

# Messung der Viskosität von Hochtemperatur-Metallschmelzen

G. Lohöfer

Institut für Materialphysik im Weltraum, DLR, Köln

AK Thermophysik, Graz, 03.-04.05.2012

# Probleme beim Prozessieren von Metallschmelzen

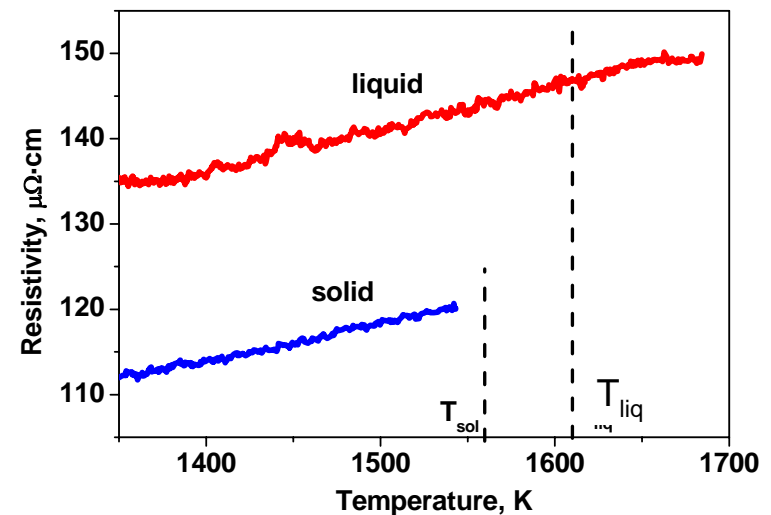
**Hohe Temperaturen**

- **Chemische Reaktion**
- **Mechanische Wechselwirkung**  
mit Tiegelwänden

- **Hohe Abdampfraten**

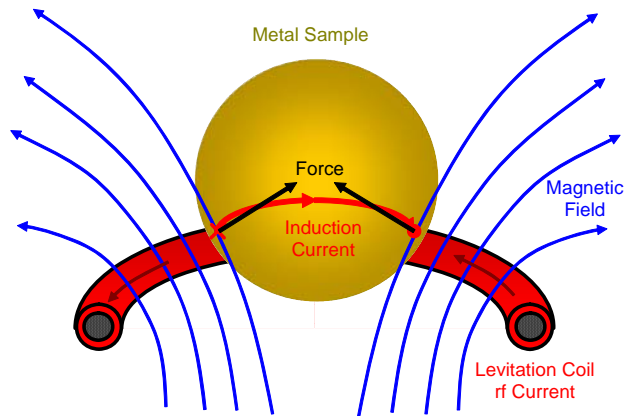
Unterkühlter Temperaturbereich

**Berührungsloses**  
**Prozessieren + Messen**



# Behälterloses Prozessieren von Metallen

## 1. Elektromagnetische Levitation



**Hochfrequentes**  $\Rightarrow$  Induktion von **Wirbelströmen** in Metallschmelze  
**Magnetfeld**  $\Rightarrow$  **Lorentz Kraft**  $\propto -\mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{B}$  (= Probengewicht)  
(~300kHz)  $\Rightarrow$  **Ohmsches Heizen**  $\propto \mathbf{B}^2$

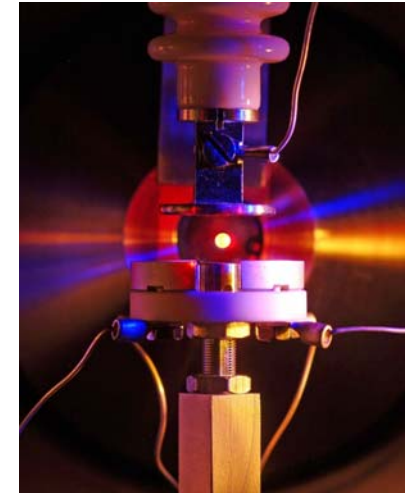
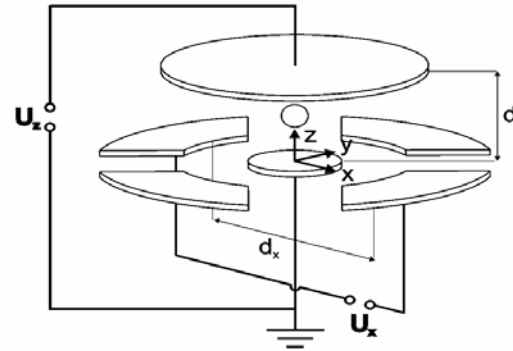
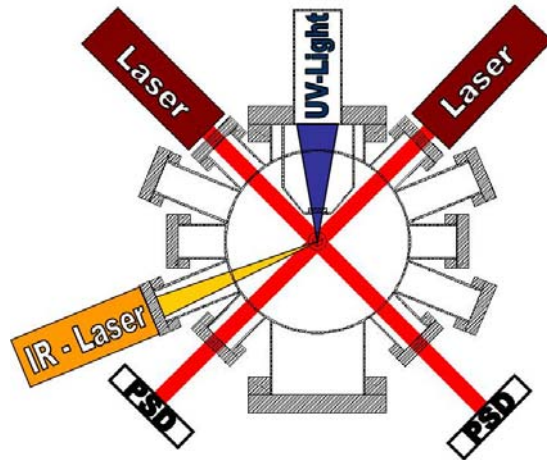
### Technische Vorteile:

- **Selbststabilisierende** Probenposition
- Relativ **einfacher** Experimentaufbau

### Technische Nachteile:

- Positionieren und Heizen **nicht unabhängig**

## 2. Elektrostat~~ische~~ Levitation



- Statisches elektrisches Feld ( $\sim 10\text{kV} / 8\text{mm}$ )  $\Rightarrow$  Influenz von **Oberflächen-Ladungen**  
 $\Rightarrow$  **Instabiles** el.-stat. Kraftfeld
- Infrarot Laser ( $\sim 25\text{W}$ )  $\Rightarrow$  **Heizen** der Metallprobe
- UV-Lampe  $\Rightarrow$  **Nachladen** der Metallprobe

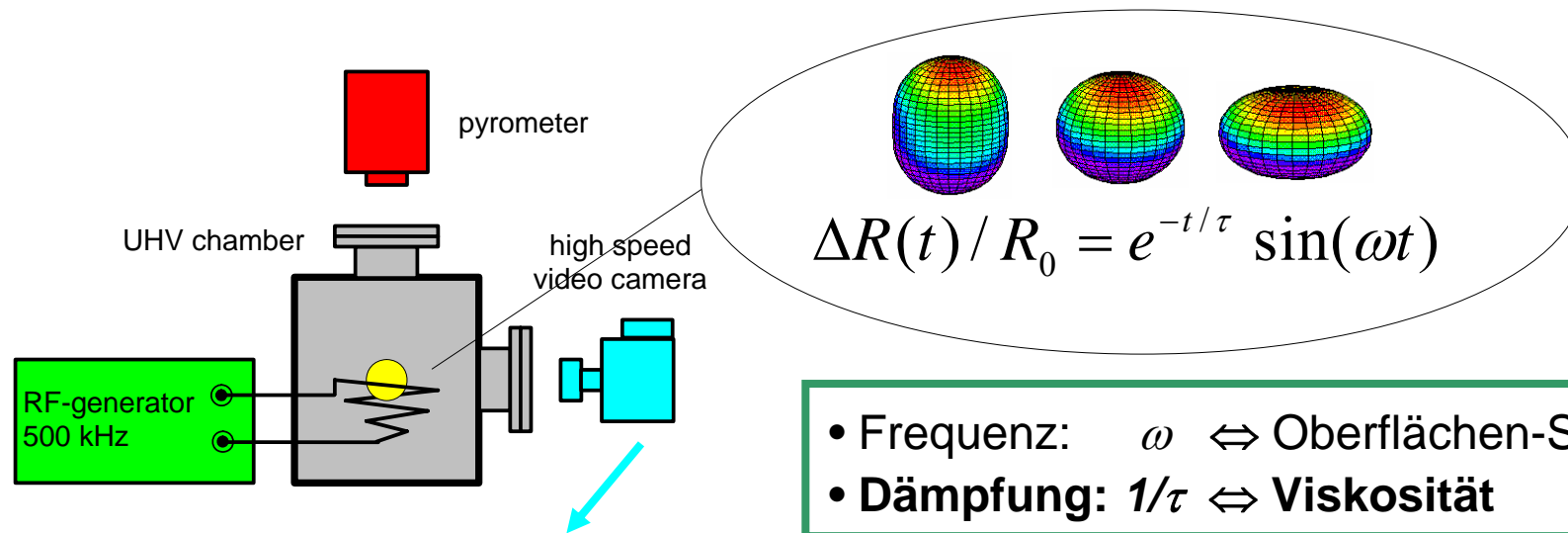
Technische Vorteile:

Technische Nachteile:

- Positionieren und Heizen **unabhängig**
- Aktive **Regelung** der Probenlage
- El. **Ladungsverluste** durch Abdampfen
- **Komplexer** Experimentaufbau

# Berührungsloses Messverfahren (Viskosität)

## Anregung von Oberflächenschwingungen



## Standard Auswertung

Bildanalyse  $\Rightarrow$  Frequenzspektrum

Physikalisches Model

**Problem:**

Einfluss der **Levitations-Kraftfelder**

Oberflächenspannung, **Viskosität**

# Existierende Modelle für Oberflächenschwingungen

## Grundlage: Navier-Stokes Gleichung

$$\rho \underbrace{(\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u})}_{d\mathbf{u}/dt} = -\nabla(p + \rho g z) + \eta \Delta \mathbf{u} + \mathbf{f}_{Vol.} + \mathbf{f}_{Surf.}$$

$$\mathbf{f}_{Vol.} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{f}_{Surf.} = p_{Surf.} \mathbf{n} \delta((\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) \cdot \mathbf{n}_s)$$

$$p_{Surf.} = p_{Oberflächenspannung} + \dots$$

## Generelle Rechen-Annahmen:

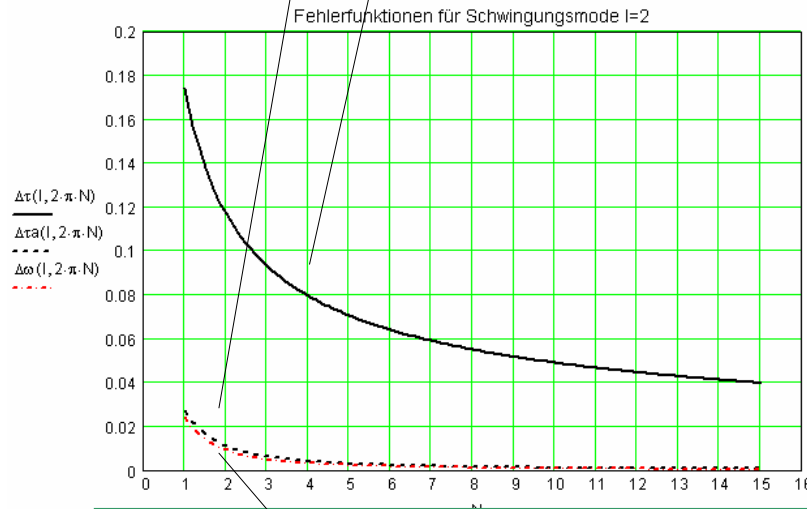
1. Geringe Strömungsgeschwindigkeiten  $\mathbf{u}$ , damit:  $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \ll \partial \mathbf{u} / \partial t$   
 $\Rightarrow$  **Keine** Volumenkräfte **nur** Oberflächenkräfte  
 $\Rightarrow$  Entweder:  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$   
oder kleine Skineindringtiefe:  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} \rightarrow p_{Mag} = B^2 / 2\mu$
2. Möglichst kugelförmige Schmelze für Störungsrechnungen  
 $\Rightarrow$  große Oberflächenspannung  $\gamma$

Unter obigen Annahmen:

⇒ **asymptotische Lösung für schwache Dämpfung:  $\omega\tau \rightarrow \infty$**

Modenfrequenz  $\omega_{2,m}^2 = \underbrace{\frac{32\pi}{3} \frac{\gamma}{M}}_{\text{Rayleigh frequency}} + \underbrace{\Omega_{2,m}^2(p_{mag})}_{\text{shape correction}}$   $\gamma$ : Oberflächenspannung  
 $M$ : Masse

**Dämpfung**  $\frac{1}{\tau} = \underbrace{\frac{20\pi}{3} \frac{\eta R_0}{M}}_{\text{Lamb damping}}$   $\eta$ : Viskosität



Formelfehler als  
 Funktion der Dämpfung

$$N_e := \omega\tau / 2\pi$$

$$\frac{20\pi}{3} \frac{\eta R_0}{M} = \frac{1}{\tau} \left( 1 - \sqrt{\frac{18}{125} \frac{1}{\sqrt{\omega\tau}}} \right)^{-1}$$

**Lösung für mittlere Dämpfung**

Zu welchen Messumgebungen passen die theoret. Annahmen ?

Geringe Strömungsgeschwindigkeiten  $\mathbf{u}$

⇒ **Keine** Volumenkräfte **nur** Oberflächenkräfte

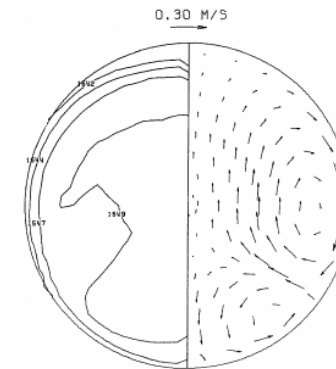
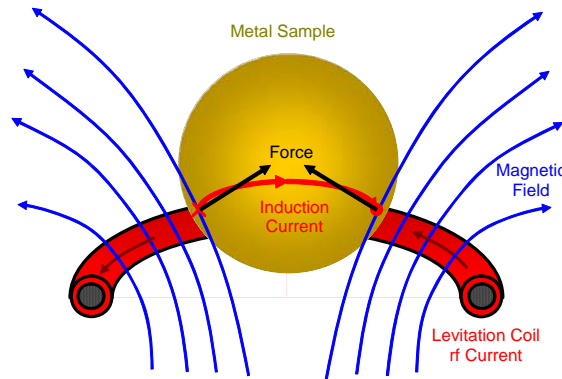
⇒ Entweder:  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$

oder kleine Skineindringtiefe:  $\mathbf{j} \times \mathbf{B} \rightarrow p_{Mag} = B^2 / 2\mu$



# Einfluss der Levitationsfelder

1. Elektromagnetisch:  $\langle j \times B \rangle \approx \rho g$ , rel. Skintiefe:  $\delta \approx 1/3 R_0$   
 $\Rightarrow f_{Vol} \neq 0$ : Modellannahmen sind **nicht** erfüllt !!



N. El Kaddah,  
J. Szekeley

Turbulente Strömung:  $u \sim 100 \text{ mm/s}$  bei  $R_0 \sim 3 \text{ mm}$

## Experimentelles Ergebnis

Dämpfung:  $\frac{1}{\tau} = \frac{20\pi \eta R_0}{3 M}$   $\Rightarrow$  **falscher** Wert für  $\eta$   
Lamb damping

Frequenz:  $\omega_{2,m}^2 = \frac{32\pi \gamma}{3 M} + \underbrace{\Omega_{2,m}^2 (p_{mag})}_{\text{shape correction}}$   $\Rightarrow$  **richtiger** Wert für  $\gamma$  !?

Rayleigh frequency

## 1a. Elektromagnetische Levitation unter „Schwerelosigkeit“

$$\mathbf{f}_{Vol} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \approx \mathbf{0} \Rightarrow \text{Theoretische Modellannahmen sind **erfüllt** !!}$$



### Vorteil:

- Technisch relativ einfach

### Nachteil:

- Seltene Gelegenheit

Experimentierzeit:  
 $\approx 20$  sec

Experimentierzeit:  
mehrere Stunden

### Experimentelles Ergebnis

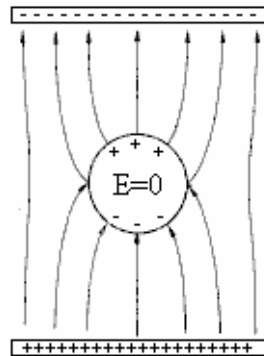
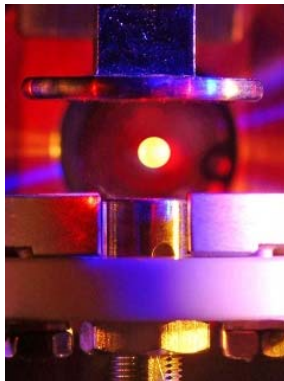
$$\text{Dämpfung: } \frac{1}{\tau} = \frac{20\pi \eta R_0}{\underbrace{3 M}_{\text{Lamb damping}}} \Rightarrow \text{richtiger Wert für } \eta$$

$$\text{Frequenz: } \omega_{2,m}^2 = \frac{32\pi \gamma}{\underbrace{3 M}_{\text{Rayleigh frequency}}} \Rightarrow \text{richtiger Wert für } \gamma \text{ (ohne Formkorrekturfaktor !!)}$$



## 2. Elektrostatiche Levitation: $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ in Metallschmelze

$$\Rightarrow \mathbf{f}_{Vol} = \rho_{el} \mathbf{E} = \mathbf{0}: \text{ Keine Volumenkräfte !!}$$



$$\mathbf{f}_{Surf.} = (\sigma_{el} \mathbf{E} + p_{surf.-tension} \mathbf{n}) \delta((\mathbf{x} - \mathbf{x}_S) \cdot \mathbf{n}_S)$$

nur Oberflächenkräfte

$\Rightarrow$  Geringe Strömungsgeschwindigkeiten  $\mathbf{u}$

$\Rightarrow$  Theoret. Modellannahmen sind **erfüllt** !!

### Experimentelles Ergebnis

$$\text{Dämpfung: } \frac{1}{\tau} = \frac{20\pi}{3} \frac{\eta R_0}{M} \Rightarrow \text{ richtiger Wert für } \eta$$

Lamb damping

$$\text{Frequenz: } \omega_{2,m}^2 = \frac{32\pi}{3} \frac{\gamma}{M} + \underbrace{\tilde{\Omega}_{2,m}^2(p_{el})}_{\text{shape correction}} \Rightarrow \text{ richtiger Wert für } \gamma$$

Rayleigh frequency

### Vorteil:

- Vorhand. Formeln **anwendbar**

### Nachteil:

- Technisch **sehr aufwändig**

## Zusammenfassung

- **Berührungslose** Prozessier- und Messverfahren sind vorteilhaft für Hochtemperaturmetallschmelzen
- Annahmen des physikalischen Messmodells bestimmen **Levitationsmethode**
  - ⇒ Messung der **Viskositäten** nur möglich, wenn Strömungsgeschwindigkeiten **u klein** sind, d.h. wenn keine Volumenkräfte auftreten.
    - ⇒ Nur **elektromagnetische Levitation** unter **Schwereelosigkeit** oder **elektrostatische Levitation**
- Klassische **Formel** für schwache Dämpfung durch frequenzabhängigen Korrekturfaktor auf den Fall **mittlerer Dämpfung** erweiterbar