

DER PRAKTIKER

DVS

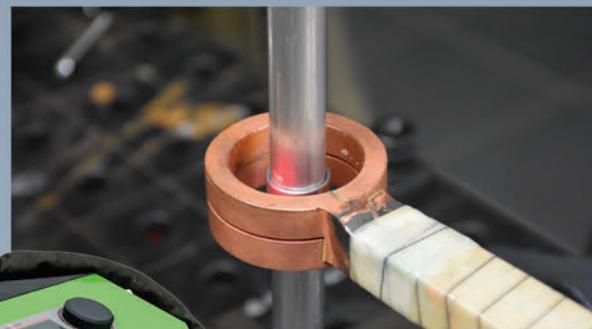
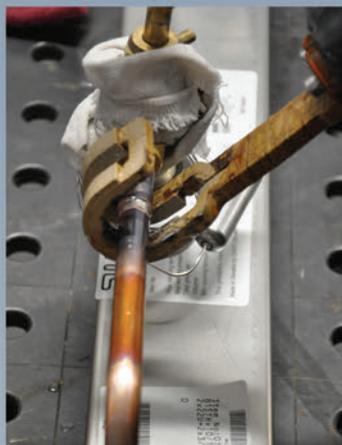
6

Fachmagazin für Schweißtechnik und mehr

2025

Schnell, prozesssicher, sogar automatisierbar:

Löten mit Tiefeninduktion



Tiefeninduktion:

- Leistungsstark
- Energieeffizient
- Kaum Lärm
- Keine Blendung
- Reproduzierbar und risikoarm wärmen
- Keine unkontrollierbar davonlaufenden Oberflächentemperaturen
- Hartlöten, wechlöten
- Kupfer/Kupfer, Kupfer/Edelstahl, Kupfer/Messing, Alu...
- Ring- oder Haken-Induktoren
- Perfekte Lot- und Flussmitteldosierung durch Fülldrahtlot



VauQuadrat

ATION BW
INNOV 2024
Innovationspreis Baden-Württemberg
- Dr.-Rudolf-Eberle-Preis -
Preisträger 2024

SCHWERPUNKT-
THEMA:
LÖTEN

PROZESSSICHERES
LÖTEN MIT TIEFEN-
INDUKTION

HANDGEFÜHRTES
LASERSTRAHL-
SCHWEISSEN

KORROSION DURCH
FLÜSSIGKEITEN AN
STÄHLEN

PROZESSSICHERES LÖTEN MIT TIEFENINDUKTION

Vom Stand der Technik

Thomas Vauderwange

In der Ausgabe 05-2021 *Der Praktiker* wurde von den ersten Erfahrungen des Einsatzes von Tiefeninduktion zum Löten von Kältekreisen im hausinternen Kältemaschinenbau der VauQuadrat GmbH in Offenburg berichtet. Zeit, um den aktuellen Stand betreffend der Lötanwendungen für die Tiefeninduktion zu betrachten. Der Nutzerkreis und die Anwendungsvielfalt haben sich erheblich erweitert.

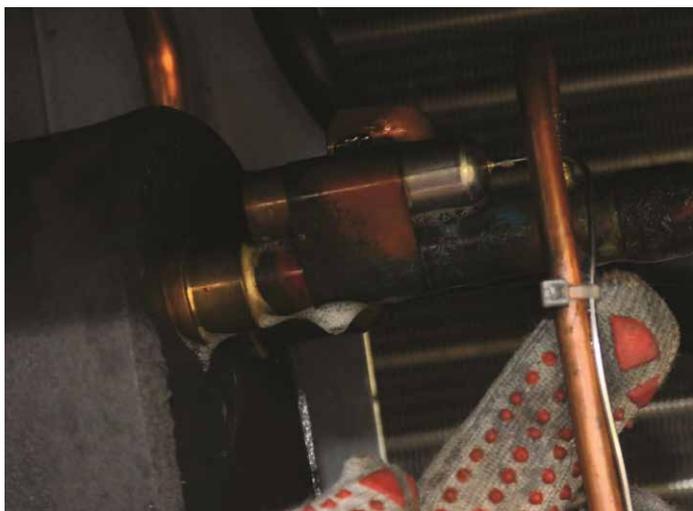


Bild 1: Verräterische Bläschenbildung bei 20 bar Formiergasfüllung und Einsatz von Lecksuchspray weisen den Weg zu größeren Lecks.
(© VauQuadrat GmbH)

Nachdem die zuvor erlebten Lecks zu 95 % an den Mischverbindungen von Chromnickelstahl (der Stutzen des Verdampfers) zu den Kupferrohren des Kältekreises auftraten und sich die handwerkliche Komplexität dieser Lötstellen mit der eigenen Erinnerung deckte, war klar, dass der Ansatz dort zu wählen war. **Bild 1** zeigt ein solches Leck. Teils waren es Verbindungen, bei denen schon anhand der ungleichen Lotverteilung eine Kerbwirkung sichtbar wurde, die im Lauf der Zeit unter der dynamischen Belastung bei laufendem Kompressor zu einem Riss geführt hat, teils aber auch die Tatsache, dass erstarrtes Flussmittel zunächst eine druckdichte Verbindung hergestellt hat.

Die Mission war riskant: im Jahr 2019 selbst zum Hersteller der Tiefeninduktionsgeräte werden. Aus den zehn Jahren zuvor unter Nutzung zugelieferter Geräte war nur eines klar: Das Lästigste waren Lecks im Kältekreis, denn

dann wird es in der Reparatur aufwendig und teuer. Bedingt durch die „Kältevergangenheit“ des Autors war damit gesetzt, den Kaltwassersatz, also das „Untergeschoss“ der Geräte, selbst zu bauen.

Nach einigen Monaten hatten aber Luftfeuchte (oder auch Kondensat, denn an der Lötstelle wird es sehr kalt!) und Temperaturwechsel dazu geführt, dass sich der Flussmittelpfropf auflöst – das Leck war geboren. Dabei handelte es sich durchweg um „große“ Lecks, die mit Seifenwasser und 20 bar Formiergasfüllung im Kältekreis einfach zu sehen waren. Also Lecks, die in der Art bei der Druckprobe am Ende der Fertigung keinesfalls unbemerkt geblieben wären. Auch die Fein-Leckprobe, bei der mit einem „Wasserstoff-Schnüffler“ nach austretendem Wasserstoffgas gesucht wird, war zu dem Zeitpunkt unauffällig (das verwendete Formiergas enthält 90 % Stickstoff und 10 % Wasserstoff).



Bild 2: Kupferrohr wird durch Ringinduktor und Fülldraht-Lotring in Chromnickelstahl-Stutzen eines Verdampfers eingelötet.
(© VauQuadrat GmbH)

Leckfrei mit eigenem Kältemaschinenbau

Die schon im Bericht von 2021 beschriebene Methode der Tiefeninduktion als Wärmequelle und der Nutzung von flussmittelgefüllten, hoch silberhaltigen Fülldraht-Lotringen wurde von Anfang an genutzt – durchaus weiter

perfektioniert – und führt mit Stand Mai 2025 zu der Feststellung, dass es seit Aufstellung des eigenen Kältemaschinenbaus zu keinem einzigen Leck an einer eigenen Lötstelle kam! Wohlgemerkt: Alle Geräte sind mit Niederdruck-Pressostaten (Druckwächter) ausgerüstet, und der Nutzer hätte unvermeidlich eine eindeutige Fehlermeldung, selbst bei den ersten Geräten von 2019.

In Wirklichkeit gab es einige wenige Fälle von Leckagen: einerseits ein Plattenwärmetauscher (Verdampfer), der an einer Ofenlötung undicht wurde – unerklärbar bis heute –, andererseits aber auch zwei Fälle, bei denen die verwendeten Hochleistungs-Verflüssiger nach einigen Monaten an einer der internen Ofenlötungen undicht wurden. Ebenfalls schwer erklärbar, aber selbst diese Anzahl an Leckagen innerhalb sechs Jahren würden zu einer Gesamtbewertung führen, die für die meisten Kälteanlagenbauer schon Grund zum Jubeln wäre. Nun reden wir bei den eigenen Lötstellen aber von Null innerhalb sechs Jahren. Das ist einigermaßen unerhört.

„Königsdisziplin“ Chromnickelstahl zu Kupfer

Betrachten wir also zunächst die „Königsdisziplin“, also die Mischverbindung von Chromnickelstahl zu Kupfer. Dabei ist es übrigens durchaus wichtig, die Werkstoffpaarung richtig herum anzusetzen! Aufgrund der unterschiedlichen Einkoppelung und Abschirmwirkung gegenüber der Tiefeninduktion wäre es fatal, wenn man versuchen würde, ein Chromnickelstahl-Rohr in eine Kupfermuffe zu löten. In der in **Bild 2** gezeigten Variante, also Kupferrohr in Chromnickel-Stutzen, macht es hingegen Sinn.

Gehen wir also davon aus, dass beide Seiten durchschnittlich sauber und nicht verbogen sind. Die Lotringe werden aufgeschoben, das Rohrende wird in die Muffe platziert, ein leichter Formiergasstrom durch die Fügestelle hergestellt und dann mit dem Ringinduktor erwärmt. Wer es noch nicht gesehen hat, schaut sich den Vorgang an und meint „schön, funktioniert ja prima, Induktionslöten ist toll!“.

Aber Vorsicht! Mit dem, was man normalerweise unter „Induktionslöten“ versteht, wäre das Erlebnis ganz anders. Denn während das Löten einfacher Kupfer-Kupfer-Verbindungen



Bild 3: Das Video hinter diesem QR-Code zeigt in aller Kürze den grundlegenden Unterschied des Erwärmungsverhaltens der Tiefeninduktion verglichen mit normaler Induktion vergleichbarer Frequenz.
(© VauQuadrat GmbH)

aufgrund der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit des Kupfers mit so ziemlich jeder Art von Induktion beherrschbar ist, sitzt man bei einem außen liegenden Fügepartner „Chromnickelstahl“ mit seiner geringen Wärmeleitfähigkeit ganz schnell dem sogenannten Skineffekt auf, der bei normaler Induktion in einem aus Arbeitsschutz-Gesichtspunkten geeigneten Frequenzbereich dazu führt, dass sich die ganze Leistung auf der Oberfläche konzentriert. Auf diese Weise laufen die Oberflächentemperaturen schnell unkontrollierbar davon, schlimmer als beispielsweise mit einer Propan-Sauerstoff-Flamme, die man ansonsten in der fachgerechten Kältetechnik-Lötung antrifft. Den Effekt von normaler Induktion und Tiefeninduktion bei vergleichbarer Frequenz sieht man in einem kleinen Video hinter dem QR-Code in **Bild 3**.

Die Besonderheit bei der Erwärmung mit Tiefeninduktion als Wärmequelle besteht nun darin, dass der Chromnickelstahl – mit Wanddicken von durchaus 5 mm bei ungünstiger Stutzengeometrie! – komplett durchwirkt wird und das innen liegende Kupfer bestimmt etwa 10 % der Induktion für eine aktive Erwärmung abbekommt. Das wiederum ist eine



Bild 4: Hinter diesem QR-Code ist ein Video zu finden, in dem das Löten eines Kupferrohrs in einen Chromnickelstutzen mit Fülldraht-Lotring und Tiefeninduktion gezeigt wird.
(© VauQuadrat GmbH)

Information, bei der sich der flammerfahrene Kältetechniker zunächst ungläubig die Augen reibt. Denn die handwerkliche Schwierigkeit beim Löten von Kupfer in Chromnickel besteht normalerweise darin, genügend Wärme in das innen liegende Kupfer zu bringen, ohne den Chromnickelstahl irreversibel zu schädigen. Denn während Anlauffarben auf der Außenseite beim Löten unvermeidlich sind, wären schwarze Spuren auf dem „Edelstahl“ durchaus nicht tolerabel.

So würde man mit der Flamme typischerweise erst einmal nur das oben aus der Verbindung herauschauende Kupferende erwärmen, um die Hitze dem Kupfer entlang per Wärmeleitung nach innen ziehen zu lassen. Wenn das in hinreichendem Umfang passiert ist, zieht man die Wärmequelle nach unten und muss vorsichtig von außen versuchen, die nötige Wärmemenge durch die Stutzenwand nach innen zur Fügestelle zu bringen, ohne die Oberfläche zu überhitzen.

Das kurze Video hinter dem QR-Code in **Bild 4** zeigt, wie so etwas mit Tiefeninduktion aussehen kann. Möglicherweise fallen einem zwei Details auf:



Bild 5: Originalstutzen des Verdampfers (rechts) und Stutzen des für VauQuadrat angefertigten Sonderstutzens mit geringerer Einstecktiefe und vor allem passendem Durchmesser (links)
(© VauQuadrat GmbH)

Tabelle B.1 — Spiel und Überlappstoß

Außendurchmesser mm	Mindesttiefe des Formstücks B mm	Spiel (C-A) mm
$5 \leq OD < 8$	6	0,05 bis 0,35
$8 \leq OD < 12$	7	
$12 \leq OD < 16$	8	0,05 bis 0,45
$16 \leq OD < 25$	10	
$25 \leq OD < 35$	12	0,05 bis 0,55
$35 \leq OD < 45$	14	
$OD < 12$	$1 \times OD$	< 0,35
$12 \leq OD < 22$	$1 \times OD$	< 0,45
$22 \leq OD < 45$	$0,3 \times OD$	

— Verbindungsart: Überlappstoß-Verbindung, T-Stoß (siehe Bild B.3);

Legende
 B Mindesttiefe des Formstücks
 (C-A) Spiel

(Nach DIN EN 14276-1)

Bild 6: Die DIN EN 14276-1 gibt in ihrer Tabelle B.1 Mindesteinstecktiefen für Hartlötverbindungen in Wärmepumpen und Kälteanlage an. (© VauQuadrat GmbH, nach DIN EN 14276-1)

- ▶ In den Stutzen wird zunächst ein Absatznippel zur Durchmesser-Reduzierung gelötet.
- ▶ Bei einem Innendurchmesser des Stutzens von 22 mm sieht man, wie der Absatznippel etwa 15 mm tief eintaucht.

Beides für sich ist noch nicht unbedingt beanstandenswert. Sieht man sich aber die beiden Stutzen in **Bild 5** im Vergleich an, so erkennt man möglicherweise den Punkt. Zur Randinformation: Bei der gegebenen

Wärmetauscher-Größe gibt es keinen realistischen Fall, bei dem ein Rohranschluss größer als 15 mm gebraucht würde. Dieser ergibt sich aus übertragbarer Leistung, Kältemittel-Massenstrom und spezifischer Wärmekapazität des Kältemittels. Beim im *VauQuadrat* V4/V6/V7 eingesetzten Verdampfer werden statt der Original-Anschlussstutzen mit 22 mm am Eintritt und 15 mm am Austritt verwendet, sodass der Absatznippel zur Reduzierung – und damit jeweils eine weitere Lötstelle – entfällt.



Bild 7: So sieht die Fertigungslötung mit Tiefeninduktion routinemäßig, also ganz ohne vorherige Reinigung und „nachlässig handgeführt“ aus – oben (links) wie unten (rechts) komplett kerbfrei. (© VauQuadrat GmbH)

Das spart Energie bei der Fertigung und rein theoretisch zwei mögliche Leckagestellen.

Schaut man sich aber auch die Geometrie der beiden Stutzen genauer an, so fällt einem bei dem Originalstutzen eine Einstecktiefe des Rohres von gut 15 mm auf. Diese Information ist für sich genommen noch nicht viel wert, aber sehen wir uns Tabelle B.1 aus der DIN EN 14276-1:2011-05 an, die in **Bild 6** wieder gegeben ist. Dort wäre für einen Durchmesser 22 mm eine Mindest-Einstecktiefe von 10 mm gefordert, für den Durchmesser 15 mm gar nur 8 mm.

Damit ist man mit der Einstecktiefe 15 mm bei Durchmesser 22 mm natürlich auf der sicheren Seite und absolut normgerecht. Man würde versucht sein, zu sagen „viel hilft viel!“. Wenn das nicht eine fatale Falschannahme wäre.

Um es klar zu sagen: Wenn die entsprechende Lötnaht zu 100 % perfekt wäre, dann stimmte die Annahme, dass eine längere Lötnaht nochmal minimal besser ist als eine kürzere. Genau das ist aber nie der Fall – und eine zu lange Einstecktiefe führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit für eine gute Lötnaht immer geringer wird.

Was ist der entscheidende Punkt?

Die Kriterien für Schwingfestigkeit sind, plump gesagt,

- 1) Die Kerbe
- 2) Die Kerbe
- 3) Die Kerbe

Keine Sorge, die Auflistung ist nicht die Folge von Copy and Paste und danach vergessen zu haben, die Einträge Nummer 2) und 3) zu korrigieren. Es ist aber in der Tat so, dass bei Vorhandensein einer Kerbe entsprechender Schärfe alle anderen Faktoren in den Hintergrund treten. Der Autor ist in dieser Hinsicht dem DVS-Fachausschuss 09 („Stabilität und Berechnung“) für das übertragene Wissen in zehn Jahren Fachausschuss-Sitzungen mehr als dankbar.

Betrachtet man also im Vergleich eine Variante 1 mit einer höheren Einstecktiefe, dafür aber ungleichmäßigerem Eindringen in die Tiefe und dadurch keinen kerbfreien unteren Rand

der Lötverbindung – und eine Variante 2 mit kürzerer (immer noch normgerechter!) Einstecktiefe und dadurch extrem hoher Wahrscheinlichkeit für vollkommenes Durchziehen des Lots in die Tiefe und kerbfreiem, unterem Lötnahtende, so ist klar, welche der beiden Varianten sehr viel schwingfester und dauerhafter ist (**Bild 7**).

Es geht übrigens durchaus noch schlimmer. Neben mehr Einstecktiefe als nötig gibt es auch Wärmetauscher, bei denen viel mehr Chromnickel-Wanddicke im Stutzen vorhanden ist als notwendig, was die gleichmäßige und schadensfreie Durchwärmung schwieriger macht. Ganz besonders prekär wird es in den Fällen, bei denen die Einstecktiefe bis in den tiefliegenden Flansch hineinreicht, sodass dort eine Erwärmung auf Löttemperatur quasi unmöglich ist.

Schade ist in diesem Zusammenhang, dass entsprechende Gespräche mit Wärmetauscher-Herstellern („Die bösen Großkunden würden so eine Änderung nie akzeptieren!“) und deren Großkunden, beispielsweise Wärmepumpenherstellern („Die bösen Wärmetauscher-Hersteller bieten ja keine lötgünstigen Stutzen an!“), einen Teufelskreis offenbart haben, aus dem selbst mit dem heutzutage

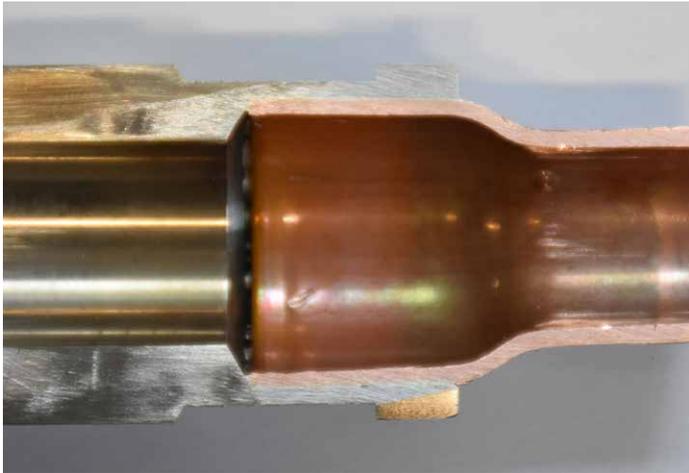


Bild 8: Natürlich sieht diese Lötung hervorragend aus! Wenn man aber genau hinsieht, bemerkt man die Reihe an kleinen Kerben auf der Innenseite, da es sehr schwierig ist, bei der großen Einstecktiefe das Lot über den gesamten Durchmesser gleichmäßig „herunterzuziehen“. (© VauQuadrat GmbH)

gestiegenen Bewusstsein für nachhaltige und energiesparende Fertigung kein Ausweg in Sicht ist...

Zum Beweis des Gesagten mag im Vergleich ein Blick auf **Bild 8** dienen. Dort sieht man eine vergleichbare Lötung wie in **Bild 7** (keine besondere Reinigung, Lotring, Ringinduktor, „nachlässige Routinelötung nach Auge von Hand“) an einem herkömmlichen Verdampferstutzen mit zu hoher Einstecktiefe. Nicht falsch verstehen, das Ergebnis ist vergleichsweise brillant: ein Benetzungsgrad von über 90 %, eine schöne Kehle auf der Oberseite, und das

Lot ist an über der Hälfte der Lötnaht bis unten durchgezogen. Damit hat man erheblich mehr Lotquerschnitt als in dem Beispiel von **Bild 7**. Aber auf der Unterseite gibt es eben einen Ring kleiner Kerben. Wenn man das mit der dauerhaften Dichtigkeit wirklich ernst meint, ist der Ansatz mit der minimalen Einstecktiefe („so wenig wie möglich, so viel wie nötig“) also der überlegene.

Bei der Gelegenheit sei auf die Neuausgabe der DIN EN ISO 18279 („Hartlöten – Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Verbindungen“) von 2023 hingewiesen. Deren in **Bild 9**

Tabelle B.2 (fortgesetzt)

Ordnungsnummer	Benennung	Vorschläge für Bewertungsgrenzen von Unregelmäßigkeiten für Bewertungsgruppen			Streng A
		Niedrig D	Mittel C	Hoch B	
3CAAA					maximal 10 % der projizierten Fläche
IV Bindefehler					
4BAAA	Bindefehler				maximal 5 % der nominellen hartgelöteten Oberfläche Zulässig, wo die Funktion des Bauteils nicht nachteilig beeinflusst wird und die Oberfläche nicht aufreißt.
4JAAA	Füllfehler				90 % oder mehr der projizierten Fläche sind mit Lötgut gefüllt. Zulässig, wo die Funktion des Bauteils nicht nachteilig beeinflusst wird und die Oberfläche nicht aufreißt.

(Quelle: DIN EN ISO 18279:2023)

Bild 9: Die DIN EN ISO 18279 schlägt Bewertungsgruppen D–A für Unregelmäßigkeiten in Hartlötverbindungen vor. Die in der Ausgabe 2023 neu eingeführte Bewertungsgruppe A fordert eine Benetzung von 90 % der Gesamtfläche der Lötverbindung. (© DIN Deutsches Institut für Normung e. V.)



Bild 10: Verschiedene Formen für Lötinduktoren: links der Ringinduktor, in der Mitte der Hookyduktor und rechts der Force Induktor (© VauQuadrat GmbH)

auszugsweise dargestellte Tabelle B.2 listet die möglichen Unregelmäßigkeiten systematisch auf und weist für vier Bewertungsgruppen D–A die jeweils zulässigen Höchstmaße an den betreffenden Unregelmäßigkeiten auf. Zum Thema der Benetzung des gesamten Lötspalts, für die in der Vorgängerausgabe in einer Bewertungsgruppe B noch 80 % die Höchstforderung waren, ist mit einer Bewertungsgruppe A jetzt eine Forderung nach 90 % Benetzung in der Norm erfasst.

Wobei gerade zum Thema der Tiefeninduktion eine ganz andere Kenngröße in den Vordergrund tritt: die durchschnittliche, sehr hohe Qualität über das gesamte Jahr beziehungsweise sogar über die drei Jahre zwischen den Lötprüfungen. Denn schließlich ist das Ergebnis einer Löt- oder auch Verfahrensprüfung nur eine Momentaufnahme, und bei Handlötung mit der Flamme ist die „Tagesform“ ein entscheidender Faktor.

Welcher Induktor für welche Anwendung?

Werfen wir nun einen Blick auf das Thema der Induktorformen. Klar ist, dass ein Ringinduktor mit Innenfelderwärmung am einfachsten eine gleichmäßige Erwärmung hinbekommt. Genau das ist für die Vorfertigung, egal ob

von Hand, mechanisiert oder gar automatisiert, auch nach wie vor das Mittel der Wahl. Was sich in den letzten Jahren verändert hat, ist die Nutzung von 3D-Druck zur Herstellung der entsprechend geformten Kupfer-Formteile, anstatt diese aufwendig mehrstufig zu glühen und zu biegen.

In **Bild 10** sind neben der klassischen Ringform (links) noch zwei offene Geometrien zu sehen, die man immer dann braucht, wenn eine Lötung einen Kreis schließt und der Induktor nicht mehr entnehmbar wäre. Der *Hookyduktor* (Mitte) hat sich als ideal für die Handlötung erwiesen, da der Lötler ideale Sicht auf die Lötstelle hat. Der *Force-Induktor* (May the force be with you...) rechts ist hingegen das Mittel der Wahl, wenn der Induktor von einem Roboter oder Cobot geführt wird. Die natürliche Befürchtung, dass die Erwärmung bei der offenen Geometrie zwangsläufig sehr ungleichmäßig würde, ist bei Wahl der richtigen Durchmesser-Verhältnisse unbegründet, wie man in dem Video hinter dem QR-Code in **Bild 11** sehen kann.

Apropos Automatisierung: Die ersten Lötungen von Chromnickel-Kupfer-Mischverbindungen am Roboter wurden tatsächlich ohne jegliche Temperaturregelung und rein zeitgesteuert vorgenommen. Das lässt sich ohne große Probleme prozesssicher umsetzen. Hierzu wird das Tiefeninduktionsgerät von der Robotersteuerung (oder einer übergeordneten Steuerung, beispielsweise eine SPS) ferngesteuert. Dies kann inzwischen über standardisierte Kommunikationsformen wie Profinet erfolgen.

Kupfer-Kupfer-Verbindungen – neue Herausforderungen

Immer wieder wurde betont, dass Kupfer-Kupfer-Verbindungen, typischerweise unter Nutzung von massiven Phosphor-Lotringen, kaum der Erwähnung wert seien, da sie einfach umzusetzen sind. Und am Beispiel der vielfältigen Lötstellen im Kältekreis der Tiefeninduktionsgeräte – **Bild 12** zeigt gleich drei auf einmal – bestätigt sich das auch. Wie immer muss man dabei im Gedächtnis behalten, dass die Digitalkamera die Glühfarben verfälscht. In Realität hat es rot geglüht, mehr nicht.



Bild 11: Der QR-Code führt zu einem Video, was eine rein zeitgesteuerte Lötung von 18-mm-Kupferrohr in einen Plattenwärmetauscher zeigt, wie sie in der Praxis mit einem Roboter durchgeführt wird. (© VauQuadrat GmbH)

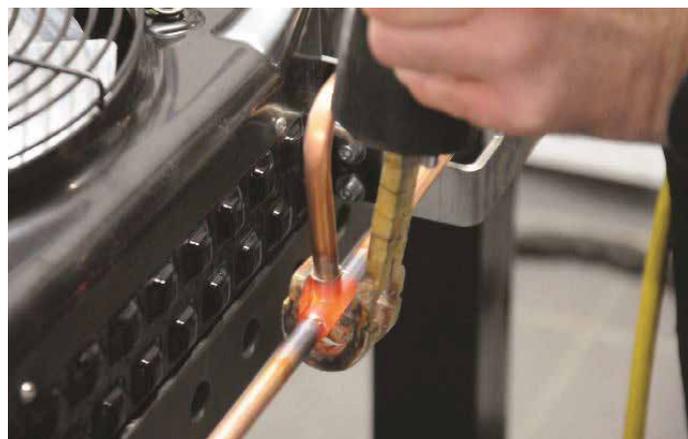


Bild 12: Lötung der drei Cu-Cu-Lötstellen an einem T-Stück auf einmal – zum Einsatz kamen ein Hookyduktor und Phosphor-Massivdraht-Lotringe mit 15 % Silbergehalt. (© VauQuadrat GmbH)



Bild 13: Beispielsweise für Kälteanlagen mit R744 (CO₂ als Kältemittel) wird das dickwandigere und höherfeste Kupferrohr aus K65 (links) verwendet – rechts im Vergleich das normale Kupferrohr desselben Nenndurchmessers, also 54 mm. (© VauQuadrat GmbH)



Bild 14: Ein Ringinduktor mit Innendurchmesser 65 mm und größerer Breite, beispielsweise zum Löten von 54-mm-Kupferrohr (© VauQuadrat GmbH)

Mit dem Aufkommen von CO₂ als Kältemittel (Bezeichnung R744) ergeben sich betreffend dieser „einfachen“ Werkstoffpaarung jedoch ganz neue Herausforderungen! Aufgrund der benötigten, extrem hohen Drücke sind der normale Kupferwerkstoff und die üblichen Rohrwanddicken nicht mehr ausreichend. Das „K65-Kupfer“ (CuFe2P, Rohre genormt in der DIN EN 12449) kommt zum Einsatz. Aufgrund der größeren Wanddicke wird das Löten mit der Flamme dadurch ab einem gewissen Durchmesser durchaus zur Herausforderung. Mit Tiefeninduktion stellt sich dieses Problem nicht, mit größerer Materialmenge im selben

Durchmesser verbessert sich die Einkoppelung eher noch. **Bild 13** zeigt bei einem Durchmesser von 54 mm eindeutig den Wanddickenunterschied zwischen normalem Kupferrohr und dem K65-Rohr.

In **Bild 14** ist ein Ringinduktor für solche großen Durchmesser gezeigt. Dieser hat einen Innendurchmesser von 65 mm und eine entsprechend größere Breite, um die bei diesen Durchmessern größere Einstecktiefe abdecken zu können.

Weg zu stabiler Temperaturregelung geebnet

Ebenfalls berichtenswert ist ein ganz anderes Betätigungsfeld im Zusammenhang: das Hartlöten von Aluminium und Aluminium-Mischverbindungen. Wo liegt die Herausforderung? Der sehr gut und universell verwendbare Zusatzwerkstoff AlSi12 (AL104 nach der DIN EN 1044) hat einen Schmelzpunkt im Bereich von 575–585 °C. Der Grundwerkstoff schmilzt aber auch schon – je nach Legierung – bei 630–660°C. Mit der Anwendungsform eines Fülldraht-Lotrings mit nicht korrosivem

Flussmittelkern in Kombination mit einem Tiefeninduktions-Induktor wird die Lötung sogar manuell bedient und rein nach Sicht gesteuert beherrschbar. Sehr genaues Hinsehen und schnelle Reaktion sind aber Voraussetzung.

Mit den gleichen Lotringen lassen sich auch Mischverbindungen Aluminium-Kupfer und Aluminium-Chromnickelstahl löten. Da man die Lötzeit kurzhalten kann, wird die Schicht intermetallischer Phasen (IMP), die man für gewöhnlich aufgrund ihrer negativen Eigenschaften fürchten muss, angenehm klein gehalten.

Bild 15 zeigt so eine Mischverbindung direkt nach dem Löten – ohne jegliche Nachbehandlung. **Bild 16** als Übersicht über einen Längsschliff und **Bild 17** mit einer Aufnahme mit Vermessung der entstandenen Intermetallischen Phasen illustrieren das erreichbare Ergebnis. Diese Lötung erfolgte zweistufig und rein zeitgesteuert: erst für ein paar Sekunden mit voller Leistung, dann für eine Zeit mit reduzierter



Bild 15: Eine Mischverbindung Aluminium-Chromnickelstahl direkt nach dem Löten, ohne Nachbehandlung (© VauQuadrat GmbH)

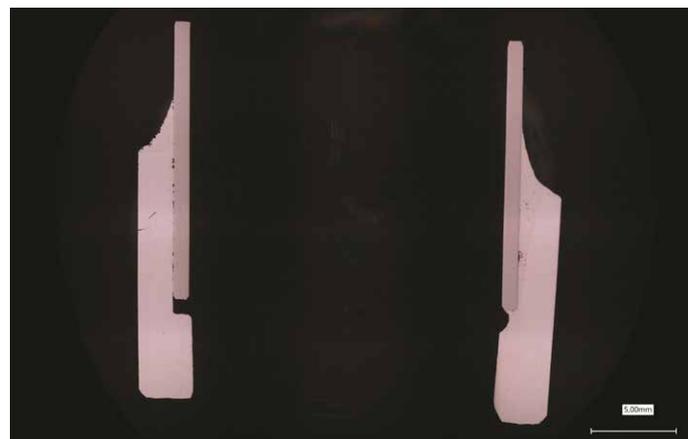


Bild 16: Übersicht über die Lötverbindung im Längsschliff (© VauQuadrat GmbH)



Bild 17: Bemaßter Schliff zur Identifikation intermetallischer Phasen
(© VauQuadrat GmbH)

Leistung. Letztendlich war es tatsächlich das automatisierte Löten von Aluminium, was bei VauQuadrat den Weg zu einer Temperaturregelung geebnet hat.

Dank eines vollständig linearen Stellgrößen-eingangs, den man bei den Tiefeninduktionsgeräten der VauQuadrat-*V-Serie* nutzen kann, brauchte es nur noch die Möglichkeit einer berührungslosen Temperaturmessung durch ein Pyrometer, um auf einfache Weise eine stabile Temperaturregelung für den Aluminium-Lötvorgang (**Bild 18**) umzusetzen. Letzteres ist herausfordernder, als man vielleicht denkt. Erst mit dem *VQSense1002*, was in dem Video hinter dem QR-Code in **Bild 19** verwendet wird, war dies möglich. ■

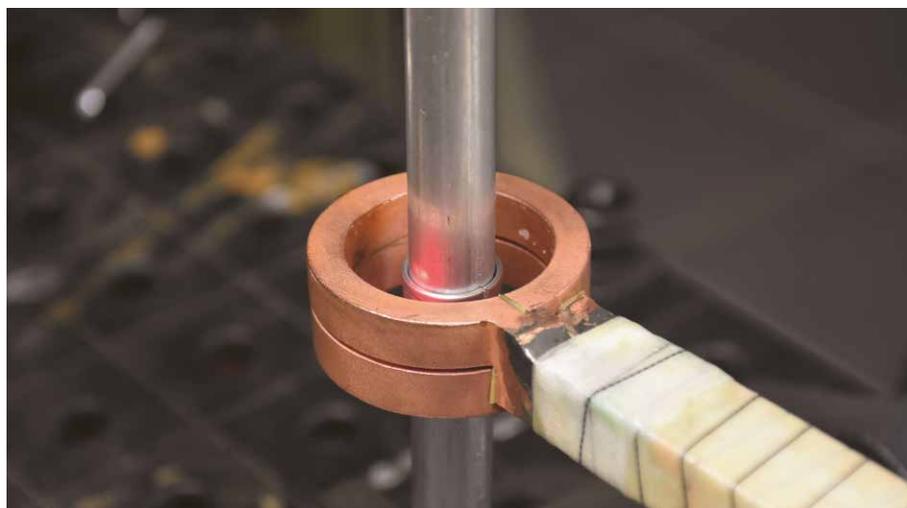


Bild 18: Das Zielgerät des verwendeten Pyrometers ist an dem roten Laserpunkt auf der Lötstelle zu erkennen. (© VauQuadrat GmbH)



Bild 19: Hinter diesem QR-Code ist das Video zu der Lötung von Aluminium mit Temperaturregelung zu finden.
(© VauQuadrat GmbH)



Dipl.-Ing. Thomas Vauderwange
MBA (SFI/IWE)
Geschäftsführer,
VauQuadrat GmbH,
tv@vauquadrat.com

i

Literaturempfehlungen

- ▶ DIN EN ISO 18279:2023: Unregelmäßigkeiten in hartgelöteten Verbindungen.
- ▶ DIN EN 14276-1:2006+A1:2011: Druckgeräte für Kälteanlagen und Wärmepumpen – Teil 1: Behälter – Allgemeine Anforderungen.
- ▶ So ähnlich wie Literatur: das Online-Löt-Tutorial der Norddeutschen Kältefachschule „Männer, die auf Oxide starren“ <https://www.youtube.com/watch?v=OHEz-Jrb8w0> – wirklich sehenswert!
- ▶ Peter, Hans-Joachim: Handbuch induktives Löten (ISBN 978-3-00-048537-4); die dargestellten, scheinbar absoluten Wahrheiten betreffend des Zusammenhangs von Frequenz und Stromeindringtiefe gelten so für den Einsatzzustand der Tiefeninduktion aber nicht.
- ▶ Türpe, M.; Ensminger, S.; Kranich, M.: Löten von Mischverbindungen aus CrNi-Stahl und Aluminiumwerkstoffen. Metall: Fachzeitschrift für Metallurgie; Technik, Wissenschaft, Wirtschaft 1-2-2018, ISSN 0026-0746.