

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

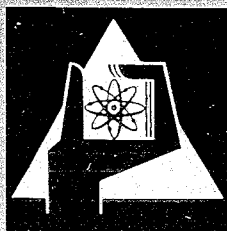
Juni 1968

KFK 833

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Die axiale Verteilung der reduzierten Wärmeleistung auf
induktiv geheizten kreiszylindrischen Stäben

F. Reiß, K. Schretzmann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



Die axiale Verteilung der reduzierten Wärmeleistung auf induktiv geheizten kreiszylindrischen Stäben

Axial distribution of the reduced heating power on circular cylindrical rods heated by induction

Répartition axiale de la puissance de chauffage de barres cylindriques à section circulaire, chauffées par induction

Von F. Reiß und K. Schretzmann, Karlsruhe¹

DK 621.365.5.001.5

Einleitung

Die induktive Heizung stellt eine weitverbreitete Methode zur Wärmeerzeugung dar. Sie wird in der Technik zum Löten, Glühen, Härten, Schmelzen und Schweißen an vielen Stellen eingesetzt und findet auch bei wissenschaftlichen Untersuchungen immer wieder Anwendung.

Wir haben uns des induktiven Heizverfahrens bei experimentellen Untersuchungen an Heat Pipes [1] bedient. Heat Pipes sind abgeschlossene, rohrartige Gefäße, die mit einer verdampfenden Flüssigkeit gefüllt sind und in denen durch Wärmezufuhr an einer Stelle und Wärmeabfuhr an einer anderen Stelle ein Zweiphasen-Stoffkreislauf und ein Wärmetransport erreicht werden. Eigentlicher Zweck derartiger Heat Pipes ist der Transport von Wärme bei geringem Temperaturgefälle. In Raumfahrzeugen und Satelliten gibt man Heat Pipes dafür besonders gute Chancen. Bei den Untersuchungen in [1] ergab sich, daß es bei den in Heat Pipes aus anderen Gründen verwendeten Verdampferflächen mit Kapillarstruktur möglich ist, bis dahin nicht bekannte Werte der Wärmeübergangszahl und der Wärmeleistung bei der Verdampfung zu erreichen. Um die Grenzwerte der Wärmeübergangszahl und Flächenleistung zu bestimmen, waren Wärmequellen mit sehr hoher Flächenleistungsdichte unbedingt erforderlich. Flächenleistungsdichten von 3000 W/cm^2 sollten erreicht werden.

Die Wärme wurde in den bei den Versuchen verwendeten Stahlrohren durch induktive Erregung von Strömen erzeugt. Da es bei den verwendeten hohen Wärmeleistungsdichten naturgemäß schwierig ist, bei größeren Flächen diese Leistungsdichten zu erzielen – die Leistungen des Hochfrequenzgenerators und der Wärmeabfuhrinrichtungen sind beschränkt –, wurde die verfügbare Wärmeleistung auf kleine Raum- bzw. Flächenbereiche konzentriert.

Dies wurde durch Verwendung von einwindigen oder auch zweiwindigen Spulen mit kleinen Steigungen erreicht. Die gesamte Wärmeleistung konnte bei den Versuchen auf andere Art sehr genau gemessen werden. Man weiß, daß die Wärmeleistungsdichte an der Werkstückoberfläche bei den hier vorliegenden Anordnungen in der Mittelebene der Spule am größten ist und von dort nach beiden Seiten symmetrisch mit zunehmender Entfernung von der Mittelebene abnimmt. Wenn man die Flächenleistungsdichte wissen will, muß man den Verlauf dieser Funktion kennen.

Bei einer anderen experimentellen Untersuchung, die dem Einfluß elektromagnetischer Felder auf die Verdampfung von Metallen gewidmet war [2] und bei der die Gesamtleistung auch aus anderen Messungen bekannt war, mußte die Wärmeleistungsdichte an jedem Punkt der Oberfläche eines induktiv geheizten Rohres ebenfalls genau bekannt sein, um daraus wieder die Stärke der elektromagnetischen Felder auszurechnen.

Direkte experimentelle Untersuchungen der Leistungsverteilung auf induktiv geheizten Rohren oder Stäben sind nicht bekannt. In der Praxis hat man sich bisher meist damit zufrieden gegeben, aus den Gefügeänderungen im Werkstück

Rückschlüsse auf die Verteilung der Wärmeleistung zu ziehen und die Heizspulen etwa durch weitere Versuche so umzugestalten, daß das Gefügebild das gewünschte Aussehen annahm [3, 4, 5, 6]. Da bei diesem Vorgehen keine für unsere Zwecke ausreichend genauen Aussagen über die Verteilung der Leistung längs der Achsenkoordinate gewonnen werden können, haben wir die Leistungsverteilung nach zwei verschiedenen Verfahren – elektrisch und kalorimetrisch – gemessen. Theoretische Beschreibungen des vorliegenden Problems gibt es. Soweit sie die tatsächlichen Verhältnisse sehr genau berücksichtigen, führen sie aber zu mathematischen Ausdrücken, die nur mit sehr großem Rechenaufwand ausgewertet werden können.

Wir haben daher in dem Bestreben, unsere Ergebnisse auch gedanklich zu untermauern, an ältere theoretische Arbeiten angeknüpft, die rigoros vereinfachende Annahmen machen. Dabei erhalten wir Ergebnisse, die von unseren Meßergebnissen in nur wenigen Fällen um mehr als 10% abweichen.

Theoretische Betrachtungen

Das Problem der axialen Verteilung der elektrischen Feldstärke oder der Leistungsdichte auf zylindrischen Stäben oder Rohren, die mit herumgelegten Spulen induktiv geheizt werden, ist bisher nur sehr selten behandelt worden. Im Gegensatz dazu ist die Zahl der Arbeiten, die sich bei streng zylindersymmetrischen Feldern mit dem Verlauf der Feldgrößen über dem Radius beschäftigen, sehr groß. Für praktische Anwendungen ist die axiale Verteilung der Leistung aber ebenso wichtig wie die radiale Verteilung. Daß bisher vorzugsweise letztere theoretisch behandelt worden ist, dürfte vor allem daran liegen, daß sie in einfachen, geschlossenen mathematischen Ausdrücken dargestellt werden kann.

Eine Lösung des vorliegenden Problems der axialen Verteilung ist in [7] angegeben. In dieser Arbeit ist unter anderem das Vektorpotential in einem unendlich langen kreiszylindrischen Stab ausgerechnet, das zu einer koaxialen, den Stab umfassenden Stromschicht von endlicher axialer Länge gehört. Die radiale Dicke der Stromschicht ist als verschwindend klein angenommen. Aus dem dabei gewonnenen Ausdruck $8a$ ($6a$) für das Vektorpotential kann die Stromdichte im Stab grundsätzlich ausgerechnet werden. Die numerische Integration des verwickelten Ausdrucks dürfte aber sehr mühsam sein. Es ist nicht bekannt, ob sie schon einmal ausgeführt wurde.

In [8] ist ein dem vorliegenden Problem verwandtes, nämlich die Abschirmung von Zylinderspulen durch ein unendlich langes, die Spule umschließendes Rohr, behandelt. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, daß die radialen Dicken der erregenden Spule und des Abschirmrohres hinreichend klein gegen den Spulenradius, den Rohrradius und gegen die Eindringtiefe der Felder im Spulen- bzw. Rohrmaterial sind. Damit ergeben sich in [8] für die Stromverteilung die Ausdrücke (49) und (50), die sehr leicht auf den inversen Fall umgeschrieben und grundsätzlich durch numerische Integration ausgewertet werden können. Auch der Aufwand für diese numerische Integration schien uns für eine einfache Interpretation unserer Messungen zu hoch zu sein.

Ein Verfahren, mit dem grundsätzlich alle rotationssymmetrischen Fälle der Stromverteilung in induktiv erwärmten Körpern ohne Einschränkungen bezüglich Dicken und Eindringtiefen berechnet werden können und bei dem die mit einem

¹ Dipl.-Phys. F. Reiß und Dr. K. Schretzmann, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe

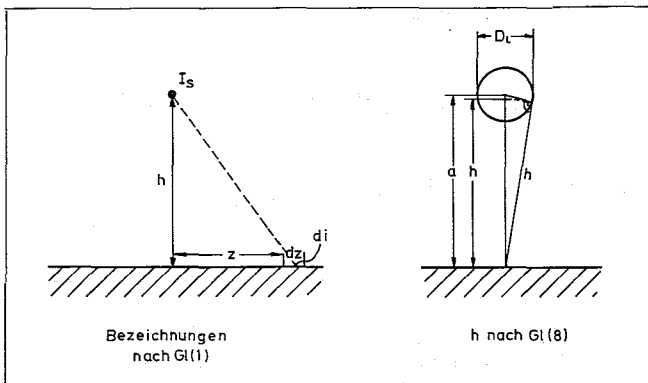


Bild 1: Die Lage von Stromfaden und Werkstückoberfläche und der Querschnitt durch Spulenrohr und Werkstück

Fig. 1: Current paths in the surface of the work piece and cross-sectional view of the coil tube and the work piece

Fig. 1: Cheminement du courant à la surface de la pièce; coupe transversale de l'inducteur et de la pièce à traiter

bestimmten Rechenaufwand erreichbare Genauigkeit überschaut werden kann, ist in [9] dargestellt und in [10] an verwickelten Beispielen demonstriert. Wenn vorausgesetzt wird, daß die zu behandelnden Körper bezüglich ihrer Permeabilität μ und des spezifischen Widerstandes ρ homogen sind und daß die Stromdichte nur von zwei Raumkoordinaten abhängt, kann die Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit den Randbedingungen auf die Lösung eines Systems von Integralgleichungen zurückgeführt werden. Eine angenäherte Lösung dieses Systems stellt die Lösung eines linearen Gleichungssystems für die Stromdichte dar, das durch eine Annäherung der stetigen Stromdichteverteilung durch eine räumlich unstetige Stromverteilung mit gebietsweise konstanten Stromdichten entsteht. Die Koeffizienten des Gleichungssystems sind die Gegen- bzw. Selbstinduktivitäten der Strompfade.

Wenn man von der Rotationssymmetrie der Anordnung absteht, also streng genommen den ebenen Fall behandelt und unterstellen will, daß damit der rotationssymmetrische Fall näherungsweise beschrieben wird, kommt man auf sehr einfachem Wege zu einem Ergebnis. In [5] ist dieser Weg gewählt. Dabei wurde nur die erste Näherungslösung des ebenen Problems benutzt [11] und die Verteilung der Stromdichte berechnet. Das bedeutet, daß angenommen wurde, daß Ströme nur an der Oberfläche des Werkstückes fließen oder daß die Eindringtiefe im Verhältnis zum Abstand der Spule von der Oberfläche sehr klein ist. Auf denselben Grundlagen beruhen die Überlegungen in [12], wo der Schein- und Wirkwiderstand einer Heizspule berechnet wurden.

In [5] ist sowohl der Fall behandelt, daß die Heizspule ein unendlich dünner Draht als auch ein Band von endlicher Breite mit konstantem Strombelag sei.

Die strenge Lösung des ebenen Problems, die auch die Ströme im Innern des Werkstückes und die unterschiedliche Phasenlage der Ströme mitberücksichtigt, liegt für den Fall des geraden, unendlich dünnen Drahtes vor [13, 14]. Sie wurde auf den rotationssymmetrischen Fall noch nicht übertragen. Wir halten das im Augenblick auch nicht für nützlich, da wir glauben, daß die Fehler, die durch die Vernachlässigung der Rotationssymmetrie entstehen, größer sind als die, die durch Annahme verschwindend kleiner Eindringtiefe entstehen.

Wir vereinfachen bei unseren folgenden Betrachtungen das Problem dadurch, daß wir, wie das auch in [11] geschieht, von der Rotationssymmetrie und von den Wirkungen der Ströme im Innern des Werkstückes und ihrer Phasenlage absehen. Wir behandeln unseren Fall als ebenes Problem mit Oberflächenströmen. Die Verteilung des Strombelages, der sich längs der Achsenkoordinate aus einem primären Linienstrom ergibt, ist nach [11]:

$$di = \frac{I_s}{\pi} \cdot \frac{h}{z^2 + h^2} dz \quad (1)$$

Dabei bedeuten (siehe auch Bild 1):

- i die Flächenstromdichte an der Werkstückoberfläche
- I_s die Stärke des erregenden Linienstromes
- h den Abstand des Stromfadens von der Werkstückoberfläche
- z den Abstand von der auf der Werkstückoberfläche senkrechten Fläche durch den erregenden Stromfaden.

Die Leistung pro Längeneinheit ist zum Quadrat des Strombelages proportional. Daraus folgt:

$$dQ = C \frac{h^2}{(z^2 + h^2)^2} dz \quad (2)$$

Die Konstante C muß so gewählt werden, daß sich bei der Integration von dQ über z von $-\infty$ bis $+\infty$ die Gesamtleistung Q ergibt:

$$C \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{h^2}{(z^2 + h^2)^2} dz = Q \quad (3)$$

Daraus folgt:

$$C = \frac{Q}{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{h^2}{(z^2 + h^2)^2} dz} = Q \cdot \frac{2h}{\pi} \quad (4)$$

und man erhält

$$dQ = Q \frac{2}{\pi} \cdot \frac{h^3}{(z^2 + h^2)^2} dz \quad (5)$$

Wenn man die Ableitung der reduzierten Leistung nach der Achsenkoordinate mit N' bezeichnet,

$$N' = \frac{dQ}{dz} \cdot \frac{1}{Q} \quad (6)$$

erhält man:

$$N' = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{h^3}{(z^2 + h^2)^2} \quad (7)$$

Wenn die Spule nicht aus einem unendlich dünnen Draht besteht, sondern einen kreisrunden Querschnitt hat, können unter den obengenannten Voraussetzungen die Formeln (1) und (7) ebenfalls angewandt werden, da das magnetische Feld an der Werkstückoberfläche dem eines Linienstromes gleicht [11]. Die Größe h berechnet man in diesem Fall nach

$$h = \sqrt{\alpha^2 - D_L^2/4} \quad (8)$$

Dabei ist

α der Abstand des Leitermittelpunktes von der Werkstückoberfläche und

D_L der Leiterdurchmesser.

Führt man hier noch mit den Bezeichnungen

D_W den Werkstückdurchmesser und

D_i den Spuleninnendurchmesser

ein, dann folgt

$$h = \frac{1}{2} [(D_i + D_L - D_W)^2 - D_L^2]^{1/2} \quad (9)$$

Mit den Formeln (7) und (9) ist bei der einwindigen Spule die Ableitung der reduzierten Leistung im Rahmen der eingeführten Voraussetzungen gewonnen. Man sieht sofort, daß für ihren Maximalwert N'_m in der Spulenebene gilt:

$$h \cdot N'_m = \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

Bei der Spule mit mehreren Windungen machen wir ähnlich rigorose Vereinfachungen wie bei der einwindigen Spule. Wir nehmen an, daß der Spulenstrom gleichmäßig über die gesamte Breite b als Flächenstrom verteilt sei, und wenden die in [5] abgeleiteten Formeln der ebenen Geometrie an. Wir sehen also davon ab, daß die Spule eine Schraubenstruktur hat. Damit ergibt sich eine gleichmäßige und bei konstantem z -Wert vom Azimut unabhängige Leistungsdichte, wie sie streng genommen nicht vorliegt [15]. Wenn der Abstand des stromführenden Leiters von der Werkstückoberfläche im Vergleich zur Steighöhe der Windungen und die Steighöhe im Vergleich zum Rohrradius klein sind, muß die Leistungsdichte aus der Stromverteilung, die sich aus der Überlagerung der Stromverteilung der einzelnen Windungen ergibt, berechnet werden. Diese Überlagerung ist zum Beispiel in [6] ausgeführt. Wir glauben aber, bei unseren Spulen wegen ihrer kleinen Steighöhe von einer Berücksichtigung der Schraubenstruktur absehen zu dürfen.

Die für diesen Fall gültige Verteilung des Strombelages im Werkstück lautet nach [5], wenn b die axiale Länge der Spule ist:

$$di = \frac{I_s}{\pi \cdot b} \arctg \left(\frac{1}{\left(\frac{h}{b} - \frac{b}{4h} + \frac{z^2}{b \cdot h} \right)} \right) dz \quad (11)$$

Bei negativen Argumenten des \arctg muß zum Hauptwert π addiert werden, damit di stetig verläuft.

Die Ableitung der normierten Leistung N' ergibt sich daraus zu

$$N' = N'_m \left(\frac{b}{h} \right) \cdot \frac{\arctg^2 \left(\frac{1}{\left(\frac{h}{b} - \frac{b}{4h} + \frac{z^2}{b \cdot h} \right)} \right)}{\arctg^2 \left(\frac{1}{\left(\frac{h}{b} - \frac{b}{4h} \right)} \right)} \quad (12)$$

Die Größe $N'_m(b/h)$ kann durch Integration des Zählers von Gleichung (12) über z von $-\infty$ bis $+\infty$ gewonnen werden. $h \cdot N'_m(b/h)$ ist eine Funktion von (b/h) allein. Die Integration ist aber nicht geschlossen ausführbar. Sie wurde für einen größeren Bereich von (b/h) aber numerisch ausgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 2 wiedergegeben. Bild 2 gestattet es, bei vorgegebener Spulenbreite b und bekanntem Abstand Spule-Werkstück h den maximalen Wert der Ableitung der reduzierten Leistungsdichte N'_m in der Spulenmitte zu errechnen. Im Sinne der benutzten ebenen Näherung kommen natürlich weder Werkstück- noch Spulenradius vor.

Experimentelle Bestimmung der Ableitung der reduzierten Leistung aus der elektrischen Feldstärke

Ein Verfahren, die Leistungsdichte auf der Staboberfläche zu bestimmen, besteht darin, die elektrische Ringspannung, die auf jedem Umfang des Stabes besteht, zu messen. Die Stromdichte ist zur Umfangsspannung proportional. Aus der Stromdichte, der Eindringtiefe und dem spezifischen Widerstand oder aus der elektrischen Feldstärke, dem spezifischen Widerstand und der Frequenz können die Volumen- und Flächenleistungsdichten für jeden Punkt der Oberfläche des Rohres dann ausgerechnet werden.

Eine unmittelbare Messung der elektrischen Feldstärke an der Rohroberfläche ist nicht möglich. Auch die elektrische Stromdichte oder die Stromstärke auf einem Rohrumfang sind einer direkten Messung unzugänglich. Die elektrische Ringspannung auf einem zur Rohroberfläche konzentrischen Kreis, dessen Radius etwas größer ist als der Rohrradius, kann aber ohne Schwierigkeiten gemessen werden. Dazu muß um das Rohr nur eine einfache Drahtschleife herumgelegt werden. An ihren Enden mißt man die Ringspannung der umfaßten Fläche. Aus ihr und aus der Frequenz des Wechselfeldes kann sofort ausgerechnet werden, wie groß die Amplitude des von der Drahtschleife umfaßten magnetischen Kraftflusses ist. Bei strenger

Rotations- und Zylindersymmetrie weiß man, wie der magnetische Kraftfluß als Funktion des Radius innerhalb der Meßschleife verläuft: Er nimmt von der Schleife zur äußeren Oberfläche des Werkstückes hin linear mit dem Radius ab.

Die magnetische Feldstärke ist außerhalb des Werkstückes konstant. Wenn das Werkstück die relative Permeabilität $\mu = 1$ hat, ist die magnetische Feldstärke in der Werkstückoberfläche nach den bekannten Stetigkeitssätzen der Elektrodynamik genau so groß wie außerhalb des Werkstücks.

Im Werkstück ändert sich die beschriebene Abhängigkeit auf Grund der in dem Werkstück fließenden elektrischen Ströme. Die magnetische Feldstärke nimmt dort rasch nach innen ab. Sie kann durch die Lösungen der komplexen Besselschen Differentialgleichung beschrieben werden. Daraus ergibt sich, daß auch die elektrische Ringspannung an der Werkstückoberfläche stetig ist und durch Extrapolation aus einer bei einem größeren Radius vorgenommenen Messung bestimmt werden kann.

Wenn zwar noch Rotations- aber keine Zylindersymmetrie mehr besteht, ist das Magnetfeld innerhalb und außerhalb des Rohres inhomogen. Dann braucht keine Proportionalität zwischen dem Radius der Meßschleife und dem magnetischen Fluß bzw. der gemessenen Ringspannung mehr zu bestehen. Wenn man in solchen Fällen auch aus den in einiger Entfernung von der Rohroberfläche vorgenommenen Messungen der Ringspannung auf die Ringspannung an der Rohroberfläche extrapolieren will, sollte man mindestens zwei konzentrische, in einer Ebene angeordnete Meßschleifen benutzen und nach dem Signal der zweiten und etwaiger weiterer Schleifen auf die Ringspannung an der Rohroberfläche linear extrapolieren. Eine experimentelle Anordnung, mit der nach diesem Prinzip Ringspannungen gemessen wurden, zeigt das Bild 3. C ist die mit dem Glühender verbundene Induktionsspule, R das Rohr, auf dem die Wärmeleistungsverteilung bestimmt werden soll. M_1 und M_2 sind zwei konzentrische in einer Ebene angeordnete Meßschleifen. Bei den von uns durchgeführten Messungen zeigte sich, daß das Verhältnis der Spannungen beider Meßschleifen stets den gleichen Wert hatte, unabhängig davon, wo die Meßschleifen in bezug auf die Erregungsspule C angebracht waren. Daraus folgte, daß die Umfangsspannung innerhalb der Meßgenauigkeit eine lineare Funktion des

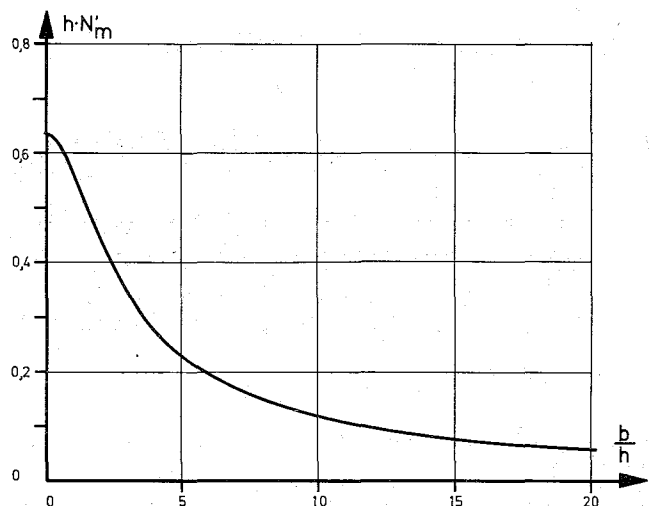


Bild 2: Zusammenhang zwischen der Ableitung der normierten Leistung in der Spulenmitte und der relativen Spulenbreite. Als Abszisse ist die Spulenbreite bezogen auf die Größe h und als Ordinate $N'_m \cdot h$ aufgetragen

Fig. 2: Variation of the standard power in the coil centre as a function of the relative coil width. Abscissa: coil width related to h . Ordinate: $N'_m \cdot h$

Fig. 2: Interspéndance de la variation de la puissance normalisée au centre de l'inducteur et de la largeur relative de l'inducteur. Abscisse: largeur de l'inducteur par rapport à la valeur h . Ordonnée: $N'_m \cdot h$

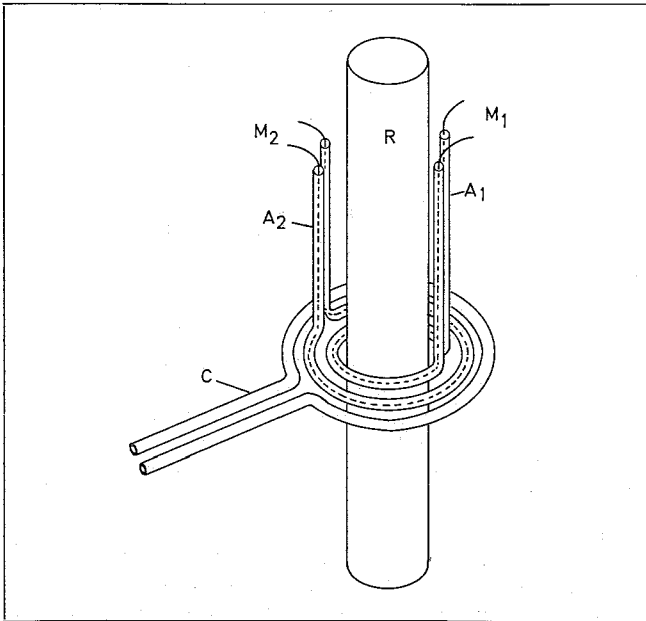


Bild 3: Anordnung zur Messung der elektrischen Ringspannung auf der Rohroberfläche. M_1 und M_2 Meßschleifen, A_1 und A_2 Abschirmröhrchen, C Induktionsspule, R Werkstück

Fig. 3: Measuring set-up for measuring the electrical toroidal voltage at the tube surface. M_1 and M_2 - measuring loops, A_1 and A_2 - screening tubes, C - inductor coil, R - work piece

Fig. 3: Disposition permettant de mesurer la tension électrique annulaire sur la surface du tube. M_1 et M_2 - boucles de mesure, A_1 et A_2 - tubes de blindage, C - Inducteur, R - pièce à traiter

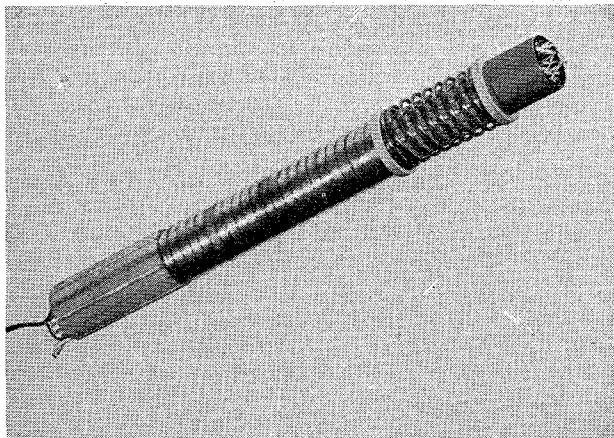


Bild 4: Vorrichtung zur kalorimetrischen Messung der Wärmeleistungsverteilung. Rohrstücke von 4 mm Länge, die innen Thermoelemente tragen, sind unter Zwischenlage von Glimmerscheiben auf einem Keramikdorn aufgereiht

Fig. 4: Set-up for calorimetric measurement of the heating power distribution. Tube sections, 4 mm long, with thermocouples fitted inside, are placed on a ceramic core with mica rings separating the tube sections

Fig. 4: Assemblage permettant la mesure calorimétrique de la répartition de la puissance de chauffage. Des portions de tube, d'une longueur de 4 mm, portant des thermocouples à l'intérieur, et séparés par des bagues de mica entreposées, renferment un noyau en céramique

Radius ist. Dadurch vereinfachte sich die Auswertung der Messungen.

Man sieht in Bild 3 weiter, daß sich die eigentlichen Meßschleifen in Rohren A_1 und A_2 befinden. Bei den ersten Messungen, bei denen die Meßschleifen mit den Eingangsklemmen eines gut balancierten Differentialverstärkers eines Oszillographen verbunden waren, verschwanden die gemessenen Spannungen auch bei sehr großen Abständen der Meßschleifen von der Spulenebene C nicht. Es wurde festgestellt, daß das scheinbare Nichtverschwinden der elektrischen Feldstärke auf die starken elektrischen Felder zurückzuführen ist,

die in der Nähe der Induktionsspule herrschten. Diese elektrischen Felder führten zwar zu einer gleichphasigen und auf beiden Anschlußdrähten der Meßschleife gleich hohen Spannung gegen Erde. Sie war aber so groß, daß der zulässige Common-mode-Bereich des empfindlichen Differentialverstärkers des Oszillographen übersteuert wurde und diese Spannung nicht eliminiert wurde. Daher wurden die Meßdrähte mit Abschirmröhrchen A_1 und A_2 aus Kupfer umgeben. Die Meßdrähte haben einen Durchmesser von 0,2 mm, die Abschirmröhrchen einen Außendurchmesser von 0,8 mm und eine Wandstärke von 0,2 mm. Die Meßschleifen und die Abschirmröhrchen sind gegeneinander isoliert. Die Abschirmröhrchen sind auch vom Rohr R isoliert. Die beiden Enden der Abschirmröhrchen waren nicht miteinander verbunden, da sonst das elektrische Feld im Innern der Abschirmröhrchen verschwunden wäre. Mit dieser Anordnung konnten die Umfangsspannungen sauber und reproduzierbar ausgemessen werden, und sie verschwanden, wie es sein muß bei großen Abständen von der Heizspule.

Um eine Erwärmung des Werkstückes zu vermeiden – durch sie hätten sich der spezifische Widerstand des Rohres und damit die Anpassung sowie die elektrischen und magnetischen Felder stark verändert –, wurde der Hochfrequenzsender für die Untersuchungen bei jeder Position der Meßschleife nur für einen kurzen Zeitraum, etwa 0,1 s, eingeschaltet. Die auf dem Oszillographen aufgezeichneten Hochfrequenzschwingungen wurden dabei fotografiert. Um Fehler durch Schwankungen der Netzspannung und ähnliches eliminieren zu können, wurde zugleich auch die Hochfrequenzamplitude an der Anode der Senderöhre mit aufgezeichnet. Die höchsten an der Meßschleife registrierten Spannungen lagen bei 20 V Hochfrequenzamplitude von Spitze zu Spitze gemessen. Die niedrigsten registrierten Spannungen betrug einige Millivolt.

Zur Auswertung wurden die ermittelten Spannungswerte über den z-Werten aufgezeichnet. Aus der graphischen Darstellung wurde die Mittelebene der Spule herausgesucht. Sodann wurden alle Meßwerte quadriert und in einer weiteren graphischen Darstellung über der Achsenkoordinate aufgetragen. Durch die Meßpunkte wurde eine glatte Kurve hindurchgelegt. Zur Normierung der Spannungsquadrate wurde die Fläche unter der Glättungskurve durch numerische Integration bestimmt. Schließlich ließ sich aus den Quadraten der gemessenen Umfangsspannungen nach Division durch das Integral unter der U^2 -Kurve sofort die gesuchte Größe N' bei den verschiedenen z-Werten ermitteln. Irgendwelche Annahmen über Gesamtleistungen, Eichfaktoren und dergleichen mußten bei dieser Auswertung nicht gemacht werden.

Kalorimetrische Messung der Ableitung der reduzierten Leistung

Mit einer anderen experimentellen Anordnung (Bild 4) wurde die Leistungsverteilung unmittelbar kalorimetrisch gemessen. Dazu war ein Rohr aus demselben Material wie das uns interessierende in Ringe von 4 mm Höhe geschnitten worden. Alle Ringe wurden unter Zwischenlage von Glimmerscheiben auf einen Dorn aus Keramik aufgereiht. An jedem Ring war auf der Innenseite ein NiCr-Ni-Thermoelement angeschweißt. Alle Thermoelementanschlüsse wurden in axialer Richtung aus dem Ringstapel herausgeführt. Am Ende des Keramikdorns wurden die Thermoelemente der Ringe hintereinandergeschaltet mit einer Anzapfung für das Thermoelement des mittleren Ringes. Auf dem Bild 4 kann man die dadurch entstehenden „kalten“ Lötstellen erkennen. Dieser Leistungsmeßdorn wurde in die Spule eingesetzt, deren Leistungsverteilung gemessen werden sollte. Die Thermoelementbatterie und das Thermoelement des mittleren Ringes wurden an einen Zweistrahloszillographen angeschlossen. Die Induktionsspule C wurde dann kurzzeitig mit Hochfrequenz beschickt. Die Einschaltdauer des Senders betrug höchstens wenige Sekunden, um die Erwärmung der Ringe und damit Wärmeverluste durch

Konvektion und Abstrahlung und Veränderungen der Materialeigenschaften mit der Temperatur klein zu halten. Bei kleinen Wärmemengen und kleinen Temperaturerhöhungen sind die Thermospannungen ein unmittelbares Maß für die Temperaturerhöhung und für die erzeugten Wärmemengen. Das Signal des gesamten Stapels ist der gesamten Wärmemenge, das Signal des mittleren Ringes ist der am Ort des mittleren Ringes erzeugten Wärmemenge proportional.

Die Aufzeichnung eines typischen Thermospannungsverlaufs über der Zeit zeigt Bild 5. Die lange waagerechte Spur ist die gemeinsame Null-Linie der Spannung. Auf der horizontalen Achse entspricht eine Gitterteilung einer halben Sekunde. Nach Abschalten des Senders, die Einschaltdauer war etwa 1 s, zeigt die höherliegende Spur die Gesamtleistung, die tieferliegende die Leistung am Ort des mittleren Ringes. Man sieht an der oberen Spur deutlich, daß der Temperaturausgleich innerhalb der Ringe binnen $\frac{1}{10}$ s nach Abschalten der Heizung vollzogen ist. Die Abkühlung nimmt jedoch viel größere Zeiten in Anspruch. Die maximale Aufheizspanne der Stahlringe war 300 °C.

Die Thermospannung des mittleren Ringes dividiert durch die Breite des Ringes und das Summensignal ist unmittelbar die gesuchte Größe N' . Durch Verschieben des Leistungsmeßdorns in der Meßspule kann die Leistungsverteilung, die sich bei der betreffenden Spule auf einem Rohr mit denselben Abmessungen einstellt, Punkt für Punkt ausgemessen werden.

Die obigen Ausführungen bezogen sich alle auf streng koaxiale Anordnungen von Spule und Werkstück. Wenn die Achsen verschoben oder gekippt werden, bleiben die Ergebnisse der Ringspannungsmessung grundsätzlich richtig. Messungen mit einem quer unterteilten Dorn in exzentrischer oder verkippter Lage liefern aber falsche Ergebnisse. Die Isolierscheiben zwischen den Rohrabschnitten, die hier notwendig sind, um die Thermolemente elektrisch in Reihe schalten zu können, verhindern in diesem Fall, daß sich die Stromlinien in dem geteilten Rohr so ausbilden, wie sie in einem ungeteilten Rohr verlaufen würden. Die Abweichungen für einen bestimmten Fall werden um so größer, je feiner der Dorn unterteilt ist. Für die Messung der azimuthalen Leistungsdichteverteilung in der Mittelebene einer einwindigen Spule haben wir deshalb ein ungeteiltes Rohr mit mehreren auf einem Umfang angebrachten Thermolementen verwendet. Für verschiedene Beträge des Parallelversatzes von Spulen- und Rohrachse wurden damit azimuthale Leistungsdichteverteilungen gewonnen, deren Integral über einen vollen Umlauf proportional zur Gesamtleistung in der jeweiligen Position ist.

Bei allen kalorimetrischen Messungen wurde durch Variation der Sendereinschaltdauer geprüft, daß tatsächlich die im stationären Betrieb sich einstellende Wärmeleistungsverteilung nach Abklingen der axialen, radialen und azimuthalen Transienten aufgenommen wurde.

Vergleich der beiden Meßverfahren

Bei den beiden Meßverfahren werden an sich verschiedene physikalische Größen gemessen. Die Ringspannungsmethode liefert die elektrische Feldstärke an der Oberfläche des Rohres, das kalorimetrische Verfahren das Integral über das Quadrat der absoluten Beträge der Feldstärke im Rohr, wenn man von der Verfälschung dieser Verteilung durch Wärmeleitung einmal absieht. Solange die auch in den theoretischen Betrachtungen verwendete Voraussetzung besteht, daß die Eindringtiefe der Felder in den Materialien klein gegen die Radien und Abstände von Spule und Werkstück ist, müssen beide Meßmethoden das gleiche Ergebnis liefern. Wenn diese Voraussetzung nicht genügend gut erfüllt ist, haben die elektrischen Ströme im Werkstück in verschiedenen Tiefen von der Oberfläche aus gerechnet unterschiedliche Phasen, und ihre Beträge nehmen dann außerdem bei verschiedenen z-Werten nicht im gleichen Verhältnis ab, wenn man von der Oberfläche um einen bestimmten Betrag in das Werkstück ein-

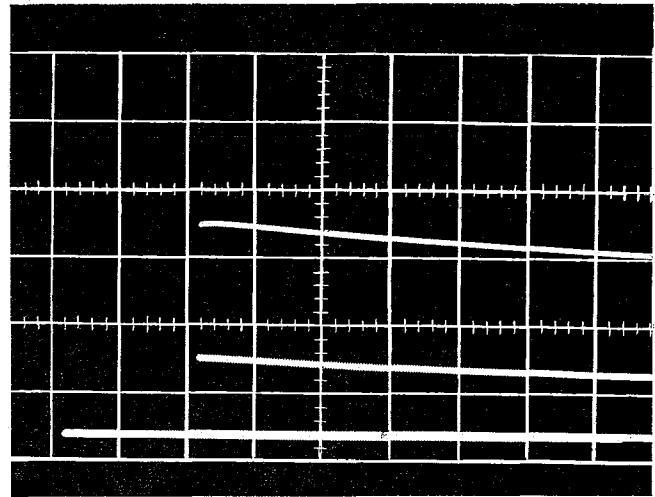


Bild 5: Typische oszillographische Meßwertaufzeichnung mit der Vorrichtung nach Bild 4. Horizontalablenkung 0,5 s/cm, Vertikalablenkung obere Spur 20 mV/cm (Gesamtleistung), untere Spur 10 mV/cm (maximale Leistungsdichte)

Fig. 5: Typical oscillographic recording of the measured values obtained with the set-up shown in fig. 4. Horizontal deviation 0,5 s/cm, vertical deviation upper line 20 mV/cm (total power), lower line 10 mV/cm (maximum power density)

Fig. 5: Enregistrement typique par oscillographe des valeurs mesurées dans les dispositions montrées sur la fig. 4. Dérivation horizontale 0,5 s/cm, déviation verticale, tracé supérieur 20 mV/cm (puissance totale), tracé inférieur 10 mV/cm (densité maximale de puissance)

dringt. Bei den im folgenden wiedergegebenen Ergebnissen sind bezüglich der Leistungsverteilung keine systematischen Unterschiede zwischen den Ringspannungsmessungen und den kalorimetrischen Messungen zu erkennen. Wir glauben, daß damit zur Interpretation unserer Messungen auch die Einführung der genannten Voraussetzung in die Theorie gerechtfertigt ist.

Ergebnisse

Bei allen Messungen, über die hier berichtet werden soll, wurden als Werkstücke Rohre aus hochwarmfestem Stahl X15 CrNiSi 25 20 mit einem Außendurchmesser von 20 mm und einer Wandstärke von 0,9 mm verwendet. Die Eindringtiefe des Hochfrequenzfeldes betrug etwa 0,7 mm.

Bestimmungen der Ableitung der reduzierten Leistung aus Messungen der Umfangsspannung wurden für fünf Spulen mit einer bis fünf Windungen und Innendurchmessern von 38 mm ausgeführt. Die Ergebnisse sind zusammen mit den Maßen der Spulen in Bild 6 wiedergegeben. Der Übersichtlichkeit halber ist die dreiwindige Spule nicht mit eingezeichnet. Die ausgezogenen Linien sind nach den Gleichungen (7), (9) und (12) berechnet, die Zeichen geben von den gewonnenen Meßwerten die für die ein- und die fünfwindige Spule an. Wie man es erwartet, ergibt die einwindige Spule den größten N'_m -Wert und die schmalste Verteilungskurve. Mit zunehmender Spulenbreite nehmen die Größtwerte von N'_m ab, und die Verteilungsfunktionen werden breiter. An der Streuung der Meßpunkte erkennt man, daß der mittlere Fehler pro Meßpunkt bei etwa 10% liegt. Man sieht aber auch, daß die Meßpunkte relativ gleichmäßig um die theoretische Kurve angeordnet sind. Eine systematische Abweichung der gerechneten Kurve von den Meßwerten ist nicht zu erkennen.

Kalorimetrische Messungen wurden an insgesamt acht Spulen ausgeführt. Von den Ergebnissen, die an vier Spulen mit einer bis vier Windungen und einem Innendurchmesser von 50 mm ermittelt wurden, sind die für eine ein- und eine vierwindige Spule zusammen mit allen zugehörigen theoretischen Kurven in Bild 7 wiedergegeben. Der Verlauf der Verteilungen

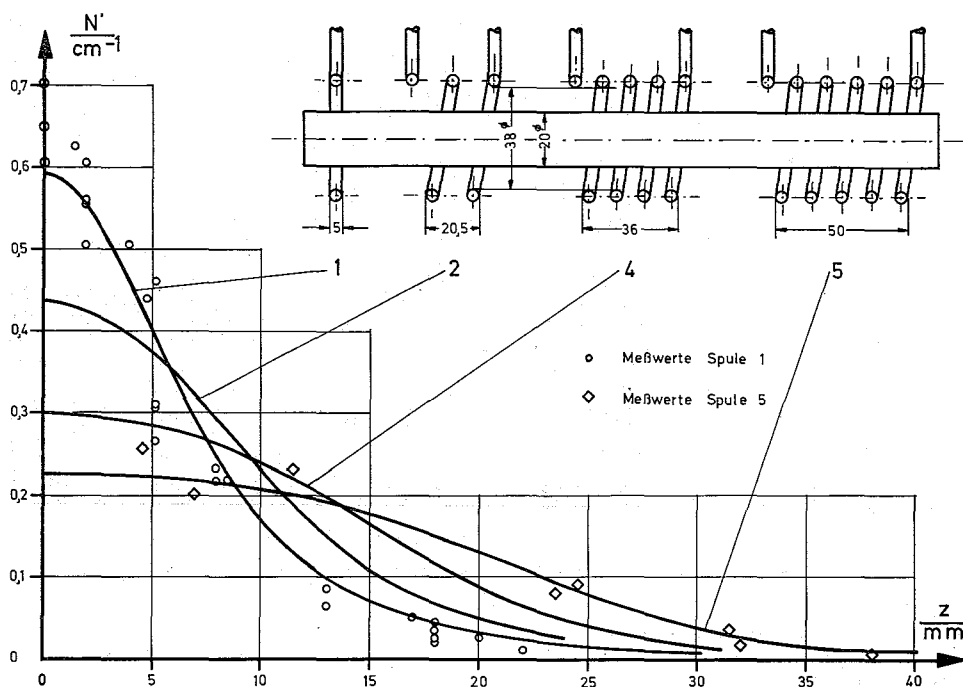


Bild 6: Ableitung der reduzierten Leistung von Spulen mit 38 mm Innendurchmesser und verschiedenen Längen auf einem Stahlrohr von 20 mm Außendurchmesser und 0,9 mm Wandstärke in Abhängigkeit von der Entfernung von der Spulenmittelebene. Ausgezogene Linien sind nach Gleichung (12) gerechnete Werte. Der besseren Übersichtlichkeit wegen sind die Meßwerte nur für die ein- und fünfwindige Spule eingetragen

Fig. 6: Variation of the reduced power with coils having different lengths and an inner diameter of 38 mm, on a steel tube (outer diameter of 20 mm, wall thickness 0,9 mm) as a function of the distance from the central plane. The solid lines express values calculated according to equation (12). Measured values are given for the one-turn and the five-turn coils only

Fig. 6: Variation de la puissance sur un tube en acier (diamètre extérieur 20 mm épaisseur des parois 0,9 mm) pour plusieurs inducteurs, ayant un diamètre intérieur de 38 mm et des longueurs différentes, en fonction de la distance au plan central de l'inducteur. Les lignes pleines indiquent les valeurs calculées à l'aide de l'équation (12). Dans un souci de plus grande clarté de la représentation, uniquement les valeurs mesurées pour les bobines à une spire et à cinq spires ont été données

ist ähnlich wie in Bild 6. Es darf bemerkt werden, daß die kalorimetrisch gewonnenen Meßwerte nicht rechnerisch normiert wurden, sondern so in das Bild eingetragen sind, wie sie sich bei den Messungen ergeben hatten. Man sieht, daß auch diese Messungen im Rahmen der Meßgenauigkeit mit den Ergebnissen unserer einfachen Theorie übereinstimmen. Es fällt in Bild 6 und besonders in Bild 7 auf, daß sich in einem gewissen Abstand von der Spulenmittelebene unabhängig von der Windungszahl für jede Spule etwa die gleiche reduzierte Leistungsdichte ergibt.

Kalorimetrische Messungen wurden außerdem an einwindigen Spulen mit 28, 80 und 125 mm Innendurchmesser ausgeführt. In Bild 8 sind diese Messungen zusammen mit denen der einwindigen Spulen der Bilder 6 und 7 zusammengestellt. Als Abszisse ist die Größe z/h und als Ordinate die Größe $h \cdot N'$ gewählt. In diesen Variablen wird die theoretische Verteilung

aller einwindigen Spulen gleich, wie man an Gleichung (7) leicht sehen kann. Sie ist als Kurve in Bild 8 eingetragen. Hier sieht man deutlich, daß die gemessenen Verteilungen von der theoretischen Verteilungsfunktion umso stärker abweichen, je größer der Spulendurchmesser wird. Es liegt nahe, den Grund für diese Abweichung in der Vernachlässigung der Rotations-symmetrie zu suchen. Bei im Verhältnis zum Werkstückradius kleinem Abstand zwischen Werkstückoberfläche und Spulinnenfläche darf der Spalt zwischen Werkstück und Spule eher als eben angesehen werden, als bei größeren Spulendurchmessern. Man sieht in Bild 8 weiterhin, daß diese Abweichungen zwischen Theorie und Experiment in der Mittelebene der Spulen am größten sind.

In Bild 9 ist das Verhältnis der gemessenen Werte von N' zu den gerechneten Werten von N' für die Spulenmitte für alle experimentell untersuchten Spulen über dem Verhältnis von

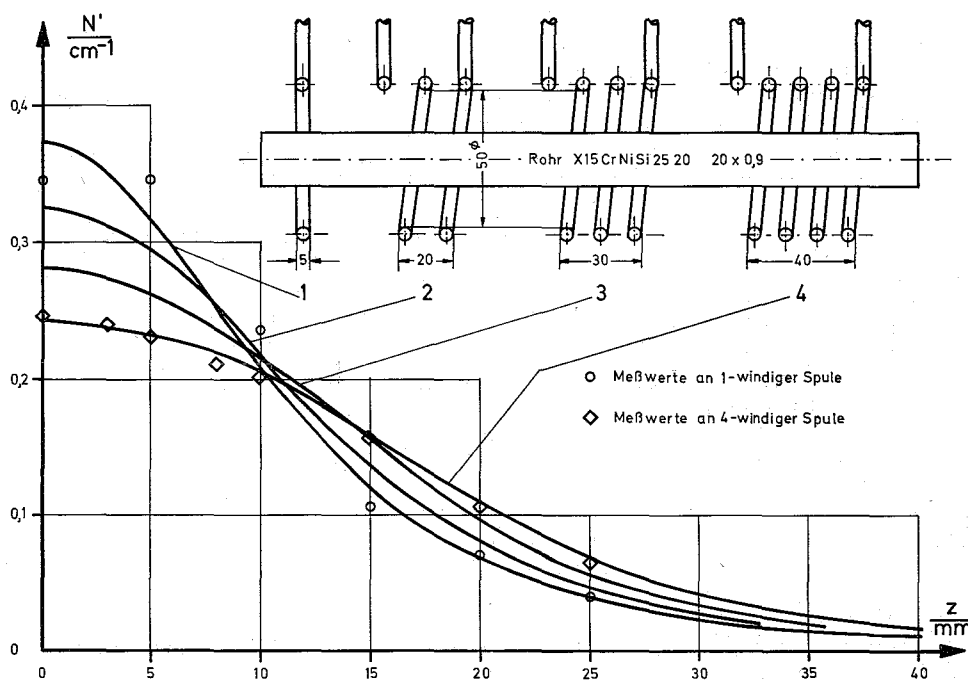


Bild 7: Ableitung der reduzierten Leistung von Spulen mit 50 mm Innendurchmesser und verschiedenen Längen auf einem Stahlrohr von 20 mm Außendurchmesser und 0,9 mm Wandstärke in Abhängigkeit von der Entfernung von der Spulenmittelebene. Ausgezogene Linien sind nach Gleichung (12) gerechnete Werte. Der besseren Übersichtlichkeit wegen sind die Meßwerte nur für die ein- und vierwindige Spule eingetragen

Fig. 7: Variation of the reduced power with coils having different lengths and an inner diameter of 50 mm, on a steel tube (outer diameter of 20 mm, wall thickness 0,9 mm) as a function of the distance from the central plane. The solid lines express values calculated according to equation (12). Measured values are given for the one-turn and the four-turn coils only

Fig. 7: Variation de la puissance sur un tube en acier (diamètre extérieur 20 mm épaisseur des parois 0,9 mm) pour plusieurs inducteurs, ayant un diamètre intérieur de 50 mm et des longueurs différentes, en fonction de la distance au plan central de l'inducteur. Les lignes pleines indiquent les valeurs calculées à l'aide de l'équation (12). Dans un souci de plus grande clarté de la représentation, uniquement les valeurs mesurées pour les bobines à une spire et à quatre spires ont été données

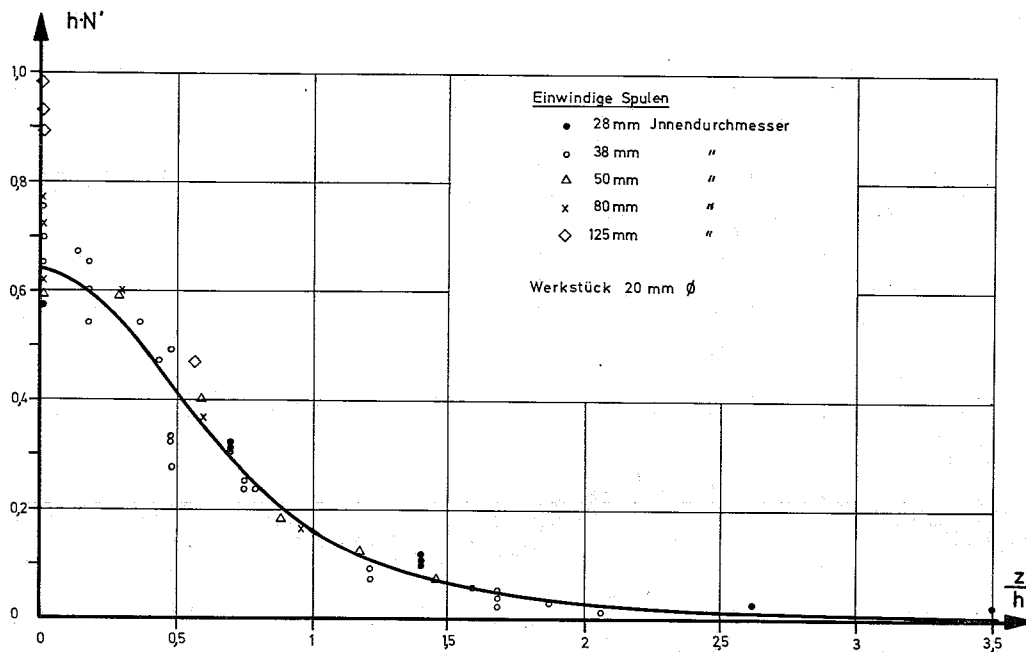


Bild 8: Ableitung der reduzierten Leistung von einwindigen Spulen mit Innendurchmessern von 28 bis 125 mm auf einem Stahlrohr von 20 mm Außendurchmesser und 0,9 mm Wandstärke in Abhängigkeit von der Entfernung von der Spulenmittelebene. Die Kurve ist nach Gleichung (7) berechnet

Fig. 8: Variation of the reduced power in the case of single-turn coils having inner diameters of 28 to 125 mm, on a steel tube (20 mm outer diameter, 0,9 mm wall thickness), as a function of the distance from the central coil plane. The curve is calculated according to equation (7)

Fig. 8: Variation de la puissance dans un tube en acier en fonction de la distance du plan central d'une bobine à une spire. Diamètres intérieurs de la bobine 28 mm à 125 mm, diamètre extérieur du tube 20 mm, épaisseur des parois du tube 0,9 mm. La courbe est établie à partir de l'équation (7)

Spulendurchmesser zu Werkstückdurchmesser aufgetragen. Die Aussage des vorigen Abschnittes über die Zunahme der Abweichungen mit wachsendem Spulendurchmesser wird bestätigt, und es zeigt sich hier, daß die Abweichungen zwischen Theorie und Experiment von der Windungszahl und der Länge der Spulen vergleichsweise nur wenig beeinflusst werden. Die Abweichungen zwischen Theorie und Experiment liegen bei 12 der untersuchten 14 Spulen unter 13% und betragen maximal 28%.

Ergebnisse an exzentrischen Anordnungen

Bei der einwindigen Spule mit 50 mm Innendurchmesser wurden nach dem kalorimetrischen Verfahren auch die Effekte studiert, die bei exzentrischer Anordnung von Spule und Werkstück auftreten. Die Gesamtleistung steigt bei exzentrischer Anordnung, und zwar um so mehr, je größer der Abstand von Spulen- und Werkstückachse wird (Bild 10).

Die experimentelle Anordnung entsprach der in Bild 11 skizzierten. Es sind eingetragen die auf die koaxiale Stellung normierten Leistungen, gewonnen an einem ungeteilten Rohr, und dazu für zwei Werte der Exzentrizität die mit dem ungeteilten Meßdorn gemessenen Leistungen. Sie bleiben aus den früher angegebenen Gründen hinter denen des ungeteilten Rohres zurück.

Die Leistungsdichte an der Rohroberfläche wird dabei natürlich vom Azimut abhängig. Sie ist an der engsten Stelle am größten und an der weitesten Stelle am kleinsten.

Bild 10: Anstieg der Gesamtleistung bei exzentrischer Anbringung der Spule in Abhängigkeit von der Exzentrizität e nach Messungen mit dem Leistungsmeßdorn. Zur Anordnung von Spule und Werkstück siehe auch Bild 11

Fig. 10: Increase of the total power with eccentric disposition of the coil as a function of the eccentricity e according to measurements carried out with a power measuring device. Comp. fig. 11 for disposition of coil and work piece

Fig. 10: Augmentation de la puissance totale dans le cas de la position excentrique de la bobine, en fonction de l'excentricité e , selon les mesures effectuées à l'aide d'un dispositif de mesure de la puissance. Comp. la fig. 11 pour la disposition de la bobine et de la pièce à traiter

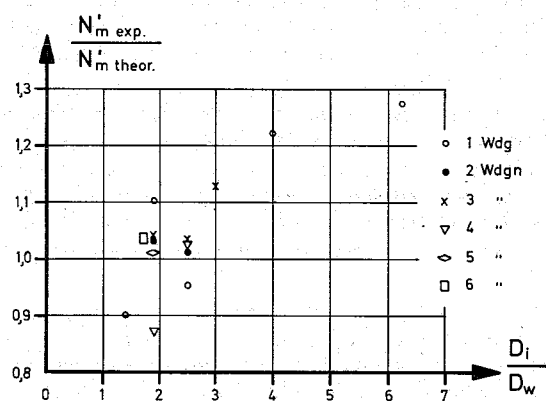
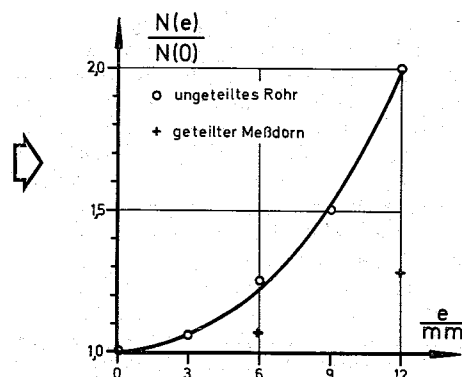


Bild 9: Verhältnis der gemessenen Werte der Ableitung der reduzierten Leistung in der Mittelebene zu den gerechneten Werten für alle untersuchten Spulen in Abhängigkeit Verhältnis des Spulendurchmessers zum Werkstückdurchmesser

Fig. 9: Ratio of the values measured to those calculated for the variation of the reduced power in the central plane (for all coils examined) as a function of the ratio of inner coil diameter to work piece diameter

Fig. 9: Rapport entre les valeurs mesurées de la variation de la puissance dans le plan central et les valeurs calculées, pour toutes les bobines examinées, en fonction du rapport entre le diamètre intérieur de la bobine et le diamètre de la pièce à traiter



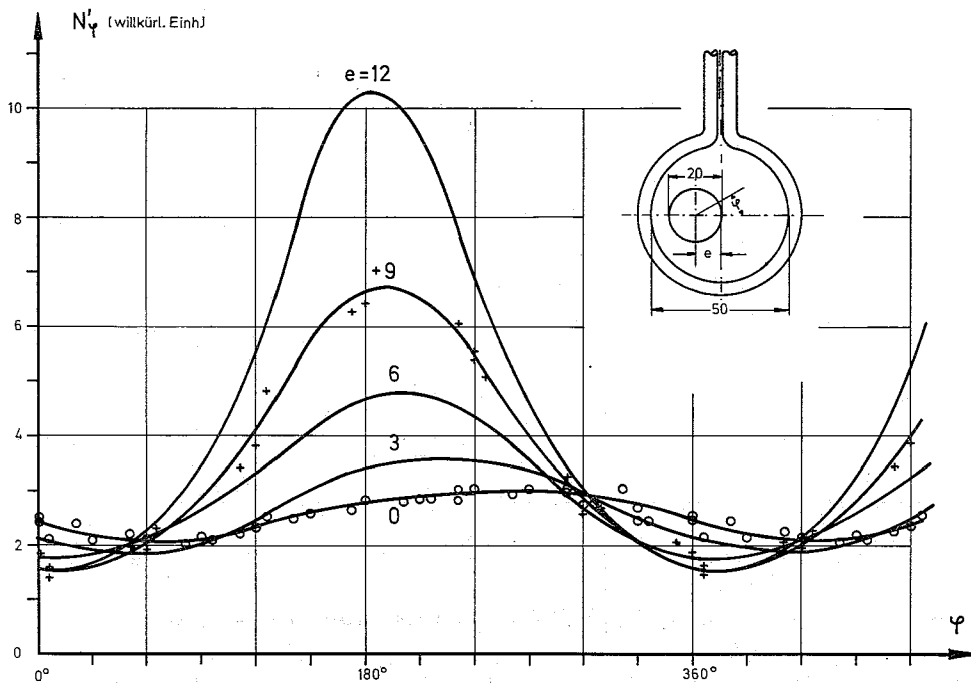


Bild 11: Relative Leistungsdichte in willkürlicher Einheit auf einem ungeteilten Rohr in der Mittelebene einer einwindigen, koaxial bzw. exzentrisch angeordneten Spule in Abhängigkeit vom Azimutwinkel. Die Schwankungen bei der Exzentrizität 0 werden von den Stromzuführungen zur Spule verursacht. Die Kurven interpolieren die Meßwerte. Der besseren Übersichtlichkeit wegen sind diese nur für die Exzentrizitäten (0) und 9 mm eingetragen

Fig. 11: Relative power density (arbitrary unit) on a tube in the central plane of a single-turn coil in coaxial and eccentric disposition resp. as a function of the azimuth angle. The fluctuations occurring with eccentricity = 0 are caused by the coil current supply lines. The curves show the interpolation of the measured values which are given only for eccentricities 0 and 9 mm

Fig. 11: Densité de puissance relative en unités arbitraires sur un tube placé dans le plan central d'un inducteur à une spire, coaxial ou excentrique. Les variations constatées pour une excentricité = 0 sont causées par les lignes d'amenée du courant à l'inducteur. Les courbes donnent une interpolation des valeurs mesurées. Dans le souci d'une plus grande clarté, celles-ci ne sont indiquées que pour les excentricités 0 et 9 mm

In Bild 11 sind die mit dem ungeteilten Rohr gemessenen relativen Leistungsdichten in der Spulenebene über dem Azimut für die zentrierte Lage und für vier verschiedene Exzentrizitäten aufgetragen. Alle fünf Kurven sind experimentell ermittelt, die Meßpunkte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit jedoch nur an der Kurve für den zentrierten Fall und für die Exzentrizität 9 mm eingetragen.

Es zeigt sich, daß bereits die Kurve für den koaxialen Fall eine Welligkeit von etwa 30% aufweist. Das Minimum der Leistungsdichte wird gemessen, wenn das Thermoelement unter den Spulenanschlüssen steht. Es wird vermutet, daß dieser Effekt kleiner werden würde, wenn man eine Spule verwenden würde, die einen geschlossenen Kreisstrom besser annähert.

Das Bild zeigt weiter eine mit zunehmender Verlagerung aus der Mitte wachsende Welligkeit der azimuthalen Verteilung. Die Minima der Leistungsdichte nehmen mit wachsender Exzentrizität wegen des wachsenden Abstands des Werkstücksaphels zur Spule geringfügig ab. Dagegen wachsen die Maxima recht stark an, was zu der in Bild 10 gezeigten Leistungszunahme führt. Maxima und Minima der Kurven verschieben sich geringfügig, da bei der im Experiment durchgeführten Verschiebung des Rohres senkrecht zu den Spulenanschlüssen die Extremwerte (z. B. die Richtung zu den Spulenanschlüssen) bei jeweils geringfügig anderen Werten des Azimutwinkels auftreten.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Überblick über die theoretischen und experimentellen Untersuchungen zur axialen Verteilung der elektrischen Feldstärke auf induktiv erwärmten Rohren und Stäben gegeben. Die Ergebnisse von Rechnungen zur axialen Verteilung der reduzierten Wärmeleistung, die mit einer einfachen Theorie gewonnen wurden, werden angegeben. An 14 verschiedenen Spulen wurden die axialen Verteilungen der Wärmeleistung nach einer rein elektrischen und einer kalorimetrischen Methode gemessen. Die Meßergebnisse weichen von den theoretischen Ergebnissen nur selten um mehr als 10% ab. Die größeren Abweichungen werden damit erklärt, daß in diesen Fällen im Experiment die Bedingungen, unter denen die einfache Theorie abgeleitet worden war, nicht erfüllt waren. Auch bei exzentrischer An-

ordnung von Spule und Werkstück wurden Messungen ausgeführt. Die relative Leistungszunahme mit dem Achsenversatz und die azimuthale Verteilung der Leistungsdichte werden angegeben.

SCHRIFTTUM

- [1] Dorner, S., Reiß, F., Schretzmann, K.: Experimentelle Untersuchungen an natriumgefüllten Heat-Pipes. KFK 512, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe, 1967
- [2] Schretzmann, K.: The Effect of Electromagnetic Fields on the Evaporation of Metals. Physics Letters 24 A (1967), S. 478/9
- [3] Ulrich, M., Glaubitz, H.: Stand der Induktionshärtung von Zahnrädern. VDI-Zeitschrift 91 (1949), S. 577/83
- [4] Curtis, F. W.: High Frequency Induction Heating. McGraw-Hill Book Comp., New York, 1950
- [5] Babat, G., Losinsky, M.: Heat Treatment of Steel by High-Frequency Currents. J. Inst. Electr. Eng. 86 (1940), S. 161/8
- [6] Brunst, W.: Induktive Wärmebehandlung. Springer-Verlag, Göttingen, 1957
- [7] Buchholz, H.: Das Magnetfeld der Wirbelströme in einem elektrischen Induktionsofen und andere daraus ableitbare Wirbelstromfelder. Arch. Elektrotechnik 43 (1958), S. 355/75
- [8] Hannakam, L.: Abschirmung von Zylinderspulen. Elektrotechn. Zeitschr.-A 87 (1966), S. 227/32
- [9] Kolbe, E., Reiss, W.: Eine Methode zur numerischen Bestimmung der Stromdichteverteilung in induktiv erwärmten Körpern unterschiedlicher geometrischer Form. Wissenschaftl. Zeitschr. der Hochschule für Elektrotechn. Ilmenau 9 (1963), S. 311/7
- [10] Reiss, W.: Die Berechnung induktiver Arbeitskreise mit Hilfe von Ziffernrechenmaschinen. IX. Internat. Koll. TH Ilmenau, Vortragsr. Elektrowärme, 1964, S. 41/6
- [11] Rüdénberg, R.: Die Ausbreitung der Erdströme in der Umgebung von Wechselstromleitungen. Zeitschr. Ang. Mathematik und Mechanik 5 (1925), S. 362/89
- [12] Buchholz, H.: Die wechselstromgespeiste Spule endlicher Wicklungshöhe mit unendlich langem metallischem Kern. Arch. Elektrotechnik 28 (1934), S. 27/50
- [13] Pollaczek, F.: Über das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfachleitung. Elektr. Nachrichtentechnik 3 (1926), S. 339/59
- [14] Carson, J. R.: Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System. Techn. Journ. 5 (1926), S. 539/54
- [15] Jabbusch, G.: Induktive Oberflächen- und partielle Erwärmung von Eisen und Metallen. Elektrotechn. Zeitschr.-B 8 (1956), S. 52/3

Summary

The present article gives a survey of theoretical and experimental investigations in the problem of the axial distribution of the electrical field lines on tubes and rods heated by induction. Calculation results are indicated, obtained on the basis of a simple theory for the calculation of the axial distribution of the reduced heating power. Measuring tests

were conducted on 14 different inductor coils in order to determine this distribution, using a purely electrical as well as a calorimetric method. The measuring results rarely differ by more than 10% from the calculated results. More important divergences are explained by stating that in these cases the conditions underlying the simple theory were not fulfilled in the experiment. Measurements were also carried out with coil and work piece in eccentric disposition. The relative power increase resulting from the axis displacement and the distribution of the power density in the azimuth are indicated as well.

Résumé

Dans ce rapport, les auteurs donnent un aperçu des études théoriques et expérimentales faites sur la répartition axiale

de l'intensité du champ électromagnétique sur des tubes et des barres chauffés par induction. Ils donnent les résultats de calculs de la répartition axiale de la puissance de chauffage obtenus en partant d'une théorie simple. La répartition axiale de la puissance de chauffage a été mesurée sur 14 inducteurs différents suivant une méthode purement électrique et suivant une méthode calorimétrique. Les résultats de mesure ne diffèrent que très rarement de plus de 10% des résultats théoriques. Selon les auteurs, les divergences plus importantes sont dues au fait que dans ces cas les conditions sur lesquelles est basée la théorie, n'ont pas été remplies dans les essais. On a également procédé à des mesures dans les dispositions excentrées de la pièce par rapport à la bobine. Les auteurs indiquent l'accroissement relatif de la puissance dû au déplacement de l'axe ainsi que la répartition de la densité de la puissance dans tous les azimuts.