

Mittelfrequenzlöten eines $18 \times 18 \text{ mm}^2$
Kupferquerschnittes mit einem $400 \text{ }^\circ\text{C}$ Lot
und dem im IPP vorhandenen 10 kHz-Generator

($400 \text{ }^\circ\text{C}$ Soldering of $18 \times 18 \text{ mm}^2$ Copper
with our existing 10 kHz-Generator)

J. Gernhardt

IPP III/16

Februar 1975

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Mittelfrequenzlöten eines $18 \times 18 \text{ mm}^2$
Kupferquerschnittes mit einem 400°C Lot
und dem im IPP vorhandenen 10 kHz-Generator

(400°C Soldering of $18 \times 18 \text{ mm}^2$ Copper
with our existing 10 kHz-Generator)

Abstract

J. Gernhardt

Description of the electrical circuit for soldering a copper
area of $18 \times 18 \text{ mm}^2$ with a 10 kHz inductor. IPP III/16 Februar 1975

Calculation of the soldering temperature for the existing
generator system.

Comparison of the measured and calculated data.

Necessary input power for high-frequency soldering.

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

IPP III/16

J. Gernhardt

Mittelfrequenzlöten eines
18 x 18 mm² Kupferquer-
schnittes mit einem 400 °C
Lot und dem im IPP vorhan-
denen 10 kHz-Generator

(400 °C Soldering of
18 x 18 mm² Copper with
our existing 10 kHz-
Generator)

Februar 1975

Abstract

Description of the electrical circuit for soldering a copper area of 18 x 18 mm² with a 10 kHz inductor.

Calculation of the soldering temperature for the existing generator parameters.

Comparison of the measured and calculated data.

Necessary input power for high-frequency soldering.

Lötverbindungen

Lötverbindungen sind ein wesentlicher Bestandteil der Montageverbindungen. Durch Schmelzlöten lassen sich Lötverbindungen prozentual lassen sich verhältnismäßig leicht und montagegerichtet realisieren.



Mittelfrequenz-Löten (10 kHz)

HF-Löten mit dem 10 kHz-Generator, der im I-Gebäude installiert ist. Die maximale Leistung beträgt 45 kW.
 $J = 62 \text{ A}$; $U = 720 \text{ V}$ bei $f = 10 \text{ kHz}$. Eine Erwärmung der Lötstelle mit der 1 kHz-Maschine war nicht möglich. Die 1 kHz Maschine hat die gleiche Leistung wie die 10 kHz Maschine jedoch bei 1 kHz.

1.) Elektrische Stromverbindungen

Elektrische Stromverbindungen von Kupferleitern, die hohe Stromdichten (ca. $100 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$) übertragen müssen, sind technisch schwierig zu realisieren; vor allem dann, wenn kein ausreichender Platz zur Verfügung steht.

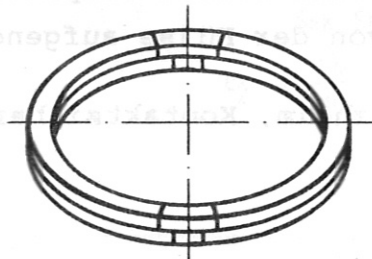
Als Verbindungsarten kommen hauptsächlich Verschraubungen oder als zweite Methode Lötungen in Frage.

1.1.) Schraubverbindungen

Schraubverbindungen lassen sich gut montieren, benötigen jedoch relativ viel Platz. Da in Tokamaks und ähnlichen Maschinen eine Schraubverbindung nachträglich nicht mehr nachgezogen werden kann, ist bei der Konstruktion ein besonderes Augenmerk auf lange Federwege zu legen, d. h. es sollen möglichst lange Schrauben (höhere Dehnung) oder zusätzliche Federelemente verwendet werden. Dadurch wird erreicht, daß die Vorspannkraft nur wenig abfällt, wenn sich in der Betriebsphase das Kontaktmaterial etwas verdichtet und dadurch der Spannabstand verkleinert wird. (Setzen der Werkstoffe)

1.2.) Lötverbindungen

Lötverbindungen sind platzsparender als Schraubverbindungen. Durch Schachtelung von zwei Lötverbindungen pro Leiter lassen sich wesentliche Montage- und Demontageerleichterungen erzielen.

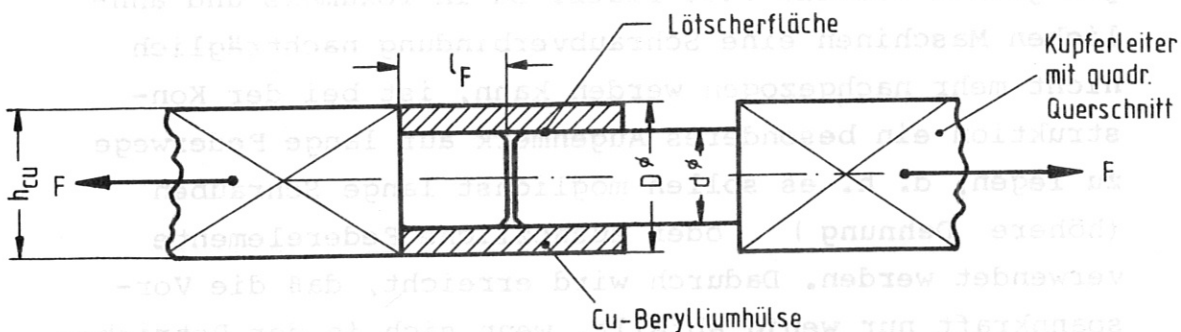


2.) Vorbereitung der Lötstelle

Für die Erwärmung einer solchen Lötverbindung kommt praktisch nur die Mittelfrequenz-Heizung (~ 10 kHz) über Lötinduktoren in Frage. Der Vorteil ist die kurze Lötzeit von ca. $3 \div 30$ sec. und damit die geringe Erwärmung der näheren Umgebung der Lötstelle. Dadurch kann die Isolierung schon vor dem Löten bis fast an die Lötstelle herangeführt werden. Mit wassergekühlten Backen kann die Wärme abgeleitet werden.

Nach dem Löten kann der Lötinduktor (z. B. Kupferrohr 4×1 mm wassergekühlt) mit dem Seitenschneider leicht entfernt werden. Eine nachträgliche Isolation der Lötstelle bereitet keine besonderen Schwierigkeiten.

Als Lötverbindung hat sich eine Kupfer-Berylliumhülse oder eine Hülse aus Kontaktsilber T⁺) nach folgender Zeichnung bewährt.



$$\sigma_{\text{Be}} = 40 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Zugfestigkeit der Berylliumhülse nach dem Löten

$$\sigma_{\text{Cu}} = 10 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Zugfestigkeit von dem Kupfer Cu-F20 nach dem Löten

$$\tau_{\text{Löt}} = 14 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Scherfestigkeit des 400°C Lotes

Eventuell auftretende Scherbeanspruchungen werden durch obige Anordnung von der Hülse aufgenommen.

⁺) Firma Rau, 7530 Pforzheim, Kontaktsilber T; $\mathcal{Z} = 44$ S, Ag Mg Ni-Legierung

Die Zugkraft F ergibt sich damit zu

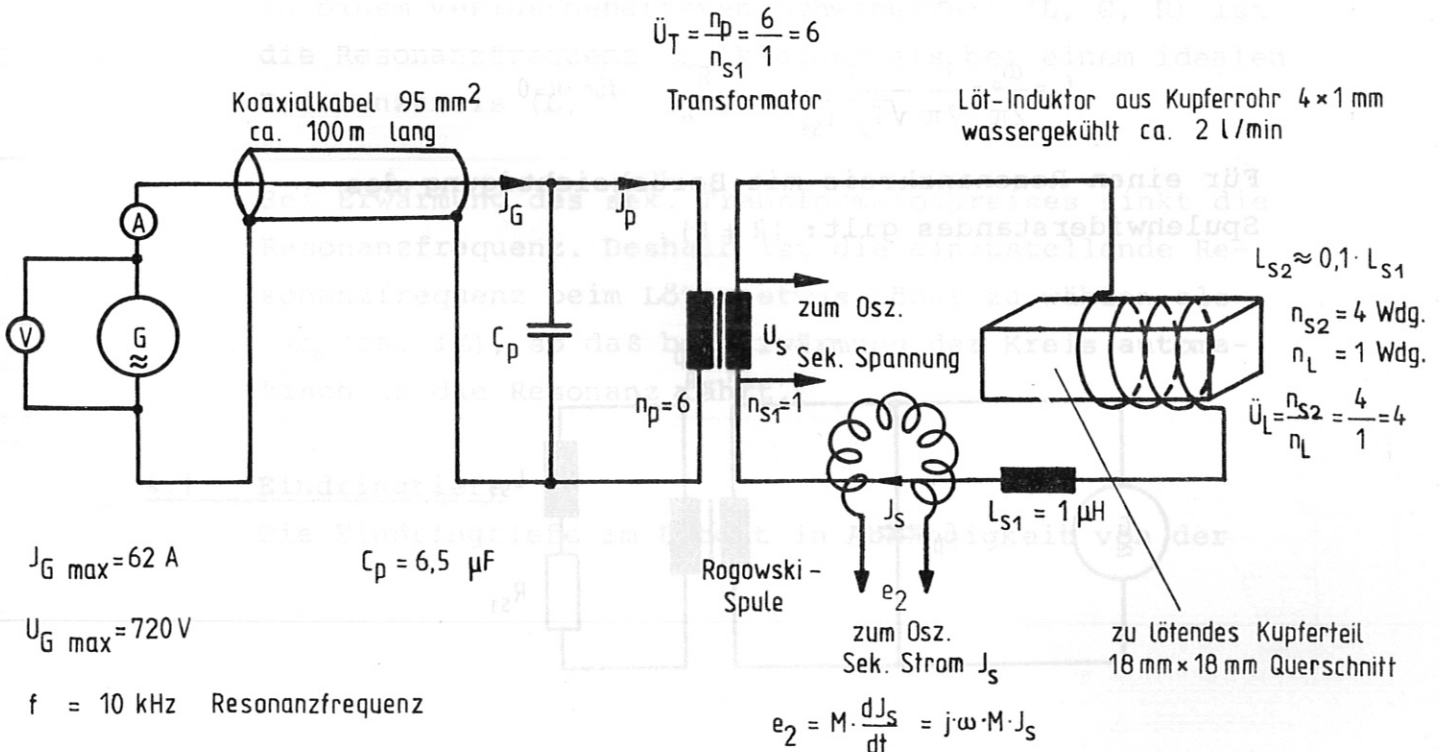
$$F = \sigma \cdot A = \sigma_{\text{Be}} \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \sigma_{\text{Cu}} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \tau_{\text{Löt}} \cdot d \cdot \pi \cdot l_F$$

Die Stumpfnah wird festigkeitsmäßig nicht berücksichtigt.

Durch die obige Anordnung wird eine sehr große Lötfläche und damit eine hohe Festigkeit auch bei dem relativ niedrig schmelzenden Lot (400°C statt wie bei dem Silberlot 600°C) erzielt. Arbeitsbereich des Lotes $340 \div 395^\circ\text{C}$ Typ Fortargen A 626. Es besteht aus 5% Silber und 95% Kadmium, hat eine Leitfähigkeit von $\kappa = 12$ Siemens und eine Zugfestigkeit von 14 kp/mm^2 .

Den gleichen Arbeitsbereich besitzt Castolin 155 mit einer Zusammensetzung von 6% Silber und 94% Kadmium. Die Zugfestigkeit beträgt 12 kp/mm^2 .

3.) Aufbau der HF-Löteinrichtung



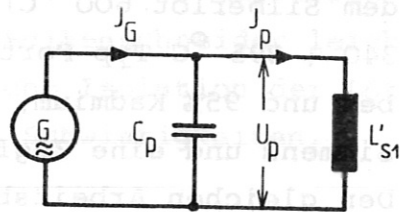
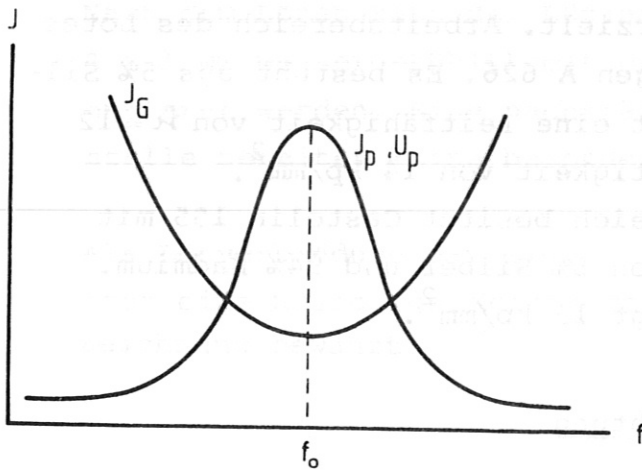
Im Resonanzfall ist

$$X_C = \frac{1}{\omega_o \cdot C_p} = X_L = \omega_o \cdot L'_{s1}$$

Die Induktivität des Lötinduktors beträgt nur ca. 10 % von der Induktivität des Transformatorsekundärkreises und kann vernachlässigt werden.

$$L_{s2} \approx 0,1 \cdot L_{s1}$$

Im Resonanzfall ist J_G ein rein ohmscher Strom und hat ein Minimum.

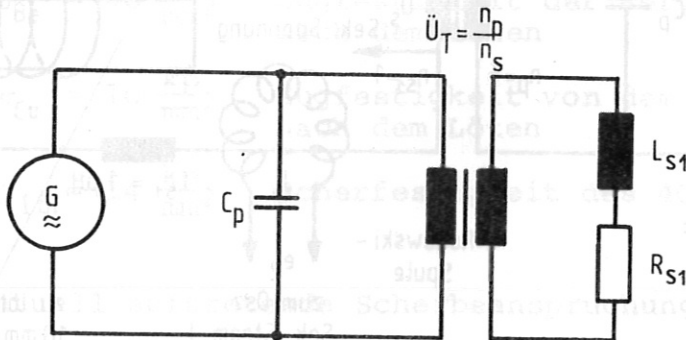


$$L'_{s1} = \dot{U}_T^2 \cdot L_{s1}$$

Im Resonanzfall gilt:

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_p \cdot L'_{s1}}} \quad \text{für } R=0$$

Für einen Resonanzkreis mit Berücksichtigung des Spulenwiderstandes gilt: ($R \neq 0$)



Die Sekundärdaten sind auf die Primärseite des Transformators umgerechnet:

$$L'_{s1} = n_T^2 \cdot L_{s1}$$

$$R'_{s1} = n_T^2 \cdot R_{s1}$$

Wenn man die Primärverluste des Transformators vernachlässigt, erhält man (auf die Primärseite umgerechnet):

$$\eta = \frac{1}{Z} = j \cdot \omega \cdot C_p + \frac{1}{R'_{s1} + j \omega L'_{s1}} = \frac{R'_{s1}}{R_{s1}^2 + (\omega L'_{s1})^2} - j \frac{\omega L'_{s1}}{R_{s1}^2 + (\omega L'_{s1})^2} + j \omega C_p$$

Im Resonanzfall ist der Imaginärteil 0, d. h.

$$\frac{\omega_{oR} \cdot L'_{s1}}{R_{s1}^2 + (\omega_{oR} \cdot L'_{s1})^2} = \omega_{oR} \cdot C_p$$

$$\omega_{oR} = \sqrt{\frac{L'_{s1} - C_p \cdot R_{s1}^2}{L_{s1}^2 \cdot C_p}} = \sqrt{\frac{L_{s1} - C_p \cdot \dot{U}_T^2 \cdot R_{s1}^2}{\dot{U}_T^2 \cdot L_{s1}^2 \cdot C_p}}$$

$$\omega_{oR} < \omega_o$$

In einem verlustbehafteten Schwingkreis (L, C, R) ist die Resonanzfrequenz ω_{oR} kleiner als bei einem idealen Resonanzkreis (L, C) ω_o .

Bei Erwärmung des sek. Transformatorkreises sinkt die Resonanzfrequenz. Deshalb ist die einzustellende Resonanzfrequenz beim Löten etwas höher zu wählen als ω_o (ca. 1%), so daß bei Erwärmung der Kreis automatisch in die Resonanz fährt.

4.) Eindringtiefe

Die Eindringtiefe im Lötgut in Abhängigkeit von der

Frequenz ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\delta \text{ [mm]} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \text{ [1]} \cdot f \text{ [Hz]} \cdot \kappa \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]}}$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right]$$

Für Kupfer als Lötgut ergibt sich folgende Tabelle:

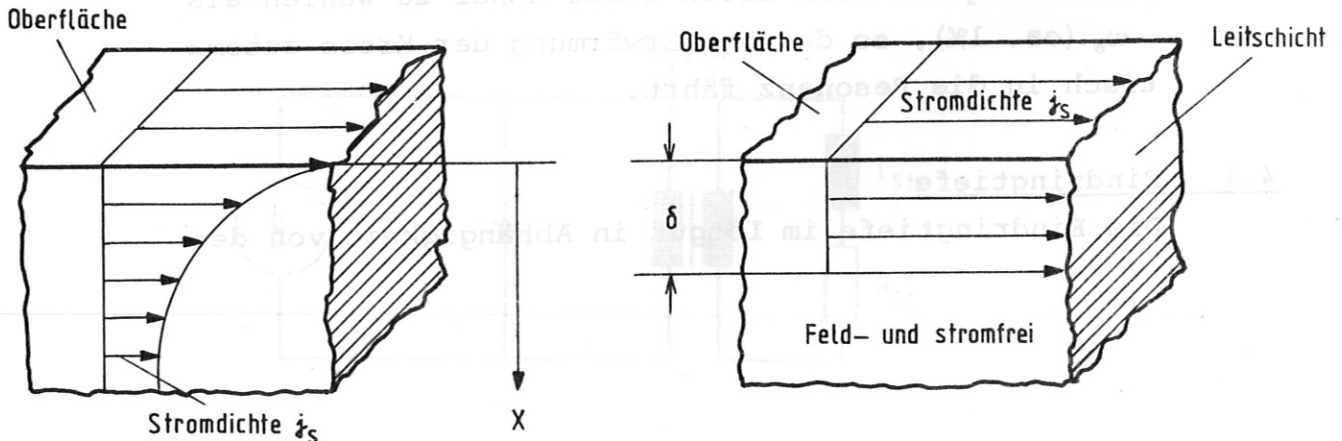
f [Hz]	δ [mm]
1	67
10	21
50	10
100	7
1000	2
5000	1
10000	0.7

$$\kappa_{\text{Cu}} = 56 \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$$

(Kupfertemperatur 20° C)

Obige Tabelle gilt für $\kappa_{\text{Cu}} = 56 \text{ [S]}$. Bei Erwärmung des Kupfers während des Lötvorganges wird jedoch die elektrische Leitfähigkeit (κ) kleiner und damit vergrößert sich die Eindringtiefe δ_{Cu} .

Dabei wird vorausgesetzt, daß der gesamte Strom gleichmäßig verteilt ist und in der Dicke δ fließt. Dadurch ergibt sich ein wesentlich höherer Widerstand als der Gleichstromwiderstand des Lötgutquerschnittes ist. Die Erwärmung $\Delta\vartheta = f(J^2 \cdot R \cdot t)$ ist dadurch größer.



$$j_s = j_{s0} \cdot e^{-\frac{x}{\delta}}$$

Theorie

zur praktischen Berechnung angenommen

Es wird also vorausgesetzt, daß die Schichtdicke δ vom Strom J erwärmt wird und diese Wärme das Innere des Lötteils erwärmen muß.

5.) Vergleich zwischen den Messungen und den Rechnungen für die Erwärmung des $18 \times 18 \text{ mm}^2$ Lötgutes aus Kupfer

Es wurden folgende Werte gemessen

- $f_0 = 10,0 \text{ kHz}$
- $J_G = 30 \text{ A}$
- $U_G = U_p = 420 \text{ V}$
- $\Delta \vartheta = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- $t = 7 \text{ sec}$
- $\ddot{U}_L = 4$: Lötinduktorwindungszahl
- $\ddot{U}_T = 6$: Transformatorübersetzungsverhältnis
- $C_p = 6,5 \text{ } \mu\text{F}$ Kapazität des Kompensationskondensators
- $L_{s1} = 1 \text{ } \mu\text{H}$ Induktivität des Transformator sek. Kreises
- $J_s = 890 \text{ A}$ Transformator Sekundärstrom (Effektivwert)
- $U_s = 70 \text{ V}$ Transformator Sekundärspannung (Effektivwert)
- $P = 12,6 \text{ kW}$

Für den Resonanzfall gilt:

$$J_L = \ddot{U}_L \cdot J_s$$

$$J_s = \ddot{U}_T \cdot J_p$$

$$J_p = \frac{U_p}{X_p} = U_p \cdot \omega_0 \cdot C_p$$

$$J_L = \ddot{U}_L \cdot J_s = \ddot{U}_L \cdot \ddot{U}_T \cdot J_p = \ddot{U}_L \cdot \ddot{U}_T \cdot U_p \cdot \omega_0 \cdot C_p$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L'_{s1} \cdot C_p}} \quad ; \quad L'_{s1} = \ddot{U}_T^2 \cdot L_{s1}$$

$$J_L = \ddot{U}_L \cdot \ddot{U}_T \cdot U_p \cdot C_p \cdot \frac{1}{\sqrt{C_p \cdot \ddot{U}_T^2 \cdot L_{s1}}}$$

$$J_L = \ddot{U}_L \cdot U_p \cdot \sqrt{\frac{C_p}{L_{s1}}} = \ddot{U}_L \cdot \ddot{U}_T \cdot U_p \cdot C_p \cdot \omega_0$$

Da nur eine begrenzte Zahl von Kondensatoren zur Verfügung steht und $f_0 = 10 \text{ kHz}$ eingehalten werden sollte (h_{Cu} sollte $ca. \leq 10 \cdot \delta_{Cu}$ sein; $h_{Cu} = 18 \text{ mm}$) und L_{s1} durch die Zuleitung von der sek. Seite des Transformators bis zum Lötteil gegeben ist, wird C_p nur durch das Übersetzungsverhältnis des Transformators variierbar.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\dot{U}_T^2 \cdot L_{s1} \cdot C_p}} \quad ; \quad J_L = \dot{U}_L \cdot U_p \sqrt{\frac{C_p}{L_{s1}}}$$

Der Strom im Lötteil J_L ist von dem Transformatorübersetzungsverhältnis \dot{U}_T unabhängig. Damit der Strom J_L im Lötteil möglichst groß wird, muß die Induktivität des sek. Transformatorkreises L_{s1} möglichst klein gehalten werden. (Kurze Zuleitungen, Koaxialkabel, Bandleiter)

6.) Theoretische Berechnung der zu erwartenden Temperaturerhöhung an der Lötstelle

Dabei werden die Wärmestrahlung und die Wärmeleitung vernachlässigt, d. h. die berechnete Temperatur ist zu hoch. In der Praxis ist die erreichte Temperatur kleiner.

Es gilt

$$6.1) \quad Q = C \cdot G \cdot \Delta\vartheta = J^2 \cdot R \cdot t \frac{1}{4186} = U \cdot J \cdot t \frac{1}{4186} = P \cdot t \frac{1}{4186}$$

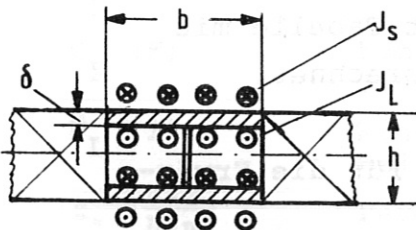
$$\text{da} \quad R = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad ; \quad G = A \cdot l \cdot \gamma \quad \text{ist,}$$

ergibt sich durch Umformung

$$\Delta\vartheta_L = \frac{J_L^2 \cdot t_L}{A_L^2 \cdot \kappa_L \cdot \gamma_L \cdot 4,18 \cdot C_L}$$

Darin bedeuten

$\Delta \vartheta_L$	[°C]	Temperaturerhöhung der Lötstelle
J_L	[A]	Strom im Lötteil
$t_L = 7$	[sec]	Lötzeit
$A_L = b \cdot \delta$	[mm ²]	Lötquerschnitt, in dem der Lötstrom J_L fließt
$\kappa_L = 56$	$[\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}]$	elektr. Leitfähigkeit des Lötteiles
$\gamma_L = 8,9$	$[\frac{kg}{dm^3}]$	spez. Gewicht des Lötteiles
$c_L = 0,092$	$[\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C}]$	spez. Wärme des Lötteiles
$h = 18$	[mm]	Breite und Höhe des Lötteiles
$b = 20$	[mm]	Querschnittsbreite, in der der Lötstrom J_L fließt
$\delta = 1$	[mm]	Querschnittstiefe, in der der Lötstrom J_L fließt (Eindringtiefe) bei 10 kHz, $\vartheta > 100^\circ C$



J_s (Strom im sek. Transformator-kreis)

J_L (Gesamtstrom im Lötteil)

$$t = \frac{h}{2} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \delta$$

Die Löttemperatur ergibt sich zu:

$$J_p = U_p \cdot \omega_0 \cdot C_p = 420 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^4 \cdot 6.5 \cdot 10^{-6} = 171 \text{ A}$$

$$J_{s_{th}} = J_p \cdot \ddot{U}_T = 171 \cdot 6 = 1029 \text{ A} \quad (\text{errechnet})$$

$$J_{s_{ge}} = 890 \text{ A} \quad (\text{gemessen})$$

Kopplungsfaktor des Transformators

$$K_T = \frac{J_{s_{ge}}}{J_{s_{th}}} = \frac{890}{1029} = 0,86$$

Kopplungsfaktor des Lötinduktors $K_L = 0,7$ geschätzt.

Damit wird:

$$J_L = U_L \cdot U_p \cdot \sqrt{\frac{C_p}{L_{sl}}} = 4 \cdot 420 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-6}}} = 4283 \text{ A}$$

Kopplungsfaktor $K = 1$

$$J_{L_K} = J_L \cdot K_T \cdot K_L = 4283 \cdot 0,86 \cdot 0,7 = 2578 \text{ A}$$

$K = 0,7$

Für $f_0 = 10 \text{ kHz}$ und wenn das Lötteil erwärmt ist, wird $\delta = 1 \text{ mm}$ (statt $0,7 \text{ mm}$).

$$A_L = b \cdot \delta = 20 \cdot 1 = 20 \text{ mm}^2$$

Die Erwärmung der Lötstelle ergibt sich dann zu

$$\Delta \vartheta_L = \frac{J_{L_K}^2 \cdot t}{A^2 \cdot \kappa_L \cdot \gamma_L \cdot 4,18 \cdot C_L} = \frac{2578^2 \cdot 7}{20^2 \cdot 56 \cdot 8,9 \cdot 4,18 \cdot 0,092}$$

$$\Delta \vartheta_L = 600 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{für } \delta = 1 \text{ mm angenommen}$$

$$\Delta \vartheta_L = 1342 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{für } \delta = 0,67 \text{ mm laut Tabelle mit } \kappa_L = 56 \text{ [S] gerechnet.}$$

Zusammenfassend sind folgende Gleichungen für die Erwärmung der Lötstelle zu berücksichtigen:

Eindringtiefe

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f \cdot \kappa}}$$

$$J_L = \ddot{U}_L \cdot U_p \cdot \sqrt{\frac{C_p}{L_{sl}}} = \ddot{U}_L \cdot \ddot{U}_T \cdot U_p \cdot C_p \cdot \omega_0$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\ddot{U}_T^2 \cdot L_{sl} \cdot C_p}}$$

$$A_L = \delta \cdot b$$

$$J_{LK} = J_L \cdot K_T \cdot K_L$$

$$\Delta \mathcal{J}_L = \frac{J_L^2 \cdot t_L \cdot K_T^2 \cdot K_L^2}{A_L^2 \cdot \mu_L \cdot \gamma_L \cdot 4,18 \cdot C_L}$$

$$\Delta \mathcal{J}_L = \frac{C_p}{L_{s1}} \cdot \dot{U}_L^2 \cdot U_p^2 \cdot \frac{t_L \cdot K_T^2 \cdot K_L^2}{\delta^2 \cdot l^2 \cdot \mu_L \cdot \gamma_L \cdot 4,18 \cdot C_L}$$

$$\Delta \mathcal{J}_L = 0,7516 \cdot f \cdot U_p^2 \cdot C_p \cdot \dot{U}_L^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{t_L \cdot K_T^2 \cdot K_L^2}{L_{s1} \cdot b^2 \cdot \gamma_L \cdot C_L}$$

Hierin bedeuten:

- | | |
|---|--|
| f [Hz] | Lötfrequenz in dem Beispiel 10 kHz |
| U_p [V] | Primärspannung in dem Beispiel 420 V |
| C_p [F] | Kapazität des Kompensationskondensators
in dem Beispiel $6,5 \cdot 10^{-6}$ F |
| \dot{U}_L [l] | Windungszahl des Lötinduktors in dem
Beispiel 4 |
| μ_0 [$\frac{V \cdot S}{A \cdot m}$] | Permeabilität $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{VS}{Am}$ |
| μ [l] | relative Permeabilität des Lötteils für
Kupfer ist $\mu = 1$ |
| t_L [s] | Lötzeit in unserem Beispiel 7 sec. |
| K_T [l] | Transformator-Kopplungsfaktor in unserem
Beispiel $K_T = 0,86$ |
| K_L [l] | Lötinduktor-Kopplungsfaktor in unserem
Beispiel $K_L = 0,7$ |
| L_{s1} [H] | Induktivität des sek. Transformatorkreises
$1 \cdot 10^{-6}$ H |

- b [mm] Breite am Lötteil, in dem der Lötstrom J_L fließt (ca. Induktorbreite) in unserem Beispiel $b = 20 \text{ mm}$
- γ_L [$\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$] spez. Gewicht für Kupfer $\gamma_L = 8,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$
- C_L [$\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$] spez. Wärme für Kupfer $C_L = 0,092 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$
- $\Delta\vartheta_L$ [$^\circ\text{C}$] Übertemperatur im Kupferring, in dem der Lötstrom J_L fließt.

7.) Schlußfolgerung:

Zum Löten mit $400 \text{ }^\circ\text{C}$ Lot ist pro cm^2 Induktor-Spiegelstromfläche

$$A = \delta \cdot b = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ cm}^2$$

eine Leistung von

$$P = U_G \cdot J_G = 420 \cdot 30 = 12,6 \text{ kW}$$

$$K_{\text{Lötstelle}} = \frac{U_G \cdot J_G}{A \cdot \dot{U}_L} = \frac{420 \cdot 30}{0,2 \cdot 4} = 16 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$$

erforderlich. Diese im Lötteil eingekoppelte Leistung kann bei sehr guter Anpassung der Lötinduktoren an das Lötteil bei $f = 1 \text{ kHz}$ auf $0,5 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$ und bei $f = 10 \text{ kHz}$ auf $30 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$ erhöht werden (bezogen auf $\dot{U}_L = 1$).

Im Resonanzfall ist die vom Generator gelieferte Leistung eine reine Wirkleistung. Die theoretische Rechnung ($600 \text{ }^\circ\text{C}$) und die in der Praxis erreichte Temperatur ($400 \text{ }^\circ\text{C}$) weichen voneinander ab. Eine genauere Rechnung ist aber sehr schwierig, vor allem, weil die Koppelfaktoren und die Wärmeverluste nicht bekannt sind.

Die beim Löten ($\Delta\vartheta_{ge} = 400^{\circ} \text{C}$) vom Generator abgegebene Leistung betrug

$$P = U_G \cdot J_G = 420 \cdot 30 = 12,6 \text{ kW}$$

Wenn man annimmt, daß diese Leistung das Lotvolumen von ($b = 20 \text{ mm}$, angenommen für 400°C eine Länge von 30 mm)

$$V = A \cdot l = 18^2 \cdot 30 = 9720 \text{ mm}^3$$

in 7 sec erwärmt, ergibt sich nach Gleichung 6.1; Seite 8 folgende Temperatur:

$$G = V \cdot \gamma = 0,18^2 \cdot 0,3 \cdot 8,9 = 0,0865 \text{ kg}$$

$$\Delta\vartheta_{the} = \frac{P \cdot t}{4186 \cdot C \cdot G} = \frac{12600 \cdot 7}{4186 \cdot 0,093 \cdot 0,0865} = 2619 [^{\circ}\text{C}]$$

Das Abfließen der Wärme nach den Seiten und Wärmestrahlung wird dabei vernachlässigt.

Dabei ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von

$$\eta = \frac{\Delta\vartheta_{ge}}{\Delta\vartheta_{the}} = \frac{400}{2619} = 0,153 \hat{=} 15,3 \%$$

Für die z.Zt. im Bau befindlichen Tokamaks sind Lötquerschnitte von ca. $20 \times 80 = 1600 \text{ mm}^2$ erforderlich. Nach unseren Kenntnissen reichen dafür Lötanlagen von $150 \div 200 \text{ kW}$ aus. Die Lötzeit beträgt etwa 40 sec. Wegen der längeren Zuleitung vom Transformator-Ausgang zum Lötobjekt (größere Induktivität), ist eine größere Kompensationsanlage vorzusehen (größere Kapazität).

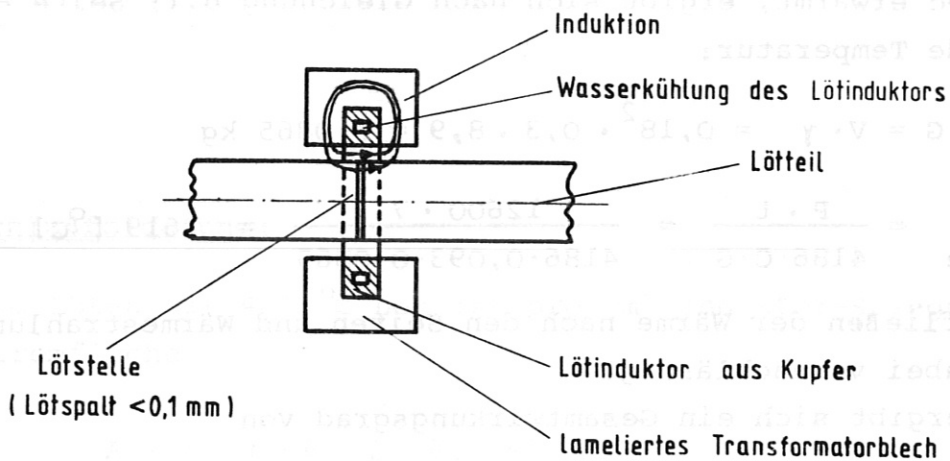
Wenn die Kompensationskapazität mit dem gleichen Faktor zunimmt wie die Induktivität des Transformatorsekundärkreises, dann ändert sich der zur Verfügung stehende Lötstrom nicht. Damit jedoch die Resonanzfrequenz

von 10 kHz eingehalten werden kann, muß das Transformatorübersetzungsverhältnis geändert werden.

$$J_L = \dot{U}_L \cdot \dot{U}_T \cdot U_P \cdot C_P \sqrt{\frac{1}{C_P \cdot \dot{U}_T^2 \cdot L_{S1}}} = \dot{U}_L \cdot U_P \sqrt{\frac{C_P}{L_{S1}}}$$

ω_0

Der Lötinduktorwirkungsgrad kann durch Anordnung von Transformatorbleche um den Induktor erhöht werden.



Ich danke Herrn Berger, Herrn Sahner und Herrn Wagner für ihre konstruktive Mitarbeit.

Anhang

Hierin bedeuten:

Index L	Löten
Index P	Primär
Index S	Sekundär
'	Sek. Werte des Transformators auf Primärseite umgerechnet
G	Generator
1	Transformator sek.Seite
2	Lötinduktorseite
K	Kopplungsfaktor

A [mm ²]	Leiterquerschnitt
b [mm]	Breite am Lötteil, in dem der Lötstrom fließt
C [F]	Kapazität
C [$\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$]	spez. Wärme
d [mm]	Durchmesser
e [V]	Induzierte Spannung (EMK)
f [Hz]	Frequenz (o bedeutet Resonanz)
F [kp]	Zugkraft
G [kg]	Gewicht
h [mm]	Seitenlänge des Lötquerschnitts
J [A]	Strom im Leiter
j [l]	Imaginäre Einheit
j _s [$\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$]	Stromdichte
k [l]	Kopplungsfaktor

l	[m]	Länge des Leiters
l_F	[mm]	Länge der Scherfläche
L	[H]	Induktivität
M	[H]	Koppelinduktivität
n	[1]	Windungszahl
P	[W]	Leistung, die im Leiter erzeugt wird
Q	[kcal]	Wärmemenge
R	[Ω]	ohm. Widerstand des Leiters
t	[s]	Zeit, in der der Strom J fließt
\ddot{U}	[1]	Übersetzungsverhältnis
U	[V]	Spannung, die den Strom J zum Fließen bringt
X_C	[Ω]	Kapazitiver Blindwiderstand
X_L	[Ω]	induktiver Blindwiderstand
η	[S]	Leitwertvektor (komplexe Zahl)
ζ	[Ω]	Widerstandsvektor (komplexe Zahl)
γ	[$\frac{kg}{dm^3}$]	spez. Gewicht des Leiters
δ	[mm]	Eindringtiefe

η	[1]	Wirkungsgrad
$\Delta\vartheta$	[°C]	Erwärmung des Leiters
κ	$\left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right]$	od [S] Leitfähigkeit des Leiters
μ	[1]	Materialpermeabilität
μ_0	$\left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right]$	Permeabilitätskonstante
σ	$\left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right]$	Zugfestigkeit
τ	$\left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \right]$	Scherfestigkeit
ω	$\left[\frac{1}{\text{s}} \right]$	Kreisfrequenz (o bedeutet Resonanz)