

Lötverfahren



Lötverfahren

Die Lötverfahren werden – in Anlehnung an DIN 8505 – nach verschiedenen Gesichtspunkten unterteilt.

1. Einteilung nach Liquidustemperaturen der Lote

1.1 Weichlöten

Weichlöten ist Löten mit Loten, deren Liquidustemperatur unterhalb 450 °C liegt.

1.2 Hartlöten

Hartlöten ist Löten mit Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 450°C liegt.

1.3 Hochtemperaturlöten

Hochtemperaturlöten ist flussmittelfreies Löten unter Luftabschluss (Vakuum, Schutzgas) mit Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb 900°C liegt.

2. Einteilung nach der Art der Lötstelle

2.1 Auftraglöten

Auftraglöten ist Beschichten durch Löten.

2.2 Verbindungslöten

Verbindungslöten ist Fügen durch Löten.

2.2.1 Spaltlöten

Spaltlöten ist Fügen von Teilen, wobei ein zwischen den Teilen befindlicher enger Spalt vorzugsweise durch kapillaren Fülldruck mit Lot gefüllt wird.

2.2.2 Fugenlöten

Fugenlöten ist Fügen von Teilen, wobei ein zwischen den Teilen befindlicher breiter Spalt (Fuge) vorwiegend mit Hilfe der Schwerkraft gefüllt wird.

3. Einteilung nach Art der Oxidbeseitigung

3.1 Löten mit Hilfe von Flussmitteln

3.2 Löten unter reduzierendem Schutzgas

3.3 Löten unter inertem Schutzgas

3.4 Löten im Vakuum

4. Einteilung nach Art der Lotzuführung

4.1 Löten mit angesetztem Lot

Löten mit angesetztem Lot ist ein Verfahren, bei dem die Werkstücke am Lötstoß auf Löttemperatur erwärmt werden und das Lot vorwiegend durch Berühren mit den zu lötenden Teilen zum Schmelzen gebracht wird.

4.2 Löten mit an- oder eingelegtem Lot

Löten mit an- oder eingelegtem Lot ist ein Verfahren, bei dem das Lot vor dem Erwärmen am Lötstoß angebracht und gleichzeitig mit den zu lötenden Teilen auf Löttemperatur erwärmt wird.

4.3 Tauchlöten

Tauchlöten ist ein Verfahren, bei dem die zu lötenden Teile in einem Bad aus geschmolzenem Lot auf Löttemperatur erwärmt werden.

5. Einteilung nach Art der Fertigung

5.1 Handlöten (manuelles Löten)

Sämtliche den Ablauf des Lötens kennzeichnende Vorgänge werden von Hand ausgeführt.

5.2 Teilmechanisiertes Löten

Einige den Ablauf des Lötens kennzeichnende Vorgänge laufen mechanisch ab.

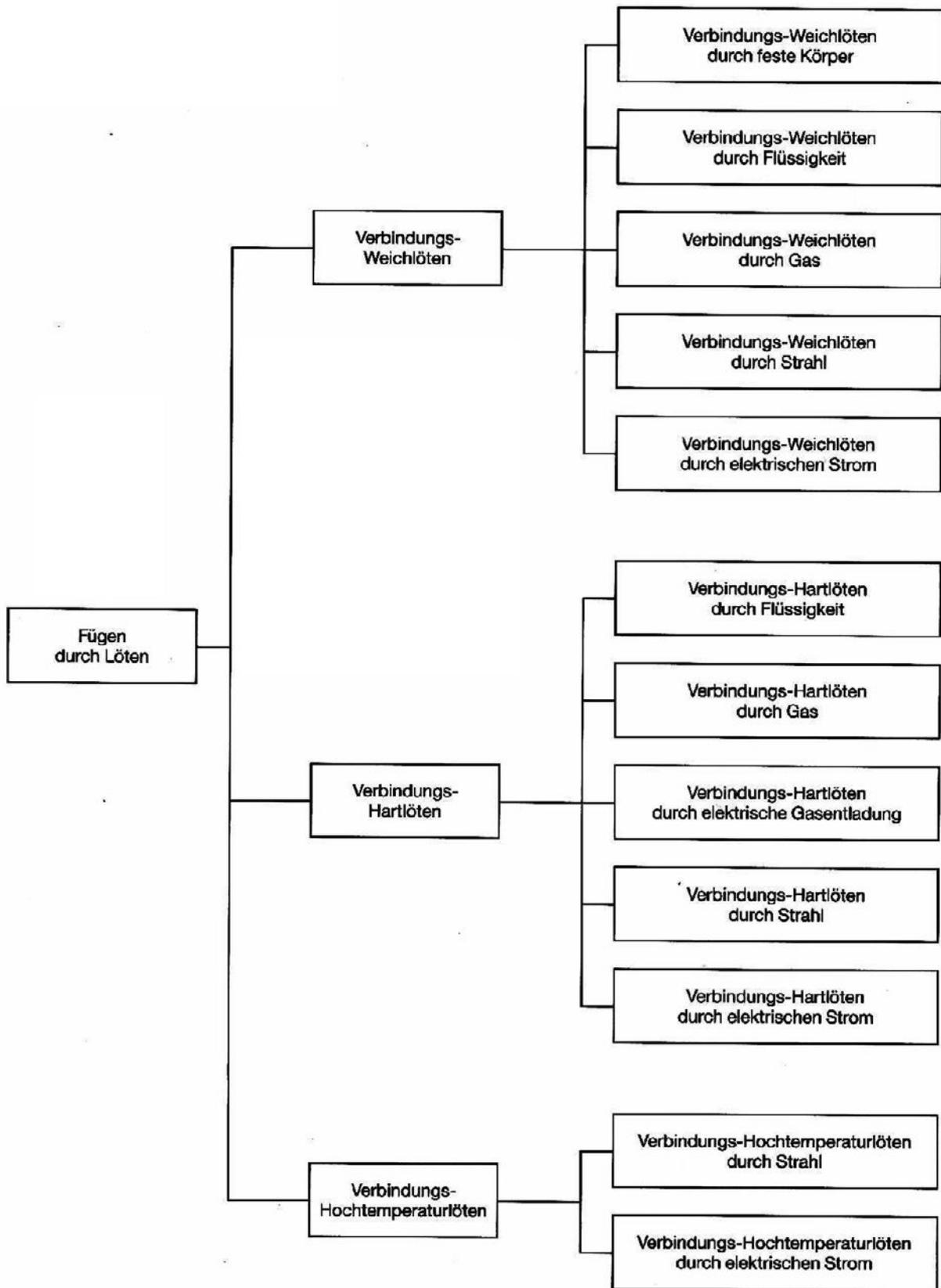
5.3 Vollmechanisiertes Löten

Sämtliche den Ablauf des Lötens kennzeichnende Vorgänge laufen mechanisch ab.

5.4 Automatisches Löten

Sämtliche den Ablauf des Lötens kennzeichnende Vorgänge einschließlich aller Nebentätigkeiten, z.B. Wechseln der Werkstücke, laufen selbsttätig nach einem Programm mit eventuell verschiedenen Ablaufmöglichkeiten ab.

Tafel 1



6. Einteilung nach Energieträgern

Eine Übersicht der Einteilung nach Energieträgern gibt die Tafel 1 wieder, die der DIN 8593 „Fertigungsverfahren Fügen – Fügen durch Löten“ – entnommen ist.

In der Praxis haben sich folgende Erwärmungsverfahren besonders bewährt:

6.1 Weichlötverfahren

6.1.1 Kolbenlötverfahren (Bild 1)

Kolbenlöten ist das Erwärmen der Lötstelle und das Abschmelzen des Lotes mit einem von Hand oder maschinell geführten LötKolben. Wärmekapazität und Form des Kolbens sowie der Lötspitze müssen der Lötstelle angepasst sein. Unter Zuhilfenahme von Flussmittel, getrennt oder in Form von Röhrenlot mit Flussmittelführung, werden beide Verbindungspartner mit dem Lot auf Arbeitstemperatur gebracht, bevor der eigentliche Lötvorgang beginnen kann.

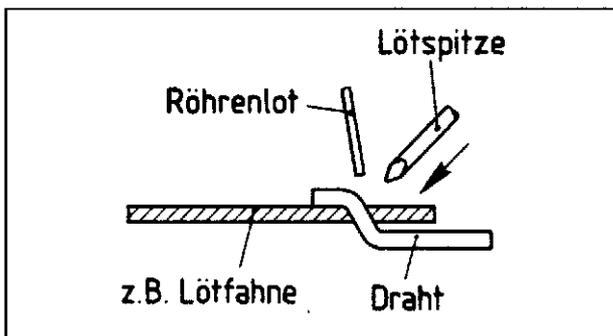


Bild 1

6.1.2 Lotbadlöten (Bild 2)

Beim Lotbadlöten werden die Verbindungspartner in ein Bad aus flüssigem Lot getaucht und so der Lötvorgang vollzogen. Vor dem Eintauchen werden die Teile mit Flussmittel benetzt. Die *Eintauchgeschwindigkeit* sollte nur so hoch gewählt werden, dass die Löttemperatur in jeder Tauchphase am Werkstück erreicht wird. Ein sichtbares Zeichen dafür ist ein positiver Meniskus an der Grenzfläche von Lotoberfläche und Bauteil. Das Lotteil kann vor dem Eintauchen kalt oder vorgewärmt sein.

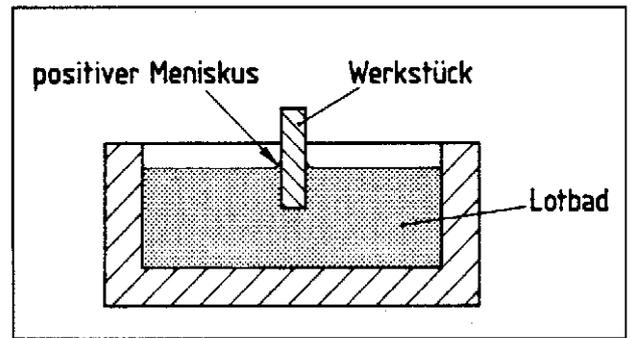


Bild 2

6.1.3 Wellenlöten (Bild 3)

Wellenlöten ist die Zuführung des flüssigen Lotes durch eine Lotwelle, die mittels einer Pumpe und einer Düse erzeugt wird. Dieses Verfahren wird hauptsächlich in Verbindung mit einem Flussmittelbad und einer Trockenstrecke (zur Trocknung des Flussmittels) zum Löten bestückter Leiterplatten eingesetzt. Als günstig hat sich beim Löten von Leiterplatten ein Durchzugswinkel der Platten zur Badoberfläche von 7° erwiesen.

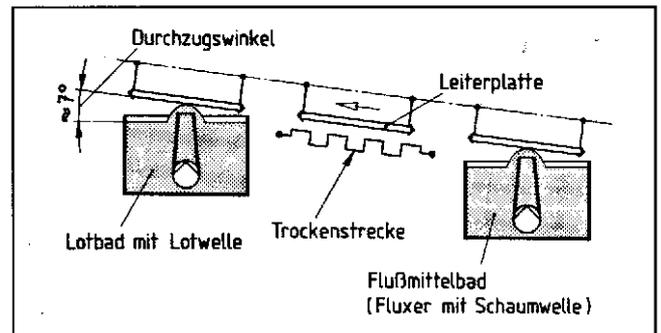


Bild 3

6.2 Hartlötverfahren

6.2.1 Flammenlöten (Bild 4)

Übliche Gaskombinationen:

6.2.1.1 Erdgas, Stadtgas, Flüssiggas oder Azetylen saugen atmosphärische Luft an (Injektorbrenner, Bunsenbrenner; nur ein Gaszuführungsschlauch erforderlich).



Bild 4: Flammenlöten

6.2.1.2 Erdgas, Stadtgas, Flüssiggas oder Azetylen werden mit Druckluft gemischt (größere Flammenleistung als bei Ansaugluftbrenner; zwei Zuführungsschläuche erforderlich).

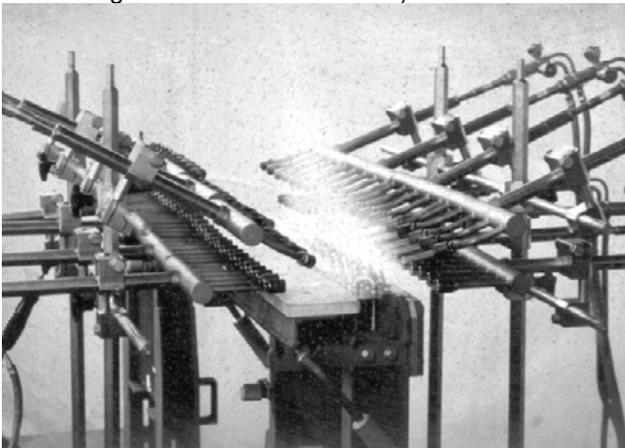


Bild 5: Hartlöten eines Wärmetauschers mit Propandruckluft-Brennerstation

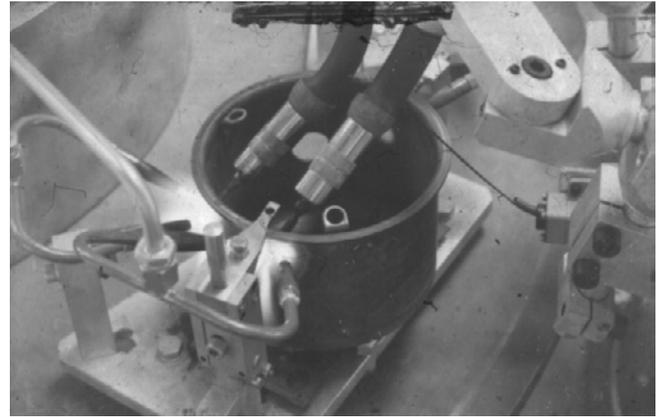


Bild 6: Hartlöten von Kompressoröpfen mit Azetylen/Druckluft/Brenner (Bild 6)

6.2.1.3 Erdgas, Stadtgas, Flüssiggas, Azetylen oder Wasserstoff werden mit Sauerstoff gemischt (noch größere Flammenleistung als bei Druckluftbrenner; für dünnwandige Bauteile meistens zu heiß).

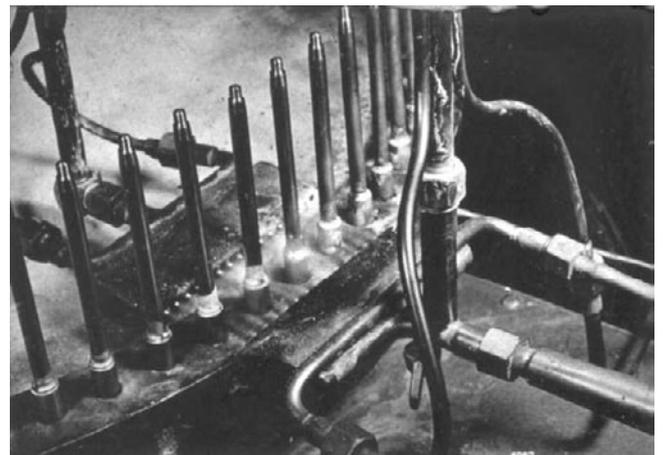


Bild 7: Hartlöten von Cu-Bolzen mit wassergekühltem Azetylen / Sauerstoff-Brenner

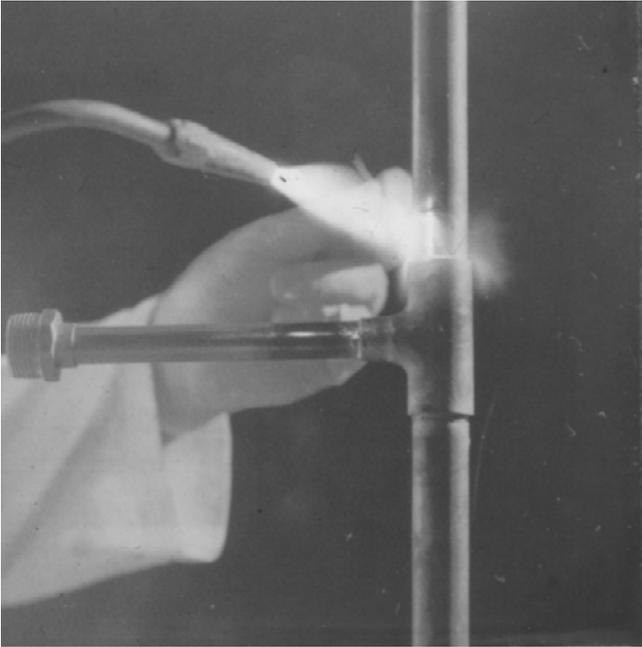


Bild 8: Handlötlung mit Azetylen-Sauerstoff-Brenner

6.2.2 Elektrisches Widerstandslöten

Die Werkstücke sind in den elektrischen Stromkreis eingeschaltet.

6.2.2.1 Löten mit Metallelektroden (Sekundärspannung etwa 1-2 Volt)

Dieses Verfahren wird bevorzugt bei Werkstücken mit relativ hohem elektrischen Widerstand eingesetzt. Der Strom erwärmt die Werkstücke direkt. Soweit möglich, sollten die Elektroden so angeordnet werden, dass der Strom nicht über die Lötstelle fließen muss.

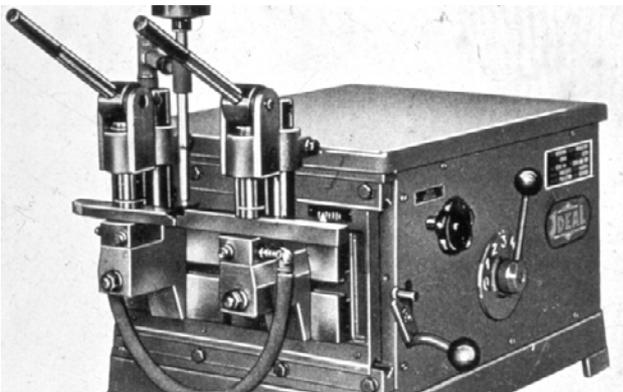


Bild 9

6.2.2.2 Löten mit Kohleelektroden (Sekundärspannung etwa 8-10 Volt)

Dieses Verfahren wird hauptsächlich für flussmittelfreie Lötungen an Kupferwerkstoffen mit phosphorhaltigen Loten eingesetzt. Der Strom erwärmt die Kohleelektroden, die die Wärme auf das Werkstück übertragen.

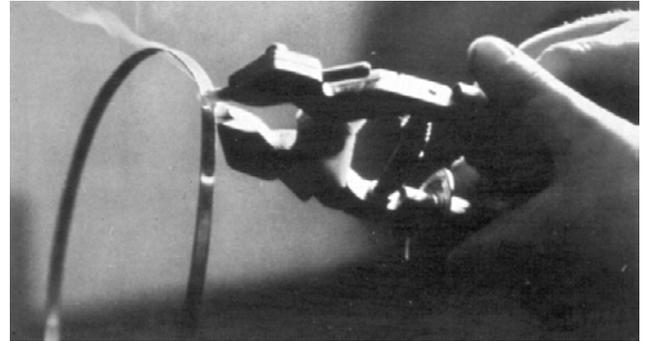


Bild 10

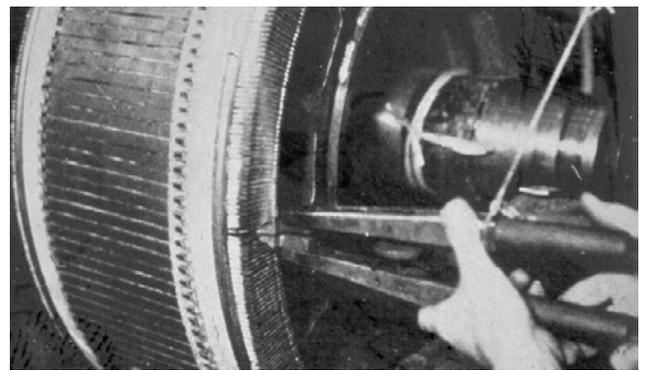


Bild 11: Löten eines Rotors mit Widerstandslötzange

6.2.3. Induktionslöten

Die Werkstücke sind nicht in den elektrischen Stromkreis eingeschaltet.

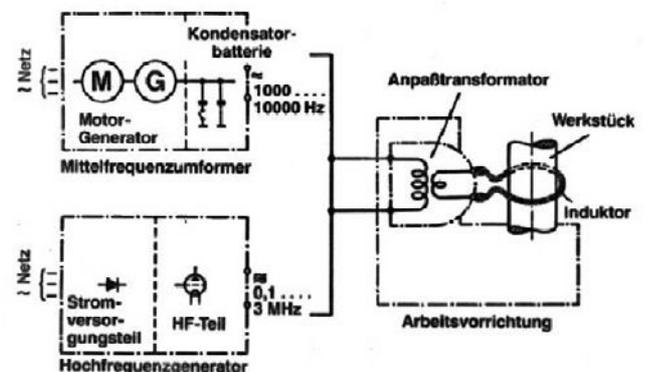


Bild 12

Lötverfahren

Der in dem Induktor fließende Strom hat ein elektromagnetisches Wechselfeld zur Folge, das innerhalb des Induktors sehr stark, an den Stirnseiten und an den Außenseiten dagegen wesentlich schwächer ist. Ein elektrisch leitfähiges Werkstück, das in die Induktionsspule gebracht wird, wird vom elektromagnetischen Feld durchdrungen, und es werden in ihm Wirbelströme erzeugt. Aufgrund des Skin-Effektes werden diese Ströme nach einer Exponentialfunktion zunehmend von innen auf die Außenseite des Werkstückes gedrängt und rufen im wesentlichen nur hier die gewünschte Erwärmung hervor. Die Schichtdicke, in welcher der Strom auf das 1/e-fache abgesunken ist, bezeichnet man als *Eindringtiefe* oder *Wirtiefe* (Bild 13). In ihr werden etwa 85 % der induzierten Leistung in Wärme umgesetzt.

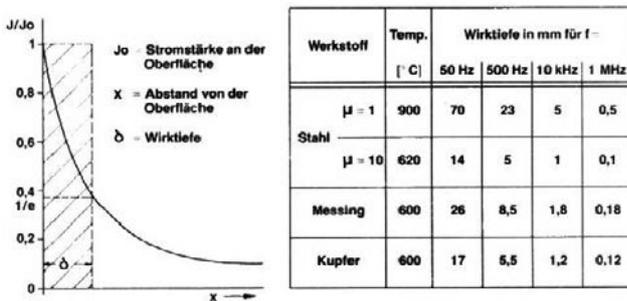


Bild 13

Hartlöten von Bohrkronen mit MF-Erwärmung (kein Kontakt zwischen Bohrkronen und Spule). Durch die „lockere“ Ankopplung wird die Energiedichte an der Oberfläche soweit verringert, dass die Wärmeleistung des Stahles eine gleichmäßige Durchwärmung ermöglicht (Bild 14).

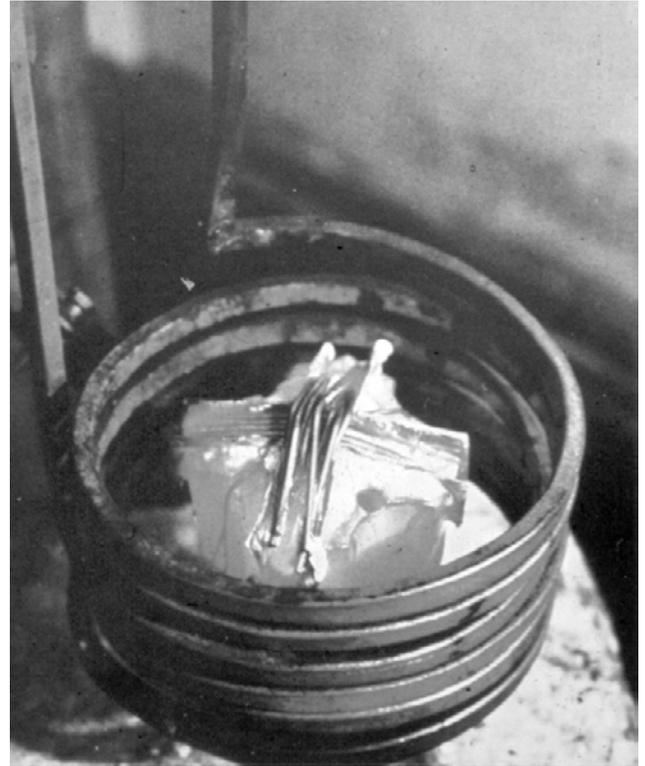


Bild 14

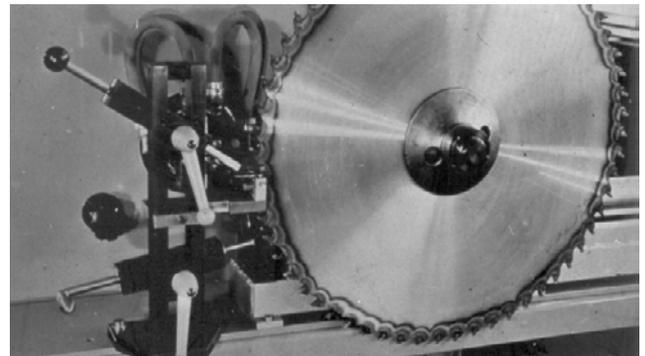


Bild 15: Hartlöten von Hartmetallen auf ein Sägestamtblatt mit HF-Erwärmung (deutlich sichtbare, begrenzte Wärmeeinbringung; Hartlot BrazeTec 49/Cu; Flussmittel BrazeTec spezial h).

6.2.4 Ofenlöten

Beim Ofenlöten werden die zu lötenden Werkstücke sowie das Lot und – falls erforderlich – das Flussmittel in einem Ofenraum auf die erforderliche Temperatur erwärmt. Die richtige Ofentemperatur liegt im allgemeinen etwa 50 – 100 °C über der Arbeitstemperatur des verwendeten Lotes.

Lötverfahren

6.2.4.1 Ofenlöten unter Verwendung von Flussmittel

Bei dieser Lötmethode gibt es keine Besonderheiten in bezug auf die Lot- und Flussmittelauswahl gegenüber anderen üblichen Lötmethoden. Es ist lediglich zu berücksichtigen, dass bei diesem Lötvorgang die Erwärmungsgeschwindigkeit häufig wesentlich langsamer ist als bei anderen Lötvorgängen und deswegen Lote mit engem Schmelzintervall vorzuziehen sind, damit keine Lotseigerung eintritt. Außerdem ist die Wirkdauer der Flussmittel zu beachten. Bei Werkstücken, die Erwärmungszeiten von mehr als 5 bis 10 Minuten erfordern, besteht die Gefahr der Flussmittel-Überzeitung. Um diese auszuschalten, muss ggf. zusätzlich Schutzgas in die Ofenkammer eingeleitet werden.

6.2.4.2 Ofenlöten unter Verwendung von Flussmittel und Schutzgas

Bei längeren Erwärmungszeiten ist neben dem Flussmittel zusätzlich die Verwendung von Schutzgas erforderlich. Da die vorhandenen Oxidhäute durch das Flussmittel entfernt werden, braucht das Schutzgas bei Löttemperatur nicht unbedingt reduziert zu wirken; es genügt, wenn es die Neubildung von Metalloxiden verhindert.

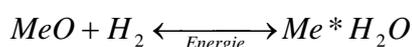
Es ist nicht jeder Ofen für das Löten geeignet. Man sollte bei Flussmittellötungen nur Öfen mit geschlossener Muffel einsetzen. Beim Ofenlöten mit zinkhaltigen Werkstücken oder -loten entstehen entsprechende Dämpfe, die den Ofen verunreinigen. Noch kritischer kann es sein, wenn Flussmittel verwendet wird. Flussmitteldämpfe können den Ofen schädigen, vor allem dann, wenn die Heizwendel nicht abgeschirmt ist.

6.3 Hochtemperaturlöten

6.3.1 Ofenlöten unter Verwendung reduzierender Schutzgase

Bei der Verwendung reduzierender Schutzgase werden vorhandene Metalloxide durch die chemische Reaktion mit den reduzierenden Bestandteilen des Schutzgases – im wesentlichen Wasserstoff H_2 , bei Endo- und Exo-Gasen auch CO – beseitigt.

Die dabei ablaufenden Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen:



Inwieweit die Reduktion gelingt, hängt zum einen von der Bindungsenthalpie der vorliegenden Metalloxide (Bild 19), zum anderen von der Trockenheit des Schutzgases ab (Bild 20).

Temperatur	1000° C	800° C	600° C
Ag, 2 AgO	(+107,7)	+ 80,9	+ 54,5
Pd, 2 PdO	+ 38,5	+ 4,9	- 30,6
Cu, 2 Cu ₂ O	-172,6	-197,8	-223,3
Sb, 2/3 Sb ₂ O ₃	-230,9	-268,2	-305,5
Ni, 2 NiO	-238,4	-277,8	-317,8
Cd, 2 CdO	-258,5	-298,3	-335,2
Co, 2 CoO	-282,4	-311,7	-341,1
Sn, SnO ₂	-315,5	-357,4	-399,3
W, 2/3 WO ₃	-342,3	-377,1	-411
P, 2/3 P ₂ O ₅	-356,1	-398	-440
Fe, 2 FeO	-360,3	-385,4	-410,6
Zn, 2 ZnO	-441,6	-481,8	-522,5
Cr, 2/3 Cr ₂ O ₃	-526,7	-561	-596,2
Mn, 2 MnO	-585,8	-614,7	-644,4
Si, SiO ₂	-641,5	-677,9	-714
Ti, TiO ₂	-674,6	-712,3	-745,8
Al, 2/3 Al ₂ O ₃	-846,4	-888,3	-938,6
H ₂ , 2 H ₂ O (feucht)	-356,1	-377,1	-398
Co, 2 Co ₂	-344,8	-379,6	-414,4

Bild 19

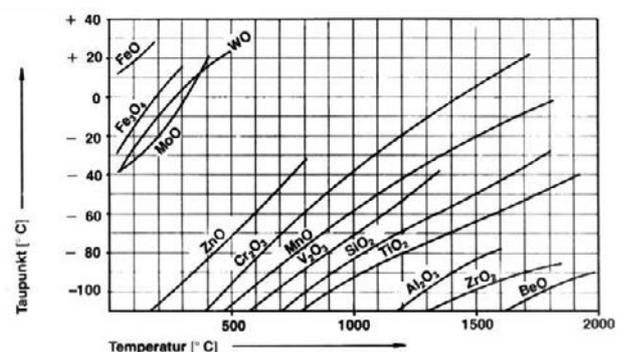


Bild 20

In Bild 20 sind Reduktions-Oxidations-Gleichgewichte verschiedener Metalle in Abhängigkeit vom Taupunkt des Schutzgases (Wasserstoff, Ammoniakspaltgas) dargestellt. Die dadurch festgelegten Temperaturen sind löstechnisch als Mindesttemperaturen zu verstehen,

Lötverfahren

bei denen die Reduktion der jeweils vorhandenen Oberflächenoxide zu Metall beginnt.

Ein Beispiel von technisch besonderer Bedeutung ist das flussmittelfreie Hartlöten eines chromhaltigen Werkstoffes, zum Beispiel eines unstabilisierten 18/8-Chrom-Nickel-Stahles (Werkstoff Nr. 14301), unter Ammoniakspaltgas oder Wasserstoff mit einem Taupunkt von etwa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entsprechend der Chrom-Chromoxid-Gleichgewichtskurve wird hierzu eine Mindesttemperatur um $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ benötigt. Unterhalb dieser Temperatur wird das auf der Oberfläche des 18/8-Stahl immer vorhandene Chromoxid nicht reduziert, sondern eher noch verstärkt, wodurch das Benetzen, vor allem aber das Fließen des Lotes, verhindert wird. Bei einem titanstabilisierten 18/8 Stahl, zum Beispiel der Werkstoff Nr. 14541 mit etwa $0,5\text{ }\%$ Ti, kann Titanoxid, das noch wesentlich schwerer zu reduzieren ist als Chromoxid, trotz seines mengenmäßig geringen Anteils zusätzliche Benetzungsschwierigkeiten bereiten. Beim Schutzgaslöten bestimmt also die Mindestlöttemperatur das Oxid, das am schwersten reduzierbar und in nicht vernachlässigbaren Mengen vorhanden ist und sich entweder auf dem Grundwerkstoff oder auf dem Lot bilden kann.

Während man bisher von der Technologie des Lötens mit Flussmittel her die Arbeitstemperatur als durch die Lotsorte gegeben ansehen konnte, wird sie beim Schutzgaslöten wesentlich auch von anderen Faktoren, wie Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und Güte des Schutzgases, beeinflusst.

Schutzgasgelötete Teile sind blank und bedürfen keiner Nacharbeit (Bild 21).

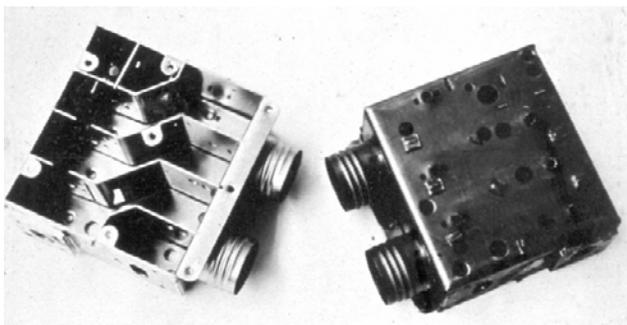


Bild 21

Beim Schutzgaslöten ist der Dampfdruck von Grundwerkstoffen und Lotes zu beachten (z.B. die Zinkausdampfung beim Löten von Messing). Dies gilt in noch höherem Maße bei Vakuumlöten (Bild 22).

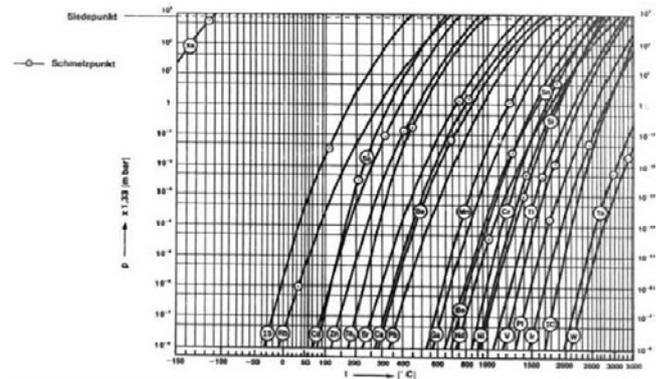


Bild 22

6.3.2 Ofenlöten unter Vakuum

Die Vakuumlote dürfen - wie die Grundwerkstoffe - keine niedrigsiedenden Bestandteile enthalten.

Für das Blankglühen zwischen 700 und $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, z.B. von hochchromhaltigen Stählen haben sich Schutzgase mit einem Taupunkt zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bewährt. Wie trocken das Restgas im Vakuum ist, geht aus Bild 23 hervor.

Druck [m bar]	Taupunkt [$^{\circ}\text{C}$] für Wasserdampfgehalt von		
	20 Vol. %	70 Vol. %	100 Vol. %
1	-32	-17	-13
10^{-1}	-52	-40	-37
10^{-2}	-68	-58	-56
10^{-3}	-84	-75	-72
10^{-4}	-91	-89	-88

Bild 23

In Bild 23 sind die errechneten Taupunkte für verschiedene Drücke angeführt, wobei im Restgas ein Wasserdampfpartialdruck von 20, 70 bzw. 100 Vol.-% zugrunde gelegt wurde. Daraus ist ersichtlich, dass bereits bei 10^{-1} mbar, d.h. einem Druck, der mit einer einfachen Rotationspumpe erreichbar ist, die Taupunkte je nach Wasserdampfpartialdruck im Restgas zwischen -40 und $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen.

Das Hartlöten wird im Vakuum oberhalb $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgenommen. Da das Vakuumlöten je nach Lot und Grundwerkstoff zwischen 10^{-1} und 10^{-6} mbar erfolgt, ist die Oxidation derart gering, dass ohne Flussmittel gearbeitet werden kann.

Lötverfahren

Während beim Löten an der Atmosphäre Flussmittel und Gase im Lötspalt eingeschlossen werden können, ist das beim Löten im Vakuum praktisch nicht der Fall, so dass Lötverbindungen mit gutem Füllgrad und hoher Festigkeit entstehen. Das ist besonders wichtig bei hochbeanspruchten Teilen wie Turbinenschaufeln, Wärmetauschern und Wabenkonstruktionen. Besonders starken Anklang hat das Vakuumlöten im Triebwerksbau gefunden.

Die Werkstücke müssen vor dem Löten auf den Lötflächen entweder mechanisch oder chemisch blank gemacht werden. Die Verweildauer auf Löttemperatur soll vor allem bei den Hochtemperaturlöten möglichst kurz sein, um ein zu starkes Anlegieren des Grundwerkstoffes (Erosion) und ggf. die Bildung spröder Phasen in den Übergangszonen zu vermeiden.

Die Ausbildung spröder Phasen ist jedoch unkritisch, wenn - wie oftmals bei Nickelbasisloten - eine Diffusionsbehandlung im Anschluss an die Lötung vorgesehen ist (Bild 24).

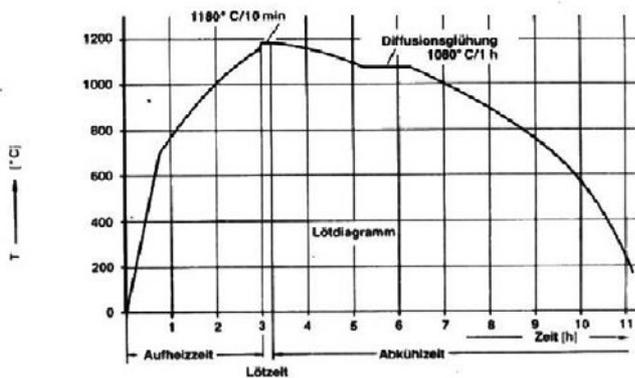


Bild 24

Oft können Löt- und Wärmebehandlungsverfahren in einem Prozess miteinander kombiniert werden (Bild 25).

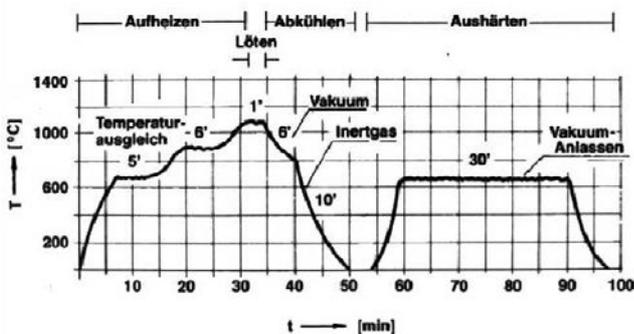


Bild 25

6.4 Ofentypen

6.4.1 Schutzgasöfen

Schutzgaslötungen werden meist in Schutzgasdurchlauföfen durchgeführt (Bild 26).

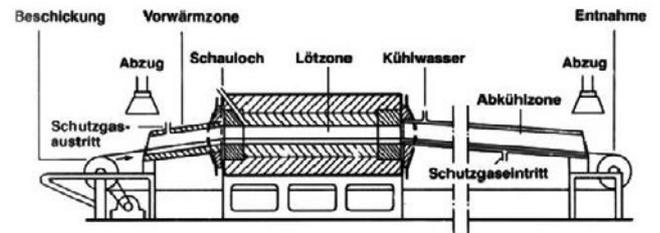


Bild 26

Für Stahlteile verwendet man überwiegend Exo-Gasöfen (Bild 27).



Bild 27

Für Messing und Chromnickel-Stähle werden Spaltgasöfen eingesetzt, die auch mit reinem Wasserstoff betrieben werden können. Um den Gasverbrauch niedrig zu halten, werden diese Öfen als „Buckelöfen“ gebaut (Bild 28).

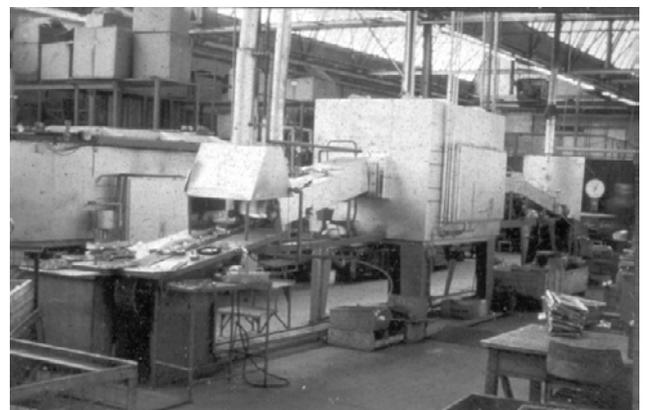


Bild 28

Lötverfahren

6.4.2 Vakuumöfen

- Degussa Kammerofen VKQgr 25/10/25 (Bild 29)

Nutzraummaße: 250 mm Länge
250 mm Breite
100 mm Höhe
Heizung: Graphittuch, verfahrbar
Nenntemperatur: 1350 °C
Bauart: Kaltwandofen mit
Inertgasumwälzung

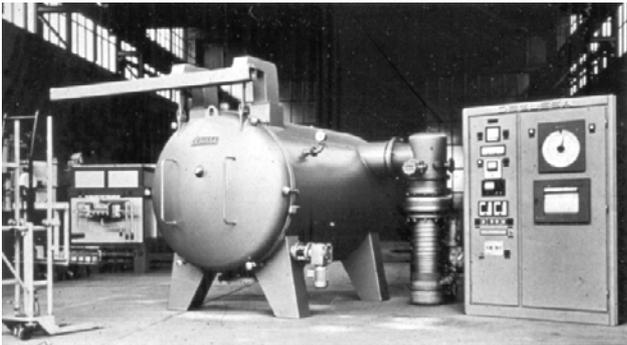


Bild 29



Bild 30

6.5 Anwendungsbeispiele

- Teil der Brennkammer eines Düsentriebwerkes aus einer Co-Legierung, gelötet mit Nickelbasislot bei 5×10^{-4} mbar (Bild 31).

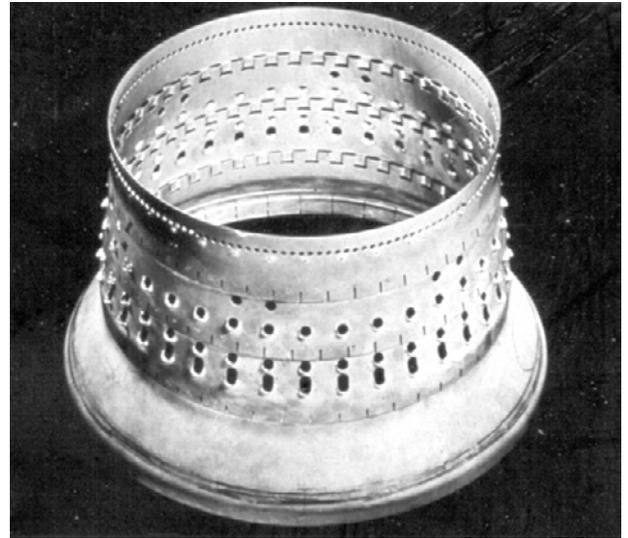


Bild 31

- Richttriebwerk einer Weltraumsonde; Edelstahl-Kühlschlange um Brennkammer gewickelt und mit BrazeTec VH 950 (Goldbasislot) bei 9×10^{-3} mbar gelötet (Bild 32).

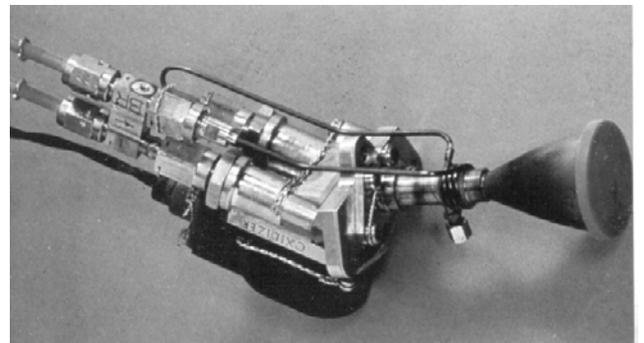


Bild 32

- Ölkühler aus Chromnickelstahl, im Schutzgasdurchlaufofen unter NH_3 -Spaltgas mit Kupferlot gelötet (Bild 33).

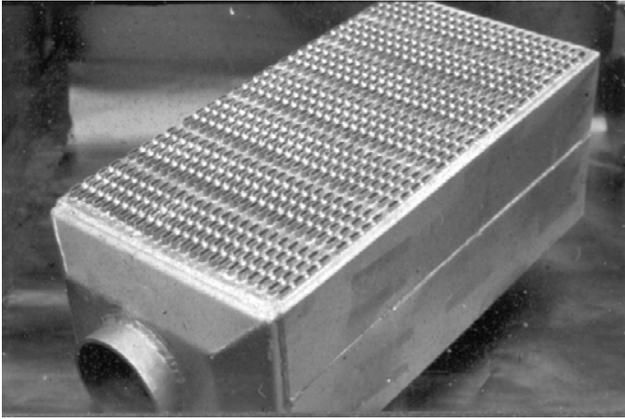


Bild 33

- Drehmomentwandler eines automatischen Getriebes im Schutzgasdurchlaufofen unter Exo-Gas mit Bronzelot gelötet (Bild 34).

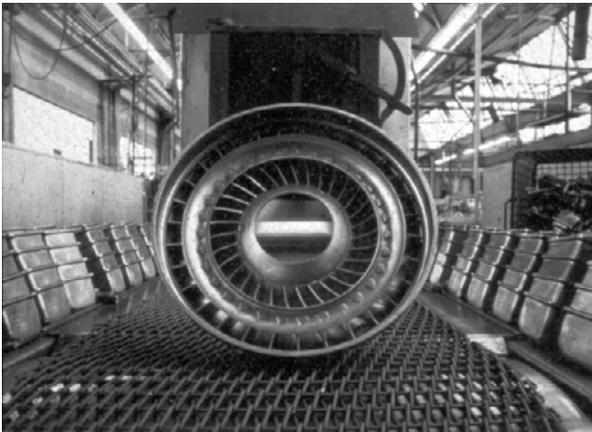


Bild 34

- Kabelwanne aus Kupfer im Schutzgasdurchlaufofen unter Exo-Gas mit BrazeTec Silfos 15 gelötet (Bild 35).

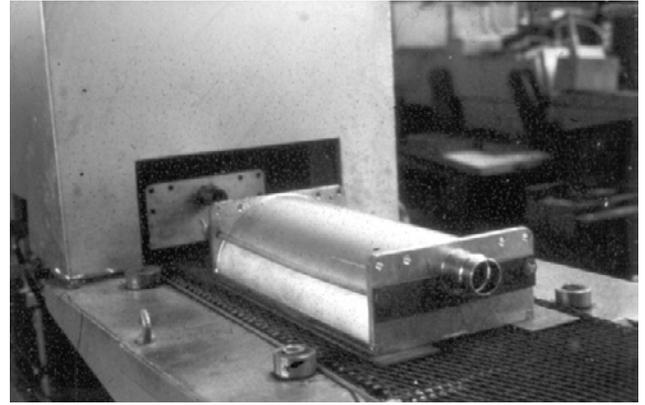


Bild 35

- Röntgenröhre; Wolframelektrode auf Kupferträger im Vakuumofen mit BrazeTec SCP-Lot gelötet (Bild36).

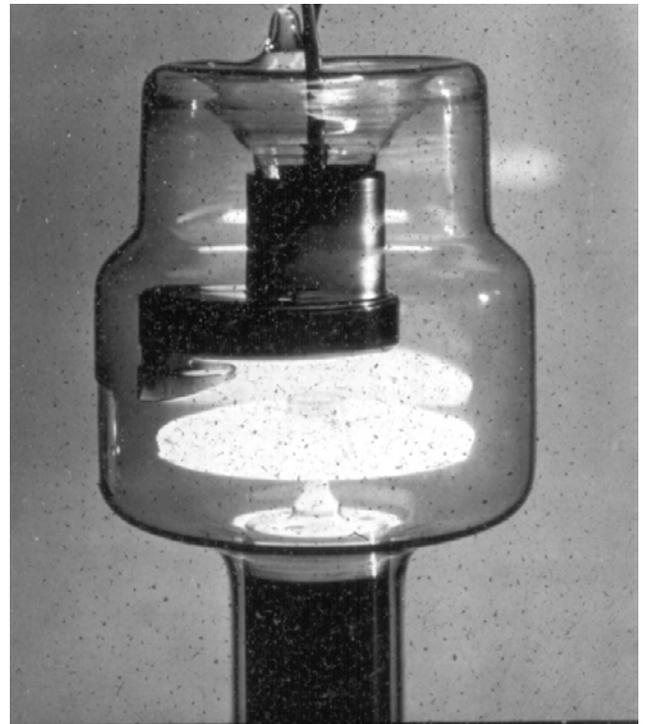


Bild36

Unsere Angaben über unsere Produkte und Geräte sowie über unsere Anlagen und Verfahren beruhen auf einer umfangreichen Forschungsarbeit und anwendungstechnischen Erfahrung. Wir vermitteln diese Ergebnisse, mit denen wir keine über den jeweiligen Einzelvertrag hinausgehende Haftung übernehmen, in Wort und Schrift nach bestem Wissen, behalten uns jedoch technische Änderungen im Zuge der Produktentwicklung vor. Darüber hinaus steht unser Anwendungstechnischer Dienst auf Wunsch für weitergehende Beratungen sowie zur Mitwirkung bei der Lösung fertigungs- und anwendungstechnischer Probleme zur Verfügung.

Das entbindet den Benutzer jedoch nicht davon, unsere Angaben und Empfehlungen vor ihrer Verwendung für den eigenen Gebrauch selbstverantwortlich zu prüfen. Das gilt - besonders für Auslandslieferungen - auch hinsichtlich der Wahrung von Schutzrechten Dritter sowie für Anwendungen und Verfahrensweisen, die von uns nicht ausdrücklich schriftlich angegeben sind. Im Schadensfall beschränkt sich unsere Haftung auf Ersatzleistungen gleichen Umfangs, wie sie unsere Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen bei Qualitätsmängeln vorsehen