

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

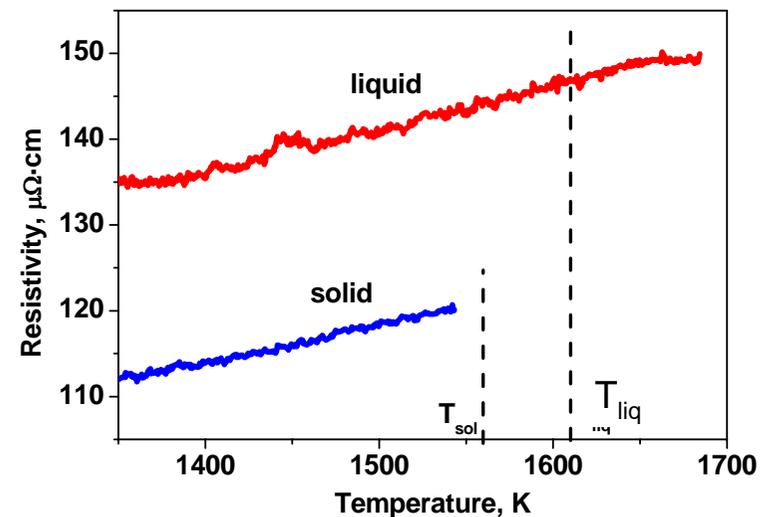
Hohe Temperaturen

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

- **Hohe Abdampfraten**

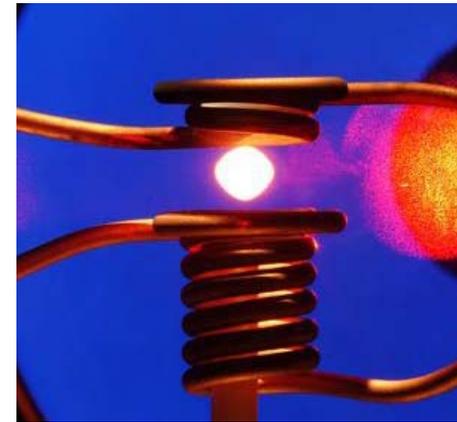
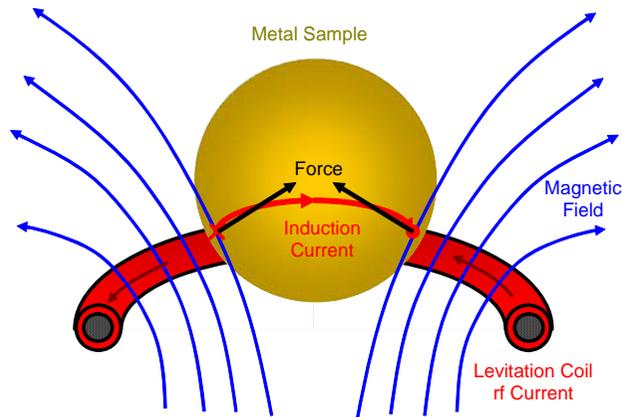
Unterkühlter Temperaturbereich

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** $\propto \mathbf{B}^2$

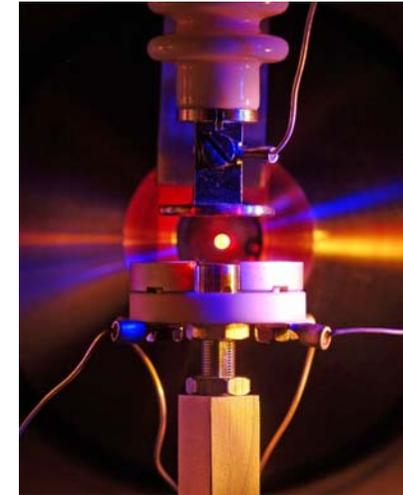
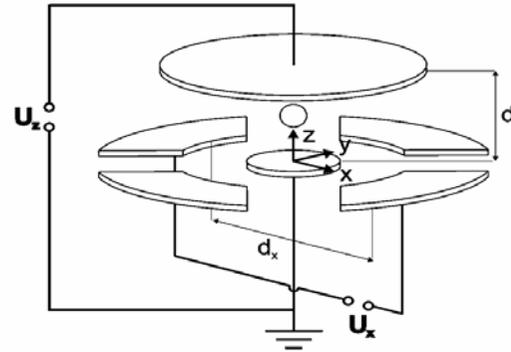
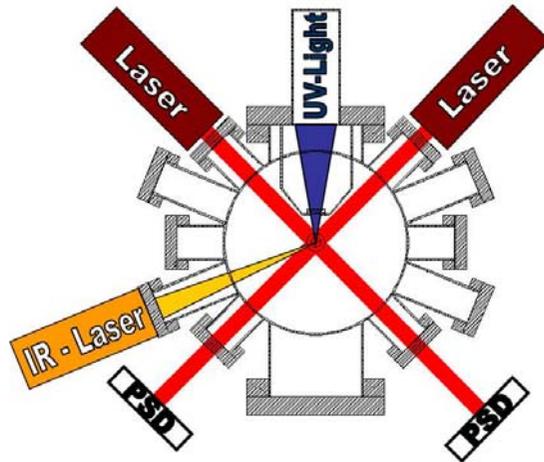
Technische Vorteile:

- **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

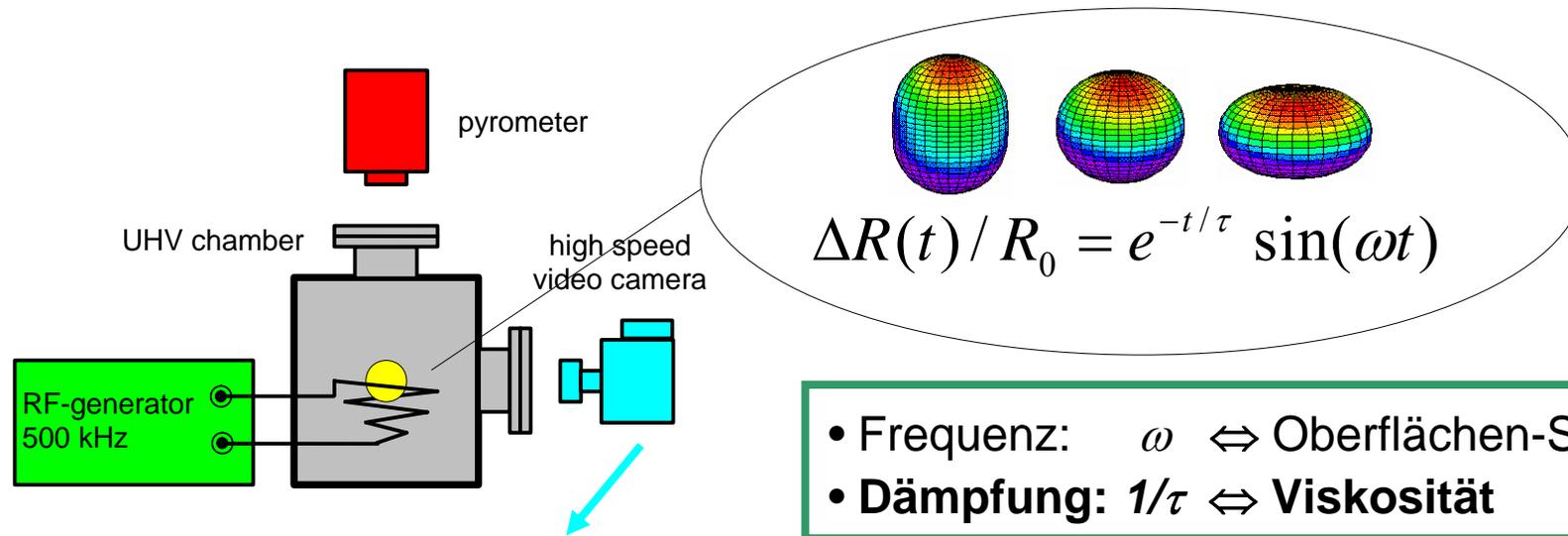
Technische Vorteile:

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:

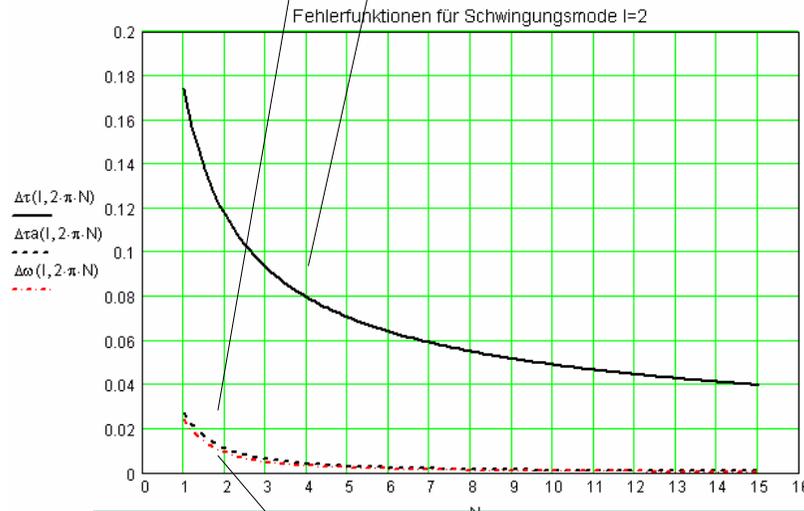
1. Geringe Strömungsgeschwindigkeiten \mathbf{u} , damit: $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \ll \partial \mathbf{u} / \partial t$
 \Rightarrow **Keine** Volumenkräfte **nur** Oberflächenkräfte
 \Rightarrow Entweder: $\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$
oder kleine Skineindringtiefe: $\mathbf{j}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

Unter obigen Annahmen:

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

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

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

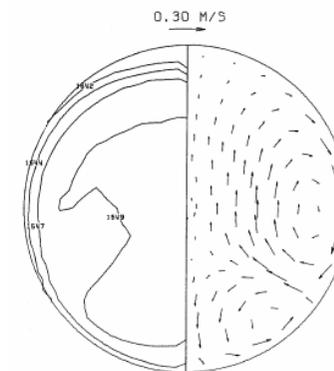
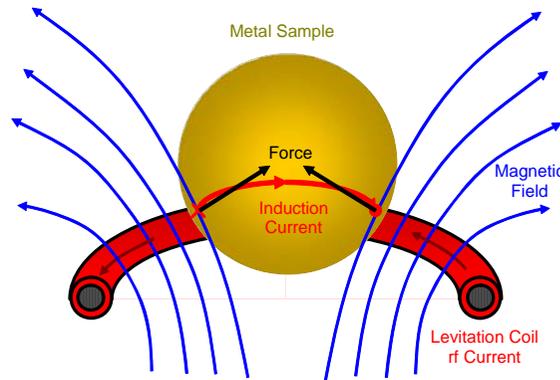
⇒ **Keine** Volumenkräfte **nur** Oberflächenkräfte

⇒ 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 η
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 γ !?

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:
 ≈ 20 sec

Experimentierzeit:
mehrere Stunden

Experimentelles Ergebnis

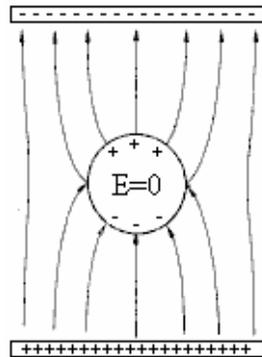
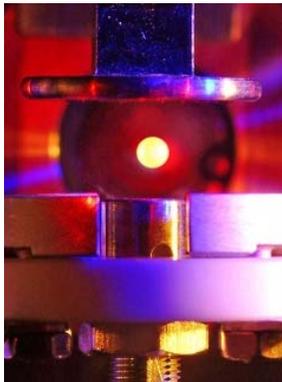
$$\text{Dämpfung: } \frac{1}{\tau} = \frac{20\pi \eta R_0}{\underbrace{3 M}_{\text{Lamb damping}}} \Rightarrow \text{richtiger Wert für } \eta$$

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



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

$\Rightarrow \mathbf{f}_{Vol} = \rho_{el} \mathbf{E} = \mathbf{0}$: **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

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

Lamb damping

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

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