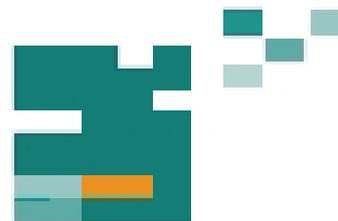


**51. IWK**  
Internationales Wissenschaftliches Kolloquium  
International Scientific Colloquium



**PROCEEDINGS**

**11-15 September 2006**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND  
ELECTRICAL ENGINEERING -  
DEVICES AND SYSTEMS,  
MATERIALS AND TECHNOLOGIES  
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

## Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische  
Angelegenheiten  
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Susanne Jakob  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):  
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht  
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):  
Universitätsbibliothek Ilmenau  
[ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

J. Kožený, D. Rot

## **Möglichkeiten zur Effizienzerhöhung beim HF-Kochen**

### **7. Schmelzen und Erwärmen im elektromagnetischen Feld (induktive, dielektrische Verfahren und Mikrowellen)**

Die Autoren befassen sich mit der Problematik der möglichen Effizienzerhöhung beim Hochfrequenzkochen. Einsatz der HF-Erwärmung im Vergleich zur indirekten Widerstandserwärmung und der Gaserwärmung bringt einige Vorteile – unter anderem in der Geschwindigkeit und in der Sicherheit.

Theoretisch handelt es sich um eine Realisation der Prinzipien der induktiven Erwärmung von ferromagnetischem Einsatz im elektromagnetischen Hochfrequenzfeld. Die Erwärmung einer im Boden der rostfreien Kochgefäße eingesetzten ferromagnetischen Einlage entsteht unter der Wirkung von eininduzierten Strömen.

An einem realen Modell wurden die Ergebnisse einer numerischen Simulation verifiziert und die angewandte Methode kann zur Optimierung der Konstruktionen des Bodens der Kochgefäße als Funktion des Materials, der Frequenz und der Geometrie ausgenutzt werden. Im realen Modell hat man eine nicht übliche Konstruktion des Induktorem angewendet. Die Ergebnisse zeigen anschaulich z. B. die Verläufe der Jouleschen Wärme in der Bodeneinlage, des Temperaturfeldes im Boden, und eine noch dichter schließenden elektromagnetischen Kopplung, wirksamere Anordnung des Induktor-Einsatzes.

Im Beitrag werden die Einzelheiten über die Theorie, über Methoden der numerischen Berechnungen, über die Problematik der materiellen und geometrischen Konstruktion der Kochgefäße und über Resultate des Vergleiches zu anderen Wärmequellen vorgestellt.

## Das Prinzip des Induktion-Kochens

Bei Induktion ist es möglich beliebig elektrisches Material zu erwärmen. Die Realisierbarkeit oder Unrealisierbarkeit, beziehungsweise Effektivität hängt von den Materialeigenschaften des zu erwärmenden Metalls ab und auch von elektrischen Parametern des gesamten Aufbaus (Induktor- Einsatz). Viel hängt auch von der Ausführung des Induktors ab. Auf Grund oben genannter Fakten kann man den Weg zu größerer Effektivität finden bei:

1. der Stromquelle
2. der Ausführung des Induktors
3. der Ausführung des Kochgefäßes

Ad. 1. In diesem Artikel werden wir uns nicht mit dieser Möglichkeit befassen.

Ad. 2. Bei der Induktor-Ausführung kann man vor allem davon ausgehen:

Die Auswahl des Induktor-Materials – weil es nötig ist, die Verluste in dem Induktor maximal zu reduzieren, muss man das Material mit der höchsten elektrischen Leitfähigkeit auswählen, deshalb benutzt man vor allem Cu.

Weiter ist es nötig über die Induktor-Ausführung von der Seite des Leiters nachzudenken. Hier haben wir zwei Möglichkeiten. Wir können einen Induktor benutzen, der mit Flüssigkeit gekühlt wird oder HF- Litze.

Wichtig ist es auch darüber nachzudenken, wie viele Spulenwicklungen verwendet werden. Wir müssen so viele Spulenwicklungen auswählen, dass wir die größte Leistung vom Netz nach dem Einsatz übertragen. Aber sicher können wir nicht sagen, je mehr Spulenwicklungen wir benutzen, desto mehr Leistung werden wir übertragen, weil bei mehr Spulenwicklungen die Impedanz auch wachsen wird. Wir müssen auch darüber nachdenken, dass wenn wir den Ferrit (magnetisch Konzentrador) benutzen, die Impedanz auch wachsen wird. Die Impedanz wird auch vom Kochgefäß beeinflusst.

Weiter ist es nötig den Induktor abzuschirmen. Abschirmen können wir mit dem Ferrit Konzentrador, oder mit einer elektrisch leitfähigen Wand. Bei Benutzung vom Ferrit Konzentrador wird die Effektivität der Erwärmung wachsen und das Streufeld wird begrenzt. Bei Benutzung der elektrisch leitfähigen Wand kann die Effektivität sinken, aber das Streufeld wird auch begrenzt. Wir müssen alle solchen Geräte gut abschirmen, weil es aus der Sicht EMC und auch hygienischen Normen wichtig ist.

Ad. 3. Ausgewähltes Kochgefäß Material hat großen Einfluss auf die Effektivität des Erwärmens. Dafür ist es zuerst nötig, spezifiziert den Bereich des verwendbaren Kochgefäßes und dieser Bereich wählt dann die Stromquelle und den Induktor aus. Gewöhnlich wählen wir Kochgefäßmaterialien für die Stromquellen die im Frequenz Bereich 20 – 40 KHz arbeiten. Aus diesem Frequenzbereich fließt die Notwendigkeit auf ferromagnetisches Material.

Am meisten benutztes Material des Kochgefäßes ist rostfreier Stahl, aber der ist nicht ferromagnetisches Material. Moderne Trends bei Kochgefäßen benutzen einen so genannten Sandwich-Boden. Davon spricht man, wenn innere und äußere Mantelfläche aus rostfreiem Stahl besteht und der Innenraum ausgefüllt ist mit Metall mit großer Wärmeleitfähigkeit (Al, Cu), sodass die Temperatur sich gleichförmig am Boden des Kochgefäßes verteilt. Diese guten Wärmeleitfähigkeiten der Materialien sind aber nicht ferromagnetisch und deshalb muss man noch ein ferromagnetisches Material hineingeben, oft ist das Stahl oder Fe. Dann entstehen in diesem Material die Verluste (Nutzwärme) und die werden durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Materials im Inneren des Kochgefäßes verwaltet.

Induktions-Kochen wird auf dem Prinzip der induktiven Erwärmung realisiert, Absorption von elektromagnetischem Wellengang von elektrisch leitenden Teilen des Kochgefäßes. Dieser Teil repräsentiert das ferromagnetische Pass-Stück im Inneren des Bodens des Kochgefäßes. Die Bedingung für schnelle und effektive Erwärmung des Bodens des Kochgefäßes ist die Applikation der geeigneten Frequenz in Abhängigkeit von der Dicke des ferromagnetisches Pass-Stückes und auch ihrer elektrischen Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit, relative Permeabilität) und auch von der Ausführung des Induktors und Konstruktion des Kochgefäßes. Frequenzbereich für induktives Kochen ist zwischen 20 KHz und 40 KHz. Die Effektivität des induktiven Kochens kann man mit der Stromquelle (Leistung, Frequenz), mit der Induktor-Ausführung und auch mit der Kochgefäß-Ausführung beeinflussen.

Vorschlag des effektiven Aufbaus wird ausgeführt durch die PC Simulation mit Benutzung der professionellen Programme ANSYS und RILLFEM. Das Ziel der ausgeführten Simulation wird sein, die vorteilhafteste Ausführung des Induktor und die optimale Ausführung des Kochgefäßes festzulegen.

## Der Vergleich der Vorteilhaftigkeit vom Standpunkt der Form des Induktors

Hier sind zwei verschiedene Möglichkeiten der Ausführung des Induktors abgebildet, realistisches und PC Modell, welche weiter verglichen werden.

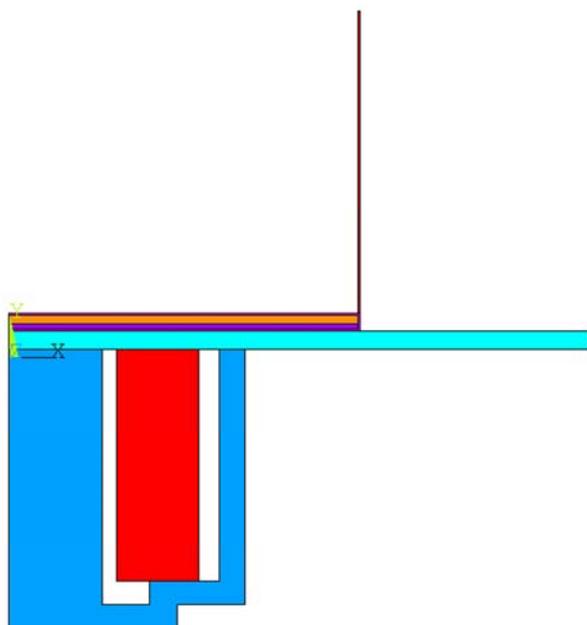


Bild 1. Aufbau mit klassischem Induktor  
(Ferrit, Kupfer, Glas-Keramik,  
rostfreier Stahl, Stahl, Aluminium)

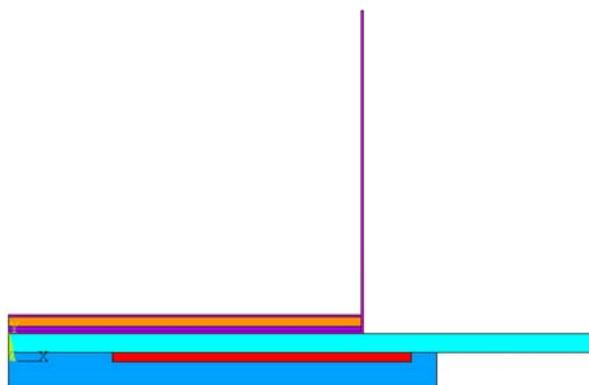


Bild 2. Aufbau mit flachem Induktor  
(Ferrit, Kupfer, Glas-Keramik,  
rostfreier Stahl, Stahl, Aluminium)



Bild 3. Echter Induktor



Bild 4. Echter Induktor

### Variante mit klassischem Induktor

In diesem Fall wurde ein klassischer Induktor mit dem ferromagnetisch Konzentrador des magnetischen Flusses bedacht. Mit Hilfe dieses Induktors wurde der Stahl-Einsatz erwärmt. Die nachfolgenden Bilder zeigen Resultate des elektromagnetischen Feldes und des Temperaturfeldes. Der Induktor wurde von einem mittleren Frequenzwandler mit der Frequenz 10 KHz, Strom 40 A (30 Spulenwicklungen aus HF-Litze) versorgt, Induktion des Aufbau Induktors – Einsatz war 111  $\mu\text{H}$ , Die Leistungsaufnahme aus dem Netz war 1550 W, die simulierte übergebene Leistung im Einsatz war 1150 W.

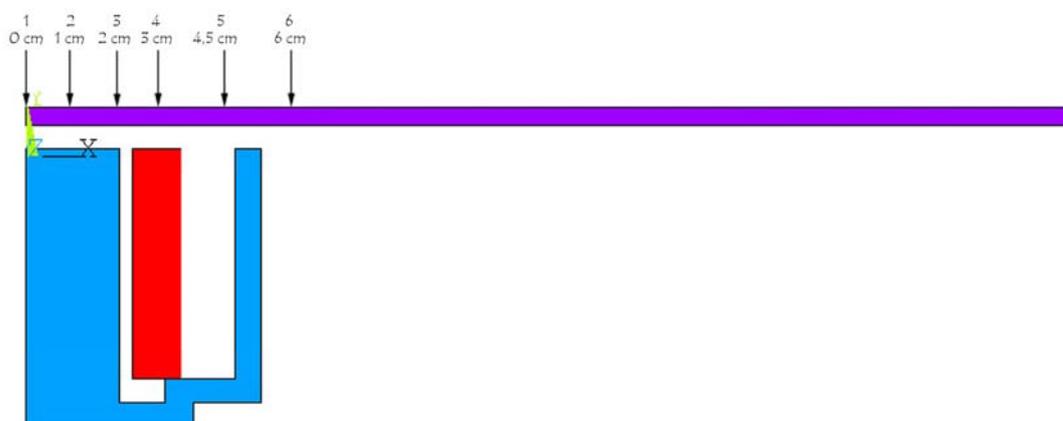


Bild 5. Getesteter Aufbau mit klassischem Induktor (Ferrit, Kupfer, Stahl)

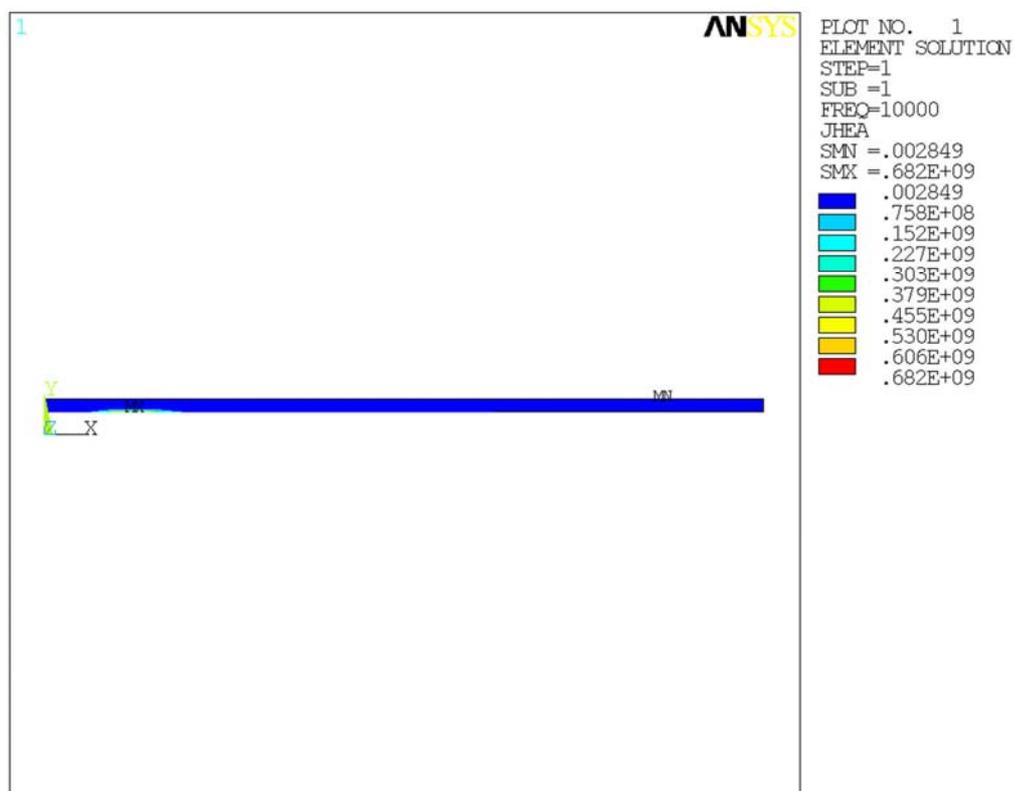


Bild 6. Anordnung der Verluste des Stahl-Eins. bei Verwendung des Induktors [W.m<sup>-3</sup>]

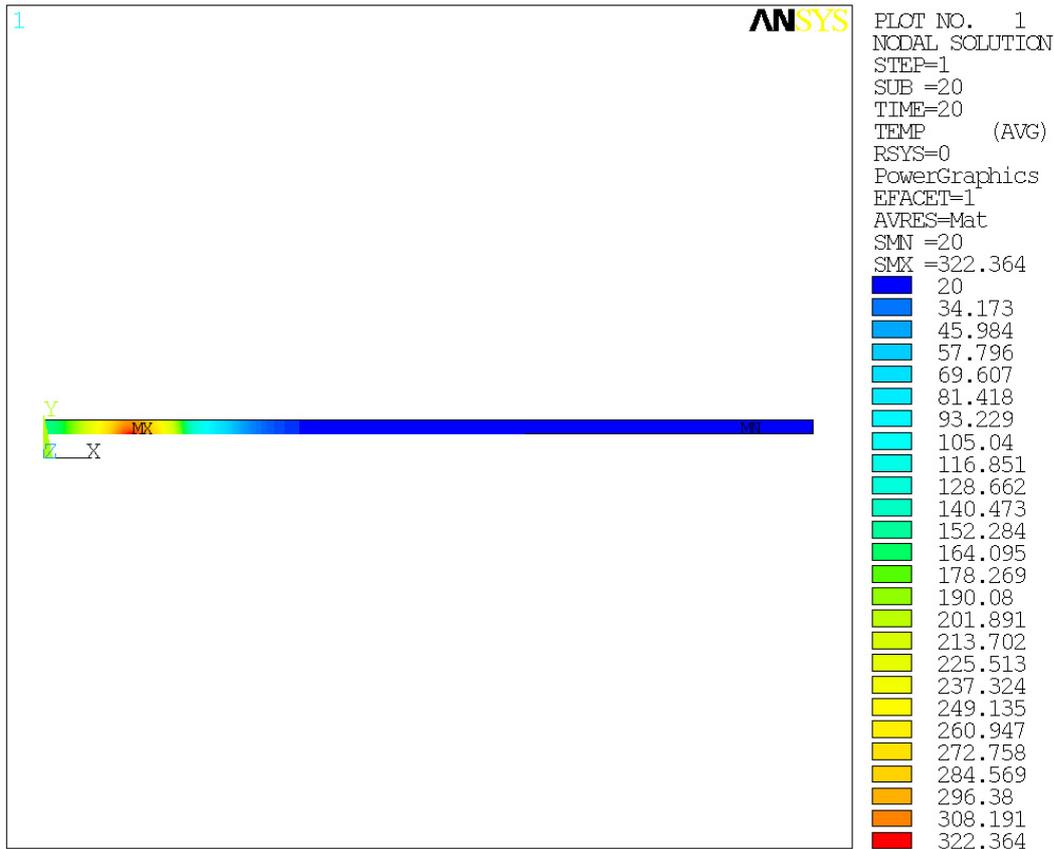


Bild 7. Temperatur-Anordnung des Stahl-Einsatzes [°C]

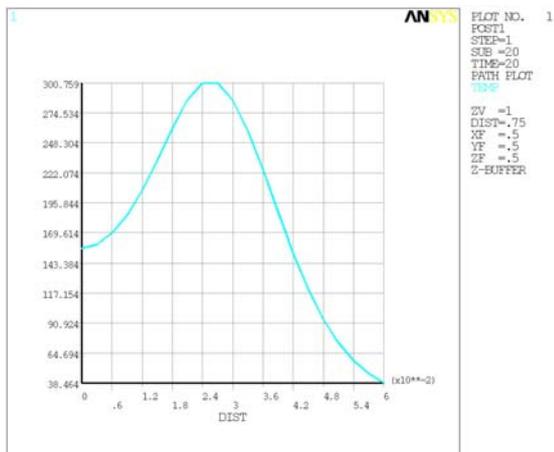


Bild 8. Temperatur-Anordnung an der Oberfläche des Stahl-Einsatzes [°C, m]

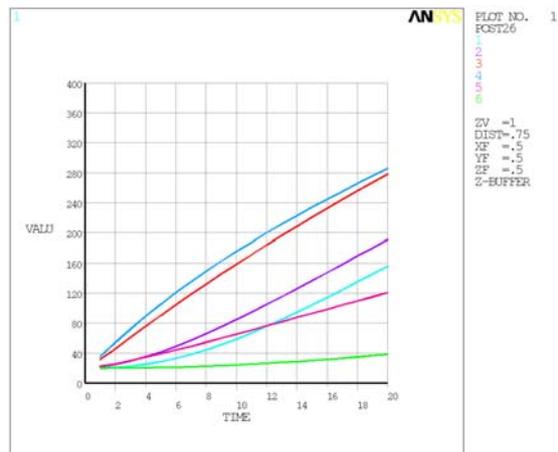


Bild 9. Temperatur-Aufbau im Zeitverlauf in Punkten markiert auf Bild 5. 1-6 [°C, s]

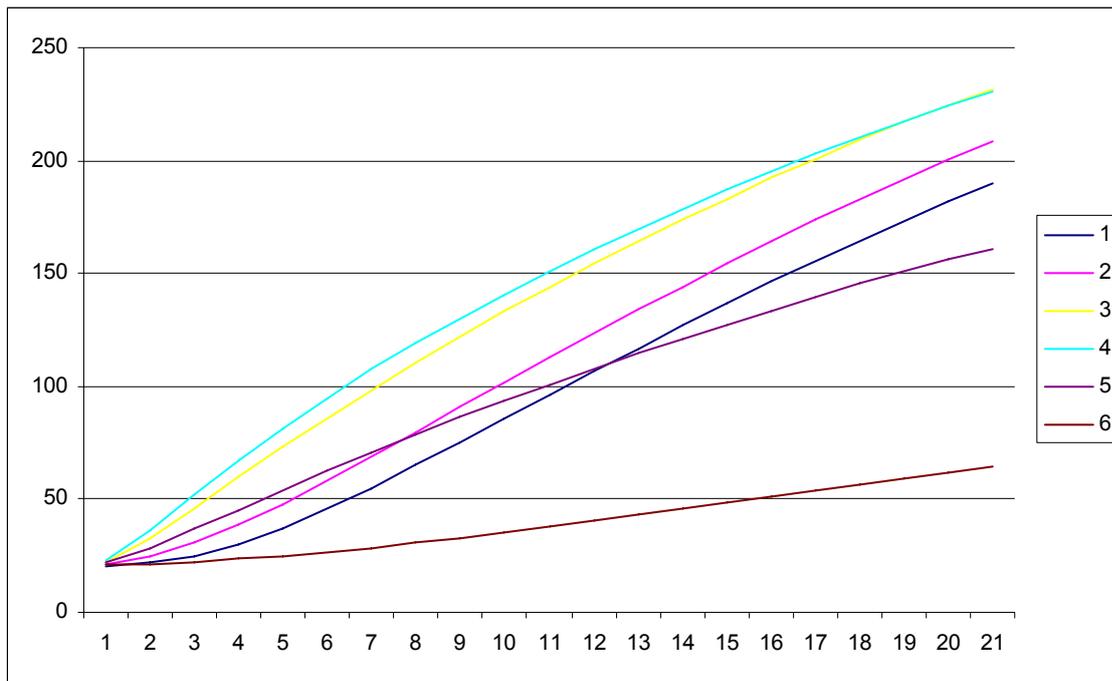


Bild 10. Wirklich gemessene Werte eines realen Einsatzes in Punkten markiert auf Bild 5. 1-6 [°C, s]

In diesem Fall verlief die Simulation und auch die Messung auf realem Objekt, aus Resultaten ist es möglich sich eine Vorstellung der Entwicklung des Temperaturfeldes im Einsatz. Aus dem Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Resultate ist sichtbar, dass sich die Differenzen innerhalb der Toleranz bewegen.

### Die Variante mit dem flachen Induktor

In diesem Fall wurde ein flacher Induktor mit dem ferromagnetisches Konzentrador des magnetisches Flusses bedacht. Mit diesem Induktor wurde der Stahl-Einsatz erwärmt. Die nachfolgenden Bilder zeigen Resultate des elektromagnetischen Feldes und des Temperaturfeldes. Induktor wurde von einem mittleren Frequenzwandler mit der Frequenz 10 KHz, Strom 40 A (30 Spulenwicklungen aus HF-Litze) versorgt, Induktion des Aufbau Induktor – Einsatzes war 111  $\mu$ H, die simulierte übergebene Leistung im Einsatz war 920 W.

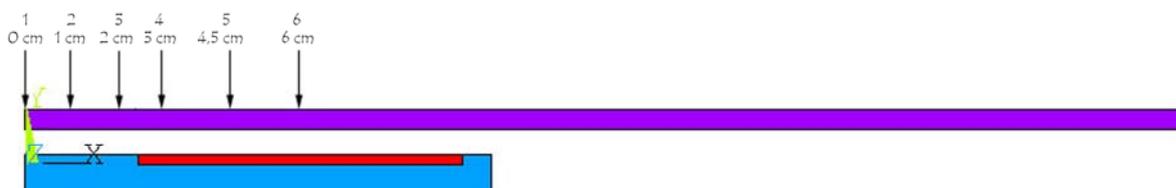


Bild 11. Aufbau mit flachem Induktor (Ferrit, Kupfer, Stahl)

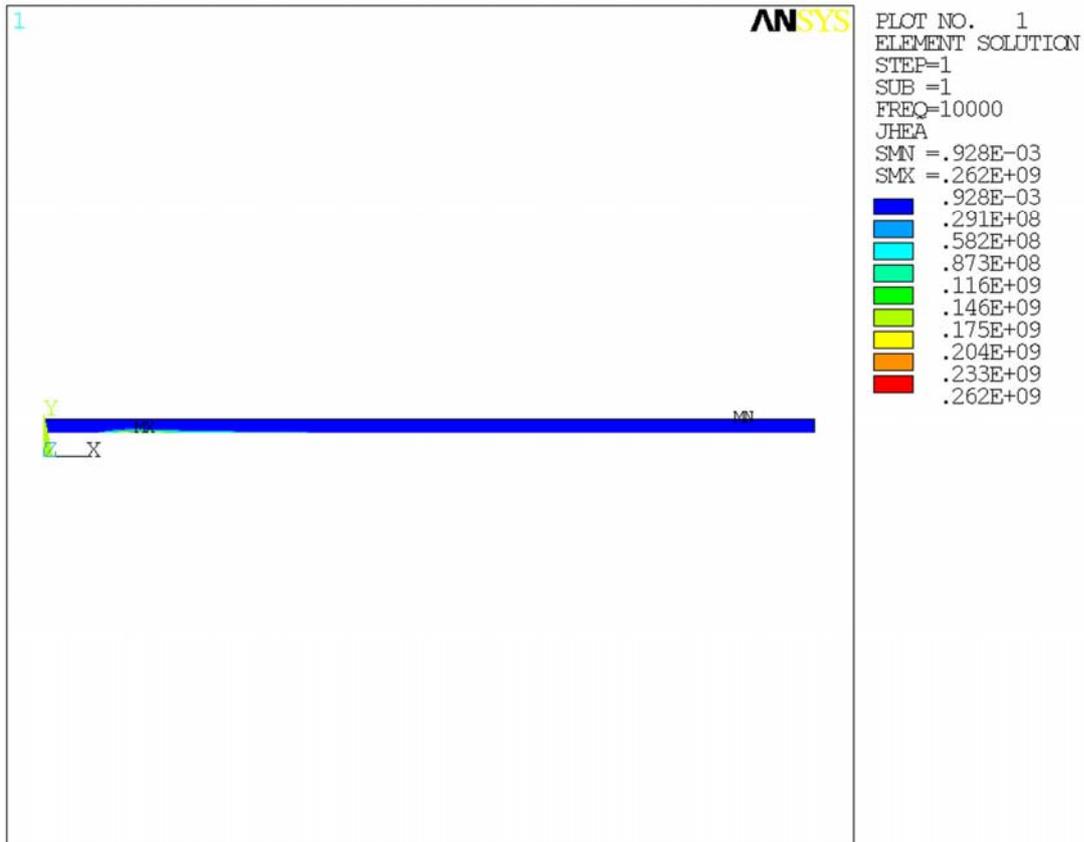


Bild 12. Anordnung der Verluste im Stahl-Einsatz [ $W \cdot m^{-3}$ ]

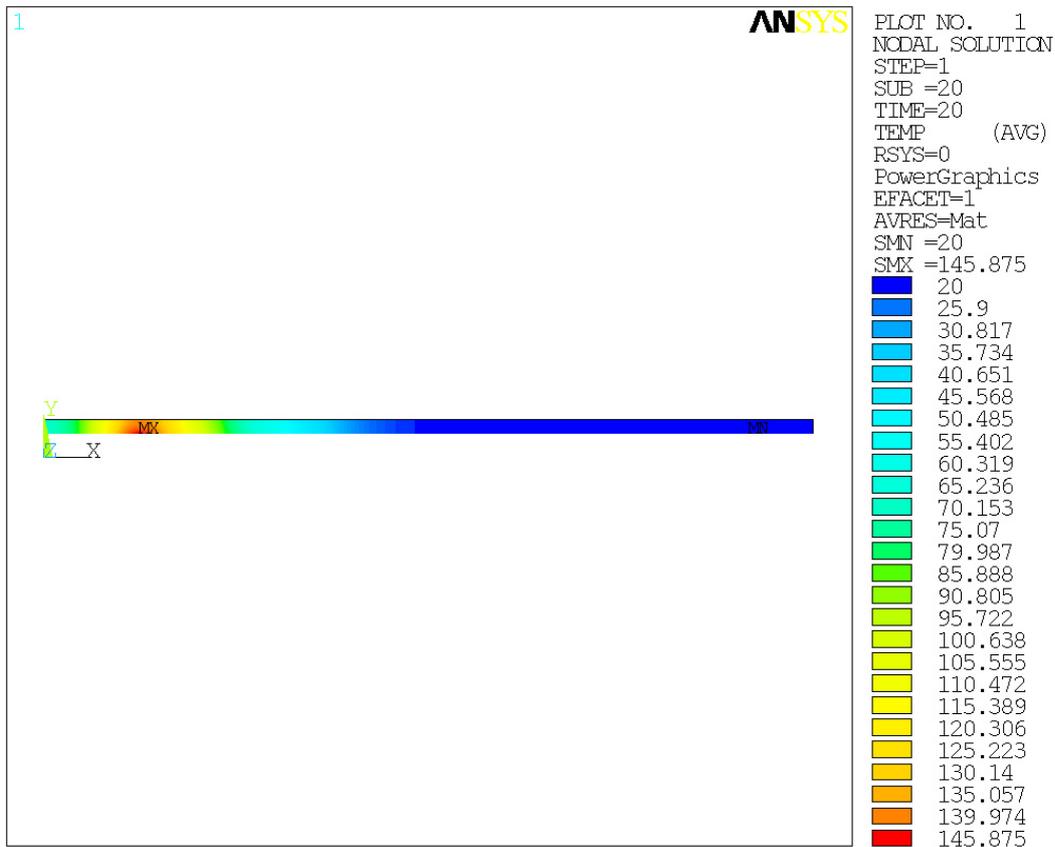


Bild 13. Temperatur-Anordnung im Stahl-Einsatz [ $^{\circ}C$ ]

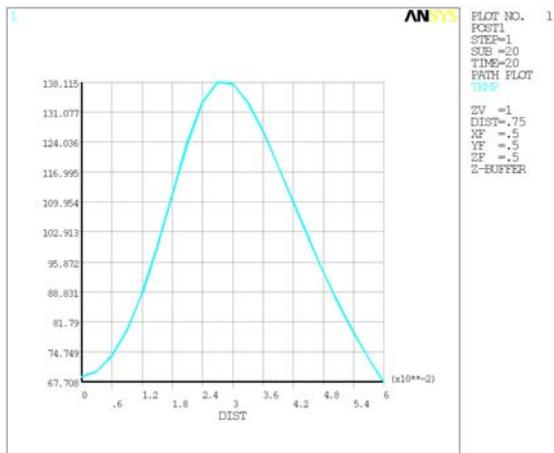


Bild 14. Temperatur-Anordnung an der Oberfläche des Stahl-Einsatzes [°C, m]

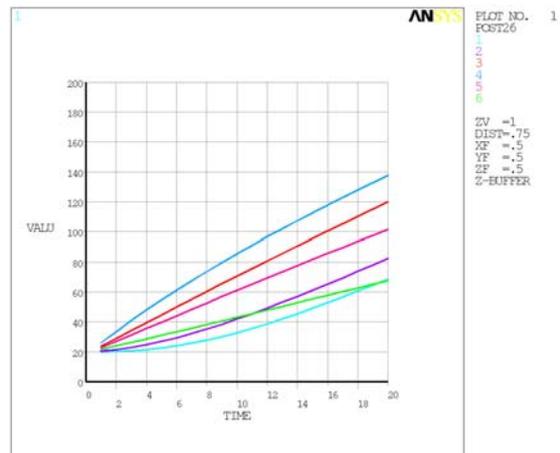


Bild 15. Temperatur-Aufbau im Zeitverlauf in Punkten markiert auf Bild 11. 1-6 [°C, s]

Diese Variante wurde nur simuliert, aber das Modell dieser Variante kommt aus modifizierter vorheriger Simulation, die verifiziert wurde.

Erhaltene Resultate aus der Simulation mit beiden Möglichkeiten dient zum Erwerb der grundlegenden Vorstellung der Induktor-Form auf das Temperaturfeld im Einsatz. Erster Aufbau ermöglichte die Bildung höherer totaler Verluste im Einsatz, aber gleichzeitig Ungleichmäßigkeiten im Aufbau des Temperaturfeldes im erwärmten Einsatz. Im Gegensatz dazu führte der Aufbau mit dem flachen Induktor zu kleineren Verlusten, aber Gleichmäßigkeit im Aufbau des Temperaturfeldes im Einsatz.

### **Beeinflussung des erwärmten Materials auf die Anordnung des Temperaturfeldes an seiner Oberfläche**

In diesem Fall wurde nur die Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit des Einsatzes auf die Anordnung des Temperaturfeldes an seiner Oberfläche für beide Induktoren getestet.

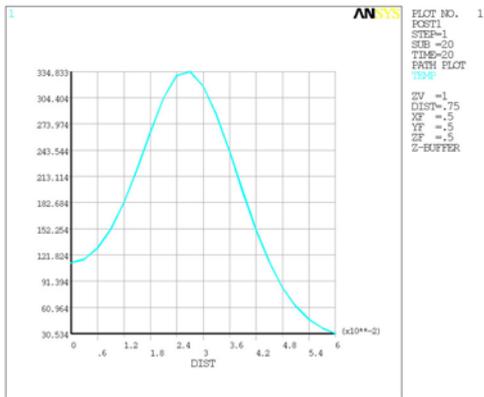


Bild 15. Klassischer Induktor [ $^{\circ}\text{C}$ , m]  
 $\lambda = 16 [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

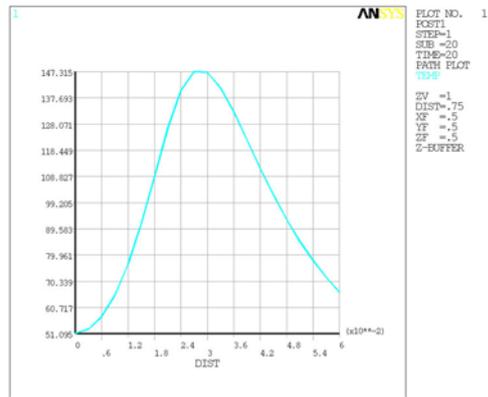


Bild 16. Flacher Induktor [ $^{\circ}\text{C}$ , m]  
 $\lambda = 16 [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

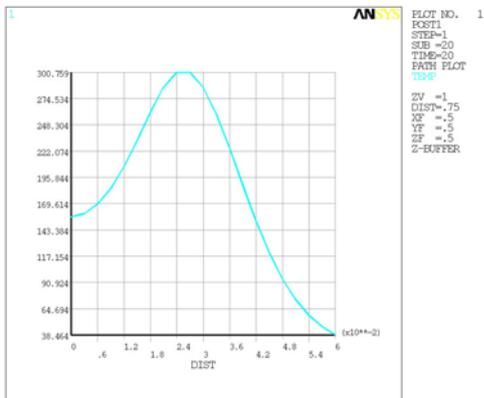


Bild 17. Klassischer Induktor [ $^{\circ}\text{C}$ , m]  
 $\lambda = 26 [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

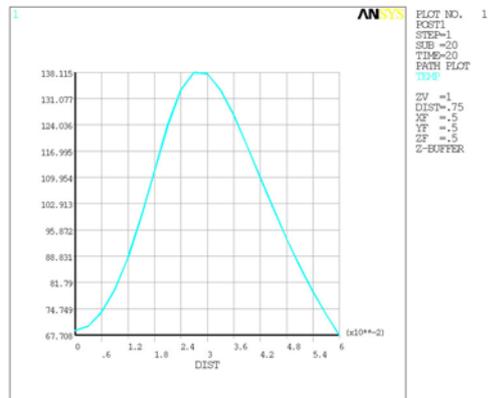


Bild 18. Flacher Induktor [ $^{\circ}\text{C}$ , m]  
 $\lambda = 26 [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

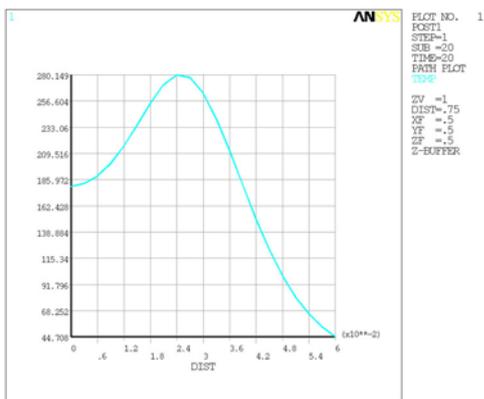


Bild 19. Klassischer Induktor [ $^{\circ}\text{C}$ , m]  
 $\lambda = 36 [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

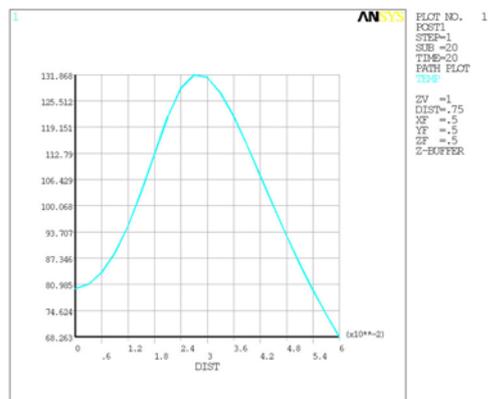


Bild 20. Flacher Induktor [ $^{\circ}\text{C}$ , m]  
 $\lambda = 36 [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$

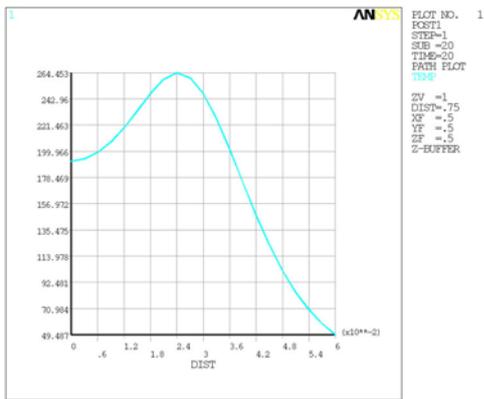


Bild 21. Klassischer Induktor [°C, m]  
 $\lambda = 46 \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

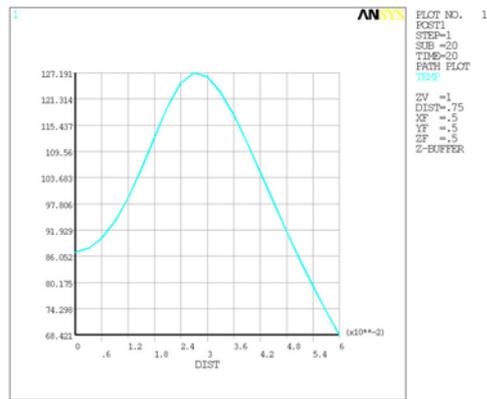


Bild 22. Flacher Induktor [°C, m]  
 $\lambda = 46 \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

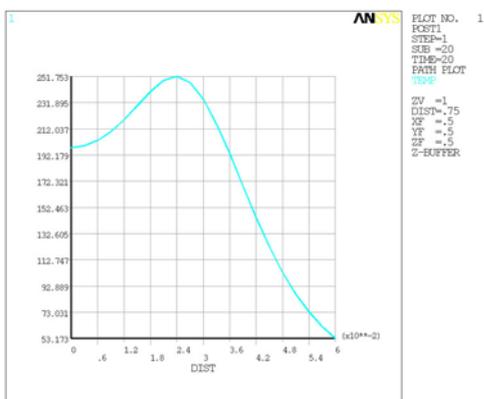


Bild 23. Klassischer Induktor [°C, m]  
 $\lambda = 56 \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

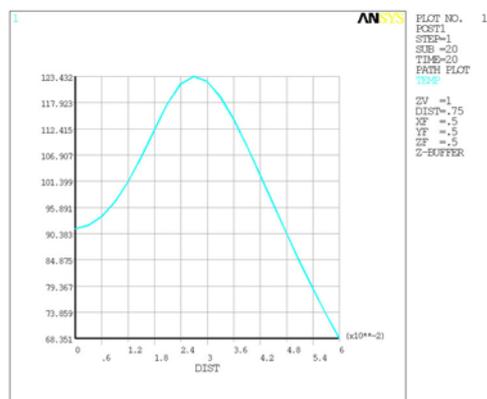


Bild 24. Flacher Induktor [°C, m]  
 $\lambda = 56 \text{ [W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$

Die größte Beeinflussung auf die Anordnung des Temperaturfeldes, vor allem auf die Verluste wird die elektrische Leitfähigkeit und Permeabilität haben. Hier haben wir nur die Beeinflussung des Temperaturfeldes von der Wärmeleitfähigkeit getestet.

### Schlussfolgerung

Alle hier präsentierten Resultate sind nur partikular und dienen zur Einleitung in der Problematik des Induktions-Kochens. Mit dieser Problematik werden wir weiter arbeiten. Das Resultat dieser Arbeit soll eine konkrete Empfehlung für die Konstruktion von Induktions-Kochern und Induktions-Kochgefäßen sein.

**References:**

[1] [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

[2] [www.rilfem.com](http://www.rilfem.com)

[3] MAYER, D.: Teorie elektromagnetickeho pole, ZCU Plzen 2001

**Authors:**

Prof. Dipl.-Ing. Jiří Kožený, CSc.

Dipl.-Ing. David Rot

University of West Bohemia in Pilsen, Department of electric power engineering, Univerzitni 26  
306 14, Pilsen

Phone: +420 377 634 345

Fax: +420 377 634 301

E-mail: [kozyeny@kee.zcu.cz](mailto:kozyeny@kee.zcu.cz)