

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 42 (1951)  
**Heft:** 15

**Artikel:** Anpassungsproblem, Wirkungsgrad und neue Anwendungen der Hochfrequenzheizung  
**Autor:** Wälchli, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056876>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN

## DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

### Anpassungsproblem, Wirkungsgrad und neue Anwendungen der Hochfrequenzheizung

Von R. Wälchli, Zürich

621.364.15

*Es wird eine einfache Formel für den Wirkungsgrad der induktiven Erwärmung von Metallen entwickelt und die Anpassung des Arbeitsstückes an den Generator rechnerisch dargestellt. An Hand dieser Formel werden die Einflüsse verschiedener Faktoren diskutiert, die das Dimensionieren der Arbeitsspulen erleichtern. Sodann werden einige neue Anwendungen auf dem induktiven wie auch auf dem kapazitiven Gebiet beschrieben.*

*Etablissement d'une formule simple pour la détermination du rendement de l'échauffement de métaux par induction et exposé du calcul de l'adaptation de la pièce à traiter avec le générateur à haute fréquence. A l'aide de cette formule, les influences des divers facteurs, qui facilitent le dimensionnement des bobines de travail, sont discutées. Description de quelques nouvelles applications dans le domaine inductif et dans le domaine capacitif.*

#### Anpassung des Werkstückes an den Generator bei induktiver Erwärmung

Denken wir uns ein zylindrisches Werkstück, das von der Heizspule, der sog. Arbeitsspule, umgeben ist. Diese Arbeitsspule wird mit den Anschlussklemmen eines Hochfrequenzgenerators in Verbindung gebracht, welcher darin ein wechselndes magnetisches Feld erzeugt. Damit werden im Werkstück Ströme erzeugt, die ihrerseits dem primären, erzeugenden Feld entgegenwirken. Als einfaches Beispiel dieses Systems diene der allgemein bekannte Transformator. In diesem entspricht der Arbeitsspule die Primärwicklung, dem Arbeitsstück selber die kurz geschlossene Sekundärwicklung. Auf dieser Grundlage ist es möglich, relativ einfache Berechnungsarten für die Anpassung und für den Wirkungsgrad zu erhalten. Diese Berechnungen haben bei genügender Vereinfachung den Nachteil, dass die Resultate nicht absolut genau sind. Sie sind aber genügend genau, um in der Praxis angewendet zu werden. Ferner gewährt uns dieser Vergleich auf einfache Art einen Einblick in die Energieumwandlung und zeigt, mit welchen Mitteln sie beeinflusst werden kann.

Die Hochfrequenzenergie hat die bekannte Eigenschaft, an der Oberfläche des Leiters sich zu konzentrieren. Die Stromverteilung in einem Leiter, die an der Oberfläche am grössten ist, um dann gegen die Mitte exponentiell abzufallen, kann nach der bekannten Gleichung berechnet werden:

$$S_x = S_0 \cdot e^{-\frac{x}{p}}$$

$S_0$  ist die Stromdichte an der Oberfläche des Leiters,  $S_x$  die Stromdichte im Abstand  $x$  von der Oberfläche und  $p$  die sog. Eindringtiefe des Stromes. Setzen wir  $x = p$ , so wird die Stromdichte im Abstände  $p$  von der Oberfläche gleich  $\frac{S_0}{e}$ . Die Stromdichte ist auf den  $e$ -ten Teil der Oberflächenstromdichte gesunken und beträgt noch ca. 36,8%. In

der äussersten Schicht eines Leiters von der Dicke  $p$  werden etwa 86% der Gesamtwärme erzeugt. Die Eindringtiefe  $p$  (mm) ist abhängig von der Frequenz  $f$  (Hz) der relativen Permeabilität  $\mu_r$  und dem spezifischen Widerstand  $\rho$  ( $\Omega\text{cm}$ ) des Arbeitsstückes. Sie kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$p = 50\,330 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \text{ mm} \quad (1)$$

Die Eindringtiefe ist eine sehr bequeme Rechnungsgrösse. Multipliziert man sie mit der Stromdichte  $S_0$  an der Oberfläche, so erhält man den Gesamtstrom, der durch den Leiter fliesst.

Nehmen wir für die weitere Berechnung an, dass der Gesamtstrom in dieser dünnen Aussenschicht konzentriert ist. Mit Hilfe dieser Vereinfachung wird es uns möglich, den Hochfrequenzwiderstand eines massiven Arbeitsstückes einfach zu berechnen. Das Arbeitsstück sei ein Zylinder mit einem Durchmesser von  $d$  cm und einer Höhe von  $h$  cm. Der Widerstand des Arbeitsstückes beträgt dann:

$$R_2 = \rho \frac{\pi d}{p h} \quad (2)$$

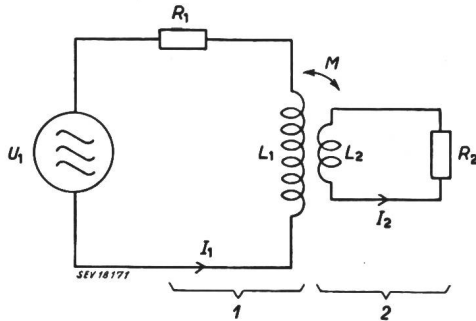
Aus dieser Formel erkennt man, dass der Hochfrequenzwiderstand des Werkstückes solange gleich bleibt, als das Werkstück seine Aussenmasse proportional verändert. Diese Erkenntnis ist besonders für den Praktiker wichtig, denn sie ermöglicht, dass bei einem Wechsel der Arbeitsspule der Generator nicht neu abgestimmt werden muss.

Das Arbeitsstück hat aber nicht nur einen Ohmschen Widerstand  $R_2$ , sondern auch eine Selbstinduktion  $L_2$ . Die Selbstinduktion wird nach folgender Formel berechnet:

$$\begin{aligned} L_2 &= 0,4 \pi \mu \cdot \frac{A}{l} w^2 \cdot 10^{-8} \\ &= 0,4 \pi \mu \frac{\pi d^2}{4 h} w^2 k \cdot 10^{-8} \text{ H} \end{aligned} \quad (3)$$

worin  $l$  Länge der Spule,  $A$  Fläche,  $w$  Windungszahl,  $k$  Korrekturfaktor bedeuten.

Die Sekundärwicklung mit einer Selbstinduktion  $L_2$  und einem Widerstand  $R_2$  ist durch die Gegeninduktivität  $M$  an die primäre Spule angekoppelt.



Prinzipschaltung der Hochfrequenzheizung

$U_1$  Spannung;  $I_1, I_2$  Ströme;  $R_1, R_2$  Widerstände;  $L_1, L_2$  Induktivitäten; 1 Arbeitsspule; 2 Werkstück

Fig. 1 stellt das Schaltschema einer Hochfrequenz-Heizanordnung dar. Daraus kann folgendes abgeleitet werden:

$$I_1 (R_1 + j\omega L_1) + I_2 \cdot j\omega M = U_1$$

$$I_2 (R_2 + j\omega L_2) + I_1 \cdot j\omega M = 0$$

$$I_2 = -I_1 \cdot \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2}$$

$$I_1 \left( R_1 + j\omega L_1 - \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} \cdot j\omega M \right) = U_1$$

$$\frac{U_1}{I_1} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} = Z$$

$Z$  ist die Impedanz an den Ausgangsklemmen des Generators. Wird der Nenner in der Gleichung durch Multiplikation mit  $(R_2 - j\omega L_2)$  reell gestaltet, so erhält man:

$$Z = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} (R_2 - j\omega L_2)$$

$$Z = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j\omega \left( L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right) \quad (4)$$

Aus Gl. 4 ist ersichtlich, dass die Primärimpedanz der Arbeitsspule durch die Anwesenheit eines Werkstückes ( $R_2$ ) vergrößert wird, währenddem die Induktivität abnimmt. Durch Einführung des Stromübersetzungsverhältnisses  $n^2 = \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$  ist dies noch besser ersichtlich:

$$Z = R_1 + n^2 R_2 + j\omega (L_1 - n^2 L_2)$$

oder  $Z = R_1' + j\omega L_1'$

Zur Anpassung der Impedanz an die Generator-

röhre muss deren günstigster Aussenwiderstand  $R_a$  bekannt sein. Dieser ist den Röhrendaten zu entnehmen. Die Röhre liefert die Wirkleistung, während der Schwingkreis die nötige Blindleistung aufbringen muss. Aus der Resonanzbedingung, der Wahl der Frequenz und der Bedingung, dass der Qualitätsfaktor der Spule  $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1}$  zwischen

10 und 100 liegen muss, ist der Schwingkreis zu bemessen.  $R_1'$  kann mit einem  $Q$ -Meter gemessen werden, sofern die Arbeitsspule aus praktischen Erfahrungen heraus schon einigermaßen richtig bemessen worden ist. Rechnerisch kann es aus der bekannten Beziehung  $R_1 = \frac{R_a}{Q_1^2}$  festgestellt werden.

$R_1$  ist hier ebenfalls leicht zu messen und  $R_2$  zu berechnen, wie wir bereits gesehen haben.  $R_1$  ist möglichst klein gegenüber  $n^2 R_2$  zu halten.

Es bleibt noch die Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses  $n^2$  übrig. Wie wir später sehen werden, kann für die Praxis mit grosser Annäherung angenommen werden, dass

$$n^2 = \frac{\kappa^2 L_1}{L_2} = \frac{h'}{H} \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2}$$

wobei  $w_1$  und  $w_2$  die Windungszahlen der Arbeitsspule bzw. des Werkstückes,  $\kappa$  den Kopplungsfaktor,  $h'$  eine reduzierte Höhe des Werkstückes und  $H$  die Höhe der Arbeitsspule bedeuten. Da das Arbeitsstück gewöhnlich aus massivem Material besteht, wird  $w_2 = 1$ . Übersteigt die Höhe des Arbeitsstückes die Arbeitsspule, was meistens der Fall ist, so können wir auch hier mit für die Praxis genügender Genauigkeit  $\frac{h'}{H} = 1$  setzen. (Für andere

Werte von  $h'$  vergleiche die Ausführungen unter Wirkungsgrad der Arbeitsspule.) Somit kann auch die Windungszahl  $w_1$  der Arbeitsspule für eine gute Anpassung leicht ausgerechnet werden. Sind Spulen für einige Arbeitsstücke einmal berechnet worden, so wird der Praktiker bald die nötige Fertigkeit besitzen, Spulen für eine korrekte Anpassung zu bemessen. Auch empirische Versuche mit verschiedenen Spulen werden nach und nach zum Ziele führen. Weder die rechnerische noch die experimentelle Methode allein erlauben eine einwandfreie Anpassung der Arbeitsspulen. Werden beide Methoden angewendet, indem zuerst theoretisch die Masse der Spule berechnet, und nachher einige Versuche durchgeführt werden, so gelangt man am schnellsten zum Ziel.

### Wirkungsgrad der Arbeitsspule

Wenn mit  $P_2$  die Nutzleistung in Form von Wärme im Arbeitsstück bezeichnet wird, und mit  $P_1$  die Verlustleistung, die die Primärseite des Transformators aufnimmt, so beträgt der Wir-

kungsgrad  $\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2}$ . Sofern man  $P_1$  und  $P_2$  weiter entwickelt, erhält man:

$$P_2 = I_2^2 R_2 = n^2 I_1^2 R_2$$

$$\eta = \frac{n^2 R_2}{R_1 + n^2 R_2} = \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{n^2} + 1}$$

Der Qualitätsfaktor des Sekundärkreises beträgt  $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$ ; wenn man diesen Wert in das Übersetzungsverhältnis  $n^2 = \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$  einführt, so erhält man

$$n^2 = \frac{Q_2^2}{1 + Q_2^2} \cdot \frac{M^2}{L_2^2}$$

Der Ausdruck  $\frac{Q_2^2}{1 + Q_2^2}$  kann graphisch dargestellt werden. Aus Fig. 2 sieht man, dass dieser Ausdruck

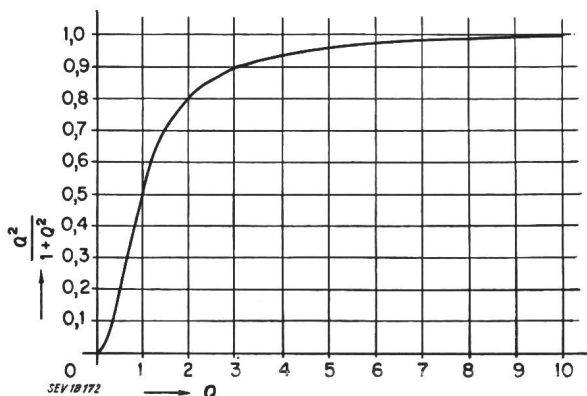


Fig. 2  
Darstellung der Funktion  $\frac{Q^2}{1 + Q^2}$

mit grösser werdendem  $Q_2$  sich rasch der Einheit nähert [1]<sup>1)</sup>. Da in der Praxis der hochfrequenten Erhitzung  $\omega L_2 \gg R_2$  ist, so ist auch  $Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$  gross und somit der Ausdruck  $\frac{Q_2^2}{1 + Q_2^2} \approx 1$ . Es ist das Übersetzungsverhältnis

$$n^2 = \frac{M^2}{L_2^2} = \frac{\kappa^2 L_1}{L_2}$$

und der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{L_2}{\kappa^2 L_1} + 1} \tag{5}$$

Betrachten wir den Nenner der Gl. (5) etwas genauer: Im Interesse eines grossen Wirkungsgrades sollte dieser möglichst klein sein. Dies ist nur durch Verkleinerung des Ausdruckes:

$$\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{L_2}{\kappa^2 L_1}$$

möglich. Der Primärwiderstand  $R_1$  kann durch die

<sup>1)</sup> siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

Verwendung von geeignetem Material, z. B. Kupfer mit Wasserkühlung, niedrig gehalten werden.  $R_2$  ist durch das Arbeitsstück gegeben. Ist sein Widerstand gross, so steigt auch der Wirkungsgrad. Im weiteren ist die Kopplung zwischen Arbeitsstück und Arbeitsspule möglichst eng zu gestalten, um ein grosses  $\kappa$  zu erhalten.  $\frac{L_2}{L_1}$  soll möglichst klein bleiben, was durch Vermeidung unnötiger Induktivitäten bei der Arbeitsspule oder deren Zuführungen möglich wird. Die richtige Ausführung einer Arbeitsspule zeigt Fig. 3b.

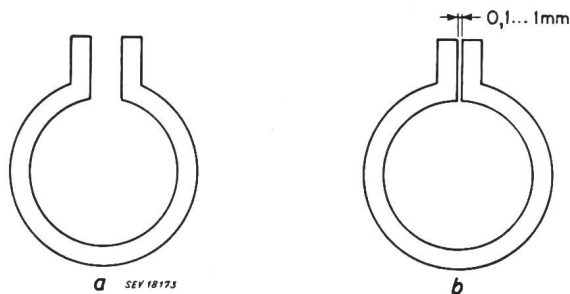


Fig. 3

Richtige und falsche Ausführung von Arbeitsspulen  
a falsche Ausführung; grosse Induktivität der Zuführungen  
b richtige Ausführung; kleine Induktivität der Zuführungen

Der Wirkungsgrad scheint von der Frequenz unabhängig zu sein. Dies ist richtig, solange die Ausmasse des Werkstückes ein bestimmtes Minimum nicht unterschreiten. Wir sind von der Annahme ausgegangen, dass wir den Gesamtstrom auf eine dünne Aussenschicht von der Dicke  $p$  konzentrieren dürfen. Die Eindringtiefe  $p$  ist aber frequenzabhängig. Sie wird um so kleiner, je höher die Frequenz ist. Um möglichst viel Energie in das Werkstück übertragen zu können, sollte dessen Durchmesser mindestens 5...8mal grösser als die Eindringtiefe sein [2]. Ist der Werkstückdurchmesser 10- und mehr mal grösser, so kann der Fehler im Wirkungsgrad vernachlässigt werden. Liegt der Durchmesser unter dem 10fachen und nähert er sich der 5fachen Eindringtiefe, so kann der Fehler einige Prozent des gerechneten Wirkungsgrades betragen. Der Durchmesser des Werkstückes sollte die 5fache Eindringtiefe möglichst nie unterschreiten.

Es seien noch die Grössen  $\frac{R_1}{R_2}$  und  $\frac{L_2}{\kappa^2 L_1}$  für praktische Fälle etwas näher untersucht: Die Arbeitsspule (Fig. 4) soll aus einer einzigen Windung bestehen. Das Verhältnis der Widerstände  $\frac{R_1}{R_2}$  beträgt unter Berücksichtigung von Gl. (2)

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_1 p_2 D h}{\rho_2 p_1 d H}$$

Sofern die Höhe des Arbeitsstückes  $h$  die Höhe der Arbeitsspule  $H$  übersteigt (z. B. eine Eisenstange in der Arbeitsspule) oder sie mindestens erreicht, können wir für die Praxis mit genügender Genauig-

keit  $\frac{h}{H} = 1$  setzen. Da die Permeabilität der Arbeitsspule  $\mu_1 = 1$  ist (Kupfer), dürfen wir mit Hilfe von Gl. (1) schreiben:

$$\frac{R_1}{R_2} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}} \cdot \frac{D}{d} \quad (6)$$

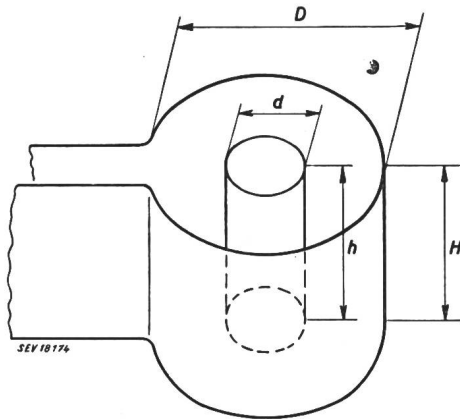


Fig. 4  
Arbeitsspule mit Arbeitsstück  
D, d Durchmesser; H, h Höhen

Der Kopplungsfaktor beträgt für 2 lange konzentrische Spulen:  $\kappa = \frac{d}{D} \sqrt{\frac{h}{H}}$  [3]. Für kurze Spulen

beträgt er  $\kappa = \frac{d}{D} \sqrt{\frac{h'}{H}}$ , wobei  $h'$  eine reduzierte Höhe darstellt. Diese ist in erster Annäherung für

$$\frac{h}{H} = 1:$$

$$h' = \sqrt{H^2 + \frac{D^2}{4}} - \frac{D}{2}$$

Wenn  $h$  grösser ist als  $H$ , so ist für  $\frac{h'}{H}$  die Zahl 1

zu setzen. Wenn wir diese Werte und ebenso diejenigen der Gl. (3) für  $L_2$  und  $L_1$  einsetzen, so erhalten wir:

$$\frac{L_2}{\kappa^2 L_1} = \frac{H}{h'} \quad (7)$$

Durch Einsetzen von (6) und (7) in (5) erhalten wir:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2} \cdot \frac{D H}{d h'} + 1}} \quad (8)$$

Im Interesse eines guten Wirkungsgrades sollten folgende Faktoren berücksichtigt werden:

a) Die Permeabilität des Werkstückes  $\mu_2$  liegt bei Stahl, unter Berücksichtigung der sehr hohen Feldstärken, die bei der Hochfrequenzheizung zur Anwendung gelangen und das Material sättigen, zwischen 10 und 50. Über dem Curiepunkt (für Stahl bei ca. 770 °C) wird  $\mu_2 = 1$ . Will man das Werkstück höher erwärmen, so muss die Spule so angepasst werden, dass sie für  $\mu = 1$  oder einen Zwischenwert von  $\mu$  im kalten und warmen Zustand richtig ist.

b)  $D/d$  ist möglichst klein zu halten. Dies kann auf zwei Arten geschehen: Entweder wählt man die beiden Durchmesser

so gross, dass das Verhältnis nahe bei 1 liegt, oder bei kleinen Durchmessern muss der Zwischenraum zwischen Arbeitsspule und Arbeitsstück auf ein Minimum reduziert werden (0,1 bis 1 mm).

c) Die Höhe der Arbeitsspule  $H$  ist so an die Höhe des Arbeitsstückes  $h$  anzupassen, dass womöglich  $\frac{H}{h} \leq 1$  ist.

d) Der spezifische Widerstand  $\rho_1$  der Arbeitsspule muss klein sein. Dies erreicht man durch Verwendung von wassergekühlten Kupferspulen.

e) Je grösser der spezifische Widerstand des Werkstückes  $\rho_2$  gegenüber dem spezifischen Widerstand der Arbeitsspule  $\rho_1$  ist, um so besser wird der Wirkungsgrad der Hochfrequenz-Erheizung.

An Hand eines *Beispiels* sei nun der Wirkungsgrad einer Arbeitsspule berechnet:

Eine Eisenstange mit einem Durchmesser von 1 cm und von einigen Metern Länge soll im Vorschubverfahren erwärmt werden. Der Innendurchmesser der Arbeitsspule betrage 1,4 cm. Wie gross ist der Wirkungsgrad der Arbeitsspule

1. im kalten Zustand der Eisenstange,
2. nachdem sie den Curiepunkt überschritten hat?

Da das Arbeitsstück viel länger ist als die Arbeitsspule, kann man  $\frac{h'}{H} = 1$  setzen.

Angaben:

Spezifischer Widerstand der Arbeitsspule (Kupfer) $\rho_1$	=	0,0175 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Spezifischer Widerstand des Werkstückes (Eisenstange, kalt) $\rho_2$	=	0,12 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Spezifischer Widerstand des Werkstückes $\rho_2$ bei 800 °C	=	1,15 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Permeabilität der Eisenstange im kalten Zustand $\mu_2$	=	20

Damit wird der Wirkungsgrad im kalten Zustand des Werkstückes:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\frac{0,0175}{0,12 \cdot 20} \cdot \frac{1,4}{1} + 1}} = \underline{89,5\%}$$

und bei 800 °C

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\frac{0,0175}{1,15} \cdot \frac{1,4}{1} + 1}} = \underline{85,5\%}$$

Bei engerer Kopplung kann der Wirkungsgrad bis auf etwa 96 % steigen. Will man Kupfer erwärmen, so ist der theoretisch erreichbare maximale Wirkungsgrad zu Beginn der Heizperiode 50%. Während des Erwärmens steigt er etwas infolge Abnahme der Leitfähigkeit des Kupfers bei höheren Temperaturen. Die praktischen Wirkungsgrade betragen 42% bzw. 61%.

### Neue Anwendungen auf dem induktiven Gebiet

Die Hochfrequenzheizung darf nicht als Allheilmittel für die Lösung von Problemen angesehen werden, die bisher mit anderen Methoden gar nicht oder nur unbefriedigend gelöst werden konnten. Diese Auffassung kann zu empfindlichen Enttäuschungen führen. Bei der richtigen Anwendung dieser Methode aber kann bedeutend mehr geleistet werden als mit anderen Verfahren.

Der HF-Generator allein darf nur als Energiequelle betrachtet werden. Erst die Anschaltung geeigneter Apparate ermöglicht die richtige Lösung



der Aufgaben, was die folgenden Beispiele zeigen sollen.

Zum Härten von Stahl ist eine sehr hohe Energiedichte nötig, die nur erreicht werden kann, wenn die Arbeitsspule sehr gut dem Generator und dem Werkstück angepasst, ferner ein entsprechender Transformator zwischengeschaltet wird. Die Arbeitsspule sollte der Form des Arbeitsstückes genauestens angepasst werden. Das Anschliessen und das Auswechseln der Geräte und der Spulen bedingt speziell konstruierte Anschlüsse, um Zeit- und Kühlwasserverluste zu vermeiden, ferner um zu diesen Manipulationen keine Werkzeuge zu gebrauchen. Die metallverarbeitende Industrie verdankt ihre Erfolge zum grossen Teil der Präzision. Genauigkeiten von 0,1 mm und weniger sind übliche Anforderungen. Werkstücke, die mit HF-Energie erhitzt werden, müssen wenn immer möglich diese Massgenauigkeiten beibehalten. Dies bedingt jedoch die Anfertigung ebenso genauer Arbeitsspulen. Soll z. B. die Oberfläche einer Welle oder eines Bolzens gehärtet werden, dann ist die Arbeitsspule so genau zu bemessen und zu formen, dass die Kopplung über dem ganzen Umfang zwischen Spule und Arbeitsstück eine möglichst grosse Gleichmässigkeit aufweist und damit eine homogene Erhitzung der Oberfläche bzw. eine gleichmässige Härtung erreicht wird. Eine Standardspule, die auf der Drehbank hergestellt wird, und mit verschiedenen Aufsätzen ausgerüstet werden kann, entspricht diesen Anforderungen am besten (Fig. 5).



Fig. 5

Wassergekühlte Standardspule

hinten: Primärwicklung; vorn: Sekundärwicklung  
Bei Änderung des Werkstückdurchmessers wird nur die rechts sichtbare Platte gewechselt

Die vorgeschriebene Qualität der Härtung wird nur gewährleistet durch eine ständige Temperaturkontrolle. Deshalb wurde für praktische Zwecke ein Vorschubgerät mit Temperaturmessung und -regulierung entwickelt. Bei diesem Apparat kann der Vorschub des Arbeitsstückes automatisch gesteuert und die Härtetemperatur genauestens kontrolliert bzw. eingehalten werden. (Fig. 6).

Eine der jüngsten Anwendungen der HF-Erhitzung ist das Schmelzen des Metalles für Metallspritzen. Bei diesem Verfahren wird das von der HF-Energie geschmolzene Metall durch ein

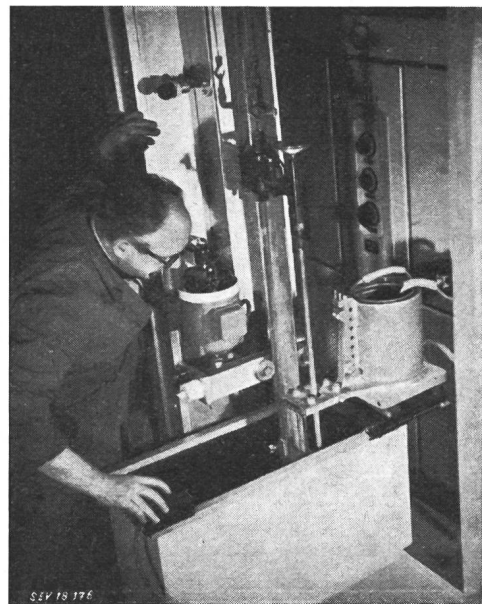


Fig. 6

Härteeinrichtung für automatischen vertikalen Vorschub mit Temperaturkontrolle

Gebläse mit grosser Kraft auf den mit Metall zu überziehenden Gegenstand gespritzt. Das in feinst verteilter Form verspritzte Metall gibt einen gut haftenden und homogenen Überzug. Mit diesem Verfahren können Metalle von höchstem Schmelzpunkt gespritzt werden (Fig. 7).



Fig. 7

Metallspritzeinrichtung

Aus der Erkenntnis heraus, dass die Zusatzeinrichtungen für die induktive HF-Erhitzung von ausschlaggebender Bedeutung sind, wird an der Entwicklung und Verbesserung dieser Geräte dauernd gearbeitet.

**Anwendung der HF-Energie bei kapazitiver Erhitzung**

Es ist aus Raumgründen nicht möglich, hier näher auf die Theorie der Erwärmung und die Anpassungsprobleme der kapazitiven HF-Heizung einzutreten. Die Anwendung der HF-Energie für die Trocknung (z. B. für die Trocknung von Formkernen in der Giesserei), für die Vorwärmung von Kunstharzstoffen, für das Schweißen von Plastikmaterial usw. ist seit einiger Zeit bekannt. Bisher wurde jedoch wenig über die Anwendungen der kapazitiven HF-Heizung in der Holzindustrie veröffentlicht. Es sollen hier einige neue Entwicklungen beschrieben werden:

*a) Herstellung von Spanplatten und fertigen Möbelteilen*

Die Holz verarbeitenden Industrien waren immer bestrebt, Platten und Möbel aus möglichst widerstandsfähigem Material bei gefälligem Aussehen herzustellen. Es ist allgemein bekannt, dass Möbelstücke nicht gut aus Massivholz hergestellt werden können, weil sie sich verziehen oder schrumpfen. Um dem entgegenzuwirken, werden Platten aus einzelnen Schichten derart zusammengeleimt, dass Längenänderungen nicht oder nur beschränkt auftreten können. Die grossen inneren Spannungen, die infolge der Ausdehnung der einzelnen Lagen auftreten, können sich ungünstig auswirken. Eine gewisse Verbesserung bringen die Tischlerplatte, die aus kleineren Elementen aufgebaut und verleimt ist, und die Platten aus mechanisch zerkleinerten und nachher zusammengeleimten Holzteilen. Auch Abfallholz, wie z. B. Hobelspäne, kann für die Plattenherstellung verwendet werden. Zu diesem Verfahren hat man sich die Vorteile der HF-

Fig. 8

Anlage für die Herstellung von Spanplatten  
Die fertigen Platten beim Verlassen der Presse

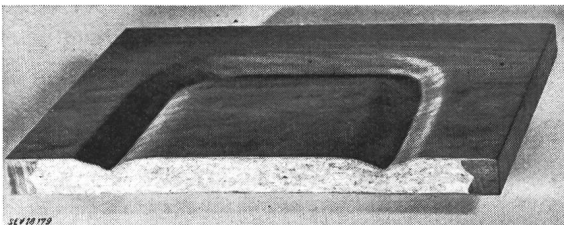


Fig. 9

In einem Arbeitsgang hergestellte profilierte Möbeltüre (Querschnitt)

gangsleistung sind 2 Platten mit Abmessungen von 250 x 130 x 2,5 cm in etwa 12 min verleimt und beidseitig mit Blindfurnieren versehen.

Der Gedanke, das Rohmaterial (Späne oder Fasern) in einem Rahmen zu pressen und in einem Arbeitsgang zu verleimen, ist naheliegend. Zugleich können auf beiden Seiten die nötigen Blind- und Edelfurniere aufgeleimt werden. Durch Kehlen der Rahmen können in einem Arbeitsgang Möbeltüren usw. angefertigt werden. Mit einem ähnlichen Pressvorgang ist es auch möglich, ein Profil in die mit einem Rahmen versehenen Platten zu pressen. Auf

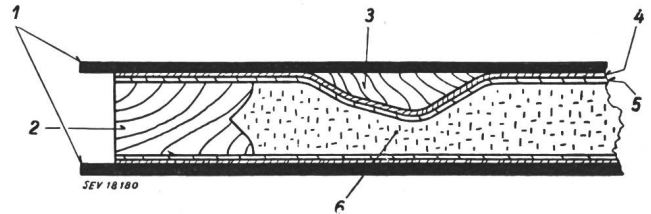


Fig. 10

Anordnung der Elektroden beim Verleimen der profilierten Möbeltüre Fig. 9

- 1 Elektroden; 2 Rahmen; 3 Profilstück; 4 Edelfurnier;
- 5 Blindfurnier; 6 Sägemehl oder zerkleinertes Holz

diese Weise erhält man profilierte Möbelfronten, Türen usw., die nach nur geringer Nachbearbeitung verwendet werden können. Fig. 9 zeigt einen Schnitt



durch eine solche profilierte Türe. Eine Platte mit Abmessungen von 180 x 60 x 2,5 cm ist in 8...10 min verleimt und bereit, weiter bearbeitet zu werden (Schleifen, Beizen, Polieren). Die Elektrodenanordnung zeigt Fig. 10. Die Profile bedingten Einlagen aus Hartholz oder einem wärmebeständigen, nicht leitenden Material. Um das elektrische Feld und somit die Erwärmung homogen zu gestalten, darf die Elektrode nicht den Konturen der Platte folgen, sondern sie muss plan bleiben.

*b) Herstellung von einfachen Möbelstücken aus Sperrholz*

Solange die einzelnen Lagen des Sperrholzes noch nicht miteinander verleimt sind, lassen sie sich fast beliebig formen. Die Kunst dieser Formgebung ist schon lange bekannt, war aber teuer, da man früher dazu elektrisch oder mit Dampf beheizte Stahlmatrizen benötigte. Die Anwendung der HF-Energie ermöglicht den Gebrauch einfacher Holzschablonen, die mit einem elektrisch leitenden Blech

— Elektroden — ausgeschlagen sind. Mit diesem Verfahren werden in der Herstellung von Möbeln grosse Vereinfachungen erreicht. Fig. 11 zeigt einen Lehnstuhl, der in einem Arbeitsgang hergestellt

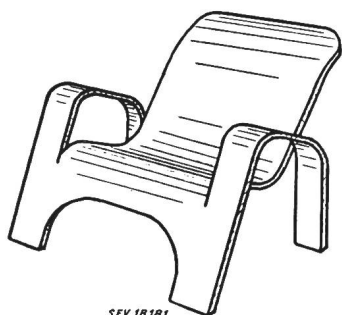


Fig. 11  
Lehnstuhl in einem  
Arbeitsgang gepresst,  
verleimt und gebogen  
Dauer der Erhitzung mit  
6-kW-Generator 9 min

worden ist; das Verleimen, das Biegen und das Trocknen geschieht im selben Arbeitsgang. Dass eine solche Herstellungsart wirtschaftlich ist, braucht nicht besonders hervorgehoben zu werden.

c) HF-Energie als Hilfsmittel beim Verleimen

Fast alle Arten von Verleimungen können mit HF-Energie auf einfache Weise schnell und wirtschaftlich erfolgen. Erfolgt die Verleimung quer zur Leimnaht (Leimschicht parallel zur Elektrodenfläche), dann genügen Zeiten von 2...3 min. Kann die Leimschicht direkt erwärmt werden (Leimschicht senkrecht zur Elektrodenfläche), so sind Zeiten zwischen 20 und 50 s, je nach Grösse der Leimnaht und der zur Verfügung stehenden Leistung für das vollständige Binden des Leimes normal; massgebend ist die schnelle Erreichung der Bindetemperatur. Wie Fig. 12 zeigt, ist die Bindetemperatur in wenigen Sekunden erreicht.

Zum Schluss geben wir noch einige Betriebsangaben, die interessieren dürften:

Zum Verleimen von Sperrholz oder Platten aus Sägespänen oder Fasern benötigt man 0,1...0,05 kWh HF-Energie pro dm<sup>3</sup> Holz, was einer Netz-Energie von 0,2...0,1 kWh pro dm<sup>3</sup> entspricht. Für

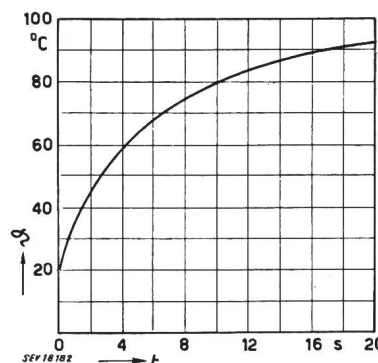


Fig. 12  
Verlauf der Temperatur  $\theta$  in der Leimnaht als Funktion der Zeit t

Feldstärke in der Leimnaht ca. 0,3 kV/cm  
Kunstharzleim-Verbrauch ca. 140 g/m<sup>2</sup>

Fugenverleimung bei normaler Verteilung der Leimfugen benötigt man sogar nur 0,05 kWh pro dm<sup>3</sup>. Wird die Leimschicht direkt erwärmt, so kann je nach Holzart mit 200...500 cm<sup>2</sup> Leimfläche pro Minute und pro kW HF-Energie gerechnet werden.

Literatur

- [1] Whiteman, R. A.: Workcoils for HF-Heating. Radio and Television News Bd. -(1950), Okt.
- [2] Witsenburg, E. C.: Erhitzung durch hochfrequente Felder, I. Induktionsheizung. Philips' techn. Rdsch. Bd. 11, Nr. 6, S. 165...166.
- [3] Kammerloher, J.: Hochfrequenztechnik Bd. I: Elektromagnetische Schwingungskreise. Leipzig.

Adresse des Autors:

R. Wälchli, Dipl. Ing., Scheideggstrasse 86, Zürich 38.

## Methoden zur Bewertung der Beleuchtungsgüte Eine kritische Übersicht

Von A. Dresler, Melbourne

628.93:612.843.6

In den letzten zehn Jahren haben namhafte amerikanische Lichtingenieure versucht, neue Methoden für die Beurteilung der Güte einer Beleuchtungsanlage zu entwickeln und praktisch einzuführen. Obwohl sich manche Einwände gegen die verschiedenen Vorschläge erheben lassen, enthalten sie jedoch so viele bemerkenswerte Anregungen, die bei der Neubearbeitung von Leitsätzen für künstliche Beleuchtung berücksichtigt werden müssen, dass im folgenden versucht wird, die vier wichtigsten Verfahren in ihren Grundzügen zu beschreiben und kritisch zu vergleichen.

**Vorbemerkung.** Im Gegensatz zur rein quantitativen Beurteilung einer Beleuchtungsanlage, z. B. nach der mittleren horizontalen Beleuchtungsstärke und der Gleichmässigkeit der Beleuchtung, hat die Frage nach einer ebenso geeigneten Methode zur zahlenmässigen Bewertung der Beleuchtungsgüte, d. h. also derjenigen Faktoren, die bei gegebenem Beleuchtungsniveau für gute Sehbedingungen sorgen, noch keine befriedigende Lösung gefunden. In den letzten Jahren sind zwar verschiedentlich Vorschläge zu einer zahlenmässigen Erfassung der Beleuchtungsgüte gemacht worden, doch ist man weit davon entfernt, sie widerspruchlos zu akzeptieren oder gar allgemein anzuwenden.

Hieraus ergab sich eine besondere Schwierigkeit für das Komitee, das im Auftrag des Australischen Normenaus-

*Au cours des 10 dernières années des ingénieurs éclairagistes américains réputés ont tenté d'établir de nouvelles méthodes pour estimer la qualité d'une installation d'éclairage. Bien que ces diverses propositions puissent donner lieu à certaines critiques, elles renferment néanmoins maintes suggestions intéressantes, dont il faudra tenir compte lors d'une nouvelle rédaction de recommandations pour l'éclairage électrique. Exposé des principes essentiels et critique des quatre nouveaux procédés les plus importants.*

schusses (Standards Association of Australia) eine Neubearbeitung der im Jahre 1942 veröffentlichten australischen Leitsätze für die künstliche Beleuchtung von Innenräumen vornehmen soll. Im Rahmen der Mitarbeit des australischen Arbeitsministeriums in diesem Komitee hat der Verfasser die wichtigsten der in den letzten Jahren (bis Ende 1949) in Vorschlag gebrachten Methoden der Gütebewertung von Beleuchtungsanlagen einer kritischen Durchsicht unterzogen. Der folgende Aufsatz stellt einen Auszug aus diesem vor kurzem veröffentlichten Bericht<sup>1)</sup> dar.

<sup>1)</sup> Methods of Appraising the Quality of Lighting, a Critical Review by A. Dresler, Department of Labour and National Service, Commonwealth of Australia, 1950.