

Partikeltriebwerke

*Thomas Trottenberg,
F. Scholze*, M. Tartz*, H. Neumann* und H. Kersten*

*Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Christian-Albrechts-Universität Kiel*

**Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig*



Mühleithen, 14.03.2007

Motivation für ein Mikropartikeltriebwerk

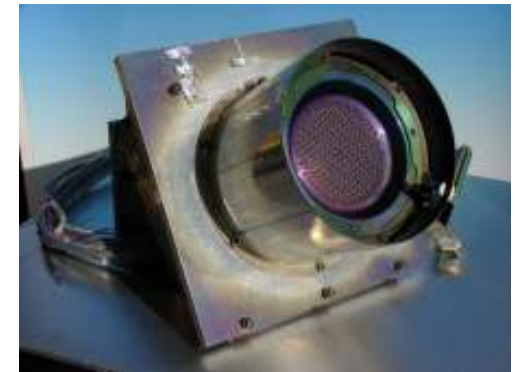
Mikropartikeltriebwerk – wozu?

Chem. Triebwerke

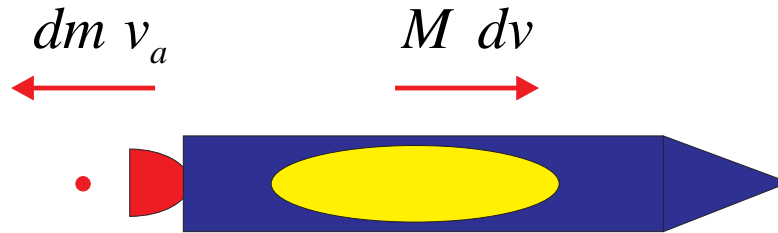


Triebwerk	Schub
Vulcain (chemisch, H ₂ + O ₂)	1,3 MN
NSTAR (Kaufman, DS1)	93 mN
RIT-10 (HF, Artemis)	10 mN
HET (Smart-1)	70 mN

Ionentriebwerke



Austrittsgeschwindigkeit: Treibmittelsparsamkeit vs. Schub



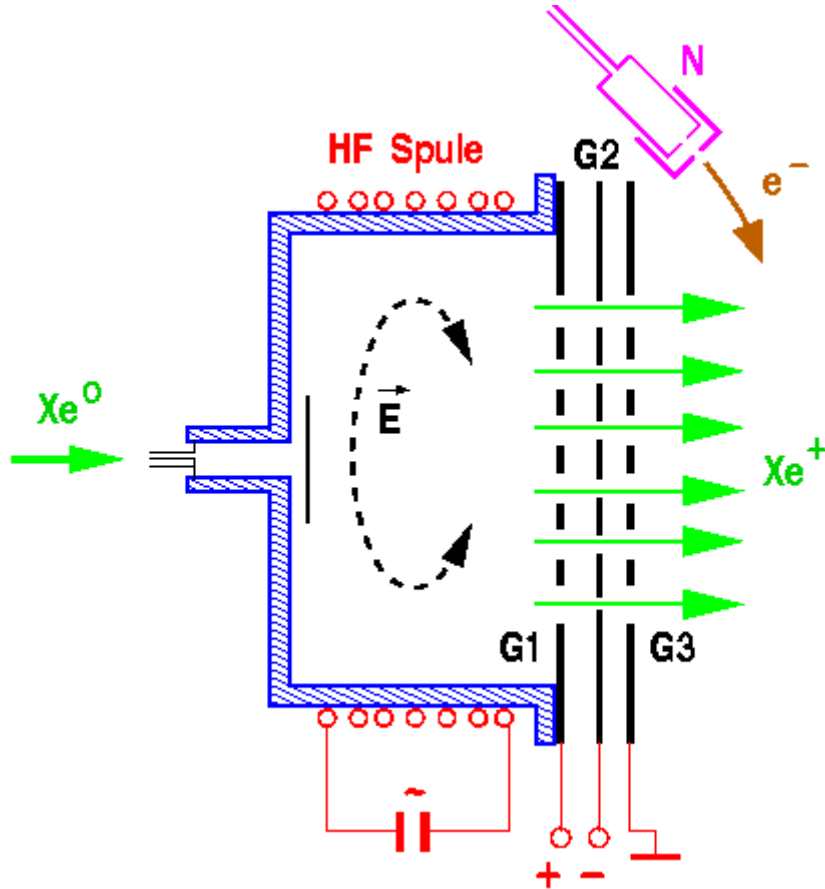
$$F = \frac{dm}{dt} v_a$$

Triebwerk	Austrittsgeschwindigkeit
Vulcain (chemisch, H ₂ + O ₂)	4,3 km/s
NSTAR (Kaufman, DS1)	35 km/s
RIT-10 (HF, Artemis)	31 km/s

übliche Definition des spezifischen Impulses:

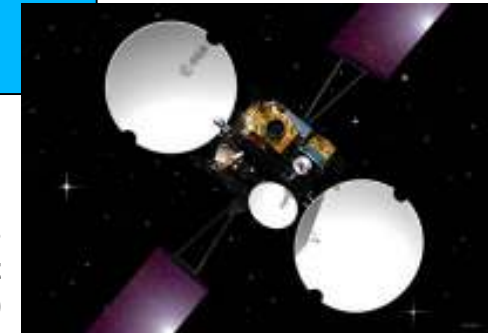
$$I_{sp} = \frac{v_a}{g} \sim \frac{F}{\dot{m}} = v_a$$

HF-Ionen-Triebwerk (RIT)

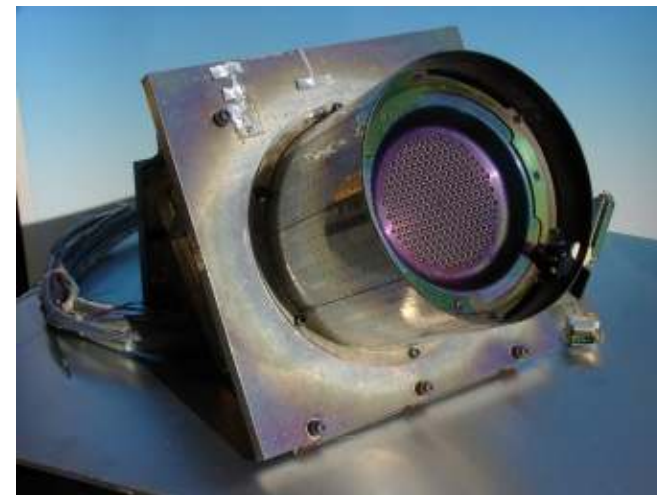


Wesentliche Bestandteile:

- Induktive Entladung
- Gittersystem
- Neutralisator

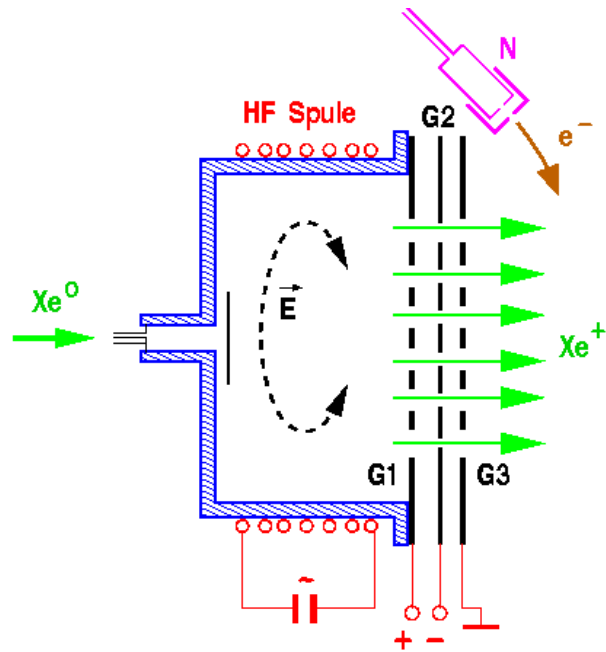


Artemis
Telekommunikationssatellit
mit Triebwerk RIT-10



RIT-10
I. Physikalisches Institut der JLU-Gießen
Arbeitsgruppe: Ionentriebwerke

Elektrostatische Beschleunigung



$$\frac{1}{2} m v_a^2 = qU$$

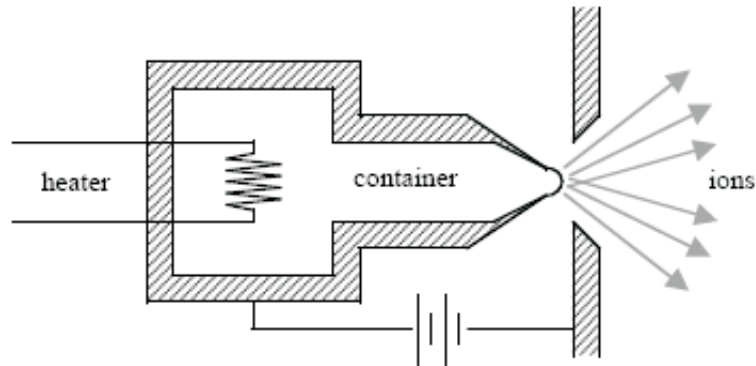
$$F = \frac{dm}{dt} \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

Schub hängt ab von:

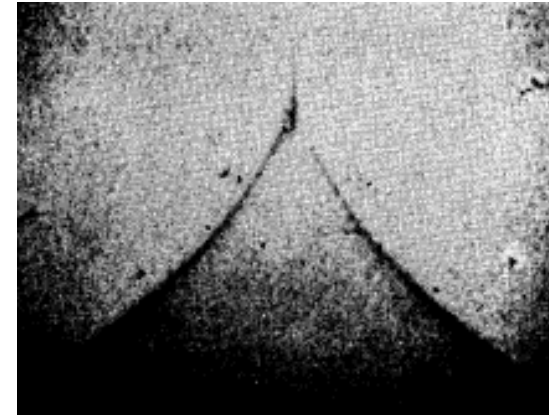
- Massenausstoßrate dm/dt
- spezifische Ladung q/m
- Beschleunigungsspannung U

Droplet- und Nanopartikeltriebwerke

Feldemissions-Triebwerk (FEEP)



Lozano, PhD-Thesis, MIT (2003)



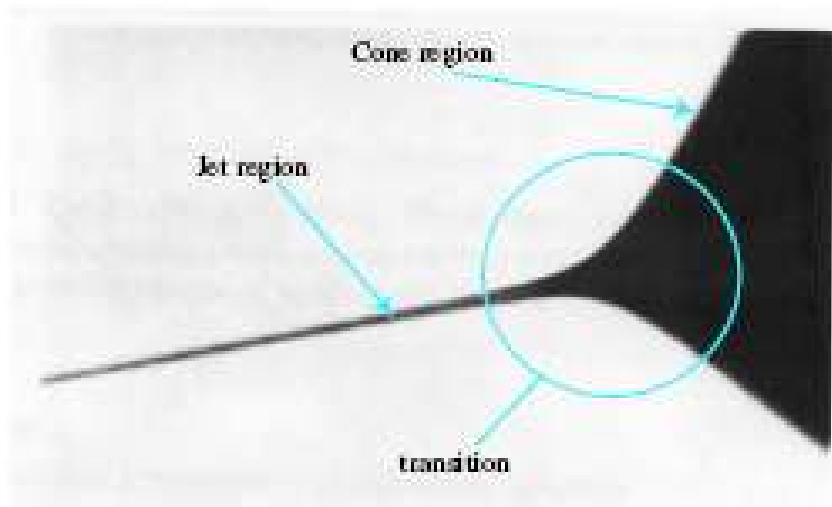
Taylor, G.
Disintegration of Water Drops
in an Electric Field
*Royal Society of London
Proceedings Series A* **280**,
383 (1964)

- Ionisierung direkt aus flüssiger Phase
- sehr hoher Wirkungsgrad
- Variante mit benetzter Nadel

Bartoli, et al., A liquid caesium field ion source for space propulsion
Journal of Physics D **17**, 2473 (1984)

Lozano, *Journal of Physics D* **39**, 126 (2006)

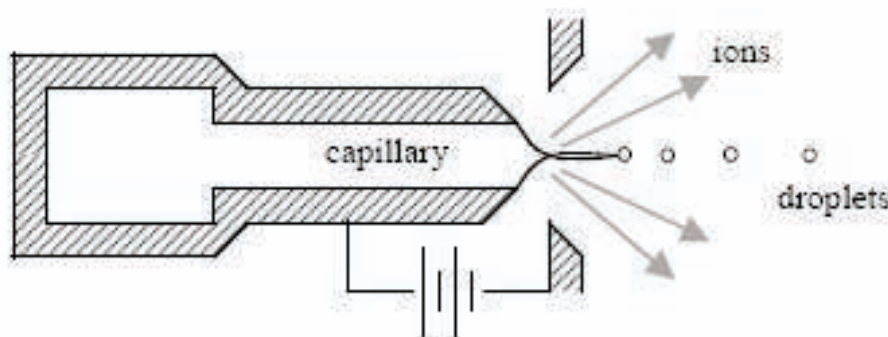
Droplet-Thruster



höhere Feldstärken



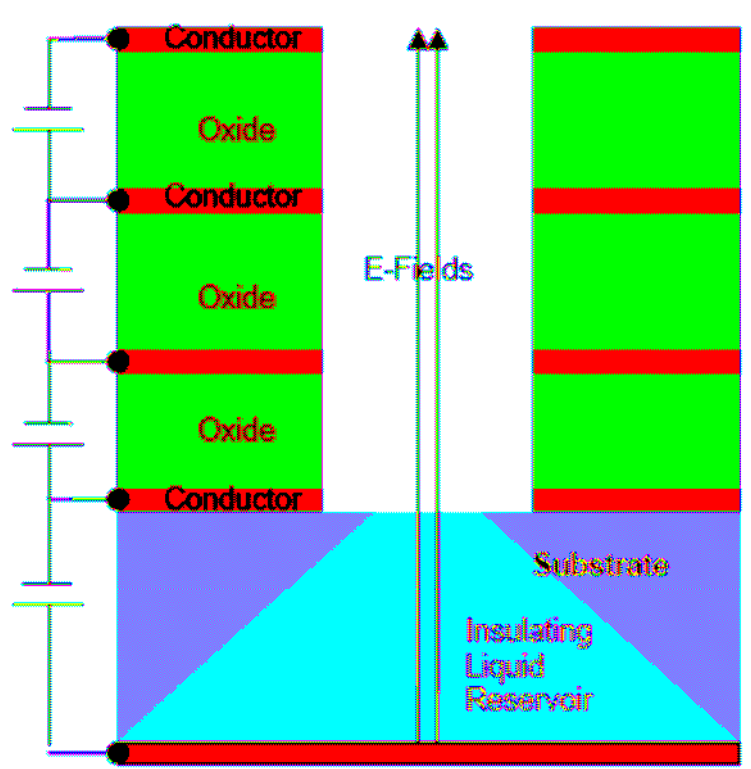
- Jet
- Instabilität des Jets
- Tröpfchenbildung



Lozano, PhD-Thesis, MIT (2003)

- Ion-Droplet mixed regime
- einstellbarer spez. Impuls

Nanopartikeltriebwerk



- Nanopartikel (~100nm) oder Ionen
- $I_{sp} = 100 \dots 10000 \text{ s}$
- Miniaturisierung
- Array -> Skalierbarkeit

Musinski et al., IEPC-2005-176 (2005)

Aufladung von Mikropartikeln

Grenzen der Aufladung

Maximales q/m für optimale Beschleunigung ?

$$\frac{F}{A} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$



Mechanische Belastbarkeit /
Feldemission

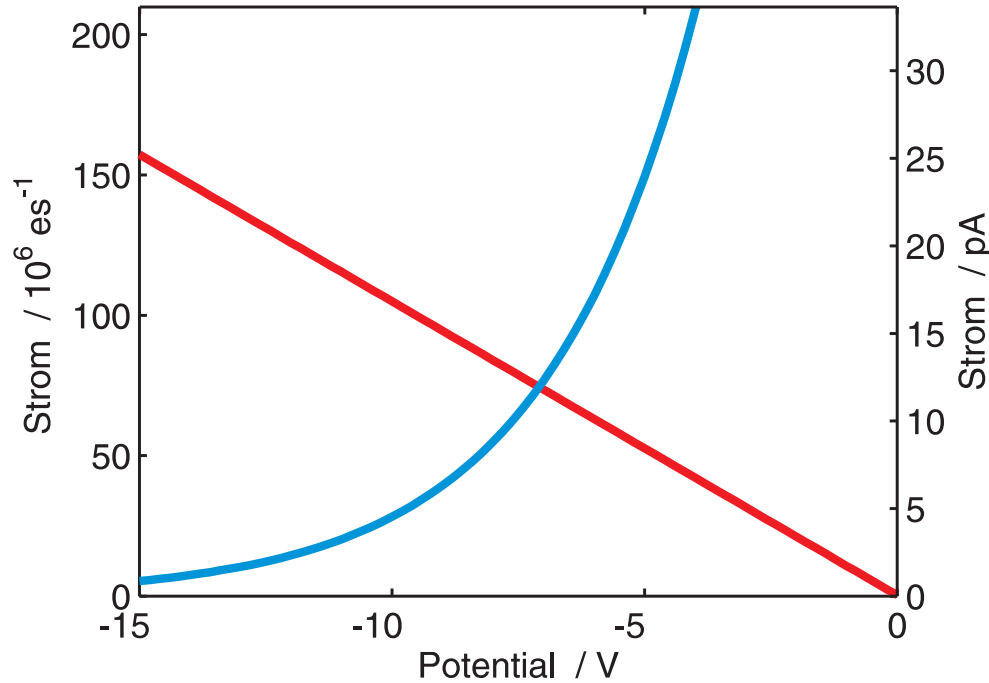
→ Elektronen: 5×10^9 V/m, Ionen: 5×10^{10} V/m

Müller, *Phys. Rev.* **102**, 618 (1955)

$$q_d = 4\pi\epsilon_0 a^2 E \longrightarrow \frac{q_d}{m_d} = \frac{3\epsilon_0 E}{a\rho} \sim a^{-1}$$

z.B. Diamant, 1 μm : $q/m < 1250$ C/kg, $q < 1.4 \times 10^{10}$ e

Aufladung im Plasma



Argon-Laborplasma:

$$kT_e = 3 \text{ eV}, \quad kT_i = 25 \text{ meV},$$

$$n_e = n_i = 10^{15} \text{ m}^{-3}$$

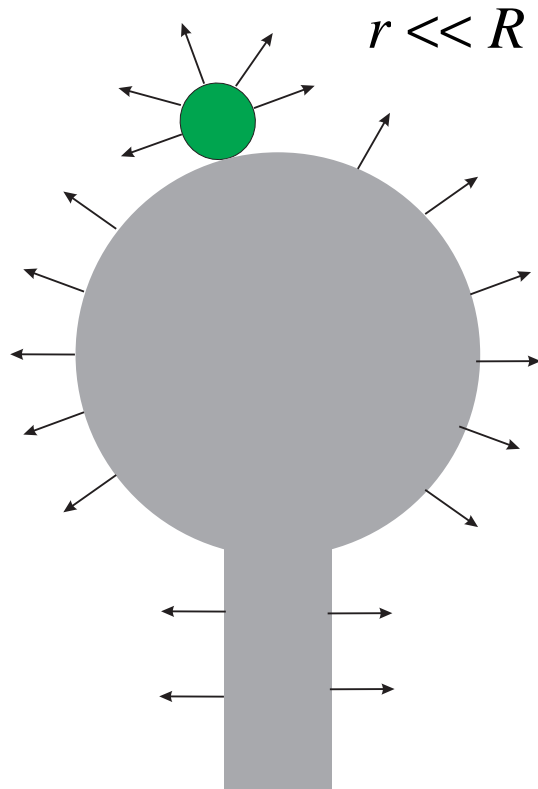
Partikelladung:

$$q_d = 4\pi\epsilon_0 r_d \phi_d$$



2000 - 3000 Elektronen je μm

Kontakt-Aufladung



$$q_d = \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \frac{Rr^2}{(R+r)^2} U \approx \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon_0 \frac{r^2}{R} U$$

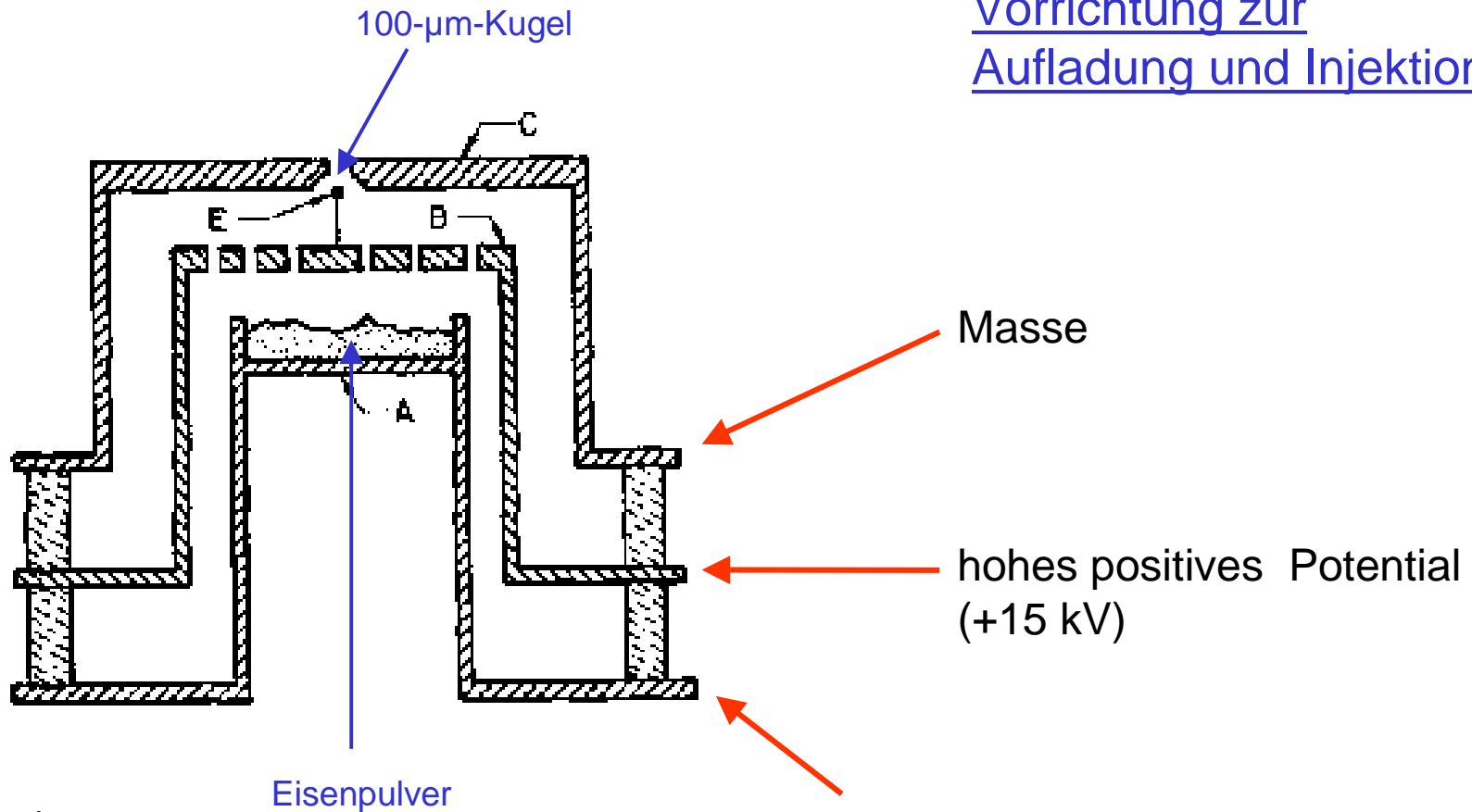
$$E_r = \frac{\pi^2}{6} \frac{U}{R}$$

z.B. $U = 25 \text{ kV}$ und $R = 12 \text{ } \mu\text{m}$:
 $E_r = 2.5 \text{ GV/m}$

Shelton et al., *J. Appl. Phys.* **31**, 1243 (1960)

Kontakt-Aufladung

Vorrichtung zur Aufladung und Injektion

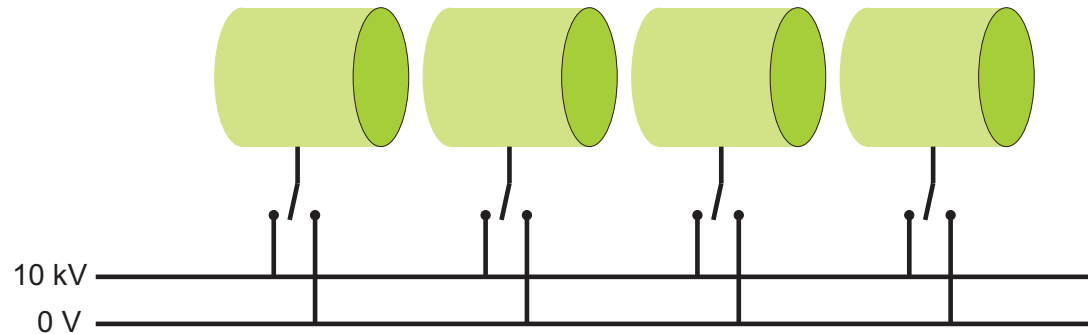


Shelton et al.,
 Electrostatic Acceleration of
 Microparticles to Hypervelocities
Journal of Applied Physics, **1960**, 31,
 1243-1246

hohes positives Potential (+15 kV),
 kurzer negativer Spannungspuls

Beschleunigung von Mikropartikeln

Linearbeschleuniger

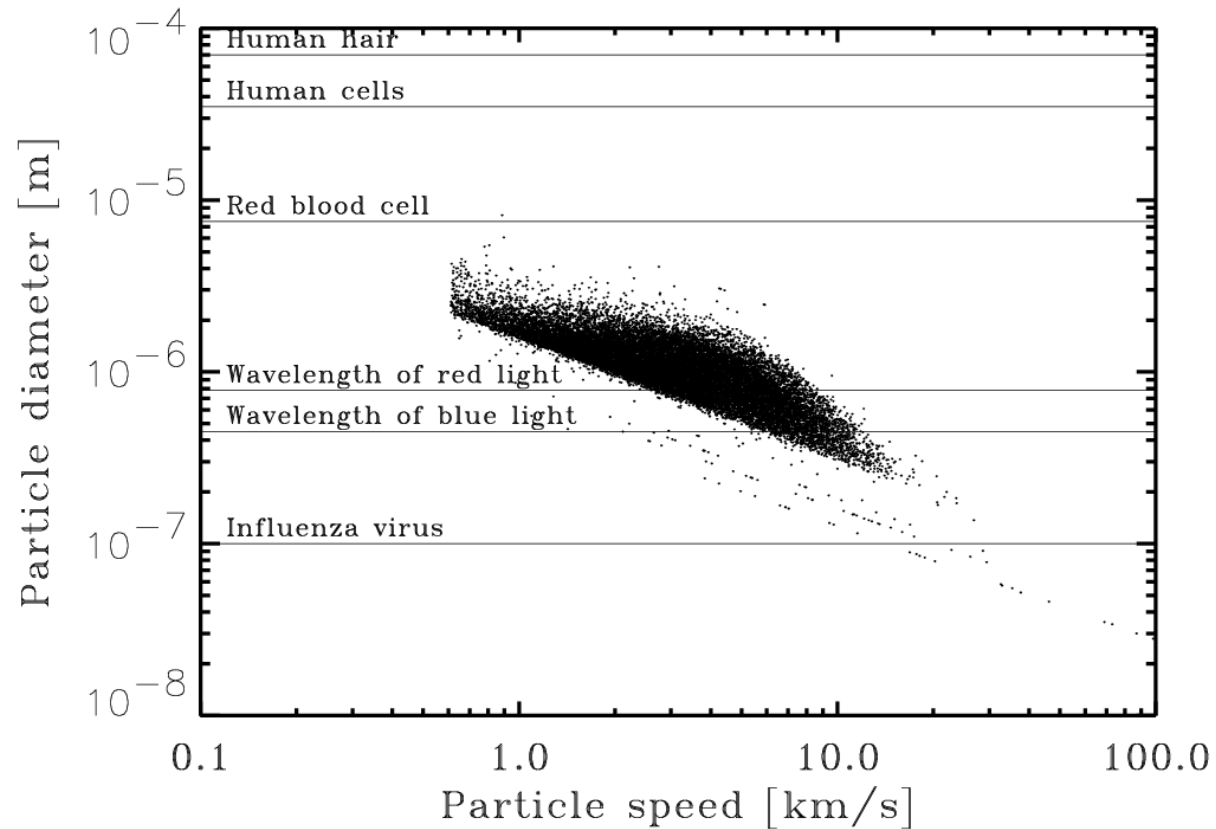


- Skalierbarkeit
- Begrenzung der Potentiale

- Beschleunigung in den Zwischenräumen der Zylinder
- Steuerung für Einzelteilchen in Abhängigkeit von q/m nötig

z.B. Heidelberg Dust Accelerator Facility

Heidelberger Staubbeschleuniger



<http://www.mpi-hd.mpg.de/dustgroup>

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Aufladung im Plasma erreicht nur Ladungen
5 bis 6 Größenordnungen unter theor. maximaler Ladung
- Möglichkeiten zur Aufladung bis zur Feldemissionsgrenze:
 - Kontaktaufladung
 - Extraktion aus Suspensionen mittels Feldemission
- wegen der kleinen q/m bei Mikropartikeln werden
Linearbeschleuniger benötigt, um akzeptable I_{sp} zu erreichen