

VORLESUNG

Materialwissenschaftliche Experimente in der Schwerelosigkeit

Prof. Dr. Iván Egry
Zentrum für Erstarrung unterkühlter Schmelzen
DLR Köln

Tel.: 02203-6012844

e-mail: Ivan.Egry@dlr.de



INHALT 1.

1. Einleitung

- Literaturhinweise
- Historisches
- Schwerkraft
- Schwerelosigkeit
- Materialwissenschaft unter μg

2. Mikrogravitationsherstellung

- Beschleunigte Bezugssysteme
- Der senkrechte Wurf
 - Grundlagen
 - Realisierungen (Falltürme & Fallrohre)
- Der schiefe Wurf (Parabelflüge, Raketen)
- Orbitalsysteme
 - Keplersche Gesetze
 - Gezeitenkräfte
 - Zeitabhängige Störungen



INHALT 2.

3. Mikrogravitationsnutzung

- Hydrodynamik
 - Navier-Stokes Gleichung
 - Rayleigh-Bénard Konvektion
 - Marangoni Konvektion
 - Empfindlichkeitsanalyse
- Flüssigkeiten
 - Transportprozesse
 - Kritische Exponenten
 - Oberflächen
- Kristallzucht
 - Diffusives Wachstum
 - Thermosolutale Konvektion
 - Monotektika
 - Zuchtverfahren
- Levitation
 - Verfahren
 - Elektromagnetische Levitation
 - TEMPUS - Anlage
 - TEMPUS - Experimente



LITERATURHINWEISE

Materials Sciences in Space

B. Feuerbacher, H. Hamacher, R. Naumann, Hrsg.
Springer 1986

Fluid Sciences and Materials Sciences in Space

H. Walter, Hrsg., Springer 1987

Materials and Fluids under Low Gravity

L. Ratke, H. Walter, B. Feuerbacher, Hrsg.
Springer 1996

Bilanzsymposium Forschung unter Weltraumbedingungen

M. Keller, P. Sahm, Hrsg., WPF RWTH Aachen, 2000

A World without Gravity

G. Seibert, Hrsg., ESA SP-1251, Noordwijk 2001

Schmelze, Erstarrung, Grenzflächen

P. Sahm, I. Egry, T. Volkman, Hrsg.
Vieweg 1999



GESCHICHTE DER LUFT- UND RAUMFAHRT

Jahr	Luftfahrt	Raumfahrt
1903	Gebr. Wright	
1927	Ch. Lindbergh	
1945	Transatlantik-Linienflug	
1957		Sputnik 1
1961		Gagarin
1965	Boeing 747	
1969		Mondlandung
1973		Skylab
1975	Concorde	
1981		Space Shuttle
1983		SpaceLab
1986		MIR
1992		EURECA
2003		ISS



WIRKUNG DER SCHWERKRAFT

Skala [m]	Gegenstand	Bedeutung
10^{-15}	Nukleonen	vernachlässigbar gegen Kernkräfte
10^{-10}	Ionen	vernachlässigbar gegen Coulombkräfte
10^{-2}	Festkörper	vernachlässigbar gegen Coulombkräfte
10^{-2}	Flüssigkeit	<u>dominante Kraft</u>
10^{-2}	Gas	in Konkurrenz zur thermischen Bewegung
10^{+10}	Sterne	<u>dominante Kraft</u>

$$\frac{F_g}{F_e} = 4\pi\epsilon_0 \frac{\gamma M^2 A^2}{e^2 Z^2} \approx 10^{-36} \frac{A^2}{Z^2}$$



ENTSTEHUNG DER SCHWERELOSIGKEIT

Schwerkraft :
$$\vec{F}_g = -\frac{\gamma mM}{r^3} \vec{r}$$

Erdanziehung in niedriger Höhe :

$$g(h) = g_0 \left(1 - 2 \frac{h}{R_0} \right) \approx 0.9 g_0 \text{ für } h = 300 \text{ km}$$

Beschleunigtes Bezugssystem :

$$m\ddot{\vec{r}}' = \vec{F}_g + \vec{F}_s = 0 \Leftrightarrow \text{Schwereelosigkeit}$$

Störungen \Rightarrow **Mikrogravitation**

- Luftwiderstand $10^{-6} g_0$
- Relativbeschleunigungen $10^{-3} g_0$
- Schwerkraftgradient $10^{-7} g_0/\text{m}$



BESCHLEUNIGTE BEZUGSSYSTEME

Existenz einer zusätzlichen "Scheinkraft" F_s :

$$m\ddot{\vec{r}}' = \vec{F}_g + \vec{F}_s$$

Translation:

$$\vec{r}'(t) = \vec{r}(t) - \vec{s}(t),$$

$$\vec{F}_s = -m\ddot{\vec{s}}$$

Rotation:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad \vec{F}_s = \vec{F}_c + \vec{F}_z$$

$$\vec{F}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}', \quad \text{Corioliskraft}$$

$$\vec{F}_z = -m\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = m\omega^2 \vec{r}_\perp, \quad \text{Zentrifugalkraft}$$



MIKROGRAVITATIONSMISSIONEN

Realisierungen :

- Senkrechter Fall Fallturm
- Schiefer Wurf Parabelflug
- Rotation Satellit



FALLTÜRME

	ZARM Bremen, D	NASA Cleveland, USA	JAMIC Sunagawa, J
Länge [m]	123	145	490
Dauer [s]	4.7	5.2	10
Nutzlast [kg]	100	450	1000



PARABELFLÜGE

Bahnkurve:

$$z(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_z t$$

$$x(t) = v_x t$$

$$z(x) = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_x}\right)^2 + \frac{v_z}{v_x}x$$



Flughöhe: $h = \frac{1}{2} \frac{v_z^2}{g}$

Flugdauer: $T = \frac{2v_z}{g} = 2\sqrt{\frac{2h}{g}}$

Typische Werte:

$v_z = 100 \text{ m/s}$, $h = 500 \text{ m}$, $T = 20 \text{ s}$

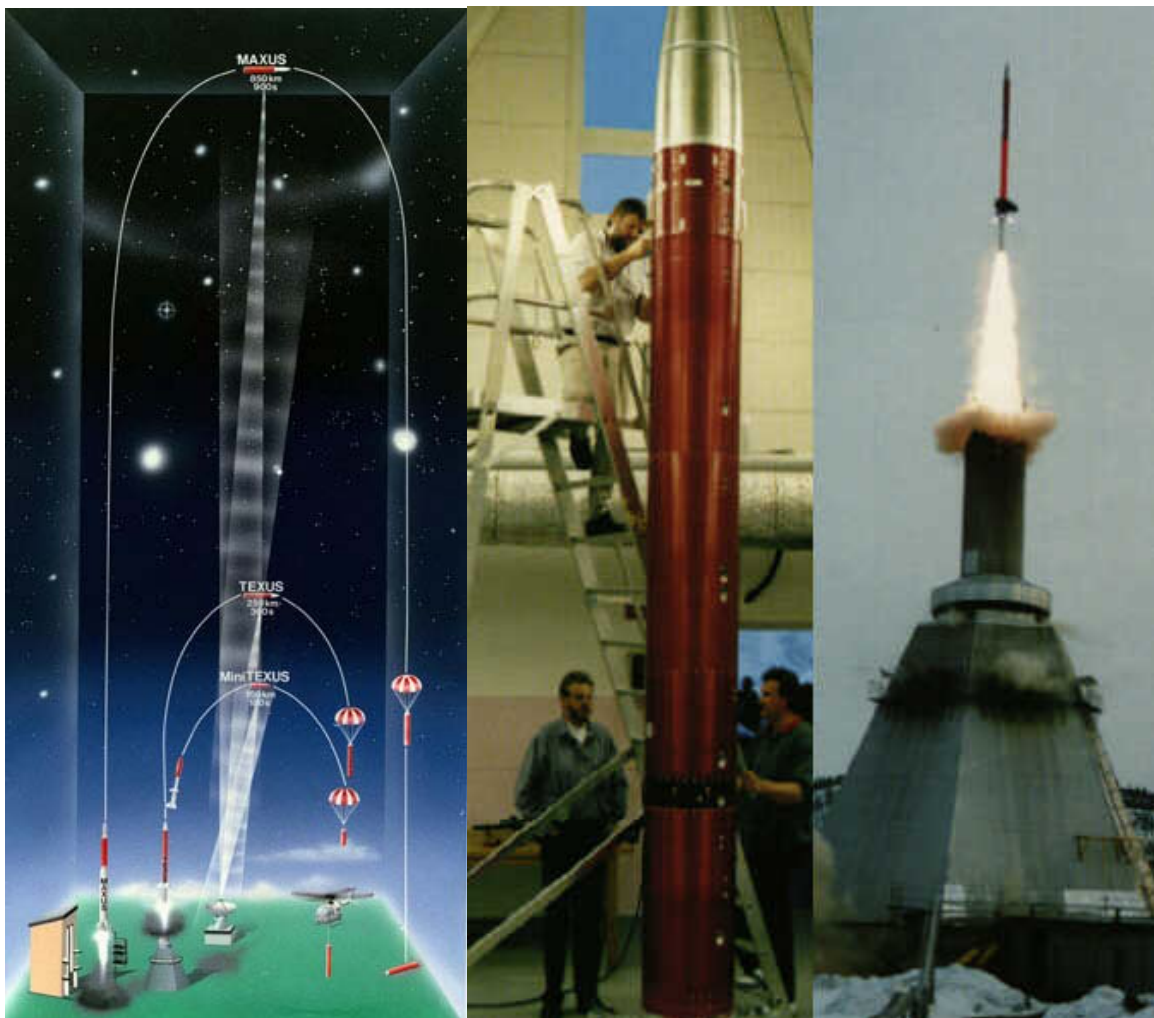


DAS TEXUS-PROGRAMM

TEXUS:

Technologische Experimente unter Schwerelosigkeit

- Höhenforschungsraketen
- 2 Kampagnen pro Jahr in Kiruna, Schweden
- $h = 250 \text{ km}$, $T = 5 \text{ min}$



ORBITALSYSTEME

Keplergesetze auf Satellitenbahnen anwendbar, falls

- Gravitationsfeld der Erde isotrop
(Erde ist Kugel mit $R_e = 6378$ km)
- Luftwiderstand vernachlässigbar

⇒ Bahnen sind Ellipsen
(bzw. Kreis, Parabel)

⇒ 3. Keplersches Gesetz:

$$\omega^2 R^3 = \text{const} = \gamma M_e = 4 \cdot 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$$

⇒ Bahngeschwindigkeit : $v^2 = \text{const}/R$

⇒ Periode : $T = 2\pi R/v$



STARRE KÖRPER IM INHOMOGENEN SCHWEREFELD

Bewegungsgleichung:

$$\sum_i m_i \ddot{\vec{r}}_i = \sum_i \vec{F}_i^g(\vec{r}_i), \quad \vec{F}_i^g(\vec{r}_i) = -m_i \frac{\gamma M_e}{r_i^3} \vec{r}_i =: m_i g(\vec{r}_i)$$

Definitionen:

Gesamtmasse: $M = \sum_i m_i$

Massenmittelpunkt $M\vec{R}_M =: \sum_i m_i \vec{r}_i$

Schwerpunkt: $Mg(\vec{R}_g) =: \sum_i m_i g(\vec{r}_i)$

$$\Rightarrow \ddot{\vec{R}}_M = g(\vec{R}_g)$$

Relativ- und Schwerpunktbewegung nicht entkoppelt !
("Orbit-Attitude-Coupling")



STARRE KÖRPER IM INHOMOGENEN SCHWEREFELD (2)

Das Metazentrum R_z :

$$\sum_i m_i g(\vec{r}_i) + \omega^2(R_z) \sum_i m_i \vec{r}_{\perp i} = 0$$

$$\sum_i m_i g(\vec{r}_i) = Mg(\vec{R}_g) = -M \frac{\gamma M_e}{R_g^3} \vec{R}_g,$$

$$\omega^2(R_z) = \frac{\gamma M_e}{R_z^3}$$

$$\Rightarrow M\vec{R}_g = \left(\frac{R_g}{R_z} \right)^3 \sum_i m_i \vec{r}_{\perp i}$$

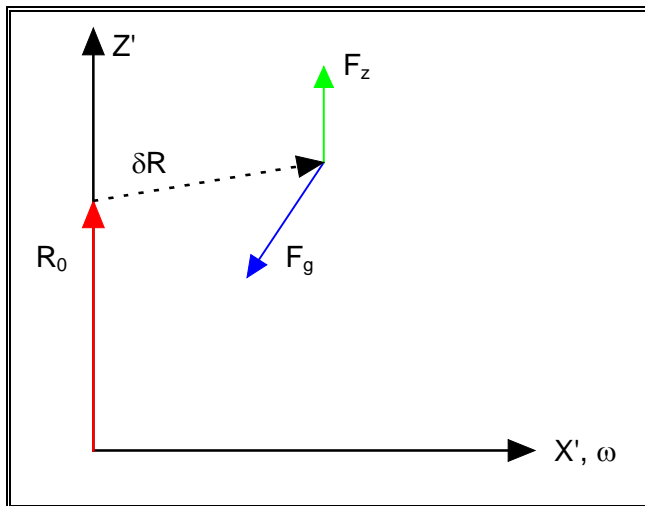
Lineare Anordnung (Hantel): $\vec{r}_i = \vec{r}_{\perp i}$

$$\Rightarrow R_z^3 = R_g^2 R_M \quad \text{mit } R_g < R_z < R_M$$



GEZEITENKRÄFTE

Restbeschleunigung durch inhomogenes Schwerfeld:



$$m\ddot{\vec{r}}' = \vec{F}_g(\vec{r}') + \vec{F}_z(\vec{r}')$$

$$\vec{r}' = \vec{R}_0 + \delta\vec{r}$$

$$\omega^2 R_0^3 = \gamma M_e$$

Mit $\delta\vec{r} = (\delta x, \delta z)$ gilt für Probemasse m .

$$\frac{1}{m} \vec{F}_z = \omega^2 (0, R_0 + \delta z) \quad \text{und} \quad \frac{1}{m} \vec{F}_g = - \frac{\gamma M_e}{|\vec{R}_0 + \delta\vec{r}|^3} (\delta x, R_0 + \delta z)$$

Entwickeln bis 1. Ordnung in $\delta x, \delta z$:

$$\frac{1}{m} \vec{F}_g = - \frac{\gamma M_e}{R_0^3} \{ (R_0 - 3\delta z) \vec{e}_z + (\delta x, \delta z) \}$$

⇒

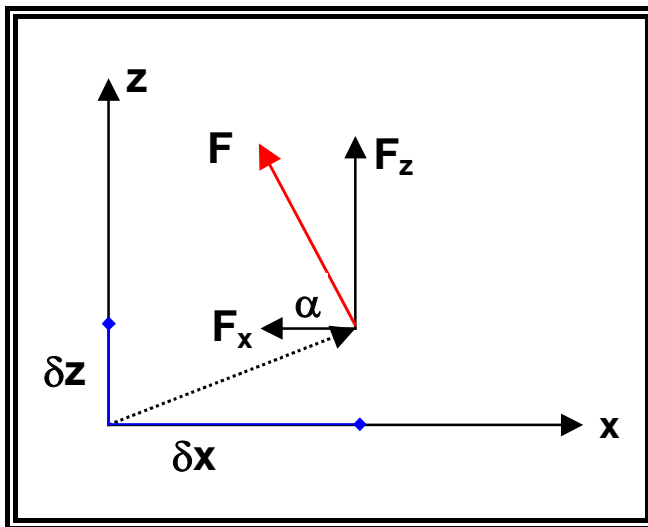
$$\begin{aligned} \delta\ddot{x} &= - \omega^2 \delta x \\ \delta\ddot{z} &= + 3\omega^2 \delta z \end{aligned}$$



GEZEITENKRÄFTE (2)

Das Kraftfeld:

Die Richtung:



$$\tan \alpha = \frac{F_z}{F_x} = 3 \frac{\delta z}{\delta x}$$

Der Betrag:

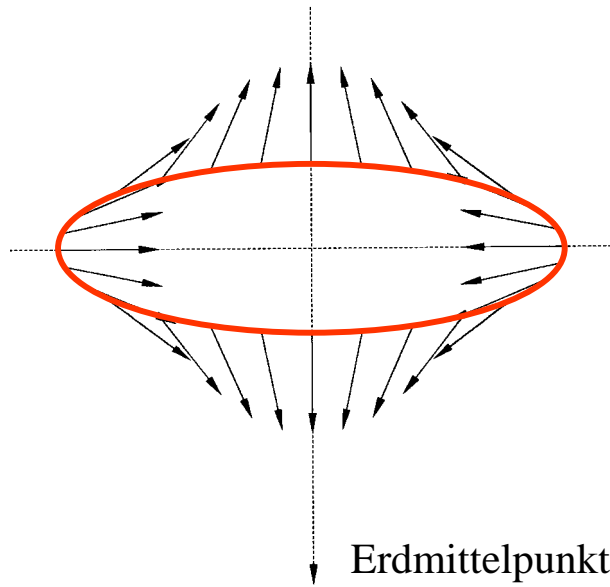
$$\left| \vec{F}_x + \vec{F}_z \right| = m\omega^2 \sqrt{\delta x^2 + (3\delta z)^2}$$

Linien konstanten Betrages:

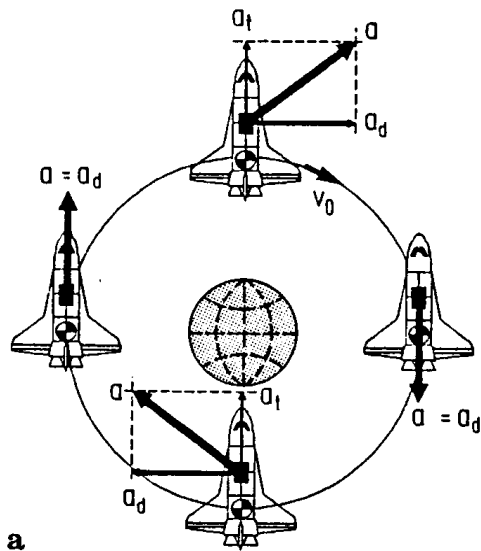
$$\left(\frac{F_0}{m\omega^2} \right)^2 = \delta x^2 + (3\delta z)^2 \quad \text{d.h. Ellipse mit } b:a = 3$$



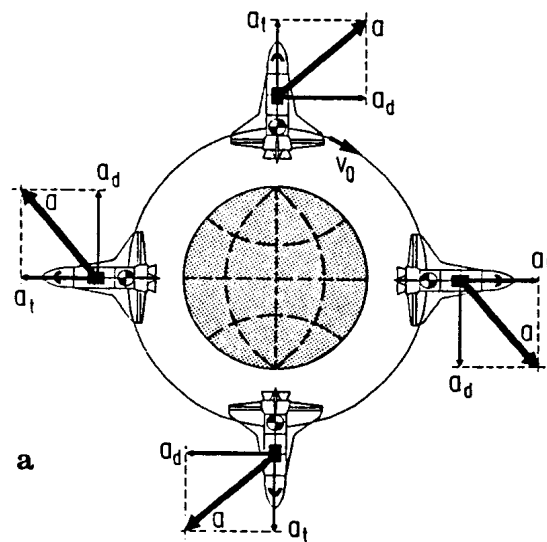
GEZEITENKRÄFTE (3)



Mögliche Fluglagen :



Inertial



Gradient

