

# FINITE ELEMENTE MODELLIERUNG DER INDUKTIVEN ERWÄRMUNG HYBRIDER STAHL-ALUMINIUM BAUTEILE

Bernd-Arno Behrens, Dirk Odening, Florian Holz, Klaus-Georg Kosch\*

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

\*Korrespondenzautor:

Dipl.-Ing. Klaus-Georg Kosch  
Abteilung Massivumformung

Tel: 0511-762 4958, Fax: 0511-762 3007

[kosch@ifum.uni-hannover.de](mailto:kosch@ifum.uni-hannover.de)

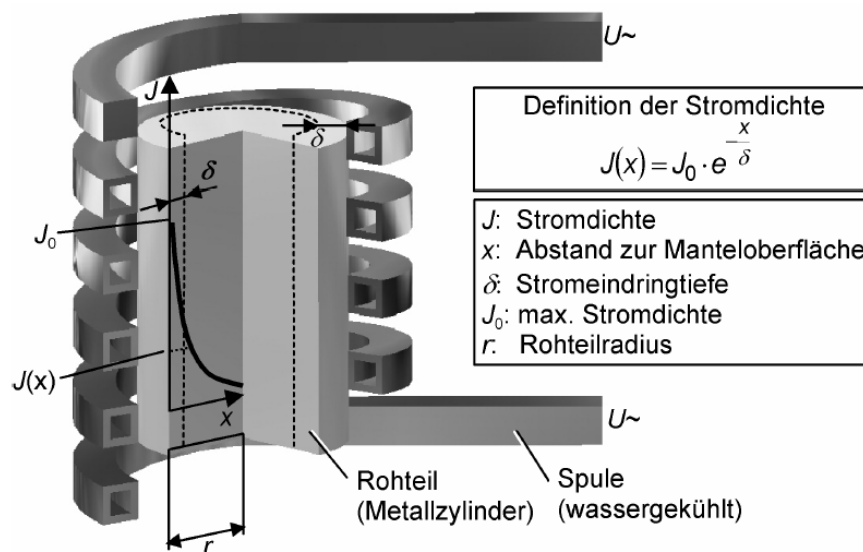
*In der vorliegenden Arbeit wird die induktive Erwärmung hybrider Stahl-Aluminium Bauteile mittels der FE-Simulation untersucht. Dabei wird eine neue Methode zur Realisierung von zwei unterschiedlichen Temperaturbereichen in einem einzigen Erwärmungsprozess vorgestellt. Ein Luftspalt wirkt als Isolator und trennt die beiden Werkstoffe thermisch von einander. Durch die Möglichkeit die Materialeigenschaften in der Simulation an die jeweiligen Bedürfnisse anzupassen, kann das aufgestellt FE-Modell auch für weitere Werkstoffe oder Werkstoffpaarungen angewandt werden. Der Einsatz von FE-Simulationen ermöglicht die Einsparung kostenintensiver experimenteller Versuche.*

**Schlüsselwörter:** Verbundschmieden, Induktionserwärmung, Massivumformung, FEM, Temperaturgradient

## Einleitung

Ein effektiver Beitrag der Fertigungstechnik zur Energie- und Ressourceneinsparung stellt die Reduzierung des Bauteilgewichts durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen dar. Mittels des Verbundschmiedens können Leichtbaukomponenten mit beanspruchungsoptimierten Funktionsflächen in wenigen Prozessschritten ressourcenschonend hergestellt werden. Bisherige Untersuchungen zum Schmieden hybrider Bauteile beschränken sich auf die Kombination verschiedener Stahlwerkstoffe. Eine weitere Gewichtsreduzierung resultiert in dem Bestreben, hybride Stahl-Aluminium Bauteile mittels des Verbundschmiedens herzustellen. Das hybride Bauteil besteht dabei aus einem Aluminiumkern, welcher von einem verschleißfesten Stahlmantel umhüllt ist. Bei dieser Werkstoffpaarung

werden die Vorzüge beider Materialien, das geringe spezifische Gewicht des Aluminiums und die hohe Verschleißfestigkeit des Stahls, optimal ausgenutzt. Die Erwärmung des hybriden Rohteils stellt beim Verbundschmieden eine besondere Herausforderung dar. Stahl wird zur Steigerung des Formänderungsvermögens bei einer Temperatur von mindestens 900 °C warmumgeformt, während das Aluminium aufgrund des geringen Schmelzpunkts eine Temperatur von 500 °C nicht überschreiten sollte. Zur Realisierung dieses Temperaturgradienten im hybriden Schmiederohteil bietet sich ein induktives Erwärmungsverfahren an.



**Abbildung 1:** Prinzip der induktiven Erwärmung [1]

Seit dem Beginn der industriellen Nutzung des induktiven Erwärmungsprozesses fand das Verfahren in verschiedenen Bereichen des Maschinenbaus Anwendung. Die Vorteile gegenüber anderen Erwärmungsverfahren, wie die Möglichkeit des schnellen und lokalen Erwärmens sowie die Energieeffizienz, erweiterten die Anwendbarkeit des Verfahrens.

Das Prinzip der induktiven Erwärmung beruht auf dem Faradayschem und Ampèreschen Gesetz. Entsprechend dieser physikalischen Grundlagen erzeugt ein elektrischer Leiter mit anliegender Wechselspannung einen wechselnden magnetischen Fluss. Die Lenzsche Regel besagt, dass dieses sich zeitlich ändernde elektromagnetische Feld in einem elektrisch leitenden Bauteil eine Spannung induziert, so dass die dadurch fließenden Wirbelströme das Bauteil nach dem Joule'schen-Effekt erwärmen. Die eingebrachte Wärmeenergie nimmt bei der

induktiven Erwärmung wegen des Skin-Effektes zum Bauteilinneren ab, da das magnetische Feld des Bauteils dem der Spule entgegenwirkt (Abbildung 1). Das Resultat ist eine inhomogene Erwärmung des Bauteils, welche nach einiger Zeit durch Wärmeleitung ausgeglichen wird. Obgleich diese Theorien einfach erscheinen, ist die induktive Erwärmung ein komplexer Prozess mit zahlreichen Parametern. Folglich wurde der Prozess viele Jahre nur nach dem zeit- und kostenintensiven „Trial & Error“-Verfahren optimiert. Durch neue Entwicklungen in der Informationstechnologie ist es heute möglich, die induktive Erwärmung mit Hilfe der computergestützten numerischen Simulation hervorragend nachzubilden. Damit ist es möglich Erwärmungsvorgänge virtuell zu analysieren und zu optimieren. Aufwendige Versuche und Produktionsstillstände sind damit nicht mehr notwendig. Die deutliche Zeit- und Kostenersparnis führt zu einem erhöhten Interesse der Unternehmen an dieser Technologie. Die numerische Simulation induktiver Erwärmungsvorgänge ist heute Stand der Technik. Mehrere kommerzielle Anbieter haben bereits entsprechende Modelle in ihrer FEM-Software implementiert. Die Simulation der induktiven Erwärmung hybrider Werkstoffsysteme für die Massivumformung mit einem gezielten Temperaturgradienten ist in der Literatur bislang nicht bekannt.

Chaboudez et al. [2,3] beschreibt die Modellierung induktiver Erwärmungsvorgänge für lange axial-symmetrische Rohteile. Mühlbauer et al. [4] erweitert die Simulationsmethode, um auch komplexere Geometrien abbilden zu können. Jang und Chiu [5] simulieren die Induktionserwärmung bei Hohlzylindern. Kang et al. [6] passt die FE-Simulationsmethode an, um die Umformung im teilflüssigen Zustand zu modellieren. Zur Realisierung der optimalen Erwärmung im Prozess wurde dabei die Länge der Induktionsspule an die Länge des Werkstücks angepasst. Weitere Prozessoptimierungen wurden in der Arbeit von Favennec et al. [7] umgesetzt. Magnabosco et al. [8] hat die Erwärmung des Stahls C45 durchgeführt, welcher ähnliche Eigenschaften besitzt, wie der in dieser Arbeit verwendete Stahlmantel.

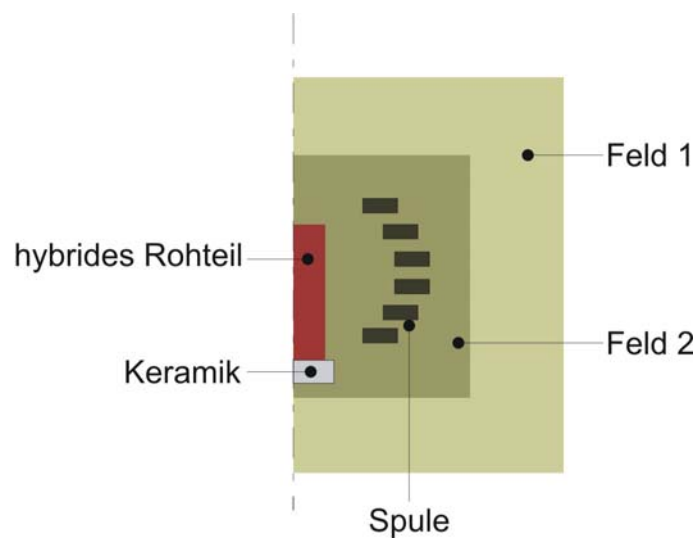
Das für die Simulation der induktiven Erwärmung hybrider Werkstoffe entwickelte Modell basiert auf den oben genannten Modellen. Dabei wurden zahlreiche Faktoren angepasst und erweitert.

Die steigende Nachfrage der Automobilindustrie nach leichteren Komponenten eröffnet neue Anwendungsgebiete für Verbundwerkstoffe mit hybriden

Materialeigenschaften. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte elektromagnetisch thermisch gekoppelte Simulationsmodell dient der Auslegung und Optimierung der induktiven Erwärmung hybrider Bauteile für die Warmmassivumformung. Es ist numerisch zu belegen, dass der geforderte Temperaturgradient innerhalb der verwendeten Materialien realisierbar ist.

### Simulationsmodell

Das für die FE-Simulation entwickelte Modell dieser Arbeit ist in fünf Hauptbereiche unterteilt (siehe Abbildung 2).

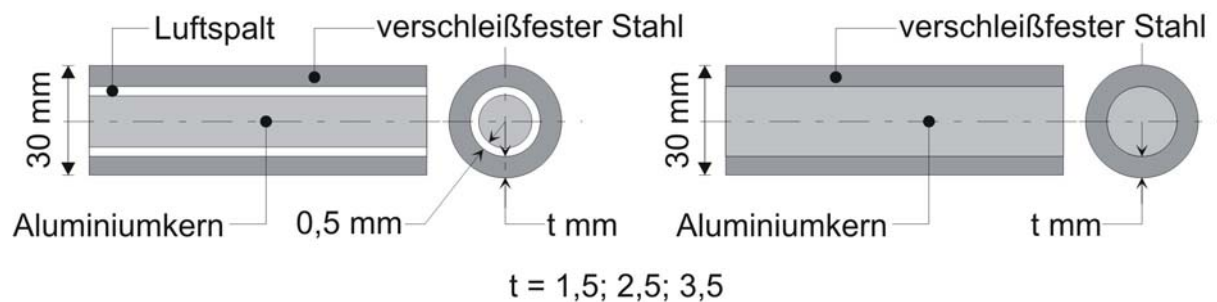


**Abbildung 2:** Aufbau des Simulationsmodells

### Geometrie

Wie in Abbildung 2 dargestellt, ist das elektromagnetische Feld in zwei Felder unterteilt. Zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes ist das Feld 2, welches die Spule umschließt, feiner vernetzt, als das umgebende Feld 1. In den numerischen Simulationen wurden drei hybride Rohteilgeometrien mit jeweils unterschiedlichen Wandstärken  $t$  des Mantelwerkstoffs bei gleicher Geometrie des Aluminiumkerns untersucht. Bei allen Simulationen wurde axialsymmetrisches Verhalten angenommen. Die untersuchten Geometrien sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Rohteile wurden jeweils mit und ohne Luftspalt zwischen dem Mantel- und Kernwerkstoff modelliert. Der Luftspalt dient zur Isolierung der beiden Werkstoffe von

einander, um den geforderten Temperaturgradienten in einem Erwärmungszyklus realisieren zu können.



**Abbildung 3:** Geometrie des Rohteils mit und ohne Luftspalt

### Materialeigenschaften

Das hybride Rohteil besteht, wie in Abbildung 3 dargestellt, aus einem Aluminiumkern und einem verschleißfesten Stahlmantel. Die verwendete Aluminiumlegierung weist ein geringes spezifisches Gewicht auf und wird bereits vermehrt in der Automobilindustrie eingesetzt. Der ausgewählte Stahlwerkstoff weist eine hohe Verschleißfestigkeit auf und ist härtbar. Der Verbund der beiden Werkstoffe stellt eine optimale Materialkombination dar, da die spezifischen Vorteile der jeweiligen Materialien ausgenutzt werden können. Aufgrund des großen Einsatzspektrums ergibt sich ein großes Potenzial in der industriellen Nutzung.

Im Bereich der induktiven Erwärmung werden Materialeigenschaften generell in zwei Kategorien unterteilt, thermisch und elektromagnetisch, wie in Tabelle 1 dargestellt.

<b>thermische Eigenschaften</b>	<b>elektromagnetische Eigenschaften</b>
Wärmekapazität	elektrische Leitfähigkeit
Wärmeleitfähigkeit	Permittivität
Emissionsgrad	Permeabilität

**Tabelle 1:** Thermische und elektromagnetische Eigenschaften für das FEM-Modell

Die Ermittlung der korrekten temperaturabhängigen elektromagnetischen Materialeigenschaften stellt eine weitere Herausforderung bei der Simulation des induktiven Erwärmungsprozesses dar. Bei Vorliegen der notwendigen Materialkennwerte ist das in dieser Arbeit erstellte FE-Modell auf alle leitfähigen Materialien anwendbar, wobei es jedoch erforderlich ist, die Ergebnisse der Simulation nachfolgend anhand von experimentellen Versuchen zu validieren.

## **Anfangs- und Randbedingungen**

Als Anfangsbedingung wird eine konstante Umgebungstemperatur von 20°C angenommen. Weitere in der Simulation angenommene Randbedingungen sind

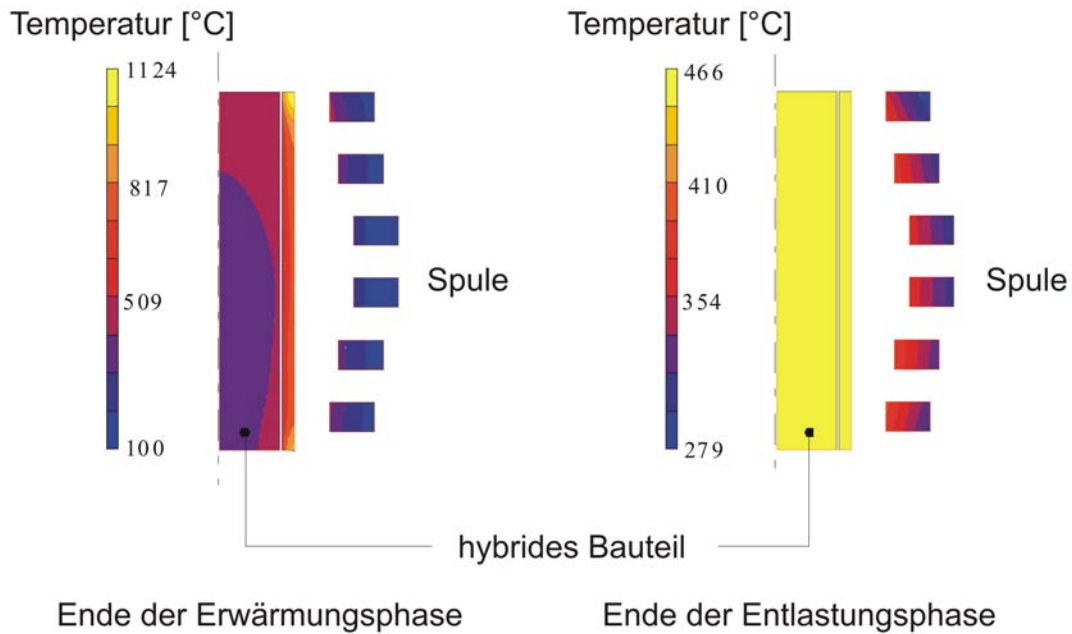
- eine konstante elektrische Spannung,
- eine konstante magnetische Spannung,
- ein über den Luftspalt zwischen Spule und Rohteil definierter Strahlungskoeffizient und
- die Energieeinbringung über den Volumenstrom.

## **Belastungszustände**

Der induktive Erwärmungsprozess ist generell in zwei Phasen, die Erwärmungs- und die Entlastungsphase, unterteilt. In dem entwickelten FE-Modell wurden beide Phasen berücksichtigt, wobei die Dauer jeder Phase bzgl. der Bauteilgröße angenommen wurde. Die Erwärmungsdauer betrug 7 Sekunden. Die Entlastungsdauer betrug 60 Sekunden. Jede Phase wurde in 100 Berechnungsschritte unterteilt.

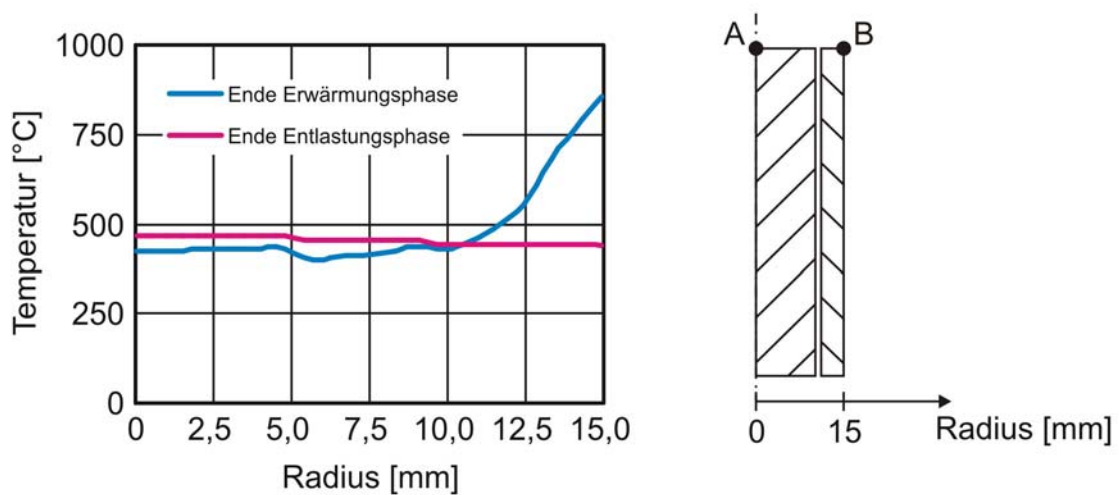
## **Ergebnisse**

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt nach drei Kriterien. In Abbildung 4 ist die vorliegende Temperaturverteilung im Bauteil während des Prozesses zu erkennen. Die Verläufe in Abbildung 5 beschreiben die vorliegende Temperatur zwischen den Punkten A und B. In Abbildung 6 ist die Temperaturveränderung an den Punkten C und D in einem Zeitraum von 15 Sekunden dargestellt.



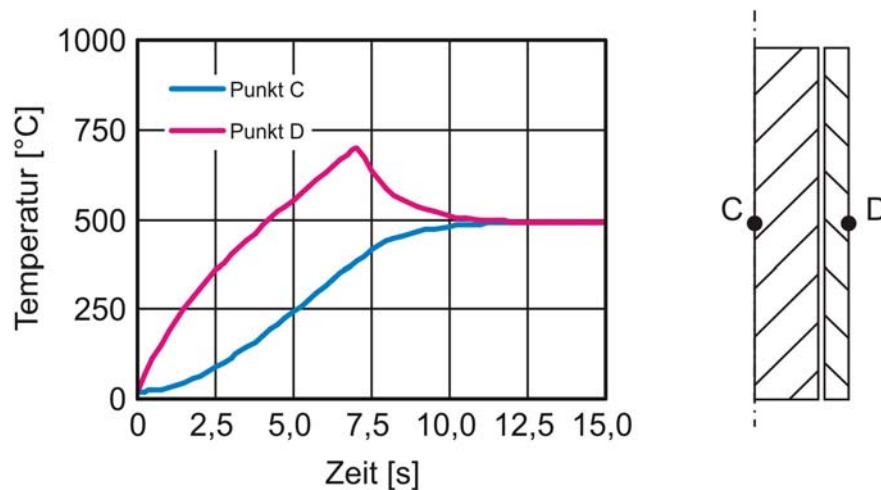
**Abbildung 4:** Temperaturverteilung im Bauteil mit Luftspalt während der Erwärmungs- und Entlastungsphase

Die Temperaturverläufe zwischen den Punkten A und B bezogen auf die vorliegende Prozesskonfiguration sind in Abbildung 5 dargestellt.



**Abbildung 5:** Temperaturverläufe zwischen den Punkten A und B am Ende der Erwärmungs- und Entlastungsphase

Die Temperaturveränderung der Knotenpunkte auf halber Höhe ist in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6:** Temperaturverlauf der mittleren Knotenpunkte C und D des hybriden Bauteils

Die Ergebnisse zeigen, dass der gewünschte Temperaturgradient innerhalb des hybriden Rohteils erzielt werden kann. Der Stahlmantel wird auf sehr viel höhere Temperaturen ( $\Delta T = 320^\circ \text{C}$ ) erwärmt, als der Aluminiumkern. Die erreichte Temperatur am Ende der Erwärmungsphase ist abhängig von der Frequenz, der Stromdichte und der Erwärmungsdauer. Durch weitere Optimierungen kann die Temperaturdifferenz noch weiter erhöht werden. Simulationen ohne Luftspalt haben gezeigt, dass der gewünschte Temperaturgradient zwischen dem Aluminiumkern und dem Stahlmantel ohne Luftspalt nicht realisiert werden kann. Die Ergebnisse der Simulationen mit einem Luftspalt zeigen jedoch, dass es möglich ist, zwei separate Erwärmungsbereiche in einem Erwärmungsprozess zu realisieren. Der Aluminiumkern wird dabei fast ausschließlich durch die Wärmestrahlung der heißen Oberfläche des Stahlmantels erwärmt. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums wird schnell eine homogene Temperaturverteilung im Aluminiumkern erreicht.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zeigen, dass es möglich ist, einen definierten Temperaturgradienten innerhalb hybrider Bauteilstrukturen mittels induktiver Erwärmung zu realisieren. Durch die Wahl der Größe des Luftspalts kann der Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem Aluminiumkern und dem Stahlmantel



gezielt beeinflusst werden. In geplanten Praxisversuchen sollen die Simulationsergebnisse validiert werden. Hierbei ist vorgesehen, die Leistung des Induktionsgenerators während der Erwärmung gezielt zu regeln, um den Wärmeverlust des Stahlmantels in der Entlastungsphase auszugleichen und somit ein definiertes Temperaturprofil einstellen zu können.

### **Danksagung**

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung innerhalb des Graduiertenkollegs "Herstellung, Bearbeitung und Qualifizierung hybrider Werkstoffsysteme (GRK 1378)".

### Literatur:

- [1] N.N., Induktive Erwärmung, Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG, 1984
- [2] Chaboudez, C.; Clain, S.; Glardon, R.; et al: *Numerical modelling in induction heating for axisymmetric geometries*, IEEE transactions on magnetics, Band 33, Nr. 1, Seite 739-745, 1997
- [3] Chaboudez, C.; Clain, S.; Glardon, R.; et al: *Numerical modelling of induction heating of long workpieces*, IEEE transactions on magnetics, Band 30, Nr. 6, Seite 5028-5037, 1994
- [4] Mühlbauer, A.; Muiznieks, A.; Panschow, R.: *Induktive Erwärmung von rotationssymmetrischen Einsätzen komplizierter Form aus ferromagnetischem Stahl*, Elektrowärme International, Band 54, Seite 78-86, 1996
- [5] Jang, J. Y.; Chiu, Y. W.: *Numerical and experimental thermal analysis for a metallic hollow cylinder subjected to step-wise electro-magnetic induction heating*, Applied thermal engineering, Band 27, Seite 1883-1894, 2007
- [6] Kang, C. G.; Seco, P. K.; Jung, H. K.: *Numerical Analysis by new proposed coil design method in induction heating process for semi-solid forming and its experimental verification with globalization evaluation*, Materials science & engineering A, Band A341, Seite 121-138, 2003
- [7] Favennec, Y.; Labbe, V.; Bay, F.: *Induction heating processes optimization a general optimal control approach*, Computational physics, Band 187, Seite 68-94, 2003
- [8] Magnabosco, I.; Ferro, P.; Tiziani, A.; et al: *Induction heat treatment of a C45 steel bar, Experimental and numerical analysis*, Computational materials science, Band 35, Seite 98-106, 2006

### Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Er war Leiter der Abteilung Umformtechnik bei der Salzgitter AG. Im Jahr 2002 ist sein Verantwortungsbereich auf die gesamte Anwendungs-

technik des Konzerns erweitert worden. Seit Oktober 2003 ist er Leiter des IFUM der Leibniz Universität Hannover.

Dipl.-Ing. Dirk Odening hat an der Leibniz Universität Hannover Maschinenbau studiert. Seit Mitte 2010 ist er Leiter der Abteilung Massivumformung am IFUM.

Dipl.-Ing. Florian Holz war bis März 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Massivumformung am IFUM.

Dipl.-Ing. Klaus-Georg Kosch studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover. Seit Ende 2009 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Massivumformung am IFUM.