Zweilagige Induktorspulen

László Koller

Induktorspulen für Induktionserwärmungsanlagen zum Glühen und Schmelzen von Metallen werden jeweils in herkömmlicher Weise aus einem Kupferhohlprofildraht und einlagig gewickelt. Warum sind diese Spulen einlagig und nicht zweilagig? Kann die Verwendung von zweilagigen Spulen irgendwelche Vorteile haben? Sowohl dieser Artikel, als auch [5] geben Antworten auf diese Fragen.

Einleitung

Induktionserwärmungsanlagen zum Glühen und Keramiktiegel-Schmelzen von Metallen gehören zu den größten Verbrauchern von Stromversorgungssystemen. Ihre wassergekühlten, zylindrischen, herkömmlichen Induktorspulen werden immer aus einem Kupferhohlprofildraht und einlagig gewickelt. Es stellt sich die Frage, warum diese Spulen einlagig sind. Auch die Verwendung von einfachen einlagigen Spulen hat Nachteile, wie das Streumagnetfeld durch die Einspeisestromschleife und bei geringeren Windungszahlen die ungünstige Wirkung von schräg im Einsatz fließenden Wirbelströmen [2]. Es ist auch bekannt, dass die mehrlagigen Luftkerndrosselspulen oder Transformatorspulen aus massivem Profildraht deutlich geringere Verlustleistungen aufweisen als die einlagigen [1]. Hat die Anwendung von mehrlagigen Induktorspulen aus Hohldraht auch einen energetischen Vorteil? Wenn nicht, warum nicht, und wie kann das geändert werden? Die Antworten auf diese Fragen wurden durch Untersuchungen im Bereich Glühen und Schmelzen gesucht, die sich auf die am wenigsten komplexen zweilagigen Induktorspulen beschränkten. Für Finite-Elemente-Berechnungen wurden rotationssymmetrische 2D-Modelle von Induktor-Einsatz-Systemen mit für die beiden Technologien typischen Geometrien und Abmessungen erstellt. Die einlagigen und zweilagigen Spulen der zu vergleichenden Modelle waren unterschiedlich, ihre Innendurchmesser, Achsabmessungen und Isolationsdickenabmessungen waren jedoch immer gleich. Induktor-Einsatz-Systeme werden nach zwei Energieparametern bewertet, dem elektrischen Wirkungsgrad von η und der Blindausnutzung von q. Von diesen ist η wichtiger, da die Kosten für Installation und Betrieb der gesamten Erwärmungsanlage (Speisequelle, Kondensatorbatterie und Induktor-Einsatz-System) proportional zu $1/\eta$ sind.

Die elektrischen Parameter der Induktor-Einsatz-Systeme mit herkömmlichen zweilagigen Spulen oder mit neuartigen auf den maximalen Wirkungsgrad optimierten zweilagigen Spulen wurden im Vergleich zu einer optimierten einlagigen herkömmlichen Version bewertet. Bei der Optimierung wurde die radiale Geometrie (Breitenabmessungen) der Windungsdrahtprofile geändert.

Über eine ähnliche Optimierung von einlagigen Spulen der Schmelzöfen wurde in [3] berichtet. Der elektrische Wirkungsgrad wurde nach Formel von

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2}$$

berechnet, wobei P_2 die im Einsatz erzeugte Nutzleistung, und P_1 die Verlustleistung in der Induktorspule sind. Der so berechnete Wirkungsgrad ist höher als der tatsächliche Wert, da in der Formel die in anderen Bauteilen (z. B. Flussleiter) erzeugte Verlustleistung nicht berücksichtigt wurde.

Der andere Energieparameter ist die Blindausnutzung:

$$q = \frac{P_2}{Q}$$

wobei Q die an den Klemmen der Induktorspule gemessene Blindleistung ist.

Dieser Parameter ist weniger wichtig, da nur die Installationskosten der Kondensatorbatterie der Erwärmungsanlage proportional zu $1/q$ sind. Durch Verringerung der radialen Abmessung der Windungsprofile könnte der Wert von q erhöht werden, aber auch der maximale Wirkungsgrad würde verringert. Tatsächlich gibt es kein Optimum für die Blindausnutzung, da sie sich theoretisch nur bei Nullprofilabmessung und Nullwirkungsgrad entwickeln würde [4]. Bei auf maximalen Wirkungsgrad optimierten ein- und zweilagigen Spulen muss der Wert von q daher als gegeben angenommen werden, da er nicht veränderbar ist. Zu beachten ist auch, dass der Wert der Blindausnutzung bei zweilagigen Spulen immer geringer ist (9,1 % beim Glühen und 2,8 % beim Schmelzen nach unseren Untersuchungen).

Die Formel für die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades im Fall ein- und zweilagiger Spule sind wie folgt:

$$\eta_I = \frac{P_{2I}}{P_{1I} + P_{2I}},$$

und

$$\eta_{II} = \frac{P_{2II}}{P_{1II} + P_{2II}} = \frac{P_{2II}}{P_{11II} + P_{12II} + P_{2II}},$$

wobei P_{1I} die Verlustleistung der einlagigen Spule und P_{1II} die Verlustleistung der zweilagigen Spule (P_{11II} ist die der inneren Lage, P_{12II} ist die der äußeren) sind. P_{2I} und P_{2II} sind die Nutzleistungen im Fall der einlagigen und zweilagigen Spule. Um die Wirkungsgrade zu vergleichen, wurde das Parameter

$$\Delta\eta = \eta_{II} - \eta_I$$

eingeleitet.

Bezüglich der Wasserkühlung wurden bei gleicher Nutzleistung (P_{2I}=P_{2II}) die Verlustleistung der zweilagigen Spule mit der einlagigen auf Grund der Formel für die volle Spule

$$\alpha_1 = \frac{P_{1II}}{P_{1I}},$$

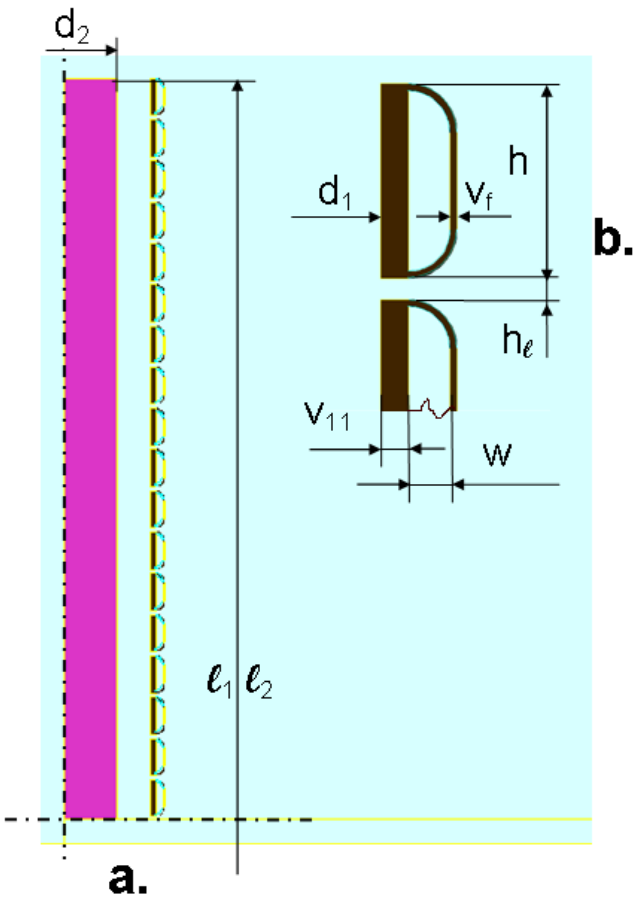

Bild 1: 2D-Modell aktiver Bauteile der Glühanlage mit herkömmlicher einlagiger Spule (**a**: Induktor-Einsatz-System, **b**: Oberwindungsprofile)

und für die innere Lage

$$\alpha_{11} = \frac{P_{11II}}{P_{1I}},$$

sowie für die äußere Lage

$$\alpha_{12} = \frac{P_{12II}}{P_{1I}}$$

verglichen.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen in zwei wichtigen Bereichen des Glühens und Schmelzens werden im zweiten und dritten Kapitel und vorgestellt. Zunächst wurde die Anwendung einer herkömmlichen zweilagigen Spule ausgewertet und der Grund für die Unbrauchbarkeit aufgezeigt. Unter Berücksichtigung dieser und der Ergebnisse in [1] wurden auch zweilagige Spulen aus einem neuartigen Profildraht optimiert und ausgewertet. Im letzten Kapitel sind die Ergebnisse der Studien zusammengefasst. Der spezifische Widerstand des Kupferleiters aller wassergekühlten Induktorspulen bei der Temperatur ϑ= 50°C betrug ρ_1=2·10^{-8} Ωm.

Glühen für das Warmformen

Der größte Teil der Energie zum Erwärmen von Stahlwerkstoffen auf die Warmformtemperatur ϑ_S=1200 °C wird verbraucht, wenn das Material des Einsatzes seine Magnetisierbarkeit bereits verloren hat, d.h. seine Temperatur über dem Curie-Wert von ϑ_C=800 °C liegt [4]. In diesem Betriebszustand wird mit einer Glühanlage ein massiver Stahlstab mit einem Durchmesser von d_2=80 mm mit einer Frequenz von f=1000 Hz erwärmt. Bei der mittleren Temperatur des Einsatzes ($\vartheta_{átl}$=1000 °C) beträgt der spezifische Widerstand des Stahls ρ_2=1,22·10^{-6} Ωm, die Eindringtiefe beträgt δ_2=17,58 mm.

Der Einsatz erwärmt sich am schnellsten im ganzen Querschnitt mit einem Parameter von

$$x_{k2} = \frac{d_2}{\sqrt{2}\cdot\delta_2} = \frac{80}{\sqrt{2}\cdot 17{,}58} = 3{,}22\,.$$

Im Kupfermaterial der Induktorspulen beträgt die Eindringtiefe δ_1= 2,25 mm.

Herkömmliche einlagige optimierte Spule

In **Bild 1** sind schematische Zeichnungen eines 2D-Modells eines herkömmlichen einlagigen Induktor-Einsatz-Systems der ausgewählten Glühanlage zu sehen, wobei nur die aktiven (elektrisch leitenden) Bauteile dargestellt werden. **Bild 1a** zeigt ein 1/4 des rotationssymmetrischen Modells und **Bild 1b** stellt eine vergrößerte Profilansicht der beiden oberen Windungen der Spule dar. Die Spule aus Kupferhohlprofildraht wurde auf höchsten elektrischen Wirkungsgrad optimiert. Spule und Einsatz haben die gleiche Länge: ℓ_1=ℓ_2=1113 mm. Zwischen den Windungen der Spule mit einem Innendurchmesser d_1=130 mm und der Windungszahl N=36 ist ein Isolationsabstand von h_ℓ=3mm. Der „Schlankheitsfaktor" der Spule beträgt ℓ_1/d_1=8,56. Im Gewindeprofil mit einer Höhe von h=28 mm ist ein massiver rechteckiger T-Teil mit einer Dicke von v_{11}=4 mm und ein hufeisenförmiger U-Teil mit einer Dicke von v_f=1 mm zu unterscheiden. Für den T-Teil gilt ε_{11}=v_{11}/δ_1=1,78 , was größer ist als der optimale Wert ε=π/2 für eine unendlich lange, nahtlos gewickelte Luftkernspule mit einem verlustleistungsoptimierten Massivleiter [1]. Das Kühlwasser strömt in einen Hohlraum, der h-2·v_f=28-2·1=26 mm hoch und w=6 mm breit ist. Es sollte erwähnt werden, dass der U-Teil in der Praxis ebenfalls eine rechteckige Form haben kann.

Zweilagige Spulen

Die Anwendbarkeit der Glühanlage mit herkömmlichen und neuartigen, optimierten zweilagigen Spulen werden durch den Vergleich ihrer elektrischen Parameter mit denen der herkömmlichen einlagigen Spule anhand der Beziehungen (5) … (8) ausgewertet.

Herkömmliche zweilagige Spulen

Es wird ein Induktor-Einsatz-System betrachtet, bei dem eine zweilagige Spule durch Wickeln einer zweiten (äußeren) Lage des gleichen Drahtes und der gleichen Windungszahl auf die optimierte einlagige Spule mit herkömmlichem Profil von **Bild 1** gebildet wird. In **Bild 2a** ist ein schematisches Diagramm des 2D-Modells des Induktor-Einsatz-Systems zu sehen, und in **Bild 2b** ist eine vergrößerte Ansicht der oberen beiden Windungen zu studieren. In diesem Fall ist v_{11}=v_{12}=4 mm, und zwischen den beiden Lagen ist h_ℓ=3 mm die Dicke der Isolierung.

Die Anwendbarkeit herkömmlicher Zweilagespulen wurde anhand der Diagramme in **Bild 3** bewertet. Daraus kann festgestellt werden, dass bei der zweilagigen Spule der Wirkungsgrad unzulässig stark abnimmt ($\Delta\eta$=-13,04%). Aus Sicht der Wasserkühlung ist der sehr starke Anstieg der Verlustleistung

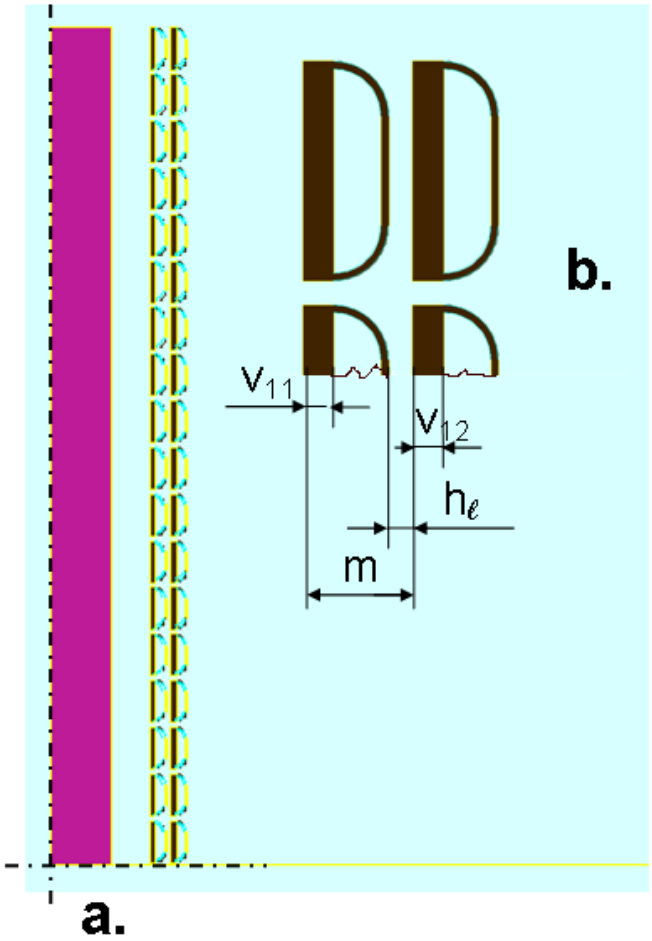

Bild 2: 2D-Modell aktiver Bauteile der Glühanlage mit herkömmlicher zweilagiger Spule (**a**: Induktor-Einsatz-System, **b**: Oberwindungsprofile)

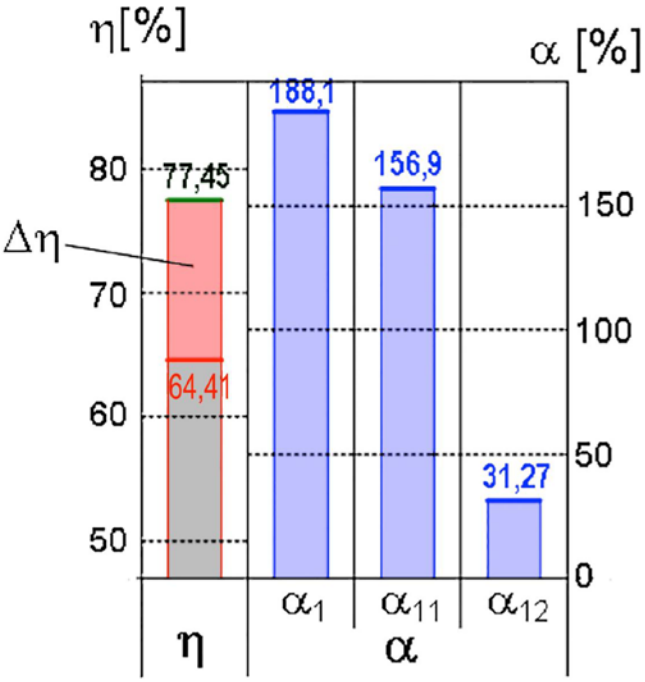

Bild 3: Der Wirkungsgrad h der Glühanlage mit herkömmlichen Spulen (rot: zweilagig, grün: einlagig) und die Verlustleistungsverhältnissen der zweilagigen Spule (a1: Vollspule, a11: innere Lage, a12: äußere Lage)

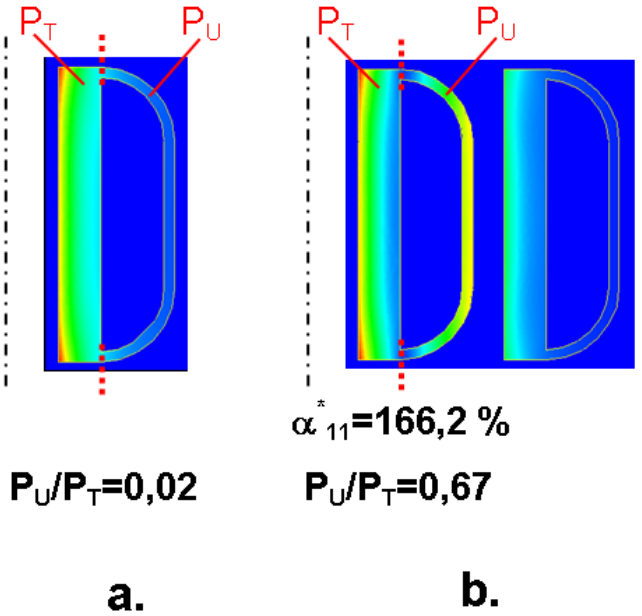

Bild 4: Stromdichtverteilungen und Verlustleistungsverhältnissen in der Mittelwindung der herkömmlichen Spulen der Glühanlage (**a:** einlagig, **b**: zweilagig)

der gesamten Spule ungünstig (α_1=188,1%). Dies erklärt die starke Reduzierung des Wirkungsgrades. Die Situation ist umso beängstigender, da der überwiegende Teil der Verlustleistungssteigerung auf die innere Lage (α_{11}=156,9%) fällt, die sogar die aus dem Einsatz strömende Wärme abführen muss. Nur ein kleiner Teil der Verlustleistung geht an die äußere Lage (α_{12}=31,27%).

Um die Ursachen genauer zu untersuchen, wurden die Verteilung von Stromdichte und Verlustleistung in den (endeffektfreien) mittleren Windungen untersucht (**Bild 4**). **Bild 4a** zeigt die Stromdichteverteilung der Mittelwindung der optimierten einlagigen Spule von **Bild 1**. Es ist zu beobachten, dass im U-Teil wenig Strom fließt, praktisch nur im T-Profil. In den äußeren Teil des Windungsprofils strömt keine Energie, da dort das axiale Magnetfeld praktisch null ist. Energie strömt nur von der Innenseite des Profils in den Einsatz. Dieser Effekt spiegelt sich auch im Anteil der Verlustleistung wider, da P_U/P_T=0,02 ist. Da sich das Profil der Außenlage der zweilagigen Spule (**Bild 4a**) an der gleichen Position befindet wie das Windungsprofil der optimierten einlagigen Spule, kann dies auch als optimiert angesehen werden, da in den äußeren Teil dieses Profils keine, sondern nur von seinem inneren Teil in Richtung des inneren Profils Energie strömt. Die durch das 7 mm breite U-Teil des Innenprofils eindringende Welle wird dadurch stark absorbiert (δ_1= 2,25 mm). Durch den in beiden Profilen in gleicher Richtung und Stärke fließenden Strom entsteht an der Außenseite des Innenprofils ein Magnetfeld H und an der Innenseite ein Magnetfeld mit gleicher Richtung und einem Wert von 2 *H*. Die besondere Situation ist, dass die Ströme an der Innen- und Außenseite des Innengewindeprofils gegenläufig fließen, und es ist sogar zu sehen, dass an einer Stelle nahe der Grenze von T- und U-Teil kein Strom fließt. Die Verlustleistung P^*_{11II} in der mittleren Windung der Innenlage der zweilagigen Spule zum Fall der einlagigen Spule (P^*_{1I}) wurde durch den Parameter

$$\alpha^*_{11} = \frac{P^*_{11II}}{P^*_{1I}}$$

verglichen. So ergab sich α^*_{11}=166,2%, was fast gleich wie im Fall der Lagen (α_{11}=156,9%) ist. Diese hohe Verlustleistung verteilt sich im Verhältnis P_U/P_T=0,67, ist also auch im U-Teil von Bedeutung. Diese Situation kann nur geringfügig verbessert werden, aber die Werte der elektrischen Eigenschaften bleiben inakzeptabel, wenn die Abmessungen des Innenprofils auf v_{11}=3 és v_f=2 mm geändert werden, wobei die Breite des Kühlkanals w=6 mm beibehalten wird. Aufgrund unserer Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Anwendbarkeit herkömmlicher zweilagiger Hohlleiterspulen in allen Fällen durch den U-Teil des Profils der Innenlage verhindert wird.

Neuartige, zweilagige optimierte Spulen

Aus dem Vorstehenden folgt, dass wassergekühlte zweilagige Spulen nur verwendet werden können, wenn der U-Teil im Windungsprofilprofil der Innenlage weggelassen und die Wasserkühlung anders gelöst wird. Die Verwendung eines rechteckigen massiven T-Teils kann auch deshalb vorteilhaft sein, weil bereits gezeigt wurde [1], dass solche zwei- oder mehrlagigen Spulen mit einem quadratischen massiven Profil deutlich geringere Verluste aufweisen als die einlagige. Diese Spulen waren Drosselspulen oder Transformatorspulen, keine Induktorspulen, daher wurden sie optimiert, um die in ihnen erzeugte Gesamtverlustleistung zu minimieren und nicht um den maximalen Wirkungsgrad des Induktor-Einsatz-Systems. Darüber hinaus wurde die Verlustleistung der Spulen mit der Gleichmäßigkeit der Erregungen und nicht der im Einsatz erzeugten Nutzleistungen verglichen. Trotz all dieser Unterschiede könnten die in [1] beschriebenen Ergebnisse und Methoden genutzt werden, um neuartige Induktorspulen zu entwickeln und zu optimieren.

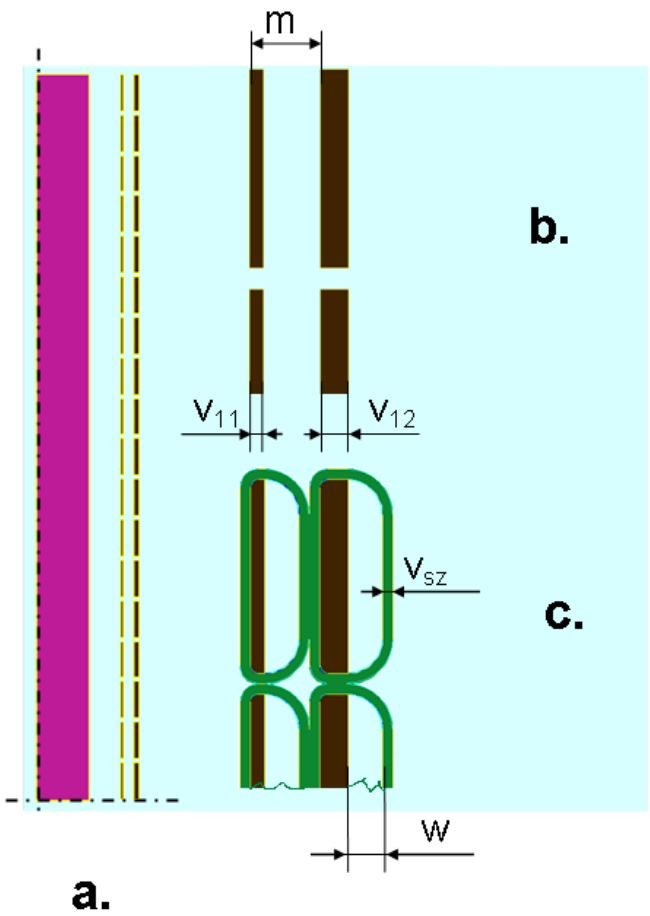

Bild 5: 2D-Modell der Glühanlage mit neuartiger zweilagiger Spule mit Cu-Windungsprofil: aktive Elemente des Induktor-Einsatz-Systems (**a**) und der oberen Windungsprofile (**b**), die oberen Cu-Profile zusammen mit Isolierhülsen (**c**)

Die zweilagigen Induktorspulen können auch nach den in [1] eingeführten Optimierungsarten B und C optimiert werden. Der höchste elektrische Wirkungsgrad des Induktor-Einsatz-Systems kann jedoch nur erreicht werden, wenn eine Typ-B-Optimierung durch Variation der radialen Dicke der Lagen bei gleicher Windungszahl durchgeführt wird. Der Optimierungstyp C musste verworfen werden, da seine Verwendung zu einer geringeren Windungszahl der inneren Lage als der äußeren führen würde, was zu einer geringeren Nutzleistung und einem kleineren Wirkungsgrad führt.

Zur Wasserkühlung von rechteckigen T-Teilen aus Kupfer wurden zwei neue Arten von Windungsprofilen (Cu und Bi) erstellt. Diese sind in **Bild 5 und 6** dargestellt, wobei die Außenlage auch die neuen Gewindeprofile enthält, aber auch das herkömmliche Windungsprofil der optimierten einlagigen Spule verwendet werden könnte.

Eine optimierte Version des neuartigen Windungsprofils Cu ist zusammen mit dem 2D-Modell des Induktor-Einsatz-Systems in **Bild 5** zu sehen. In den Bildern a und b sind nur die aktiven Elemente dargestellt. Das neue Windungsprofil besteht aus zwei Teilen: einem T-Teil aus Kupfer mit einer optimierten Breite von v_{11}=2, és v_{12}=4 mm und einer Isolierhülse mit einer Dicke von v_{sz}=1,5 mm (**Bild 5c**). Im Hohlraum zwischen Abdeckung und T-Profil strömt Kühlwasser. Für die Innenlage ist $\varepsilon_{11}=v_{11}/\delta_1$=0,89, was größer als 44 für die Innenschicht einer zweilagigen massiven spaltfreien unendlich langen Luftspule, die für minimale Verlustleistung optimiert ist [1]. Die neuartigen isolierten Leiter (ähnlich der Kabelfertigung) können durch das Extrudieren von ausreichend festen und hitzebeständigen Kunststoffprofilrohren (z.B. Teflon) zusammen mit dem Kupferleiter hergestellt werden. Ein fester Verbund zwischen Kupfer und Kunststoff (z.B. durch Behandlung der Kupferoberfläche) muss gewährleistet sein. Es empfiehlt sich, die Innenkanten der Kupferprofile ca. auf einen Radius von 1 mm zu runden. Die Auswirkung hiervon auf den Wert elektrischer Parameter kann nicht festgestellt werden. Die Breite des herkömmlichen Kühlkanals wurde von w=6 auf w= 5 mm reduziert, der Querschnitt des Kanals wurde jedoch nicht reduziert, da die axiale Abmessung von 26 auf 28 mm vergrößert wurde.

Bild 6 zeigt die optimierte Version des anderen neuartigen Windungsprofils in der zweilagigen Spule des 2D-Modells des Induktor-Einsatz-Systems. In **Bild 6b** ist zu erkennen, dass das Windungsprofil aus zwei Aktivteilen unterschiedlicher Materialien besteht. Dieses Bimetallprofil wird mit Bi bezeichnet. Sein T-Teil aus Kupfer ist identisch mit dem T-Teil des Cu-Profils. Die Abmessungen des U-Teils des Bi-Profils sind die gleichen wie beim herkömmlichen Profil (w=6, v_f=1 mm), sein Material ist jedoch eine Legierung mit einem viel höheren spezifischen

Widerstand als Kupfer und ist hartgelötet am T-Teil befestigt. Das Material des U-Teils ist in diesem Fall eine nicht ferromagnetische Cr-Ni-Legierung mit einem spezifischen Widerstand vom 54-fachen des Kupferwertes (ρ_{1f}=1,08·10^{-6} Ωm). Dementsprechend ist die Eindringtiefe $\sqrt{54}$-mal, also δ_{1f}=16,54 mm. Durch die Wahl eines solchen Materials ist zu erwarten, dass die Verlustleistung im U-Teil aufgrund der viel kleineren und gleichmäßiger verteilten Stromdichte viel geringer (sogar vernachlässigbar) ist als bei dem herkömmlichen Kupfermaterial. Das auf herkömmliche Weise (z. B. durch Wickeln von Isolierband) auf eine Dicke von v_{sz}=1,5 mm isolierte Windungsprofil Bi wurde in **Bild 6c** dargestellt.

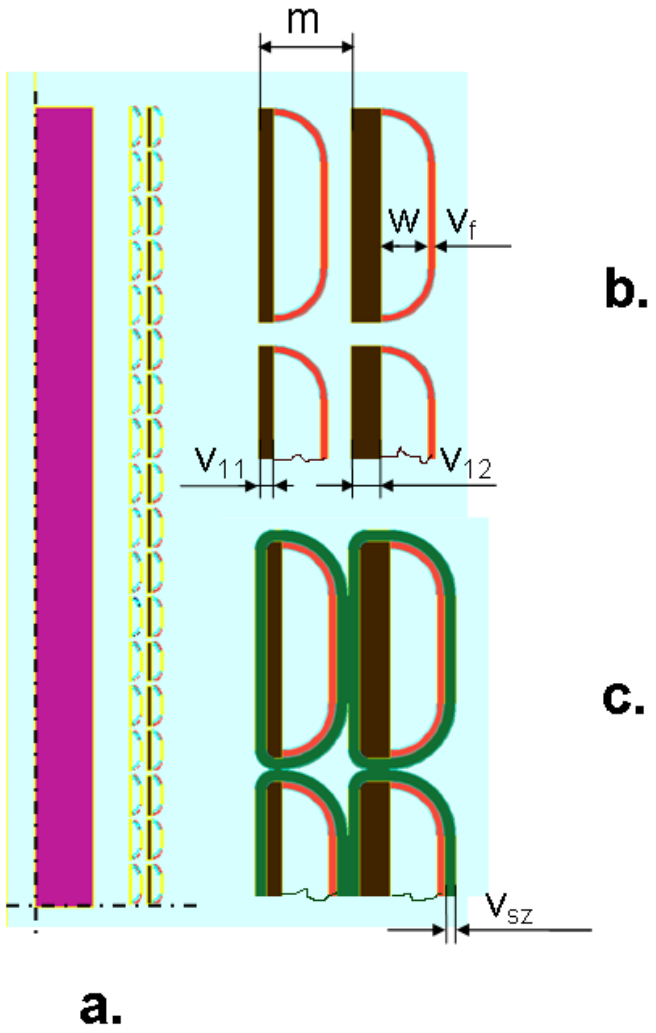

Bild 6: 2D-Modell der Glühanlage mit neuartiger zweilagiger Spule und mit Bi-Windungsprofil: aktive Elemente des Induktor-Einsatz-Systems (**a**) und der oberen Windungsprofile (**b**), die oberen isolierten Bi-Profile (**c**)

Bild 7 zeigt die Stromdichteverteilung in den mittleren Windungen der zweilagigen Spulen mit den neuen Windungsprofilen (Cu in **Bild 7a** und Bi in **Bild 7b**). Kein erwarteter Unterschied zwischen den Stromdichteverteilungen der T-Profile ist zu sehen, was sich bereits an den Werten der Verlustleistung in den Innenlagen ablesen lässt: etwas höher im Bi-Profil (α^*_{11}=46,27%) als beim Cu-Profil (α^*_{11}=43,43%). Es ist zu erkennen, dass die Stromdichte und Verlustleistung im U-Teil des Profils sehr gering sind (P_U/P_T=0,051).

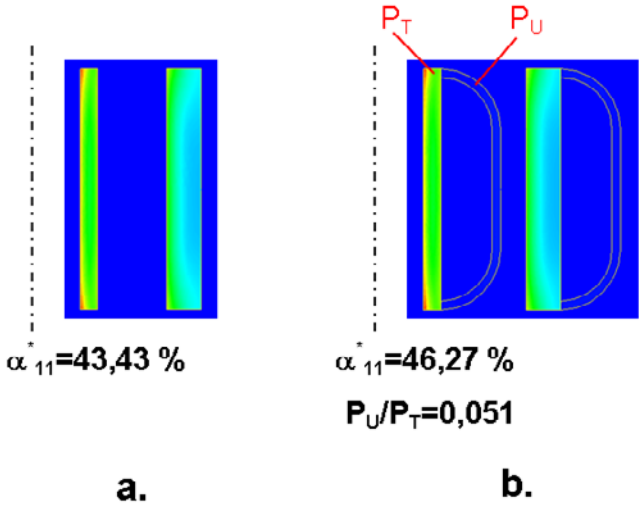

Bild 7: Stromdichtverteilungen und Verlustleistungsverhältnissen in der Mittelwindung der neuartigen Spulen der Glühanlage (**a:** Cu-Profil, **b**: Bi-Profil)

Die untersuchten Induktorspulen hatten einen „Schlankheitsfaktor" von ℓ_1/d_1=8,56. In der Praxis wird eine viel längere und schlankere Spule (bestehend aus mehreren Teilen) verwendet, deren Endeffekte weniger ausgeprägt sind und deren elektrische Parameter verbessert werden. Die besten Werte werden mit einem unendlich langen Induktor-Einsatz-System erzielt. Daher sollten die auf Grund des unendlich langen 2D-Modells berechneten und mit ∞ gekennzeichneten Parameter auch mit den Ergebnissen unseres mit Re gekennzeichneten realen (endlich langen) Modells verglichen werden.

Die Diagramme der elektrischen Parameter von neuartigen Induktor-Einsatz-Systemen mit zweilagigen Spulen sind in **Bild 8** zu sehen, wo sich die gepunkteten Linien auf die ∞-Modelle beziehen. Folgendes kann angegeben werden:

- Auch der hohe Wirkungsgrad (η =77,45 und 78,62%) von Induktor-Einsatz-Systemen für einlagige Spulen kann durch die Anwendung neuartiger zweilagiger Spulen deutlich erhöht werden ($\Delta\eta$=3,79…5,24%).
- Für das endliche Re-Modell beträgt die Windungsgrad-

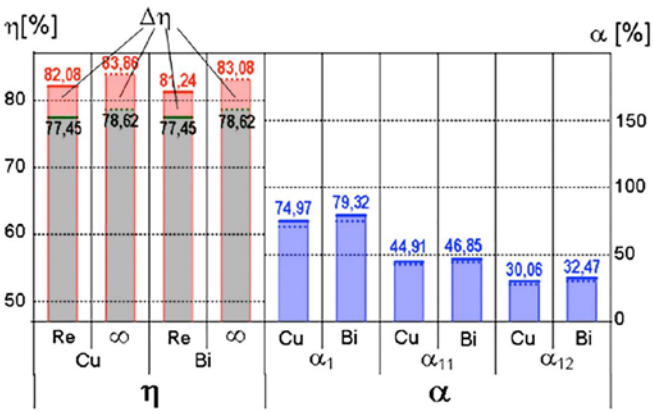

Bild 8: Der Wirkungsgrad h der Glühanlagen mit neuartigen zweilagigen Spulen (rot) und mit herkömmlichen einlagigen Spulen (grün) sowie die Verlustleistungsverhältnissen der neuartigen zweilagigen Spule (a1: Vollspule, a11: innere Lage, a12: äußere Lage)

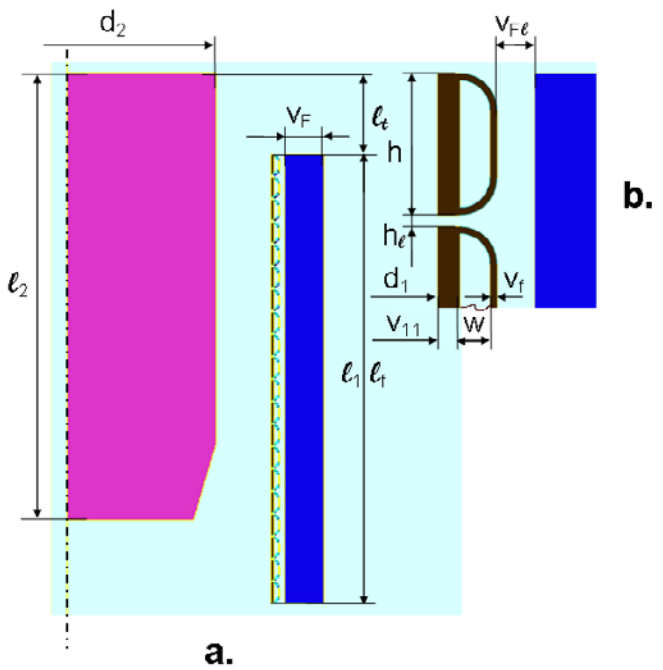

Bild 9: 2D-Modell aktiver Bauteile des Tiegelschmelzofens mit herkömmlicher einlagiger Spule (**a**: Induktor-Einsatz-System, **b**: Oberwindungsprofile)

erhöhung beim Cu-Profil $\Delta\eta$ = 4,63 % . Ein geringerer ($\Delta\eta$ = 3,79%), aber immer noch signifikanter Anstieg ist beim Bi-Profil zu erfahren.

- Für jedes Profil sind die Werte des ∞- Modells h und Dh größer als die des Re-Modells, die die durch Verlängerung des Re-Modells erreichbaren Maxima darstellen.
- Entsprechend der Wirkungsgraderhöhung ist die Situation auch für die Wasserkühlung bei den Re-Modellen und besonders beim Cu-Profil sehr günstig (α_1=74,97, α_{11}=44,91, und α_{12}=30,60%).
- Bei den ∞-Modellen sind die Werte von a offensichtlich etwas kleiner als die Werte der Re-Modelle.

Tiegelschmelzen

Ein herkömmlicher Mittelfrequenz-Schmelzofen [4] wird im Betriebszustand untersucht, in dessen Keramiktiegel (innen glatt) Aluminium oder Stahl geschmolzen (auf Gießtemperatur erwärmt) wird. Der spezifische Widerstand des Al-Einsatzes beträgt ρ_{2Al}=2,5·10^{-7} Ωm und der des Stahls beträgt ρ_{2Fe}=1,3·10^{-6} Ωm. Bei der Frequenz f= 400 Hz betragen die Eindringtiefen δ_{2Al} =12,58 mm és δ_{2Fel} =28,69 mm. Voraussetzung für einen möglichst hohen elektrischen Wirkungsgrad ist, dass die Wellen in den Einsätzen mit d_2=540 mm Durchmesser vollständig absorbiert werden. Dies kann gewährleistet werden, da nach x_{k2Al}=30,35 és x_{k2Fe}=13,31 gilt. Im Kupfermaterial der Induktorspulen beträgt die Eindringtiefe δ_1= 3,56 mm.

Herkömmliche einlagige optimierte Spule

In **Bild 9a** ist ein 2D-Modell des Ofeninduktor-Einsatz-Systems (aktive Elemente in Halbansicht) zu sehen. **Bild 9b** zeigt ein vergrößertes Detail der zwei oberen Windungsprofile einer herkömmlichen einlagigen Spule, die für maximalen elektrischen Wirkungsgrad optimiert ist. Die Spule, der Einsatz und der Flussleiter sind gleich lang: ℓ_1=ℓ_2=ℓ_f=817 mm. Der Isolationsabstand zwischen den Windungen der Spule mit einem Innendurchmesser von d_1=740 mm und der Windungszahl von N = 20 beträgt h_ℓ=3 mm. Der „Schlankheitsfaktor" der Spule beträgt ℓ_1/d_1=1,104. Der unten konische Einsatz ist um ℓ_t=150 mm von der Spule nach oben versetzt, um die Badüberhöhung zu reduzieren. Der Abstand zwischen dem als Ring modellierten Flussleiter ist v_F=70 breit und der der Spule beträgt $v_{F\ell}$=10 mm. Ein nahezu verlustfreies Eisen mit einer relativen Permeabilität von μ_r=7000 wurde als Flussleitermaterial gewählt. Im Windungsprofil mit der Höhe von h=38 mm sind ein T-Teil v_{11}=6 mm dick und ein U-Teil v_f=2mm dick zu unterscheiden. Für den T-Teil ist ε_{11}=v_{11}/δ_1=1,685, was kleiner ist als ε=1,8 für die etwas schlankeren (ℓ_1/d_1=1,235) Luftkernspule mit Flussleiter [1].

Zweilagige Spulen

Die Anwendbarkeit der Induktor-Einsatz-Systeme von Öfen mit herkömmlicher und neuartiger optimierter zweilagiger Spule wird auch hier durch den Vergleich ihrer elektrischen Parameter mit denen des Systems mit herkömmlicher optimierter einlagiger Spule bewertet.

Herkömmliche zweilagige Spule

Untersucht wurden zweilagige Induktor-Einsatz-Systeme, bei denen beide Lagen (mit der Windungszahl von N = 20) mit herkömmlichem Draht mit dem in **Bild 9** optimierten Profil gewickelt wurden. Die gleiche äußere Lage wie die optimierte einlagige Spule gilt als optimiert. In diesem Fall ist v_{11}=v_{12}=6 mm, und zwischen den beiden Lagen ist h_ℓ=3mm die Dicke der Isolierung. Es wurde festgestellt, dass der Wirkungsgrad bei dieser zweilagigen Spule inakzeptabel abnimmt: für den Al-Einsatz $\Delta\eta$=-10,42%, für den Fe-Einsatz $\Delta\eta$=-8,61%. In den Fällen des Fe-Einsatzes wurde die Wasserkühlung bewertet, da deren α-Werte etwas niedriger waren. Der sehr starke Anstieg der Verlustleistung der gesamten Spule ist ungünstig (α_1=150,7%) und fällt zum größten Teil auf die Innenlage (α_{11}=108,4 %). Ähnliche Untersuchungen wie bei Glühanlagen haben gezeigt, dass die Anwendbarkeit herkömmlicher zweilagiger Hohlspulen in allen Fällen durch den U-Teil des leitfähigen Profils der Innenlage verhindert wird.

Neuartige optimierte zweilagige Spule

Ähnlich wie bei der Glühanlage wurde bei der neuen zweilagigen Spule des Schmelzofens das U-Teil zumindest im Windungsprofil der Innenlage - unter Beibehaltung des T-Teils - weggelassen und das neuartige Cu-Profil verwendet. Die für Typ B optimierte Version zusammen mit dem 2D-Modell des Induktor-Einsatz-Systems sind in **Bild 10** zu sehen. Die Außenlage beinhaltet das neue Gewindeprofil, aber auch das traditionelle Gewindeprofil der optimierten Einlagenspule konnte verwendet werden. In **Bild 10a** und **b** sind nur aktive Elemente dargestellt. Die neuen Gewindeprofile bestehen aus zwei Teilen: kupfergefertigten T-Profilen mit optimierter Breite v_{11}=3, és v_{12}=6mm und v_{sz}=1,5 mm dicken Isolierhülsen (**Bild 10c**). Im Hohlraum zwischen Hülse und T-Profil strömt Kühlwasser. Für die innere Lage gilt ε_{11}=v_{11}/δ_1=0,843, was kleiner als ε = 0,85 für die Spule mit Flussleiter ist. Diese etwas schlankeren Luftkernspulen sind jedoch auf minimale Verlustleistung optimiert [1]. Der

Vorschlag, diese neuartigen isolierten Leiter herzustellen, wurde beim Glühen bereits beschrieben. Die Breitenabmessung des herkömmlichen Kühlkanals wurde von w=8 auf w=6 mm reduziert, der Querschnitt des Kanals wurde jedoch nicht reduziert, da die axiale Größe von 34 auf 38 mm vergrößert wurde.

Anhand der Berechnungsergebnisse lässt sich Folgendes feststellen:

- Der elektrische Wirkungsgrad des Schmelzofens mit Flussleiter und mit einlagiger Spule (η=57,34% für Aluminiumeinsatz, und η=74,01% für Stahl) kann durch die Verwendung von neuartiger zweilagiger Spule mit dem Cu-Profil nur geringfügig ($\Delta\eta$=0,84% und 0,32 %) gesteigert werden. Ein ungünstigeres Bi-Profil würde bereits den Wirkungsgrad reduzieren, daher wurde es nicht modelliert. Es ist auch zu beachten, dass die Werte von $\Delta\eta$ tatsächlich noch kleiner sind, weil die Verluste im Flussleiter vernachlässigt wurden.
- Bei den ungünstigeren Fe-Einsätzen wird die Wasserkühlung bewertet. Entsprechend der geringen Wirkungsgradsteigerung ist die Verlustleistung in der gesamten zweilagigen Spule nur geringfügig kleiner als in der einlagigen (α_1=98,63%). Andererseits ist es sehr vorteilhaft, dass diese Verlustleistung zwischen den Lagen etwa halbiert wird; in der Innenlage erreicht sie nicht einmal die Hälfte des Wertes der einlagigen (α_{11}=47,55%).

Fazit

Zweilagige zylindrische Induktorspulen aus konventionellem Hohlprofil-Kupferdraht sind in der Praxis unbrauchbar, da im Vergleich zum Fall der einlagigen Spule der elektrische Wirkungsgrad der Erwärmungsanlagen unzulässig geringer, und dabei die Verlustleistung in der Spule unzulässig höher ist (einschließlich in der inneren Lage).

Durch die Anwendung neuartiger Profildrähte für eine zweilagige Spule einer Glühanlage ohne Flussleiter war der Wirkungsgrad deutlich höher und der Verlust in der Spule deutlich geringer als bei einer einlagigen (weniger als die Hälfte in der inneren Lage).

Der neuartige Profildraht für die zweilagige Spule eines Schmelzofens mit Flussleiter konnte den Wirkungsgrad des einlagigen Falls nur geringfügig steigern, der Verlust in der inneren Lage war jedoch weniger als halb so hoch wie bei einlagiger Spule.

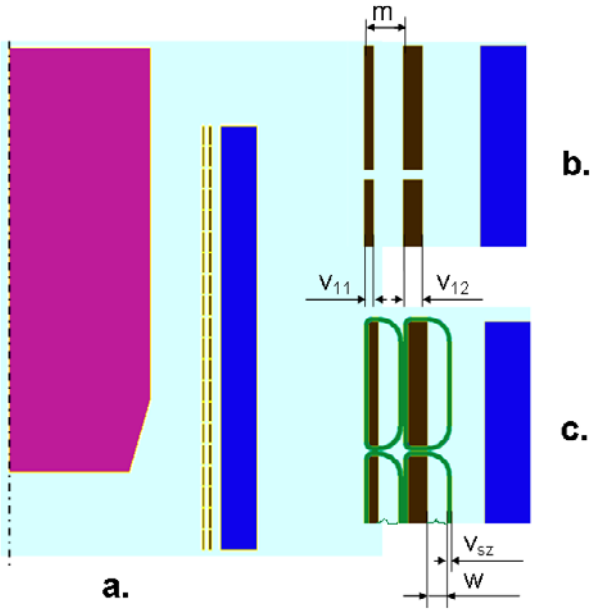

Bild 10: 2D-Modell des Tiegelschmelzofens mit neuartiger zweilagiger Spule mit Cu-Windungsprofil: aktive Elemente des Induktor-Einsatz-Systems (**a**) und der oberen Windungsprofilen (**b**), die oberen Cu-Profile zusammen mit Isolierhülsen (**c**)

Literatur

[1] Koller, L.: Váltakozóáramú hengeres tekercsek optimalizálása. (Optimierung von zylindrischen Wechselstromspulen). Elektrotechnika. 114 (2021) 7-8 sz. pp 13-18

[2] Koller, L.-Dévényi, G: Einfluss der Geometrie von einlagigen Induktorspulen auf die Richtung der Wirbelströme im Einsatz. Elektrowärme International. 1/2005 pp. 46-48

[3] Koller, L.: Untersuchung des elektrischen Wirkungsgrades von Induktionstiegelöfen (Wirkung der Spulenparameter). Elektrowärme International. 4/2001. pp. 158-160

[4] Beji Szabó, D.: Indukciós hevítés (Induktionserwärmung). Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1965

[5] Koller, L.: Kétrétegű induktortekercsek. (Zweilagige Induktorspulen). Elektrotechnika. 115 (2022) 7-8 sz. pp 29-33

Autor

Dr.-Ing. László Koller, PhD
Honorarprofessor
TU Budapest
+36 1 463 2864
kollerlaszlogyula@gmail.com