

Einsatz der Elektromagnetischen Puls Technologie (EMPT) – Anwendungsmöglichkeiten im Anlagen- und Behälterbau

Dipl.-Ing. IWE Stephan Kallee, Dr.-Ing. Ralph Schäfer und Dr.-Ing. Pablo Pasquale
PSTproducts GmbH, Alzenau, <http://www.pstproducts.com>

1 Einführung

Die elektromagnetische Puls Technologie (EMPT) ist ein berührungsloses Fertigungsverfahren zum Schweißen, Fügen, Umformen und Schneiden von Metallen^[1]. Es kommt zu einer zunehmenden Anzahl von industriellen Anwendungen für Druckbehälter und Rohrleitungen insbesondere von schwer schmelzschweißbaren Legierungen, Mischverbindungen und Leichtmetallen (Bild 1).



Bild 1: EMPT geschweißter Druckbehälter für Kraftfahrzeug-Klimaanlagen Alu-Alu ($\varnothing 75\text{mm}$)

Bei diesem Verfahren werden elektromagnetische Spulen verwendet, durch die kurzzeitig ein Strom mit sehr hoher Stromstärke fließt, der von einem Pulsgenerator bereitgestellt wird. Durch elektromagnetische Kräfte kann z.B. der Durchmesser von Rohren durch Kompression oder Aufweitung geändert werden. Da in Rohren kurzzeitig ein Wirbelstrom induziert wird, können auch nicht-magnetische Metalle wie Aluminium verarbeitet werden. Durch die hohe Verfahrensgeschwindigkeit ist es sogar möglich, auch Schweißungen entsprechend dem Sprengplattieren durchzuführen.

Da es sich bei der EMPT um ein formgebendes Fügeverfahren handelt, sind Füge- und Umformoperationen von metallischen Werkstoffen wie Aluminium-, Kupfer- und Stahlrohren möglich. Es besteht die Möglichkeit, auch nicht rotationssymmetrische Querschnitte zu expandieren oder zu komprimieren. Das Ergebnis kann eine stoff- oder formschlüssige Fügeverbindung oder eine reine Geometrie-

änderung sein (z.B. spezifische Formgebungen oder Kalibrieroperationen).

Im Folgenden werden die technologischen Möglichkeiten der EMPT, die hierzu notwendige Anlagentechnik sowie die Wirtschaftlichkeit des Prozesses kurz dargestellt.

2 Grundlagen der elektromagnetischen Pulstechnologie (EMPT)

Stromdurchflossene Leiter erfahren in einem Magnetfeld eine Kraft, die nach ihrem Entdecker Lorentzkraft genannt wird. Zudem erzeugen stromdurchflossene Leiter ein magnetisches Feld. Zwei parallele, stromführende Leiter stoßen sich deshalb voneinander ab, wenn die Stromflussrichtung in beiden gegenläufig ist (Bild 2).

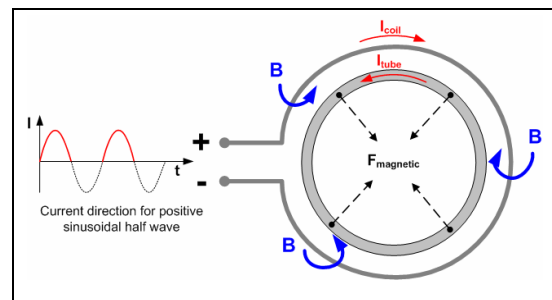


Bild 2: Kräfte auf ein metallisches Rohr in einer stromdurchflossenen Spule

3 EMPT-Anlagentechnik

Die EMPT-Anlagentechnik besteht aus einer Spule, gegebenenfalls einem Feldformer und dem zur Bereitstellung der hohen Ströme notwendigen Pulsgenerator (Bild 3):



Bild 3: Integriertes EMPT BlueWave System PS16-10 mit 16kJ Energiespeicher bei 10kV Spannung

Es gibt etwa 400-500 EMPT Anlagen in den verschiedensten Industriesektoren. Die Anzahl der EMPT Anlagen steigt zur Zeit sehr stark an, da es inzwischen sehr zuverlässige und langlebige industriell genutzte Anlagen gibt. PSTproducts gilt als Weltmarktführer für industrielle EMPT Systeme.

3.1 Spulen und Feldformer

Spulen und Feldformer dienen zum Aufbringen des magnetischen Drucks auf das elektrisch leitfähige Werkstück^[2]. Die Spule besteht aus einer oder mehreren Windungen eines hochfesten und leitfähigen Werkstoffs und die Spulenleiterquerschnitte betragen aufgrund der hohen Ströme in der Regel mehrere 100 Quadratmillimeter.

Der Feldformer ist mit mindestens einem radialen Schlitz versehen sowie gegen Spule und Werkstück elektrisch isoliert. Feldformer und Spule weisen an ihrer Wirkfuge die gleiche Länge auf. Die Spule induziert im 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 sogenannte Schneide. Dies bewirkt zweierlei: Zum einen wird das ungleichmäßige magnetische Feld der mehrwindigen Spule homogenisiert, zum anderen werden die magnetischen Feldlinien auf den Schneidenbereich konzentriert (Bild 4).

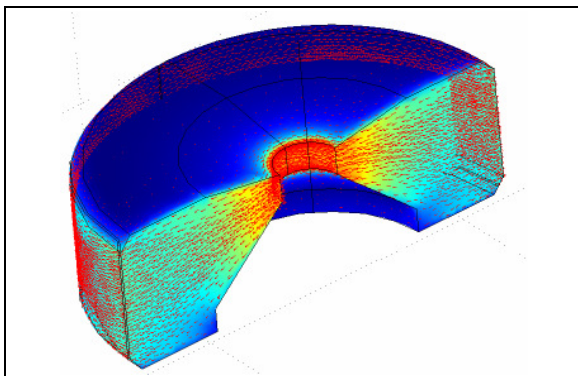


Bild 4: Konzentration des elektromagnetischen Feldes im Feldformer

Hierdurch ist der auf die Spule wirkende magnetische Druck geringer als der auf das Werkstück lastende. Die Standzeit der Spule ist somit beim Einsatz eines Feldformers erheblich höher als die einer direkt wirkenden Spule und führt zu einer erhöhten Spulenstandzeit und Wirtschaftlichkeit. Moderne Spulen von PSTproducts GmbH sind so ausgelegt, dass eine Spulenstandzeit von bis zu 2.000.000 Pulsen gewährleistet ist.

Der Feldformer dient in erster Linie zur Homogenisierung des magnetischen Feldes mehrwindiger Spulen, zur Konzentration der Feldlinien auf den Umformbereich und zur mechanischen Entlastung der Spule (Bild 5). Darüber hinaus kann mit einem Feldformerwechsel die Spule mit geringem Aufwand an neue Werkstückdurchmesser oder -geometrien angepasst werden. Ein Feldformerwechsel dauert 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.

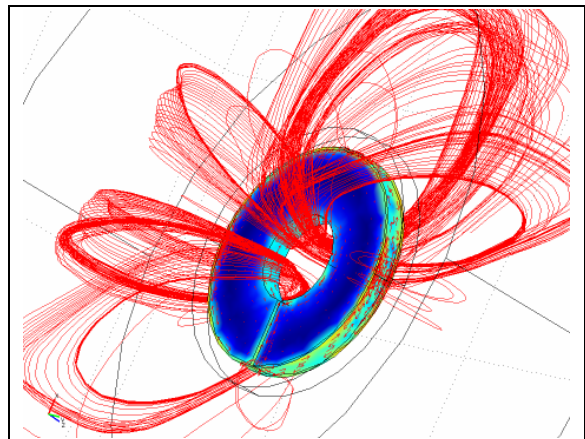


Bild 5: FEM Darstellung der magnetischen Feldlinienverteilung im Inneren eines Feldformers

3.2 Pulsgenerator

Die zur Umformung metallischer Werkstoffe notwendigen magnetischen Drücke liegen im Bereich von bis zu einigen 100 N/mm². Zur Erzeugung dieser Drücke ist es erforderlich, gepulste Ströme im Bereich von 100 kA bis weit über 1500 kA bereitzustellen. Ein entsprechender Pulsgenerator ist in Bild 6 abgebildet.



Bild 6: PS112-16 BlueWave EMPT Pulsgenerator mit 112kJ Energiespeicher bei 16kV Spannung

Der Pulsgenerator besteht aus einer Kondensatorbatterie, einer Kondensatorladeeinheit und einer entsprechenden Verschaltung. Der Pulsgenerator bildet mit der Arbeitsspule des EMPT Systems einen elektrischen Schwingkreis.

4 Arbeitsablauf

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 normalerweise weniger als 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 (Bild 7). Die Entladefrequenz industriell eingesetzter EMPT Anlagen liegt im Bereich zwischen 6 und 60 kHz.



Bild 7: Eine typische Entladekurve

EMPT Anlagen der Firma PSTproducts GmbH zeichnen sich durch eine optimierte Standzeit, hohe Entladeströme und geringe Taktzeiten sowie moderne Prozessüberwachungs- und Steuerungsalgorithmen aus. Die Lebensdauer der Kondensatoren liegt bei modernen Blue-Wave Pulsgeneratoren bei mehr als 2 Millionen Pulsen, Wartungsintervalle liegen bei ca. 500.000 Pulsen, die Entladeströme, je nach Modell, zwischen 100 kA und 2000 kA.

Alleinstellungsmerkmal der PSTproducts Pulsgeneratoren ist die hundertprozentige Prozessüberwachung. Hierbei wird der Stromverlauf eines jeden Pulses analysiert und gespeichert. Darauf basierende Regelalgorithmen gewährleisten, dass sich der Entladestrom auch bei Änderung der Umgebungsbe-

dingungen innerhalb eines spezifizierten Prozessfensters bewegt. Die Steuerungstechnik der Firma PSTproducts GmbH erlaubt somit auch die Einbindung dieser Pulsgeneratoren in vollautomatisierte Produktionslinien.

5 Anwendungsbeispiele

Die EMPT wird industriell wie folgt zum Umformen, Fügen Schweißen und Schneiden eingesetzt:

5.1 Umformen

Beim Umformen besteht die Möglichkeit, rohrförmige Strukturen zu komprimieren bzw. zu expandieren. Dabei können bei Raumtemperatur größere Umformgrade als mit konventionellen Methoden erreicht werden^[3]. Freiumformungen sind generell möglich, jedoch ist zur Gewährleistung geometrischer Toleranzen sowohl bei Kompression als auch bei Expansion der Einsatz von Dornen bzw. Gesenken notwendig. Oftmals ist es erforderlich, diese Stützelemente teilbar vorzusehen, so dass eine Ausformung des gefertigten Bauteils möglich ist.

Die Anwendungsmöglichkeiten des EMPT-Umformens beschränken sich nicht nur auf tubulare Produkte wie sie oft in Wärmetauschern eingesetzt werden (Bild 8). Auch das Umformen ebener Strukturen (Bleche) ist durch die Auslegung geeigneter Spulen möglich.



Bild 8: EMPT geformtes Keilwellenprofil (ø40mm)

5.2 Formschlüssiges Fügen

Formschlüssiges Fügen mit Hilfe der EMPT repräsentiert eine sowohl technologische als auch wirtschaftliche Alternative zu mechanischen Crimp-Prozessen. Aufgrund der berührungslosen Druckaufbringung bei der EMPT werden Werkstücke über den gesamten Umfang gleichmäßig umgeformt. Auch koaxiale Positionierungsfehler der Fügepartner können beim EMPT-Fügen ausgeglichen

werden. 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 zum Beispiel für mit Hilfe der Pulsformtechnik verschlossene Medikamentenflaschen aus Glas (Bild 9).



Bild 9: Vial-Medizinflasche mit EMPT gecrimpten Aluminiumdeckel

Das Fügen mit Hilfe elektromagnetischer Puls Technologie beschränkt sich nicht nur auf Strukturen niedriger Festigkeit. Vielmehr ist auch die Umformung - und somit auch das Fügen - höherfester Stahlbauteile möglich.

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 mechanisches Crimpen hergestellter Anschlüsse^[4]. Formschlüssiges Fügen ist in der industriellen Anwendung weit verbreitet. Unter Zuhilfenahme von Dichtelementen kann hierbei auch eine Gasdichtheit geschlossener Behälter gewährleistet werden (Bild 10).



Bild 10: EMPT gecrimpter Alu-Kunststoff Kraftstoff-Filter mit zwei O-Ringen (ø75mm)

5.3 Stoffschlüssiges Fügen (= Schweißen)

In einigen Fällen ist es wünschenswert, stoffschlüssige Fügungen, d.h. Schweißungen, durchzuführen, z.B. wenn das Produkt besonderen Anforderungen hinsichtlich Belastung oder Dichtheit unterliegt (Bild 11).



Bild 11: Erfolgreicher Schältest eines EMPT geschweißten Alu-Alu Druckbehälters

Mit Hilfe der EMPT ist es möglich, stoffschlüssige Verbindungen metallischer Werkstoffe zu fertigen (Bild 12). Dies geschieht ohne Aufbringung thermischer Lasten und somit auch ohne Gefügeänderungen.



Bild 12: Kleine EMPT geschweißte Druckbehälter für den Automobilbau (ø50mm)

Das Verfahren beruht - wie auch das damit 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, und es schließt sich ein zunächst V-förmiger Spalt. Im Grund des V-förmigen Spaltes treten Kontaktnormalspannungen in der Größenordnung einiger 1000

N/mm² und erhebliche Dehnraten auf (Bild 13). 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.

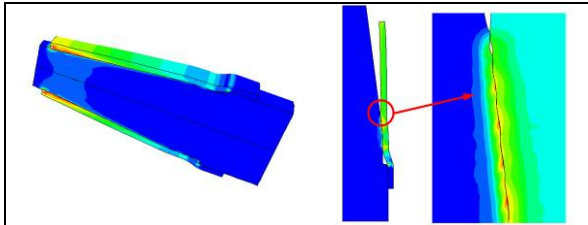


Bild 13: FEM-Simulation der Kraftverteilung während des EMPT-Schweißens

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 sogenannte 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. Schwer schweißbare Edelstähle sind mit dieser Technik stoffschlüssig miteinander ffügbar^[5] (Bild 14).



Bild 14: EMPT Schweißung der ferritisch-martensitischen Stahllegierung T91 für Atomkraft-Kernbrennstäbe (ø8mm)

Zum anderen besteht die Möglichkeit zur Erzeugung heliumdichter Verbindungen unterschiedlicher metallischer Werkstoffe ohne thermische Gefügebeeinflussung. Bei Mischverbindungen entspricht die Fügstellenfestigkeit der Festigkeit des weicheren Kontaktpartners z.B. bei Aluminium-Stahl oder Aluminium-Kupfer Werkstoffpaarungen (Bild 15).



Bild 15: EMPT Schweißung einer Aluminium-Kupfer Mischverbindung (ø25mm)

5.4 EMPT Schneiden

Mit der EMPT lassen sich auch Bleche bis etwa 3mm Dicke schneiden. Diese müssen aus einem elektrisch leitenden Metall sein, z.B. Aluminium, Kupfer, Magnesium, Stahl oder hochfestem Stahl. Edelstahl ist aufgrund des höheren elektrischen Widerstands weniger dafür geeignet. Aber durch den Einsatz eines sogenannten Treibers ist auch das Schneiden von Edelstahl oder Nichtleitern möglich.

In den meisten Fällen wird eine Schneidmatrize eingesetzt^[6]. Das kann im einfachsten Fall eine horizontale Stahlplatte sein, in die ein Loch gebohrt wurde. Über das Loch der Matrize wird das Blech gelegt. Über dem Blech wird eine elektromagnetische Spule installiert und fest verankert. Das Magnetfeld erzeugt in der Oberfläche des zu schneidenden Bauteils einen Wirbelstrom. Dieser wird vom Strom der Spule abgestoßen, da er nach der Lenzschen Regel in der Gegenrichtung zum Spulenstrom fließt. Die Abstoßung ist so stark, dass das Blech mit hoher Kraft auf die Schneidkanten der Matrize gepresst wird, und - ohne einen Stempel zu verwenden - z.B. ein Loch gratfrei ausgestanzt wird.

Um Löcher in Rohre zu schneiden, oder um Rohre in Stücke zu schneiden, wird ein Schneiddorn in das in einer Spule eingelegte Rohr gelegt. Wenn die Spule mit einem Strom beaufschlagt wird, verringert sich der Durchmesser des Rohres schlagartig, so dass es durch das Aufpressen auf den Schneiddorn zu einem Schnitt kommt.

Bei Rohren kommt es auf das Durchmesser zu Wandstärkenverhältnis an, z.B. 75mm Durchmesser und 2mm Wandstärke bei Aluminiumrohren. Die Schnittkanten sind generell gratfrei, was einer der Hauptvorteile des elektromagnetischen Puls Schneidens ist

6 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 haushaltsüblichen 230V Anschlüssen betrieben werden. Die Stromkosten für einen Puls liegen derzeit bei Anlagen mit 60kJ Energiespeicher und 15 Cent/KWh unter 0,0025€ (ein viertel 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 (Bild 16). Durch Einsatz dieser sogenannten MJo Spule (Mehrfachfügespule) ist es möglich, die Ausbringung pro Zeiteinheit zu vervielfachen sowie die bauteilbezogenen Umform- oder Fügekosten drastisch zu senken. Die Fertigung mehrerer Bauteile in einem Puls führt zudem zu einer deutlichen Verlängerung der Wartungsintervalle des Pulsgenerators und der Spule, da bei diesen Komponenten der Verschleiß maßgeblich von der abgegebenen Pulszahl abhängig ist.



Bild 16: Von PSTproducts patentierte MJo Spule zum gleichzeitigen Fügen von zwei Werkstücken

8 Literatur

- [1] Schäfer, R. and Pasquale, P.: "Die Elektromagnetische Puls Technologie im industriellen Einsatz". White Paper, June 2009. <http://www.pstproducts.com/html/downloads.html>
[2] Winkler, R.: Hochgeschwindigkeitsumformung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1973

PSTproducts bietet Kunden neben dem reinen Maschinenkauf auch die Möglichkeit an, eine Anlage auf Pro-Puls-Basis zu installieren. Abrechnungsgrundlage 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 2010) für eine typische Stahl-Stahl Baugruppe eines Automobilzulieferers bei 400.000 Pulsen pro Jahr ca. 0,32€ (zweiunddreißig Cent). Wenn mit einer von PSTproducts patentierten MJo Spule zwei Bauteile gleichzeitig gefügt werden, sinkt der Preis pro Fügestelle auf 0,16€ (sechzehn Cent).

7 Zusammenfassung

Die elektromagnetische Puls Technologie (EMPT) basiert auf der berührungslosen Verformung elektrisch leitfähiger Werkstoffe mit Hilfe starker magnetischer Felder. Hierdurch ist die Durchführung von Umform-, Schneid- und Fügeoperationen im Bereich der Blech- und 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 numerischer Auslegungsmethoden auf Wartungsintervalle von 500.000-2.000.000 Pulse 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.

Weiterführende Informationen:

<http://www.pstproducts.com>

- [3] Daehn, G. S. et al: Opportunities in High-Velocity Forming of Sheet Metal. Metalforming magazine, January 1997
- [4] 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 Altynova M. M., Material Science and Engineering Dept., Ohio State University, 1996
- [5] McGinley J.: "Electromagnetic pulse technology as a means of joining generation IV cladding materials". 17th Int. Conference on Nuclear Engineering ICONE17, 12-16 July 2009, Brussels, Belgium
- [6] Kräusel V. and Lieber T.: "Schneiden mit elektromagnetischen Feldern". Fraunhofer Mediendienst December 2009

© Copyright, PSTproducts GmbH, 2010: <http://www.pstproducts.com/html/impressum.html>