

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

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 Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [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.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

U. Krieger / D. Hülsenberg / B. Halbedel / J. Räthel

Elektromagnetische Modifizierung von Entmischungen in Glasschmelzen

KURZFASSUNG

Die mikroskopische Struktur von Gläsern wird unter anderem von physiko-chemischen Prozessen während des Erstarrungsvorganges (z.B. Diffusion, Phasentrennung, Kristallisation) bestimmt. Verändert sich der Anteil einzelner Phasen, resultiert daraus auch eine Modifizierung des makroskopischen Verhaltens. Ziel der Forschungsarbeit ist es, elektromagnetisch erzeugte Kräfte für die Beeinflussung der mikroskopischen Struktur zu nutzen. Die entsprechenden Experimente und Ergebnisse aus analytischen Untersuchungen werden vorgestellt.

MOTIVATION

Die werkstofflichen Eigenschaften von Gläsern, wie zum Beispiel chemische Beständigkeit, mechanische Festigkeit, optische Eigenschaften, werden vor allem durch ihre chemische Zusammensetzung und ihre mikroskopische Struktur bestimmt. Beides wird von verschiedenen physiko-chemischen Prozessen während des Erstarrungsvorganges (z.B. Diffusion, Phasentrennung, Kristallisation) beeinflusst. Die resultierenden makroskopischen Eigenschaften des Glases können daher je nach Herstellungsprozess sehr stark divergieren. Die Realisierung der gewünschten Werkstoffeigenschaften sowie die Erfüllung der stetig steigenden Qualitätsanforderungen an das Produkt erfordern daher zum Beispiel die Gewährleistung einer hinreichenden Homogenität der Glasschmelze.

Im Mittelpunkt der Forschungsarbeit stehen die Erforschung und Entwicklung neuer Methoden, welche eine Modifizierung der mikroskopischen Struktur und somit auch der makroskopischen Eigenschaften von Gläsern unabhängig von anderen Herstellungsparametern ermöglichen. Dazu werden elektromagnetisch erzeugte Kräfte genutzt, um die Schmelzen entweder mittels künstlicher Lorentzkräfte zu homogenisieren (elektromagnetisches Rühren) oder die Verteilung von Ionen in der Schmelze durch paramagnetische Kräfte zu modifizieren.

Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Effekte beschreibt der erste Abschnitt des vorliegenden Artikels die Untersuchungen zur Beeinflussung der Strömung durch den Einfluss der künstlichen Lorentzkraft und der zweite Teil die Wirkung paramagnetischer Kräfte.

ENTMISCHUNGEN IN GLASSCHMELZEN

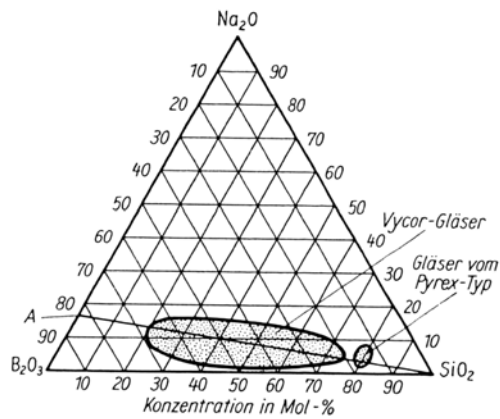
Die genannten physiko-chemischen Prozesse während des Erstarrungsvorganges treten vor allem in Gläsern auf, deren chemische Zusammensetzung zwischen zwei oder mehreren stabilen chemischen Verbindungen liegt. Kommt es bei der Glasherstellung zur Bildung von unterschiedlich chemisch zusammengesetzten Bereichen, spricht man von Entmischungen. Diese zeichnen sich durch eine Grenzfläche gegenüber dem Restglas aus. Man unterscheidet zwischen bereits im flüssigen Zustand (nicht mischbare Flüssigkeiten) oder während des Erstarrungsprozesses in der unterkühlten Schmelze gebildeten Phasen. Das bedeutet, die Entmischungsvorgänge sind zudem stark zeit- und temperaturabhängig. Findet zusätzlich in den Entmischungen eine Umbildung der Struktur zu einer Fernordnung statt, entstehen kristalline Bereiche.

Ausgehend von der Netzwerkhypothese nach Zachariasen und Warren werden die Bestandteile des Glases durch Dietzel in Netzbildneroxide (z.B. SiO_2 , B_2O_3), Zwischenoxide (z.B. MgO , Fe_2O_3) und Netzwerkwandleroxide (z.B. BaO , Na_2O) unterteilt [1]. Entscheidende Bedeutung für die Bildung von Entmischungen hat die Höhe der von Dietzel eingeführten Feldstärke F der in der Schmelze vorhandenen Kationen (Gleichung 1: z – Wertigkeit, a – Kation-Sauerstoffion-Abstand) siehe Gl. (1), sowie die potentielle Grenzflächenspannung bei möglicher Entmischungsbildung und die Volumenbeanspruchung unterschiedlicher Strukturelemente [1].

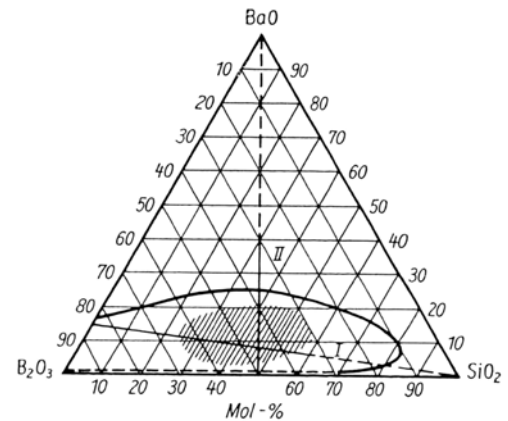
$$F = \frac{z}{a^2} \quad (1)$$

Thermodynamisch können die Entmischungserscheinungen auch mit Hilfe der freien Enthalpie beschrieben werden.

Bereits im schmelzflüssigen Zustand können erste Vororientierungen (z.B. Cluster) entstehen. Daraus schlussfolgern Vogel et al. [2] für Zusammensetzungen aus dem Stoffsystem $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, dass aufgrund der höheren Feldstärke des B^{3+} -Ions ($F=1,63$) im Vergleich zum Si^{4+} -Ion ($F=1,57$) in der Schmelze erste Verbindungsbildungen zwischen B_2O_3 und BaO stattfinden, da das B^{3+} -Ion stärker als das Si^{4+} -Ion bestrebt ist, seine Ladung durch Koordination mit Sauerstoffionen abzuschirmen. Neben den Netzbildnerkationen beeinflusst auch die Feldstärke der Netzwerkwandlerkationen trotz der um eine Größenordnung kleineren Werte die Phasentrennung, siehe Abbildung 1. Der Ersatz von Na_2O ($F_{\text{Na}^+}=0,19$) im Stoffsystem $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ durch BaO ($F_{\text{Ba}^+}=0,24$) verschiebt die Größe des Entmischungsbereichs signifikant. In beiden Stoffsystemen bildet sich in den Entmischungsbereichen eine boratreiche Phase, bestehend aus B_2O_3 und dem jeweiligen Netzwerkwandleroxid.



a) Stoffsystem $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

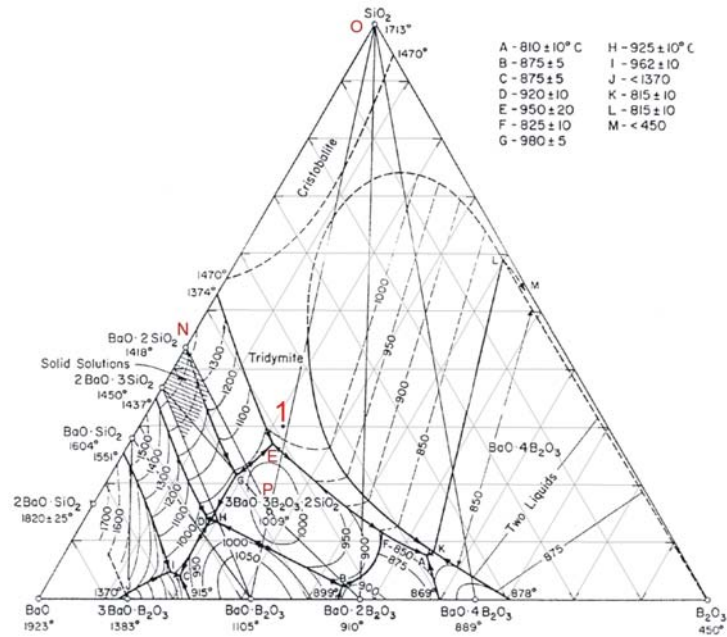


b) Stoffsystem $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

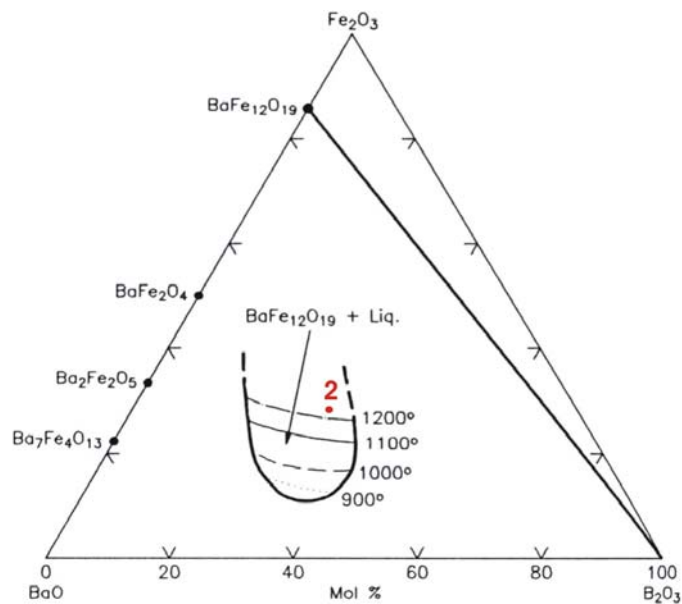
Abb. 1: Vergleich der Bereiche von Sub-Liquidus-Entmischungen in Stoffsystemen mit verschiedenen Netzwerkwanderionen [2]

Ausgehend von der geometrischen Form, unterscheidet man zwischen Tröpfchen-Phase und Matrix-Phase, wenn die entmischte Phase in das Grundglas in Form von Tropfen eingebunden ist. Des Weiteren kann bei entsprechendem Mengenverhältnis der Phasen eine Durchdringungsstruktur entstehen. Die einzelnen Phasen haben aufgrund der differierenden chemischen Zusammensetzung auch unterschiedliche physikalische Eigenschaften. Sie neigen zum Beispiel leichter zur Kristallisation.

Zur Erforschung der elektromagnetischen Modifizierbarkeit von Entmischungen in Glasschmelzen wurde ein Glas aus dem Stoffsystem $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ für die Untersuchung des elektromagnetischen Rührens durch künstliche Lorentzkraft gewählt und ein Glas aus dem Stoffsystem $\text{BaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$ zur Anwendung der paramagnetischen Kraftwirkung. Die chemische Zusammensetzung ist in die jeweiligen Phasendiagramme eingezeichnet (siehe Abbildung 2).



a) Zustandsdiagramm BaO-B₂O₃-SiO₂ nach [3], gewählte Zusammensetzung mit „1“ gekennzeichnet {49,3% BaO – 20,7% B₂O₃ – 30,0% SiO₂ (Ma%)}



b) Zustandsdiagramm BaO-Fe₂O₃-B₂O₃ nach [4], gewählte Zusammensetzung mit „2“ gekennzeichnet {40% BaO – 27% Fe₂O₃ – 33% B₂O₃ (Mol%)}

Abb. 2: Zustandsdiagramme der gewählten Stoffsysteme und Zusammensetzung der Gläser zur Untersuchung der elektromagnetischen Modifizierbarkeit von Entmischungen

Da das Glas für die Experimente zum elektromagnetischen Rühren keine paramagnetischen Ionen enthält, entstehen durch künstliche Lorentzkkräfte nur elektromagnetische Rühreffekte, die im Schmelzvolumen auf die Vorgänge während des Schmelz- und Erstarrungsprozesses wirken. Wird nicht elektromagnetisch gerührt, entstehen zum Beispiel ungewollte Kristallisationen.

Als Beispiel zeigt Abbildung 3 eine REM-Aufnahme einer geätzten Oberfläche einer Glasprobe des Glases 1 aus einer nicht elektromagnetisch gerührten Schmelze. Zu erkennen ist eine Ätzmulde, in der sich ein nicht vollständig weggelöster Kristall (Größe ca. 5µm) befindet.

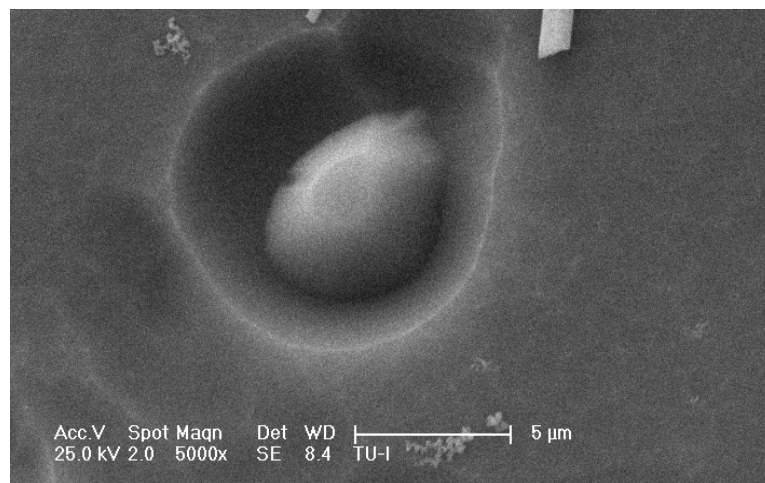


Abb. 3: REM-Aufnahme der geätzte Oberfläche einer Glasprobe, Kristallrelikt eingebunden in eine Matrix-Glas-Phase

ELEKTROMAGNETISCHES RÜHREN

Eine Möglichkeit, die Phasentrennungen zu verändern und damit die Eigenschaften von Gläsern zu optimieren, besteht im Homogenisieren der Glasschmelze durch mechanisches Rühren [5]. Die dazu angewendeten Verfahren unterscheiden sich je nach technologischen Anforderungen an das herzustellende Produkt und sind unter anderem von der Kosten-Nutzen-Relation abhängig.

Ein bisher kaum erforschetes Verfahren ist das elektromagnetische Rühren der Glasschmelze [6]. Durch die Generierung von Lorentzkkräften im Schmelzvolumen sind die Strömungsverhältnisse berührungslos und gezielt variierbar [7]. Da sich die elektromagnetische Kraftwirkung aus dem Kreuzprodukt von elektrischer Stromdichte \vec{j} und magnetischer Flussdichte \vec{B} ergibt, entsteht eine zu diesen beiden vektoriellen Größen senkrecht wirkende künstliche Lorentzkraftdichte \vec{f}_L (Gleichung 2).

$$\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

Die im Volumen zwischen den Elektroden erzeugte Kraftdichte kann für eine Strömungsbeeinflussung gezielt eingesetzt werden, um die vorhandene Schmelzströmung zu verstärken, zu unterdrücken oder sogar umzukehren.

Zur experimentellen Untersuchung der elektromagnetischen Effekte wurde eine spezielle Laborschmelzanlage verwendet [6], welche es ermöglicht, eine Glasschmelze direkt elektrisch zu beheizen und mit einem magnetischen Wechselfeld zu durchsetzen. Die prinzipielle Anordnung der Elektroden im Schmelztiegel und die Richtung der entstehenden künstlichen Lorentzkraftdichte in der Schmelze sind in Abbildung 4 dargestellt.

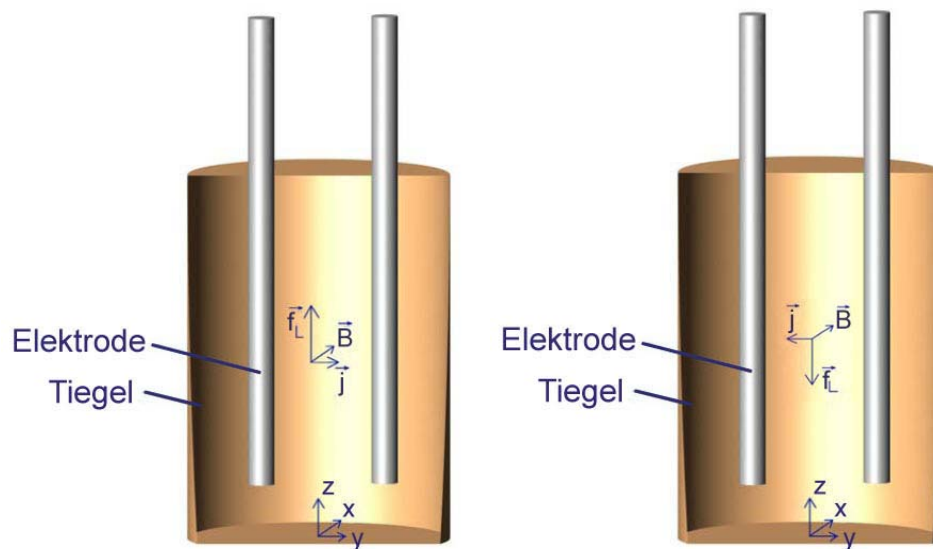


Abb. 4: Prinzipielle Darstellung der Elektrodenanordnung im Schmelztiegel, Richtung der künstlichen Lorentzkraftdichte f_L , bestimmt durch Phasenverschiebung zwischen elektrischer Stromdichte j und externem Magnetfeld B (0° oder 180°)

Um die Modifizierung der Strömung durch die künstliche Lorentzkraftdichte zu visualisieren, wurden zwei unterschiedlich gefärbte Gläser (das bereits angegebene Glas und dotiert mit 0,2% CoO) in einem Korrundtiegel im Massenverhältnis 8:1 übereinander geschichtet und anschließend in der Laborschmelzanlage indirekt elektrisch wieder aufgeschmolzen (Experiment I). Danach erfolgt die direkte elektrische Beheizung (Experiment II) über die zuvor eingetauchten Elektroden, wodurch sich ein hoher Temperaturgradient in der Glasschmelze einstellt (u.a. hervorgerufen durch die elektrische Stromdichteverteilung $j_{\max} \approx 1 \text{ A/cm}^2$). Daraus resultiert eine Strömung in der Glasschmelze infolge von Konvektion und natürlichen Lorentzkraften. Wird gleichzeitig ein magnetisches Wechselfeld eingeprägt (Experiment III, $B_{\max} = 44 \text{ mT}$), entsteht gemäß Abbildung 4 eine künstliche Lorentzkraftdichte, die zu einer Modifizierung der Strömung (Überlagerung

thermischer Konvektion und elektromagnetisch getriebener Strömung) führt. Nach Beendigung der Experimente und Ausfahren der Elektroden schließt sich eine definierte Abkühlung der Schmelze, die Trennung des Tiegels mit anschließendem Schleifen und Polieren der Oberflächen sowie eine graphische Auswertung der polierten Flächen an.

In Abbildung 5 ist das in die Schnittebene projizierte Schlierenbild (Schnitt: x-z-Ebene) gezeigt, welches nach jeweils 20 Minuten Dauer für Experiment II beziehungsweise Experiment IIIa erhalten wurde.

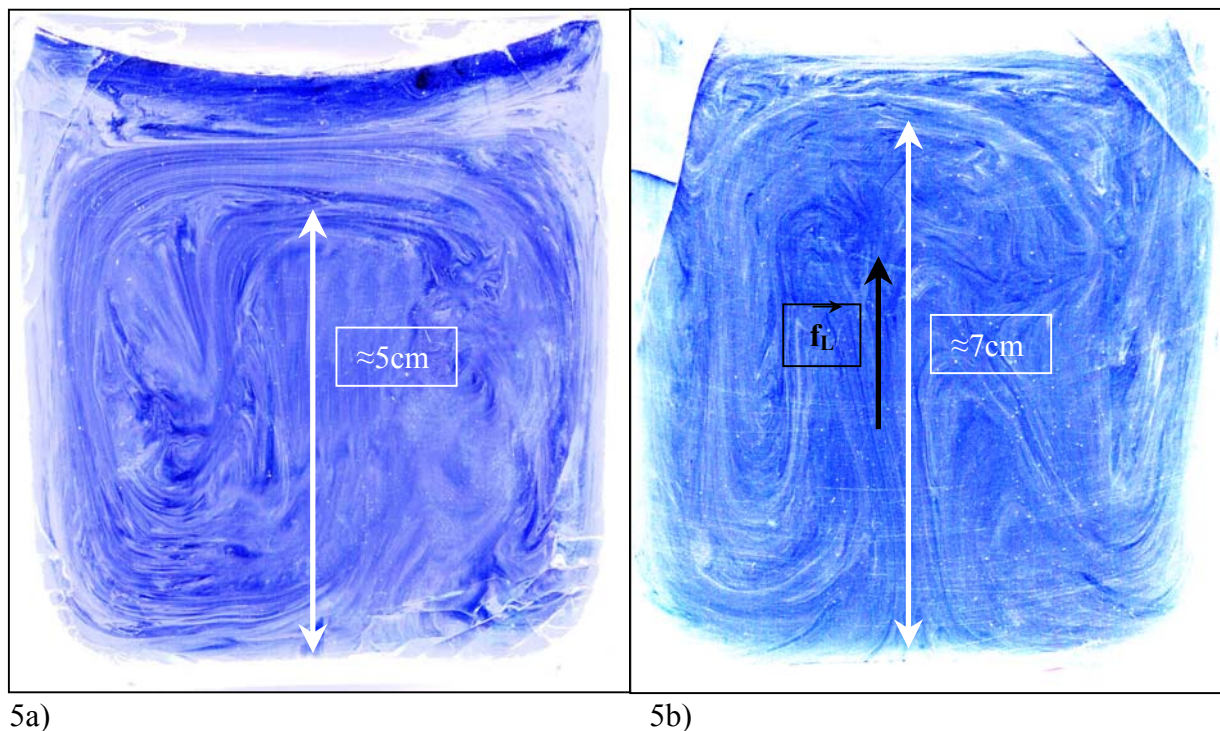


Abb. 5: Schlierenbilder (Schnitt: x-z-Ebene) mit Kennzeichnung der Höhe der Aufwärtsströmung im Tiegelzentrum nach 5a) – Experiment II (thermische Konvektion und natürliche Lorentzkraft) und 5b) – Experiment IIIa (thermische Konvektion und natürliche Lorentzkraft, künstliche Lorentzkraft in Richtung +z)

Der Vergleich der Schlierenbilder ermöglicht die qualitative Bewertung der Veränderung der Strömungsverhältnisse in der Glasschmelze. Dabei müssen die während der Abkühlung zusätzlich ablaufenden physiko-chemischen Prozesse (z.B. Diffusion, Phasenbildung) berücksichtigt werden. In Abbildung 5a ist zu erkennen, dass, bedingt durch die Auftriebskräfte und natürlichen Lorentzkraft, welche besonders in Elektrodennähe wirken [8,9], die sich ausbildende Strömung vorwiegend um die Elektroden konzentriert ist. Weiterhin deutet die starke Schlierenbildung an den Tiegelwänden auf eine schlechte Durchmischung besonders in den Randbereichen hin. Mit der Generierung der künstlichen Lorentzkraft (Abbildung 5b) entsteht eine zusätzliche

Volumenkraft in der Schmelze zwischen den Elektroden. Die Richtung der Lorentzkraft in positive z-Richtung (Experiment IIIa) unterstützt damit die vorhandene Schmelzströmung. Somit bilden sich größere Strömungswirbel aus, welches im Schlierenbild durch deutliche Zunahme der Höhe der Aufwärtsströmung im Tiegelzentrum zu erkennen ist und zu einer verstärkten Homogenisierung in den Randbereichen führt.

Um die Auswirkungen der elektromagnetischen Strömungsmodifizierung auf die mikroskopischen Strukturen zu charakterisieren, finden zur Zeit noch Untersuchungen (z.B. zum Beispiel mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie, chemischer Analyse, Röntgendiffraktometrie) statt.

MAGNETISCHE MODIFIZIERUNG

Für die Herstellung von Bariumhexaferritpulver mit Hilfe der Glaskristallisationstechnik werden Schmelzen aus dem System BaO-Fe₂O₃-B₂O₃ verwendet. Die Homogenität der Schmelze und die Redoxverhältnisse der Ionen (Fe²⁺/Fe³⁺- Verhältnis) sind besondere Merkmale, welche die sich anschließenden Prozesse der Kristallisation von Bariumhexaferrit nachhaltig beeinflussen. Darum wurde untersucht, ob in Schmelzen dieses Systems von außen aufgeprägte Magnetfelder bisher ungenutzte Wirkungen erzeugen.

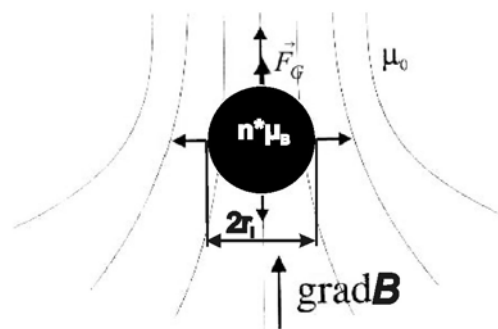


Abb.6: Grenzflächenkraft F_G auf ein paramagnetisches Ion mit dem Radius r_i , μ_0 -absolute Permeabilität, μ_B -Bohrsches Magneton, [10]

Existieren in der Schmelze Ionen mit einem resultierenden magnetischen Moment (z.B. Fe²⁺, Fe³⁺, Co²⁺, ...), entstehen durch ein eingepprägtes Magnetfeld, das einen Flussdichtegradienten aufweist, paramagnetische Kräfte in Richtung des Feldgradienten [10,11]. Abbildung 6 zeigt in prinzipieller Darstellung die Grenzflächenkraft F_G , welche proportional zum magnetischen Moment ($n \cdot \mu_B$) und dem Quadrat des Feldgradienten $\{grad(B^2)\}$ auf ein paramagnetisches Ion wirkt.

Für die Erzeugung des magnetischen Flussdichtegradienten dient ein Magnetsystem, in dessen

Luftspalt ein MnZn-Ferrit eingebracht wird (siehe Abbildung 7). Der daraus resultierende Feldgradient durchsetzt ebenfalls den im Luftspalt positionierten Laborschmelzofen und die sich in einem Tiegel befindende Schmelze.

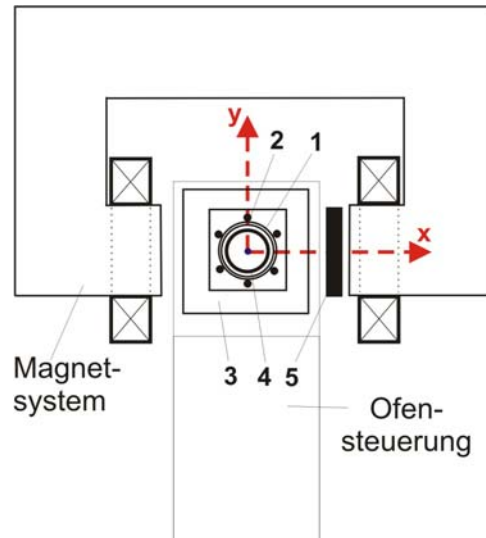


Abb.7: Draufsicht auf die Laborschmelzanlage: 1-Mullitrohr, 2-bifilare Heizelemente, 3-thermische Isolierung, 4-Tiegel, 5-MnZn-Ferrit

Die magnetische Flussdichte $B(z)$ im Luftspalt wurde mit Hilfe eines Hallsensors ermittelt und daraus der Gradient $B \cdot \Delta B / \Delta z$ bestimmt (siehe Abbildung 8). Die so ermittelte Größe des Feldgradienten beträgt $\pm 8 \cdot 10^{-3} \text{ T}^2/\text{m}$ bei einer maximalen Flussdichte von 44mT im Luftspalt. Über die Positionierung des Schmelztiegels im Ofen kann die Richtung der paramagnetischen Kraftwirkung variiert werden. Die realisierten Positionen sind in Abbildung 8 schematisch gezeigt. Das Magnetsystem wurde während der Abkühlung bei einer Temperatur von 1050°C abgeschaltet. Nach Erstarrung des Glases im Tiegel erfolgte die Entnahme von Bohrkernen mit Hilfe eines Diamanthohlbohrers (Innendurchmesser 14mm). Von den Probekernen (Höhe ca. 80mm) wurde der obere und der untere Teil (jeweils ca. 20mm) abgetrennt und nach Zerkleinerung die Dichte (Messgerät: Accupyc 1330 Micromeritics, Neuss) bestimmt. Die Proben des unteren Teilstückes weisen generell eine höhere Dichte auf. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Dichtedifferenz zwischen den Teilstücken der Probenkerne sich in Abhängigkeit der Tiegelposition (Richtung des Feldstärkegradienten) verändert, siehe Abbildung 9. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass auch die paramagnetischen Grenzflächenkräfte für eine Modifizierung von Entmischungen in Schmelzen genutzt werden können.

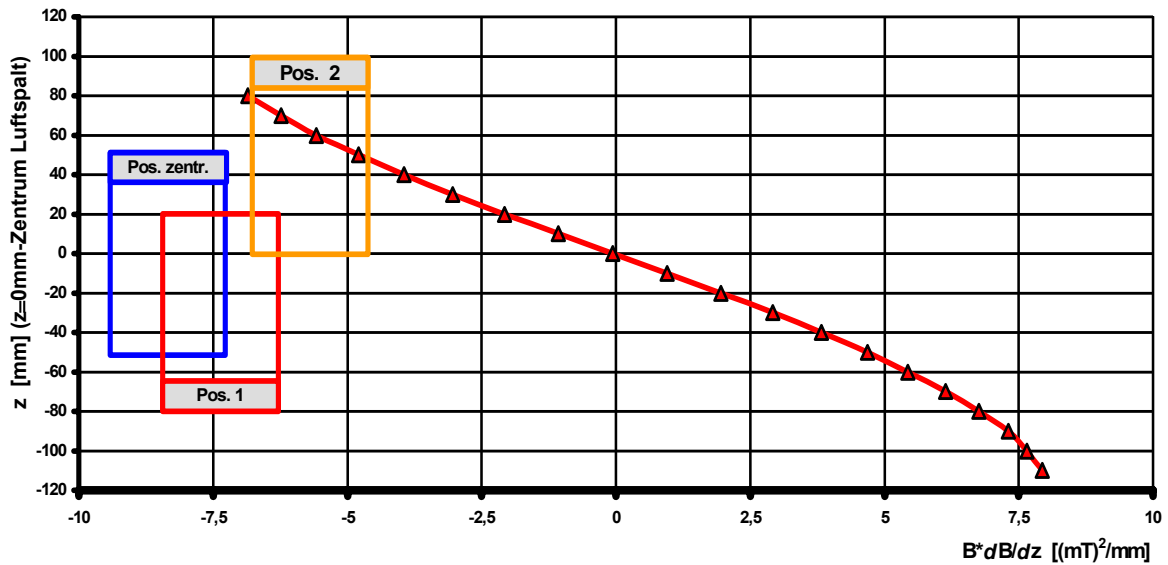


Abb.8: Gradient der magnetischen Flussdichte $B \cdot \Delta B / \Delta z$ im Zentrum des Luftspaltes des Magnetsystems, Angabe über verschiedene Positionen des Schmelztiegels im Magnetfeld

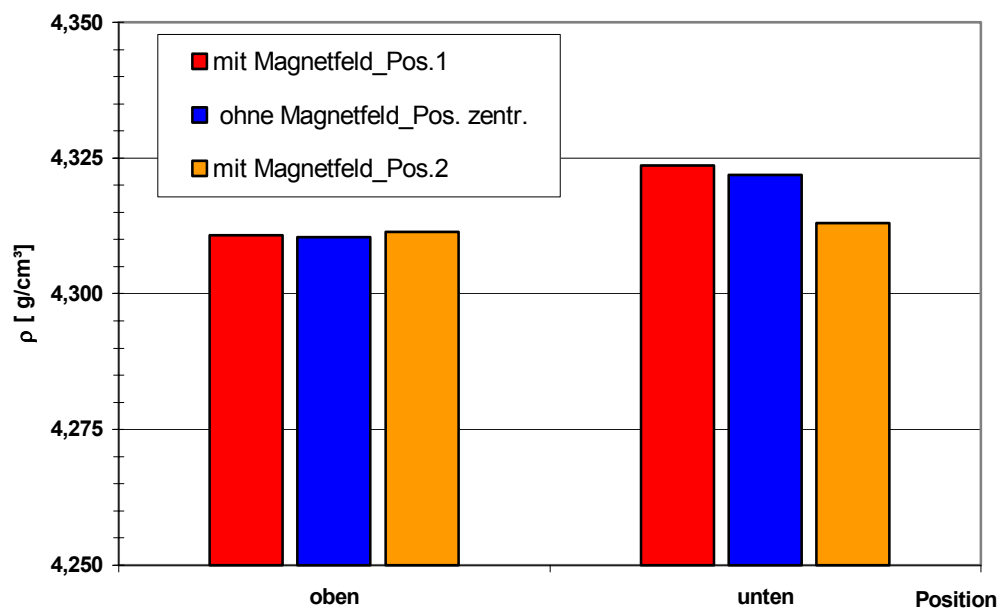


Abb.9: Mittlere Dichteverteilung der Teilstücke von Probekernen (oben, unten) der Zusammensetzung 40% BaO – 27% Fe₂O₃ – 33% B₂O₃ (Mol%) bei verschiedenen Positionen des Schmelztiegels (siehe Abb.8) im Magnetfeld

Die weitere Bewertung der elektromagnetischen Effekte erfolgt durch analytische Untersuchungen an Glasproben, zum Beispiel mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie, chemischer Analyse, Röntgen-diffraktometrie und magnetischen Messungen. Ausgehend von den bisher gewonnenen Ergebnisse werden die Möglichkeiten zur elektromagnetischen Modifizierung von Entmischungen in Glasschmelzen weiter erforscht.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Elektromagnetisch erzeugte Kräfte zur Homogenisierung von Schmelzen haben hohes Anwendungspotential für die Praxis. Die Ergebnisse zum Rühren mittels künstlichen Lorentzkräften zeigen, dass schon mit Hilfe geringer magnetischer Feldstärken ($B=44\text{mT}$) in einer direkt elektrisch beheizten Glasschmelze Strömungen gezielt modifiziert werden können.

Die Wirkungen eines Magnetfeldgradienten auf paramagnetische Ionen in der Glasschmelze sind bisher erstmals nachgewiesen, aber noch nicht ausreichend erforscht. Erste Ergebnisse im vorgestellten Material weisen auf eine Modifizierung der Schmelzen durch die erzeugte paramagnetische Kraftwirkung hin. Dabei wirken die Grenzflächenkräfte der Gravitation entgegen.

Die Ergebnisse entstanden im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschergruppe „Magnetofluidynamik“ an der TU Ilmenau. Die Autoren danken der DFG für die Förderung.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] VOGEL, W. : Glaschemie : Springer-Verlag, 3. Auflage, 1992
- [2] VOGEL, W.; SCHMIDT, W.; HORN, L. : *Die mehrphasige Struktur von Bariumborosilicatgläsern als Folge einer stufenförmig ablaufenden Phasentrennung* : Z. Chem., 9. Jg. (1969) Heft 11, S.401-410
- [3] LEVIN, E. M.; UGRINIC, G. : J. Research Natl. Bur. Standards, 51, [1], 48, 1953
- [4] MACHALE A. E. : Phase equilibria diagrams / Vol. 12 / Oxides : American Ceramic Society, 1996
- [5] SIMS, R. : *Rühren im Glas – ein Technologieüberblick* : Proc. 75. Glastechnische Tagung, S. 117–121, Deutsche Glastechnische Gesellschaft e.V., 2001
- [6] HÜLSENBERG, D.; HALBEDEL, B.; CONRAD, G.; THESS, A.; KOLESNIKOV, J.; LÜDTKE, U. : *Electromagnetic Stirring of Glass Melts Using Lorentz Forces: Experimental Results* : Glass. Sci. Technol. 77, S.186-193, 2004
- [7] KRIEGER, U.; HALBEDEL, B.; HÜLSENBERG, D.; LÜDTKE, U.; KOLESNIKOV, Y.; THESS, A. : *Elektro-magnetische Strömungsbeeinflussung in Glasschmelzen* : Proc. 78. Glastechnische Tagung, Deutsche Glastechnische Gesellschaft e.V., 2005
- [8] HOFMANN, O.R.; THESS, A. : *Elektromagnetische Beeinflussung der Glasbadströmung – Ein neues Anwendungsgebiet der Magneto hydrodynamik* : Glas - Ingenieur, 1, 39–45, 2002
- [9] HOFMANN, O.R. : *Electroagnetic force in electric glass melting* : Glass Sci. Technol., 76, S. 190-194, 2003
- [10] HALBEDEL, B.; KRIEGER, U.; HÜLSENBERG, D.; LÜDTKE, U.; THESS, A. : *Generation and Influences of Lorentz and Magnetic Interfacial Forces on Black Melts from the BaO-B₂O₃-Fe₂O₃-SiO₂ System* : Proceedings 4th ASIA-EURO Workshop of Electromagnetic Processing of Materials, 06.- 9.09.2004, Shenyang/China
- [11] HALBEDEL, B.; KRIEGER, U.; GEORGI, CH.; HÜLSENBERG, D. : *Influence of a low AC Magnetic Field on Glass Melts with Paramagnetic Ions* : Proceedings 6th Pamir International Conference on Fundamental and Applied MHD, 27.06.-01.07.2005 Riga/Latvia

Autorenangabe(n):

Titel Vorname Nachname	Dipl.-Ing. Uwe Krieger
Titel Vorname Nachname	Prof. Dr. rer. oec. Dr.-Ing. Dagmar Hülsenberg
Titel Vorname Nachname	Dr. Bernd Halbedel
Titel Vorname Nachname	Jan Räthel
Einrichtung, Straße, PF	TU Ilmenau, Gustav Kirchhoffstr. 6
PLZ, Ort	98693, Ilmenau
Tel.:	+49+3677-691561
Fax:	+49+3677-691436
E-mail:	Uwe.Krieger@tu-ilmenau.de