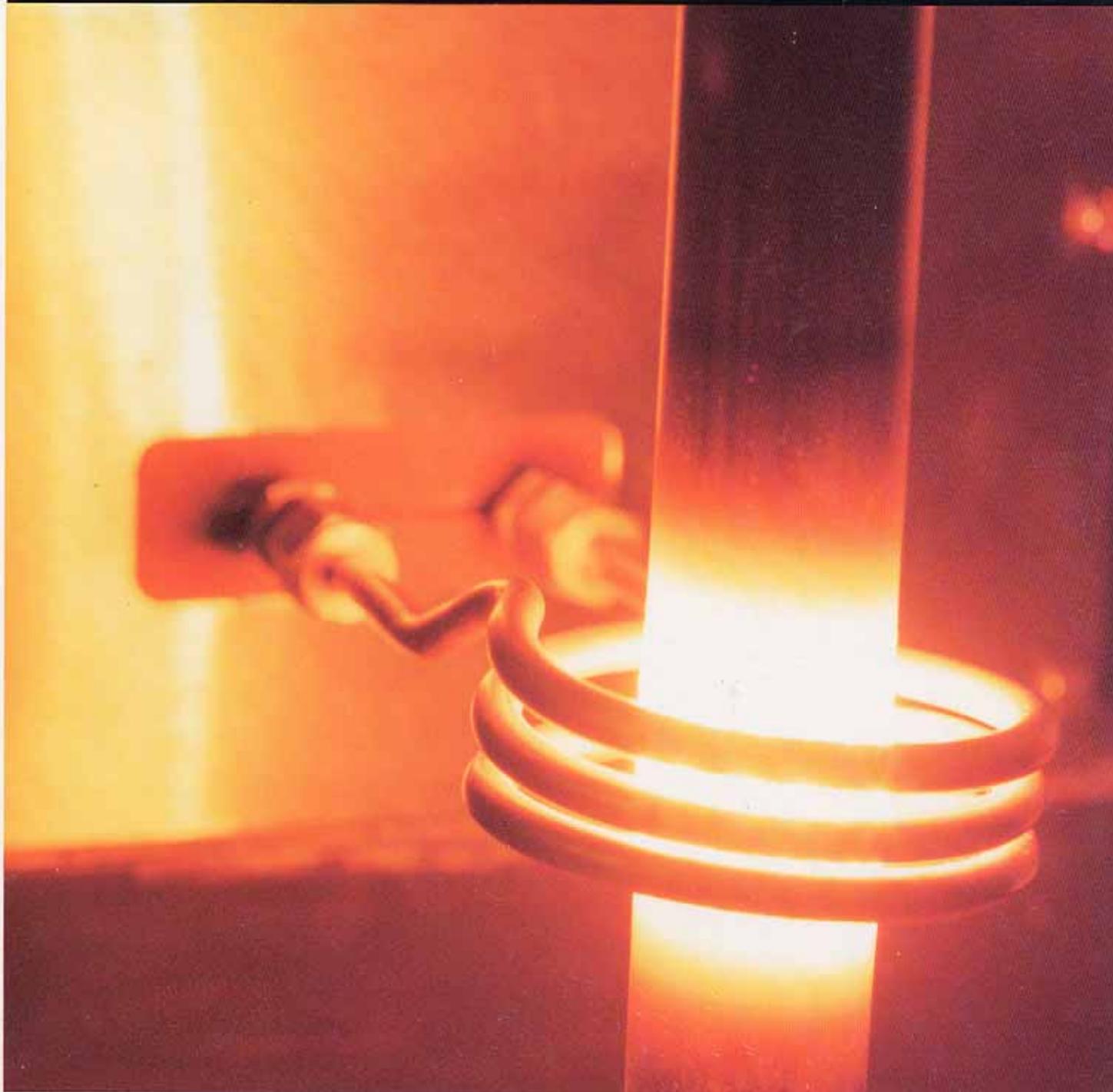


linn
High Therm

Induktionswärmeanlagen

für das HOCHFREQUENZ-INDUKTIONSLÖTEN und -FÜGEN



sauber • wirtschaftlich • zuverlässig • automatisierbar

Hochfrequenz-Induktionserwärmung Wesen und Besonderheiten

Wesen der Induktionserwärmung

Das Wirkprinzip der HF-Induktionserwärmung besteht darin, daß eine ein- oder mehrwindige Arbeitsspule (Induktor) von einem Wechselstrom hoher Frequenz durchflossen wird. Dieser Induktor baut in seiner Umgebung ein elektromagnetisches Wechselfeld auf. Wird in dieses elektromagnetische Wechselfeld ein elektrisch leitendes Werkstück gebracht, dann wird in diesem eine Spannung induziert, welche einen Wechselstrom erzeugt.

Nach dem Jouleschen Gesetz ($Q = I^2 \cdot R \cdot t$) wird dann, als Resultat, in den stromdurchflossenen Oberflächenbereichen dieses Werkstücks Wärme erzeugt.

Praktisch gesehen arbeitet eine Induktionsanlage also nach dem Prinzip eines Transformators, wobei der Induktor die Primärwicklung und das Werkstück eine einwindige Sekundärwicklung darstellt.

Besonderheiten für die Anwendung:

1. Die Energieübertragung erfolgt prinzipiell nur auf elektrisch leitende Werkstoffe, auf elektrisch leitende Medien und auf Werkstoffe, in denen durch spezielle Effekte ein Stromfluß möglich ist (z. B. Halbleiter).
2. Die Energieübertragung erfolgt berührungslos.
3. Die direkte induktive Erwärmung des Werkstückes erfolgt nur in unmittelbarer Nähe des Induktors.

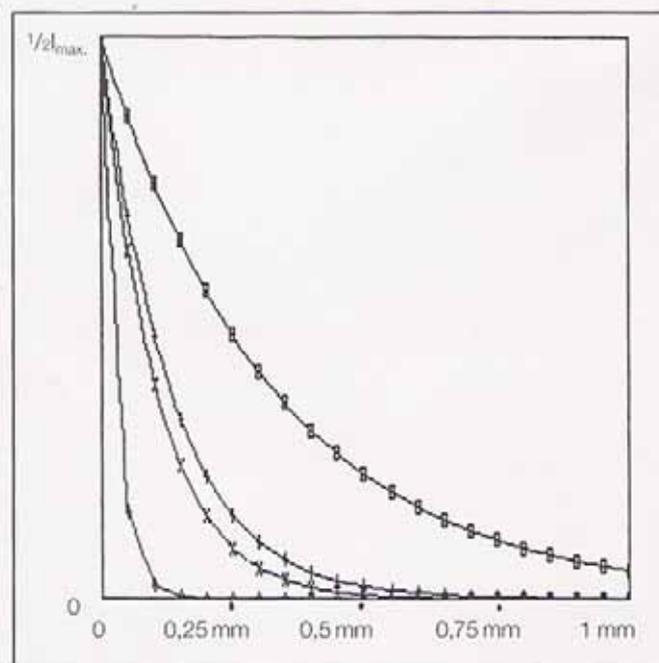


Bild 1a: Stromdichteverteilung bei induktiver Erwärmung verschiedener Metalle: Eisen o, Kupfer x, Aluminium +, Zinn □

4. In dem Werkstück induzierte hochfrequente Wechselströme ($f > 10$ kHz) fließen zum Großteil nur in dessen Oberflächenbereichen (Skineneffekt). Das resultiert aus der Selbstinduktion im Inneren des Werkstückes, was den Stromwiderstand des Leiters erhöht und somit den induzierten Strom nach außen drängt. Die durch diesen Effekt erzielte Stromdichteverteilung ist im Bild 1a für verschiedene Werkstoffe bei 400 kHz dargestellt.
5. Der Hochfrequenzstrom fließt hauptsächlich in den Werkstückteilen, in denen die magnetische Feldstärke am größten, also der magnetische Widerstand am kleinsten ist.

Einflußfaktoren auf die Effektivität

Der Wirkungsgrad und somit die Effektivität der Erwärmung sind im wesentlichen abhängig von:

1. generatorabhängigen Einflußfaktoren
2. konstruktiven Einflußfaktoren
3. werkstoffbedingten Einflußfaktoren

Generatorabhängige Einflußfaktoren (z. B. Frequenz, Leistung) sind vom Hersteller vorgegeben und sind auf die jeweilige Anwendung abzustimmen.

Die zu erwärmenden Werkstoffe sind meist durch die Konstruktion festgelegt und können in den seltensten Fällen durch die Technologen ausgewählt werden. Bild 1c zeigt, welchen Einfluß der Werkstoff bei den jeweiligen Temperaturen auf den Wirkungsgrad des Verfahrens besitzt. Der spezifische Widerstand und die Permeabilität sollen möglichst große Werte annehmen.

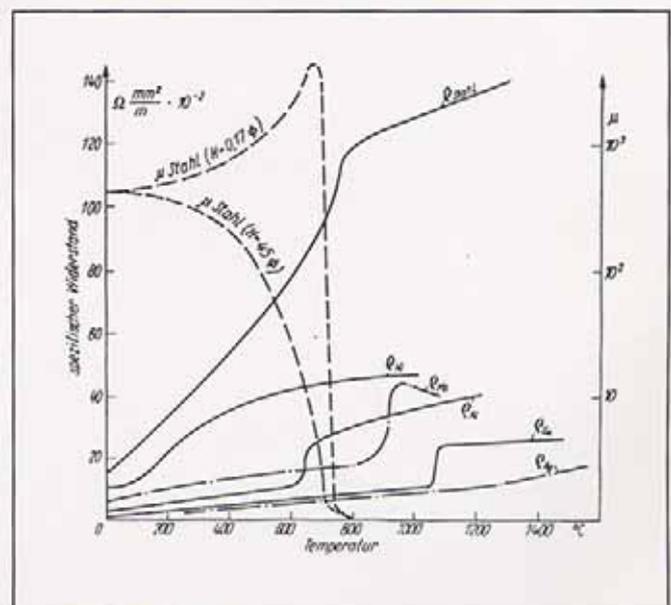


Bild 1b: Spezifischer Widerstand und Permeabilität in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Werkstoffe nach Tripmacher

HF-Induktionserwärmung bietet nur Vorteile

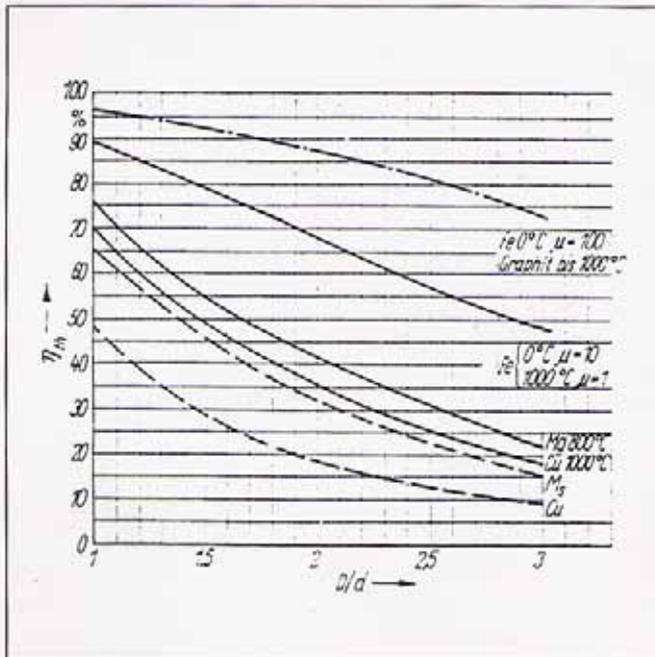


Bild 1c: Thermischer Wirkungsgrad als Funktion des Durchmesserverhältnisses D/d für verschiedene Werkstücke (D =Induktordurchmesser, d =Werkstückdurchmesser)

Aus dem Diagramm in Bild 1 ist ersichtlich, daß sich Stähle besonders für die Induktionserwärmung eignen.

Das Diagramm in Bild 1c zeigt die Auswirkung eines der konstruktiven Einflußfaktoren.

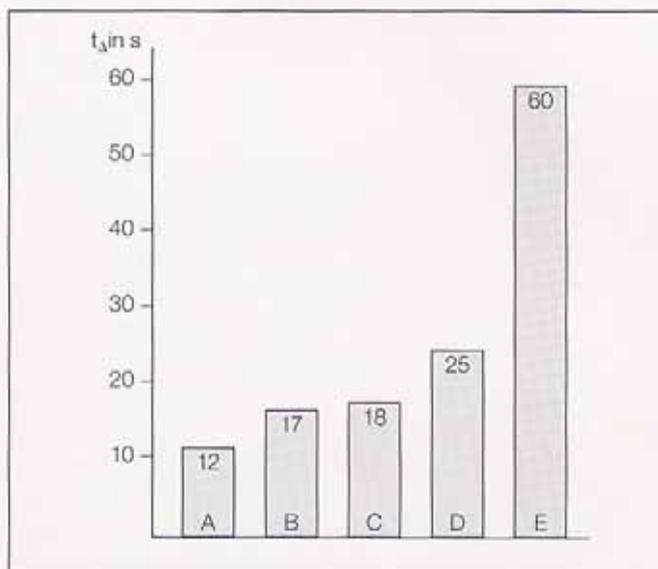


Bild 2: Aufwärmzeit verschiedener Erwärmungsverfahren für das Löten (A...HF-Induktionslöten, B...manuelles Flammlöten, C...Widerstandslöten, D...Flammfeldlöten, E...Ofenlöten)

Hinweise auf konstruktive Einflüsse bei der Anwendung des Induktionslötens werden in den nachfolgenden Seiten gegeben.

Die Vorteile der Induktionserwärmung ergeben sich hauptsächlich aus dem physikalischen Wesen dieses Verfahrens, denn gegenüber den meisten anderen Erwärmungsverfahren wird die Wärmeenergie direkt im zu erwärmenden Werkstück erzeugt.

Deshalb sind durch die Induktionserwärmung große Leistungen relativ verlustarm übertragbar und die Leistungsdichte dieses Verfahrens ist höher als bei anderen Erwärmungsverfahren (siehe Bild 3). Die Aufwärmzeiten der Werkstücke verringern sich bei der HF-Induktionserwärmung gegenüber anderen Erwärmungsverfahren (siehe Bild 2).

Diese prinzipiellen Vorteile machen das HF-Induktionslöten besonders wirtschaftlich.

Erwärmungsart	P in Watt/cm ²
Konvektion (Wärmemittelnahme d. Molekularbew.)	0,5
Strahlung (Elektrofenen, Muffelöfen)	8
Berührung, Wärmeleitung (Salzbad, Kochpl.)	20
Flamme (Brenner)	1000
Induktion	30000
Laser	10 ³ bis 10 ⁴

Bild 3: Leistungsübertragung für verschiedene Erwärmungsarten nach Benkowsky

Besondere Vorteile des HF-Induktionslötens

- hohe Wirtschaftlichkeit
- sauber und umweltfreundlich (da z.B. keine offene Flamme zur Anwendung kommt)
- gute Reproduzierbarkeit
- Werkstoffeigenschaften in unmittelbarer Umgebung der Erwärmzone bleiben nahezu unbeeinflusst
- Oxid- und Zunderbildung werden vermindert
- schwer zugängliche Stellen und komplizierte Nahtverläufe können meistens problemlos erwärmt werden
- geringer Platzbedarf der Linn-HF-Anlagen
- Einsatz von Schutzgasen oder das Löten im Vakuum sind möglich, dadurch können besondere Anforderungen an das Werkstück erfüllt werden
- ausgezeichnete Eignung für die Mechanisierung und Automatisierung

Induktions-Lötverfahren

Aufgrund der genannten Vorteile ist die Induktionserwärmung zu einem festen Bestandteil der Elektrowärmeanwendung geworden und hat nach jahrelanger Nutzung ein hohes technisches Niveau erreicht.

Beispiele für den Einsatz der Induktionserwärmung in der industriellen Fertigung sind das Härten, Anlassen, Glühen, Vergüten, Löten, Schweißen, Schmelzen, Schrumpfen, Sintern, Trocknen, Vorwärmen für Kunststoffbeschichtungen, die Erwärmung für Warm- und Halbwarmumformung; das Aushärten von Klebern wird verkürzt.

Die HF-Induktionserwärmung wird auch für das Weichlöten, Hartlöten und Hochtemperaturlöten erfolgreich genutzt.

Das Induktionslöten kann nach verschiedenen Verfahrensvarianten angewendet werden:

- an Luft ohne oder mit Flußmittel
- in reduzierendem oder inertem Schutzgas sowie
- im Vakuum

Beim Löten z. B. von Stählen mit Kupferlot zeichnen sich die Lötverbindungen durch hohe Festigkeit aus. Unter besonderen Bedingungen bildet sich auch beim Induktionslöten ein spezieller Gefügeaufbau aus, der zur Festigkeitssteigerung führt.



Bild 4: Induktions-Lötverfahren

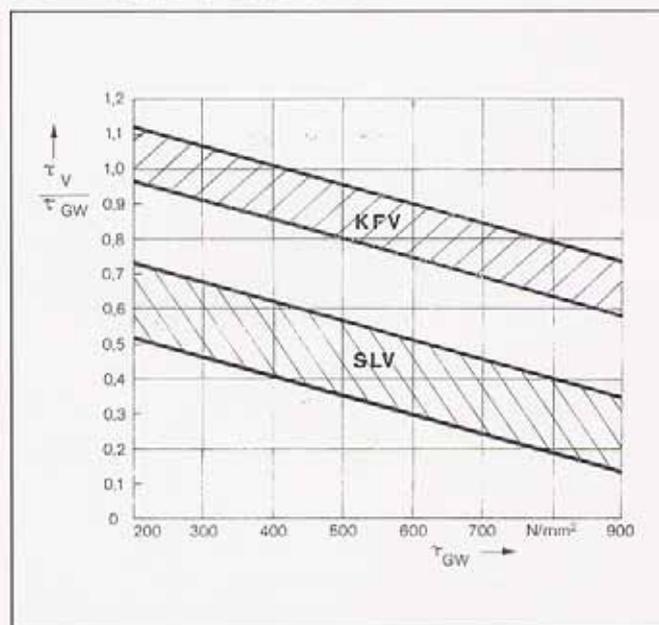


Bild 5: Festigkeiten von Schmelzlötverbindungen (SLV) und kombinierte Schmelzlöt-Schmelzschweißverbindungen (KFV)

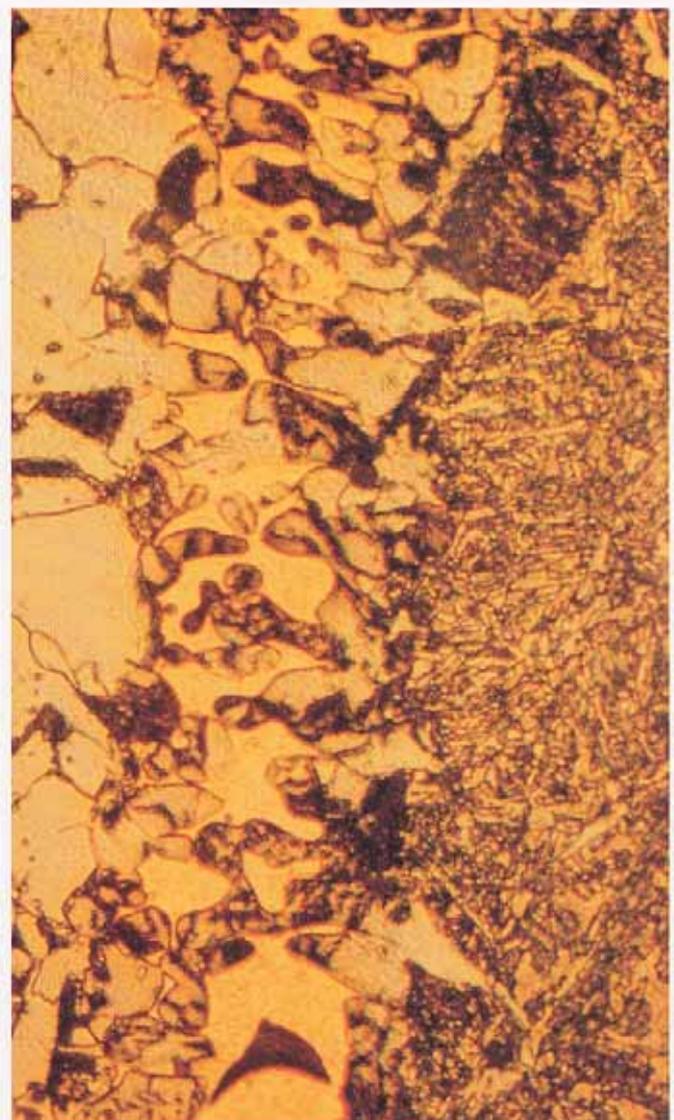


Bild 6: Gefüge einer durch Induktionslöten hergestellten hochfesten Schmelzlöt-Schmelzschweißverbindung (mittlere Spaltbreite $40 \mu m$)

Flußmittel-Induktionslöten an Luft

Das HF-Induktionslöten an Luft ist das in der Praxis sehr häufig angewandte Lötverfahren. Die Vorteile bestehen darin, daß der Aufbau der Lötstation unkompliziert und das Verfahren damit kostengünstig ist. Wenn keine selbstfließenden Lote verwendet werden können, ist die Anwendung von Flußmitteln erforderlich. Diese Flußmittel sind handelsüblich und werden in Abhängigkeit vom Werkstoff und Lot ausgewählt. Nachteilig bei dem Flußmittel-Induktionslöten ist die erforderliche Nacharbeit zur mechanischen oder chemischen Entfernung der Flußmittelrückstände.

Einfache Anwendungsbeispiele:

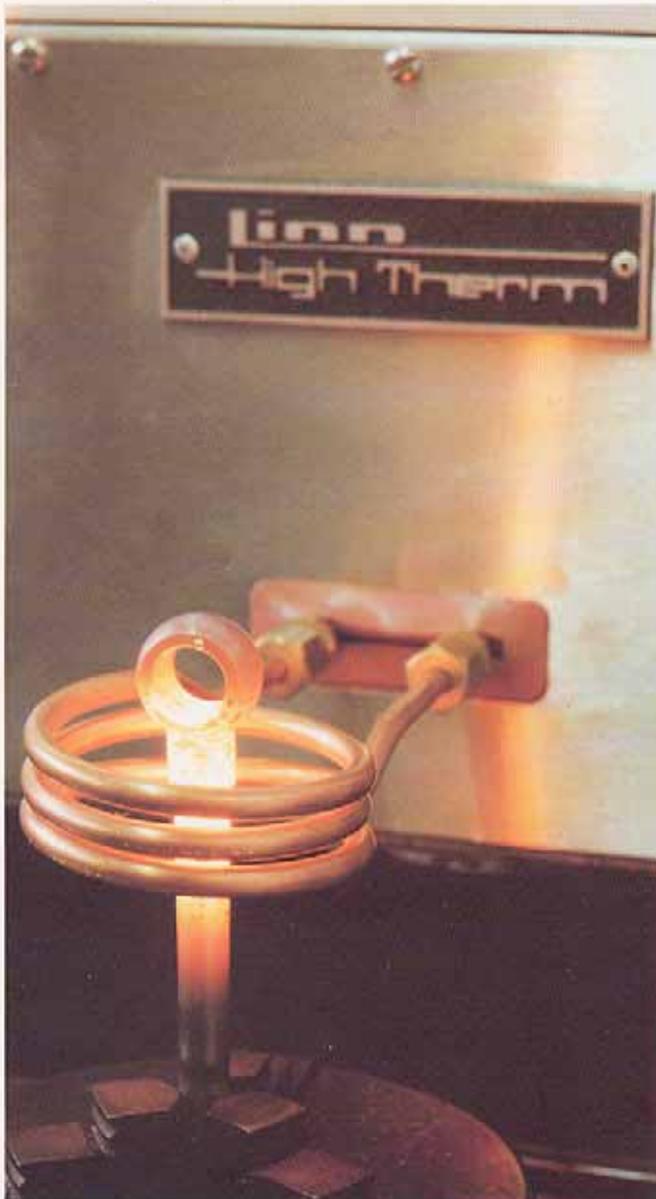


Bild 8: Hartlöten von Rohrverbindern für Hydraulikanlagen mit Silberlot

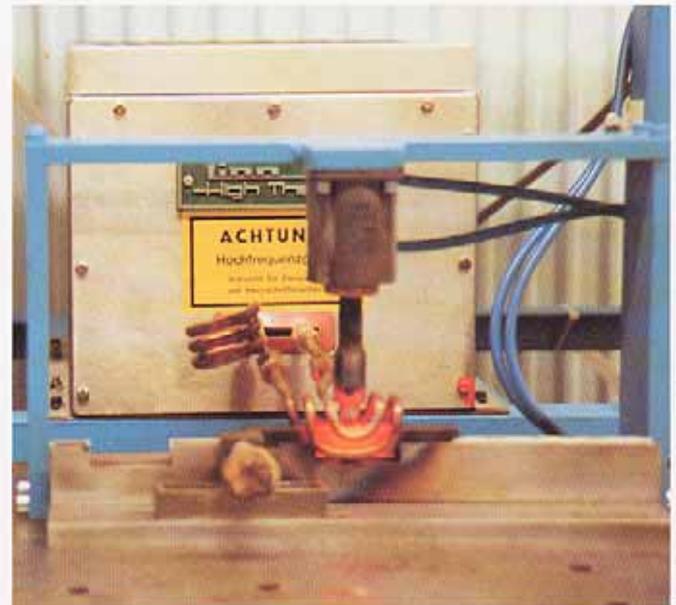


Bild 7: Hartlöten von aktiven Werkzeugteilen

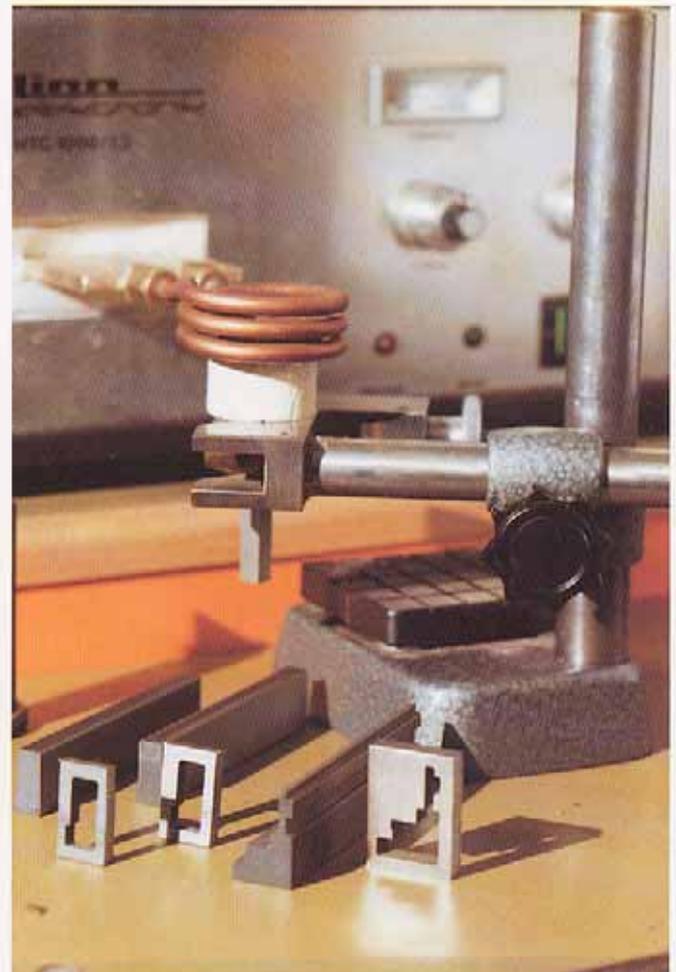


Bild 9: Hartlöten von Schneidstempeln für Stanzwerkzeuge mit Silberlot

HF-Induktionslötén im Schutzgas und Vakuum

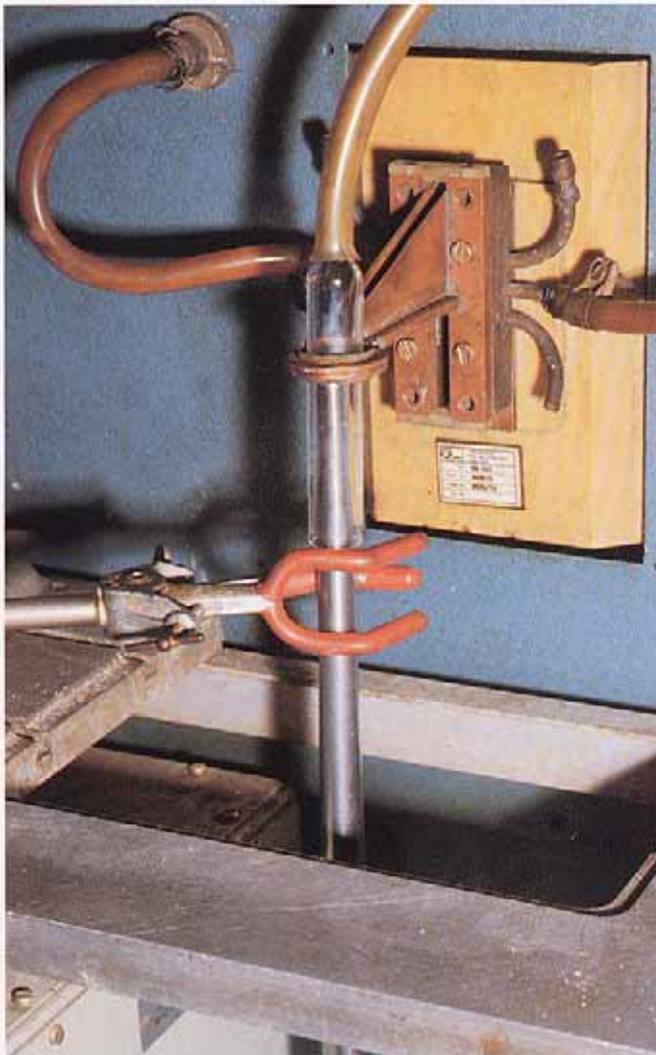


Bild 10: HF-Induktionslötén einer Meßlanze mit Schutzgasspülung

Besondere Anforderungen an das zu lötende Bauteil lassen sich oft nur durch die Verwendung von Schutzgasen während des Lötprozesses oder durch das Lötén dieser Bauteile im Vakuum erfüllen.

Schutzgase oder die Verwendung von Vakuum bewirken hauptsächlich, daß die Bildung von Oxiden bei der Erwärmung der Bauteile verhindert wird und vorhandene Oxidschichten beseitigt werden.

Die Effekte sind, daß Bauteile nach dem Lötén in einer ausgezeichneten Oberflächenqualität vorliegen, aber ein erhöhter gerätetechnischer Aufwand notwendig ist.

Das Induktionslötén kann in unterschiedlichen Varianten durchgeführt werden:

1. der Induktor befindet sich in der Schutzgas- beziehungsweise Vakuumkammer,

2. der Induktor umschließt diese Kammer,
3. der Induktor selbst dient beim Schutzgaslötén als Schutzgasbrause,
4. die Lötstelle wird beim Schutzgaslötén durch eine gesonderte Gasleitung von Schutzgas umspült.

Im zweiten Fall kann die Schutzgas- oder Vakuumkammer z. B. auch aus Quarzglas bestehen. In diesem so gebildeten Arbeitsraum befindet sich das zu lötende Bauteil, das durch das Glas von einem entsprechend gebildeten Induktor auf Löttemperatur erwärmt wird.

Eine Alternative dazu bildet die Anwendung der sogenannten Autoschutzgastechnik. Deren Prinzip besteht darin, daß in einer nichtthermetisch verschlossenen Kammer durch den in den Bauteilen vorhandenen Kohlenstoff eine bei Löttemperatur reduzierende Atmosphäre während des Lötprozesses automatisch gebildet wird.

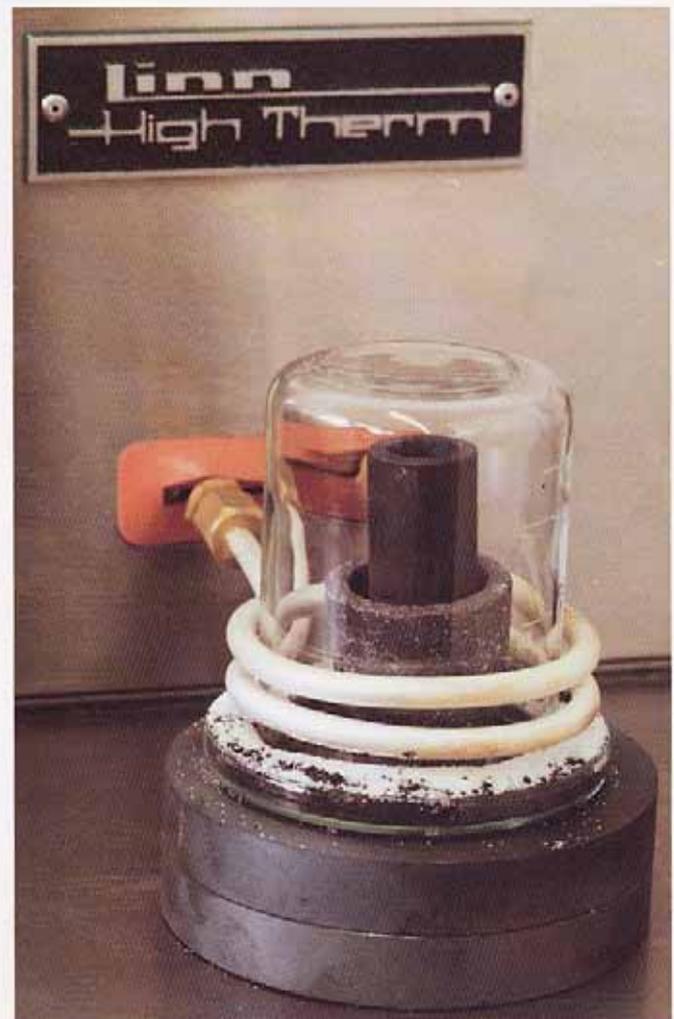


Bild 11: Beschichten eines Rohwerkzeuges durch HF-Induktionslötén im Autoschutzgas

Schutzgas-Induktionslöten von Cu-Al-Rohrverbindungen

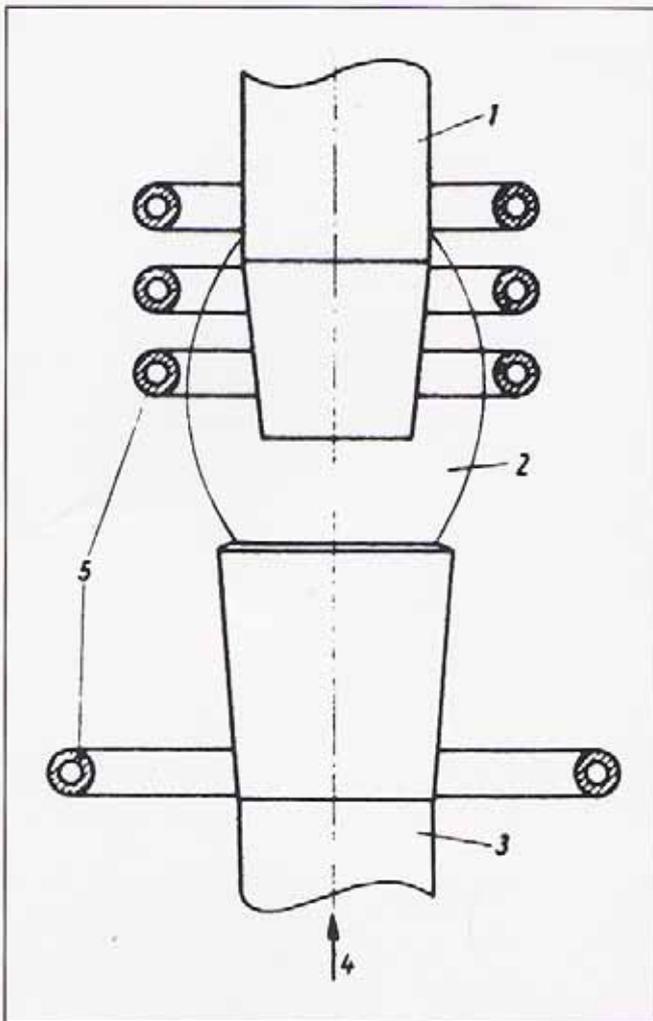


Bild 12: Prinzip des Diffusionslötens von Cu-Al-Rohren nach Peter, 1 Cu-Rohr, 2 Schutzgaszone, 3 Al-Rohr, 4 Schutzgas, 5 Induktor

Das Wirkprinzip des Diffusionslötens besteht darin, daß während des Lötprozesses durch Diffusion ein Eutektikum zweier Werkstoffe gebildet wird, dessen Schmelzpunkt niedriger liegt als die Schmelztemperatur dieser Werkstoffe.

In der Praxis wird beim Diffusionslöten von Kupfer mit Aluminium das Kupferrohrende induktiv auf eine Temperatur von etwa 950 °C erwärmt, während gleichzeitig das Aluminiumrohrende unter seiner Schmelztemperatur vorgewärmt wird.

Nach dem Abschalten der HF-Energie wird das Kupferrohrende in das Aluminiumrohrende gepreßt.

Durch die ablaufenden Diffusionsvorgänge bildet sich ein Eutektikum in der Zusammensetzung Al-CuAl₂, welches eine Schmelztemperatur bei zirka 545 °C besitzt. Um diesen Vorgang vor dem schädlichen Einfluß des Luftsauerstoffes zu schützen, läuft der gesamte Prozeß unter reduzierendem Schutzgas ab.

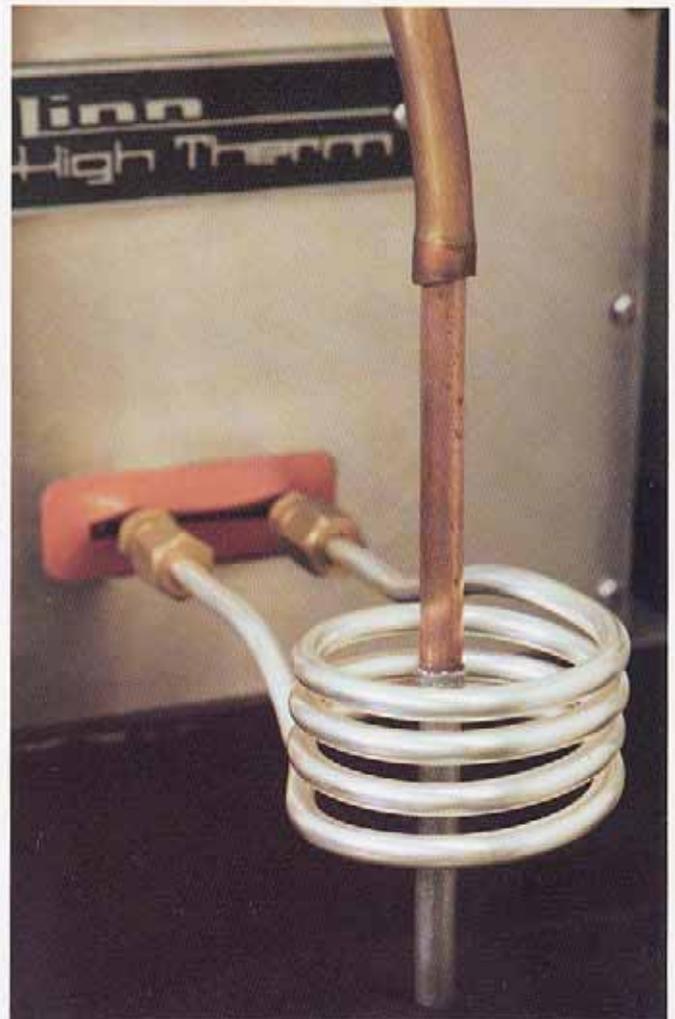


Bild 13: Diffusionslöten einer Cu-Al-Rohrverbindung unter reduzierendem Schutzgas

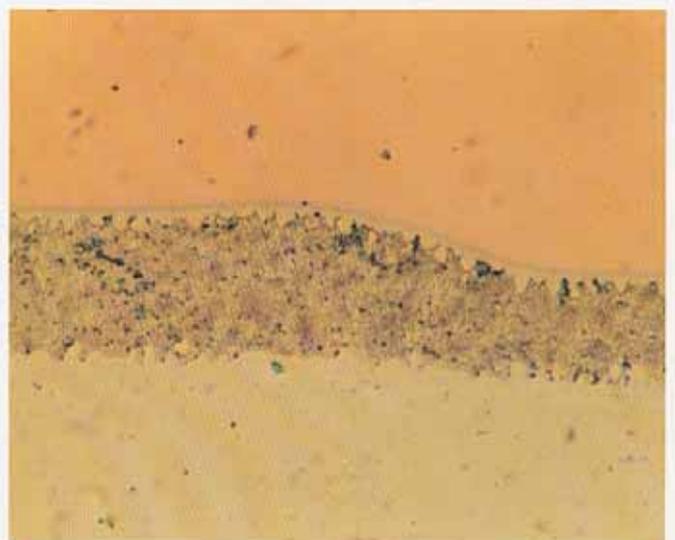


Bild 14: Mikroschliff einer Cu-Al-Rohrverbindung

Durch HF-Induktionslöt gefügte Bauteile



Bild 15: Mischbatterie vom Wasserhahn mit drei eingelöteten Zuflüssen

Mit dem HF-Induktionslöt werden in der Industrie oft kleine Bauteile mittlerer Stückzahl und bei wechselndem Sortiment gefertigt.

Durch die Anpassung der Induktoren können die unterschiedlichsten Teile mit einer oder auch mehreren Lötverbindungen wirtschaftlich hergestellt werden.

Es werden Stähle, Hartmetall-Stahlverbindungen, Kupfer, Messing und Aluminium erfolgreich induktionsgelötet.

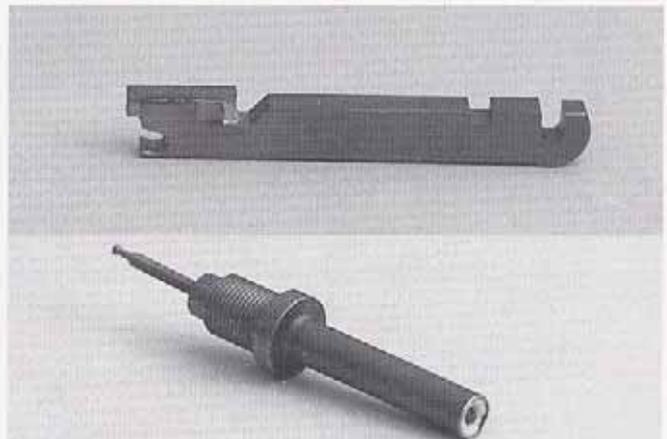


Bild 16 oben: Drehmeißel mit eingelöteter Hartmetall-Schneide. Bild 16 unten: Heizelement mit verlöteter Verschraubung



Bild 17: Im Schutzgas HF-induktionsgelötete Rohrtülle, beschichteter Rauhkörper, Brennerdüse, Bohrer mit eingelöteten Hartmetallplättchen, Rohrverbinder

Hohe Wirtschaftlichkeit durch HF-Induktionslötungen mehrerer Verbindungen

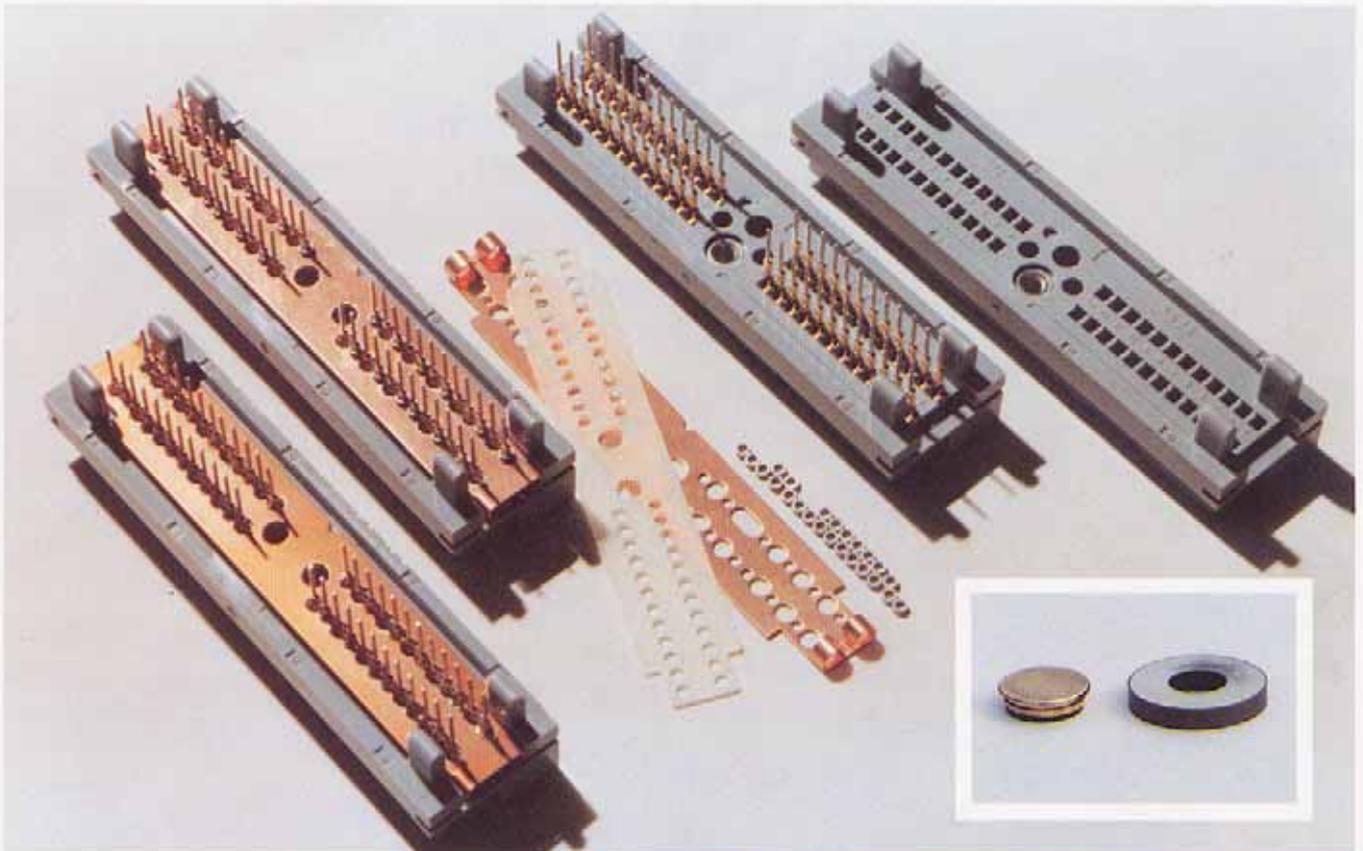


Bild 18: Aufbau von Steckverbindern für Computeranwendungen (Connektoren), daneben Präzisionskleinteile aus verlöteten Komponenten

In Abhängigkeit von der Bauteilform ist mittels des HF-Induktionslötens eine besonders wirtschaftliche Fertigung dann erreichbar, wenn viele Lötverbindungen, bei entsprechender Induktorgestaltung, gleichzeitig hergestellt werden können. Die Anwendung von sogenannten Nadelinduktoren mit lösbaren Steckverbindungen gestattet auch das gleichzeitige Löten z. B. von Rohrkrümmern in Wärmetauschern.



Bild 20: HF-induktionsgelötete Rohrkrümmen für Wärmetauscher



Bild 19: Gleichzeitiges Weichlöten von 24 Lötverbindungen bei der Fertigung von Connektoren

Mechanisierung und Automatisierung des HF-Induktionslötens



Bild 21: Rundschalttisch für das HF-Induktionslötens

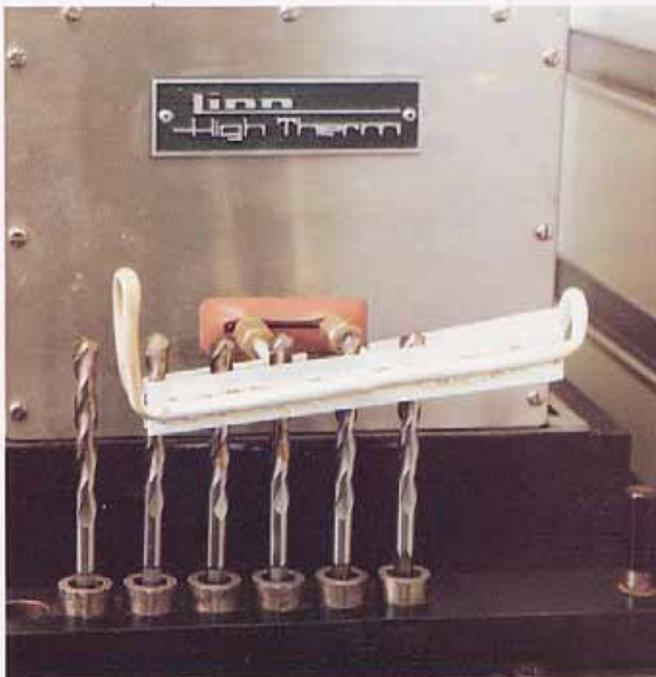


Bild 22: Vorrichtung für das Induktionslötens und gleichzeitige Wärmebehandlung von Hartmetallbohrern, bestückt mit Hartmetallplättchen

Die Eignung von HF-Induktionsanlagen für die Mechanisierung und Automatisierung (siehe Bild 23) ergibt sich unter anderem aus folgenden Vorteilen:

- sofortige Betriebsbereitschaft,
- kurze Schaltzeiten,
- Betriebsparameter sind gut reproduzierbar,
- die Anlage kann gesteuert und durch Vernetzung in Fertigungssysteme integriert werden.
- Einfache optische Temperaturmessung

Entsprechend des Teilesortimentes und der Fertigungsparameter (wie z. B. Taktfrequenz) werden translatorische und rotatorische Vorrichtungen für die Teileaufnahme verwendet. Diese Vorrichtungen können mit Hubeinrichtungen gekoppelt werden, um Teile auch in komplizierteren Induktoren mechanisiert positionieren zu können. Spezielle Tunnelinduktoren gestatten eine kontinuierliche Erwärmung auf Löttemperatur und wo notwendig und möglich, auch das gleichzeitige Wärmebehandeln. Industrie-Roboter erlauben mit den leichten Linn-HF-Teilen einen optimalen Einsatz für alle Anwendungen im Bereich Löten, Glühen, Härten und Klebestellen aushärten.

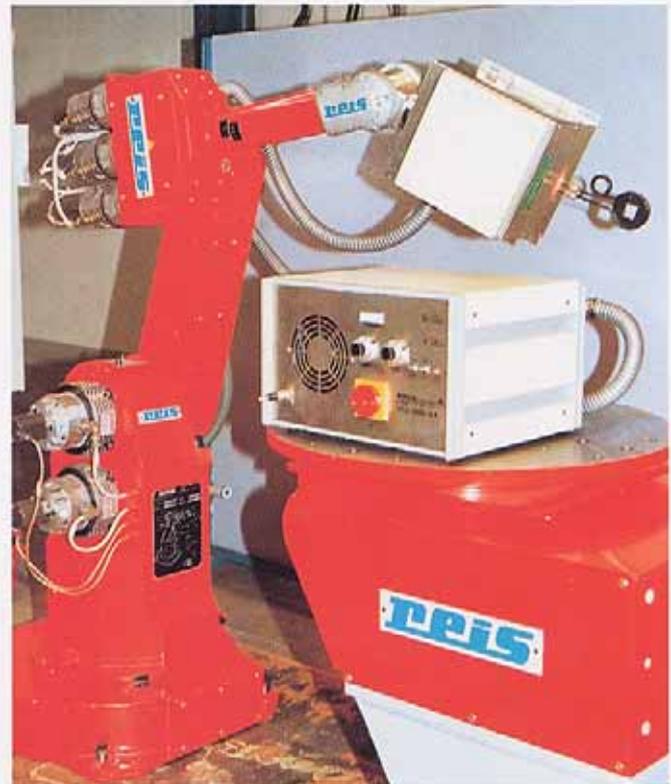


Bild 23: Lötroboter vom Typ RV 12/15 der Firma Reis für perfekte Bahnen und hochgenaue Positionen.

Induktorgestaltung

Da die zu lötenden Werkstoffe und die Induktionsanlage, einmal angeschafft, meist vorgegeben sind, kann der Anwender den Wirkungsgrad nur durch die Anpassung des Induktors an das Werkstück beeinflussen.

Entsprechend der zu lötenden Teile unterscheidet man Innenfeldinduktoren (das Werkstück befindet sich innerhalb des Induktors), Außenfeldinduktoren (das Werkstück umschließt den Induktor) und Flächeninduktoren, welche ein- oder mehrfach auf das Werkstück wirken können. In dem Bild 24 sind die Wirkungsgrade für die verschiedenen Induktortypen angegeben.

Induktortyp	Wirkungsgrad
Innenfeldinduktor	0,5 ... 0,9
Außenfeldinduktor	0,3 ... 0,5
Flächeninduktor	0,3 ... 0,6
– einseitiger Flächeninduktor	0,15 ... 0,3
– doppelter Flächeninduktor	0,4 ... 0,8

Bild 24: Wirkungsgrade verschiedener Induktoren nach Benkowsky

Aus diesem Bild ist ersichtlich, daß mit Innenfeldinduktoren die höchsten Wirkungsgrade erreichbar sind.

Einen großen Einfluß auf den Gesamtwirkungsgrad des Übertragungssystems Induktor-Werkstück besitzt der

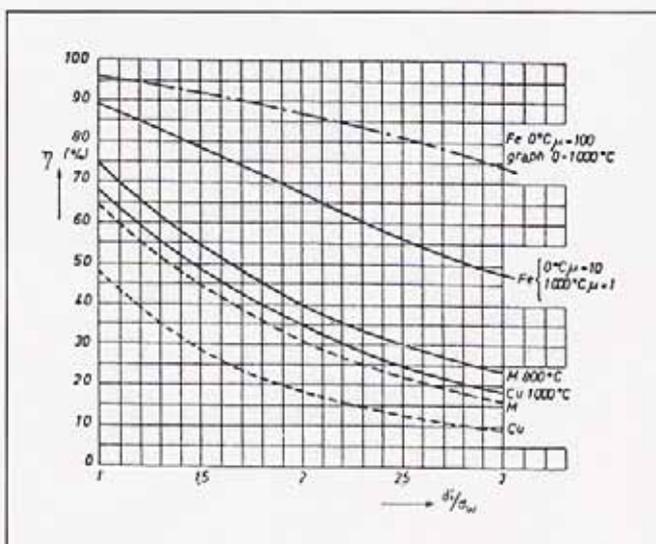


Bild 25: Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Kopplungsabstandes, bei verschiedenen Temperaturen, nach Kretzmann

Kopplungsabstand. Als Kopplungsabstand wird der Zwischenraum zwischen Induktor und Werkstück bezeichnet. In dem Bild 25 ist dargestellt, welchen Einfluß der Kopplungsabstand auf den Gesamtwirkungsgrad besitzt. Mit der Verringerung des Kopplungsabstandes steigt der Wirkungsgrad.

Der Kopplungsabstand kann aber nicht gegen Null verringert werden, da ein zu geringer Kopplungsabstand Spannungsüberschläge zur Folge hat.

Der Kopplungsabstand ist wesentlich von dem verwendeten Induktor und Generator abhängig.

Hinweise für die Induktorgestaltung

1. Induktorzuleitungen sollen möglichst kurz gehalten werden, empfohlen werden 50 mm bis 100 mm.
2. Induktorzuleitungen sollen aus einem Stück, möglichst ohne Verbindungen gefertigt werden.
3. Induktoren sollen aus gut elektrisch leitenden Materialien bestehen, in der Praxis wird deshalb Kupfer verwendet. Es ist vorteilhaft, Kupferinduktoren zu versilbern (siehe Bild 26).



Bild 26: Versilberter wassergekühlter Induktor

4. Auf der Oberfläche der Induktoren fließen Ströme in der Größenordnung von 300 A/mm² bis 600 A/mm². Es ist erforderlich, Induktoren gut durch Wasser zu kühlen. (+_{Ein} max 25 °C +_{Aus} max 40 °C)
5. Querschnitte RUND oder RECHTECKIG so wählen, daß genügend Kühlwasserdurchfluß auch bei Druckabfall gewährleistet ist.

Technische Beschreibung der HF-Induktionsanlagen der HTG-Serie

Hochfrequenz-Generatoren HTG 1500/0,5, HTG 3000/0,4, HTG 6000/0,3 sind:

Freischwingende Gegentakt-HF-Generatoren in Power-FET-Technologie mit stufenloser Leistungsregelung (15–100 %). Funkentstörung nach VDE.

Die Anwendung von Transistoren als Leistungsbauelemente der Oszillatoren bietet gegenüber den Röhren einige entscheidende Vorteile. Die Transistoren benötigen keine Heizspannungsversorgung, die Abmessungen der Bauelemente sind deutlich kleiner als die Abmessungen von Röhren. Die Schaltverluste der Transistoren sind entscheidend kleiner, somit sinkt der Kühlmittelverbrauch und der Wirkungsgrad der Gesamtanlage liegt zirka 20 % höher als bei Röhrengeräten.

Zur Ansteuerung der Transistoren sind nur kleine Spannungen notwendig, was zu einer Reduzierung der geometrischen Abmessungen sowie des Gewichts der Netzteile führt. Wenn die Abmessungen des Arbeitsgerätes noch kleiner sein sollen, ist auch die Trennung des HF-Teils vom Netzteil nötig.

Häufig scheidet eine nachträgliche Integration von Induktionsanlagen an den äußeren Abmessungen. Durch die Verwendung von Halbleitergeneratoren können jedoch in den meisten Fällen auch bei schwierigen Platzverhältnissen Fertigungslinien nachgerüstet werden.

Da Röhrengeräten hochohmige Sender sind, besitzen sie Ausgangsspannungen im Kilo-Volt-Bereich.

Dadurch ergeben sich erhöhte Sicherheitsbedingungen bezüglich Berührungsschutz und Störstrahlungen. Transistorgeneratoren haben einen Niederohmigen Ausgang, somit besteht keine Bedenken bei einem zufälligen Berühren der Arbeitsspule.

Jeweils zwei Ausführungen:

- * Kompaktgerät mit integriertem HF-Teil
- * Steuerteil mit abgesetztem HF-Teil (maximal 10 m)

Sicherheitsfunktionen:

- * schnelle Überlastabschaltung
- * Steuerspannungsüberwachung
- * Drainspannungsüberwachung
- * Wasserdurchflußüberwachung
- * Temperaturüberwachung

Anzeigeelemente LED:

- * Hochfrequenz
- * Überlast
- * Wassermangel
- * Temperatur

Option zur HTG-Serie:

- * Wärmetauscher zur besseren Kühlung des HF-Teils (bei hohen Umgebungstemperaturen beziehungsweise Dauerbetrieb)
- * potentialfreie Ausgänge der Kontrollfunktionen
- * Fußschalter
- * Regeleinheit HTG-REG (auch mit RS 232 lieferbar, siehe Bild 27)
- * Optische Pyrometer

Für niederohmige Induktoren muß zwischen dem Induktor und dem HF-Generator ein Anpaßteil (Transformator) verwendet werden. Im Bild 28 sind die Kennlinien des Transformators dargestellt.

- * Anpaßtransformator für kleine Induktoren

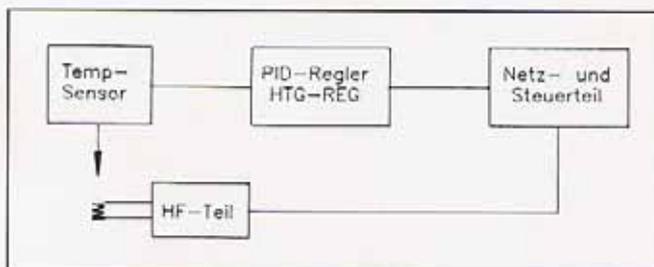


Bild 27: Regeleinheit HTG-REG

Gerätebezeichnung/Typ	HTG 1500/0,5	HTG 3000/0,4	HTG 6000/0,3
HF-Ausgangsleistung	1500 W	3000 W	6000 W
Optimale Arbeitsfrequenz	250 - 450 kHz	150 - 400 kHz	150 - 300 kHz
Blindleistung am Induktor	46 - 81 kVA	50 - 133 kVA	117 - 234 kVA
Netzanschluß	230 V/50 Hz/2,2 kVA	3x400 V/50 Hz/5,0 kVA	3x400 V/50 Hz/9 kVA
Wasserverbrauch (3 bar)	1,5 l/min	2 l/min	3 l/min
Abmessungen HF-Teil (BxHxT)	200x200x230 mm	290x245x310 mm	290x245x310 mm
Abmessungen Steuerteil	350x165x400 mm	470x310x420 mm	520x690x330 mm
Abmessungen Kompaktgerät	470x160x400 mm	auf Anfrage	auf Anfrage
Gewicht HF-/Steuerteil in kg	11/24	15/65	15/120
Kompaktgerät in kg	auf Anfrage	auf Anfrage	auf Anfrage

Serieninduktivität L_s und - Widerstand R_s des Transformators bei Anschluß eines Induktors mit 50 nH.

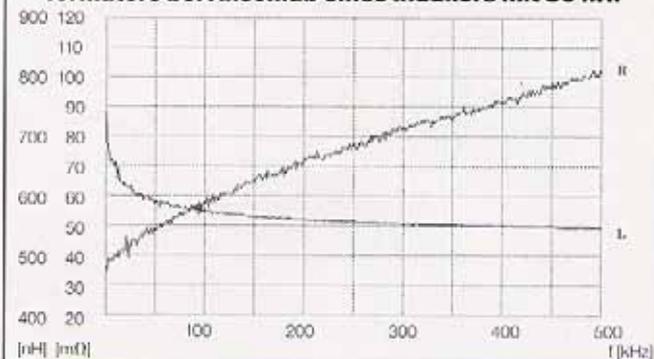


Bild 28: Kennlinie des Transformators