
Die Elektromagnetische Puls Technologie im industriellen Einsatz

Dr.-Ing. Ralph Schäfer, Dr.-Ing. Pablo Pasquale, PSTproducts GmbH, Alzenau,
www.pstproducts.com

Die elektromagnetische Puls Technologie (EMPT) ist ein berührungsloses Fertigungsverfahren zum Umformen, Trennen und Fügen elektrisch leitfähiger Materialien. Dieser Bericht gibt Einblicke in die Wirkmechanismen des Verfahrens und die notwendige Anlagentechnik. Beispielbauteile zum Formen und Schneiden sowie zum form- und stoffschlüssigen Fügen metallischer Verbunde werden unter Erklärung der Wirkprinzipien dargestellt. Aufgrund der niedrigen Prozesskosten sowie der hohen Standzeit und Automatisierbarkeit der von PSTproducts hergestellten EMPT Anlagen sind diese z.B. bei führenden Automobilzulieferern im Einsatz.

Industrial application of the electromagnetic pulseforming technology

The electromagnetic pulse forming technology (EMPT) is a non contact process based on magnetic pressure for forming, cutting and joining of electric conductible components. This report illustrates this process' fundamentals as well as the therefore essential equipment. Sample components with respect to forming, cutting and joining by positive locking or atomic bonding are shown. PSTproducts made EMPT systems show minor process costs and superior durability in concordance with excellent possibility for process automatization. Thus, PSTproducts fabricated EMPT equipment is for in use for instance at leading automotive suppliers.

Einleitung

Rohre und Profile stellen in nahezu allen Bereichen des modernen Maschinenbaus, im Automobilbau sowie in der Luft- und Raumfahrt ein gemeinsames Konstruktionsmerkmal dar. Diese Halbzeuge erlauben nicht nur die Leitung von Gasen, Flüssigkeiten und Granulaten, sondern auch die wirtschaftliche Fertigung von Leichtbaukonzepten. Oftmals ist jedoch eine partielle Umformung, z.B. eine Durchmesseränderung bei Rohren gewünscht oder eine Fügeoperation notwendig. Die elektromagnetische Pulsumformtechnik (EMPT) stellt für diese Aufgaben eine gegenüber klassischen Fügemethoden oftmals sowohl wirtschaftlich als auch technologisch überlegene Fertigungsmöglichkeit dar.

Mit Hilfe der EMPT sind Umform- sowie Fügeoperationen durchführbar. Es besteht die Möglichkeit auch nicht rotationssymmetrische Querschnitte zu expandieren bzw. zu komprimieren. Das Ergebnis einer solchen Umformoperation kann durch eine Geometrieänderung oder eine formschlüssige Fügeverbindung dargestellt werden. Darüber hinaus ermöglicht die EMPT aber auch die stoffschlüssige Verbindung verschiedener metallischer Werkstoffe ohne Gefügeänderungen durch Temperatureinfluss. Im Folgenden werden die technologischen Möglich-

keiten der EMPT, die hierzu notwendige Anlagentechnik sowie die Wirtschaftlichkeit des Prozesses detailliert dargestellt.

1 Grundlagen der Elektromagnetischen Puls Technik (EMPT)

Stromdurchflossene Leiter erfahren im Magnetfeld eine Kraft, die nach ihrem Entdecker Lorentzkraft genannt wird. Zudem erzeugen stromdurchflossene Leiter selbst ein magnetisches Feld. Zwei parallele, stromführende Leiter ziehen sich an, wenn die Stromflussrichtung in beiden gleich ist. Projiziert man dies auf ein innerhalb einer Spule liegendes Rohr, so stellt die Spule einen Leiter dar, das Rohr den anderen. Sofern die Spule mit Wechselstrom beaufschlagt ist, induziert diese in das Rohr einen jeweils gegenläufigen Stromfluss und das Rohr erfährt eine radial auf seine Rotationsachse wirkende Kraft (Abbildung 1). Wechselt der Spulenstromfluss seine Richtung, baut sich im Rohr wiederum ein gegenläufiger Stromfluss auf. Daher bleibt die auf das Rohr einwirkende Kraft in ihrer Richtung bestehen. Die Umformung des Rohres verläuft jedoch zeitversetzt zum Stromverlauf. Dies ist maßgeblich durch die Massenträgheit des bewegten Bauteils bedingt. Abbildung 2 zeigt die berechnete Umformung eines EMPT-Beispielbauteils.

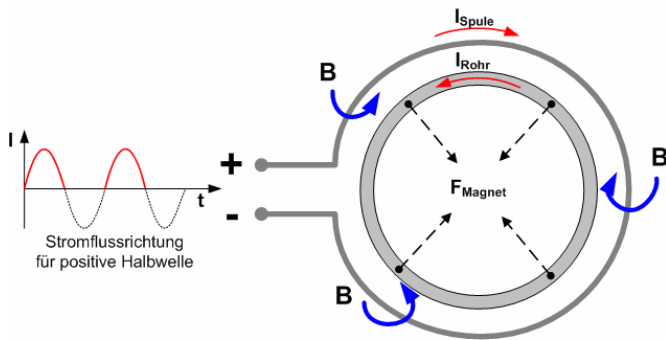


Bild 1: Spule mit innen liegendem Rohr. Stromfluss und Kraft während einer Wechselstromhalbwellen

In der ansteigenden Flanke des sinusförmigen Stromverlaufs verstreicht zunächst einige Zeit, bis eine Verschiebung des Bauteilquerschnittes hin zu kleineren Durchmesserbereichen eintritt. In diesem Zeitraum bauen sich im Rohr zunächst Spannungen auf, die zum Einen die Fließgrenze des Materials, zum Anderen die aus der Massenträgheit resultierenden Kräfte überwinden müssen. Sobald die Spannungen ein ausreichendes Niveau erreicht haben erfährt das Rohr eine Durchmesserreduktion. Im weiteren Prozessverlauf ist eine deutliche Beschleunigung der Durchmesseränderung zu beobachten. Die Umformung ist noch vor Wechsel der Stromrichtung beendet.

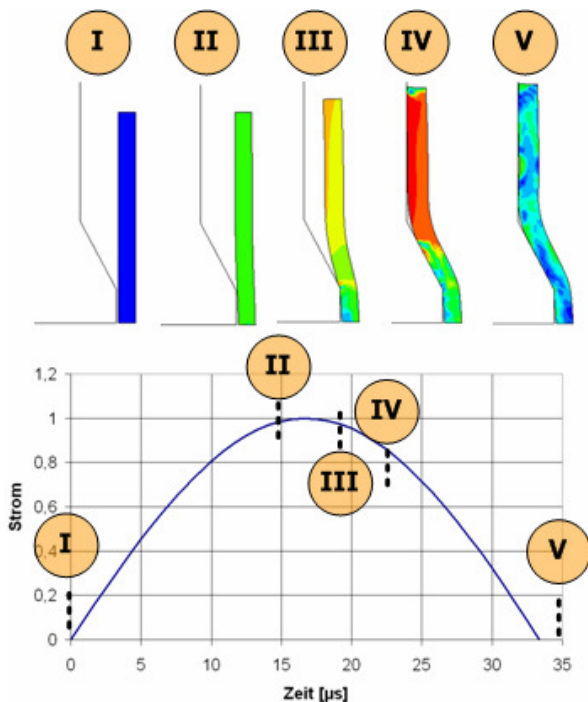


Bild 2: Bewegung des Bauteilquerschnittes und mechanische Vergleichsspannung im Werkstoff während der ersten Wechselstromhalbwellen

1.1 EMPT-Anlagentechnik

Die EMPT- Anlagentechnik besteht aus dem eigentlichen Umformwerkzeug, der Spule, gegebenenfalls Feldformern, und dem zur Bereitstellung der Ströme notwendigen Pulsgenerator.

1.1.1 Spulen und Feldformer

Spulen und Feldformer dienen zum Aufbringen des magnetischen Drucks auf das elektrisch leitfähige Werkstück. Die Spule besteht aus einer oder mehreren Windungen hochfestem und leitfähigen Werkstoffs, z.B. einer speziellen Kupferlegierung. Die Spulenleiterquerschnitte betragen aufgrund der hohen Ströme in der Regel mehrere 10-100 mm². Abbildung 3 zeigt die Schnittansicht einer mehrwändigen Spule mit innen liegendem Feldformer.

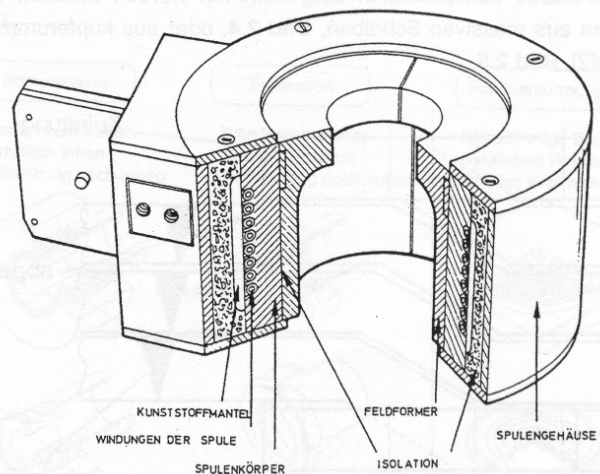


Bild 3: Schnittdarstellung einer mehrwändigen Spule mit innen liegendem Feldformer [5]

Der Feldformer ist mit mindestens einem radialen Schlitz versehen und gegen Spule sowie Werkstück elektrisch isoliert. Feldformer und Spule weisen an ihrer Wirkfuge die gleiche Länge auf. Die Spule induziert in den Aussenmantel des Feldformers einen Strom, der aufgrund des radialen Schlitzes auf die Innenbohrung des Feldformers geleitet wird. Der Innenbohrungsdurchmesser entspricht nahezu dem Werkstückdurchmesser. Die Länge der Innenbohrung ist jedoch in der Regel kleiner als die der Spule und bildet somit die so genannte Schneide. Dies bewirkt zweierlei: Zum einen wird das ungleichmäßige magnetische Feld der mehrwändigen Spule homogenisiert, zum anderen die magnetischen Feldlinien auf den Schneidenbereich konzentriert [4]. Hierdurch ist der auf die Spule wirkende magnetische Druck geringer als der auf das Werk-

stück lastende. Die Standzeit der Spule ist somit beim Einsatz eines Feldformers erheblich höher als die einer direkt wirkenden Spule. Jedoch begrenzte in der Vergangenheit oftmals die Spulenstandzeit die Wirtschaftlichkeit der EMPT. Spulenstandzeiten von z.T. nur wenigen Pulsen stellten keine Ausnahme dar. Moderne Spulen von PSTproducts hingegen sind mit Hilfe numerischer Methoden so ausgelegt, dass eine Spulenstandzeit von bis zu 2.000.000 Pulsen gewährleistet ist.

Der Feldformer dient wie oben stehend beschrieben in erster Linie zur Homogenisierung des magnetischen Feldes mehrwinkliger Spulen, zur Konzentration der Feldlinien auf den Umformbereich und zur mechanischen Entlastung der Spule. Darüber hinaus stellt der Feldformer jedoch eine Möglichkeit dar, die Spule mit geringem Aufwand an neue Umformgeometrien anzupassen. Hierzu wird lediglich ein an die zu fertige Werkstückgeometrie angepasster Feldformer in die Spule eingesetzt. Ein Feldformerwechsel dauert in der Regel weniger als zwei Minuten. So ist unter Voraussetzung einer entsprechend dimensionierten Spule in Kombination mit einem geeigneten Pulsgenerator die Fertigung verschiedenster Bauteile mit geringem Werkzeugaufwand möglich. Jedoch ist ein Feldformer nicht zwingend notwendig, er dient bei einwindigen Spulen in erster Linie nur zur Erhöhung der Anlagenflexibilität.

1.1.2 Pulsgenerator

Die zur Umformung metallischer Werkstoffe notwendigen magnetischen Drücke liegen im Bereich bis zu einigen 100 N/mm². Zur Erzeugung dieser Drücke ist es notwendig gepulste Ströme im Bereich von 100 kA bis weit über 1000 kA bereitzustellen. Hierzu dient der so genannte Pulsgenerator. Dieser besteht aus einer Kondensatorbatterie, einer Kondensatorladeeinrichtung und einem Hochstromschalter. Der Pulsgenerator bildet mit der Arbeitsspule des EMPT Systems einen Schwingkreis (Abbildung 4)

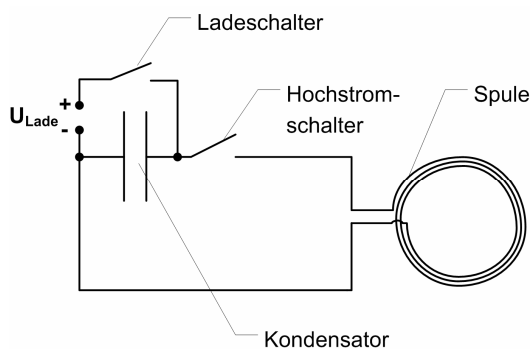


Bild 4: *Prinzipskizze des Pulsgenerators mit angeschlossener Arbeitsspule*

Der Arbeitsablauf lässt sich wie folgt beschreiben: Nachdem das Werkstück in der Spule positioniert ist, wird bei geöffnetem Hochstromschalter der Ladeschalter geschlossen. Der Schwingkreis ist somit zunächst unterbrochen, die Kondensatorspannung nähert sich im Zeitraum von ca. 8 Sekunden der gewählten Ladespannung. Sobald die Ladespannung erreicht ist, wird der Ladeschalter geöffnet und der Hochstromschalter geschlossen. Die im Kondensator gespeicherte Energie wird nun freigesetzt und bedingt einen sinusförmigen Stromverlauf in der Arbeitsspule, der jedoch nach wenigen Schwingungszyklen abgeklungen ist. Die Entladefrequenz industriell eingesetzter EMPT Anlagen liegt im Bereich zwischen 6 und 30 kHz. EMPT Anlagen der PSxx Baureihe zeichnen sich durch eine optimierte Standzeit, hohe Entladeströme und geringe Taktzeiten sowie moderne Prozessüberwachungs- und Steuerungsalgorithmen aus. Die Wartungsintervalle liegen bei ca. 500.000 Pulsen, die Entladeströme, je nach Modell, zwischen 100 kA und 2000 kA.

Alleinstellungsmerkmal der PSTproducts Puls-generatoren ist jedoch die 100% Prozessüberwachung. Hierbei wird der Stromverlauf eines jeden Pulses analysiert und gespeichert. Darauf basierende Regelalgorithmen gewährleisten, dass sich der Entladestrom auch bei Änderung der Umgebungsbedingungen innerhalb eines spezifizierten Prozessfensters bewegt. Die Steuerungstechnik der PSxx Baureihe erlaubt somit auch die Einbindung dieser Puls-generatoren in vollautomatisierte Produktionslinien.

2 Anwendungsbeispiele

2.1 Umformen

Beim Umformen besteht die Möglichkeit rohrförmige Strukturen zu komprimieren bzw. zu expandieren. Freiumformungen sind generell möglich, jedoch ist zur Gewährleistung geometrischer Toleranzen sowohl bei Kompression als auch bei Expansion der Einsatz von Dornen bzw. Gesenken notwendig, siehe Abbildung 5. Oftmals ist es erforderlich diese Stützelemente teilbar vorzusehen, so dass eine Ausformung des gefertigten Bauteils möglich ist.

Untersuchungen von Daehn [1] zeigen zudem, dass unter bestimmten Voraussetzungen eine Erhöhung des Grenzformänderungsvermögens aufgrund der hohen Verformungsgeschwindigkeiten zu erwarten ist. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Ringe des Werkstoffes Al6061 mit Hilfe der EMPT expandiert.

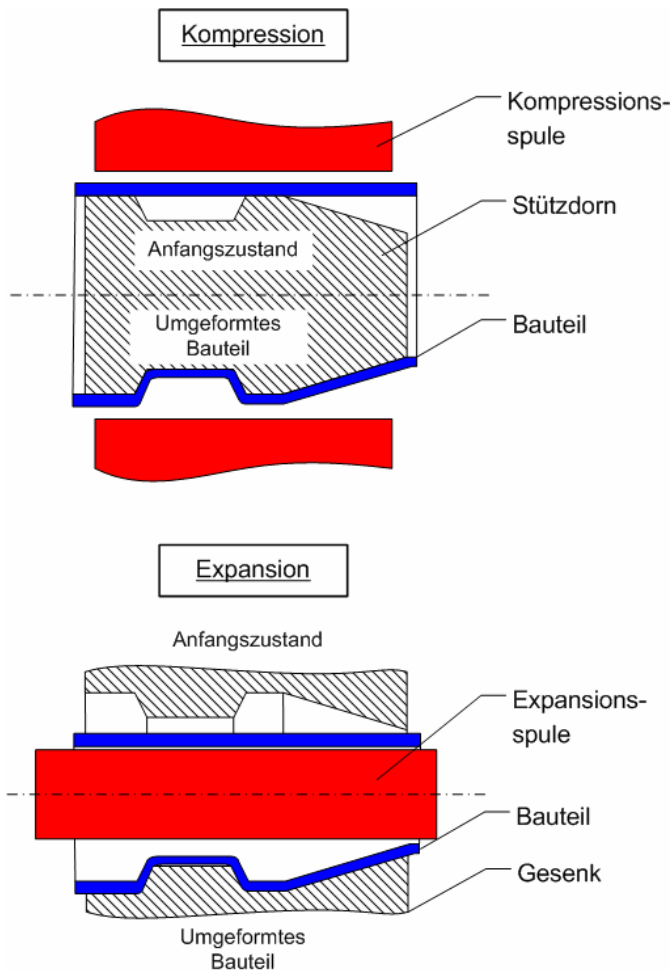


Bild 5: Prinzipskizze des Werkzeugaufbaus beim EMPT Expandieren und Komprimieren

Bei quasistatischer Belastung konnten plastische Dehnungen von 26% erreicht werden. Bei der Expansion mit Hilfe der EMPT jedoch mehr als 60%. Die radiale Ringgeschwindigkeit betrug in den genannten Untersuchungen bis zu 170 m/s. Eine geschlossene Erklärung der hier wirkenden Mechanismen ist bislang nicht vorhanden, jedoch scheinen vor allem Trägheitseffekte hierbei eine Rolle zu spielen [1].

Eine Besonderheit der EMPT ist die Möglichkeit nahezu beliebige Geometrien zu Komprimieren. Abbildung 6 zeigt eine Crashbox-Struktur, die mit Hilfe der EMPT Kompression aus einem Aluminiumrohr gefertigt ist. Im gleichen Arbeitsgang erfolgt auch das Schneiden der Anschlusslöcher. Hierzu ist der innenliegende Dorn in den Endbereichen als Schneidmatrize ausgeführt. Die hohe Aufprallgeschwindigkeit des Rohres auf den Dorn führt im Schneidmatrizenbereich zu einer Trennung des Rohrwerkstoffes. Dies bedeutet, dass Umformen und Materialtrennen durch eine entsprechende Ausbildung

des Dornes in einem Puls durchführbar ist. Bemerkenswert ist hierbei die hohe Schnittgüte. Die Schneidkanten weisen keine Gratbildung auf.

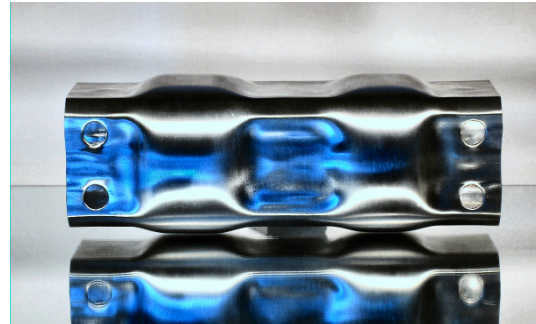


Bild 6: EMPT geformte Crashboxstruktur

Die Anwendungsmöglichkeiten des EMPT Formens beschränken sich nicht nur auf tubulare Produkte. Auch das Umformen ebener Strukturen (Bleche) ist durch die Auslegung geeigneter Spulen möglich. Die Prozessgrenzen der elektromagnetischen Pulsformumformtechnologie sind generell weniger durch die Festigkeit der umzuformenden Materialien als durch deren elektrische Leitfähigkeit gegeben. Tabelle 1 gibt die elektrischen Leitfähigkeiten einiger Werkstoffe wieder.

Werkstoff	Elektr. Leitfähigkeit [MS/m]
Kupfer Cu99,9	>58,0*
Aluminium Al 99,9	36,89*
Aluminium 6082	24-28
Magnesium Mg 99,9	22,7
Magnesium AZ91	6,6-7,1
Unlegierter Baustahl	9,3
Titan Ti 99,9	2,56*
Edelstahl 1.4301	1,6*

Tabelle 1: elektrische Leitfähigkeiten einiger Konstruktionswerkstoffe (Daten* aus [2])

Die Leitfähigkeit von Baustahl stellt derzeit eine Grenze dar, unterhalb derer eine elektromagnetische Pulsformung nicht mehr direkt möglich ist. Die dann auftretenden hohen ohmschen Widerstände führen zu einer unverhältnismäßigen Erwärmung des Bauteils und zugleich zu einer Verringerung des magnetischen Drucks. So genannte Treiber aus gut leitfähigen Werkstoffen, z.B. Aluminiumlegierungen, bieten hier Abhilfe. Der Treiber besteht bei rohrförmigen Produkten lediglich aus einem dünnwandigen Ring, der im Bereich der Umformzone aufgebracht ist. Hierdurch ist auch die Umformung nicht leitender Materialien, wie z.B. Kunststoffen, möglich. Die Umformung von

Baustahl ist ohne Treiber möglich. Das EMPT Formen oder Fügen von Edelstählen macht derzeit jedoch noch immer den Einsatz von Treibern aus Aluminium oder Kupfer notwendig.

2.2 Formschlüssiges Fügen

Formschlüssiges Fügen mit Hilfe der EMPT repräsentiert eine sowohl technologische als auch wirtschaftliche Alternative zu mechanischen Crimpprozessen. Beim Fügen durch mechanische Kompression stellen die Nahtbereiche der oftmals tortenstückartigen Kompressionswerkzeuge eine Inhomogenität dar. Das Werkstück wird an diesen Stellen z.T. nur unzureichend umgeformt oder der Werkstoff setzt sich bei hohen Kompressionsdrücken in den Werkzeugspalten fest. Aufgrund der berührungslosen Druckaufbringung bei der EMPT entfällt dieser Unsicherheitsfaktor. Auch koaxiale Positionierungsfehler der Fügepartner werden z.T. beim EMPT Fügen ausgeglichen. Darüber hinaus, weist die EMPT eine ausgezeichnete Wiederholbarkeit und eine sehr gute Regelungsmöglichkeit des magnetischen Druckes auf. Da keine Hilfsstoffe notwendig sind, kann das EMPT Fügen auch unter sterilen Bedingungen durchgeführt werden. Abbildung 7 zeigt eine mit Hilfe der Pulsumformtechnik verschlossene Medikamentenflasche aus Glas.



Bild 7: sterile Fügeverbindung einer Medikamentenflasche

Abbildung 8 stellt einen Druckschlauch dar, dessen Anschlüsse mit Hilfe der EMPT gefügt sind. Die Verbindung hält dem Berstversuch stand, der Schlauch jedoch versagt bei 70 bar Innendruck.

Das Fügen mit Hilfe elektromagnetischer Pulsumformtechnologie beschränkt sich nicht nur auf Strukturen niedriger Festigkeit. Vielmehr ist auch die Umformung –und somit auch das Fügen– höher fester Stahlbauteile möglich. So zeigt Abbildung 9 einen Kotflügelhalter aus dem LKW- Bereich, der höheren Festigkeitsanforderungen unterliegt. Der Rohrdurchmesser beträgt ca. 50 mm, Wanddicke 3mm, ST52

stellt den Werkstoff dar. Die geforderte Abzugskraft beträgt 45 kN, die Verbindung selbst hält aber Abzugskräften von mehr als 75 kN stand. Die Baugruppe versagt durch Bruch des Rohres außerhalb des Fügebereiches.



Bild 8: Druckfeste Verbindung eines Schlauches mit einem Stahlanschluss



Bild 9: EMPT Fügung an einem LKW-Kotflügelhalter

Formschlüssiges Fügen elektrischer Kontakte mittels der EMPT weist gegenüber mechanischen Verfahren eine höhere und gleichmäßigere Verpressung auf. Die elektrischen Übergangswiderstände EMPT gecrimpter Kabelanschlüsse sind teilweise 50% niedriger als die durch mechanische Crimpen hergestellter Anschlüsse [3].

2.3 Stoffschlüssiges Fügen

Formschlüssiges Fügen ist in der industriellen Anwendung weit verbreitet. Unter Zuhilfenahme von Dichtelementen kann hierbei auch eine Gasdichtheit geschlossener Behälter gewährleistet werden. In einigen Fällen ist es jedoch wünschenswert, stoffschlüssige Fügungen durchzuführen, da das Produkt besonderen Anforderungen hinsichtlich Belastung oder Dichtheit unterliegt. Mit Hilfe der EMPT ist es möglich, stoffschlüssige Verbindungen metallischer Werkstoffe zu fertigen. Dies geschieht ohne Aufbringung thermischer Lasten und somit auch ohne Gefügeänderungen.

Das Verfahren beruht – wie auch das verwandte Sprengschweißen – darauf, dass die Atome zweier metallisch reiner Kontaktpartner unter hohem Druck einander genähert werden, bis sich ein metallischer Verbund durch Elektronenaustausch aufbaut. Während des Prozesses „rollt“ der druckbelastete Kontaktpartner auf dem anderen ab, es schließt sich ein zunächst V-förmiger Spalt (Abbildung 10).

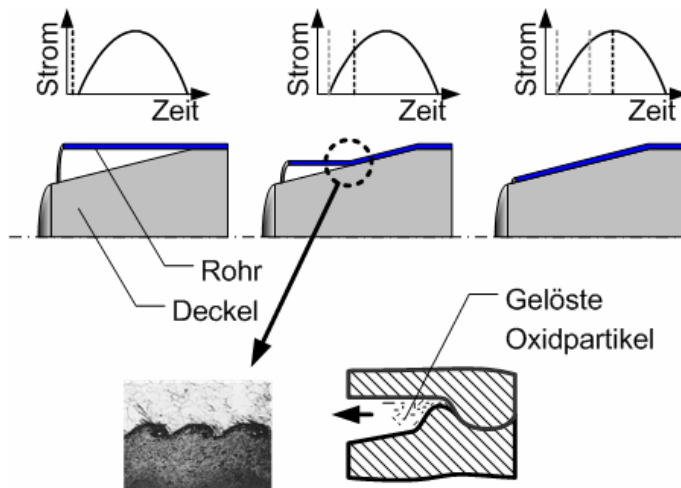


Bild 10: Schematische Darstellung der Abläufe beim EMPT Schweißen

Im Grund des V-förmigen Spaltes treten Kontaktnormalspannungen in der Größenordnung einiger 1000 N/mm² und erhebliche Dehnraten auf. Hierdurch entsteht vor dem Kontaktpunkt eine sich fortlaufend neu bildende Bugwelle in beiden Kontaktpartnern, deren Wellenlänge im Bereich einiger 10 µm liegt. Die dadurch hervorgerufenen oberflächennahen, erheblichen plastischen Deformationen der Wirkfuge führen zu einem Aufbrechen der Oxidschichten beider Kontaktpartner. Finite Elemente Berechnungen zeigen Verformungsgeschwindigkeiten, die z.T. oberhalb der Schallgeschwindigkeit in Luft, jedoch weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit üblicher Metalle liegen. Die im Wirkspalt befindliche Luft wird dadurch stark komprimiert und aus dem Spalt heraus beschleunigt. Der entstehende so genannte Jet trägt Schmutz und gelöste Oxidteilchen aus dem Fügebereich heraus.

Die Vorteile stoffschlüssiger EMPT Fügungen sind zum Einen durch die hohe Festigkeit der Verbindung begründet. Die Fügestellenfestigkeit entspricht der Festigkeit des weicheren Kontaktpartners. Zum Anderen besteht die Möglichkeit zur Erzeugung Helium dichter Verbindungen unterschiedlicher metallischer Werkstoffe ohne thermische Gefügebeeinflussung. Schwer schweißbare Edelstähle sind mit dieser Technik stoffschlüssig miteinander ffügbar wie z.B auch Aluminium-Stahl oder Stahl-Kupfer Werkstoffpaarungen. Abbildung 11 zeigt eine Alumi-

niumantriebswelle mit EMPT eingeschweißten Stahlanschlussköpfen. Die Welle wurde im Torsionsversuch geprüft. Versagen tritt durch plastische Verformung des Rohres ausserhalb des Fügebereichs auf.



Bild 11: Leichtbau- Aluminiumwelle mit EMPT eingeschweißten Stahlanschlussköpfen

Die notwendigen magnetischen Drücke und damit auch die Bauteilverformungen können oftmals durch höhere Halbzeugqualitäten und gute Oberflächenvorbereitung reduziert werden.

3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Bei Betrachtung der im EMPT Prozess auftretenden hohen Ströme drängt sich unweigerlich der Gedanke hoher Stromkosten sowie der der Notwendigkeit eines geeigneten Stromanschlusses auf. Dies ist jedoch weit gefehlt, denn die Ströme werden durch stoßartige Entladung der Kondensatoren des Pulsgenerators aufgebracht. Zum Laden der Kondensatoren ist auch bei leistungsstarken Generatoren lediglich ein 380 V/ 32 A Netzanschluss notwendig. EMPT Anlagen kleiner Leistung können z.T. sogar an handelsüblichen 230V Anschlüssen betrieben werden. Die Stromkosten für einen Puls liegen derzeit bei Anlagen mit 60kJ Energiespeicher unter 0,25 Cent.

Eine von PSTproducts entwickelte und patentierte Spule zum multiplen Formen und Fügen erlaubt die gleichzeitige Umformung mehrerer Bauteile mit dem Strombedarf einer gleichwertigen Einzelumformoperation. Durch Einsatz dieser Spezialspule ist es möglich die Ausbringung pro Zeiteinheit zu vervielfachen sowie die bauteilbezogenen Umform-/Fügekosten drastisch zu senken. Die Fertigung mehrerer Bauteile in einem Puls führt zudem zu einer deutlichen Verlängerung der Wartungsintervalle des Pulsgenerator und des Spule, da bei diesen Komponenten der Verschleiß maßgeblich von der abgegebenen Pulszahl abhängig ist.

PSTproducts bietet Kunden neben dem reinen Maschinenkauf auch die Möglichkeit an eine Anlage auf Pro Puls Basis zu installieren. Abrechnungs-

grundlage ist hierbei die Anzahl der pro Jahr abgegebenen Pulse. Dieses Modell beinhaltet auch alle Wartungskosten für den Pulsgenerator und soll daher an dieser Stelle zur Angabe eines Fügepreises herangezogen werden. So betragen die Kosten für eine formschlüssige Fügung (inklusive Stromkosten zum Stand Januar 2009) für die in Abbildung 9 gezeigte Stahl-Stahl Baugruppe bei 400.000 Pulsen pro Jahr ca. 0,33€.

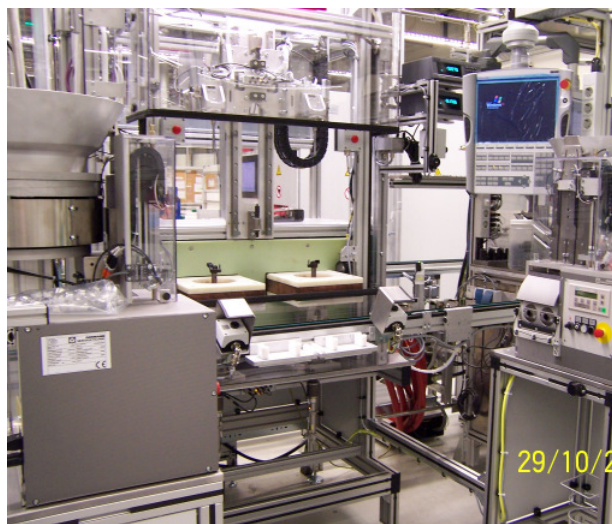


Bild 12: PS45 EMPT- Anlage mit Doppelspulenkonzept (ein Puls zwei Bauteile) installiert bei einem großen, deutschen Automobilzulieferer

4 Zusammenfassung

Die elektromagnetische Pulsumformtechnik (EMPT) basiert auf der berührungslosen Verformung

elektrisch leitfähiger Werkstoffe mit Hilfe starker magnetischer Felder. Hierdurch ist sowohl die Durchführung von Umform-, Schneid- und Fügeoperationen im Bereich der Blech und der Rohrbearbeitung möglich. Im industriellen Einsatz überwiegt derzeit jedoch die Rohrfüge und Formtechnik. Eine Besonderheit der EMPT in diesem Kontext ist die Möglichkeit zur Kompression nahezu beliebiger Querschnitte.

Die in der Vergangenheit problematische Werkzeug- und Pulsgeneratorstandzeit ist heute durch Einsatz geeigneter Werkstoffe und Auslegungsmethoden auf Wartungsintervalle von 500.000-2.000.000 Pulsen angehoben. Die Kosten für eine einzelne Umformoperation an härtesten Stahlbauteilen sind somit auf Centbeträge gesunken. Die Verfügbarkeit der PSTproducts Anlagen genügen den heutigen industriellen Anforderungen mit 100% Prozesskontrolle und Implementierbarkeit in vollautomatisierte Fertigungslinien.

Literatur

- [1] Daehn, G. S. et. Al.; S.: Opportunities in High-Velocity Forming of Sheet Metal. Metalforming magazine, January 1997
- [2] Lide, D. R.: CRC Handbook of Chemistry and Physics: 87th Edition: 2006 - 2007. 87th ed. Auflage. B&T, 2006
- [3] Belyy, I. V.; Fertik, S. M.; Khimenko, L. T.: Electromagnetic Metal Forming Handbook. A Translation of The Russian Book: Spravochnik po Magnitno-impul'snoy Obrabotke Metallov. Translated By M. M. Altynova, Material Science and Engineering Dept., Ohio State University, 1996
- [4] Winkler, R.: Hochgeschwindigkeitsumformung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1973
- [5] Miracle, D.B. et.al: ASM Handbook: Composites. Edition: 10, ASM International, 2002