

ELEKTROMAGNETISCHE LEVITATION

- **Grundlagen**
- **Mikrogravitation**
- **Die TEMPUS Anlage**
- **Die Experimentvorbereitung**
- **Das wissenschaftliche Programm**
- **Die Experimente**
- **Perspektiven**

I. Egry

Institut für Raumsimulation

DLR Köln



ELEKTROMAGNETISCHE LEVITATION:

DIE GRÜNDE

ermöglicht

- tiegelfreie Bearbeitung von Metallschmelzen

bietet

- hohe Reinheit
 - * saubere Oberfläche
 - * Unterkühlung
- hohe Temperaturen

erfordert

- inhomogenes Hochfrequenzfeld (≈ 300 kHz)
- berührungsfreie Messverfahren



ELEKTROMAGNETISCHE LEVITATION:

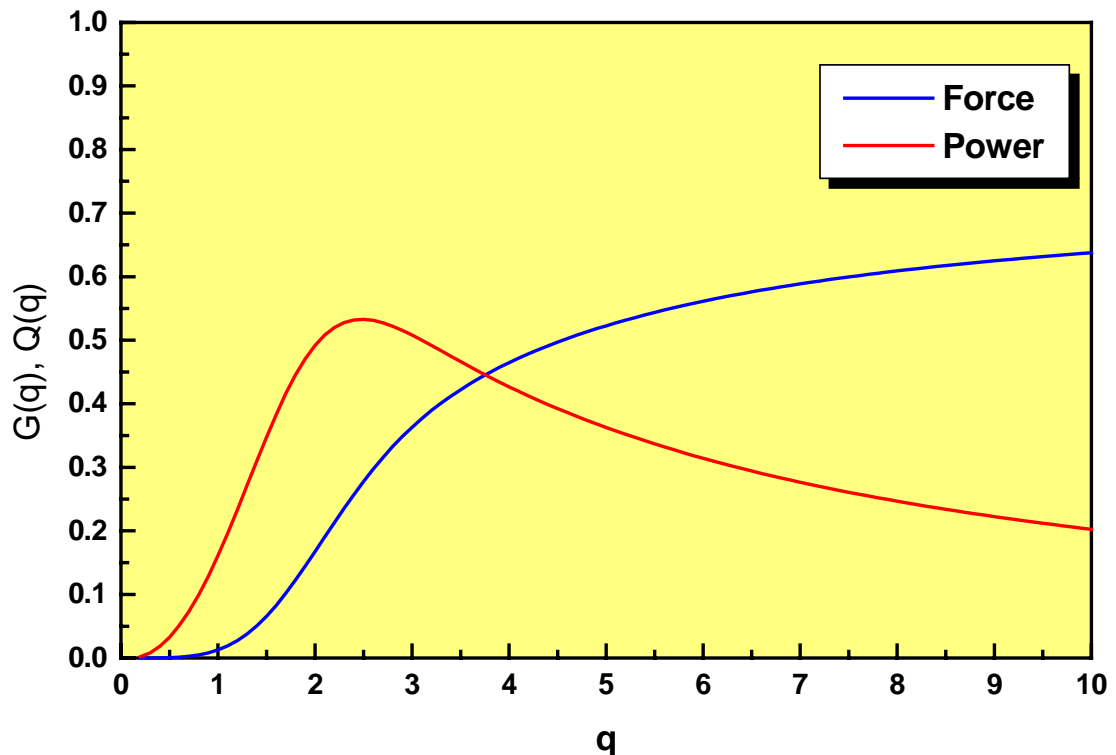
DAS PRINZIP

Positionieren:

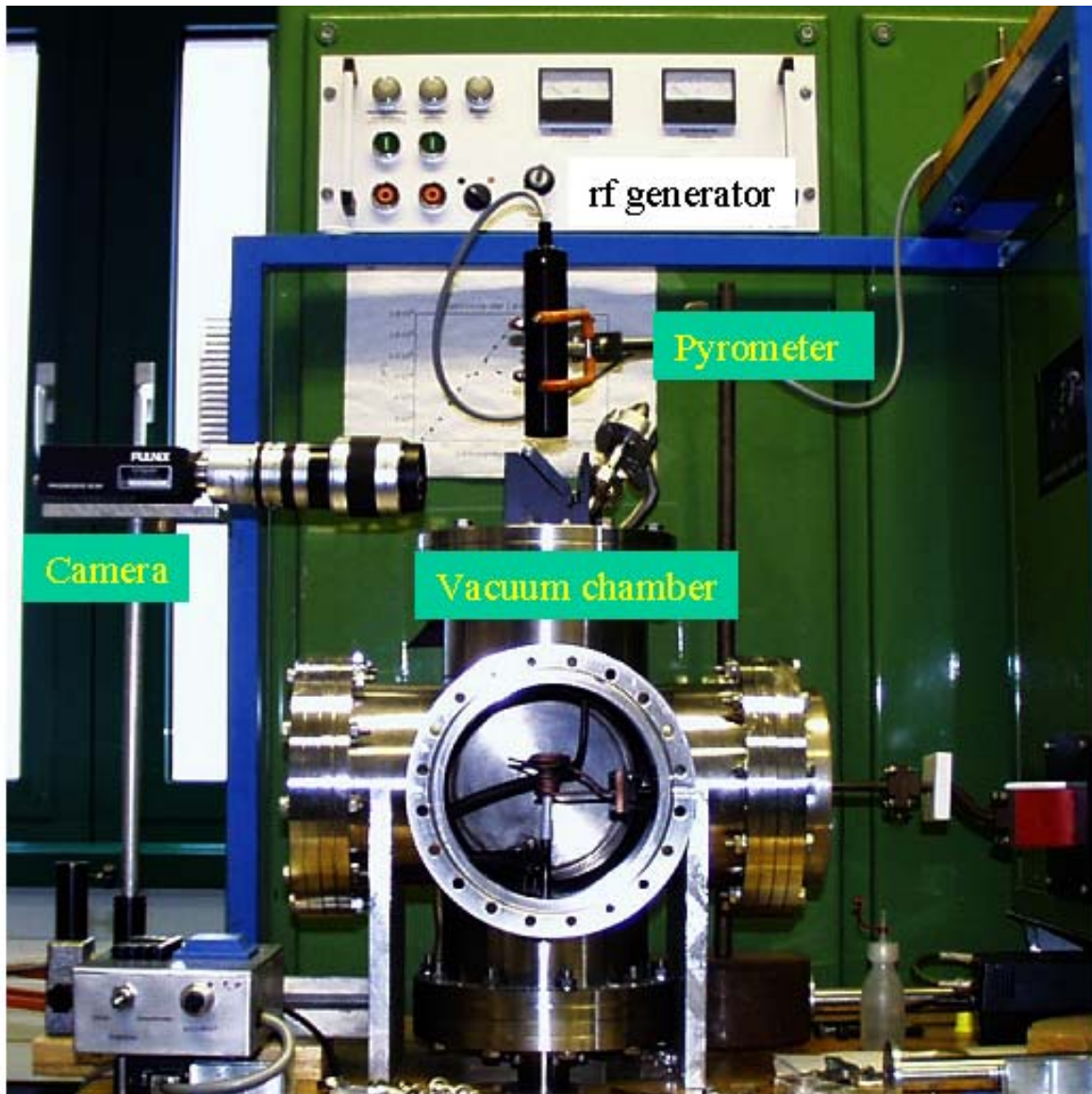
Tragkraft: $\vec{F}_L(\vec{r}) = V \frac{\vec{\nabla} B(\vec{r})^2}{2\mu_0} G(q)$, $\vec{F}_L(\vec{r}_0) = -m\vec{g}_0$

Rückstellkraft: $(\vec{r} - \vec{r}_0) \cdot \vec{\nabla} \vec{F}_L(\vec{r}_0) < 0$

Heizen: $P = V \omega \frac{B^2}{2\mu_0} Q(q)$



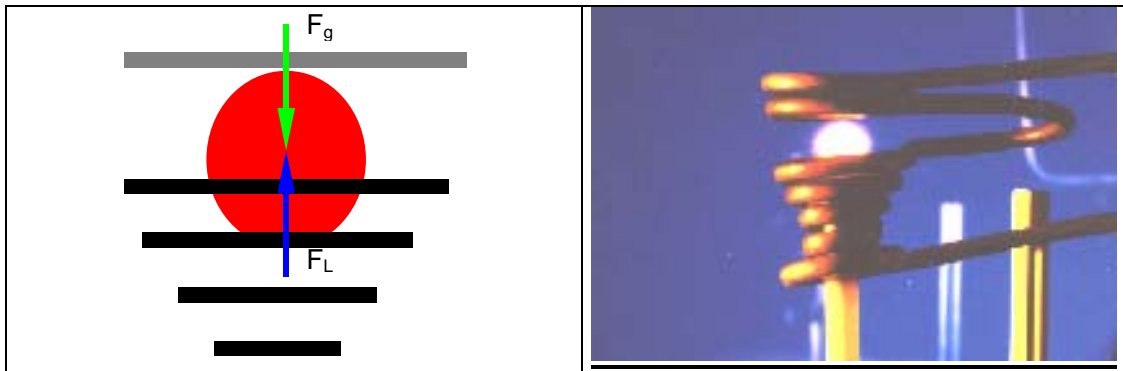
ELEKTROMAGNETISCHE LEVITATION: DIE REALISIERUNG



ELEKTROMAGNETISCHE LEVITATION & MIKROGRAVITATION

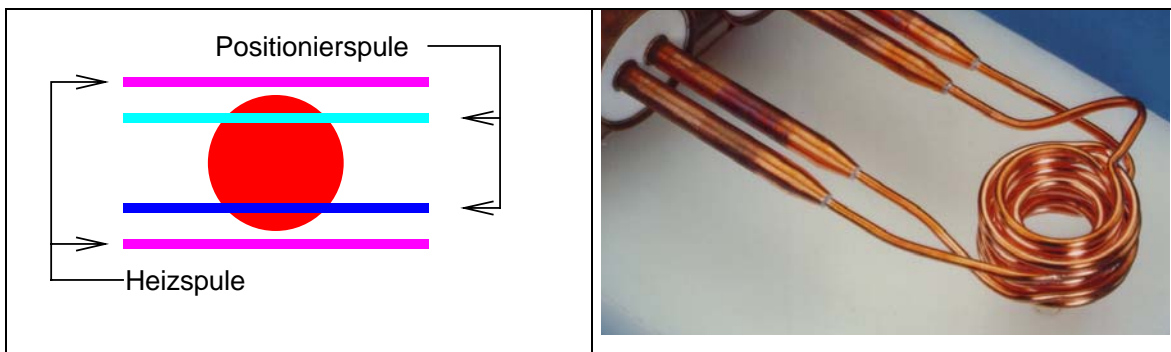
1-g Levitation:

Heizung durch Positionierfeld unvermeidlich
⇒ Einspulensystem



μ -g Levitation:

Heizung durch Positionierfeld vernachlässigbar
⇒ Zweispulensystem
⇒ **Heizung** und **Positionierung** entkoppelt



ELEKTROMAGNETISCHE LEVITATION & MIKROGRAVITATION: DIE VORTEILE

- Weiter Temperaturbereich
(600 - 2400 °C)
- Betrieb unter UHV
(Strahlungskühlung ausreichend)
- keine Probendeformation
(geringer magnetischer Druck)
- große Proben
(\varnothing 6-8 mm)
- keine Rühreffekte
(laminare Strömung)



DIE TEMPUS-ANLAGE

Tiegelfreies Elektro-Magnetisches
Prozessieren Unter Schwereelosigkeit

4 Modelle:

- | | |
|--------------------|--------------|
| - TEMPUS-Airbus | operationell |
| - TEMPUS- Spacelab | 1994, 1997 |
| - TEXUS-EML | 2005-2006 |
| - MSL-EML | 2008 auf ISS |

Spulensystem:

- * Positionierkreis:
Quadrupolfeld, 150 kHz, 850 W
- * Heizkreis:
Dipolfeld, 350 kHz, 1080 W



DIE TEMPUS-ANLAGE (2)

- **Pyrometer**

1 Si, 2 InAs, 100 Hz & 1 MHz, 300-2400°C

- **Videokameras**

2 Hochgeschwindigkeitskameras 60-480 Hz, s/w für axiale und radiale Beobachtung, 1 hochauflösende Kamera s/w für radiale Beobachtung

- **Proben**

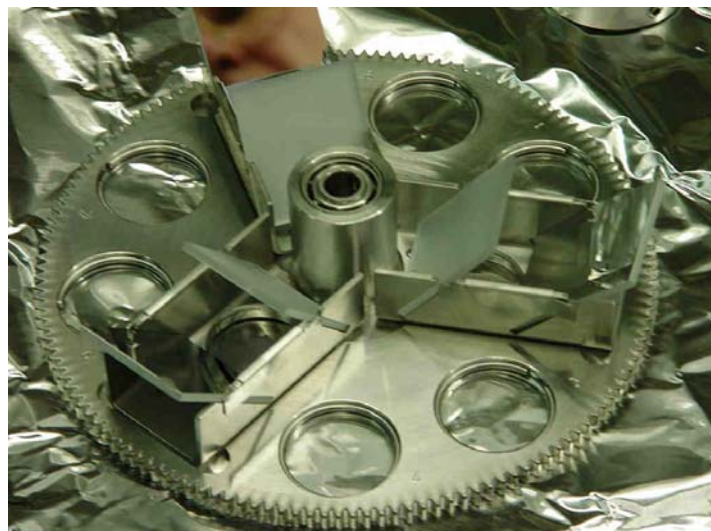
18 Proben (\varnothing 6-8mm) in Käfig oder Becher

- **Bedampfungsschutz**

22 Doppelspiegel oder CaF_2 -Fenster

- **Prozesssteuerung**

- * über Parametersatz
- * interaktiv vom Boden (Telescience)
- * interaktiv von Astronauten



EXPERIMENTVORBEREITUNG

- **Proben**
 - * Herstellung
Zusammensetzung, Formgebung
 - * Charakterisierung
Emissivität, Abdampfrate, ...
- **Mission**
 - * Temperatur-Zeit-Profile
 - * Parameterdefinition
(\approx 1000 pro Experiment)
 - * Ressourcenanforderung
Kontamination, Energie, Video, Crew, ...
 \Rightarrow "Functional Objective Sheet"
 - * Crew-Training
 - * Experimentreihenfolge
Priorität, Kompatibilität, ...
 \Rightarrow "Timeline"



TEMPUS-EXPERIMENTE (MSL-1)

- Unterkühlung und Keimbildung

- * maximale Unterkühlung
- * Keimbildungsstatistik
- * Erstarrungsgeschwindigkeit
- * metastabile Phasen

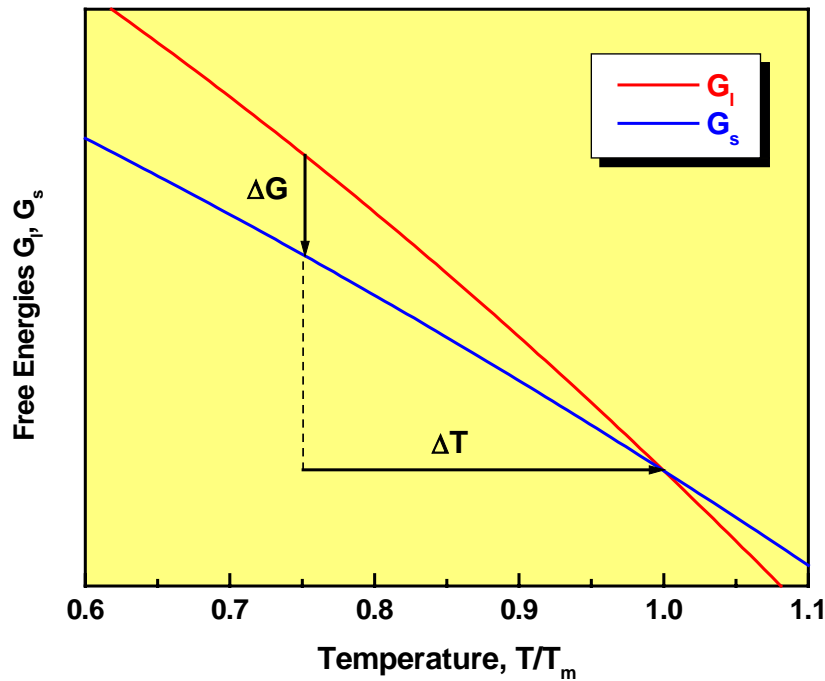
- Thermophysikalische Eigenschaften

- * thermische Ausdehnung
- * spezifische Wärme
- * elektrischer Widerstand
- * Oberflächenspannung
- * Viskosität



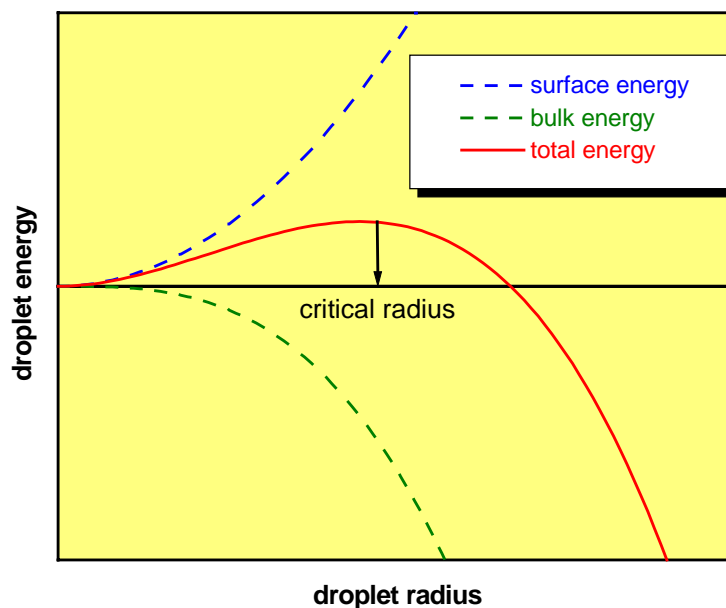
UNTERKÜHLUNG UND KEIMBILDUNG

Gibbsche Freie Energie:



$$\Delta G \propto \Delta T$$

Keimbildungsbarriere durch Grenzflächenenergie:



$$\Delta G^* = \frac{16\pi}{3} \frac{\sigma^3}{\Delta G^2}$$



UNTERKÜHLUNG VON Zr

- Ziel:

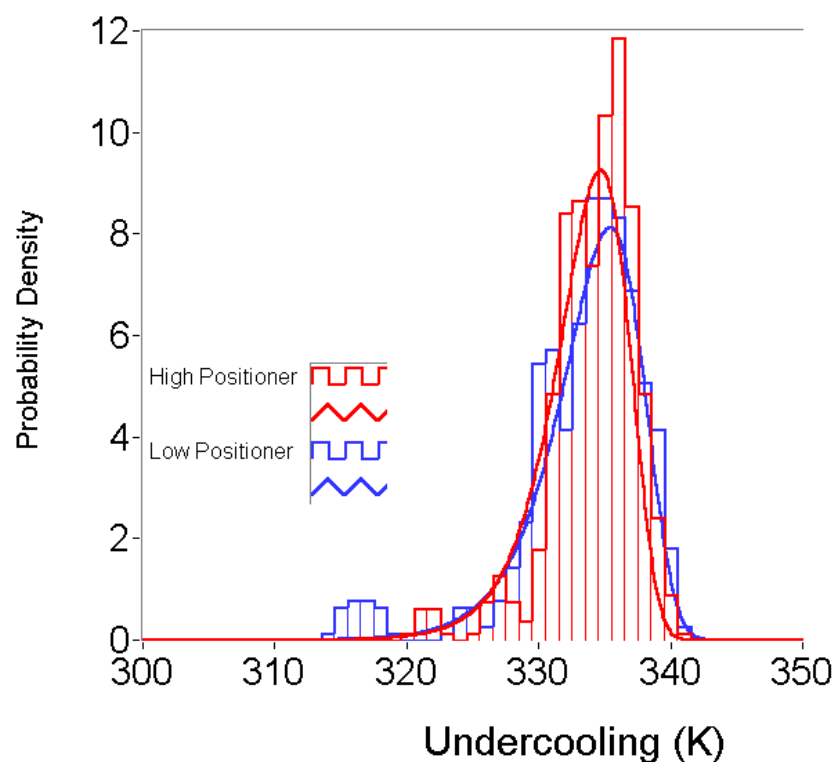
Statistische Analyse der Keimbildung (Scripov)

$$F(T) = 1 - \exp \left[-\frac{V}{\dot{T}} \int_{T_m}^T K_v \exp \left(-\frac{\Delta G^*}{kT} \right) dT \right]$$

$K_v \propto$ Zahl der Keime, $\Delta G^* \propto$ Keimbildungsschwelle

- Experiment:

122 Zyklen, $T_m = 1858^\circ\text{C}$, $T_N = 1525 \pm 2^\circ\text{C}$, $\Delta T = 333^\circ\text{C}$



ERSTARRUNGSGESCHWINDIGKEIT VON Ni

- Ziel:

Diffusionskontrollierte Erstarrungsgeschwindigkeit V
als Funktion der Unterkühlung ΔT

$$\Delta T = \Delta T_{hyp} I_V \left(\frac{VR}{2a} \right) \quad VR^2 = konst$$

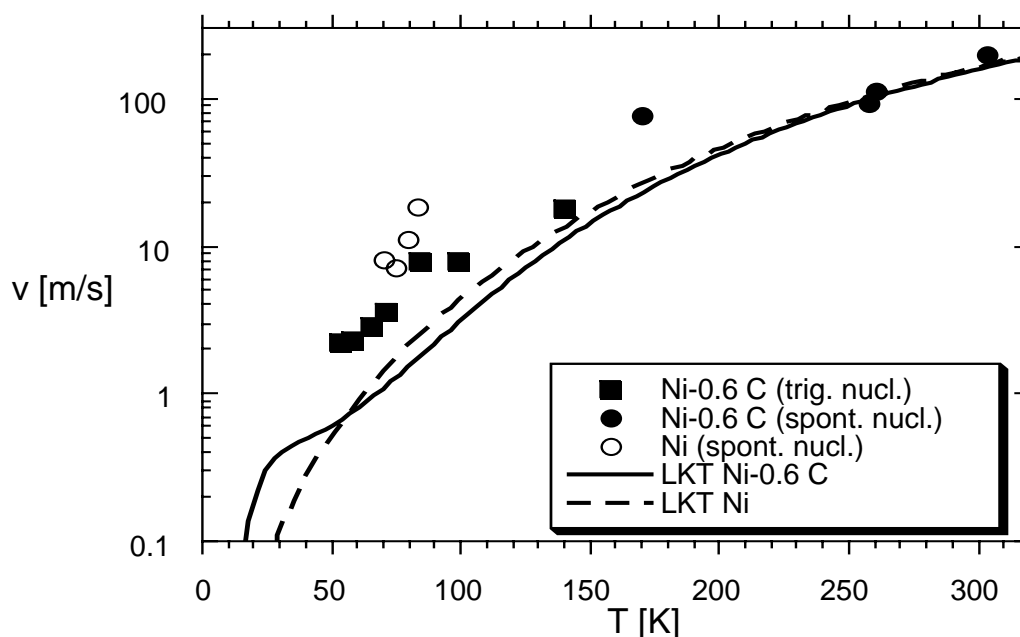
a : thermische (Ni) oder chemische (Ni-C) Diffusivität

- Methode:

räumlich & zeitlich gezielte Auslösung der Keimbildung
("Triggern")

optische Verfolgung der Erstarrungsfront

- Experiment:



ELEKTRISCHER WIDERSTAND VON Zr

- Ziel:

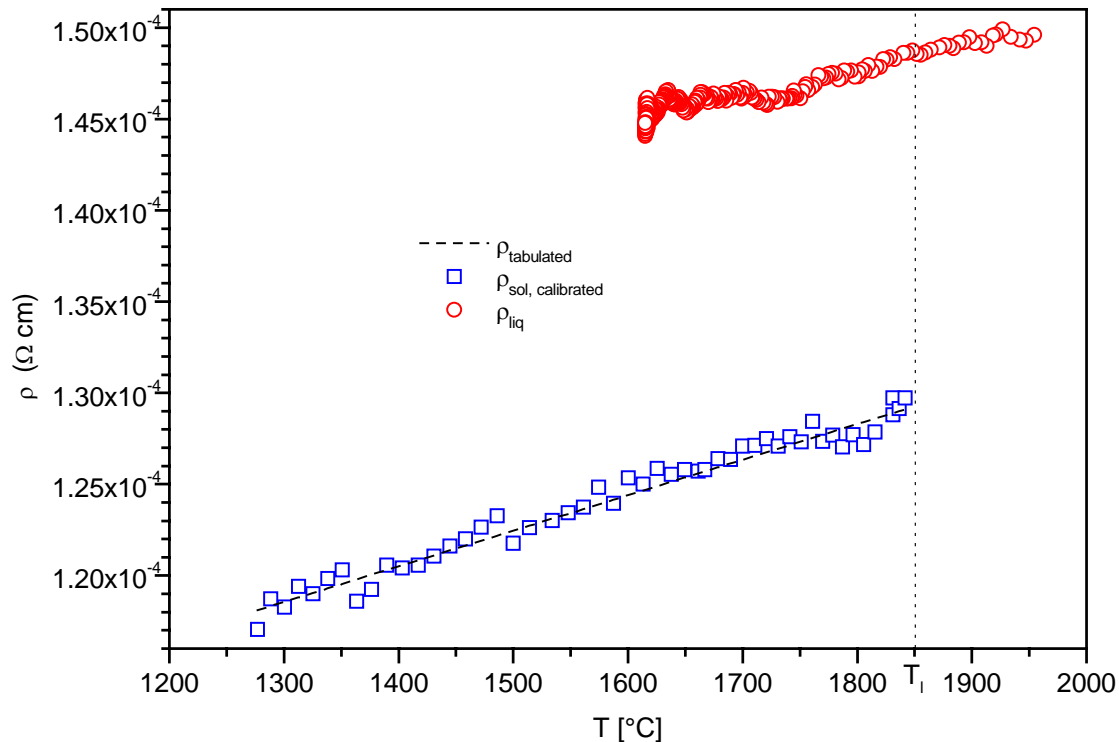
Messung des elektrischen Widerstandes σ als Funktion der Temperatur

- Methode: Impedanzmessung

$$\sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0}} = \frac{R}{2} \left(1 - \sqrt{A - B \frac{I_0}{U_0}} \right)$$

- Experiment:

el. resistivity of Zr (from TEMPUS MSL-1, FO2)



SPEZIFISCHE WÄRME VON ZrNiCuAlNb

- Ziel:

Bestimmung der spezifischen Wärme als Funktion der Unterkühlung in metallischen Glasbildnern

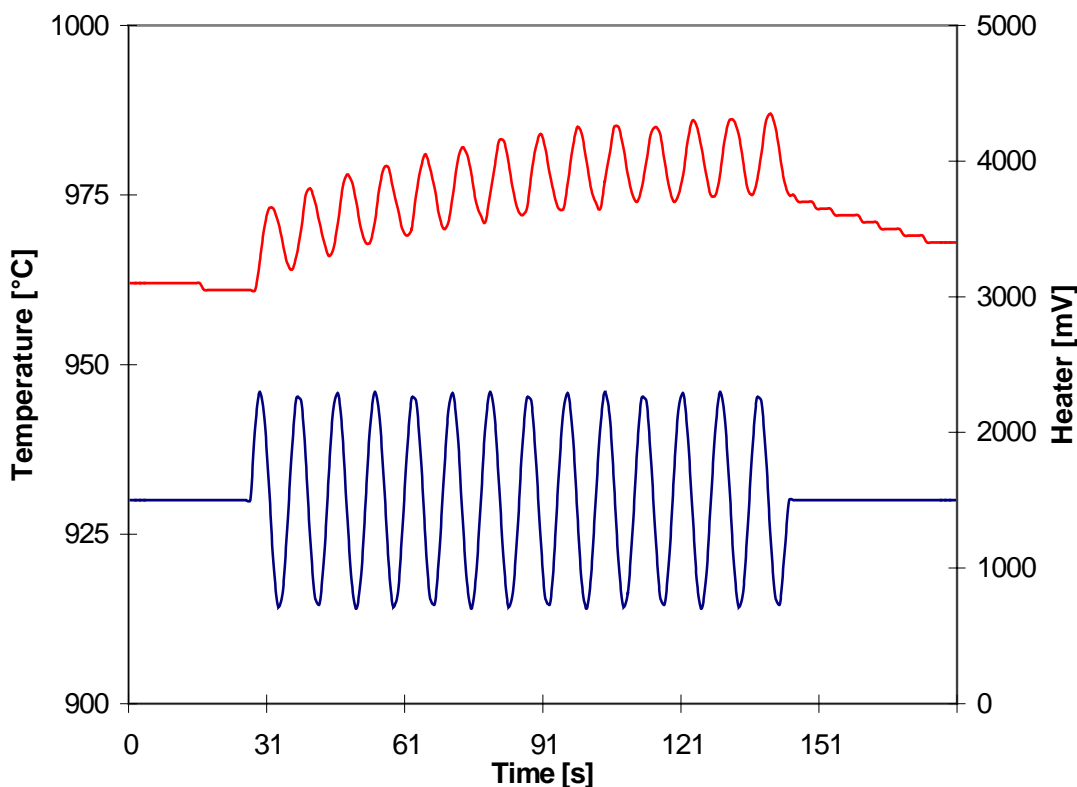
- Methode: Modulationskalorimetrie in UHV

$$P_{\text{in}} = f \{P_0 + P_{\omega} \cos(\omega t)\} = P_{\text{rad}} = 4\pi R^2 \varepsilon \sigma T^4$$

$$\Delta T_{\omega} = \{f P_{\omega} / \omega c_p\} \{1 + (\omega \tau_1)^{-2} + (\omega \tau_2)^2\}^{-1/2}$$

- Experiment:

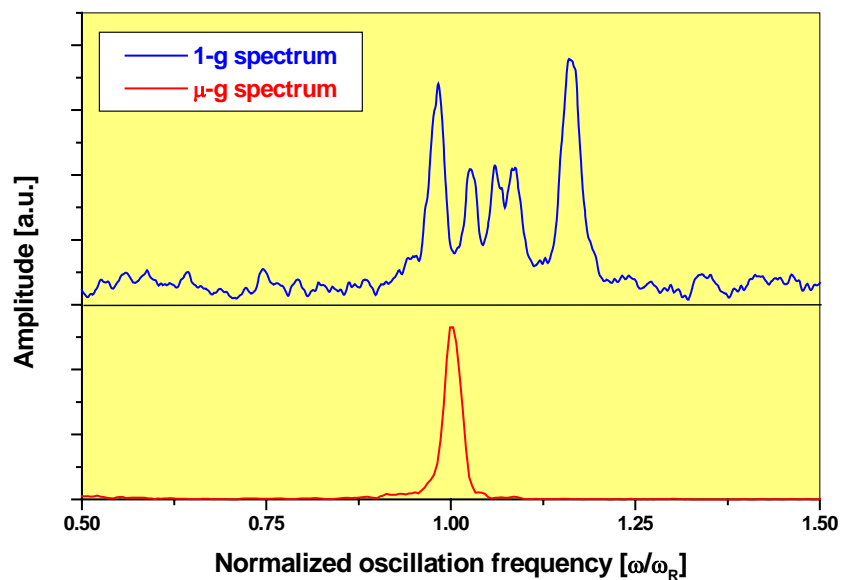
30 Zyklen, $T_m = 817^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{max}} = 155^{\circ}\text{C}$



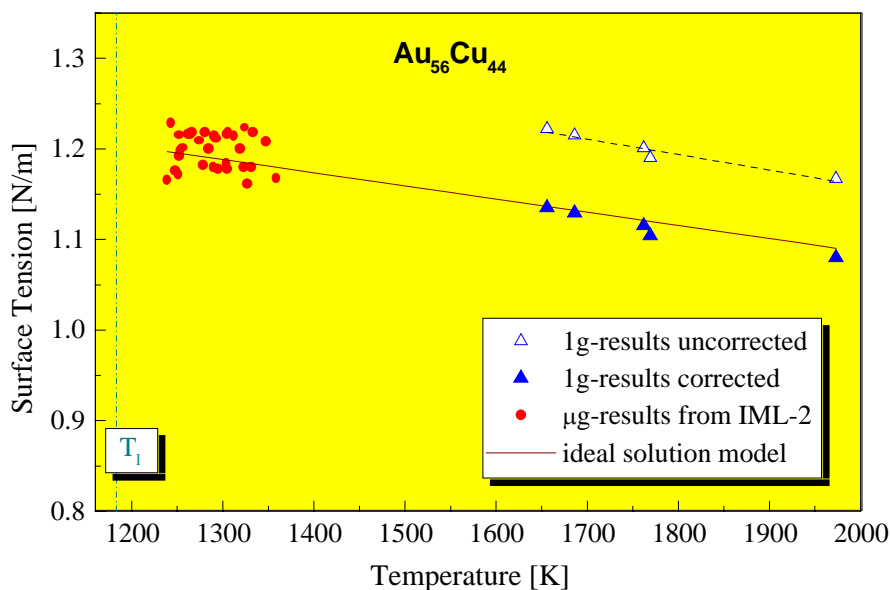
OBERFLÄCHENSPIGUNG VON AuCu

- Ziel: Messung der Oberflächenspannung
- Methode: „Oscillating drop technique“
 $\delta R(\theta, \phi, t) \propto Y(\theta, \phi) \cos(\omega t) \exp(-\Gamma t)$

$$\frac{32\pi}{3} \frac{\gamma}{m} = \omega_R^2$$



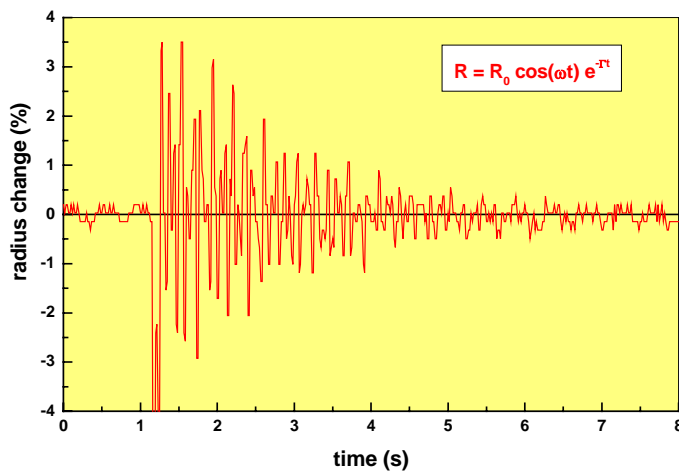
- Ergebnis: Bestätigung der Cummings-Korrektur



VISKOSITÄT VON PdCuSi

- Ziel: Bestimmung der Viskosität
- Methode: "Oscillating drop technique":

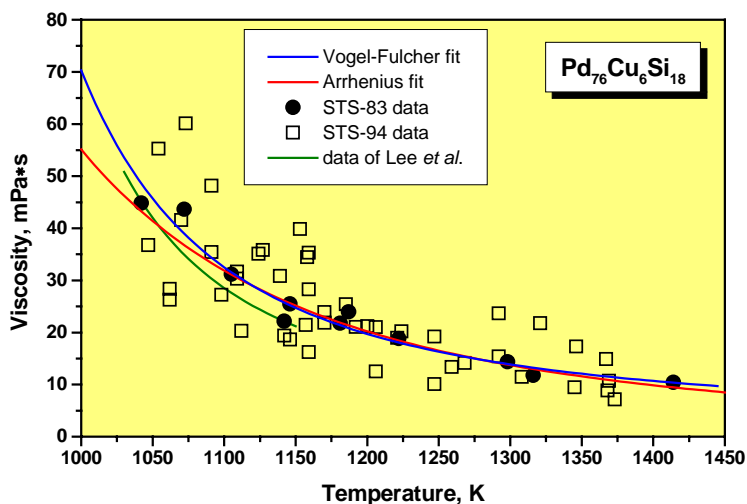
$$\delta R(\theta, \phi, t) \propto Y(\theta, \phi) \cos(\omega t) \exp(-\Gamma t)$$



$$\Gamma = \frac{20 \pi}{3} \frac{R \eta}{m}$$

- Experiment:

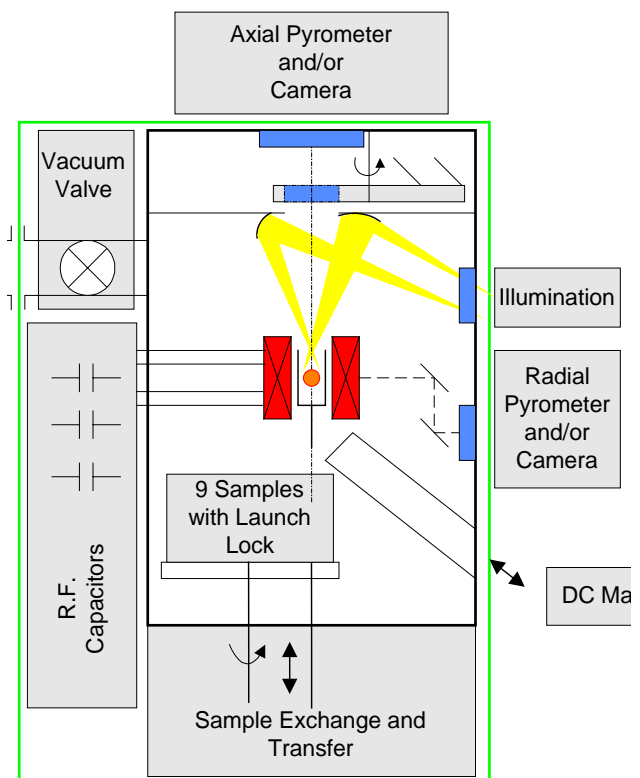
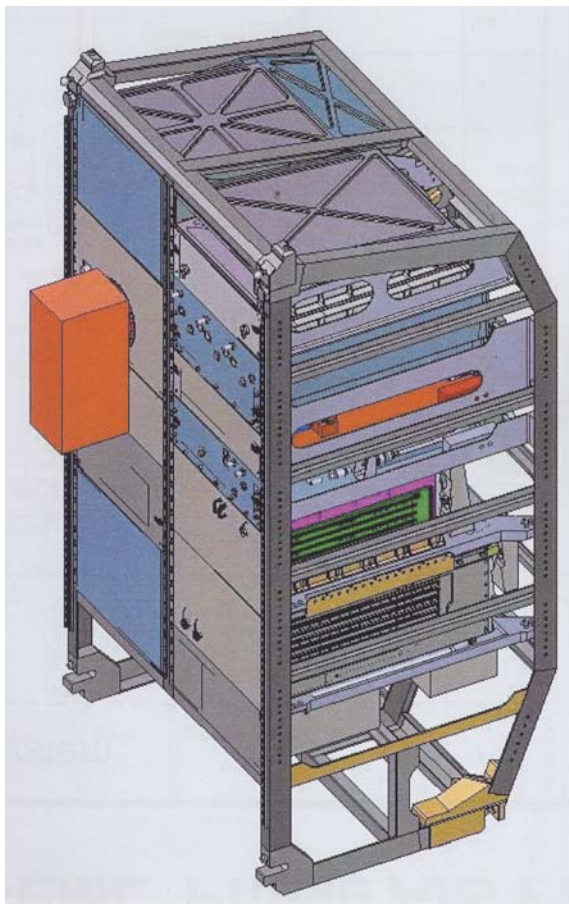
16 Zyklen, 50 Pulse, $T_m=870^\circ\text{C}$, $\Delta T=85^\circ\text{C}$



PERSPEKTIVEN

MSL-EML auf ISS-COLUMBUS

Anlage im Bau



Neue internationale Projekte

- ThermoLab
- CoolCop
- IMPRESS

