



**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>

O. Peșteanu, E. Baake, B. Nacke

## Elektromagnetisches Zweifrequenzventil für Flüssigmetalle

### EINLEITUNG

In konventionellen rotationssymmetrischen Schwebeschmelzanlagen werden elektromagnetische Kraftdichteverteilungen erzeugt, bei welchen die vertikale Kraftdichte entlang der Rotationsachse  $Oz$  auf null abfällt [1]. Aus diesem Grund werden für die induktive Durchflussregelung elektromagnetische Ventile mit verhältnismäßig komplizierten Konstruktionen verwendet: Mit innerem ferromagnetischen Rückschlusskern [2], mit keramischen Innenkern [3, 4], mit seitlichen Auslasskanal [5] und andere.

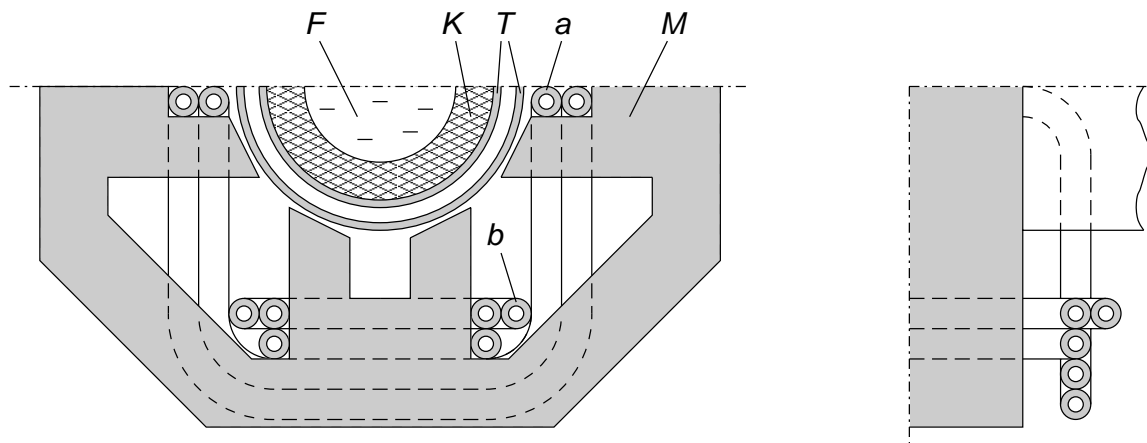
In diesem Beitrag wird eine Ventilanordnung ohne inneren Kern vorgestellt und berechnet, mit der sich Vertikalkraftdichten auch auf der Symmetrieachse  $Oz$  ergeben.

### KONSTRUKTION

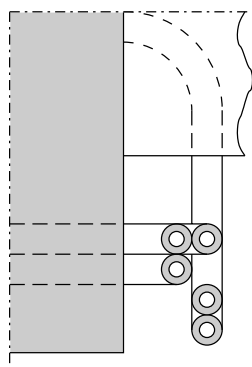
Vertikale Kraftdichten ergeben sich auf der Achse  $Oz$  in einem homogenen magnetischen Wechselfeld, wenn dessen Feldlinien horizontal verlaufen, aber die Kraftdichteverteilung ist nicht rotationssymmetrisch. Durch die Überlagerung von zwei homogenen Magnetfeldern, deren horizontale Feldlinien senkrecht zueinander stehen, kann man ein resultierendes praktisch rotationssymmetrisches Kraftdichtefeld realisieren [6, 7]. Die Frequenzen der Felder müssen unterschiedlich sein, damit sich kein Drehfeld ergibt.

Die beiden Magnetfelder lassen sich mit zwei Einphasenwicklungen  $A$  und  $B$  erzeugen, die in den Nuten eines Magnetkreises eingebettet werden und jede die Polpaarzahl  $p = 1$  hat (**Bild 1**). Beide Wicklungen haben dieselbe Konstruktion, mit Ausnahme der Wicklungsköpfe, welche verschieden sein müssen, damit sich keine Leiterkreuzungen ergeben. Die Wicklungsköpfe werden in nur zwei Etagen angeordnet (Bild 1), wodurch eine geringe Abmessung in axialer Richtung erreicht wird. Weil die Wicklungen gegeneinander mit  $90^\circ$  verschoben sind, sind sie nicht miteinander magnetisch gekoppelt.

Ein rotationssymmetrisches Kraftdichtefeld ergibt sich durch die Überlagerung nur der Grundwellen der beiden Felder. Die störenden Oberwellen werden durch die entsprechende Wahl der Nutenzahl und der Leiterzahlen in den Nuten verringert.



a)



b)

**Bild 1:** Zweifrequenzventil (schematisch)

a) Hälfte der Spulen der Wicklung A

*M* Magnetkreis; *a, b* Teilwicklungen; *T* wasserdurchflossenes zweiwandiges Teflonrohr; *K* Keramikrohr; *F* Flüssigmetall

b) Spulenköpfe der Wicklung B

## WICKLUNGSFAKTOR

Zur Verringerung der wichtigsten 3. und 5. Oberwellen wurde ein Magnetkreis mit 8 Nuten gewählt, welche von 2 Größenarten sind, damit man eine unterschiedliche Leiterzahl pro Nut verwenden kann (Bild 1).

Jede der beiden Einphasenwicklungen, z.B. die Wicklung A ist aus 2 verschiedenen Teilwicklungen *a* und *b* zusammengesetzt (Bild 1a). Die Teilwicklung *a* mit  $q_a = 1$  Nut je Pol ist in

$$n_a = 2q_a = 2 \quad (1)$$

Nuten eingebettet, wobei sich in jede Nut  $z_a = 4$  Leiter befinden, von denen aus Symmetriegründen in Bild 1a nur 2 Leiter gezeichnet sind. Die Windungszahl der Teilwicklung *a* beträgt

$$w_a = q_a z_a = 4. \quad (2)$$

Die Teilwicklung *b* hat  $q_b = 2$  Nuten je Pol und ist somit in

$$n_b = 2q_b = 4 \quad (3)$$

Nuten angeordnet. Mit einer Leiterzahl pro Nut  $z_b = 3$  (Bild 1a) ergibt sich die Windungszahl der Teilwicklung  $b$

$$w_b = q_b z_b = 6 \quad (4)$$

und die Anzahl der Windungen der ganzen Einphasenwicklung  $A$  ist

$$w = w_a + w_b = 10. \quad (5)$$

Der elektrische Winkel  $\alpha_{el a}$  der Teilwicklung  $a$ , welcher für  $p = 1$  gleich dem geometrischen Winkel ist, und der Zonenfaktor der  $v$ -ten Welle [8, 9], mit  $v = 1, 3, 5, \dots$  sind

$$\alpha_{el a} = \frac{2\pi}{n_a} = \pi, \quad \xi_{qav} = \frac{\sin v q_a \frac{\alpha_{el a}}{2}}{q_a \sin v \frac{\alpha_{el a}}{2}} = 1. \quad (6)$$

Somit ergibt sich für die Teilwicklung  $a$  der folgende Wicklungsfaktor der  $v$ -ten Welle:

$$\xi_{av} = \sin v \frac{\pi}{2} \xi_{qav} \frac{\sin v \frac{b_a \pi}{\tau 2}}{v \frac{b_a \pi}{\tau 2}} = \sin v \frac{\pi}{2} \frac{\sin v \frac{b_a}{D}}{v \frac{b_a}{D}}, \quad (7)$$

worin  $b_a$ ,  $\tau$  und  $D$  die Breite der Nutöffnung für die Teilwicklung  $a$ , die Polteilungslänge und den Innendurchmesser des Magnetkreises bezeichnen.

In ähnlicher Weise ergeben sich der elektrische Winkel, der Zonen- und der Wicklungsfaktor der Teilwicklung  $b$  zu

$$\alpha_{el b} = \frac{2\pi}{n_b} = \frac{\pi}{2}, \quad \xi_{qbv} = \frac{\sin v q_b \frac{\alpha_{el b}}{2}}{q_b \sin v \frac{\alpha_{el b}}{2}} = \cos v \frac{\pi}{4}, \quad (8)$$

$$\xi_{bv} = \sin v \frac{\pi}{2} \xi_{qbv} \frac{\sin v \frac{b_b \pi}{\tau 2}}{v \frac{b_b \pi}{\tau 2}} = \sin v \frac{\pi}{2} \cos v \frac{\pi}{4} \frac{\sin v \frac{b_b}{D}}{v \frac{b_b}{D}},$$

worin  $b_b$  die Breite der Nutöffnung der Teilwicklung  $b$  bedeutet.

Für die gesamte Einphasenwicklung wird ein Ersatzwicklungsfaktor  $\xi_v$  gemäß

$$w \xi_v = w_a \xi_{av} + w_b \xi_{bv} \quad (9)$$

berechnet. Wenn die Breiten der Nutöffnungen gleich sind  $b_b = b_a$ , dann kann man mit der folgenden Formel auch einen äquivalenten Zonenfaktor  $\xi_{qv}$  einführen

$$\xi_v = \sin v \frac{\pi}{2} \xi_{qv} \frac{\sin v \frac{b_a}{D}}{v \frac{b_a}{D}} \quad (10)$$

**Tabelle 1:** Berechnete Werte des Zonenfaktors (11)

| $\nu$      | 1     | 3      | 5      | 7     | 9     | 11     | 13     |
|------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| $\xi_{qv}$ | 0,824 | -0,024 | -0,024 | 0,824 | 0,824 | -0,024 | -0,024 |

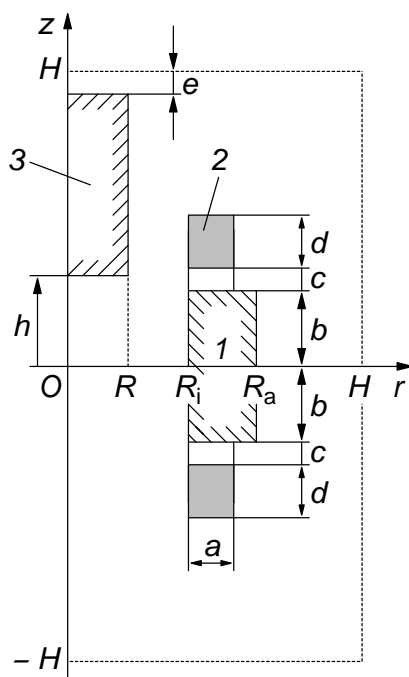
und durch die Anwendung der Gln. (2), (4), (5) und (7 bis 9) erhält man

$$\xi_{qv} = \frac{1}{W} (w_a \xi_{qav} + w_b \xi_{qbv}) = \frac{1}{10} (4 + 6 \cos \nu \frac{\pi}{4}). \quad (11)$$

Wie aus der **Tabelle 1** ersichtlich ist, sind die Werte des Zonenfaktors für die wichtigsten 3. und 5. Oberwellen gering. Somit werden in der folgenden vereinfachten Berechnung des elektromagnetischen Feldes die Oberwellen vernachlässigt und nur die Grundwellen der Felder der beiden Wicklungen *A* und *B* in Betracht genommen.

### BERECHNUNG DES ELEKTROMAGNETISCHEN FELDES

Es wurde ein Induktionsventil für flüssiges Aluminium (Bild 1) mit den Abmessungen und Kenndaten gemäß **Bild 2** und **Tabelle 2** berechnet. Die Grundwellen der von den Wicklungen *A* und *B* erzeugten elektromagnetischen Felder wurden in Zylinderkoordinaten  $r, \varphi, z$  mit der endlichen Differenzenmethode zweidimensional, wie in [7], durch die Anwendung des magnetischen Skalar- für  $r > R$  und des magnetischen Vektorpotentials für  $r \leq R$  ermittelt. In den Gleichungen des Vektorpotentials wurde auch die durch die Bewegung mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  hervorgerufene elektrische Feldstärke



**Bild 2:** Berechnungsgebiet (schematisch)

1 Magnetkreis; 2 Wicklungskopf; 3 Flüssigmetall

**Tabelle 2:** Kenndaten des berechneten Induktionsventils (Bild 2)

|   |   |
|---|---|
| Radien, Höhe des Blechpakets  | $R_i = 2 \text{ cm}, R_a = 4,5 \text{ cm}, 2b = 3 \text{ cm}$   |
| Frequenzen, Amplituden der Strombeläge der Wicklungen <i>A</i> und <i>B</i>                 | $f_A = 15 \text{ kHz}, f_B = 18 \text{ kHz},$<br>$A_{Am} = 89,7 \text{ kA/m}, A_{Bm} = 88 \text{ kA/m}$                     |
| Abmessungen des Wicklungskopfes   | $a = 24 \text{ mm}; c = 5 \text{ mm}; d = 8 \text{ mm}$   |
| Radius, elektrische Leitfähigkeit, Dichte, kinematische Viskosität des flüssigen Aluminiums | $R = 10 \text{ mm}, \sigma = 3,5 \cdot 10^6 \text{ S/m},$<br>$2400 \text{ kg/m}^3, 0,56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Daten des Berechnungsgebietes   | $H = 12 \text{ cm}, e = 1 \text{ cm}$   |

$$\underline{\mathbf{E}} = \mathbf{v} \times \underline{\mathbf{B}} \quad (12)$$

eingeführt und somit das elektrische Potential  $V$  im Flüssigmetall durch die numerische Lösung der Gleichung  $\Delta V = \text{div } \mathbf{E}$  berechnet.

In die Feldberechnung wurde ein in den  $r$ - und  $z$ -Richtungen aufgebautes Gitternetz mit  $108 \times 216$  Gitterpunkten und die in [7, 10, 11] angegebenen Randwerte und Randbedingungen verwendet.

### STRÖMUNGSBERECHNUNG

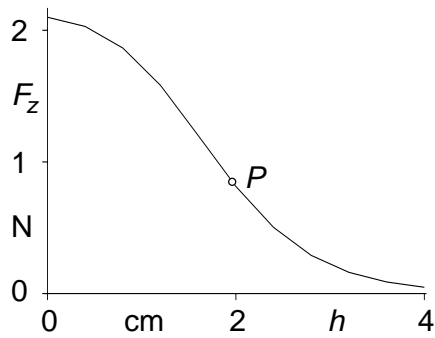
Die Flüssigmetallströmung wurde mit dem  $k$ - $\varepsilon$  Turbulenzmodell berechnet und die untere freie Oberflächen als Fläche auf welche die vertikale Normalspannung

$$\sigma_z = p - 2\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (13)$$

konstant und gleich der Normalspannung auf der oberen horizontalen freien Oberfläche ist [12, 13], wobei  $p$  und  $\mu_e$  den mit dem SOLA-Verfahren [14] ermittelten Druck und die effektive dynamische Viskosität bezeichnen.

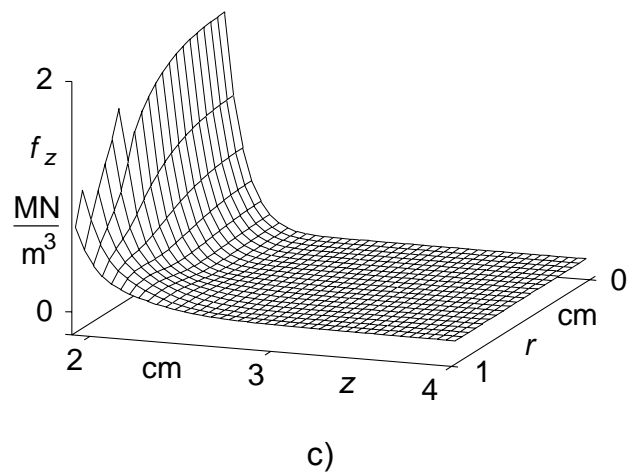
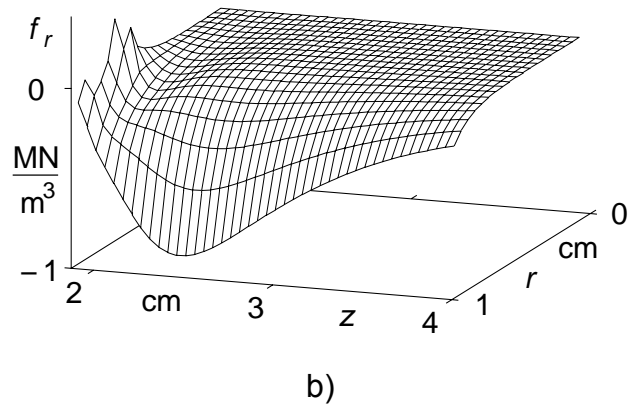
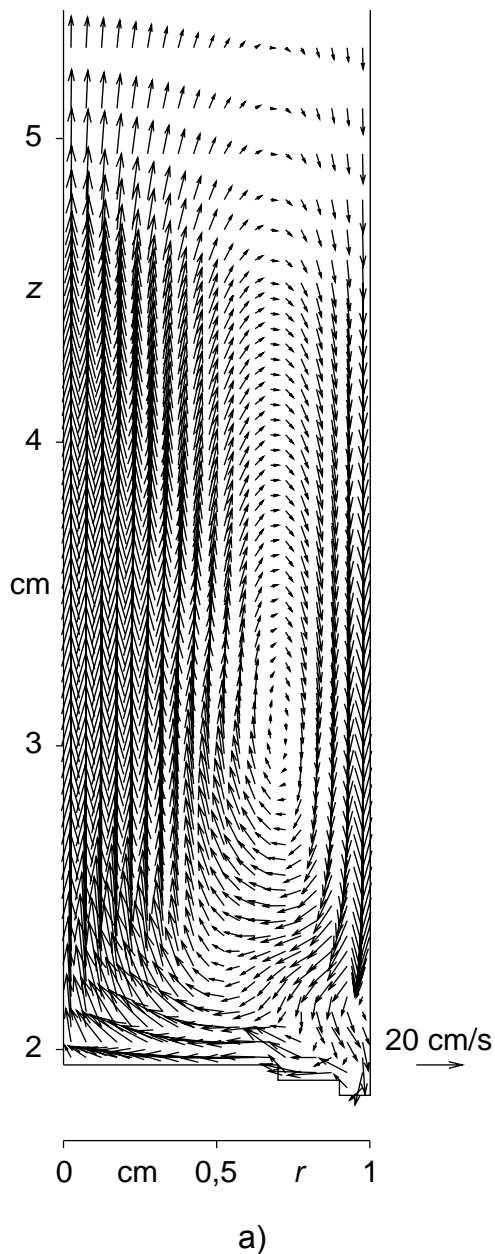
### ERGEBNISSE

Die Strömung des Flüssigmetalls wurde zuerst vernachlässigt und die auf dem Aluminiumzylinder 3 (Bild 2) ausgeübte Vertikalkraft  $F_z$  für verschiedene Höhen  $h$  bis zu der Mittelebene des Induktors berechnet (**Bild 3**). Bei zunehmendem Eintreten des Metallzylinders in dem elektromagnetischen Zweifrequenzfeld, d.h. bei Verkleinerung des Abstandes  $h$ , vergrößert sich die Vertikalkraft  $F_z$ . Für eine im Ventil elektromagnetisch gestützte Aluminiumsäule mit einer Höhe von ungefähr 11 cm ergibt sich der Betriebspunkt  $P$  des Induktionsventils bei  $h = 1,95 \text{ cm}$  (Bild 3).



**Bild 3:** Berechnete Verteilung der auf der Aluminiumsäule im elektromagnetischen Zweifrequenzfeld ausgeübten Vertikalkraft

Für die Anordnung mit  $h = 1,95$  cm wurde auch die Strömung berechnet (**Bild 4**). Die vom Induktor ausgeübten Abstoßkräften (Bilder 4b und 4c) treiben in dem unteren Teil der Metallsäule eine zur Symmetrieachse  $Oz$  gerichtete Strömung an (Bild 4a).



**Bild 4:** Berechnete Verteilungen  
a) der Geschwindigkeitsvektoren in einer Vertikalebene  
b) der radialen Kraftdichte  
c) der axialen elektromagnetischen Kraftdichte



Die Normalspannung (13) ergibt sich gleich der Spannung an der oberen freien Oberfläche auf einer unteren, in der Mitte nach oben gewölbten freien Oberfläche, welche bei Anwendung der endlichen Differenzenmethode mit einer treppenförmigen Kurve approximiert wurde (Bild 4a).

#### Literatur

- [1] Block, F.R., Theißen, A.: Das elektromagnetische Schwebeschmelzen - ein Beitrag zu den Verfahren des tiegelfreien Schmelzens. *elektrowärme int.* 29 (1971) 6, S. 349-354
- [2] Delot, J.: Elektromagnetisches Ventil. Patentschrift DD 295 035 A5 (1990)
- [3] Del Vecchio, R.M., Slepian, R.M.: Liquid metal electromagnetic flow control device incorporating a pumping action. European Patent Application 0 298 373 A2 (1989)
- [4] Lillicarp, D.C.: Electromagnetic valve. European Patent Application 0 291 288 A1 (1988)
- [5] Kallien, L., Lünebach, G.: Elektromagnetische Vorrichtung zum Steuern und Regeln des Durchflusses von schmelzflüssigem Metall. Patentschrift DE 41 32 910 C1 (1992)
- [6] Peşteanu, O., Baake, E., Nacke, B.: Schwebeschmelzen und Durchflussregelung mit magnetischen Zweifrequenzfeldern. *elektrowärme int.* 62 (2004) 2, S. 85-86
- [7] Peşteanu, O., Baake, E., Nacke, B.: Induktives Schwebeschmelzen mit zwei Frequenzen. Tagungsband Workshop Elektroprozessstechnik 2004, TU Ilmenau, Bericht 8
- [8] Richter, R.: Elektrische Maschinen, Band I. Basel: Birkhäuser 1967
- [9] Bödefeld, Th., Sequenz, H.: Elektrische Maschinen: eine Einführung in die Grundlagen. 8., vollst. neubearb. Aufl. Wien: Springer 1971
- [10] Ivanov-Smolenskij, A.V., Abramkin, Ju.V., Vlasov, A.I., Kuznecov, V.A.: Universalnyi metod rasčeta élektromagnitnych processov v élektřičeskich mašinach. Moskva: Énergoatomizdat. 1986
- [11] Peşteanu, O.: Berechnung des magnetischen Feldes in Rotationsrührern beim Stranggießen. *elektrowärme int.* 59 (2001) 3, S. 114-115
- [12] Szekeley, J., Schwartz, E.: Some Perspectives on Electromagnetic Levitation in Space Experimentation. Proc. Int. Symp. Electromagnetic Processing of Materials 1994, Nagoya, ISIJ, S. 9-14
- [13] Rappaz, M., Bellet, M., Deville, M.: Numerical Modeling in Materials Science and Engineering. Berlin: Springer 2003
- [14] Brockmeier, U.: Numerisches Verfahren zur Berechnung dreidimensionaler Strömungs- und Temperaturfelder in Kanälen mit Längswirbelerzeugern und Untersuchung von Wärmeübergang und Strömungsverlust. Diss. Ruhr-Univ. Bochum 1987

#### Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Ovidiu Peşteanu  
Institut für Metallurgie  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 42  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel.: +49 5323 72-3107  
Fax: +49 5323 72-3527  
E-mail: ovidiu.pesteanu@tu-clausthal.de

Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake  
Prof. Dr.-Ing. Bernard Nacke  
Institut für Elektrothermische Prozesstechnik  
Universität Hannover  
Wilhelm-Busch-Str. 4  
D-30167 Hannover  
Tel.: +49 511 762-2872 (Baake: 3248, Nacke: 5533)  
Fax: +49 511 762-3275  
E-mail: baake@ewh.uni-hannover.de  
nacke@ewh.uni-hannover.de