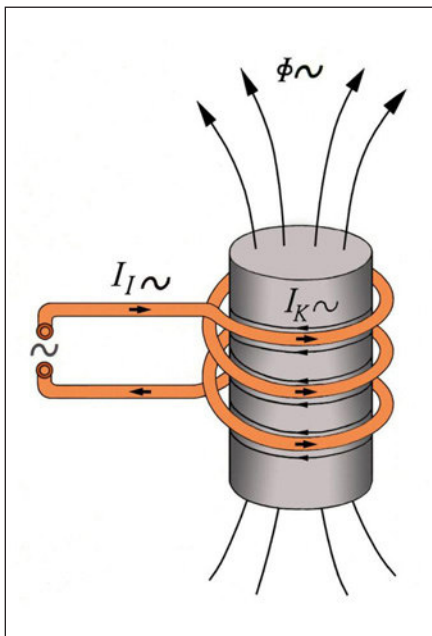


## NACHHALTIGES LÖTEN MIT INDUKTIVER ERWÄRMUNG

# Nachhaltig Löten – geht das?

Hans-Joachim Peter, Berlin

Neben Energie aus fossilen Energieträgern lässt sich auch elektrische Energie zum Löten nutzen. Allerdings wird diese größtenteils wiederum aus fossilen Energieträgern gewonnen. Es gibt zwar große Anstrengungen, den Anteil an erneuerbaren Energieträgern zur Erzeugung elektrischer Energie zu steigern. Allerdings gibt es hier Grenzen. Es gilt also auch beim Löten, sparsam mit Energie umzugehen, und Wärme nur an den Stellen eines zu lötenden Werkstücks zuzuführen, an denen die Wärme auch nötig ist. Hier tritt insbesondere das Löten mit induktiver Erwärmung in den Fokus der Überlegungen, was für das nachhaltige Löten von entscheidender Bedeutung werden könnte.



▲ Bild 1. Prinzipielle Darstellung der induktiven Erwärmung eines Metallzylinders, der von einem dreiwindigen Induktor umschlossen ist: magnetischer Fluss  $\Phi$ , Wechselstrom  $I_I$ , induzierter Strom (Kurzschlussstrom)  $I_K$

Der allgemeine Begriff Löten umfasst das Weichlöten mit Arbeitstemperaturen bis etwa 450°C und das Hartlöten einschließlich Hochtemperaturlöten mit über 450°C bis etwa 1700°C. Das heißt, Löten ist ein thermisches Fügeverfahren. Die erforderliche Wärmeenergie wird dabei meist aus fossilen Energieträgern, zum Beispiel Heizöl, Heizgas, gewonnen. Mit diesen Energieträgern können dann Lötanlagen wie Flammlötanlagen oder Ofenlötanlagen (zum Beispiel Förderband-Durchlauföfen) betrieben werden.

Neben diesen genannten Energieträgern, die direkt zum Löten eingesetzt werden

können, kann auch elektrische Energie genutzt werden. Allerdings wird diese Energieform zum großen Teil wieder aus fossilen Energieträgern gewonnen. Dieser Zustand muss so nicht bleiben. Es werden große Anstrengungen unternommen, den Anteil an erneuerbaren Energieträgern massiv zu steigern, um dann daraus elektrische Energie zu generieren. Dass hier noch sozusagen Luft nach oben ist, sollte uns nicht entmutigen, die sogenannte Energiewende zu forcieren. Diese, aus erneuerbaren Energieträgern gewonnene elektrische Energie für Lötprozesse einzusetzen, sollte also das Ziel heutiger Überlegungen sein. Nun sollte aber auch diese Energieform nicht allzu großzügig eingesetzt werden, auch hier gibt es Grenzen der Zurverfügungstellung. Es gilt also, das Sparsamkeitsprinzip so weit wie möglich durchzusetzen und Wärme nur an den Stellen eines zu lötenden Werkstücks zuzuführen, an denen die Wärme auch benötigt wird. Dass hier insbesondere das Löten mit induktiver Erwärmung in den Fokus der Überlegungen tritt, ist naheliegend und könnte so für das nachhaltige Löten von entscheidender Bedeutung werden. Bis dahin ist es aber noch ein steiniger Weg.

## Seit mehr als 70 Jahren erfolgreich im Einsatz

Das Löten mit induktiver Wärmeführung basiert auf dem Transformatorprinzip. Eine mit einem Wechselstrom durchflossene Induktionsspule (meist Induktor genannt) erzeugt ein magnetisches Feld wechselnder Richtung. In einem in dieses magnetische Wechselfeld eingebrachten Werkstück (zu betrachten wie eine kurzgeschlossene Spule, Kurzschlussring)

wird nach dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert, die wiederum einen Stromfluss zur Folge hat (Bild 1) [1]. Dieser Stromfluss (Wirbelstrom) bewirkt die gewünschte Erwärmung. Wärme entsteht aber nicht nur im Werkstück, sondern auch im Induktor. Um diese Wärme gering zu halten, wird er aus Kupfer hergestellt und zusätzlich mit Wasser gekühlt. Bei der Sekundärspule, also dem Werkstück, ist die entstehende Verlustwärme ausdrücklich gewünscht, hier wird der Lötprozess ausgelöst.

Diese induktive Löttechnologie wird besonders in der Metall verarbeitenden Industrie als Fügeverfahren bei meist hohen Stückzahlen seit mehr als 70 Jahren erfolgreich eingesetzt [2]. Durch die optimale Gestaltung der Induktorform kann die erforderliche Erwärmung auf den Teil des Bauteils beschränkt werden, an dem die Erwärmung tatsächlich benötigt wird. Alternative Lötverfahren wie das Flammlöten oder das Löten in Ofenlötanlagen (zum Beispiel Förderband-Durchlauföfen mit Elektro- oder Gasbeheizung) haben sich ebenfalls für die Massenproduktion bewährt. Gerade aber in der heutigen Zeit gewinnt ein Faktor neben anderen zunehmend an Bedeutung, nämlich die Effektivität der thermischen Fügeverfahren, und zwar der spezifische Energieverbrauch. Es ist deshalb nur folgerichtig, dass auch die Energieeffizienz der eingesetzten Verfahren zum Löten stärker in den Fokus gerückt werden muss. Hier liegen offensichtlich nicht nur große Energieeinsparpotenziale, sondern es ergibt sich auch die Notwendigkeit, lang- oder mittelfristig auf nachhaltiges Löten umzustellen. Es gilt deshalb, den elektro-thermischen Fügeverfahren größere Beachtung zu schenken, bei denen neben der

hohen Energieeffizienz verbunden mit einer hohen Qualität auch die Nachhaltigkeit gesehen werden muss.

Die Vorteile des induktiven Lötens liegen auf der Hand: hohe Energieeffizienz, Beschränkung der Erwärmung auf die Lötzone und damit keine thermische Beeinflussung der benachbarten Werkstückzonen, keine (bei Schutzgaslötung) oder nur geringe (bei Flussmittellötung) Nacharbeitskosten sowie hohe Stückzahlen bei gleichbleibend hoher Fertigungsqualität und die Möglichkeit der Integration in den Produktionsprozess.

### Energiequellen sehr flexibel einsetzbar

Um die erforderliche Energie für die induktive Erwärmung bereitzustellen, werden Transistor-Umrichter eingesetzt. Diese Umrichter sind sehr flexibel einsetzbar. Dabei werden Frequenzen sowohl im unteren (Mittelfrequenz (MF) mit etwa 10 bis 25 kHz) als auch im höheren (Hochfrequenz (HF) mit etwa 150 bis 450 kHz) Bereich abgedeckt. Die erforderliche Leistung für eine bestimmte Lötstelle kann dabei sehr genau gesteuert werden, ob mit verschiedenen nacheinander ablaufenden Zeit-/Leistungsstufen oder über Pyrometersteuerung, sodass mit geringstmöglicher Energie die Werkstücke schonend erwärmt und gelötet werden können. **Bild 2** zeigt als Beispiel einen 70-kW-Generator der „Eco Line“-Baureihe von



◀ Bild 2. 70-kW-Mittelfrequenz-Generator der „Eco Line“-Baureihe

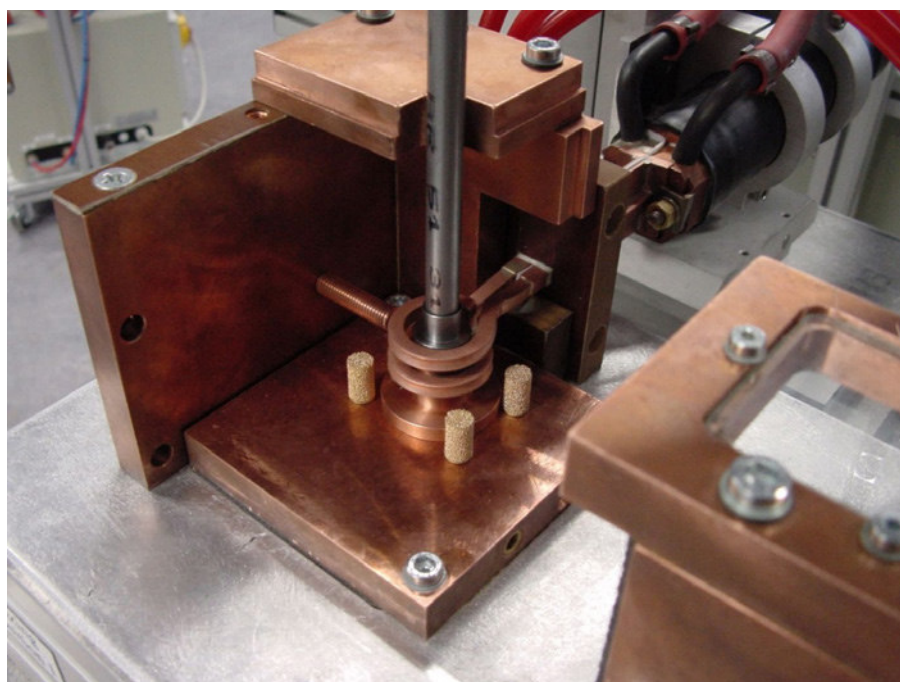
Emag eldec. Die Generatoren passen sich in jede Produktionslösung ein. Sie verfügen über eine Dauerleistung von 5 bis 150 kW (MF-Version) oder 5 bis 75 kW (HF-Version). Die Umrichter erreichen bei Volllast einen Wirkungsgrad von über 90%. Dabei ist es heute üblich, einen flexiblen Leistungsausgang über Kabel mit Koaxialtransformator oder außen liegendem Schwingkreis (bei hohen Leistungen) anzubringen. Hier ist die Möglichkeit gegeben,

mit dem am Koaxialtransformator (Koaxtrafo) (**Bild 2 unten**) befestigten Induktor sehr flexibel umzugehen. Die Generatoren können optional mit einer Vielzahl von Ausgangsvarianten angeboten werden. So kann jede Leistungsklasse zum Beispiel auch als „2A“ (zwei Ausgänge, nacheinander heizen), als „x2“ (zwei Ausgänge, gleichzeitig unabhängig voneinander heizen) oder als „:2“ (gleichzeitig symmetrisch heizen) geliefert werden. Mit ihrer kompakten Bauart und der Vielzahl an Ansteuerungsmöglichkeiten (optional: Profibus-/Profinet-Schnittstelle) können diese Generatoren optimal in Gesamtsysteme eingebunden werden.

### Spulenform optimale Induktorform

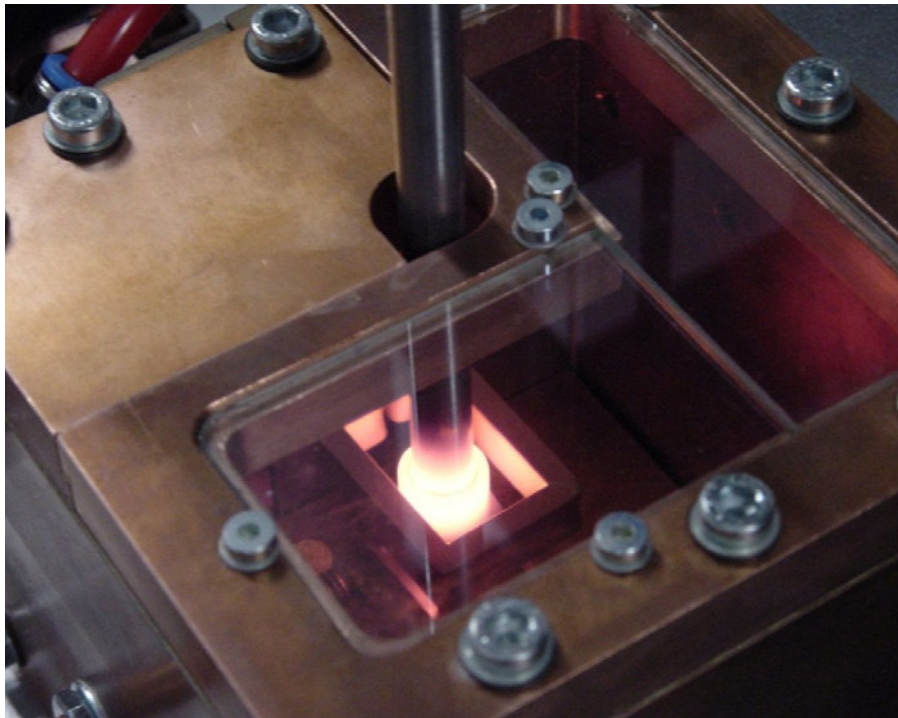
Je nach der anstehenden Aufgabe, welche Zone erwärmt werden soll und wie die Zugänglichkeit zur Lötstelle beschaffen ist, sind verschiedene Induktorformen gebräuchlich. Die optimale Induktorform ist die Spulenform, die das Werkstück umschließen kann. Hier wirkt das Innenfeld des Induktors und somit der günstigste Wirkungsgrad. Wenn diese Möglichkeit nicht gegeben ist, können zum Beispiel auch gabelförmige Induktoren oder auch sogenannte Klappinduktoren verwendet werden.

Die Magnetfeldkräfte wirken sowohl auf den Induktor als auch auf das Werkstück, deshalb muss im Allgemeinen das Werkstück eingespannt und der Induktor stabil aufgebaut



▲ Bild 3. Geöffnete Schutzgaskammer mit zweiwändigem Ringinduktor und in Lötposition eingeschobenem Rohrwerkstück





▲ Bild 4. Geschlossene Schutzgaskammer während des Hartlötvorgangs

werden. Da die induzierten Ströme lediglich an der Oberfläche des Induktors und des Werkstücks fließen, bedeutet das für den Induktor, dass nicht der Querschnitt für die Stromleitung maßgebend ist, sondern die Oberfläche. Die Zuleitung muss also möglichst großflächig ausgebildet werden, um die ohmschen Verluste des Induktors gering zu halten. Deshalb wird die Zuleitung aus Kupferblech (etwa 1,5 bis 2 mm dick bei Leistungen bis etwa 50 kW bzw. 2 mm dick bei Leistungen bis 100 kW) hergestellt. Weitere Verluste können in längeren Zuleitungen entstehen, wenn der Abstand zwischen der Hin- und der Rückleitung des Induktors zu groß gewählt wird. Es entstehen dann neben den ohmschen Verlusten induktive Verluste. Der Zwischenraum sollte also möglichst eng und kurz gehalten werden. Im Allgemeinen sieht man hier 1 bis 2 mm Zwischenraum vor. Der Stromfluss im Induktor ist stets so gerichtet, dass er verstärkt in der Fläche fließt, die der gegenüberliegenden am nächsten ist (Proximity-Effekt).

Der Induktorfuß wird mit dem individuellen Induktorkopf durch Hartlöten verbunden. Der so entstandene Induktor kann dann mit der Induktionserwärmungsanlage (Koaxialtransformator) verbunden werden. Der elektrische Anschluss ist gleichzeitig mit der Kühlwasserzuführung über O-Ring-Abdichtung gekoppelt. Die Klemmung des Induktors erfolgt

meist mit zwei Klemmstücken aus unmagnetischem Chromnickelstahl. Wasserdurchflusswächter für Induktor- und Transformator- kühlung bieten Sicherheit gegen zu geringen Kühlwasserfluss. Durch diese Konstruktion ist ein schneller und leichter Induktorwechsel bei verschiedenen zu lötenden Werkstücken möglich [1].

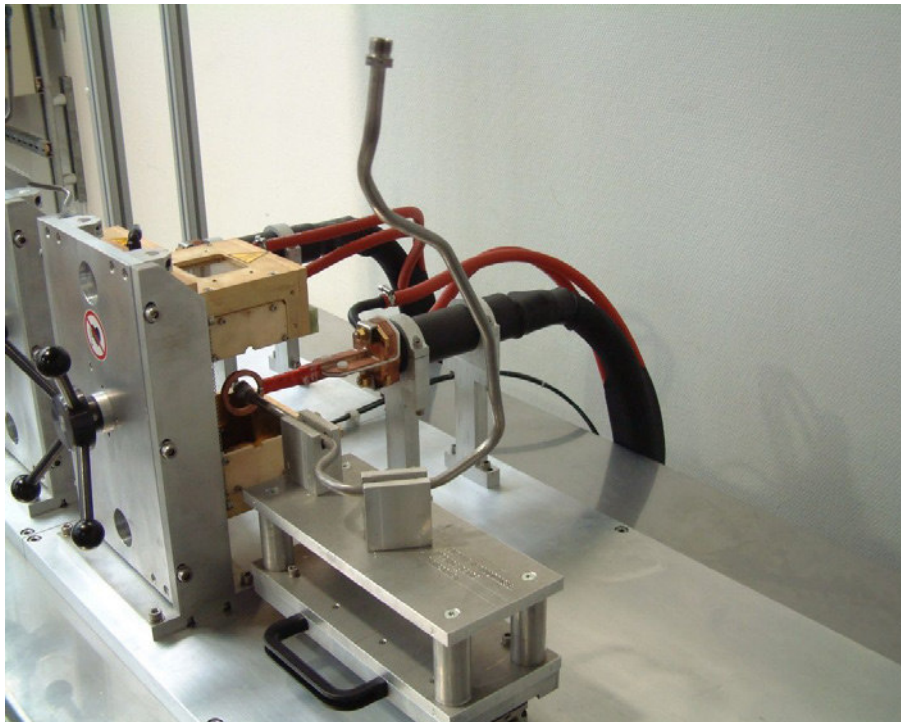
### Lötbeispiele aus der Praxis

Es können grundsätzlich alle elektrisch leitenden Werkstoffe induktiv gelötet werden, die auch mit anderen Erwärmungsmethoden gelötet werden können. So werden zum Beispiel beim Hartlöten von Stahlwerkstoffen heute zunehmend Schutzgase als Oberflächenschutz verwendet, um eine sichere Benetzung durch das Lot und saubere Lötteile ohne Waschprozesse zu erhalten. Dazu können Schutzgaskammern zum Einsatz gelangen, die aber möglichst klein gestaltet sein sollten. Beim Zuführen des Schutzgases muss darauf Wert gelegt werden, dass es möglichst wirbelfrei und annähernd laminar zum glühenden Werkstück strömen kann, um zu verhindern, dass Sauerstoff mitgerissen wird und an die glühende Oberfläche gelangt und damit die Schutzwirkung negativ beeinträchtigt wird.

Zum Werkstückwechsel können die Schutzgaskammern manuell oder auch automatisch geöffnet werden. Sie haben meist ein Schauglas, um den Lötvorgang gegebenenfalls beobachten zu können. So zeigt **Bild 3** eine geöffnete Schutzgaskammer, in der ein Rohr mit einzulötendem Ringstück positioniert ist. Ein zweiwindiger Ringinduktor erwärmt den Lötbereich. In der Grundplatte sind vier Strömungsverteiler aus Sinterbronze angebracht, aus denen das Schutzgas auf die Lötzone



▲ Bild 5. Schutzgaslötanlage zum wechselseitigen Löten von Rohren mit Ringstücken mithilfe eines 15-kW-Generators mit zwei Leistungsausgängen



▲ Bild 6. Lötstation mit eingespanntem Rohrwerkstück, eingekoppelt in einen einwindigen Ringinduktor

strömt. **Bild 4** zeigt den Lötvorgang. Der Induktor hat hier eine rechteckige Form. Bewährt haben sich auch Lösungen, bei denen das Schutzgas direkt aus dem Induktor auf die Lötzone strömt und diese während des Erwärmen und Lötens vor Oxidation schützt [1]. Als Schutzgase kommen vorwiegend reduzierende Mischgase zum Einsatz, zum Beispiel Formiergas mit 5 bis 10%  $H_2$ , Rest  $N_2$ , weiterhin auch inerte Schutzgase wie  $N_2$  und Ar.

Je nachdem, wie hoch die Forderungen nach einer „sauberen“ Oberfläche der Werkstücke nach dem Schutzgaslöten gestellt werden müssen, können die gelöteten Werkstücke unmittelbar oder nach einer kürzeren oder längeren Verweilzeit in der Schutzgaskammer dieser entnommen werden. Besonders bei kleinvolumigen Werkstückzonen sorgt eine rasche Abkühlung an Luft für eine nur geringe Oxidationsschicht, die in vielen Fällen auch so akzeptiert werden kann. Ein typisches Verzundern mit abblättermendem Abbrand entsteht

nur beim Aufheizen an Luft oder bei massiven Werkstücken, die eine längere Zeit zum Abkühlen an Luft benötigen.

Gerade im Automotive-Bereich werden viele Bauteile induktiv hartgelötet. Das betrifft unter anderem diverse Rohrverbindungen. So sind mit dem Anlöten verschiedener Endstücke an gebogenen Rohren in Schutzgasdurchlauföfen immer ein Weichwerden und damit ein unkontrollierter Verzug der Rohrleitungen verbunden. Ein nachträgliches Richten ist dabei dann unerlässlich. Der Energieverbrauch ist hoch, da das gesamte Bauteil längere Zeit auf Arbeitstemperatur gehalten wird. Anders ist dies beim Induktionslöten; hier bleiben die Bögen und die Härte der Rohre erhalten, da nur der Lötstellenbereich erwärmt wird, wodurch der Energieverbrauch entsprechend gering gehalten werden kann. Als Lote kommen hierbei fast ausschließlich Kupferlote zur Anwendung wie reines Kupfer, verschiedene Bronzelote mit etwa 6% Sn, aber auch

Kupfer-Mangan-Legierungen mit bis zu 12% Mn (meistens 2%).

Ein Beispiel für eine Schutzgaslötanlage zum Hartlöten von Ringstücken an gebogenen Rohren ist in **Bild 5** zu sehen. Ein 15-kW-MF-Generator vom Typ „MFG 15 DA“ mit zwei wechselseitig arbeitenden Leistungsausgängen speist zwei Arbeitsplätze, die jeweils mit einer Schutzgaskammer ausgerüstet sind. Die mit Kupferlotringen bestückten Werkstücke werden in eine Werkstückaufnahme gelegt und in die seitlich geöffnete Schutzgaskammer eingeführt. Danach wird die Schutzgaskammer geschlossen und der Lötvorgang gestartet. Zunächst wird mit einer hohen Leistungsstufe vorgeheizt und nach Erreichen der Arbeitstemperatur auf eine niedrigere Leistungsstufe zurückgeschaltet. Bis zu acht verschiedene Zeit-Leistungs-Stufen können eingestellt werden. Im Allgemeinen reichen aber zwei Leistungsstufen aus. Während auf der einen Seite gelötet wird, kann auf der anderen Seite ein gelötetes Werkstück gegen ein ungelötetes ausgewechselt werden. Im Bild rechts unten ist der Generator, im Bild links unten ist die Kühlwasserrückkühlanlage zu sehen. Oben auf dem Arbeitstisch sind die beiden Schutzgaskammern mit den Werkstückaufnahmen und darüber die Absaugstutzen angeordnet. **Bild 6** zeigt eine geöffnete Schutzgaskammer mit eingelegtem Rohrwerkstück. Der Energieverbrauch beträgt zum Beispiel beim Löten von Ringstücken in Rohren mit einem Durchmesser von 12 mm  $\times$  1 mm mit Kupferlot, einer Heizzeit von 8 s bei einer aus dem Netz entnommenen Leistung von 5,5 kW etwa 44 kWs = 0,012 kWh. **Bild 7** zeigt die Beschaffenheit der Werkstückoberfläche nach dem Schutzgaslöten. Das unter Schutzgas gelötete Ringstück wurde ohne Abkühlung unter Schutzgas dem Induktorbereich entnommen. Es ist zu erkennen, dass sich auch bei einer sofortigen Entnahme aus dem Schutzgas kein abblättermender Zunder gebildet hat, sondern eine grauschwarz gefärbte Oberfläche.

### Beilagenhinweis

In dieser Ausgabe finden Sie eine Beilage der Firma:  
DVS Media GmbH / Düsseldorf





▲ Bild 7. Ringstück in Rohr (12 mm × 1 mm), mit Kupferlot unter Schutzgas induktiv mit 5 kW in 8 s gelötet, ohne Abkühlung unter Schutzgas (Bilder: [1] (1, 7), Emag eldec (2, 5, 6), MiniTec Berlin (3, 4))

Bei einer angenommenen Produktionsmenge von 10.000 Stück würden nach den im vorigen Absatz angegebenen Werten etwa 122 kWh verbraucht werden. Bei einem Vergleich mit einem Schutzgasdurchlauföfen muss die gesamte Rohrleitung erwärmt werden. Ein mit Exogas betriebener Förderbandofen kann bei 45 kW Leistung eine Durchsatzleistung von 80 kg/h erreichen. Demnach können 10.000 Rohrleitungen von je 0,5 kg in 12,5 h gelötet werden. Bei 45 kW installierter Leistung wäre damit ein Energieverbrauch von etwa 562 kWh verbunden [3]. Gegenüber dem Schutzgas-Induktionslöten muss in diesem Beispiel mit einem etwa 4,6 Mal höheren Elektroenergieverbrauch gerechnet werden. Andere anfallende Kosten, zum Beispiel für Schutzgas und für Abschreibung, sind hier nicht enthalten [5].

#### Effektiver Einsatz gewährleistet

Neben den beschriebenen Anwendungen des induktiven Lötens von Stahlwerkstoffen kommen selbstverständlich weitere Anwendungen hinzu. Gerade in den letzten 30, 40 Jahren wurde eine Reihe von technisch ausgereiften Induktionslötanlagen besonders für das Fügen von Rohrverbindungen entwickelt, wobei mit Schutzgasanwendung attraktive Lösungen angeboten werden konnten; insbesondere auch mit dem Einsatz von Mittelfrequenz- oder Hochfrequenz-Generatoren mit

bis zu vier Leistungsausgängen, die dann jeweils im Wechseltakt geschaltet werden [1]. Hierdurch ist ein effektiver Einsatz der induktiven Erwärmung gewährleistet. Ein besonders wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit der gezielten Beschränkung der Erwärmung auf die Lötzone verbunden mit einer hohen Qualität der Lötverbindung besonders auch bei hohen Stückzahlen. Dieser Punkt wird zukünftig eine immer stärkere Rolle spielen, denn der Senkung des spezifischen Energieverbrauchs bei thermotechnologischen Fertigungsprozessen wird weltweit eine wesentlich stärkere Beachtung geschenkt werden müssen, gerade auch in Bezug auf einen nachhaltigen Energieeinsatz. ■



Dipl.-Ing. Hans-Joachim Peter, Berlin, hansjoachim.peter@yahoo.de

#### Literatur

- [1] Peter, H.-J.: Handbuch Induktives Lötten. 2. Auflage. Eigenverlag (www.induktionsloeten-peter.de), Berlin 2017.
- [2] Peter, H.-J.: Induktionslöten – eine bewährte Fügetechnologie mit innovativem Zukunftspotenzial. Schweißen und Schneiden 60 (2008), Nr. 4, S. 216–221.
- [3] Janissek, N.; Krappitz, H.: Wirtschaftliches Hochtemperaturlöten im Schutzgas-Durchlauföfen durch Optimierung des Lötensystems. DVS-Berichte, Band 212, S. 22–26. DVS Media, Düsseldorf 2001.
- [4] Peter, H.-J.: Induktives Hartlöten – eine Betrachtung auch aus energieökonomischer Sicht. Elektrowärme international (2008), Nr. 3, S. 172–177.

Anzeige

TIG  
EXTRACTOR

# TRANSLAS

8TE TIG EXTRACTOR

## ABSAUGUNG

**KEIN SCHWEISSRAUCH, NUR SAUBERE LUFT**

QUELLENEXTRAKTION

# REINE LUFT

BY WELDERS. FOR WELDERS

TRANSLAS.COM

info@translas.com  
+31 30-604 73 73