ist; Teile die im allgemeinen sehr lange Schweißzeiten benötigen.



## 2.2.2 Dreiphasen-Gleichrichtung

Die Dreiphasen-Sekundärgleichrichtung hat im Vergleich zum Wechselstrom bereits den Vorteil der Polarität und einen kontinuierlichen Schweißimpuls ohne eine Pause. Die Regelung erfolgt lediglich über die Länge und Höhe des Schweißimpulses, die Anstiegszeit ist vorgegeben. Der Anwendungsbereich liegt ebenfalls bei einfachen Schweißaufgaben.

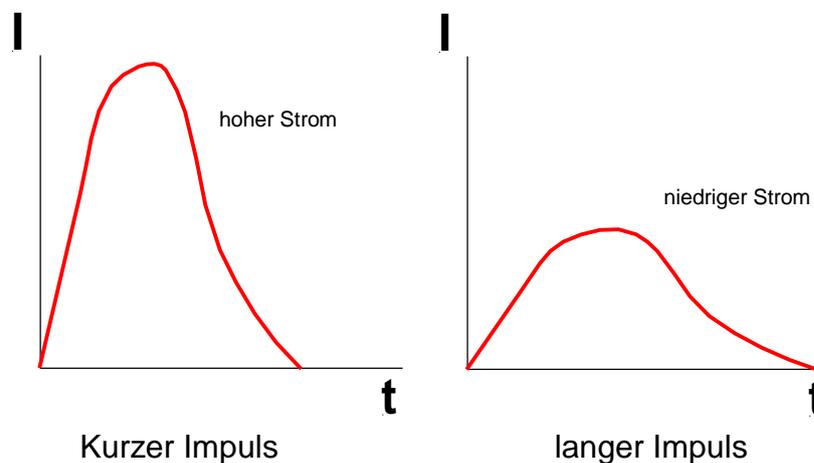
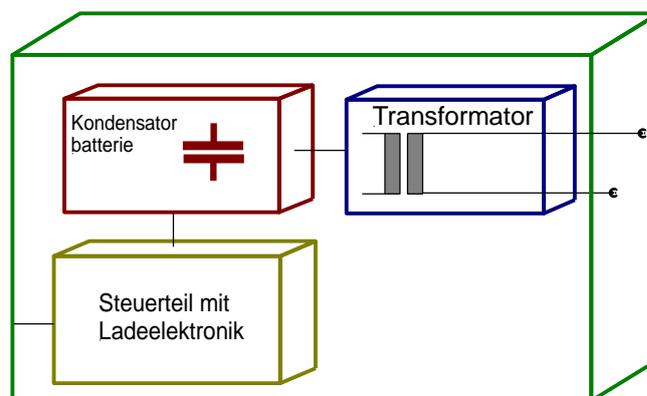


### 2.2.3 Kondensatorentladung

Vorteil von Steuerungen mit Kondensatorentladungstechnik ist die geringe Stromaufnahme aus dem Netz. Eine Kondensatorbatterie wird über längere Zeit mit einem niedrigen Strom aus dem Netz auf eine einstellbare, stabilisierte Spannung aufgeladen, die unabhängig von der Netzspannung ist. Bei Auslösung des Schweißvorgangs wird die so gespeicherte elektrische Energie während einer äußerst kurzen Zeitspanne von wenigen Millisekunden mit sehr hoher Stromamplitude über einen Transformator an das Werkstück abgegeben.

Der Nachteil liegt in der stark eingeschränkten Regelbarkeit des Stromes.

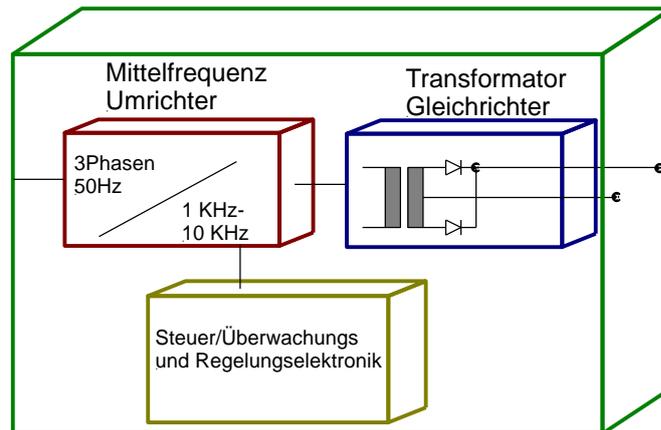
Der Kuvverlauf ist durch die Kondensatorentladungskurve vorgegeben und lediglich in seiner Stromhöhe einstellbar.



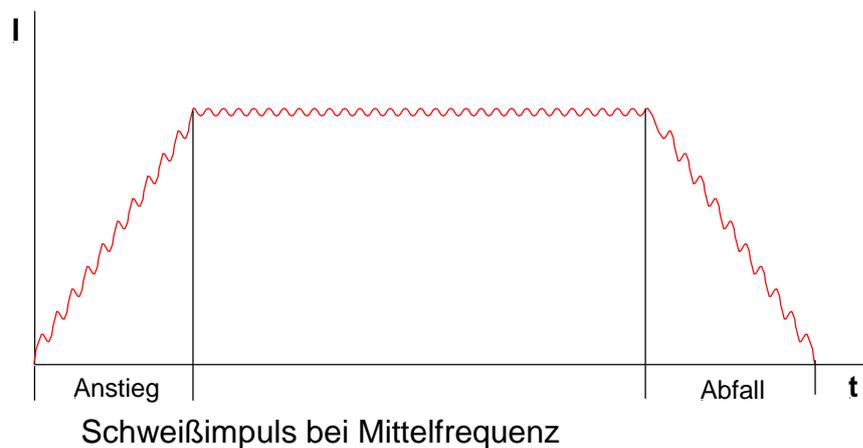
## 2.2.4 Mittel-/Hochfrequenz

Die Mittel-/Hochfrequenz –Invertertechnik kommt mit ihrem Regelverhalten dem des geregelten Gleichstroms am nächsten, sie ist in ihrer Anstiegszeit aber immer noch eingeschränkt und abhängig von der Frequenz. Ein weiterer Nachteil ist die Restwelligkeit über den gesamten Schweißimpuls.

Ihr Vorteil liegt darin, dass durch die Hochfrequenztechnik die Leistungsteile deutlich kleiner sind, als die für eine Gleichstromregelung mit Halbleitern.



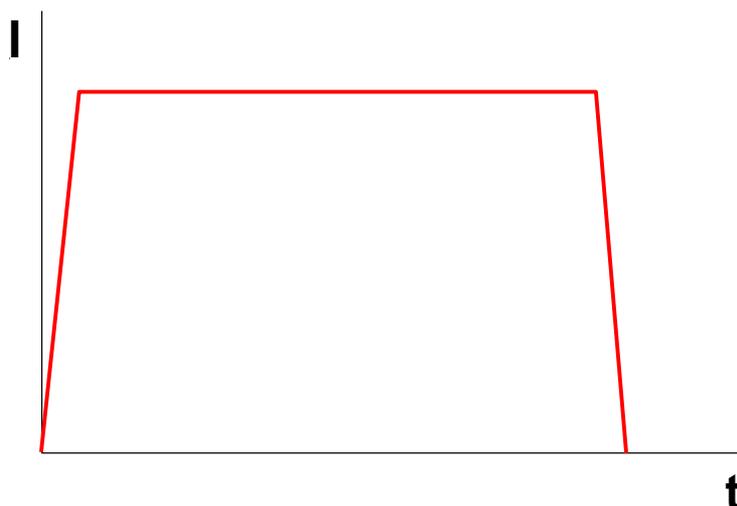
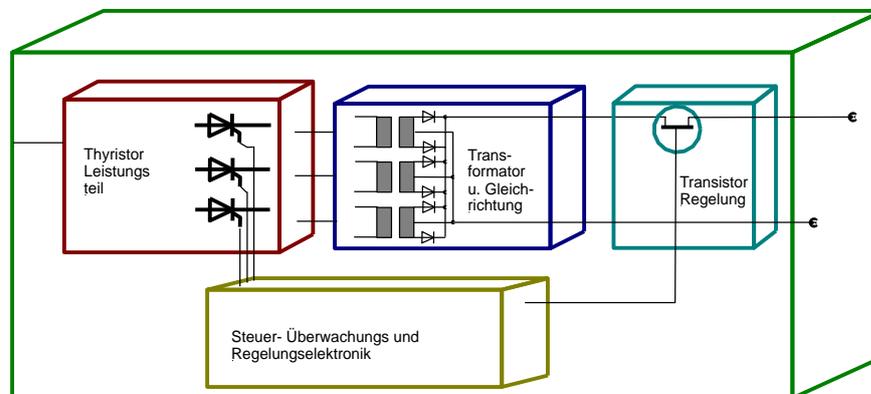
Prinzipaufbau Mittelfrequenzinverter



## 2.2.5 Transistor geregelter Gleichstrom

Bei Transistor-geregelten Gleichstrommaschinen erfolgt das Schalten und Steuern des Schweißimpulses nicht auf der Primärseite mit Phasenanschnitt über Thyristoren, sondern auf der Sekundärseite über Transistoren hinter den Gleichrichterdiolen. Die höchstmögliche Schaltleistung und die abzuführende Verlustleistung begrenzen die Ausgangsleistung.

Geringste Verluste und beste Steuerbarkeit prädestinieren die geregelte Gleichstromtechnik auch für die Lösung bislang unbewältigter Fügeaufgaben. Der Schweißimpuls läßt sich beliebig komplex einstellen. Anstiegszeiten von 1ms auf einen Endstrom von 20 kA sind realisierbar. Durch diese Flexibilität der einstellbaren Stromverläufe läßt sich der Prozeß hervorragend auf das Widerstandsgefüge der Schweißaufgabe einstellen.



## **2.3 Sekundär/Primärregelung und deren Unterschiede**

Der Unterschied zwischen einer Primär oder Sekundärregelung bezieht sich auf die Position an der für das elektrische Regelverfahren die notwendigen Informationen abgefragt werden. Der entscheidende Unterschied ist, dass bei einer Primärregelung der Trafo mit im Regelkreis ist, und somit das gesamte Regelverhalten viel träger wird. Eine Sekundärregelung ist also für ein schnelles Regelverhalten unumgänglich.

Bei den Sekundärregelungen ist zusätzlich noch zu unterscheiden, ob es sich um eine transistorgesteuerte Konstantstromregelung oder eine Inverterstromtechnik handelt. Bei der transistorgesteuerten Konstantstromregelung erhält man ein noch genaueres Regelverhalten als bei einer Inverterstromtechnik, da hier zwischen den Schweißteilen und dem Trafo die notwendigen Transistoren sitzen, die den gewünschten Strom exakt regeln.

Wenn also bei einer Inverterstromquelle ein schnelles Abschalten des Stromes gewünscht wird, fließt die gesamte Restenergie die noch im Trafo gespeichert ist in das Schweißgut, hingegen bei der Transistorregelung werden diese Restenergien in Wärme umgewandelt. Diese Energie gelangt also nicht in das Schweißgut. Die Teile und die Elektroden werden somit im Falle eines gewünscht schnellen Abschaltens des Schweißimpulses geschützt.

## **3 Parameterveränderung und deren Wirkung**

Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich auf normale Punktschweißungen mit Kupferwerkstoffen. Bei anderen Materialien oder Schweißaufgaben ( HotStaking oder Kompaktierungen) können sich andere Gesetzmäßigkeiten ergeben. Das Grundprinzip ist aber das selbe. Letztlich muss immer betrachtet werden, was eine Veränderung der Parameter für Auswirkungen auf das Widerstandverhalten oder die Wärmeverhältnisse in der Verbindung hat.

### **3.1 Stromregelung, Spannungsregelung, Leistungsregelung**

In neuen Steuerungsgenerationen kann der Bediener auswählen welche Größe konstant geregelt werden soll. Im allgemeinen führt die Stromregelung zu den konstantesten Ergebnissen bezogen auf den Serienprozess, da hier Veränderungen in den Zuleitungen und zusätzliche Spannungsabfälle den geringsten Einfluss auf das Ergebnis und die Qualitätsauswertung haben .

Die Spannungs- oder Leistungsregelung wird hauptsächlich dann eingesetzt, wenn Materialien deutlich schwankende temperaturabhängige Materialwiderstände haben, die dann bei flüssigem Material zu einer regelrechten Explosion der Teile führt. Bei Kupferwerkstoffen ist dies nicht der Fall.

### 3.2 Druck

Durch Veränderung des Druckes für den Schweißprozess werden sämtliche Übergangswiderstände beeinflusst. Das bedeutet: um so höher der Druck ist, um so besser kontaktieren sich die Teile. Der Übergangswiderstand wird also bei höherem Druck kleiner. Damit wird bei kleinerem Übergangswiderstand und konstantem Strom das Schweißergebnis schwächer.

Um so höher der Druck, um so schwächer wird die Schweißung.

Um so niedriger der Druck, um so stärker wird die Schweißung.

Wir müssen für den Schweißprozess eine Schweißlinse genau zwischen den zu verbindenden Teilen erzeugen, und dies erreichen wir am besten, wenn der Widerstand R4 am höchsten ist.

Ziel sollte also sein, mit so wenig wie möglich Druck zu schweißen, denn dann ist der R4 sehr groß. Ein weiterer Grund für geringe Drücke sind die Schweißwarzen und Wellen (siehe Kapitel 10), die bei einem hohen Druck wieder zurückgeformt werden, ohne dass Sie Ihren Vorteil ausspielen können.

Wenn der Druck aber zu klein wird, haben wir das Problem, dass der Schweißprozess eine sehr hohe Spritzneigung hat. Dies ist hauptsächlich ein Problem der Schweißköpfe (siehe Kapitel 5 Nachsetzverhalten).

Ein weiteres Problem bei zu kleinem Druck ist das anlegieren der Schweißteile an die Elektrode (Klebneigung). Dieses Phänomen erklärt sich am einfachsten durch einen zu großen Übergangswiderstand zwischen der Elektrode und dem Teil. Was letztlich dazu führt, dass sich das Teil auch mit der Elektrode verbinden möchte.

### 3.3 Regelgröße

Die Regelgröße (Strom, Spannung, Leistung) in Abhängigkeit des eingestellten Regelverfahrens sollte zu Beginn etwas niedriger gewählt werden. Man tastet sich dann im Laufe der Versuche von unten an das ideale Ergebnis heran. Hier sind die Gesetzmäßigkeiten relativ einfach: um so größer der Wert eingestellt wird, um so stärker wird die Schweißung.

### 3.4 Zeit / Impuls

Die eingestellten Zeiten unterteilen sich in eine Anstiegszeit, eine Schweißzeit, eine Abfallzeit und eine Pause. Je nach Steuerung kann dies mehrmals wiederholt werden, und so ein beliebig komplexer Kurvenverlauf erzeugt werden. (ein Vorglühen/Schließen von dem Schweißgut und ein 2. deutlich höherer Schweißimpuls)

Die wichtigsten Zeiten sind dabei die Anstiegs und Schweißzeiten.

Mit der Schweißzeit und der Höhe der Regelgröße wird die gesamte Energie bestimmt, die die Teile in den flüssigen Zustand bringen soll.

Mit der Anstiegszeit wird bestimmt, wie schnell das Ganze durchgeführt werden soll.

Prinzipiell sollte ein Schweißprozess lieber so hoch (Regelgröße) und so schnell wie möglich durchgeführt werden. Hierzu muss die Anstiegszeit möglichst kurz sein, damit der gewünschte Strom (Spannung, Leistung) so schnell wie möglich erreicht wird, und so die höheren Übergangswiderstände zwischen den Teilen so lange genutzt werden, solange diese noch vorhanden sind.

Die maximal erreichbare Geschwindigkeit ist wiederum abhängig vom Nachsetzverhalten (siehe Kapitel 5).

Bei zu kurzer Anstiegszeit entsteht wieder eine verstärkte Spritzneigung.

Eine sehr lange Schweißzeit verstärkt das Problem der Anlegierung bei CuFe-Materialien.

Mit der Pausenzeit bestimmen wir, wie lange die Elektroden nach dem Schweißvorgang noch geschlossen bleiben, wir müssen den Teilen die Zeit geben, dass das flüssige Material wieder erstarren kann.

Zudem nehmen wir auf diese Weise deutlich mehr Hitze aus den Teilen in die gekühlten Elektroden auf, und schonen somit die Umgebung der Schweißpunkte.

Die Abfallzeit hat nur bei einer Kombination mit mehreren Impulsen eine Relevanz.

### 3.5 Abschaltart Zeit oder Weg

Im normal Fall wird der Schweißimpuls so durchgeführt, wie er mit den einzelnen Schweißzeiten programmiert wurde. In einzelnen Fällen ist es allerdings sinnvoll, nach Erreichen einer Schweißtiefe den Stromimpuls sofort zu beenden, da bei dieser definierten Schweißtiefe davon auszugehen ist, dass das Schweißergebnis gut ist. Diese Abschaltvariante wird immer dort eingesetzt, wo aufgrund von Toleranzen und Oberflächenverunreinigungen im Serienprozess unterschiedliche Übergangswiderstände zwischen den Schweißteilen zu erwarten sind. Auf diese Weise erreicht man trotz der schlechten Grundvoraussetzungen immer noch relativ gute Prozessfähigkeiten.

### 3.6 Überwachungen

Für die Qualitätsauswertung werden während des Schweißprozesses mehrere Parameter überwacht, für die Ober- und Untergrenzen eingegeben werden. Aufgrund dieser Grenzwerte wird dann eine Qualitätsaussage über die Schweißung möglich.

Überwacht wird die Schweißtiefe sowohl der erreichte Endwert, wie auch der gesamte Kurvenverlauf; die Spannung (bei Stromregelung) als maximaler Wert und effektiver Wert (Analog bei anderen Regelungsarten). Im Falle der Abschaltart Weg wird zusätzlich die Schweißzeit überwacht.

## 4 Polarität

Bei einem Schweißverfahren mit einer Gleichstromquelle wird die Seite der Materialien wärmer, die mit dem Pluspol der Stromquelle verbunden ist.

Dieses Phänomen tritt nur beim verschweißen unterschiedlicher Materialien auf und verschiebt somit die Schweißlinse in Richtung des Pluspols der Stromquelle. Der Effekt wird allgemein als Peltiereffekt bezeichnet.

## 5 Nachsetzverhalten

Unter Nachsetzverhalten versteht man die Eigenschaft, wie schnell die mechanischen Schweißköpfe eine Schließbewegung durchführen können, oder in wie weit diese an der Schließbewegung gehindert werden; z.B. durch Reibung oder Massen die bewegt werden müssen.

Während des Schweißprozesses werden die Teile in Millisekunden flüssig und diffundieren ineinander. Hier werden je nach Schweißanwendung Wege von bis zu 500µm gemacht. Dies bedeutet, dass innerhalb dieser Zeit die Elektrode den Kontakt zum Teil nie verlieren darf. Somit wird der minimal mögliche Druck und die minimal mögliche Anstiegszeit der Regelgröße durch die Mechanik und hier insbesondere das Nachsetzverhalten und die Massen bestimmt. Die Schweißköpfe sind deshalb gefedert aufzubauen, damit diese Federung mit geringen Massen unmittelbar entstehenden Wegen nachhelfen kann.

## 6 Werkstoffe und Oberflächen

### 6.1 Werkstoffe

Durch immer exaktere Regelverhalten und Regelkriterien sind immer neue Werkstoffe schweißbar, die seither als nicht oder nur schwer schweißbar gegolten haben. Für die Umsetzung eines Serienreifen Prozesses sind allerdings je nach Wahl der Werkstoffe mehr oder weniger Auflagen und Randbedingungen zu erfüllen, die eine Wirtschaftliche Fertigung überhaupt erst ermöglichen.

Durch den Einsatz in der Elektronik sind in den letzten Jahren die Kupferwerkstoffe deutlich in den Vordergrund getreten, die sich in fast allen Legierungen schweißen lassen.

Aber auch andere Werkstoffe wie Titan, Stahl, Neusilber oder Hartmetall lassen sich schweißen.

Um die Schweißbarkeit Ihrer Werkstoffpaarungen und die korrekten Randbedingungen für eine Fertigungsreife Lösung zu erörtern bitten wir Sie, sich möglichst in der Konstruktionsphase Ihrer Projekte an uns zu wenden. Zu diesem Zeitpunkt können wir kostenneutral die gesamte Konstruktion zu einer Fertigungsreifen Schweißaufgabe umsetzen.

Wir stellen Ihnen gerne unsere Erfahrung zur Verfügung, und ermitteln die richtigen Schweißparameter für den Serienstart.

## 6.2 Oberflächenveredelung

Die Oberflächenveredelung besitzt einen sehr hohen Stellenwert für die Qualität und Prozessfähigkeit der Schweißung. Durch die Oberflächenbeschichtung mit Zinn, Silber oder Gold können schlechte Eigenschaften der Werkstoffe für den Schweißprozess (Oxide) oder Verunreinigungen der Oberflächen behoben werden, und so eine Prozessfähigkeit gewährleistet werden. Wichtig dabei ist, dass die Oberflächenbeschichtungen in Ihrer Schmelztemperatur niedriger als die des Grundwerkstoffes ist.

Wenn das nicht der Fall ist wirkt die zusätzliche Schicht wie eine Trennschicht zwischen den Schweißmaterialien, die jegliche Diffusion der Materialien ineinander unterbindet.

Auf jegliche Form von Passivierungen oder Theolenen sollte so weit wie möglich verzichtet werden, da diese Schwefelverbindungen zu einer Verrußung der Elektroden führt, und somit die Prozessfähigkeit sehr negativ beeinflussen. (Theolene und Passivierungen werden als Anlaufschutz von z.B. Silberoberflächen eingesetzt)

## 7 Elektrodenmaterialien

Die Wahl des Elektrodenmaterials ist abhängig von den zu verbindenden Schweißgut. Wenn wir ein Schweißgut mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit haben (z.B. Kupfer), müssen wir eine Elektrode mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit einsetzen, damit die erzeugte Hitze im Bereich der Schweißlinse erhalten bleibt, und nicht problemlos nach außen abgeführt werden kann.

Dies sind dann Wolfram-, Wolframlegierungen oder Molybdän- Elektroden.

Wenn wir dagegen Schweißgut mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit verschweißen, werden Kupfer, Wolfram-Kupfer oder Kupfer-Chrom-Zirkon Elektroden eingesetzt.

Diese verhindern, dass der Schweißbereich überhitzt.

Durch unterschiedliche Elektrodenmaterialien an der oberen und unteren Elektrode, kann die Schweißlinse gezielt aus dem Zentrum verschoben werden. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn aufgrund der Schweißmaterialien kein bestimmtes Elektrodenmaterial zwingend erforderlich ist.

## 8 Elektrodengeometrie

Durch die Veränderung der Elektrodengeometrie kann mehr oder weniger Wärme in das Teil eingebracht werden (analog zum Elektrodenmaterial Kapitel 7 ). Dies ist ebenfalls auf die entsprechenden Übergangswiderstände zurückzuführen. Bei einer kleineren bis zu einer punktförmigen Berührung wird der entsprechende Widerstand deutlich vergrößert und gleichzeitig die Wärmeabfuhr durch die Elektrode reduziert und somit die Position der Schweißlinse mehr nach oben oder unten in dem Schweißmaterial verschoben, je nachdem ob die Oberfläche der oberen oder unteren Elektrode verkleinert wird.

Der Nachteil einer kleinen Elektrode liegt allerdings in der Standzeit der Elektrode. Eine kleine punktförmige Elektrode arbeitet sich schneller ein und verschleißt somit schneller. Das Ziel sollte also sein, eine möglichst große Elektrode einzusetzen.

## 9 Schweißköpfe

Der Punktschweißkopf und die Schweißzangen sind geeignet für Punkt oder Buckelschweißungen, sowie Gabel oder Laschenschweißungen also die Standardverbindungen beim Widerstandsschweißen. Der Spaltschweißkopf und das Kompaktierwerkzeug spezielle Verfahren des Widerstandsschweißen.

### 9.1 Punktschweißkopf

Der Punktschweißkopf besteht im allgemeinen aus einem oberen Schweißkopf und einem unteren Schweißkopf. Der untere Schweißkopf dient als Amboss und hebt das zu verschweißende Teil leicht aus der Aufnahme. Hierbei ist sicherzustellen, dass der Kontakt zwischen Teil und Elektrode immer gewährleistet ist, und die Teile niemals hohl liegen können.

Eine Variante der unteren Elektrode ist, eine feste Einarbeitung in die Aufnahme, so dass das Teil immer direkt auf die Elektroden aufgelegt wird. Auch hier ist auf einen guten Kontakt zwischen den Elektroden und dem Teil zu achten.

Das obere Werkzeug wird normalerweise pneumatisch angetrieben, der genaue Schweißdruck wird dabei über ein Proportionalregelventil geregelt und kann so je nach Parametersatz von Schweißpunkt zu Schweißpunkt unterschiedlich sein. Durch den oberen Schweißkopf wird das Nachsetzverhalten bestimmt (Siehe Kapitel 5) deshalb ist es wichtig, dass die bewegten Massen möglichst klein sind, die Schweißköpfe sehr schnell entsprechende Wege nachsetzen können. Die Schweißköpfe von Credé Elektronik sind deshalb alle mit Federn aufgebaut, die entsprechend der Federhysterese den anliegenden Schweißdruck 1:1 umsetzen können, ohne das Zeit durch Regelungen und Sensorerkenntnisse verloren geht.

### 9.2 Schweißzange

Im Programm von Credé Elektronik wird zwischen zwei Schweißzangen unterschieden: das eine ist die Drehpunkt-Schweißzange und das andere ist die parallel schließende Schweißzange.

Die Drehpunkt-Schweißzange ist die einfachere Variante der Schweißzange. Sie ist optimiert auf das Nachsetzverhalten und möglichst kleine Massen. Aus diesem Grund ist sie relativ klein und benötigt wenig Platz. Sie eignet sich ideal für den Einsatz bei kleinen und schwierigen Teilen bei denen ein schnelles Nachsetzverhalten gewährleistet sein muss. Die Schweißzange ist schwimmend aufgebaut, was bedeutet, dass sich die Zange an den Teilen ausrichten kann, wenn diese verbogen sind, und nicht die Zange die Teile richtet oder verbiegt, da hierdurch Veränderungen des Schweißdruckes und damit des Schweißergebnisses entstehen würden. Sie hat nur den Nachteil, dass der Schweißdruck über die mechanische Vorspannung der Feder eingestellt wird, und somit in einer Anlage pro Zange immer nur mit einem Druck geschweißt werden kann.

Bei der parallel schließende Schweißzange wird die Schweißkraft mit einem Proportionalregelventil eingestellt, und kann somit von Schweißpunkt zu Schweißpunkt unterschiedlich sein. Sie ist wie der Name schon sagt parallel schließend und kann deshalb in kleinere Freiräume eintauchen, benötigt aber im hinteren Bereich der Zange mehr Platz durch die Führungen. Beide Schenkel der parallel schließenden Schweißzange sind gefedert aufgebaut, für ein schnelles Nachsetzverhalten. Die Zange schließt immer auf

einen Mittelpunkt und ist um diesen Bereich, aufgrund der beidseitigen Federung, leicht schwimmend (0,1-0,2mm).

### 9.3 Spaltschweißkopf

Der Spaltschweißkopf wird überall dort eingesetzt, wo man aus konstruktiven Gründen nicht von oben und unten an den Schweißbereich heran kommen kann, sondern nur von oben. Es wird unterschieden zwischen dem Schweißen auf nur einer Kontaktseite und dem separatem Kontaktieren von beiden Einzelteilen. Zweiteres entspricht wieder im Prinzip einer Punktschweißung, im ersten Fall entsteht zwischen beiden Elektroden ein Schweißbad, das sich so weit ausbilden muss, dass es vom oberen Teil in das untere Teil übergeht, und somit in beiden Teilen flüssiges Material entsteht. Beim Erstarren entsteht dann ein gemeinsamer Materialverbund.

Das Problem bei diesem Schweißverfahren ist dass der Untergrund der Schweißteile stabil und Hitzebeständig sein muss. Wenn dies nicht gewährleistet ist, werden die Messergebnisse der Schweißtiefe verfälscht. Dies kann so weit gehen, dass die Schweißtiefe nicht mehr als Qualitätskriterium zur Auswertung des Schweißergebnisses genutzt werden kann.

### 9.4 Kompaktierwerkzeug

Bei der Kompaktierung werden Bündel aus einzelnen Litzen zu einem rechteckigen Format verschweißt.

Hierzu werden zur seitlichen Begrenzung des Formates Keramiken an die untere Elektrode angeschlagen, oder mit entsprechender Mechanik geklemmt. Die obere Elektrode fährt in diesen entstandenen Schlitz ein und kompaktiert im Widerstandsschweißverfahren die Litzen zu einem rechteckigen Format.

Die Schwierigkeit dabei liegt in hohen Genauigkeit der oberen und unteren Elektrode, da sonst die Kompaktierung einen seitlichen Grad erhält. Die Werkzeuge, die mit öffnenden Keramiken ausgestattet sind lassen sich leichter bestücken und entnehmen.

## 10 Widerstandsschweißungen, deren Geometrie und Auslegung im Schweißbereich

### 10.1 Punktschweißen

Bei der Punktschweißung wird die Energie für den Schweißprozess durch eine kleine punktförmige Elektrode gezielt in einem kleinen Bereich erzeugt. Die Position zur Entstehung der Schweißlinie ergibt sich aus der Kombination der Materialstärken und der Größe sowie die Materialien der Elektroden.

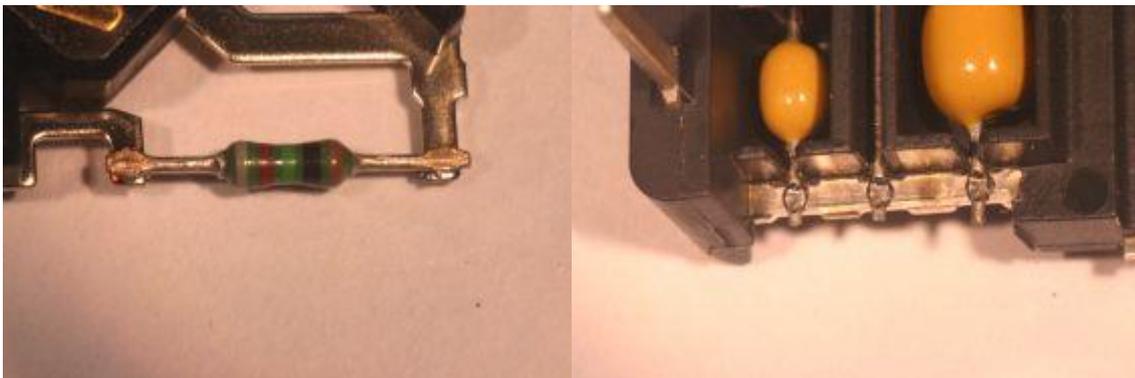
Die Punktschweißung findet hauptsächlich bei einfacheren Schweißaufgaben seine Anwendung, überall dort, wo verhältnismäßig gleiche Materialpaarungen sowohl in der Materialstärke als auch in der Materialzusammensetzung miteinander verbunden werden sollen.

Die Elektrodengeometrie der oberen Elektrode wird dabei relativ klein und teilweise ballig ausgeführt. Die kleine Elektrode bedeutet kürzere Standzeiten der Elektrode und damit größere Maschinenstillstandzeiten wegen Elektrodenwechsel. Eine ballige Elektrode verändert während des Serienprozesses durch das Einarbeiten der Elektrode seinen Übergangswiderstand zum Teil und beeinflusst so das Schweißergebnis.

### 10.2 Kreuzschweißung

Die Kreuzschweißung findet überall dort Anwendung, wo nicht zwei Teile großflächig aufeinander liegen, sondern dort, wo ein kleineres Teil mit einem anderen verbunden werden muss, und gleichzeitig gewisse Positionierungstoleranzen aufgrund der Automatisierung auftreten können. Diese Toleranzen führen zu einer Veränderung der Fläche zwischen den beiden Teilen und damit zu einer Veränderung des Übergangswiderstandes.

Die Toleranz durch die Positionierung geht also direkt in die Qualität der Schweißung ein. Um trotz der Positionierungstoleranz eine Prozessfähigkeit zu erreichen bedient man sich der Kreuzschweißung, da hier immer die selben Widerstandsverhältnisse auftreten.



Die Elektroden können dabei sehr groß und einfach ausgeführt werden. Hierdurch werden Kosten reduziert und gleichzeitig die Elektrodenstandzeit erhöht.

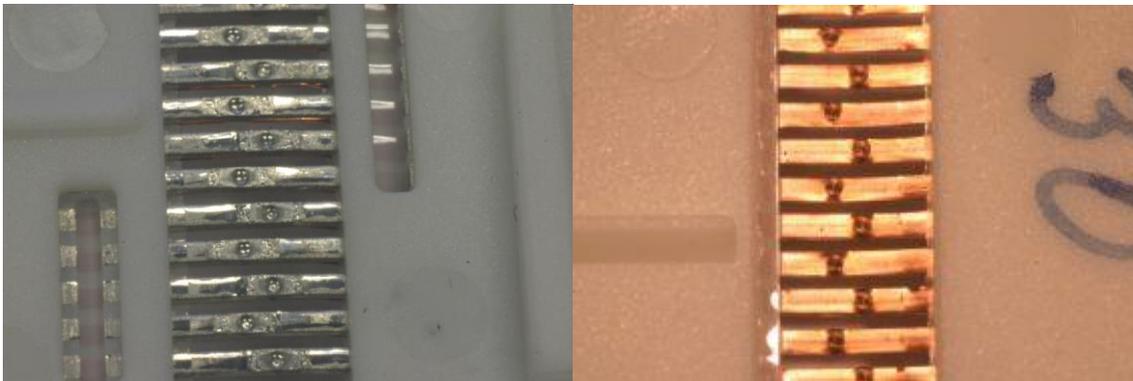
### 10.3 Buckelschweißung mit Schweißwarzen

Bei der Buckelschweißung wird in eines der Schweißteile eine Schweißwarze eingeprägt. Diese Schweißwarze führt zwischen den Teilen zu einer punktförmigen Berührung und damit zu einem sehr großen Übergangswiderstand.

Wenn jetzt der entsprechende Strom durch die Teile fließt, entsteht die Schweißlinse genau zwischen den beiden Teilen, genau dort wo sie gewünscht wird. Der Schweißprozess und die Schweißparameter sind hierbei so ausgerichtet, dass man tendenziell einen sehr hohen aber kurzen Schweißimpuls durchführt, um den Vorteil des großen Übergangswiderstandes so lange zu nutzen, so lange dieser noch vorhanden ist.

Wenn die Regelgröße (Strom, Spannung, Leistung) zu langsam ansteigen wird die Schweißwarze zurückdeformiert, bevor eine Schweißlinse entstehen kann.

Die Anforderungen an das Regelverhalten der Steuerung und an die Mechanik des Schweißkopfes steigen dabei deutlich. (siehe Kapitel 5 und 2.3)



Die Schweißwarze ist nach Möglichkeit immer in dem Teil zu prägen, das die größere Materialstärke hat. (Ausnahmen bei unterschiedlichen Materialpaarungen: das Material mit der größeren Temperaturleitfähigkeit) Die Schweißwarze muss immer ins freie geprägt werden und darf nicht in eine feste Gegenform geprägt werden, da dies zu einer Materialverhärtung und somit zu einer Veränderung der Korngrenzen führt, was die Schweißung wiederum verschlechtert. (härteres Material lässt sich schlechter schweißen als weiches)

In diesem Fall bei härterem Material bricht die Schweißverbindung 'Glashart' ab.

Ein weiterer Vorteil der Buckelschweißung ist, dass die Elektroden sehr groß und einfach ausgeführt werden können. Hierdurch werden Kosten reduziert und gleichzeitig die Elektrodenstandzeit erhöht.

## 10.4 Buckelschweißen mit Schweißwellen

Bei der Buckelschweißung mit einer Schweißwelle wird die Schweißwarze von Kapitel 10.3 durch eine längliche Welle ersetzt. Ursache hierfür sind Positionierungstoleranzen in einem Automatisierungsprozess, oder sehr kleine längliche Teile die nicht mit einer Kreuzschweißung durchgeführt werden können, aber von einer Schweißwarze seitlich abrutschen würden.



Die Vorteile sind die selben wie die bei der Buckelschweißung mit einer Schweißwarze

## 10.5 Spaltschweißen

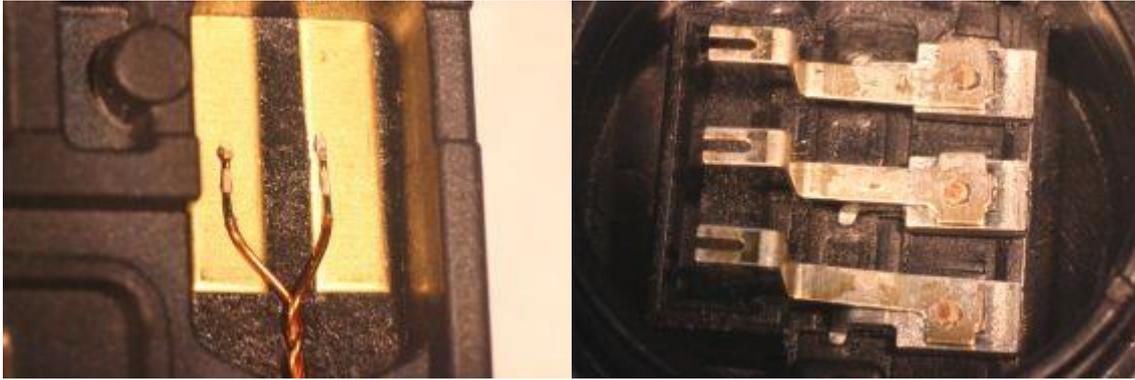
Das Spaltschweißverfahren wird immer dort eingesetzt, wo die Schweißteile von unten keine Zugänglichkeit für die Elektroden bieten. Beide Elektroden kommen somit von oben auf das Schweißgut und haben zwischen den beiden Elektroden einen Spalt. Dieses Spaltmaß ist ein weiterer maßgeblicher Parameter beim Spaltschweißen.

Die Größenverhältnisse der zu verschweißenden Teile sollte so ausgelegt sein, dass das dünnere Teil immer auf dem dickeren liegt, und die Elektroden somit auf dem dünneren Teil mit dem Schweißprozess beginnen.

Die Schweißlinse entsteht im reinen Spaltschweißverfahren zwischen den Elektroden und muss sich so weit ausprägen (vom dünnen in das dickere Teil), dass beide Materialien flüssig werden.

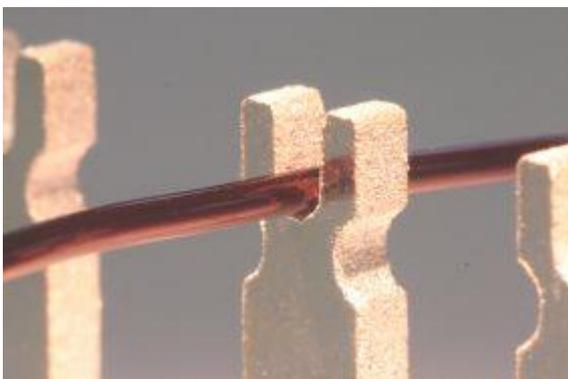
Es gibt auch beim Spaltschweißen die Variante, dass mit Schweißwarzen geschweißt wird, oder dass die zweite Elektrode das Teil indirekt kontaktiert und somit wieder eine Punkt oder Buckelschweißung durchgeführt wird. In allen Varianten ist darauf zu achten, dass das Grundmaterial möglichst temperaturbeständig ist, damit wir keine Störeinflüsse auf den Schweißprozess bekommen, da die gesamte Auflagefläche der Schweißteile aufschmilzt und somit die Messergebnisse verfälscht. Dies kann in den meisten Fällen nicht zu 100% ausgeschlossen werden, wodurch bei der Erfassung der Schweißtiefe Kompromisse eingegangen werden müssen.

Im reinen Spaltschweißverfahren ohne Schweißwarze bei kleinem Schweißgut ist die Aussagekraft der Schweißtiefe bereits sehr reduziert.



### 10.6 Schweißen mit Schweißgabeln (Hot Staking)

Das Schweißen mit einer Schweißgabel ist eine Mischung aus einer Crimpverbindung und einer Schweißverbindung. Während des Schweißprozesses sind definierte Nebenschlüsse des Stromkreislaufes vorhanden, die zu einer allgemeinen Erwärmung und Aufschmelzung der Materialien führen soll. Die richtige Dimensionierung der Gabel ist somit entscheidend. Die Qualitätskriterien zur Prozessüberwachung sind nicht mehr so aussagefähig wie die einer echten Widerstandsschweißung.



Der entscheidende Vorteil des Verfahrens liegt in der Tatsache, dass die Elektroden nicht direkten Kontakt zu dem Teil in der Gabel haben. Hierdurch kann an dieser Stelle Material mit schlechten Oberflächen verarbeitet werden, ohne dass das Verbrennen dieser Materialien direkt zu einem Auftrag auf der Elektrode führt. Dadurch ist es möglich trotz schlechter Grundvoraussetzungen relativ akzeptable Standzeiten der Elektroden zu erreichen.

Es geht sogar so weit, dass Lackdrähte im Vorfeld in der Erwärmungsphase der Gabel aufgeschmolzen werden und anschließend mit der Gabel verschweißt werden. Diese könnten mit einem herkömmlichen Widerstandsschweißverfahren nicht geschweißt werden da die Lackdrähte komplett isolieren.

Somit ergibt sich auch der Hauptanwendungsbereich beim verschweißen von gewickelten Drahten z.B. bei der Motorfertigung.

Die Elektroden sind im allgemeinen mit einer Schräge von  $3^{\circ}$ - $5^{\circ}$  ausgeführt, damit eine stärkere Schließung der Gabel erfolgt. Im allgemeinen kommen Schweißzangen zum Einsatz.

Die Position des Drahtes in der Gabel bestimmt die Qualität des Schweißergebnisses, es ist durch zusätzliche Maßnahmen sicherzustellen, dass der Draht immer möglichst unten in die Gabel eingelegt und positioniert ist.

### 10.7 Schweißen mit Schweißlaschen

Das Schweißen mit der Schweißlasche hat den selben Anwendungsbereich und Hintergrund wie das Hot Staking, nur die Geometrische Umsetzung ist anders ausgeführt. Je nach Konstruktion und Platzsituation in der Anwendung wird das eine oder andere Verfahren eingesetzt.



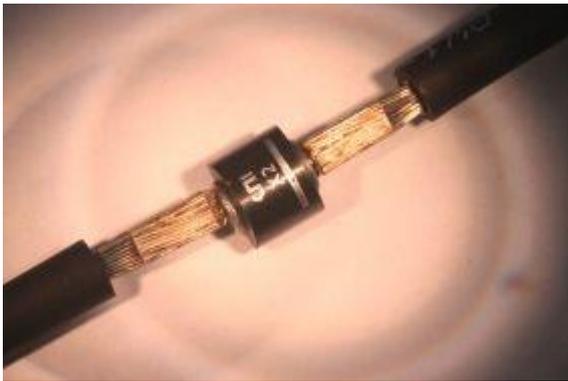
Die Geometrie der Elektroden kann jeweils  $90^{\circ}$  ausgeführt werden, die Elektrode auf der Oberseite der Lasche hat teilweise auch eine Schräge.

Die Position des Drahtes in der Lasche bestimmt ebenfalls die Qualität des Schweißergebnisses, es ist auch hier durch zusätzliche Maßnahmen sicherzustellen, dass der Draht immer möglichst im Radius der Lasche eingelegt und positioniert ist.

## 10.8 Kompaktierung

Bei der Kompaktierung werden Bündel aus einzelnen Litzen zu einem rechteckigen Format verschweißt.

Dieses Verfahren wird immer dann eingesetzt, wenn die Litzen anschließend noch mit einem weiteren Teil verschweißt werden müssen, oder um einen Kabelschuh zu ersetzen. Es sind Querschnitte von 0,5mm<sup>2</sup> bis 25mm<sup>2</sup> möglich, der Schwierigkeitsgrad steigt um so kleiner die einzelnen Litzen werden.



## 11 Geometrie von Kunststoffen um den Schweißbereich

Es kommen immer mehr Hybridbauteile (Stanzgitter mit umspritztem Kunststoff) zur Anwendung, bei denen zusätzliche elektronische Bauteile eingebracht werden müssen, oder die miteinander verbunden werden müssen.

Hierbei ist der zur Verfügung stehende Bauraum und die Zugänglichkeit des Schweißbereiches mit den Elektroden immer stärker eingeschränkt.

Die Elektroden sollten ein Maß von 4 X 4mm nicht unterschreiten, da sonst extrem kurze Standzeiten zu erwarten sind. Innerhalb dieses Bereiches plus Öffnungshub und Automatisierungstoleranzen sind sämtliche Kunststoffe fern zu halten.

Sobald die Elektrode während oder nach der Schweißung den Kunststoff berührt beginnt dieser zu schmelzen und es bleiben leichte Rückstände an der Elektrode. Diese Rückstände verbrennen bei der nächsten Schweißung. Auf diese Weise trägt sich immer mehr Material auf den Elektroden auf, die dann immer stärker den Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Teil beeinflussen. Dadurch ist die Prozessfähigkeit in Frage gestellt, es kann sogar zu kleinen Explosionen aufgrund von Kontaktierungsproblemen kommen.

Um die Toleranzen in der Positionierung des Teiles so gering wie möglich zu halten ist es empfehlenswert, das Teil an Positionslöchern des Stanzgitters zu fixieren, da hier keine Toleranzen durch Schwundmaße und Entformungsschrägen wie beim Kunststoff entstehen. Die zu verschweißenden Teile sollten so wenig wie möglich Abdichtungsbereiche zwischen Stanzgitter und Kunststoff im Schweißbereich haben, oder diese möglichst weit von der Schweißstelle entfernt.

Das Stanzgitter wird beim Schweißen erhitzt bis auf die Schmelztemperatur des Materials (bei Kupfer ca.800°C) diese Hitze strahlt im Stanzgitter aus, und verflüssigt den Kunststoff an den Abdichtungskanten.

Dieser verdampft teilweise und führt zu einer schnelleren Verrußung der Elektroden. Wenn der Kunststoff aber deutlich zu nah am Schweißbereich liegt

verhält sich der flüssige Kunststoff wie ein Lot und fließt in den Bereich der größten Hitze und damit in den Schweißbereich, hier kann es dann dazu führen, dass er jegliche Verbindung der Materialien miteinander verhindert. Auf jeden Fall wird die Qualität der Schweißung deutlich verschlechtert und die Prozessfähigkeit durch eine zunehmende Verrußung der Elektrode in Frage gestellt.

## 12 Einflüsse auf den Schweißprozess und die Prozessfähigkeit

### 12.1 Verschmutzungen der Elektrode

Durch vorangegangene Arbeitsprozesse können Verschmutzungen auf dem Schweißgut entstehen, die sich ev. auch gar nicht vermeiden lassen, da sonst der vorangegangene Arbeitsprozess nicht mehr durchführbar wäre.

Die Schweißtechnik muss deshalb deutlich über den eigentlichen Aufgabenbereich hinaus, andere Prozesse und vor allem deren Hilfsstoffe und Nebenprodukte kennen, die Einfluss auf das Schweißen und die Prozessfähigkeit haben.

Die Verschmutzung der Elektrode wird hauptsächlich durch Kohlerückstände erzeugt, die während des Schweißprozesses durch verdampfen von Fremdstoffen entstehen. Diese Rückstände sind als schwarzer Film auf der Elektrode sichtbar und verändern den Übergangswiderstand von der Elektrode zum Schweißgut. Dieser Übergangswiderstand steigt stetig an, um so stärker die Verschmutzungen werden. Bei steigendem Übergangswiderstand wird immer mehr Energie in das Teil eingebracht, somit wird auch die Schweißung immer stärker. Durch ständig ansteigende Energien im Schweißprozess wird die Elektrode immer stärker belastet, da auch diese immer heißer wird. Auf diese Weise entsteht eine Spirale, in der sich die einzelnen Effekte potenzieren.

Es ist deshalb für einen möglichst konstanten Prozess und eine gleichbleibende Qualität sicherzustellen, dass alle Fremdstoffe die zu Verschmutzungen auf der Elektrode führen können beseitigt werden.

Verschmutzungen durch Klebstoffe, Lacke, Silicone oder Glasbeschichtungen wirken sogar isolierend und unterbinden den kompletten Schweißprozess.

Um Verschmutzungen auf der Oberfläche nachzuweisen werden Lackstifte eingesetzt, die die Oberflächenspannung auf den Teilen klassifizieren. Diese Stifte kommen aus der Bondtechnik, bei der eine 100% saubere Oberfläche für den Prozess notwendig ist. (Arcotest)

#### 12.1.1 Öle/Fette von Stanzprozessen

Öle und Fette werden hauptsächlich bei Stanzprozessen benötigt, sie werden aber teilweise auch bei anderen Bearbeitungsschritten zum Schmieren eingesetzt. Diese Schmierstoffe bleiben nach der Verdunstung der flüssigen Anteile der Schmieremulsion auf der Oberfläche zurück. Auch bei den verflüchtigenden Ölen verflüchtigt sich lediglich der flüssige Anteil der Emulsion, dies geschieht durch Zusatz von Alkohol nur deutlich schneller.

Der Rückstand des Schmierstoffes bleibt.

Während des Schweißprozesses entstehen dann Kohlerückstände und die Spirale wie in Kapitel 12.1 beginnt sich zu drehen.

Für eine prozesssichere Schweißung benötigen wir gute Grundvoraussetzungen, und die haben wir nur mit sauberen Teilen. Damit muss entweder auf den Schmierstoff verzichtet werden, oder die Teile nach dem Prozess, bei dem geschmiert werden muss gereinigt (galvanisch).

Die nächste Alternative ist wir setzen keinen Schmierstoff ein, sondern einen Reinigungsmittel genannt Isopropanol ein, das auch leichte Schmiereigenschaften hat. Falls dies alles nicht Umsetzbar ist muss die Elektrode im Fertigungsprozess regelmäßig gereinigt werden, dies erfolgt über Bürsten oder Diamantabziehsteine.

### 12.1.2 Passivierung / Theolen

Die Passivierung ist ein Oxidationsschutz, der verhindert, dass Sauerstoff an die Oberfläche der Materialien kommt. Passivierungen werden z.B. bei Gold, Silber oder Kupferoberflächen eingesetzt, und sollen verhindern, dass diese schwarz werden. Das hat zum einen optische Gründe, zum anderen machen die entstehenden Oxide aber auch Probleme bei Kontakten. (vergoldete Steckerkontakte). Man kann also davon ausgehen, dass überall dort, wo diese Oberflächen eingesetzt sind und Steckkontakte vorhanden sind, Passivierungen verwendet werden, um diese Steckkontakte zu schützen.

Eine Passivierung ist in diesem Falle eine Schwefelverbindung, bei der sich die Schwefelmoleküle immer so ausrichten, dass der Sauerstoff nicht direkt Kontakt zur Materialoberfläche erhält, und dort reagieren kann.

Diese Schwefelmoleküle verbrennen im Schweißprozess und schlagen sich als Schlacke auf der Elektrode nieder. Hierdurch verändert sich der Übergangswiderstand wie unter 12.1 beschrieben.

Die Menge der aufgetragenen Passivierung spielt hierbei eine entscheidende Rolle für die Prozessfähigkeit der Schweißung. Bei extrem geringem Auftrag ist ein Schweißprozess mit integriertem Reinigungszyklus umsetzbar.

Bei einer Passivierung mit Oxiban 60 ist der Schweißprozess noch relativ gut umsetzbar und Prozessfähig.

### 12.1.3 Kunststoffe im Schweißbereich

Analog zu Kapitel 11 Geometrie von Kunststoffen, um den Schweißbereich was aufgrund seiner Aktualität in einem separaten Kapitel behandelt wurde, möchte ich hier nochmals darauf aufmerksam machen.

Kunststoffe verhalten sich, wenn sie flüssig werden, wie ein Lot und fließen deshalb immer dort hin, wo es am wärmsten ist, und damit in den Schweißbereich. Diese Kunststoffe können im Ernstfall eine richtige Gefügeverbindung der Materialien verhindern und kleben die Teile zusammen, anstatt sie zu verschweißen. Die flüssigen Kunststoffe entstehen durch die Wärmeleitung der Grundmaterialien während des Schweißprozesses.

Der Kunststoff wird einfach an den Abdichtungskanten zwischen dem Stanzgitter und dem Kunststoffkörper aufgeschmolzen.

Diese Abdichtungskanten direkt auf das Stanzgitter müssen so weit wie möglich vom Schweißbereich entfernt werden. Auf diese Weise wird die Wärmeeinstrahlung über das Stanzgitter in den Kunststoff reduziert.

Die Abdichtungsbereiche sind aber unbedingt als Qualitätskriterium in der Wareneingangskontrolle mit aufzunehmen, da durch Alterung der Werkzeuge immer stärkere Spritzhäute entstehen, und so der Kunststoff immer weiter in den Bereich der Schweißung wandern kann.

Das nächste Problem entsteht bei direkter Berührung der Elektrode mit dem Kunststoff. Durch die heißen Elektroden nach der Schweißung wird der Kunststoff aufgeschmolzen und bleibt auf der Elektrode zurück. Hier baut sich langsam immer mehr Kunststoff auf, bis dieser in den Schweißbereich gelangt und zu einer Fehlschweißung führt. Im allgemeinen wird diese erkannt, dies führt aber zu einem erhöhten Ausschuss und kann im Extremfall auch die Prozesssicherheit in Frage stellen. Hier ist es wichtig, sämtliche Toleranzen des Automatisierungsprozesses mit zu beachten.

## 12.2 Stanzgrat

Wenn das Stanzteil konstruktiv schlecht aufgebaut ist, kann es vorkommen, dass der Stanzgrat genau auf der Elektrode landet, und so die Kontaktfläche zur Elektrode reduziert. Es wird dann immer in diesem Bereich der Elektrode zu punktuellen Überhitzungen kommen, die Elektrode wird in diesen Bereich eine Einkerbung erfahren. Der Serienprozess wird somit beeinflusst, da der Übergangswiderstand zwischen der Elektrode und dem Teil je nach Stanzgrat und Ausbildung der Einkerbung verändert wird. Wir haben keine Konstanten Voraussetzungen für den Serienprozess.

## 12.3 Positionsveränderungen / Toleranzen

Positionsveränderungen und Toleranzen haben immer dann einen Einfluss auf die Schweißung und die Prozessfähigkeit, wenn sie einen Einfluss auf das Widerstandsverhältnis haben. Deshalb versucht man durch Schweißwellen oder Kreuzschweißungen Positionierungseinflüsse zu eliminieren, da in diesen Fällen die Positionierungstoleranz keine Auswirkung mehr auf die Widerstandsverhältnisse hat.

## 12.4 Materialhärte

Die Materialhärte hat einen deutlichen Einfluss auf die Qualität der Schweißung. Deshalb ist es wichtig, dass in einer Serienproduktion sichergestellt ist, dass die Materialien nicht zu große Schwankungen in der Materialhärte haben.

Prinzipiell verhält es sich so, dass hartes Material schlechter geschweißt werden kann als weiches. Bei einem harten Material sind die Korngrenzen bereits so verdichtet, dass diese keine Verbindung mit dem anderen Schweißpartner eingehen.

Wenn in einer Serienproduktion plötzlich deutlich härteres Material eingesetzt wird, wird die Schweißverbindung deutlich spröder, bei einem Abreißversuch bricht dieses „glashart“ ab. Eine Schweißverbindung in der sich die Gefüge miteinander verbunden haben ist ein „zähes“ Bruchverhalten erkennbar mit deutlich höheren Abzugskräften. Im Idealfall führt die Verbindung zu einem Ausknüpfen der Materialien.

## 12.5 Oxidationen / Lagerzeiten

Durch Lagerzeiten der Teile entstehen Oxidschichten und intermetallische Verbindungen, die eine Schweißverbindung bei gleichen Parametern verhindern.

Aus diesem Grund werden Kupferoberflächen mit einem Oxidschutz oder mit einer zusätzlichen Oberfläche versehen, da hier die Oxidschichten sehr schnell in Abhängigkeit der Feuchtigkeit und Luftzugänglichkeit entstehen.

Aber auch bei verzinneten Teilen wächst durch Lagerung die intermetallische Verbindung. Sobald diese komplett ausgebildet ist lassen sich die Teile nicht mehr schweißen oder löten. Es sind deshalb auch hier, für eine Prozessfähige Serienproduktion ganz klare Lagerzeiten zu definieren und einzuhalten.

Diese betragen bei blanken Kupferteilen z.B. 7-14 Tage und bei verzinneten Kupferteilen 6 Monate.

### 13 Prozessvalidierung und deren Umfang bis zur DOE

Ziel der Prozessvalidierung ist, dass ein Prozess reproduzierbar ein Produkt liefert, das den vorgegebenen Eigenschaften und Qualitätsanforderungen entspricht.

Somit umfasst die Prozessvalidierung nicht nur den Schweißprozess sondern die gesamte Anlage mit allen Automatisierungskomponenten und den möglichen Fehlern die aufgrund der Automatisierungstoleranzen entstehen und Auswirkungen auf den Schweißprozess haben. Hinzu kommen Unterschiede in den zu verschweißenden Teilen mit den Einflüssen aus Kapitel 12.

Bei der Prozessvalidierung wird durch das Einengen der Grenzwerte der relevanten Schweißparameter eine Toleranz für gut geschweißte Produkte definiert.

Hierzu muss als erstes die notwendige Qualität festgelegt werden.

Als nächster Schritt werden Schweißparameter ermittelt, mit denen diese Qualität gehalten werden kann.

Hierzu werden die Toleranzgrenzen sehr stark reduziert. Jedes vermeintliche Ausschussteil wird untersucht und falls es sich als Gutteil erweist die entsprechende Grenze aufgeweitet. Sobald sich eine Grenze als richtig erweist, und diese ein Schlechtteil identifiziert muss diese Grenze ‚eingefroren‘ werden.

In den meisten Unternehmen ist an dieser Stelle die Prozessuntersuchung beendet, gewisse Einflussfaktoren innerhalb des Prüfungszeitraumes sind damit in die Prozessvalidierung eingeflossen, zumindest die, die ständig an den Anlagen auftreten. So z. B. die Toleranzen der Automatisierungstechnik.

Eine DOE (Design of Experiments) geht hier einen Schritt weiter und versucht gezielt Störfaktoren zu erzeugen, und diese zu erkennen. Aber auch hier können nur bereits bekannte Störfaktoren siehe Kapitel 12 nachgebildet und simuliert werden.

Der zeitliche Aufwand für eine solche Untersuchung steigt dabei drastisch an. Allein die Probenbeschaffung kann zum Problem werden. Eine Prozessvalidierung / DOE kann des halb nur vom Kunden selbst durchgeführt werden, nachdem die ersten Parameter ermittelt wurden. Der Vorteil dabei ist, dass sich der Anwender bei dieser Aufgabe sehr intensiv mit der gesamten Materie befassen muss und somit neue Probleme, die seither noch nicht erfasst waren schneller erkennt und beheben kann.

Eine Untersuchung zur Prozessfähigkeit ist somit realistisch betrachtet während der gesamten Lebensdauer des Produktes nie abgeschlossen, da ständig neue Faktoren in den Prozess eingebracht werden können. Selbst der Verschleiß von Aufnahmen und Halterungen kann zu Qualitätsproblemen führen.

## 14 Prozessbegleitende QS

Um eine Aussage über die Qualität Ihrer Schweißungen machen zu können ist eine zerstörende Prüfung immer noch am aussagefähigsten und für einen Qualitätsnachweis unumgänglich. Es gibt Einflussfaktoren die von den Qualitätsgrenzen der Schweißparameter nicht erkannt werden, aber unweigerlich zu einer schlechten Schweißung führen (z.B. plötzliche Veränderung der Oberflächenveredelung mit zusätzlicher Nickelschicht)  
Derartige Fehler können nur durch eine Prozessbegleitende zerstörende Qualitätsprüfung erkannt werden.

Schliffbilder von Schweißungen lassen sich nur sehr schwer interpretieren und sind sehr kostenintensiv. Zudem muss die exakte Position des Schliffbildes im Bereich der Schweißlinse sichergestellt sein.  
Der Aufbau der Prüfvorrichtung sollte möglichst den tatsächlich anfallenden Kräften im Feld entsprechen, ev. auftretende Toleranzen in der Prüfvorrichtung sind genauso wie im Einsatzfall auszulegen um realistische und sinnvolle Werte zu erhalten.  
Bei der Probenerzeugung ist darauf zu achten, das die Schweißverbindung auf keinen Fall vor dem eigentlichen Versuch belastet wird. Der Versuch hat sonst seine Aussagekraft verloren.

### 14.1 Zug- / Druckprüfung

Das Schweißgut wird durch einen Stößel oder durch entsprechende Greifsysteme voneinander geschoben, beziehungsweise gezogen.  
Diese Prüfung erfüllt 90% aller Aufgaben und sollte bei keiner Serienfertigung fehlen.  
Der wesentliche Unterschied der Prüfgeräte liegt darin ob der Zug, bzw. Druck über einen Motor konstant angelegt wird oder ob dieser durch ein Kurbelrad vom Personal selbst, und damit unterschiedlich erzeugt wird.

### 14.2 Torsionsprüfung

Die Torsionsprüfung prüft das Schweißgut an der Verbindungsstelle durch eine Drehbewegung. Das entstandene Moment wird festgehalten.  
Diese Prüfvorrichtung ist ebenfalls motorisch oder manuell erhältlich. Ihr Einsatzbereich ist aber deutlich geringer als die Zug-/ Druckprüfung da das Schweißgut für die Werkzeuge gut zugänglich sein muss um sinnvolle Werte zu erhalten.

### 14.3 Schälversuch

Der Schälversuch ist eine absolut subjektive Einschätzung der Schweißverbindung. Hierbei wird das Schweißgut durch eine vertikale Drehbewegung voneinander getrennt. Bei einer guten Verbindung sollte immer entsprechendes Material ausknüpfen, und somit auf einem der Elemente zurückbleiben.  
Der Schälversuch gibt relativ schnell eine Aussage über die Qualität einer Schweißverbindung und wird hauptsächlich in der Phase der Parameterermittlung eingesetzt, um sich die Zeit für aufwendige Zugversuche zu sparen.

## 14.4 Schliffbilder

Schliffbilder werden eingesetzt, um in der Gefügestruktur nachzuweisen, dass sich das Material miteinander verbunden hat und die Korngrenzen ineinander übergehen.

Bei der Interpretation von Schliffbildern sind sich teilweise die Experten nicht einig, deshalb sollte man bei nicht eindeutig positivem Ergebnis auf jeden Fall fachmännischen Rat zur Unterstützung mit heran ziehen.

Kritisch werden immer die Verschweißungen mit veredelten Oberflächen bewertet, da hier gewisse Rückstände der ursprünglichen Oberflächen noch sichtbar sind und diese eine Trennschicht aufweisen und das Grundmaterial sich somit nicht miteinander verbunden hat. Dies sind aber Intermetallische Verbindungen, die einen Zugversuch bestehen und bei Gutschweißungen zu einer Ausknüpfung des Materials führen. Der Nachteil einer intermetallischen Verbindung ist, dass diese sehr hart und spröde ist und bei Vibrationstests schlechtere Eigenschaften aufweist.

Für den Zugversuch und die Verbindung der Materialien ist diese Schweißung völlig ausreichend. Lediglich für die Vibrationsbeständigkeit müssen zusätzliche mechanische Lösungen umgesetzt werden, die das Teil stabilisieren und ein Aufschwingen verhindern.

## 15 Fertigungsbegleitende Visualisierung und Chargendokumentation

Sämtliche Steuerung von Credé Elektronik bieten die Möglichkeit die gesamten Prozessrelevanten Daten über eine Schnittstelle in einen übergeordneten Rechner einzulesen. Großfirmen können diese Schnittstelle nutzen, und die Daten für Ihre Hausinterne Archivierung aufbereiten. Für kleine und mittlere Unternehmen bieten wir eine zusätzliche Software, mit der auf einem beigegebenen PC die Visualisierung und Chargendokumentation durchgeführt werden kann.

Sie haben hier die Möglichkeit Langzeitauswertungen zu betrachten.

Zusätzliche Auswertungen mit der gaußschen Verteilungskurve auf die eingestellten Grenzwerte sowie die Cpk oder Cmk –Werte können durchgeführt werden.

Der Gesamte Schweißparametersatz und die an Ihrer Anlage einprogrammierte Projektstruktur mit den einzelnen Parametern werden sichtbar und können gespeichert werden.

## **16 Literaturverzeichnis und Quellen**

[1] Franz J. Gruber: Widerstandsschweißtechnik : wirtschaftliches Fügen von Metallen in der Kleinteilefertigung Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie,1997

[2] Taschenbuch DVS-Merkblätter und Richtlinien Widerstandsschweißtechnik : DVS-Verlag