

Laserantriebe

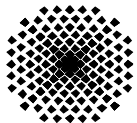
*Eine Uhr, die auf Schiffen pro Tag
auf zirka drei Sekunden genau geht,
ist undenkbar.*

Isaac Newton, 1714

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

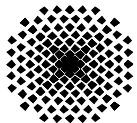
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018

*Du hast nichts anderes im Kopf,
als Käfer sammeln, Jagen und
Ratten fangen
und wirst dir und der ganzen Familie
nichts als Schande machen.*

*Robert Waring Darwin, 1821,
Vater von Charles*



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

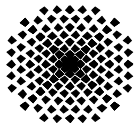
Bakterien sind Hirngespinnste.

Rudolf Virchow, 1870

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

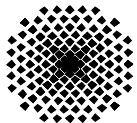
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018

*Von der Fotografie in natürlichen
Farben ist leider nicht nur für die
nächste Folgezeit,
sondern aus theoretischen Gründen
auch für alle Zukunft
so gut wie nichts zu erwarten.*

Emil du Bois-Reymond, 1890



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

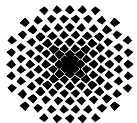
*Diese Strahlen des Herrn Röntgen
werden sich als Betrug herausstellen.*

William Thomson (Lord Kelvin), 1897

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

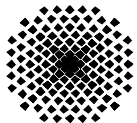
*Alles, was erfunden werden kann,
wurde bereits erfunden.*

Charles Duell, US Patentamt, 1899

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

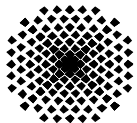
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018

*Die weltweite Nachfrage nach
Kraftfahrzeugen wird eine Million nicht
überschreiten –
allein schon aus Mangel an verfügbaren
Chauffeuren.*

Gottlieb Daimler, 1901



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

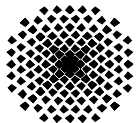
*Das Pferd wird es immer geben.
Das Automobil ist nur eine
vorübergehende Erscheinung.*

Wilhelm II., 1906

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

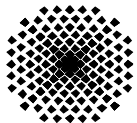
*Flugzeuge sind interessant,
haben aber keinerlei militärischen Wert.*

Marschall Ferdinand Foch, 1911

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

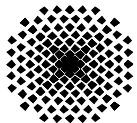
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018

*Es gibt nicht das geringste Anzeichen,
dass wir jemals Atomenergie entwickeln
können.*

Albert Einstein, 1932



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

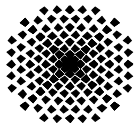
*Ich denke, dass es einen Weltmarkt für
vielleicht fünf Computer gibt.*

Thomas J. Watson, IBM, 1943

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

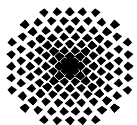
IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018

*Für einen Reporter, der unterwegs
Notizen aufschreiben will, mag das
interessant sein.*

*Aber für den Durchschnittsnutzer sind
diese Geräte [tragbare Computer]
unnützlich, und es gibt auch kaum Software
dafür.*

Steve Jobs, 1985



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

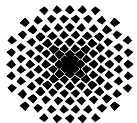
Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018

Das Werk [in Tschernobyl] verfügt über sichere und zuverlässige Kontrollen, so dass die Reaktoren gegen jede Störung mit drei Sicherheitssystemen, die unabhängig voneinander arbeiten, geschützt sind.

Vitali Sklyarow, Energieminister der Ukraine, 1986



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

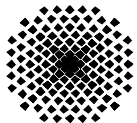
Die Zeitung ist im Jahr 2000 tot.

Bill Gates, 1998

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtssysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserantriebe

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

31. Januar 2018



Dr. Stefan Scharring

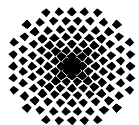
Institut für Technische Physik, Stuttgart

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.



Wer Visionen hat, sollte zum Arzt gehen.

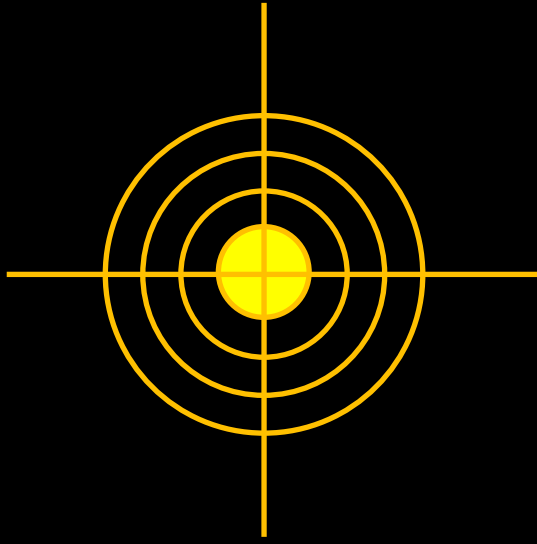
Helmut Schmidt, 1980



Universität
Stuttgart

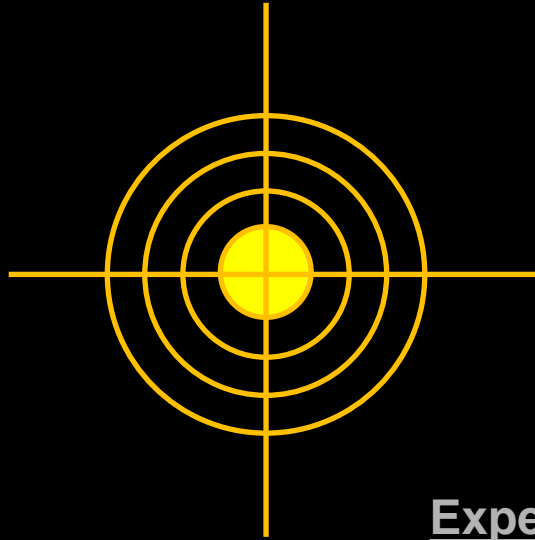
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de





Experiment 1:

- Schubkraft: 6.7 pN
- Leistung Laserpointer: < 1 mW



Optimierungspotenzial:

- Steigerung der Laserausgangsleistung
- Fokussierung der Laserstrahlung
- Verwendung kurzer Laserpulse
- Anpassung von Material und Wellenlänge

Experiment 2 (CLEANSPACE):

- Mittlere Laserleistung: 33 W
- 3 ns Pulse: 94 MW (Puls)
- 3 mm Fokus: 190 MW/mm²
- Aluminium, $\lambda = 1064$ nm
- Energiedichte: 4.7 J/cm²
- Schubkraft: 700 μ N
- $c_m = 21 \mu$ N/W

Motivation

*Wenn Du ein Schiff bauen willst,
dann trommle nicht Männer zusammen,
um Holz zu beschaffen, Aufgaben zu vergeben
und die Arbeit einzuteilen,
sondern lehre die Männer die Sehnsucht nach
dem weiten, endlosen Meer.*

Antoine de Saint-Exupery.



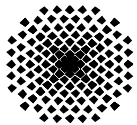
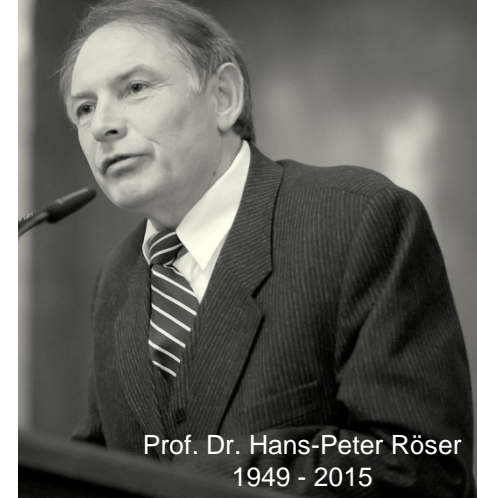
Upload von
Antriebsenergie
MW

Minimaler
Treibstoffverbrauch
<1 %

Satelliten präzise
positionieren
nm - μ m

Weltraumschrott
aufspüren und
verglühen lassen
cm - dm

Raumfahrt aus Leidenschaft



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

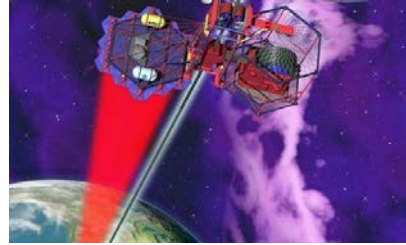




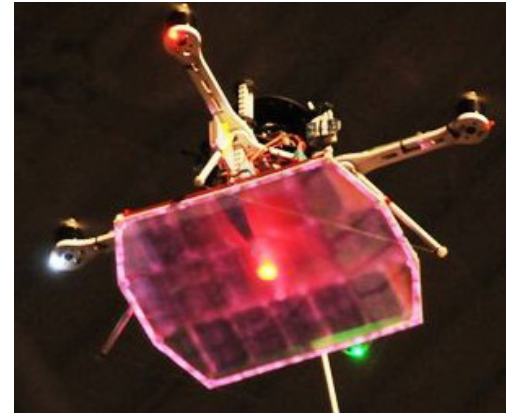
Laserschneiden
von Stahl



Laserschwert



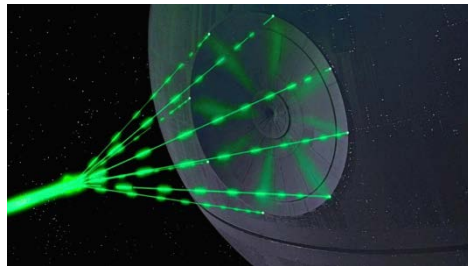
Weltraumfahrstuhl



Quadrocopter



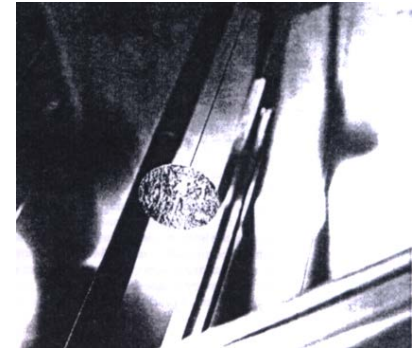
Augen-OP (Lasik)



Todesstern

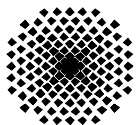


Photonenantrieb



Lasersegel

Myrabo et al, Laser-booster light sail experiments with the 150-kW- LHMEL II CO₂ laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



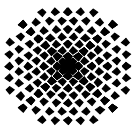
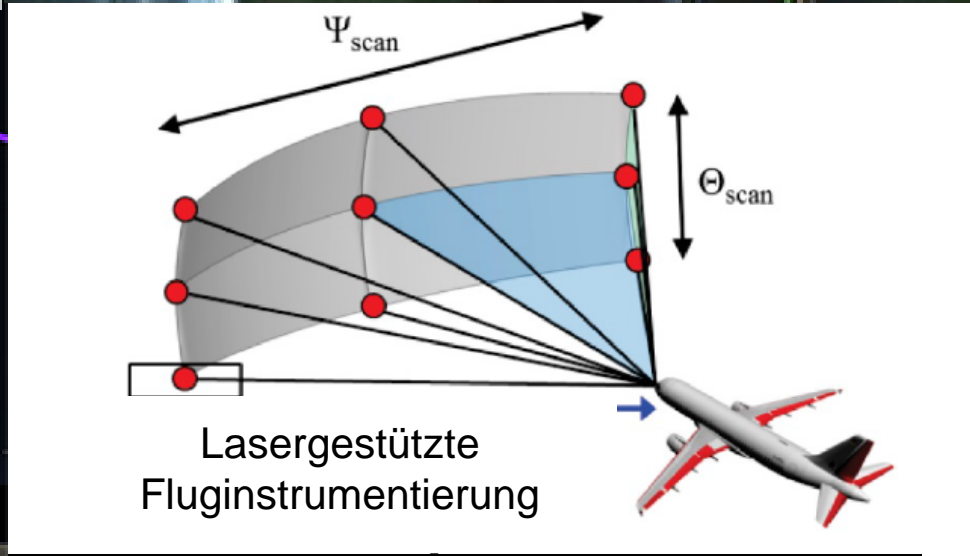
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



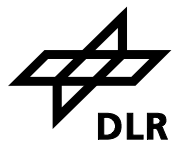
1 Einleitung DLR – Institut für Technische Physik

Institutsleitung: Prof. Dr. Thomas Dekorsy



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Geschichte



E. Sänger



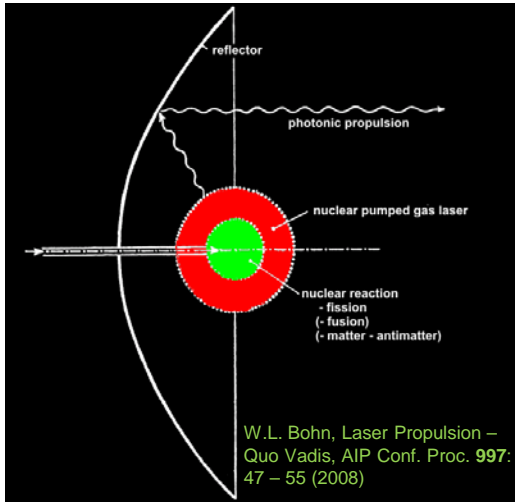
Kantrowitz



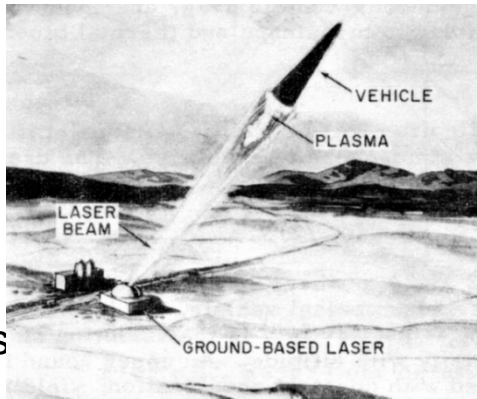
Myrabo



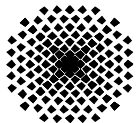
Phipps



- 1953 E. Sänger Konzept Photonenrakete
- 1967 G.A. Askarian Laser-ablativer Impulsübertrag
- 1972 A.Kantrowitz Konzept bodengestützter Laserantrieb
- 1991 Schall Laser-basierte Beseitigung von Weltraummüll
- 1995 Liukonen Flug im Labor (CO₂-Laser)
- 1997 Myrabo Freiflug
- 1998 DLR Vertikalflug im Labor
- 2000 Myrabo Weltrekordflug, 71 m
- 2002 Phipps Konzept des laser-ablativen Mikroantriebs
- 2006 Bae Photonischer Laserantrieb



Pirri et al, Laser propulsion, AIAA paper 72-719 (1972)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Definitionen und Beispiele

Definition Laserantrieb:

Antrieb, bei dem die Laserenergie einen substantiellen und unverzichtbaren Beitrag zur Bewegungsenergie liefert

Allgemeine Definition Lightcraft:

Antrieb, der auf gerichteter elektromagnetischer Strahlung beruht (Laser oder Mikrowelle)

Lightcraft im engeren Sinne:

Antrieb durch laser-gestützte Detonationen mit räumlich getrennter Laserquelle

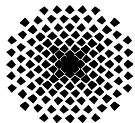
Photonenantrieb



Laserthermischer Antrieb



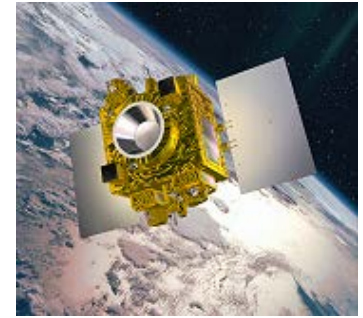
Laser Lightcraft



Beamed Energy Propulsion – onboard laser



GRACE: © NASA/JPL-Caltech



MICROSCOPE: © CNES

Alternative Lageregelung im sub- μN bis mN-Bereich für

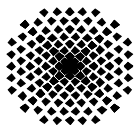
- wissenschaftliche Missionen
- Formationsflüge zur Erdbeobachtung

Vollständige Vermeidung beweglicher Komponenten für

- langjährige Betriebsdauer
- *trägheitsfreien Betrieb*

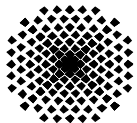
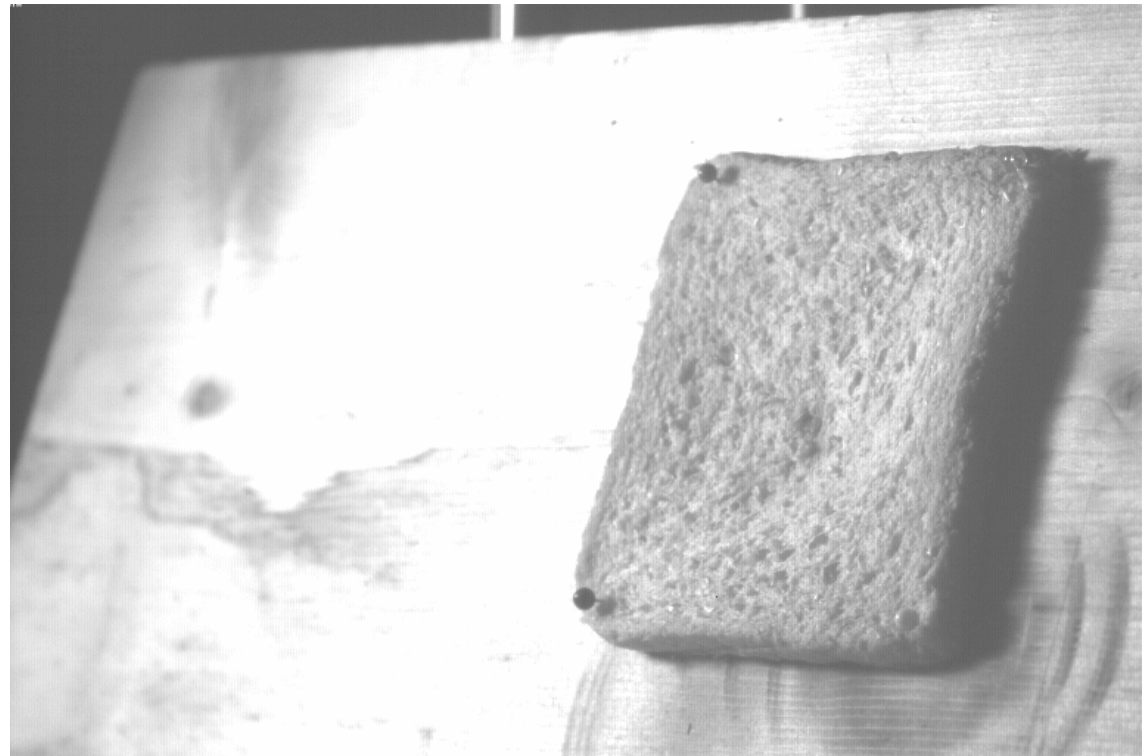
Minimale Restbeschleunigung $< 10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$

Dittus et al, *Applications of Microthrusters for Satellite Missions and Formation Flights Scenarios*,
Beamed Energy Propulsion, AIP Conf. Proc. **1402**, 367-373 (2011)



Beispiel: Rückstoß durch Materialabtrag („unkooperatives Target“)

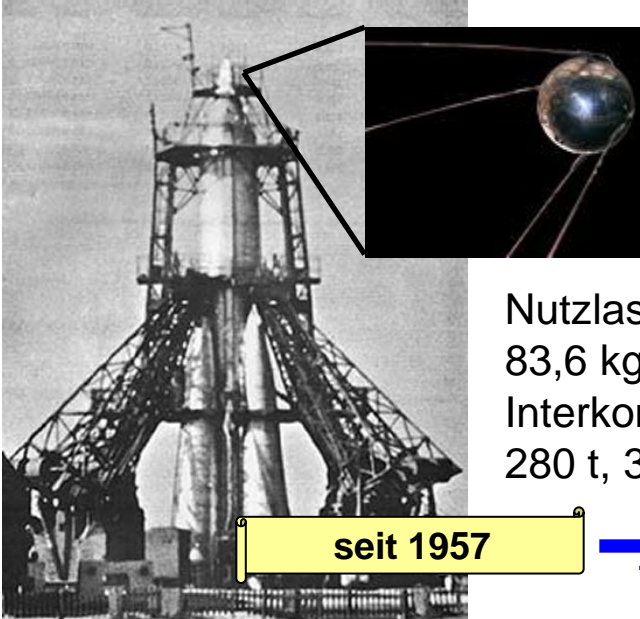
- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **unfokussiert**:
 $\sim 290 \text{ kW} / \text{cm}^2$
(solar: $140 \text{ mW} / \text{cm}^2$)
- Repetitionsrate: 50 Hz
- Laserstrahldurchmesser:
8 cm



Beamed Energy Propulsion – Ground-based Laser

Transport des Energieträgers

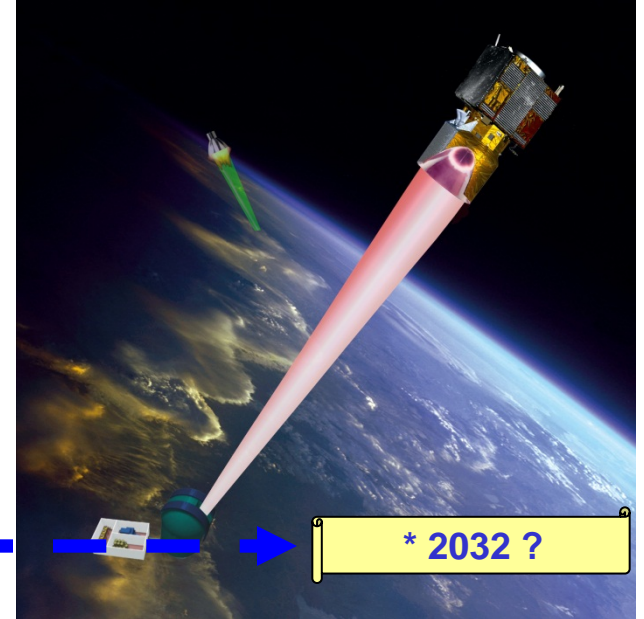
Externe Energiequelle



Nutzlast: Sputnik-I,
83,6 kg, 58 cm
Interkontinentalrakete:
280 t, 34 m

seit 1957

75 Jahre F&E?



* 2032 ?

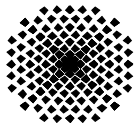


seit 1804

75 Jahre F&E



* 1879



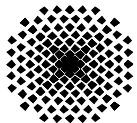
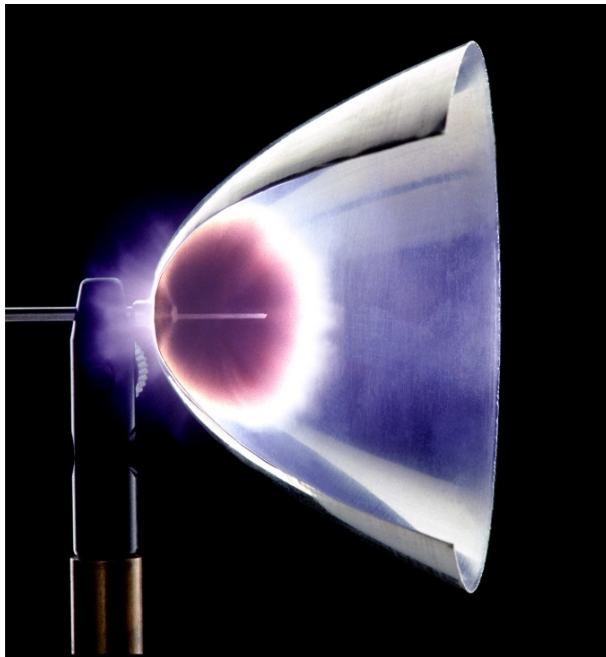
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Beispiel 2: Schuberzeugung in Düse („*kooperatives Target*“)

- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **fokussiert**:
3,3 MW / cm^2
- Repetitionsrate: 50 Hz



Inhalt

1 Einleitung

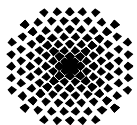
2 Laser

- > **2.1 Funktionsprinzip**
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

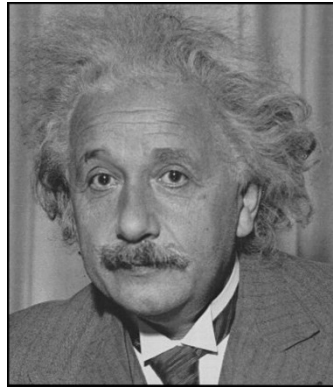
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

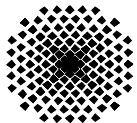
4 Zusammenfassung



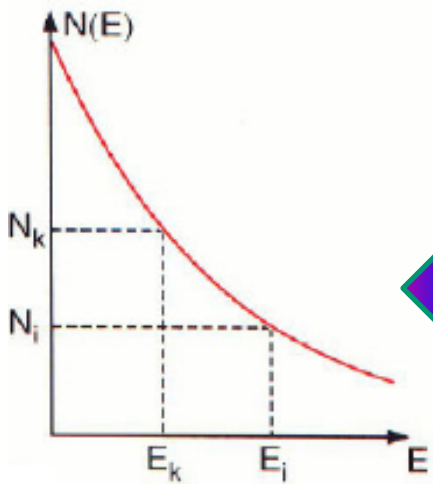
Geschichte



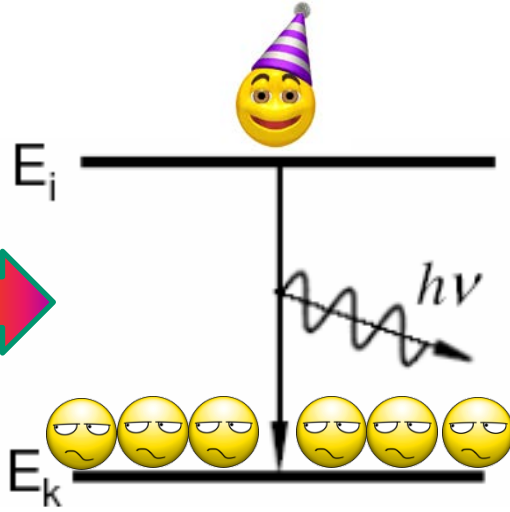
- 1916 Postulat der Stimulierten Emission (Albert Einstein)
- 1951 Erfindung des MASERs
(Charles Townes, Nikolai Basov, Alexander Prokorov)
- 1960 Erfindung des Rubin-Lasers
- 60`s Halbleiterlaser, Nd:YAG-Laser, Argon-, CO₂, chemische Laser,
Farbstofflaser, Metalldampfaser
- 70`s Excimer-Laser, Free-Electron-Laser, COIL



Stimulierte Emission



Thermisches Gleichgewicht,
z.B. für Molekülschwingungen,
Elektronenzustände



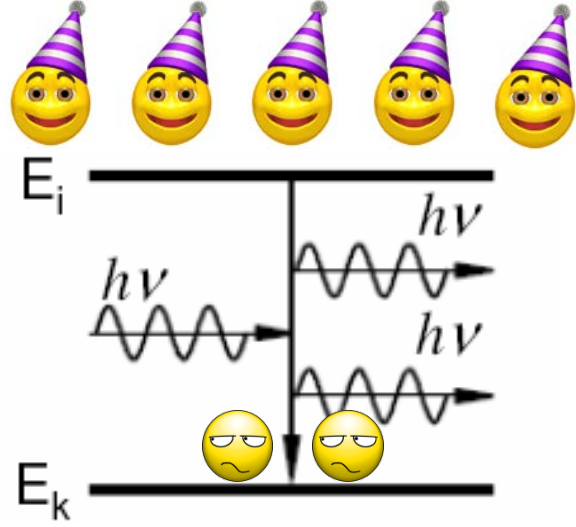
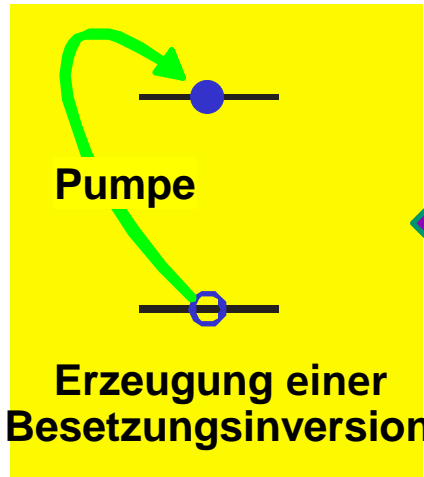
Spontane Emission

Diskrete (quantisierte)
Energieniveaus



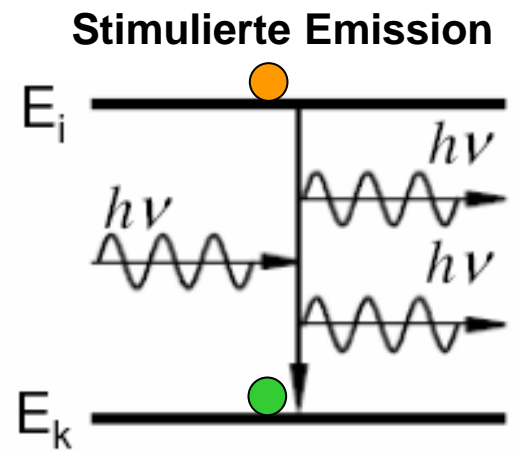
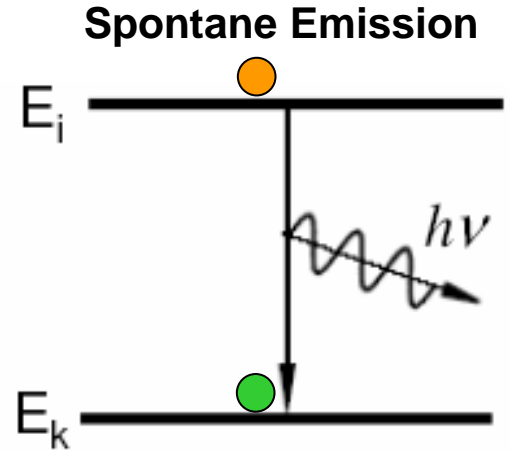
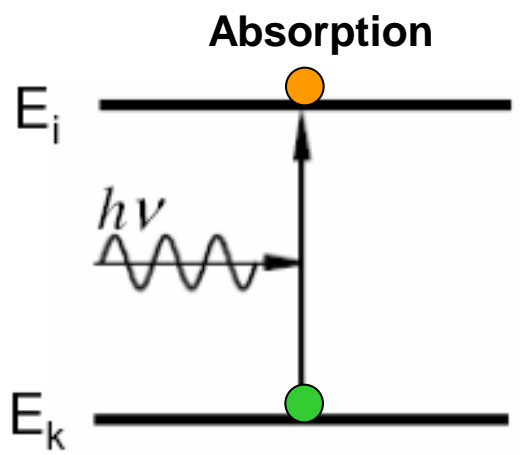
$$E_{rot} = 1/2 \cdot M \cdot \omega^2 R^2$$

Kontinuierliche
Energieübergänge



Stimulierte Emission

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

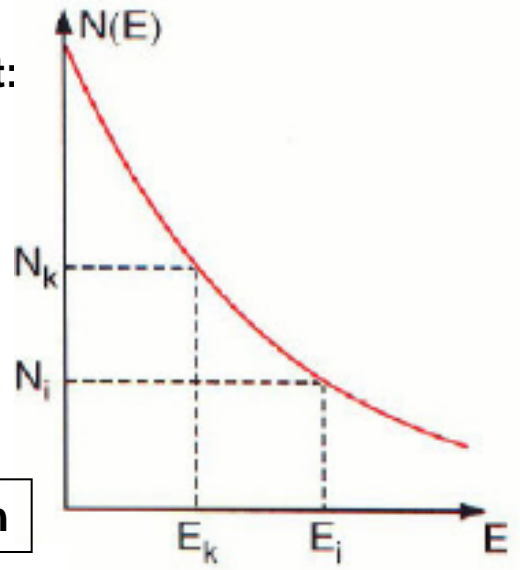


Besetzung der Energieniveaus im thermischen Gleichgewicht:

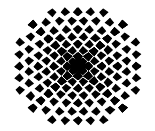
$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-(E_i - E_k)/kT} = \frac{g_i}{g_k} e^{-h\nu/kT}$$

(Boltzmann-Verteilung)

N: Besetzungszahl
g: Entartung der Energieniveaus

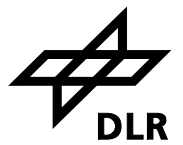


Lichtverstärkung ➔ **Besetzungsinversion erforderlich**



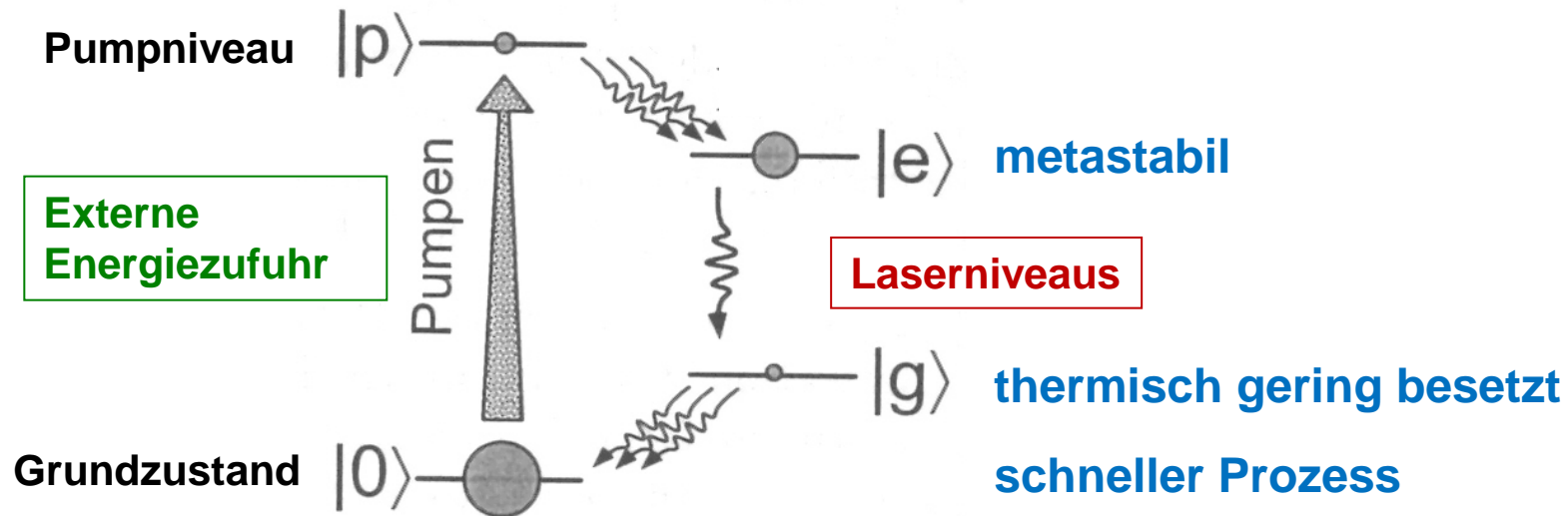
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Pumpprozess

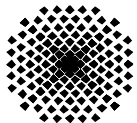
Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



Pumpprozesse:

- Elektronenstoß
- Stöße zwischen Molekülen
- chemische Reaktionen
- ...

D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Teubner-Verlag 1999, Leipzig



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserresonator

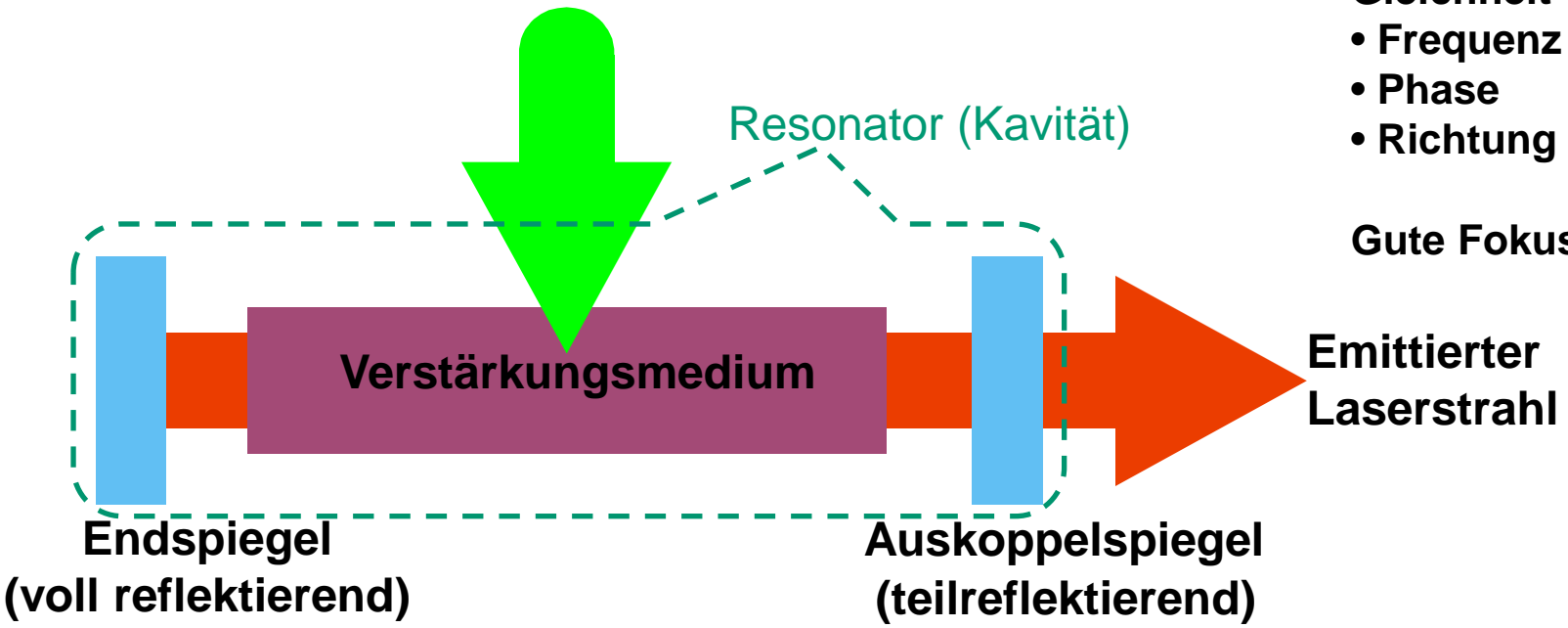
Pumpenergie

Kohärentes Licht:

Gleichheit von

- Frequenz
- Phase
- Richtung

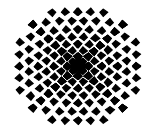
Gute Fokussierbarkeit



Kleinsignalverstärkung (materialspezifisch) >> Absorption

↓

Lichtverstärkung („Photonenlawine“)



Inhalt

1 Einleitung

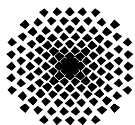
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > **2.2 Beispiele**
 - > 2.2.1 Halbleiterlaser
 - > 2.2.2 Festkörperlaser
 - > 2.2.3 Gaslaser
 - > 2.2.4 Andere Laserquellen
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

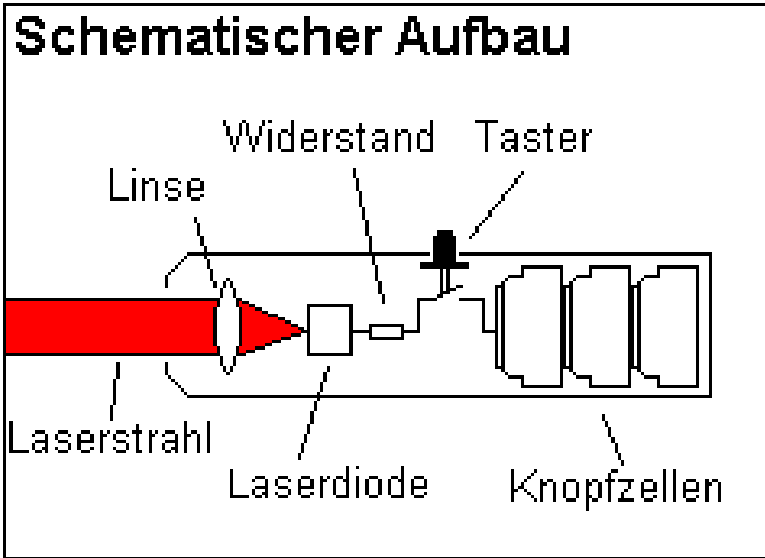
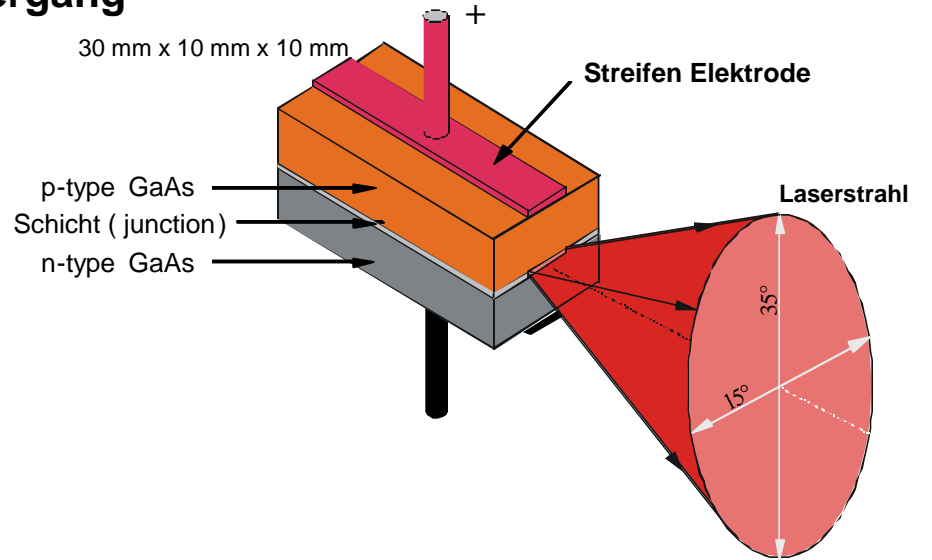
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung



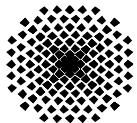
Halbleiterlaser

- **Lichtemission:** Rekombination am pn-Übergang
- **Pumpprozess:** Gleichstrom
- **Resonator:** Teilreflektierende Endflächen



- + **hoher Wirkungsgrad (bis 50%, IR)**
- + **Einzelemitter: 100 μ W ... 10 W**
- + **kompakte Baugröße**
- **limitierte Strahlqualität**

Beispiel: Laserpointer
 $P_{opt} < 1 \text{ mW}$: augensicher
 bei Lidschlussreflex



Festkörperlaser

Laseraktive Ionen + Wirtsmaterial (Glas, Kristall, Polymer...)

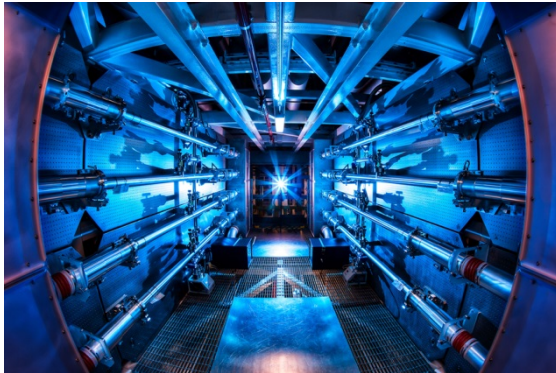
Beispiel: Nd:YAG (Reines 4-Niveau-System)

Emission des oberen Laserniveaus $^4F_{3/2}$ (230 μ s):

- 1320 nm (~14%) / 1064 nm (~55%) / 946 nm (~30%)

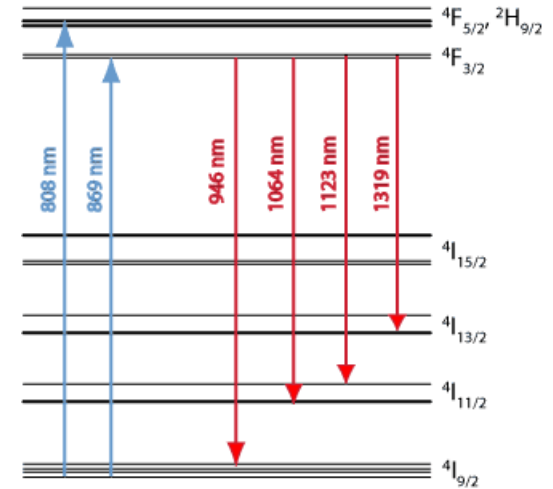
Pumpprozess: optisch (nahes Infrarot)

- Gasentladungslampen
- Laserdioden

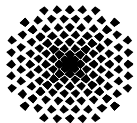


Thermisches Management?

- Erwärmung
- Ausdehnung
- Brechungsindexgradient

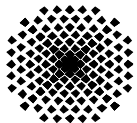
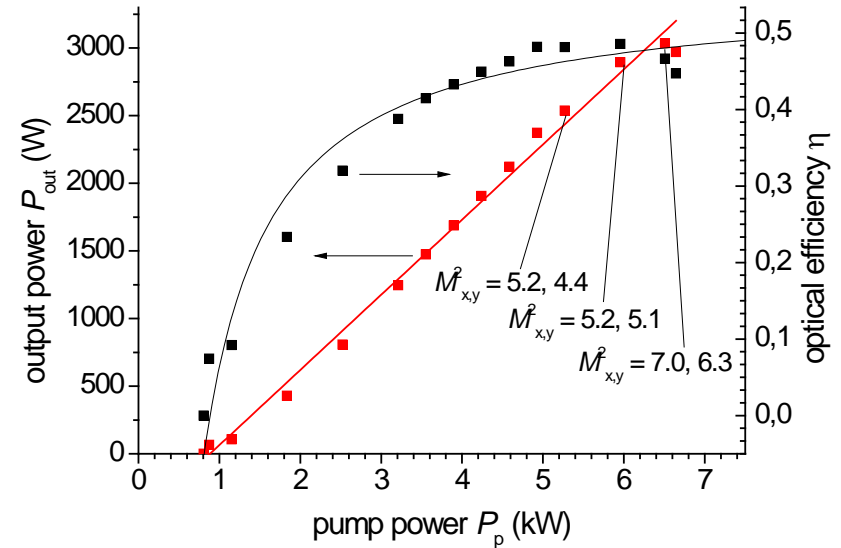
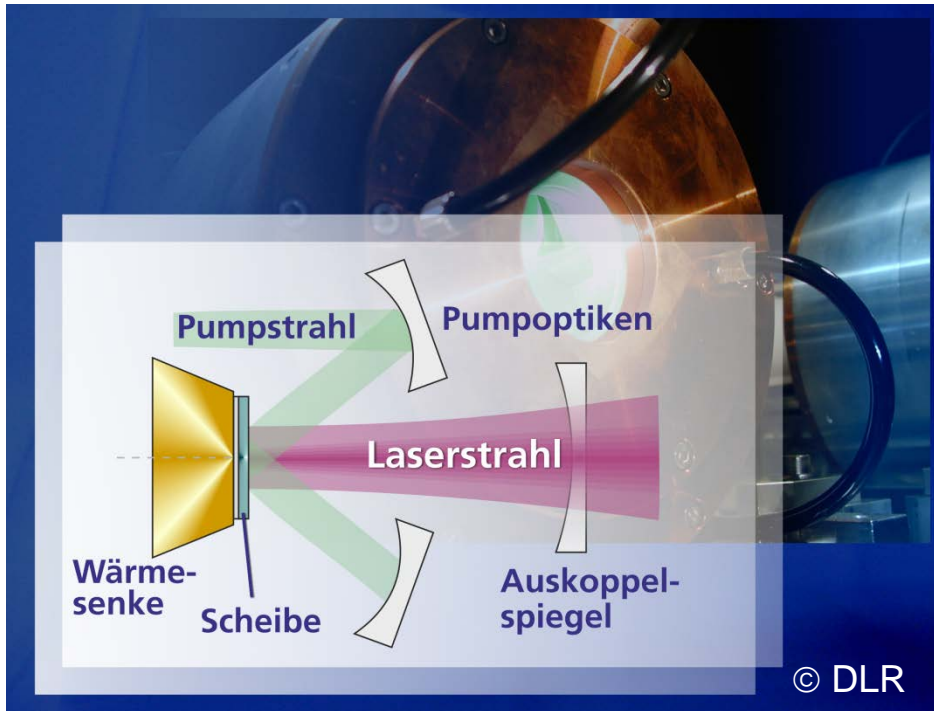
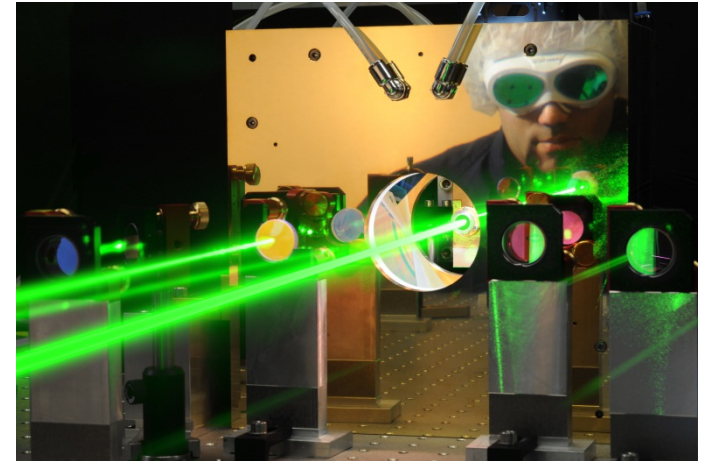


National Ignition Facility
Fusionsexperimente
> 3 MJ Laserpulsenergie

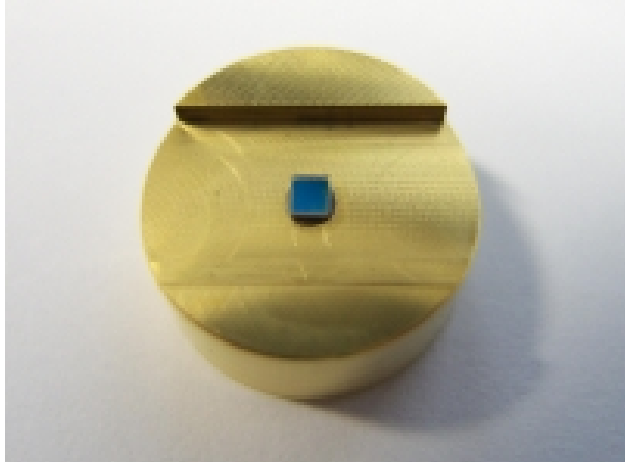
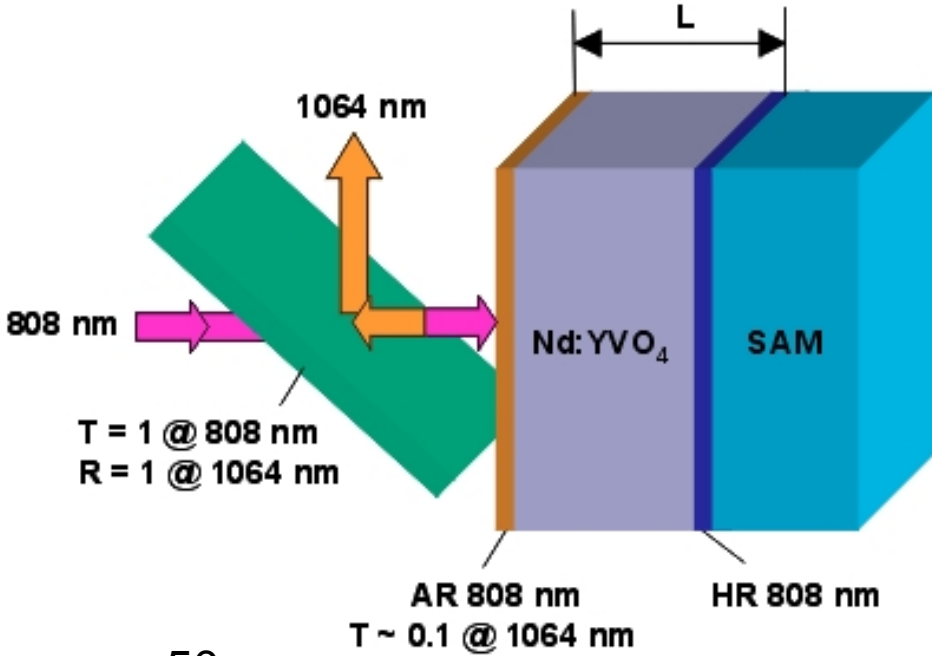


Scheibenlaser

- Gemeinsame Erfindung DLR-TP / IFSW Uni Stuttgart
- 100 – 200 μm Kristallscheibe, z.B. Yb:YAG
- Pumpmodule: Laserdioden
- cw-Betrieb im kW-Bereich, gut skalierbar
- gepulster Betrieb fs – ns möglich
- hohe Brillanz (Leistung x Strahlqualität)



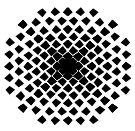
Mikrochip laser



Pumpfleck \varnothing 40 – 80 μm

- τ 50 ps
- f_{rep} 100 kHz – 3 MHz
- E_L 4 nJ

© BATOP optoelectronics, Data sheet microchip MC-1064-50ps

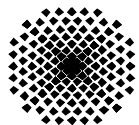
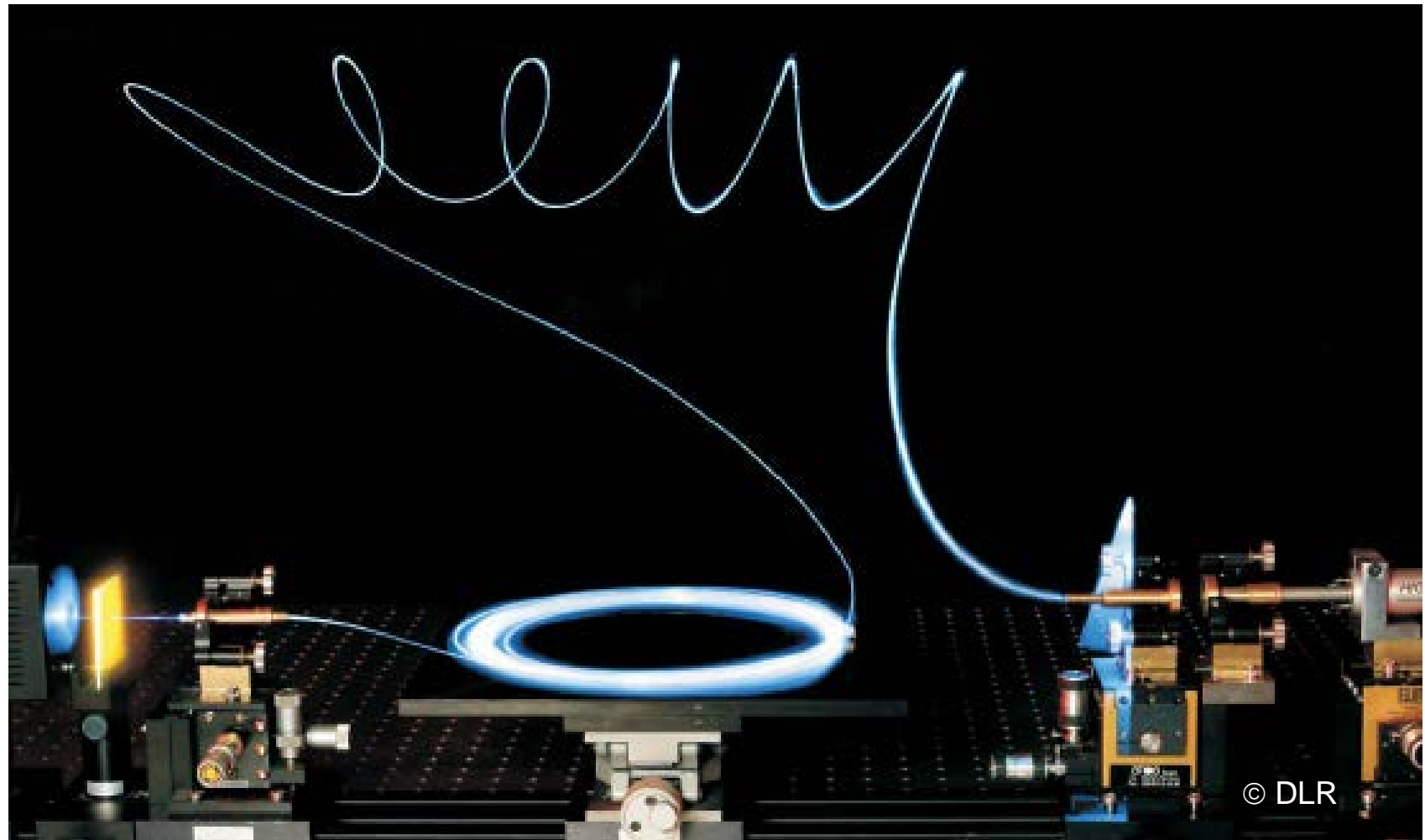


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Faserlaser



Elektrisch angeregter CO₂-Laser

Anregungsschema

Vibrationsanregung durch Elektronenstoß,
DC-Entladung; RF-Entladung

Energietransfer N₂ ⇒ CO₂

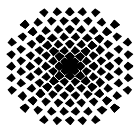
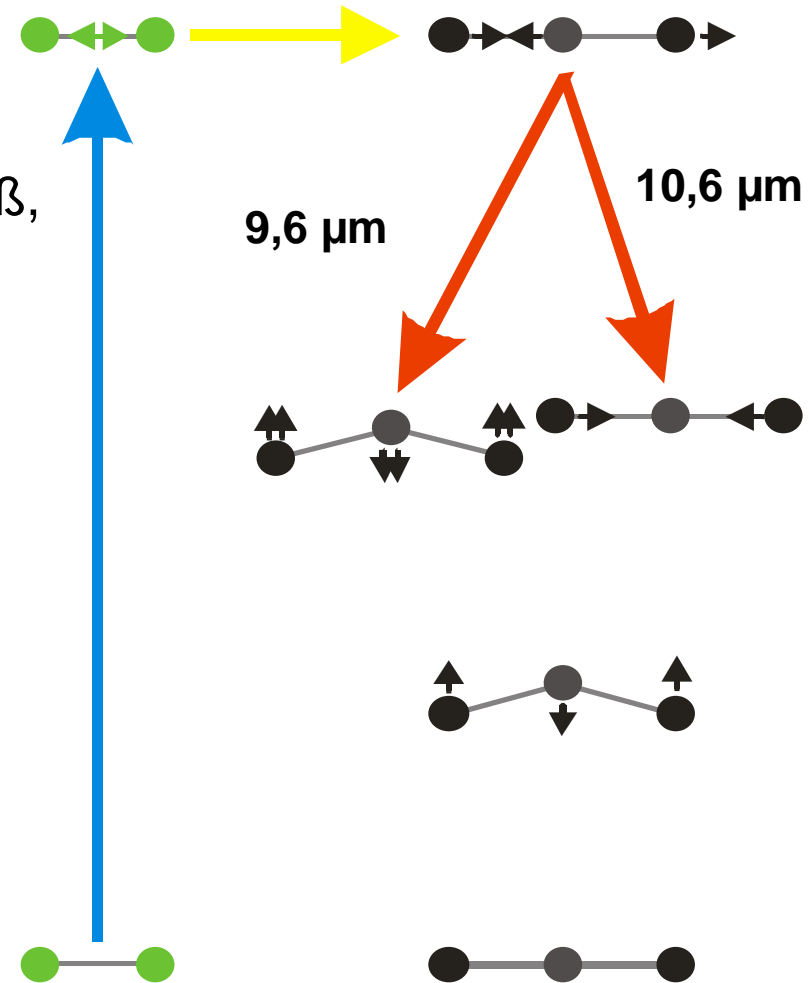
Laseremission 10,6 μm und 9,6 μm

Strahlungslose Relaxation in den
Grundzustand ⇒ Wärme

Vorteil von Gasen:

homogenes Brechungsindexprofil

Kühlung, z.B durch Gaskreislauf
oder Beimischung von He, möglich



Multispektrallaser

Elektronenstrahlgestützte Entladung

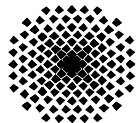
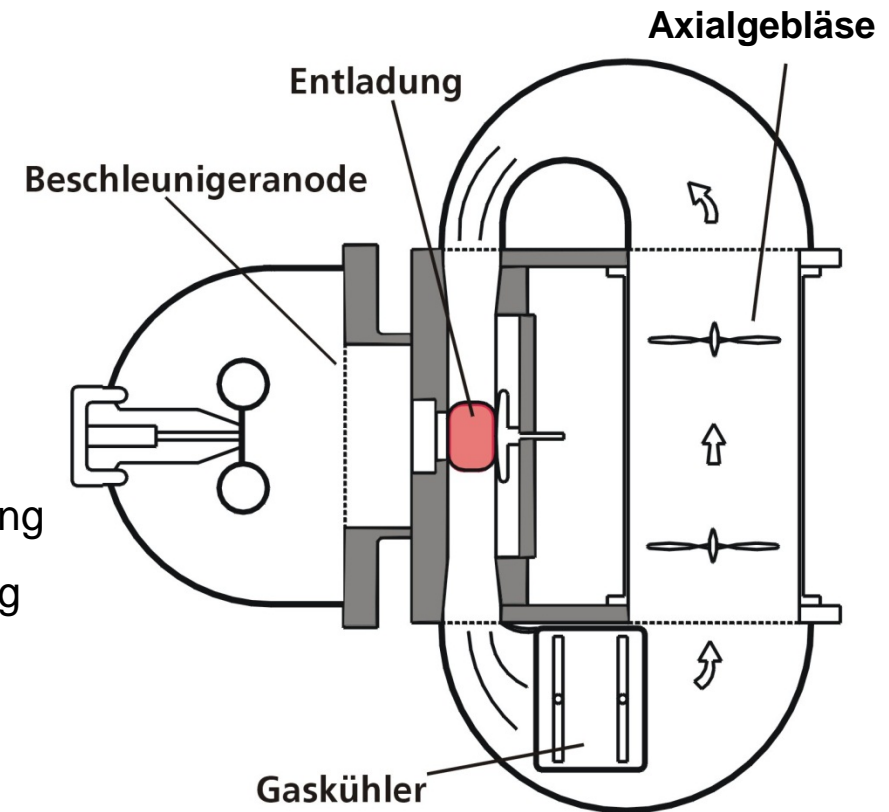
Elektronenstrahl	120 kV
➤ Vorionisation und Triggerung	
Hauptentladung	20 – 50 kV
➤ Pulsenergie	25 – 450 J

Verfügbare Spektralbereiche

9,6 – 10,8 μm	CO ₂
4,9 – 6,8 μm	CO Grundschiwingung
2,5 – 3,4 μm	CO Oberschiwingung
1,7 μm	Ar-Xe

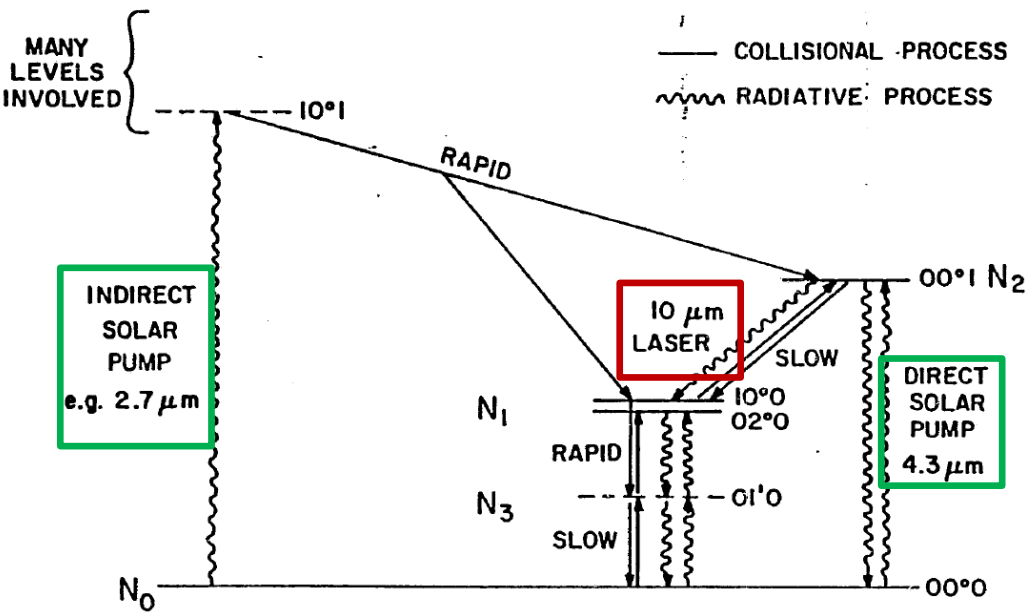
Kenndaten (CO₂)

Mittlere Leistung	10 kW
Pulszahl	bis zu 1000
Pulsenergie	100 J @ 100 Hz
Pulslänge	2 – 12 μs



Natürlicher CO₂-Laser

MOLECULAR PHYSICS OF NATURAL MARTIAN LASER



D. Deming et al., Modeling of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85045, 1983

Emittierte Laserleistung

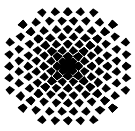
(λ = 9,4 μm und λ = 10,4 μm kombiniert):

- Mars: P = 1,6 μW/cm²
- Venus: P = 5,6 μW/cm²

D. Deming et al., Observations of the 10 Micrometer Natural Laser Emission from the Mesospheres of Mars and Venus, NASA Technical Memorandum # 85044, 1983

Maximal zulässige Bestrahlung (mittleres IR):

- Auge: P_{MZB} = 0,1 W/cm²
- Haut: P_{MZB} = 0,1 W/cm²

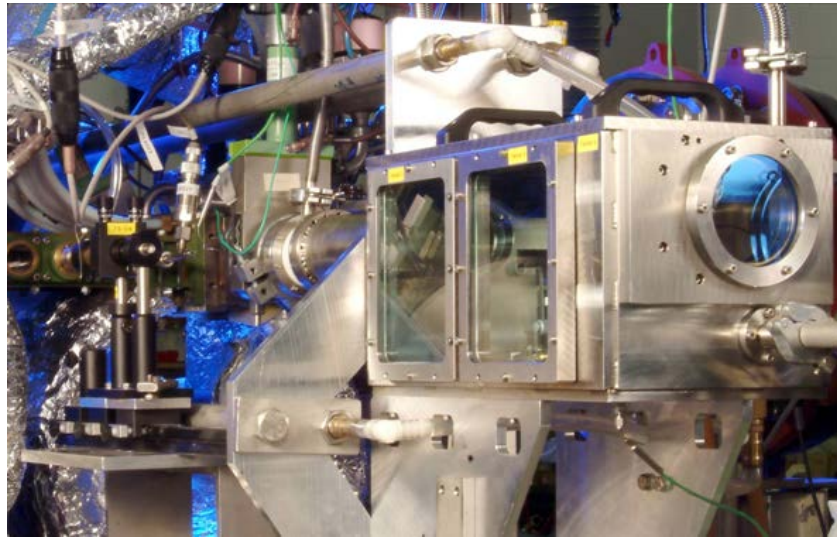


Universität Stuttgart

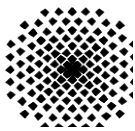
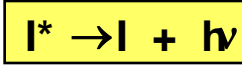
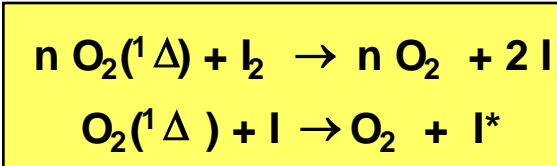
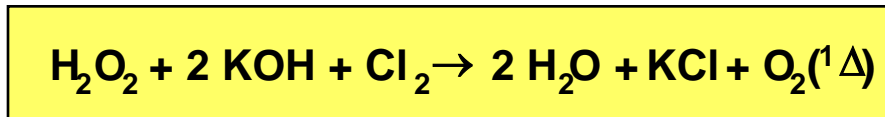
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Chemischer Sauerstoff-Iod-Laser (COIL)



COIL der 10 kW-Klasse (cw)
DLR-ITP Lampoldshausen

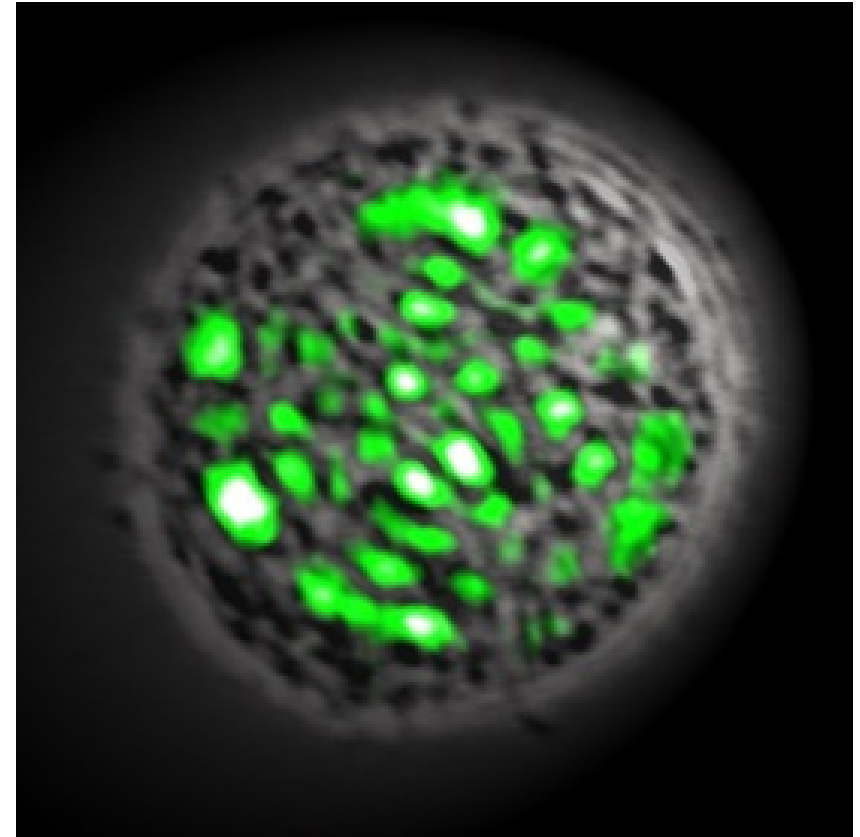


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



„Biolaser“



Einzelne Zelle einer Qualle
im Resonatoraufbau

Pumpprozess:

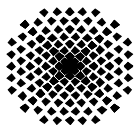
ns/nJ Pulse (blau)

Lasermedium GFP

(green fluorescent protein), $\lambda = 516 \text{ nm}$

Zelle lebt auch nach längerer Laseremission.

M.C. Gather et al, Single-cell biological lasers, Nature Photonics 5, 406-410 (2011)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

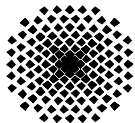
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > **2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung**
 - > 2.3.1 Fokussierbarkeit und Reichweite
 - > 2.3.2 Propagation

3 Antriebskonzepte

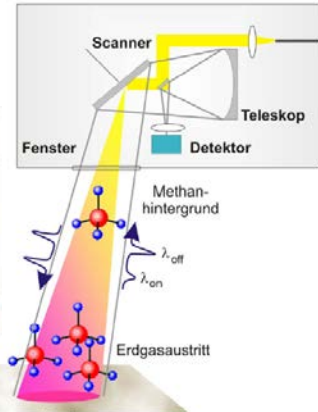
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung



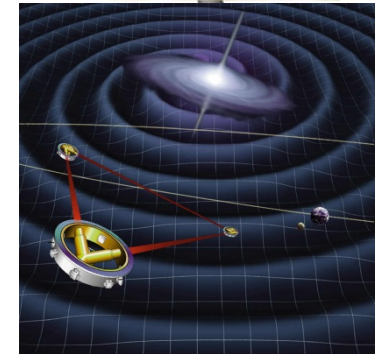
Eigenschaften

➤ Kohärentes Licht mit Gleichheit von
➤ Frequenz  Spektroskopie



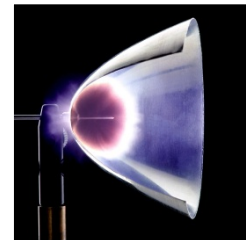
Bsp.: Detektion von
Lecks in Gasleitungen


➤ Phase  Interferometrie

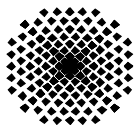


Bsp.: Detektion von
Gravitationswellen

➤ Richtung  große Reichweite, gute Fokussierbarkeit



➤ Laserpulse  hohe Intensitäten in kurzen Zeitskalen (μs – fs)
Kurzzeitdynamik



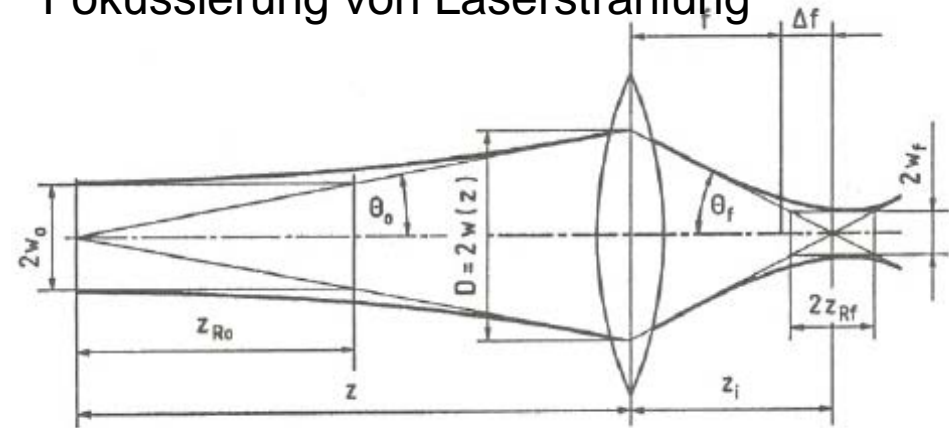
Fokussierbarkeit

Fokussierung von Sonnenlicht



Untergang der Römischen Flotte,
Hitzestrahle des Archimedes,
Syracus, 212 v. Chr.

Fokussierung von Laserstrahlung

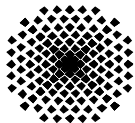


H. Hügel, Strahlwerkzeug Laser, Teubner-Verlag 1992, Stuttgart

Strahlparameterprodukt

$$w_0 \Theta_0 = w_f \Theta_f = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi}$$

- w Strahltaile
- Θ Divergenzwinkel
- M^2 Strahlqualitätsparameter
- konstant bei Durchgang durch optische Elemente
- idealer Gaußstrahl: $M^2 = 1$
- sehr hohe Intensitäten möglich



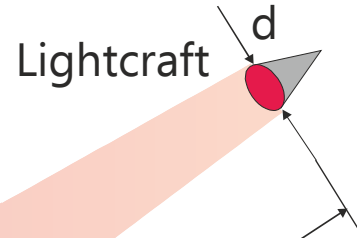
Reichweite

Begrenzung der Reichweite:

- **Strahldivergenz**
- **im Idealfall beugungsbegrenzt ($M^2 = 1$)**

$$R = \frac{\sqrt{Str}}{2,44} \frac{D \cdot d}{\lambda}$$

Turbulent
Atmosphäre



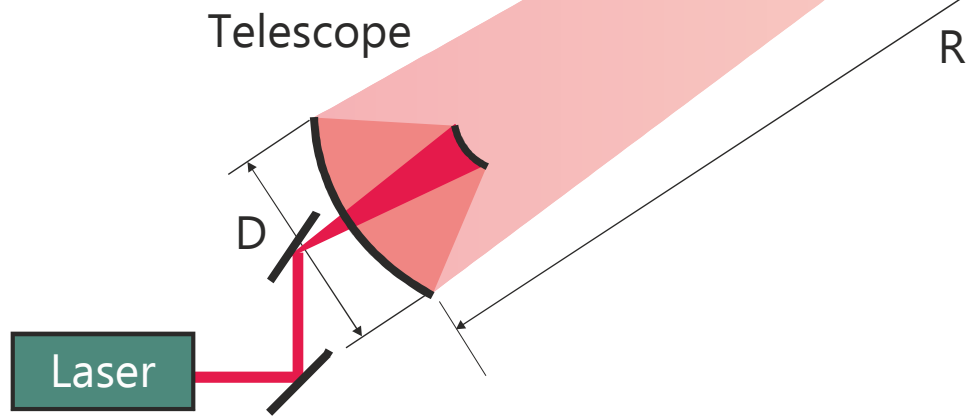
Str. Strehlzahl (0,3 ... 0,5)

- Transmission
- Strahlqualität
- Optische Komponenten

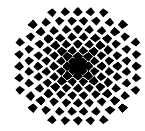
Beispiel: $D = 5\text{m}$, $d = 1\text{m}$, $Str=0,5$

Laser	λ , μm	R, km
CO ₂	10,6	137
COIL	1,32	1103
Nd:YAG 2f	0,53	2736

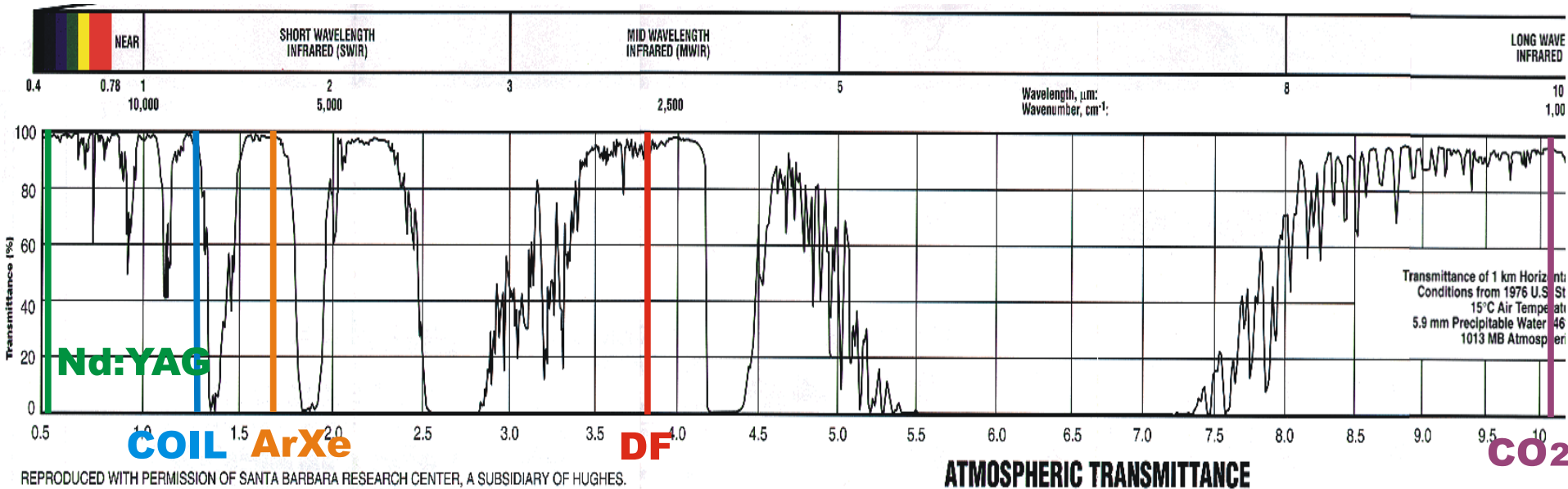
LEO: 350 ... 400 km Höhe
 → 1000 km Reichweite



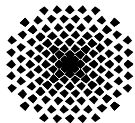
Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)



Atmosphärische Transmission



- Streuung an Partikeln – wetterabhängig, größenabhängig
- Turbulenz
 - Strahlwanderung / -aufweitung
 - Modifikation der Fokussierung
 - insbesondere bei Erhitzung durch Absorption an Partikeln (Thermal Blooming)



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

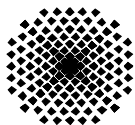
- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

> 3.1 Überblick

- > Systematik und Kenngrößen
- > Photonenantrieb
- > Photovoltaische Laserantriebe
- > Thermische Laserantriebe
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

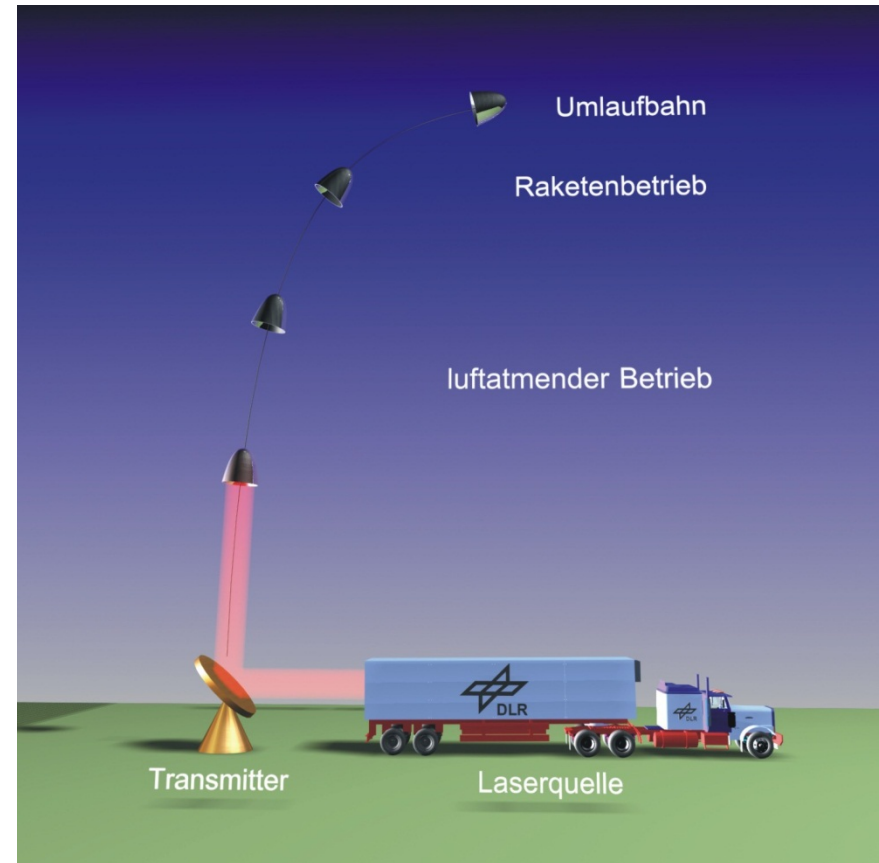
4 Zusammenfassung



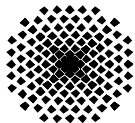
Antriebskonzepte

Arten der Wechselwirkung

- Reflektion – **Photonenantrieb**
- Absorption
– **Photovoltaische Laserantriebe**
- Erwärmung, Ionisierung
– **Thermische Laserantriebe**
 - Materialabtrag
– **Ablative Laserantriebe**
- Detonation und Verbrennung
– **Laser Lightcraft**



Laserbasierter Raketenantrieb



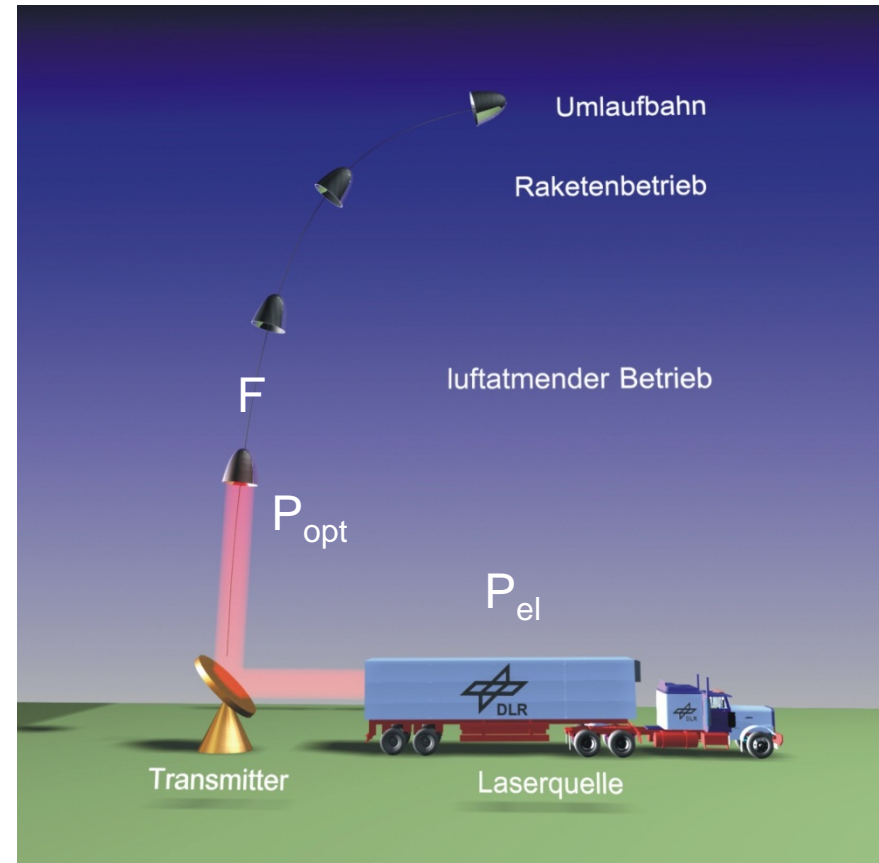
Schub-/Leistungsverhältnis

Impulskoppelkoeffizient (Antrieb):

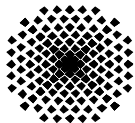
$$c_m = \frac{F}{P_{opt}} = \frac{\Delta p}{E_L}$$

Impulskoppelkoeffizient (System)

$$c_{m,sys} = \frac{F}{P_{el}} = \eta_{el-opt} \cdot c_m$$



Laserbasierter Raketenantrieb



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzept für interstellare Missionen

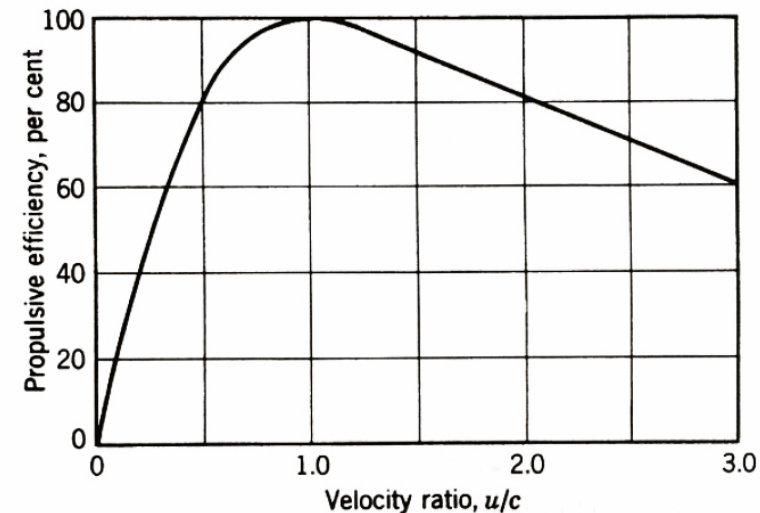


- minimaler Impulsübertrag (→ Mikroantriebe)

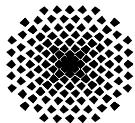
$$c_m = \frac{2p_{\text{Photon}}}{E_{\text{Photon}}} = \frac{2h\nu \cdot c^{-1}}{h\nu} = \frac{2}{c} = 6.7 \text{ nN/W}$$

- hohe Effizienz bei relativistischen Geschwindigkeiten
 Beispiel: $v=c/4$

$$\eta_{\text{prop}} = \frac{2v/v_{\text{jet}}}{1 + (v/v_{\text{jet}})^2} = \begin{cases} 47\% & (v_{\text{jet}} = c) \\ 0,03\% & (v_{\text{jet}} = 5 \text{ km/s}) \end{cases}$$



G.P. Sutton et al, Rocket Propulsion Elements (2001)

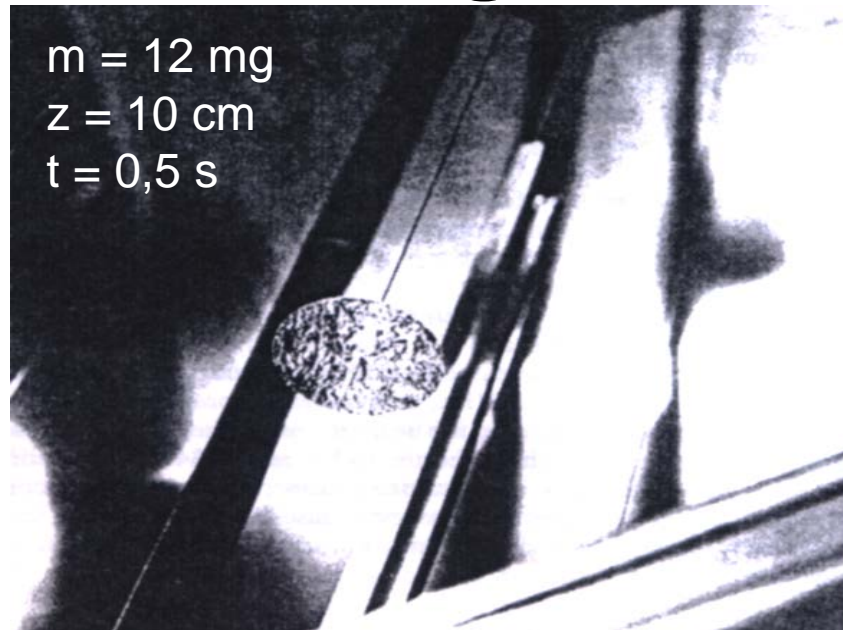


Universität
Stuttgart

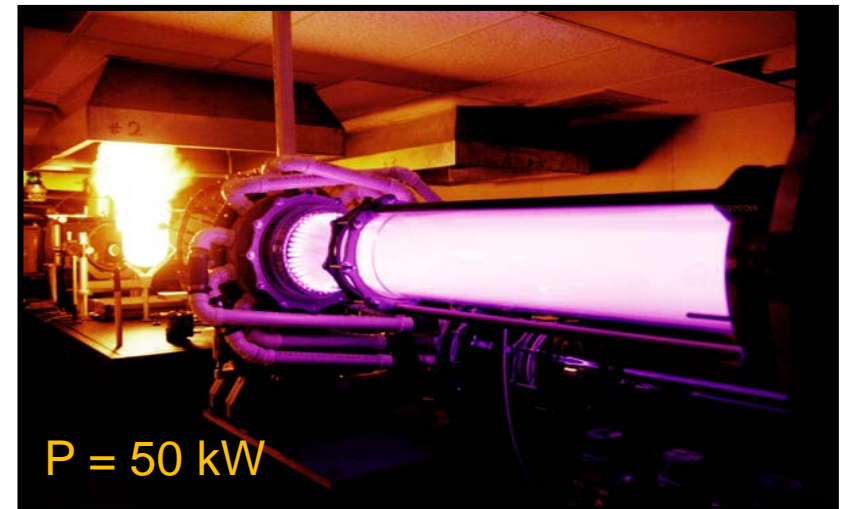
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



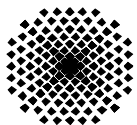
Lasersegel am Hochenergielaser



Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW- LHMEL II CO₂ laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



CO₂-Laser (cw)
Laser Hardened Materials Evaluation Laboratory
Wright Patterson Air Force Base



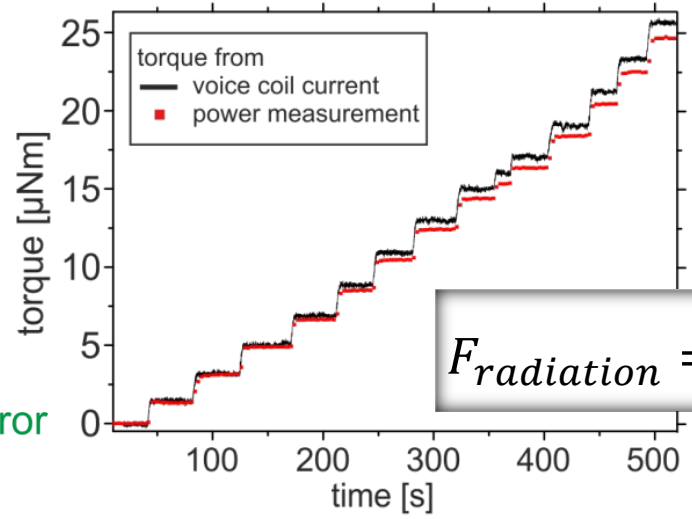
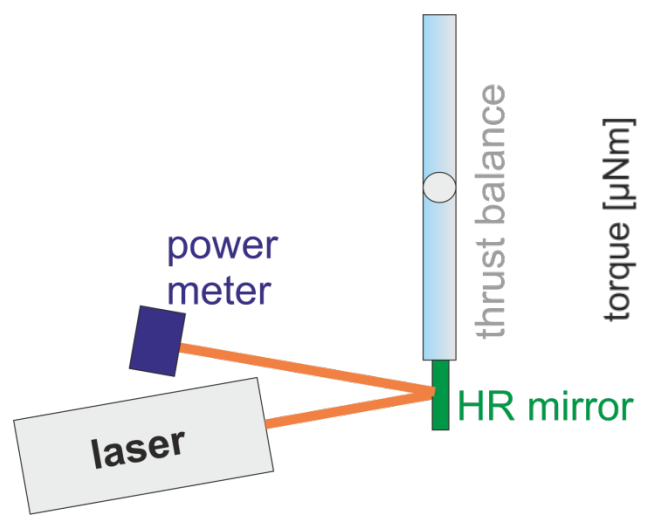
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Exkurs: Kalibration durch Photonendruck

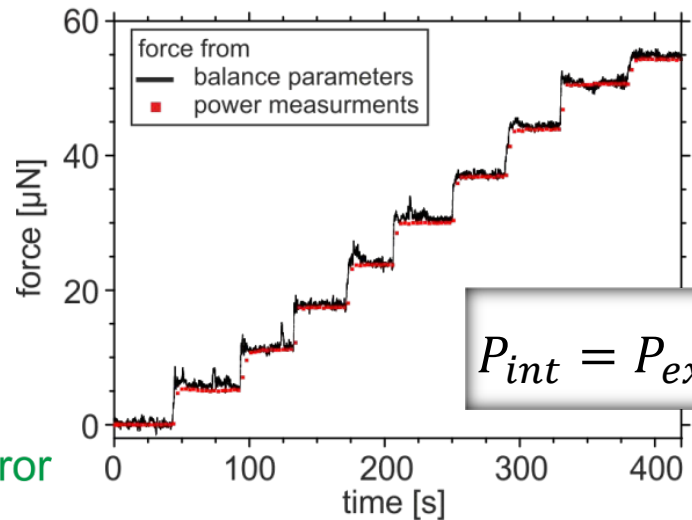
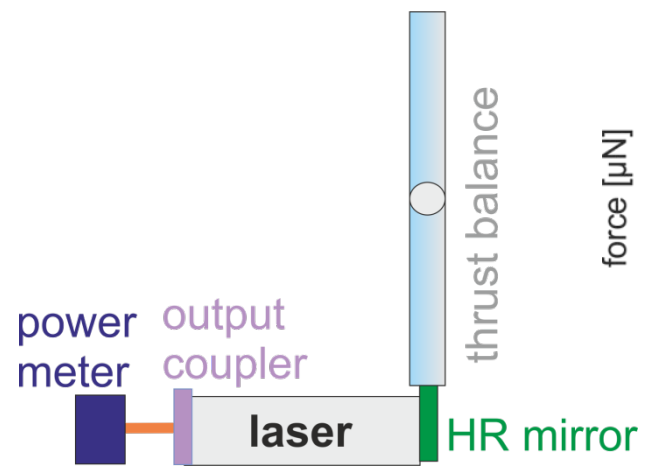
Extra-cavity



Laser: 1 kW Scheibenlaser
 HR: Hochreflektierender Spiegel, R = 99.98%
 Einfallswinkel $\vartheta = 10^\circ$

$$F_{radiation} = (1 + R) \cdot \frac{P_{ext}}{c} \cdot \cos(\vartheta)$$

intra-cavity

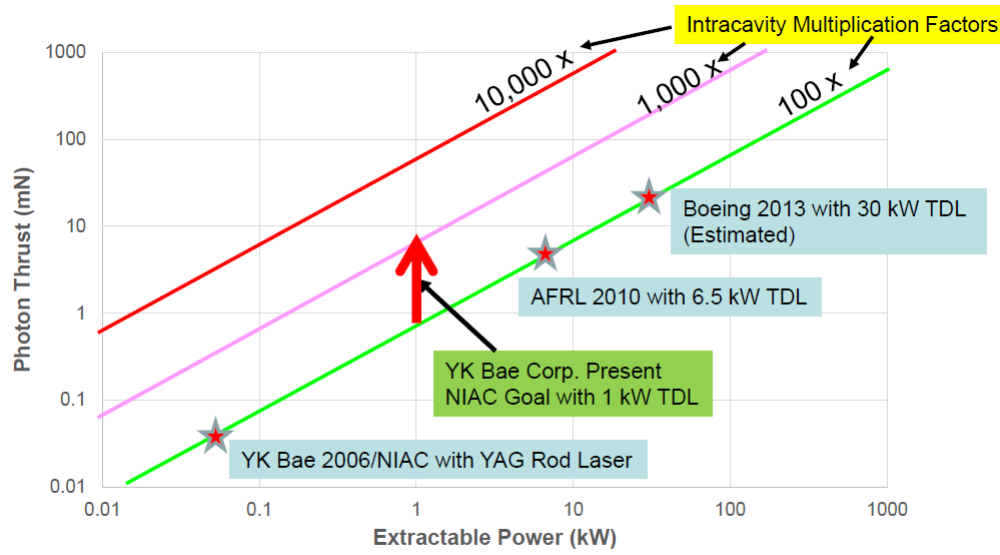
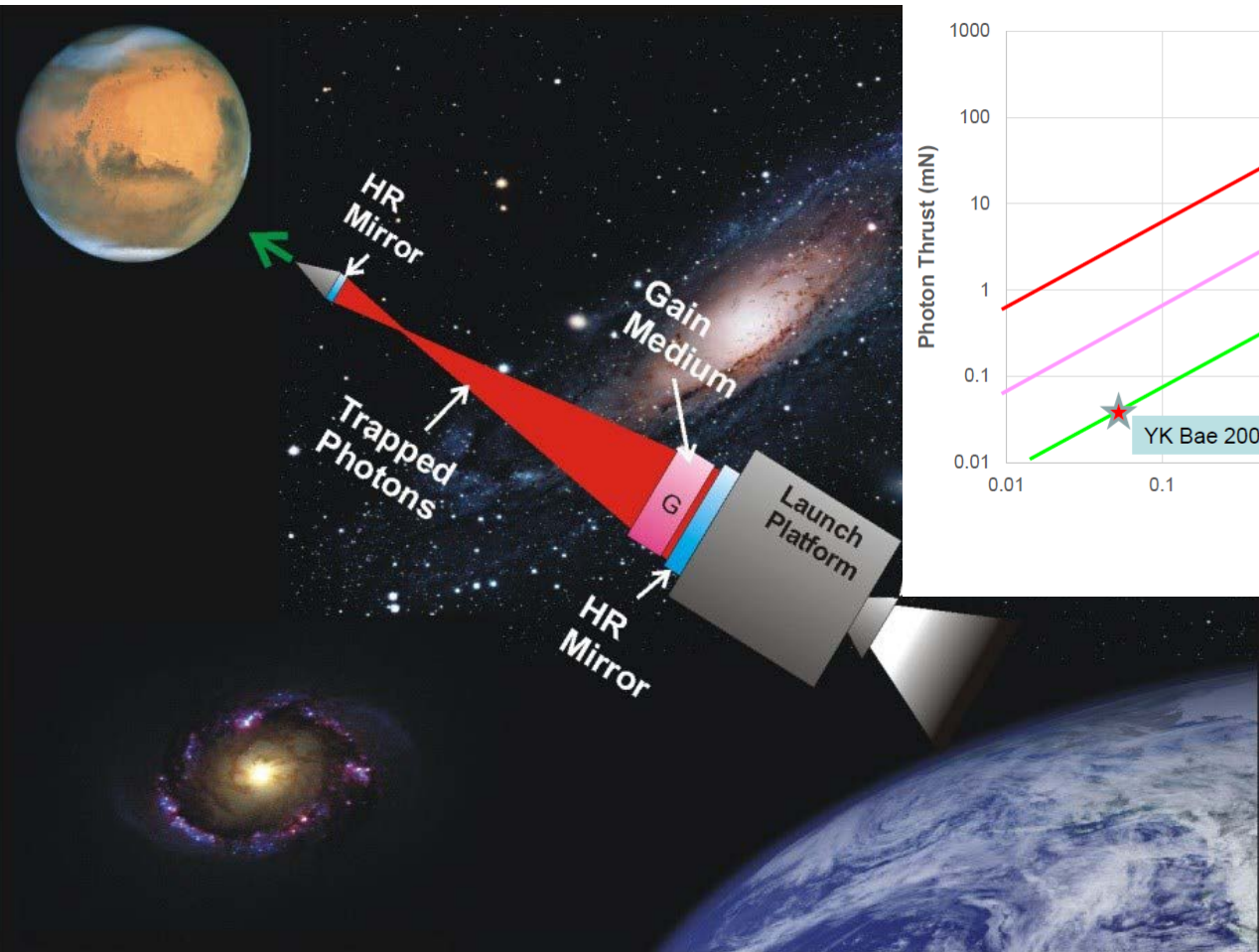


HR-Spiegel = Endspiegel der Laserkavität
 Auskoppelspiegel: T = 2.4 %
 $\vartheta = 0^\circ$

$$P_{int} = P_{ext} \frac{1 - T}{T} \approx 41 \cdot P_{ext}$$

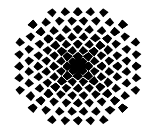
S. Karg et al., Laser Propulsion Research Facilities at DLR Stuttgart, Proceedings of HPLA/BEP 2014

Photonenantrieb – intra-cavity



TDL: Thin Disk Laser

Y.K.Bae, The Past, Present and Future of Photon Propulsion, Proceedings of HPLA/BEP 2014

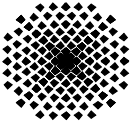
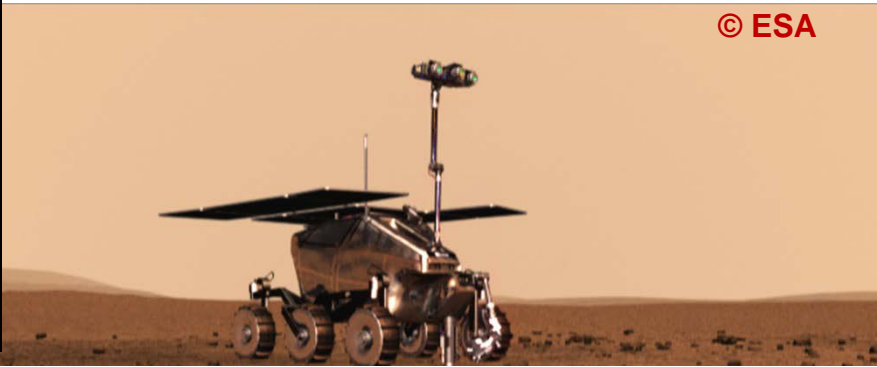
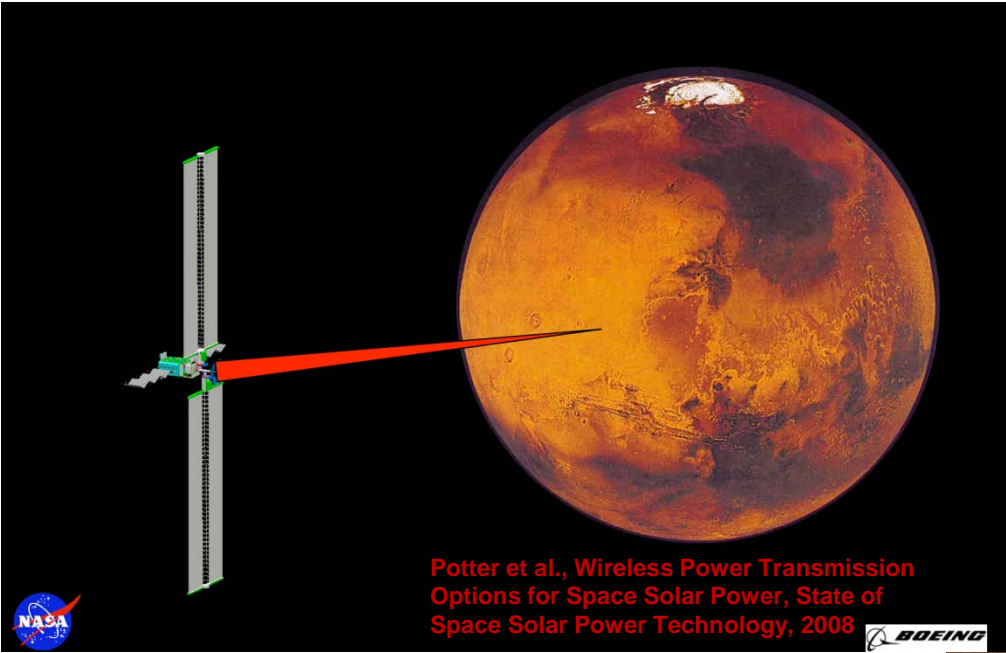
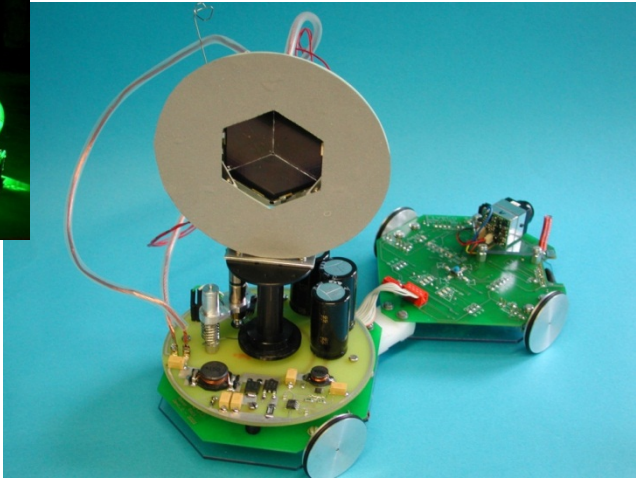
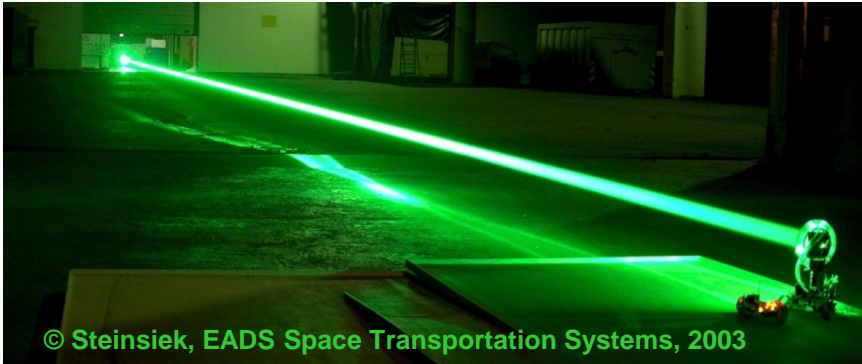


Universität Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Energieversorgung im Planetenschatten



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

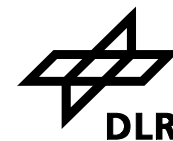
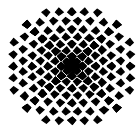


Space Elevator

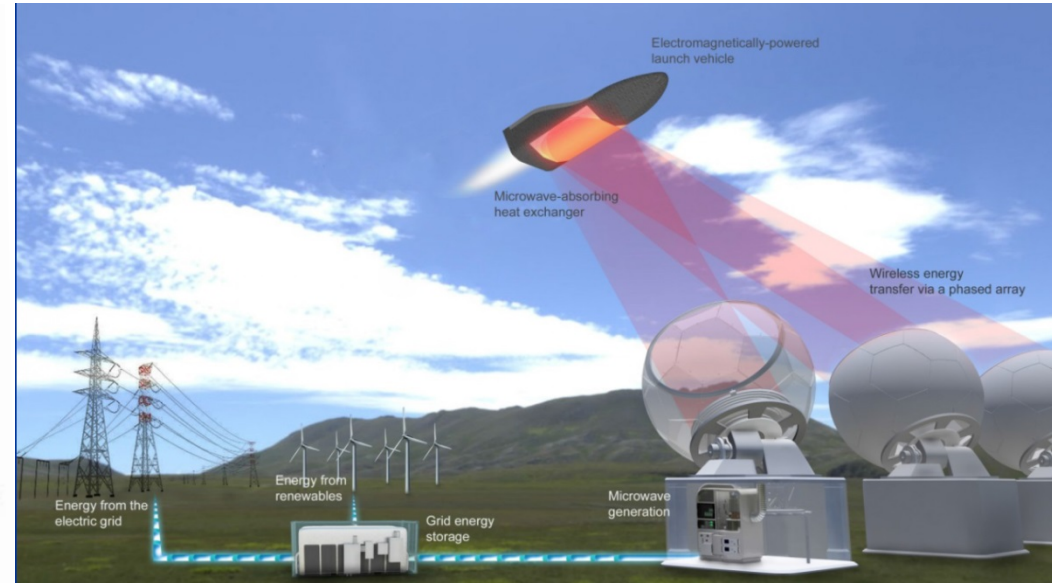
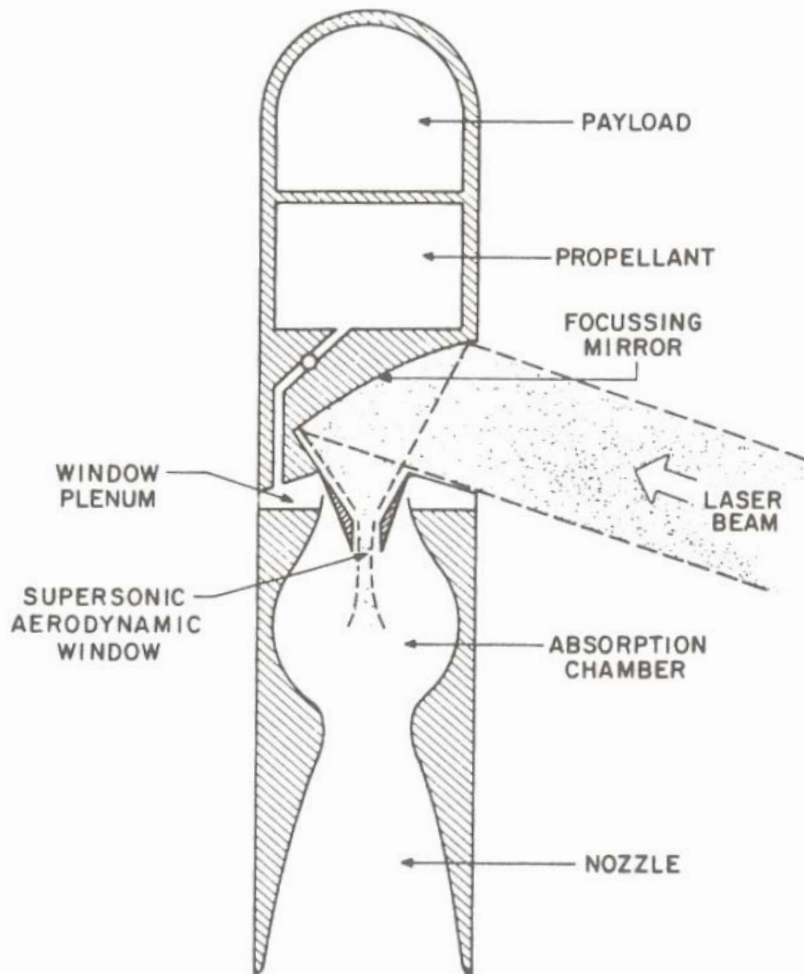


J.T. Kare et al, Laser Power Beaming on a Shoestring, AIP Conf. Proc. **997**, 97-108 (2008)

B.C. Edwards, The Space Elevator: an Ideal Application for the Free Electron Laser, Proc. SPIE **4632**, 134-140 (2002)



Thermische Laserantriebe



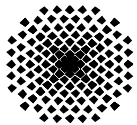
J. Coopersmith et al., A Strategic Roadmap for Commercializing Low-Cost Beamed Energy Propulsion Launch Systems, AIAA Space 2016

Funktionsprinzip:

- Aufheizen eines Treibstoffes durch fokussierten Laserstrahl
- Schub durch Expansion

Laserquelle: cw oder gepulst

R.F. Weiss et al., Laser Propulsion, Astronautics and Aeronautics, March 1979: 50 – 58



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

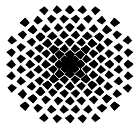
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

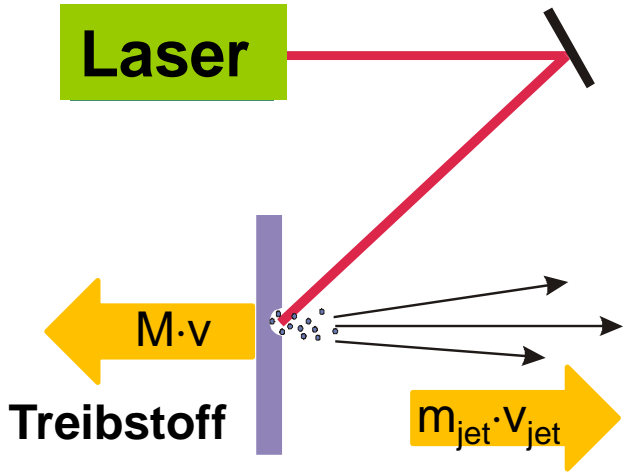
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > **3.2 Ablative Laserantriebe**
 - > 3.2.1 Antriebsprozess
 - > 3.2.2 Mikroantriebe USA
 - > 3.2.3 Mikroantrieb DLR
 - > 3.2.4 Hybride laser-el. Antriebe
 - > 3.2.5 Beseitigung von Weltraummüll
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung

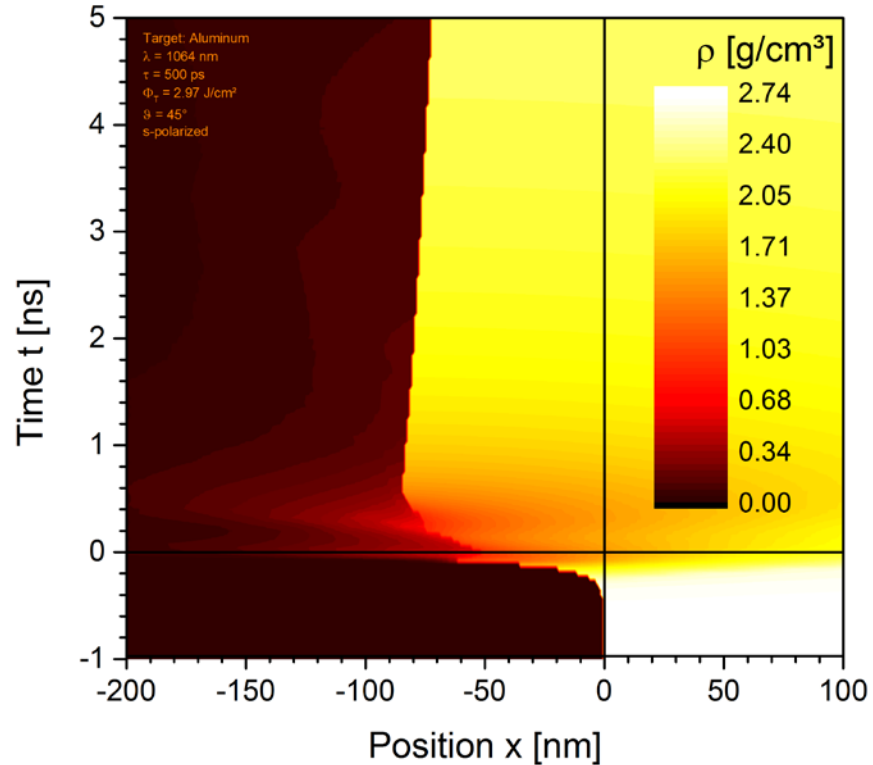


Laserinduzierter Ablationsprozess

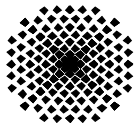


Laser Ablation

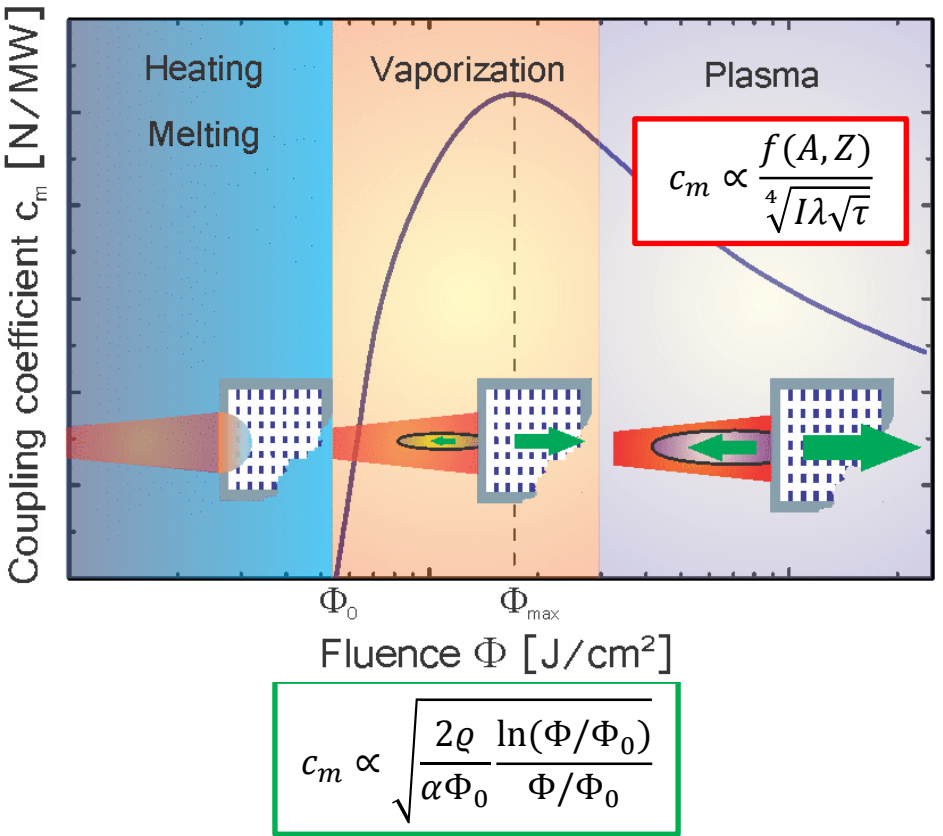
- Schmelzprozesse
- Verdampfung
- Ionisierung
- Plasmabildung
- Thermische Expansion
- Impulsübertrag



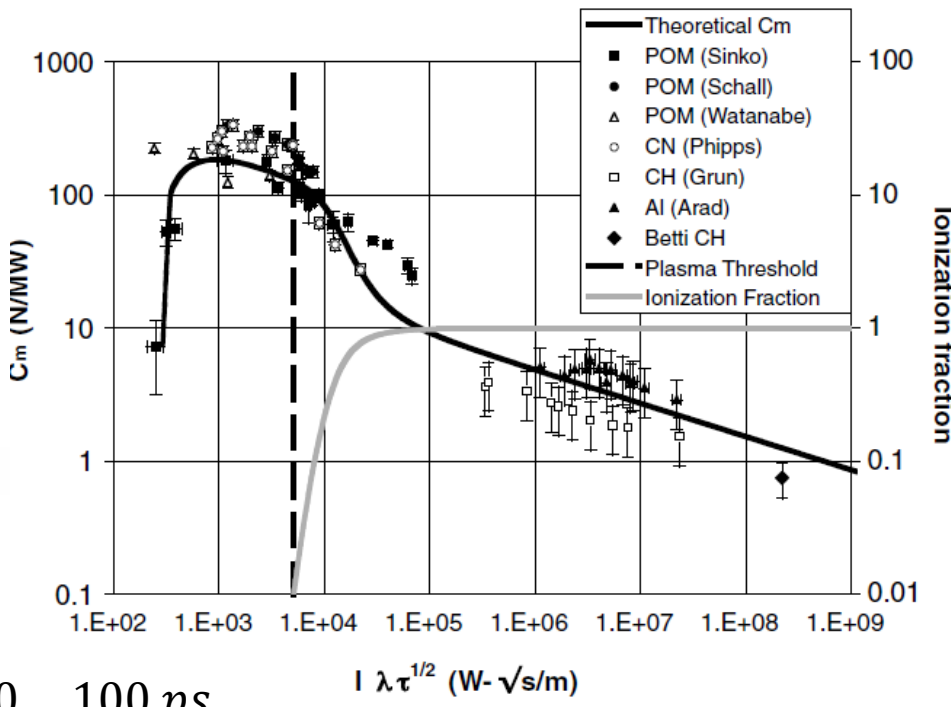
Hydrodynamische Simulationen mit Polly-2T (JIHT-RAS)



Impulskoppelkoeffizient

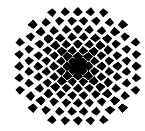


gültig für $\tau > 10 \dots 100 \text{ ps}$



B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)

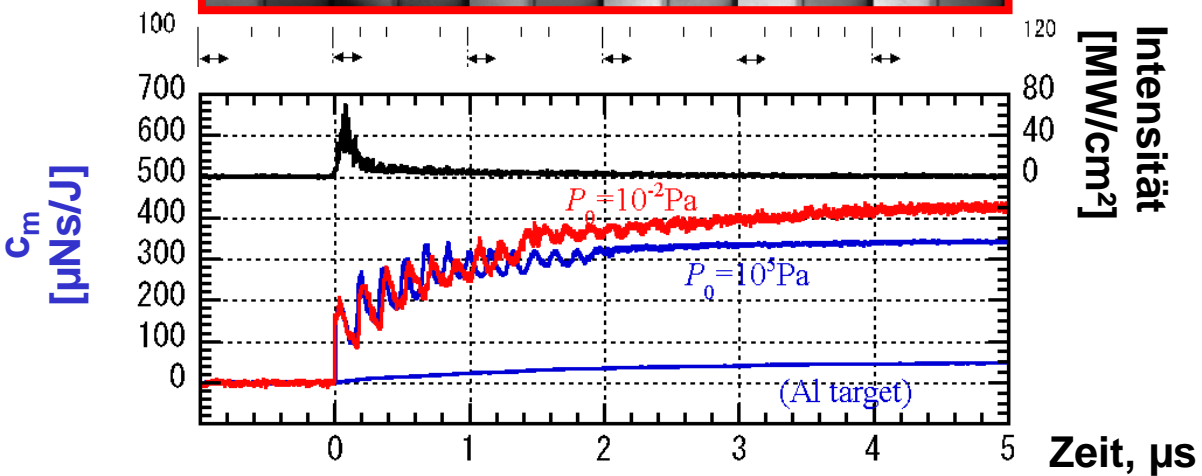
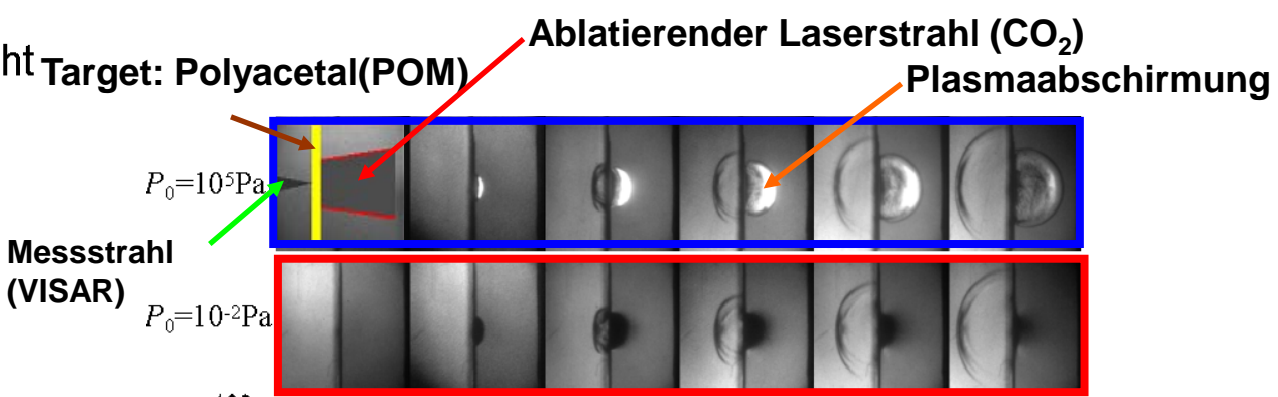
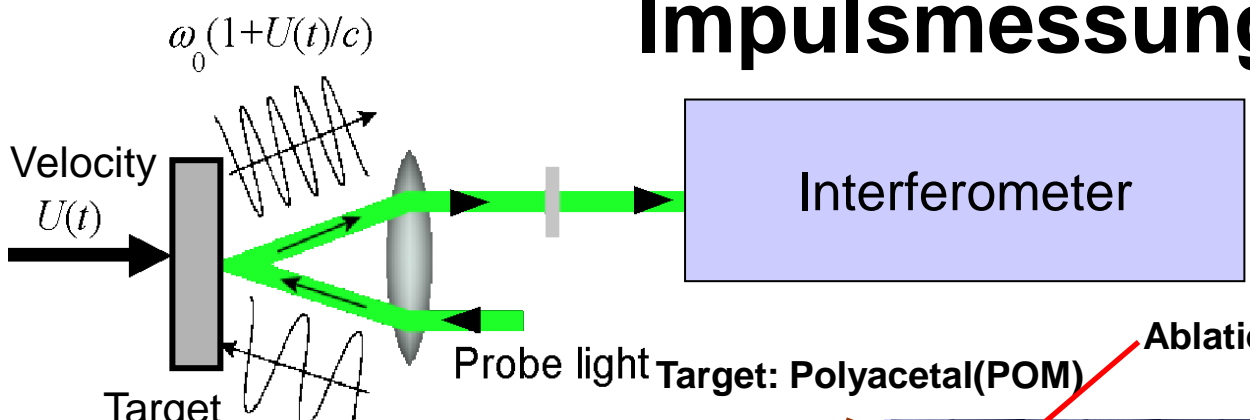


Universität
Stuttgart

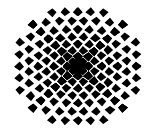
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Impulsmessung



A. Sasoh et al, Diagnostics and Impulse Performance of Laser-Ablative Propulsion, AIP Conf. Proc. 997 (2008)

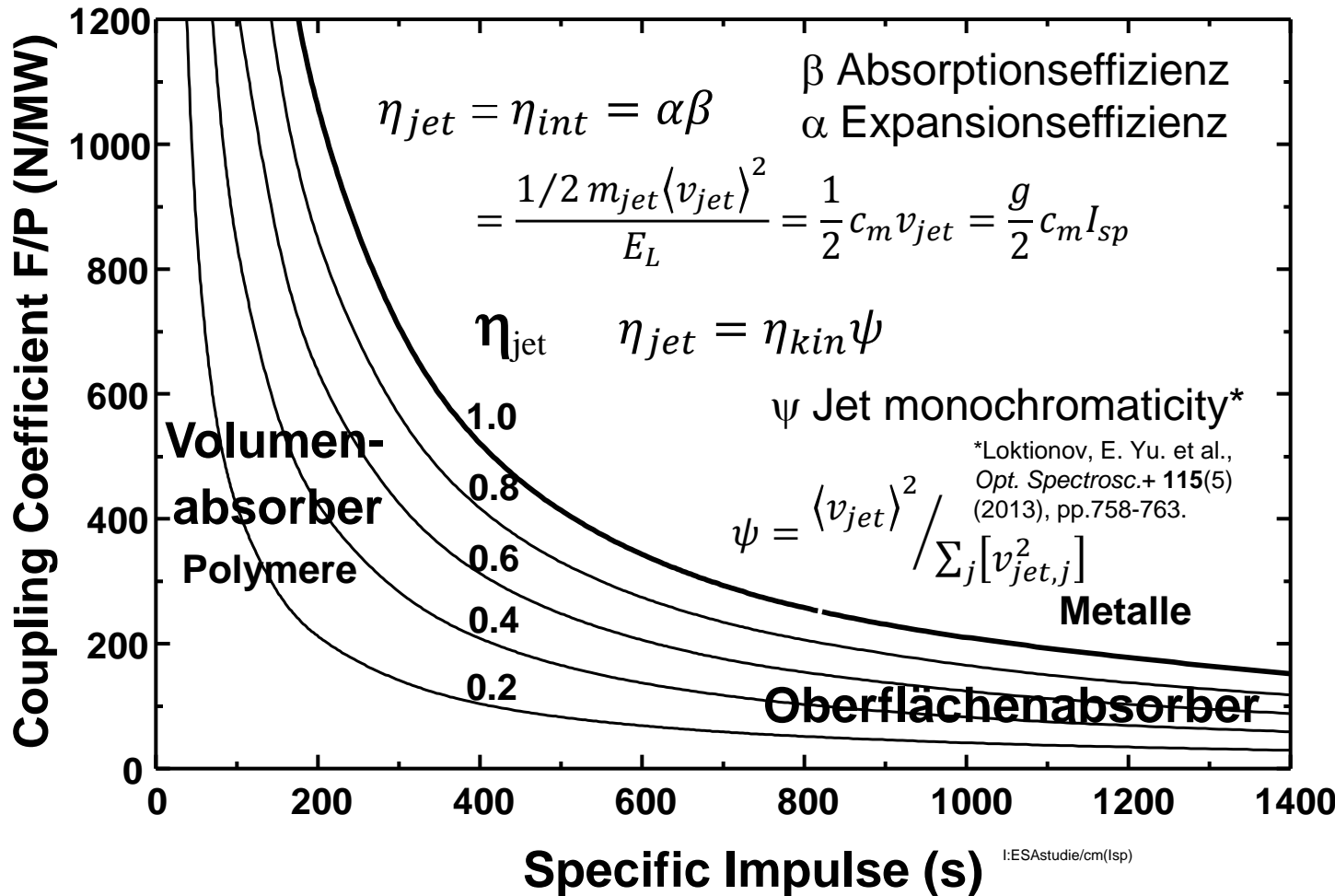


Universität Stuttgart

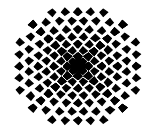
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Innere Antriebseffizienz (Treibstoff-/Jeteffizienz)



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)

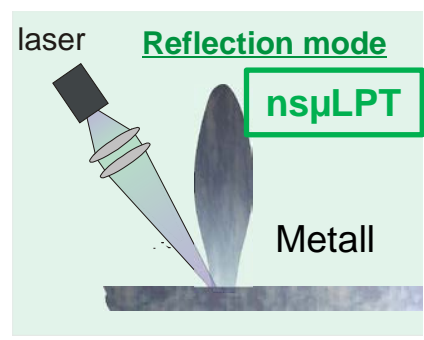


Universität
Stuttgart

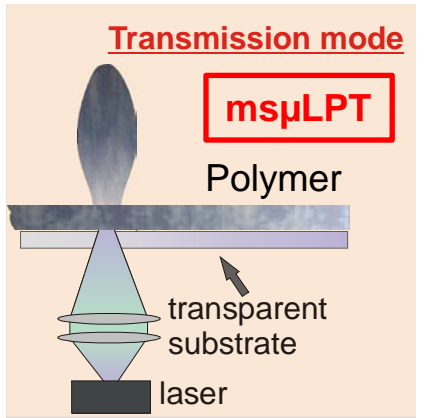
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzepte



Antrieb	Masse [kg]	Min.Impulsbit [μNs]	I_{sp} [s]	$C_{m,sys}$ [$\mu\text{N}/W_{el}$]	T [μN]
ns μ LPT	0,8	$4 \cdot 10^{-5}$	3000	40	100

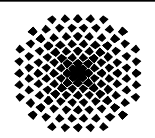


ms μ LPT	0,5	0,05	250	550	10000
--------------	-----	------	-----	-----	-------

Vergleich:

μ PPT	1,0	2	1000	20	30
FEPP	8,7	1	9000	15	1400

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



T-Mode Micro Laser Plasma Thruster (ms μ LPT)

Getestete Treibstoffe:

PVC, sowie exotherme
Polymere (C-dotiert)

T 0,14 ... 0,29 mN (PVC:C)
2,8 ... 7,2 mN (EP:C I)

c_m 60 ... 120 μ N/W (PVC:C)
1170 ... 3000 μ N/W (EP:C)

I_{sp} 650 ... 750 s (PVC:C)
160 ... 540 s (EP:C)

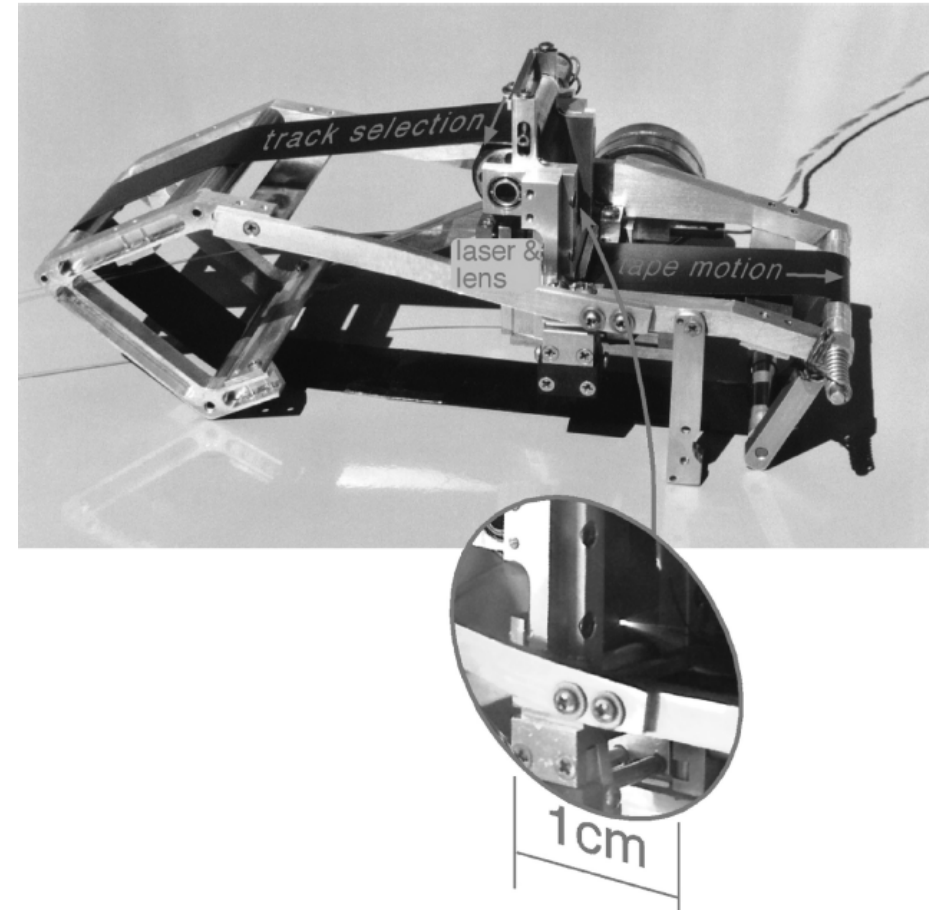
Lasertyp: Diodenlaser

τ 2 ms

λ 920 nm

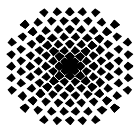
f_{rep} 80 Hz

E_L 30 mJ



Phipps et al, Micropropulsion using a Laser Ablation Jet,
J. Prop. Pow. **20(6)**, 1000-1011 (2004)

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered
Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



R-Mode Micro Laser Plasma Thruster (ns μ LPT)

Getestete Treibstoffe:

Aluminium, Gold

T 0,47 ... 0,63 μ N (Au)

0,94 ... 1,88 μ N (Al)

c_m 7,2 ... 68 μ N/W (Au)

32 ... 111 μ N/W (Al)

I_{sp} 3664 ... 7905 s (Au)

822 ... 6610 s (Al)

Lasertyp: Diodengepumpter

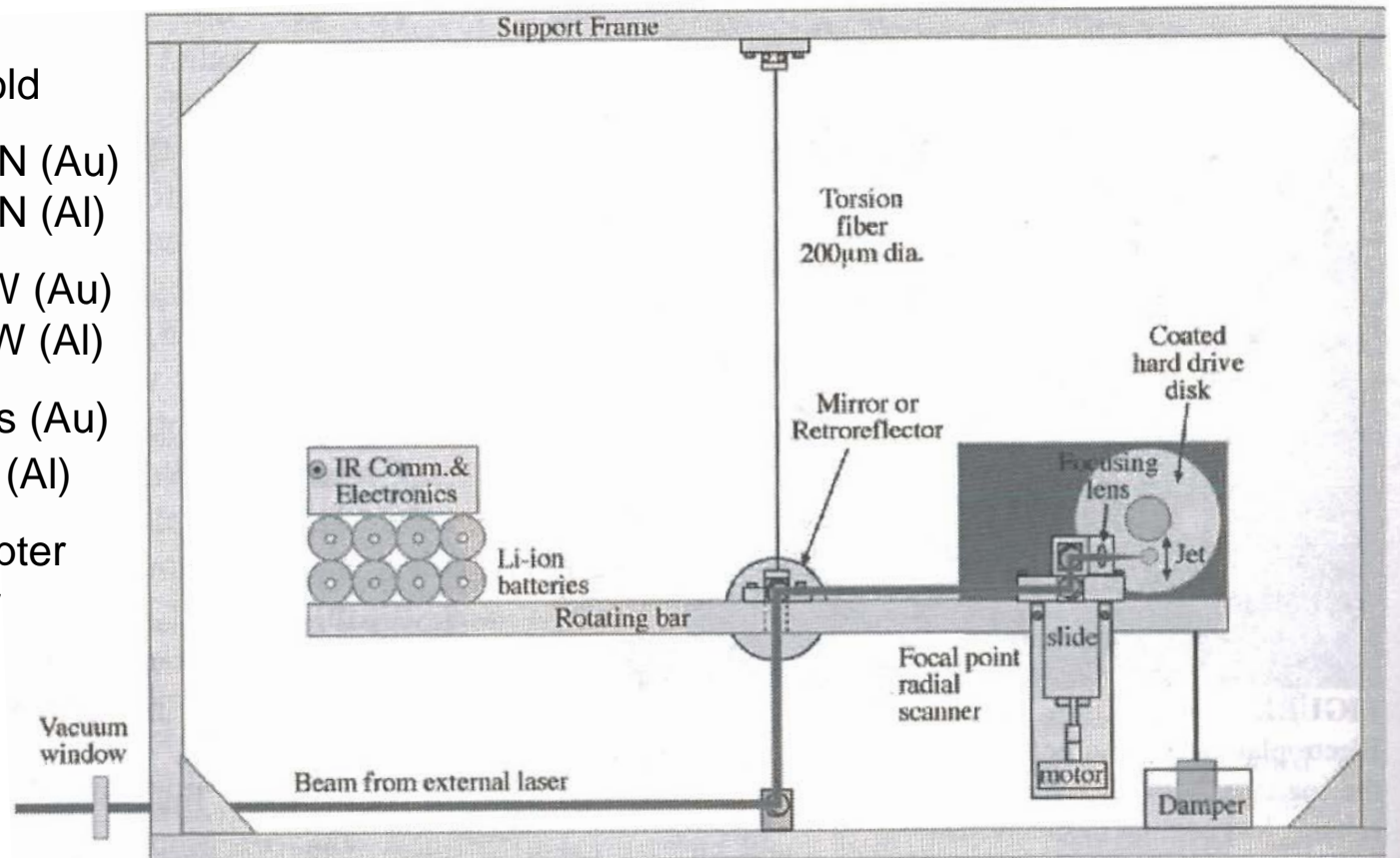
Nd:YAG-Laser

τ 5 ns

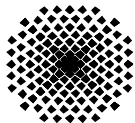
λ 1064 nm

f_{rep} 10 Hz

E_L 1 ... 20 mJ



Phipps et al, A ns-Pulse Laser Microthruster,
AIP Conf. Proc. **830**, 235-246 (2006)

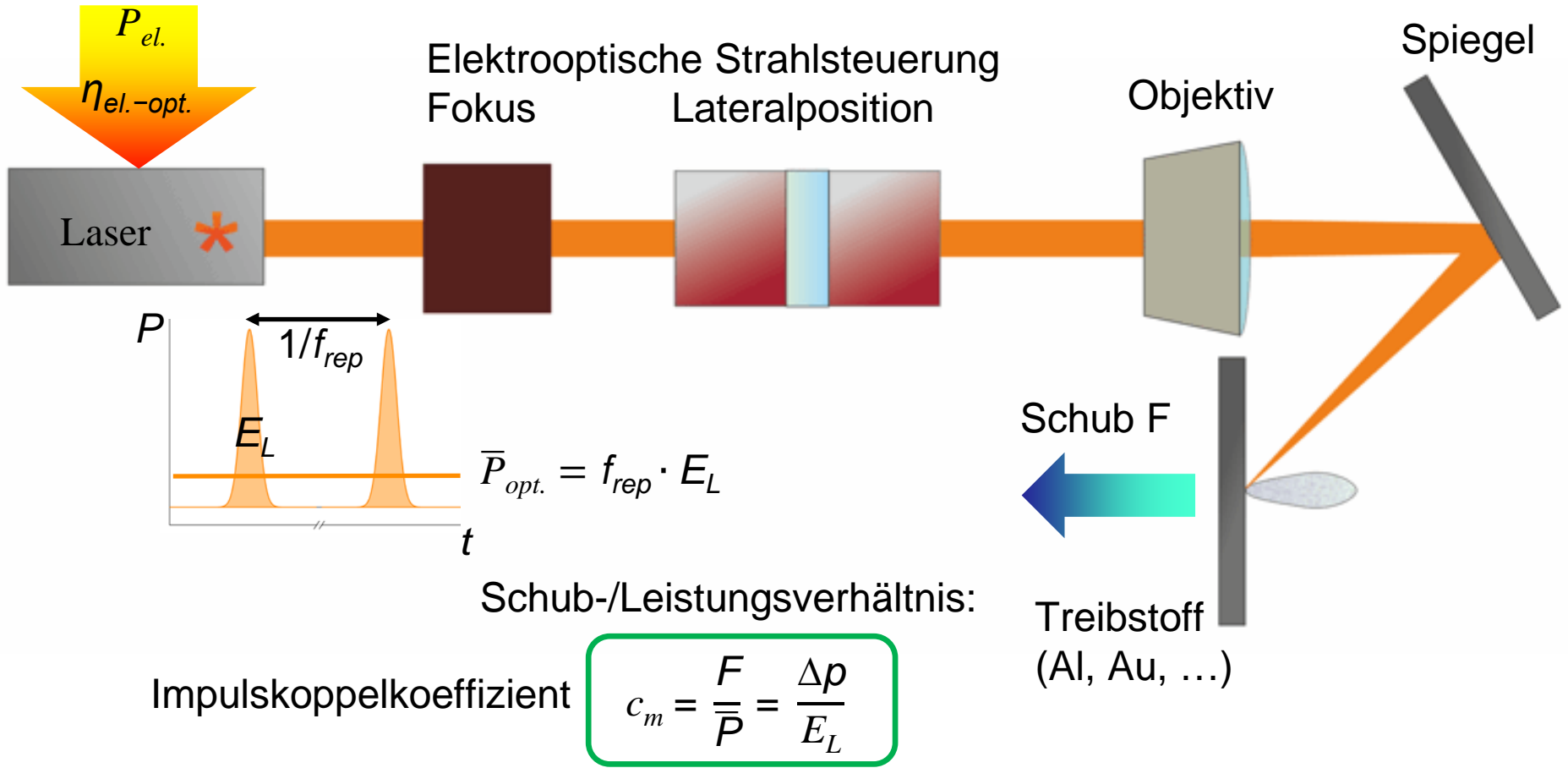


Universität
Stuttgart

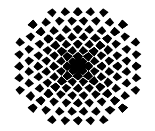
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Trägheitsfreies Antriebskonzept



Eckel et al, *Tailoring Laser Propulsion for Future Applications in Space*, High Power Laser Ablation 2010, AIP Conf. Proc. **1278**, 677-688 (2010)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

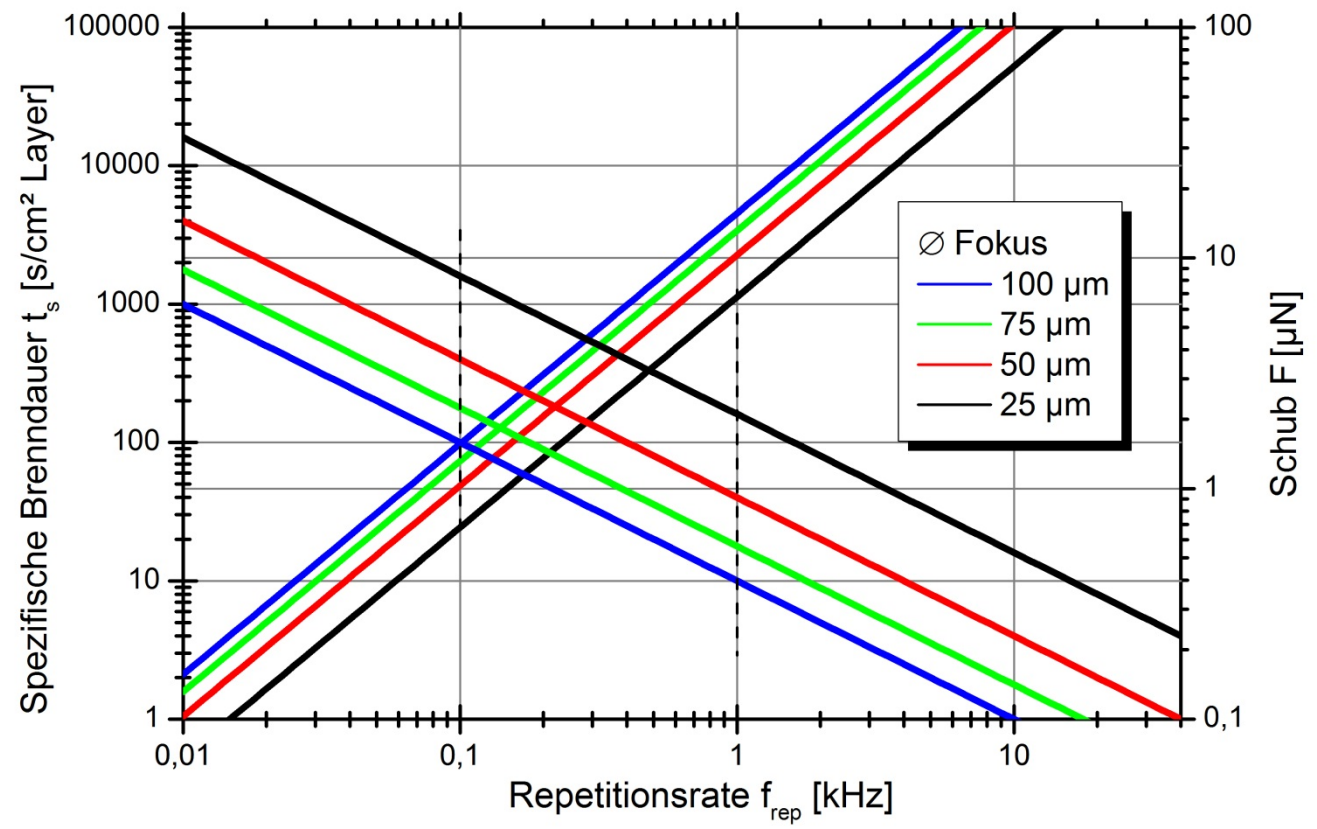


Schubcharakteristik

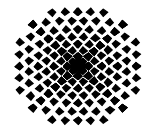


Stablaser
 $\bar{P}_{max} = 35 \text{ W}$

$\tau = 10 \text{ ns}, E_L = 0,5 \text{ mJ}$



Modellrechnung mit experimentellen Werten aus Phipps et al, Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers, J. Appl. Phys. 64(3), 1083-1096 (1988)

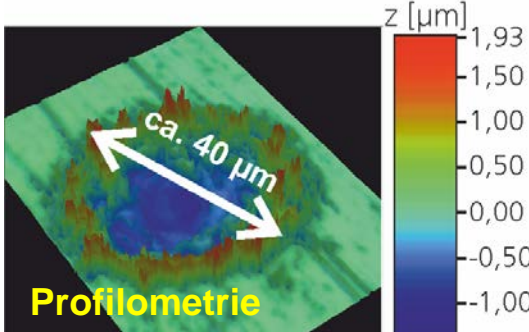


Universität
Stuttgart

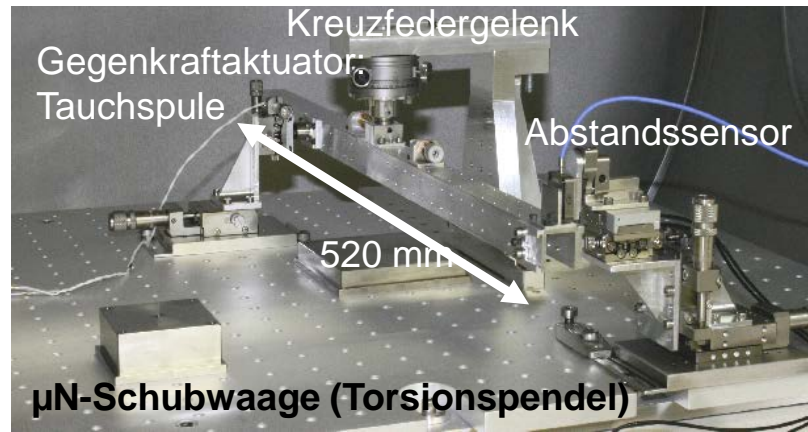
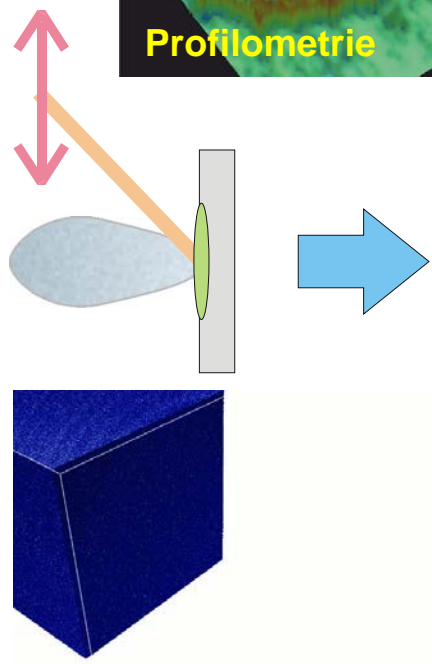
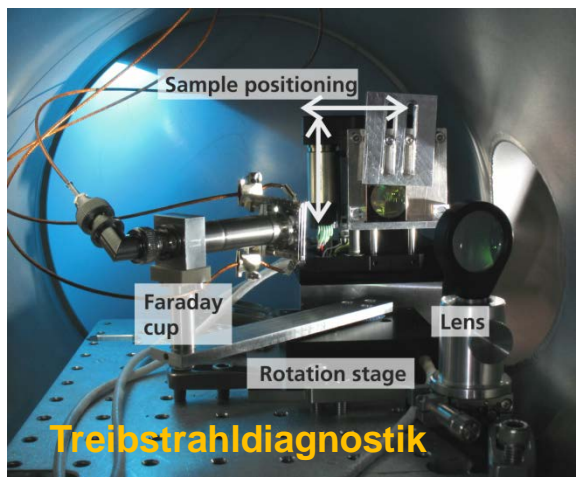
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Forschungsgebiete

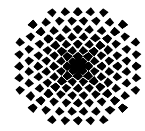


- Kenngrößen:**
- Impulsübertrag
 - Ablatierte Masse
 - Oberflächenqualität
 - Jet: Geschwindigkeitsverteilung
 - Divergenz



Ablationsprozess:
Molekulardynamik (IMD) / Hydrodynamik (Polly-2T)
Plasmajet: DSMC-PIC-Simulation (PICLas)

- Optimierungsparameter:**
- Pulsdauer, -profil
 - Wellenlänge
 - Ablationsschema
 - Material

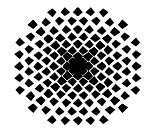
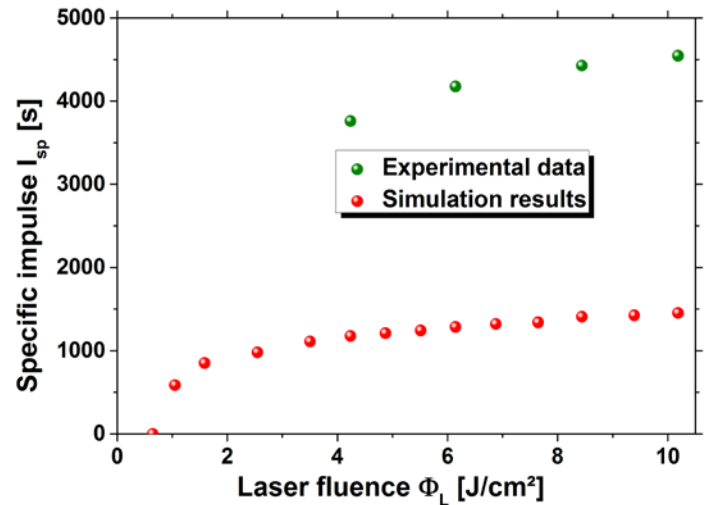
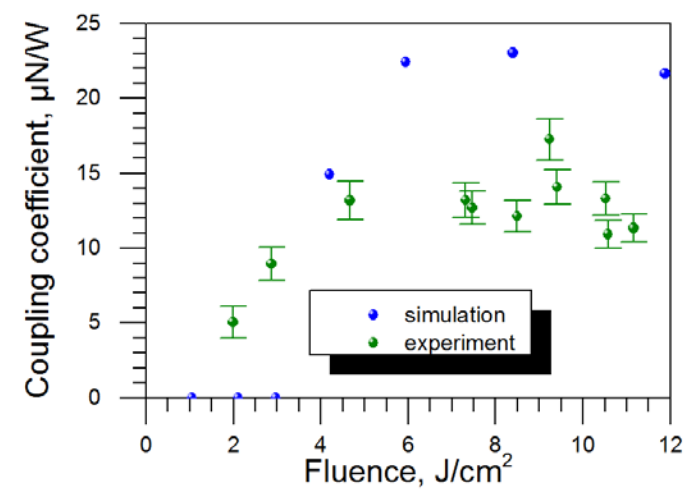
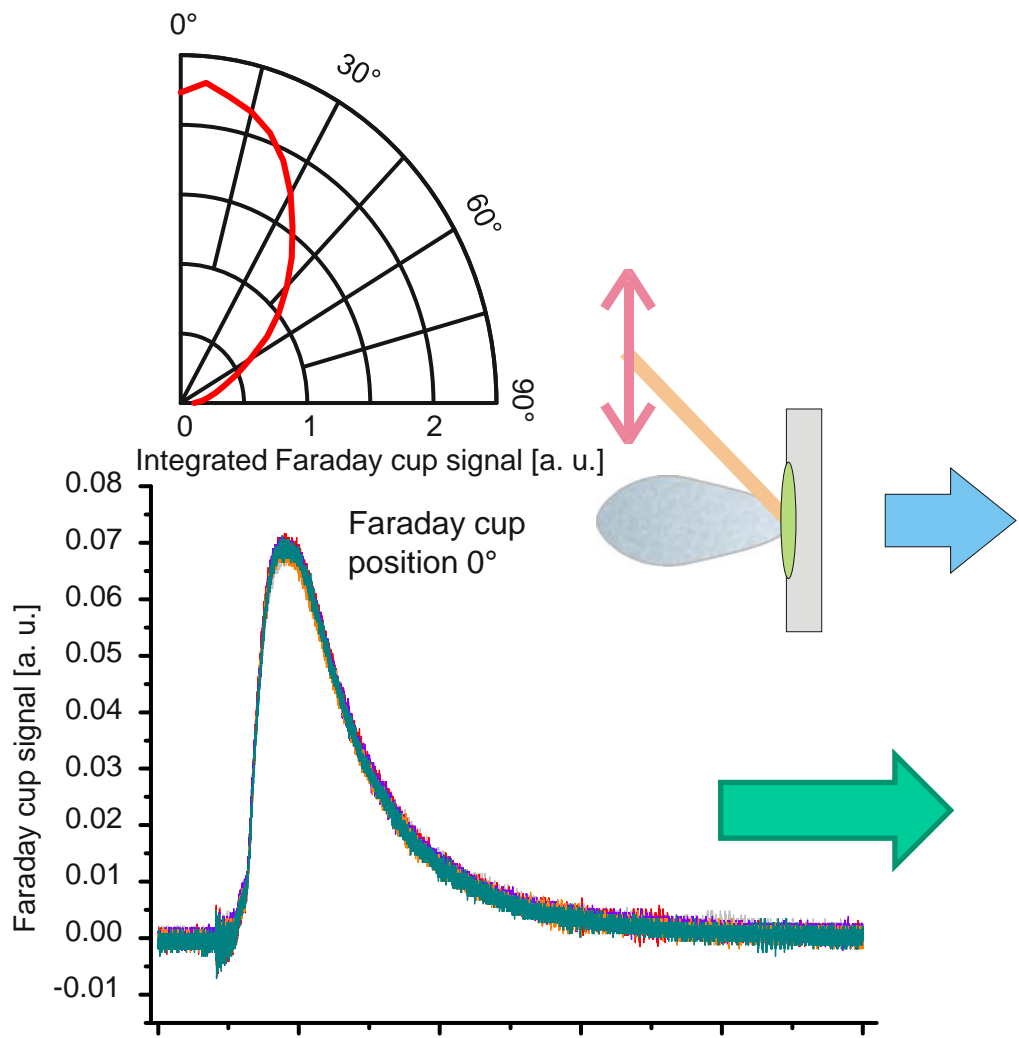


Universität
Stuttgart

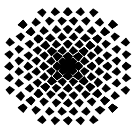
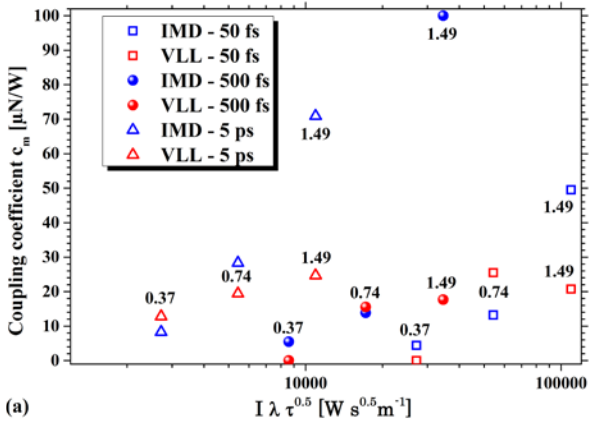
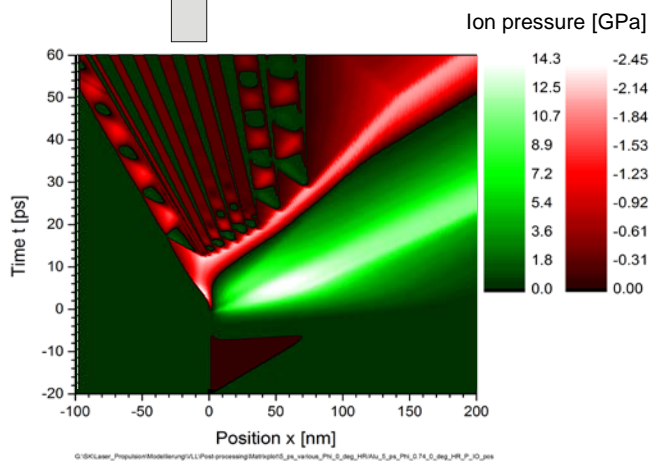
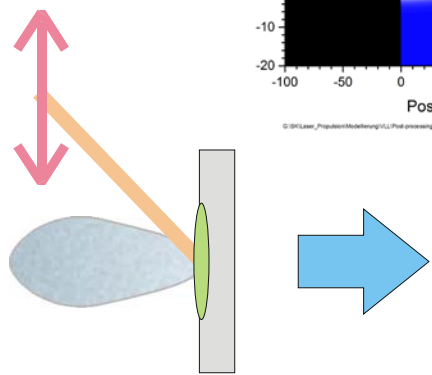
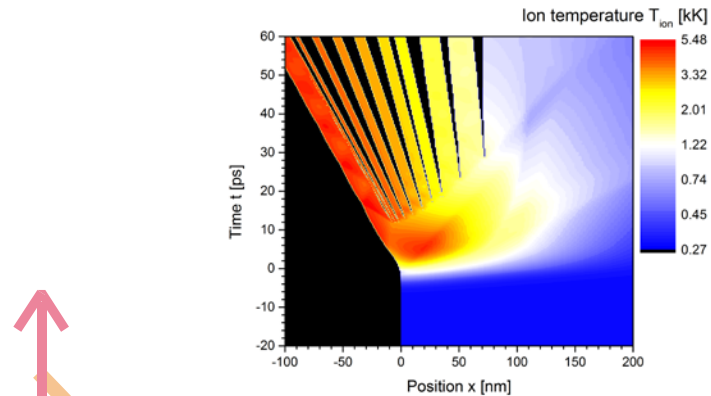
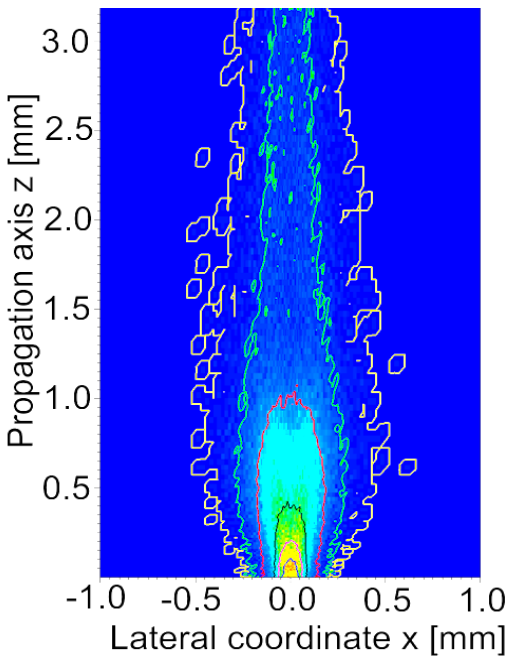
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Experimente – Ablation von Aluminium



Simulationen – Ablation von Aluminium

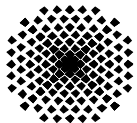
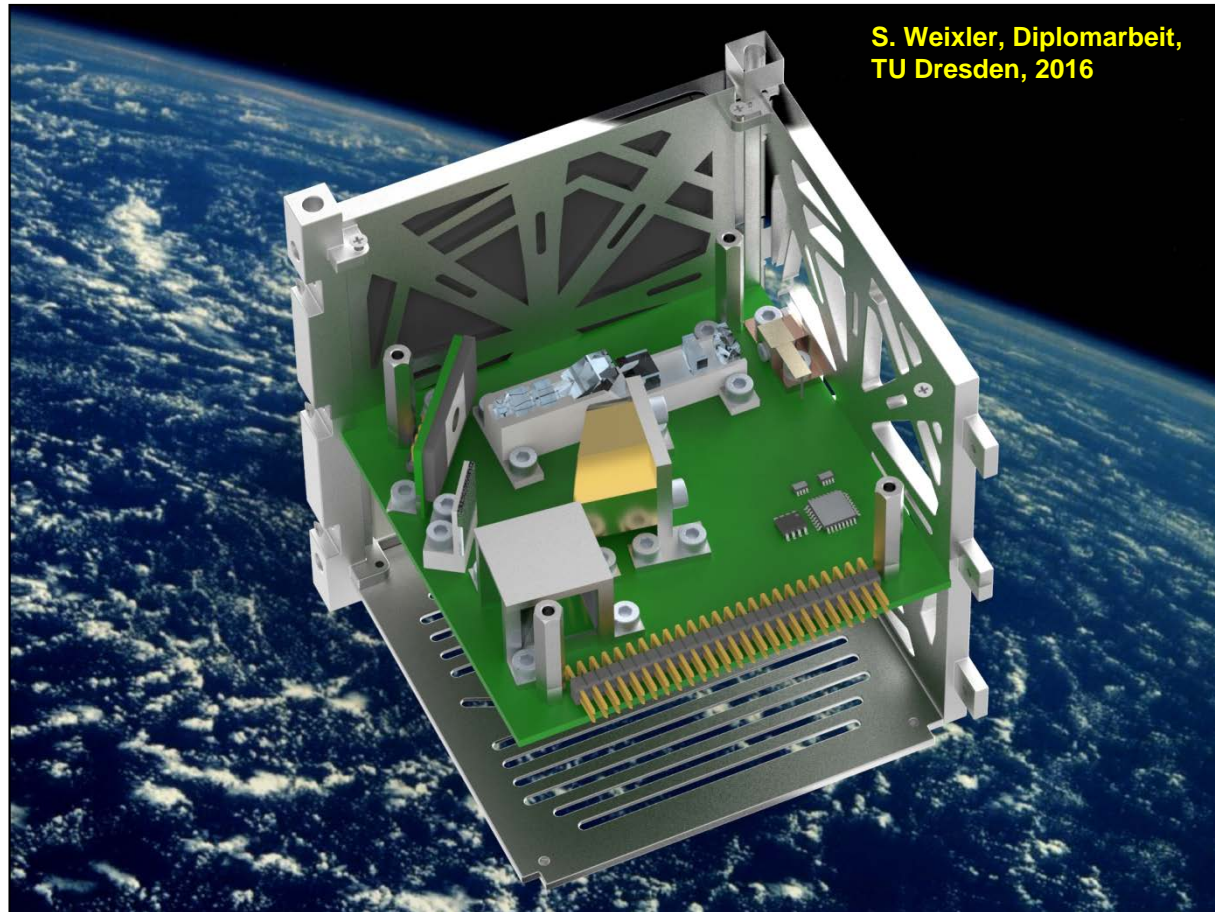


Universität
Stuttgart

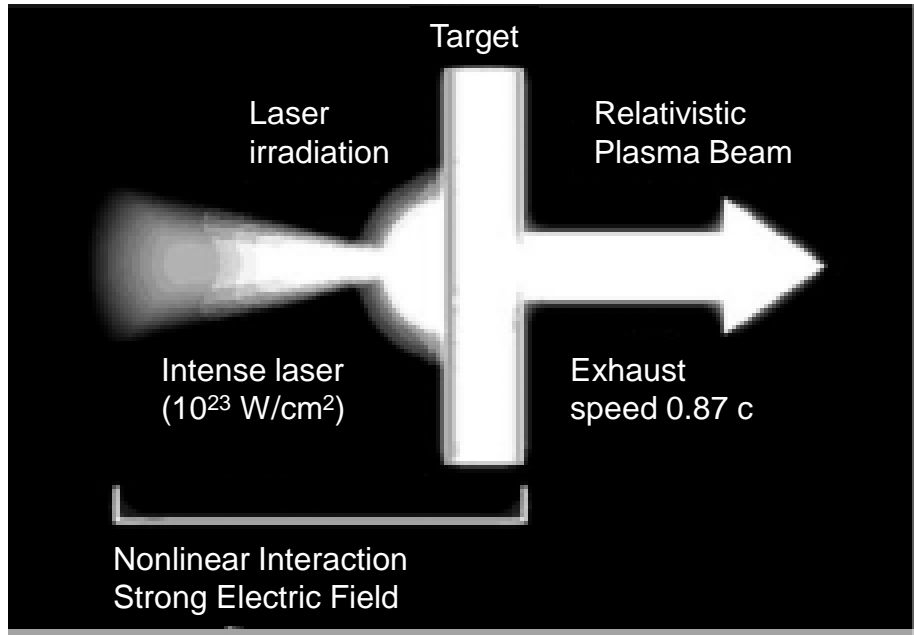
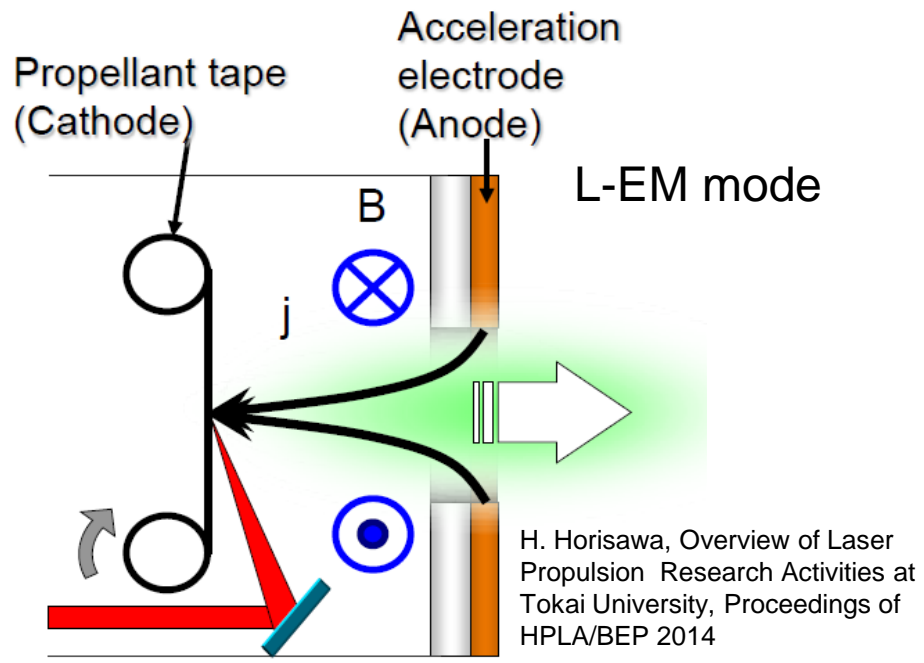
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Demonstrator-Entwicklung für Cubesat



Antriebskonzepte



elektrostatisch (L-ES mode)

+ *el. Entladung: elektrothermisch (LT mode)*

+ *große Stromstärken: elektromagnetisch durch Selbstinduktion (L-EM mode)*

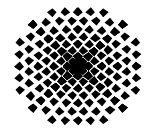
relativistisch

Pulsdauer: 10 fs ... 5 ps
Schichtdicke: ~ 100 nm

Coulomb-Explosion

- Erzeugung hochenergetischer Elektronen
- Aufbau eines elektrischen Feldes
- Expansion der Ionen in Plasmastrahl

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)

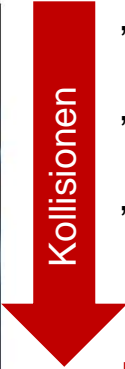


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Bedrohung durch Weltraummüll

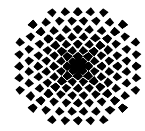


- Größenordnungen letaler Objekte:
- „Autos“ – 1%
einfaches Tracking und Ausweichen
 - „Radkappen“ – 3%, > 10 cm, < 2 kg
schwieriges Tracking und Ausweichen
 - „Granatsplitter“ – 96 %, > 1 g
derzeit kein Tracking,
kein Ausweichen möglich

Kessler- Syndrom

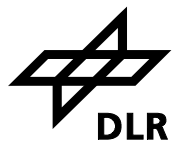


nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzepte

Weltraumgestütztes System Schall 1990

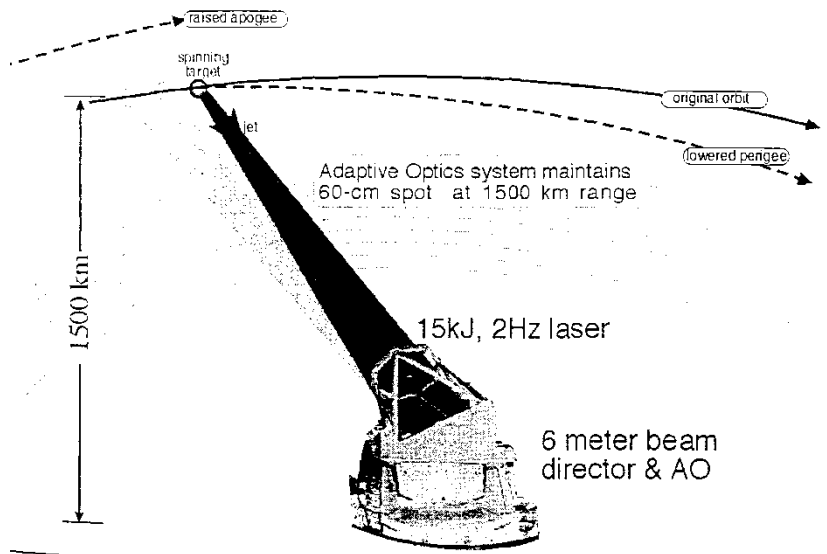
Laser: 30 ... 100 kW, 100 Hz
Range: < 100 km



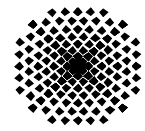
nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

Erdgestütztes System (Orion) Phipps et al. 1996

Laser: 15 kJ, 2 Hz
Range: 1500 km



EU-Projekt 2011 – 2014 (F, D, E, P)
<http://www.clean-space.eu/>



Universität
Stuttgart

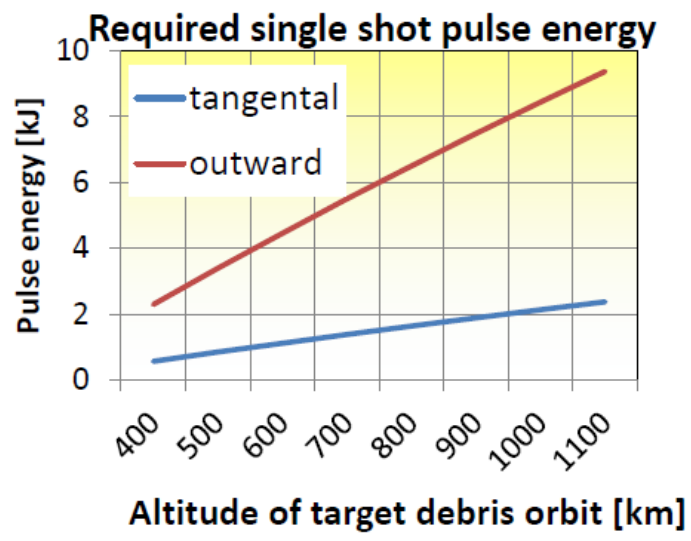
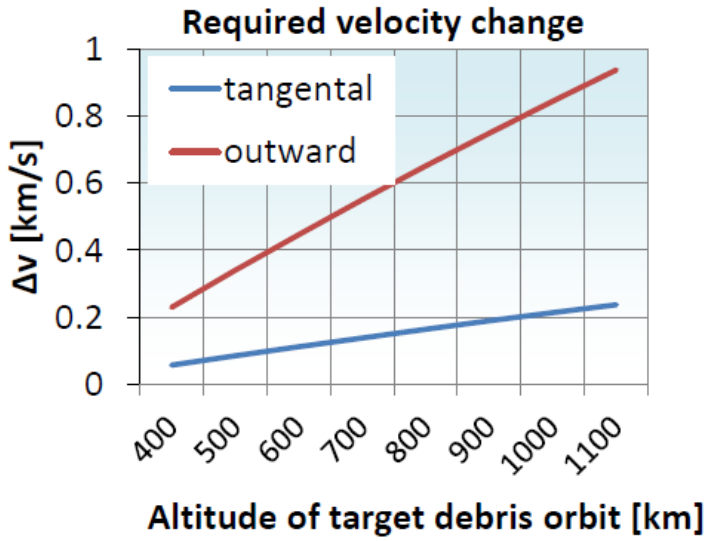
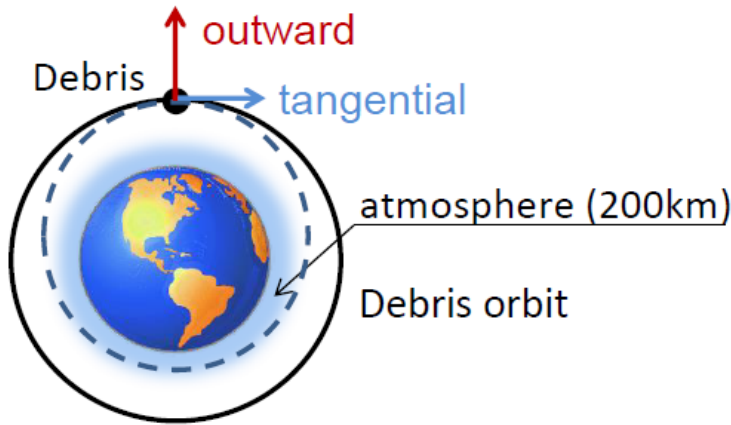
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



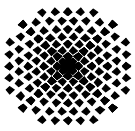
Weltraumgestützte Beseitigung

Conditions:

- Debris' mass 1 g
- Momentum coupling coefficient $C_m=10[\text{dyn/W}]=100\text{N/MW}$
- atmospheric re-entry begins at the altitude of 200 km



K. Kawakami, Phase Conjugate Light Generation for Space Debris Removal, Proceedings of HPLA/BEP 2014



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



CLEANSPACE – Detection, Ranging & Tracking

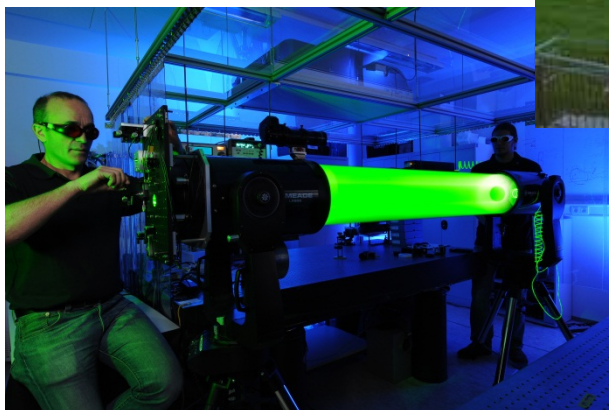
- ▶ Detektion von Weltraummüll mit $\varnothing \geq 1 \text{ cm}$
- ▶ Tracking-Genauigkeiten $\leq 100 \text{ nrad}$
- ▶ Adaptive Optik zu Turbulenzkompensation
- ▶ Laser-ranging (Time-of-flight)



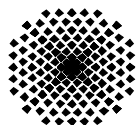
Spur eines Debris-Objekts



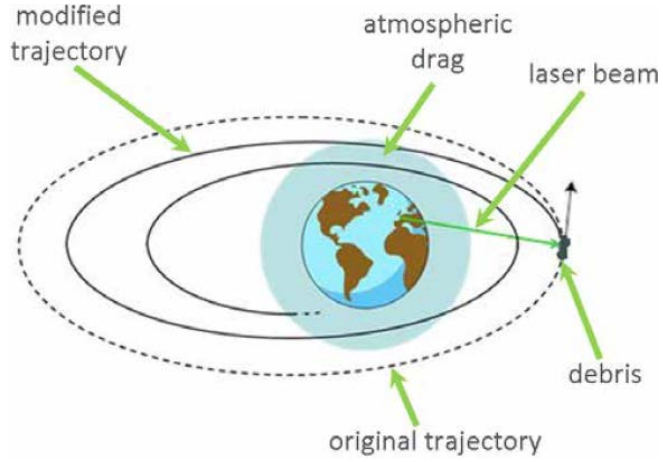
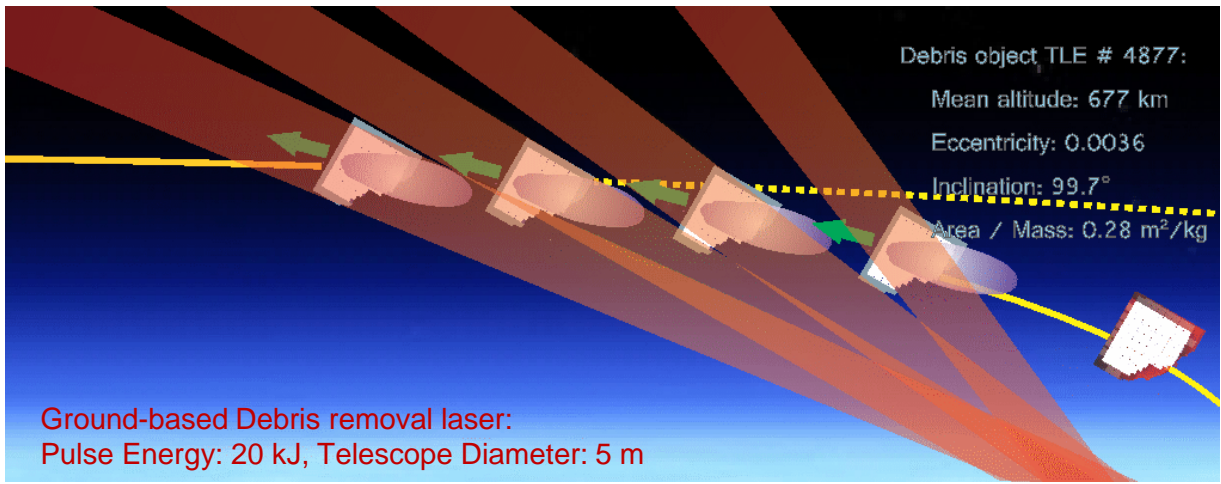
Beobachtungsstation
Uhlandshöhe, Stuttgart



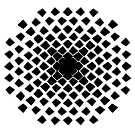
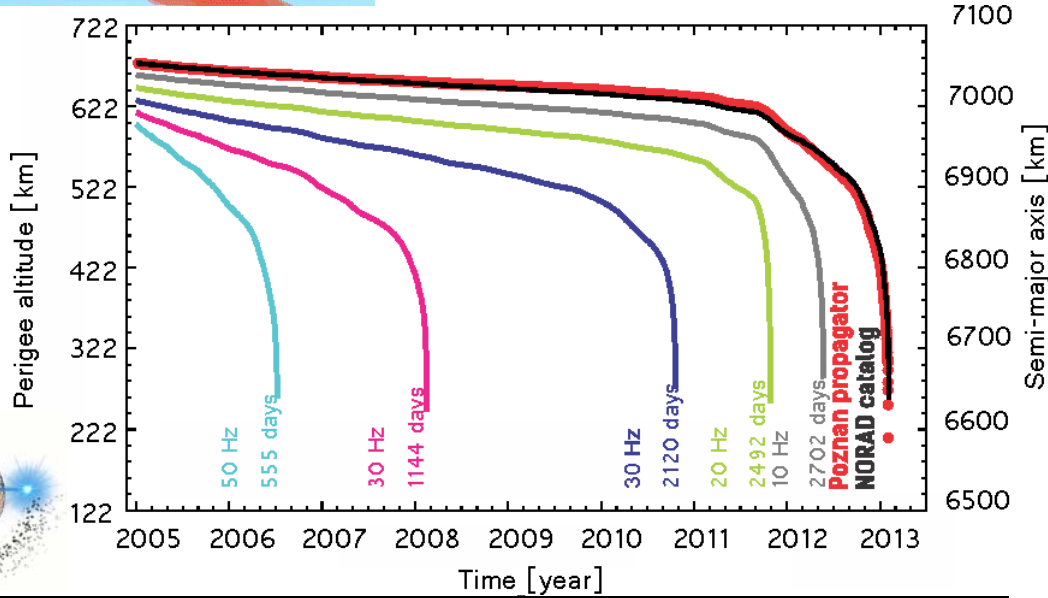
Laborexperiment



CLEANSPACE – Beseitigung von Debris



- ▶ Spotgröße am Target: \varnothing 0,5 m
- ▶ Laserpuls $E_L \leq 15 \text{ kJ} \rightarrow \Phi \geq 7,5 \text{ J/cm}^2$
- ▶ Rep.-rate $f_{rep} > 10 \text{ Hz} \rightarrow \bar{P} > 150 \text{ kW}$
- ▶ Wellenlänge: $\lambda = 1,0 \dots 1,1 \mu\text{m}$



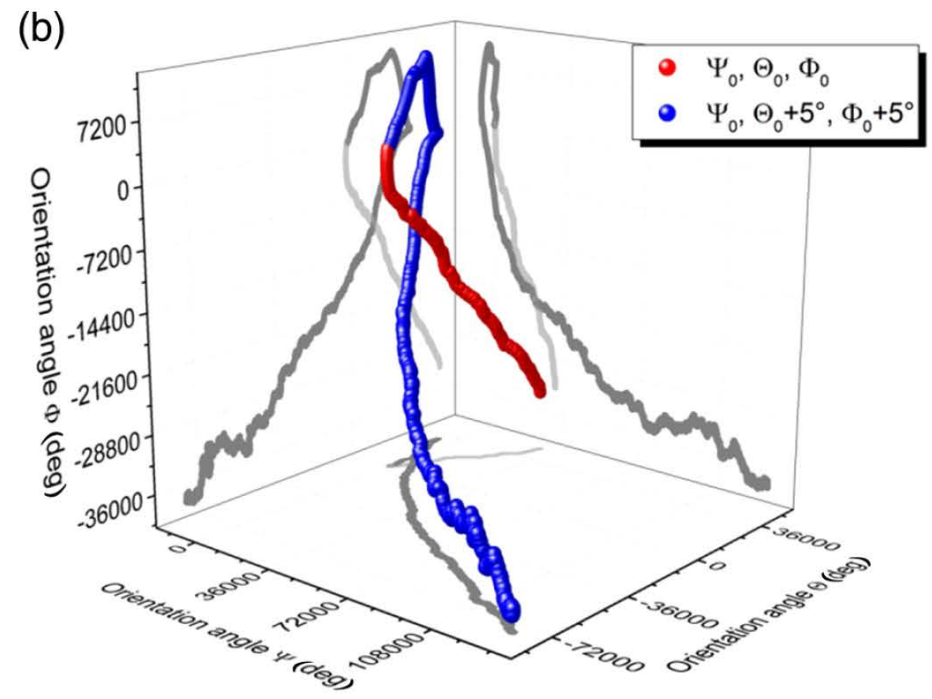
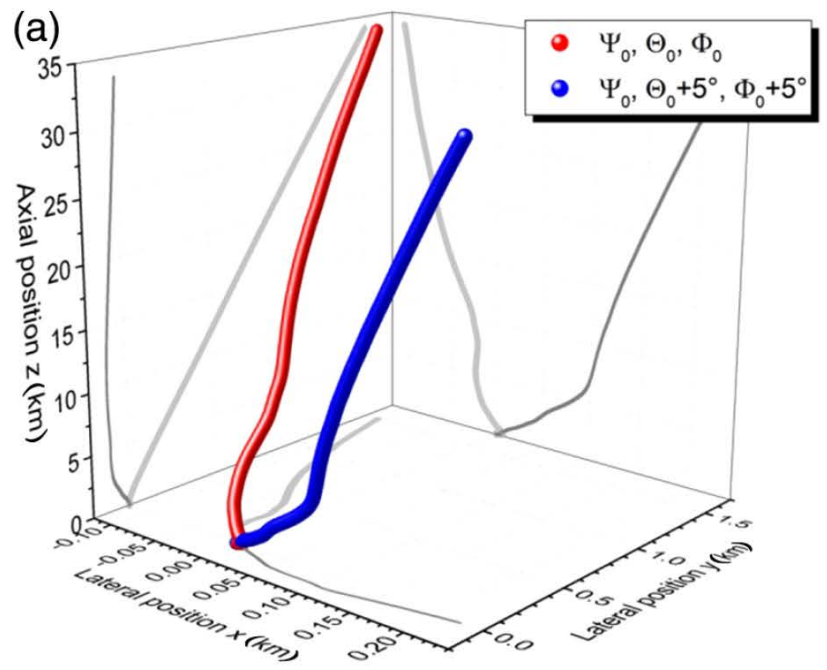
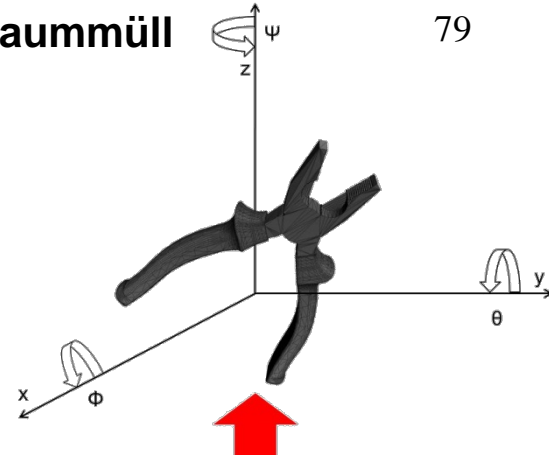
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

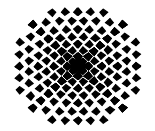


Impulserzeugung

- ▶ Richtung des Lateralimpulses nicht vorhersagbar
- ▶ starke Abhängigkeit von Orientierung im Raum
- ▶ Synchronisierung mit Lichtkurve sinnvoll



Stefan Scharring, Jascha Wilken, Hans-Albert Eckel, "Laser-based removal of irregularly shaped space debris," Opt. Eng. 56(1), 011007 (2017), doi: 10.1117/1.OE.56.1.011007 (open access)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

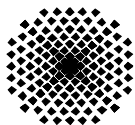
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

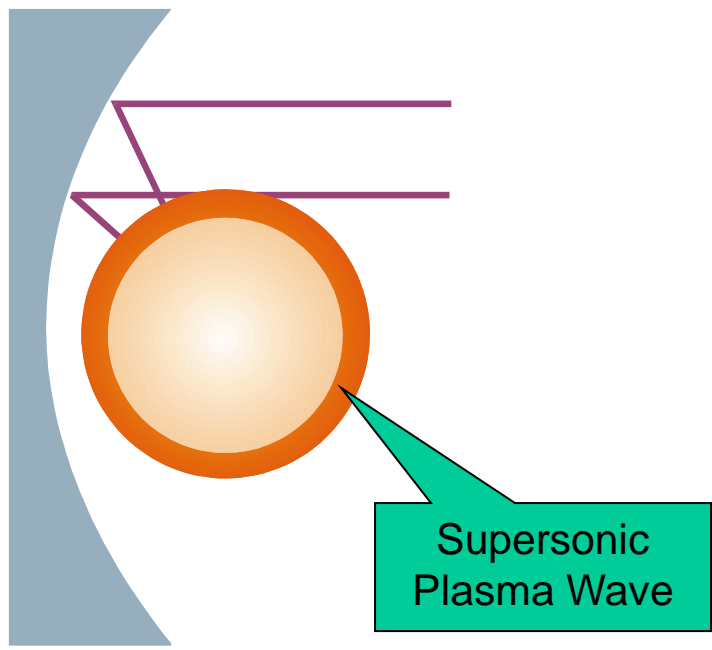
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > **3.3 Laser Lightcraft**
 - > 3.3.1 Detonationsprozesse
 - > 3.3.2 Lightcraft Technology Demonstrator
 - > 3.3.3 Parabolisches Lightcraft (DLR)
 - > 3.3.4 Russland - ASLPE
 - > 3.3.5 Earth-based LEO launch

4 Zusammenfassung



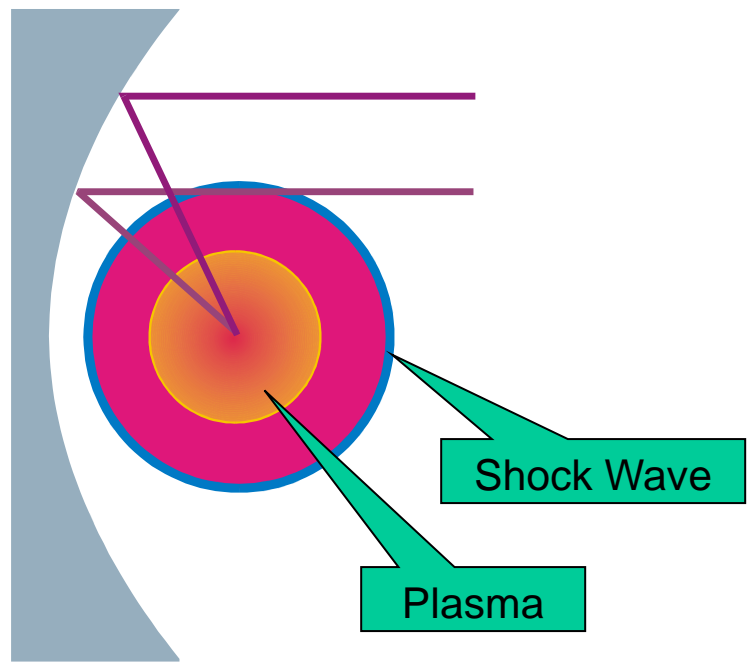
Lasergestützte Absorptionswellen



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \rightarrow \omega_{Laser}$$

Laser Supported Detonation Wave (LSD)

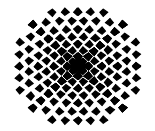
$$I > 10^7 \text{ W/cm}^2$$



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \ll \omega_{Laser}$$

Laser Supported Combustion Wave (LSC)

$$I < 10^7 \text{ W/cm}^2$$



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Detonation ablativer Treibstoffe

Interne Effizienz für reine Ablation (s.o.):

$$\eta_{int} = \frac{1}{2} c_m \cdot v_{jet} = \alpha \beta$$

β Absorptionseffizienz
 α Expansionseffizienz

Interne Effizienz für exotherme Reaktionen:

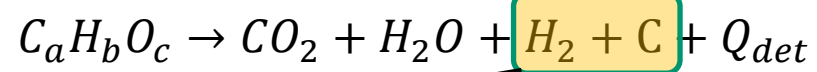
$$\eta_{int} = \alpha(\beta + mQ/E_L)$$

Q Spezifische Reaktionswärme
 E_L Laserpulsenergie

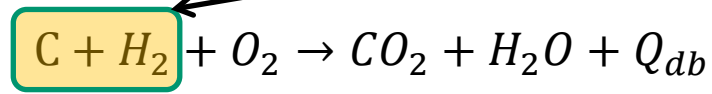
mit $Q = Q_{det} + N_{db} Q_{db}$

Beispiel: CHO-Polymere

Q_{det} Spezifische Detonationsenergie



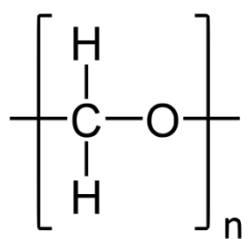
Q_{db} Spez. Energie für verzögerte Verbrennung



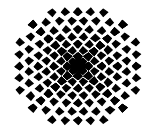
Bsp: Polyoxymethylen (Delrin, POM)

$$Q_{det} = 2,69 J/mg$$

$$Q_{db} = 16,1 J/mg$$



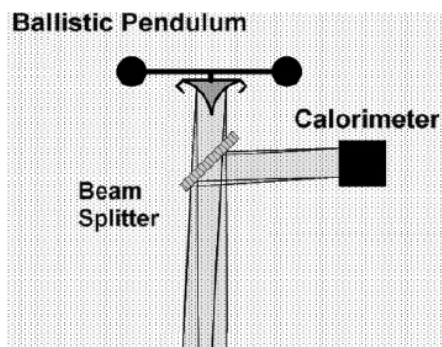
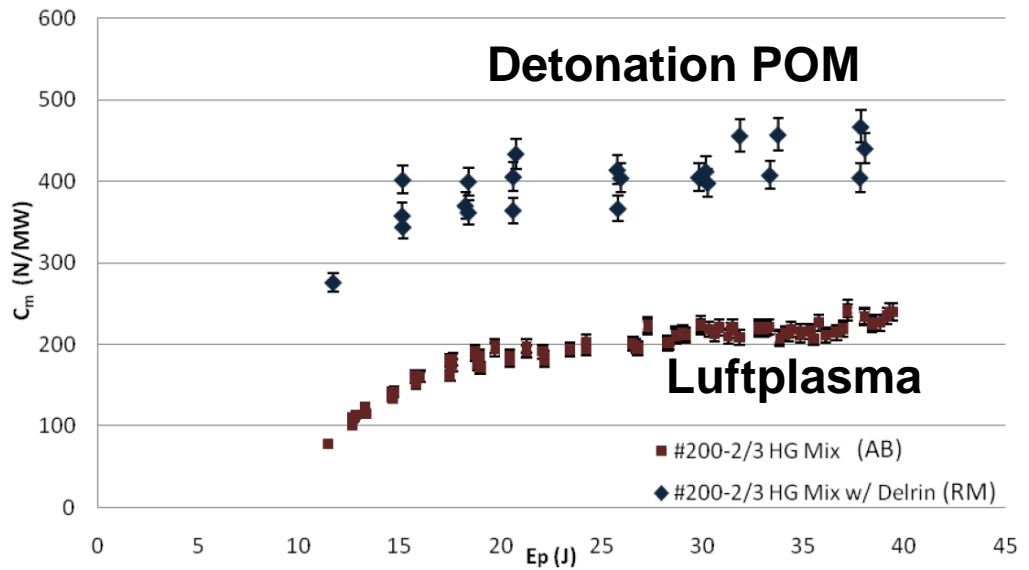
A.A. Ageichik et al, Detonation of CHO Working Substances in a Laser Jet Engine, Technical Physics **54(3)**, 402 – 409 (2009)



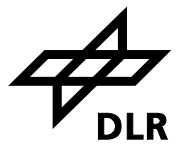
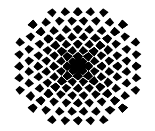
Pendelexperiment



Physikalisches Pendel



D.A. Kenoyer et al, Axial Impulse Generation of Lightcraft Engines with ~ 1 μs Pulsed TEA CO₂ Laser, AIP Conf. Proc. **1402**, 82 – 92 (2011)

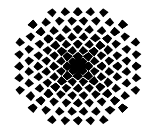


Weltrekordflug



$m = 50,6 \text{ g}$
 $\bar{P}_{opt} = 10 \text{ kW}$
 $f_{spin} = 10000 \text{ upm}$
 $z_{max} = 71 \text{ m}$

L.N. Myrabo, World Record Flights of Beam-Riding Rocket Lightcraft: Demonstration of „Disruptive Propulsion Technology, AIAA Paper 2001-3798



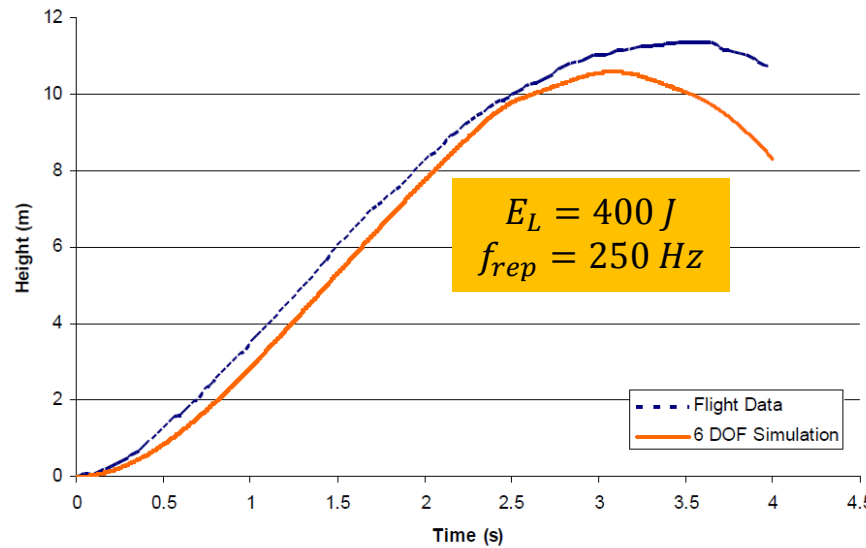
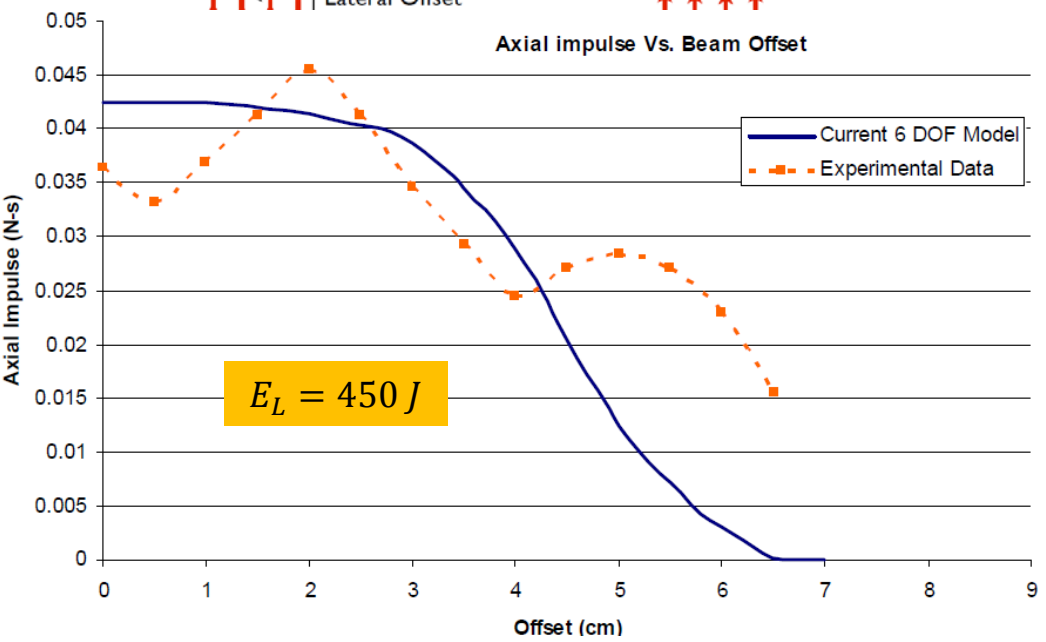
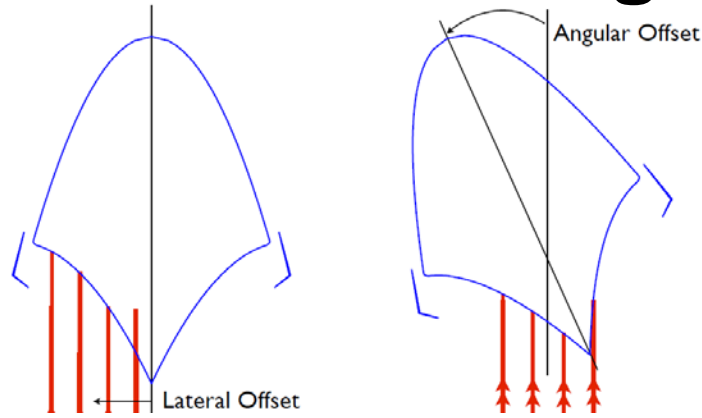
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Flugbahnanalyse

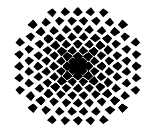
M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014



Simulationsrechnung mit aerodyn. Kräften

D.A. Kenoyer et al, Validation and Calibraton of a 6-DOF Laser Propelled Lightcraft Flight Dynamics Model vs. Experimental Data, AIP Conf. Proc. **997**, 325 – 337 (2008)

Pendelexperiment mit Lateralversatz

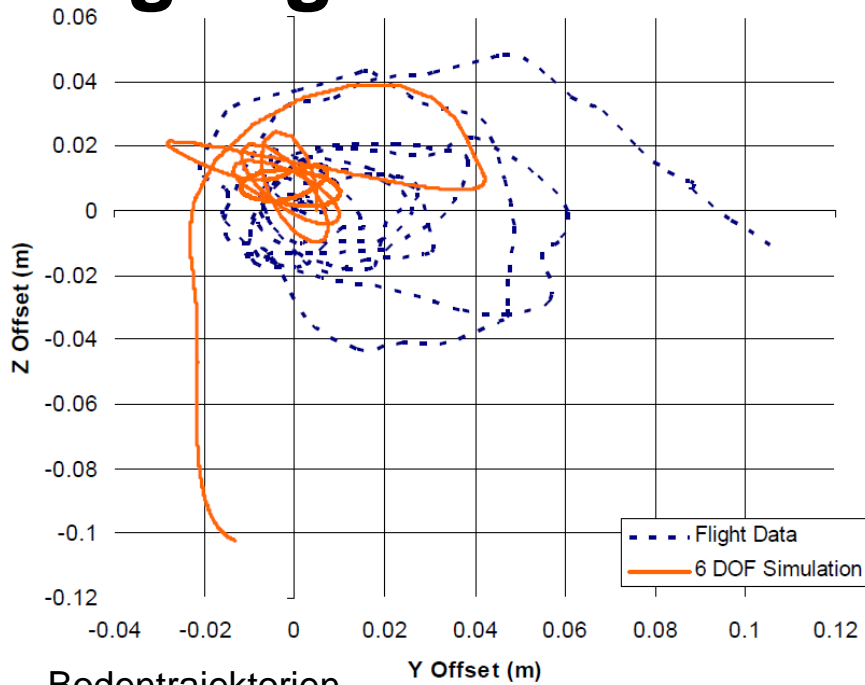
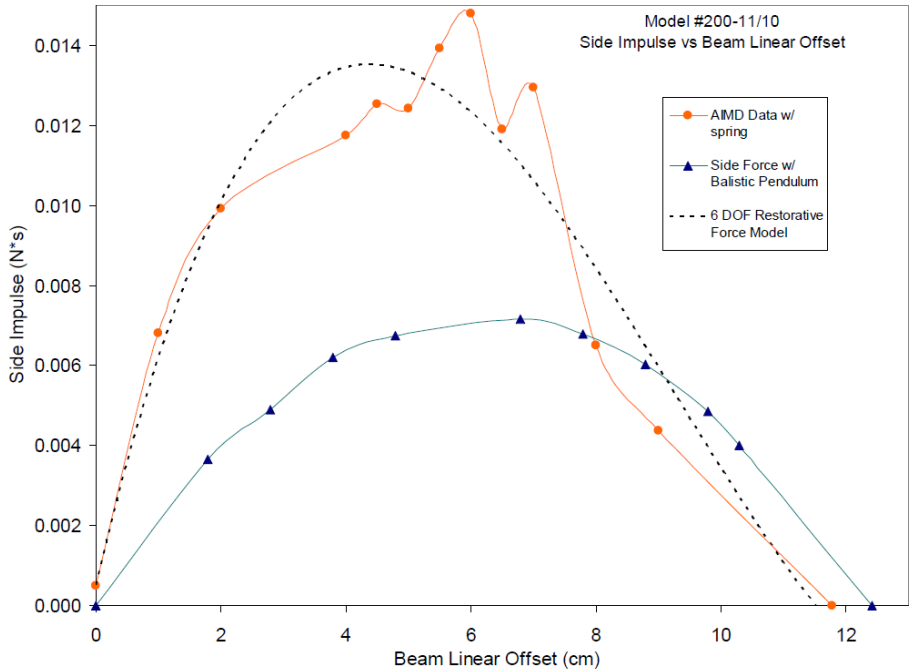


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

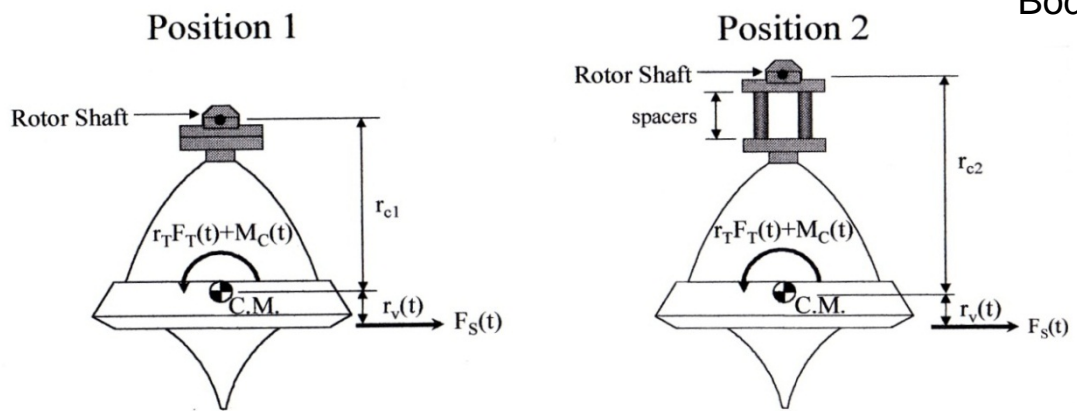


Lateralbewegung



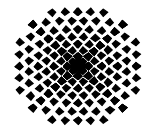
Bodentrajektorien

D.A. Kenoyer et al, ebd.



Angular Impulse Measurement Device (AIMD):

- Drehimpuls auf Rotor bei verschiedenen Trägheitsmomenten
- Drehimpuls, Lateralimpuls auf Lightcraft

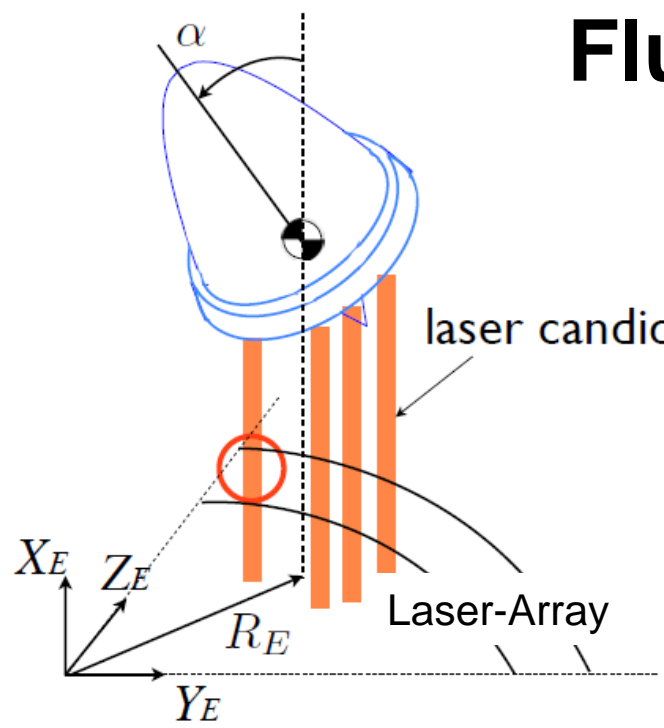


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

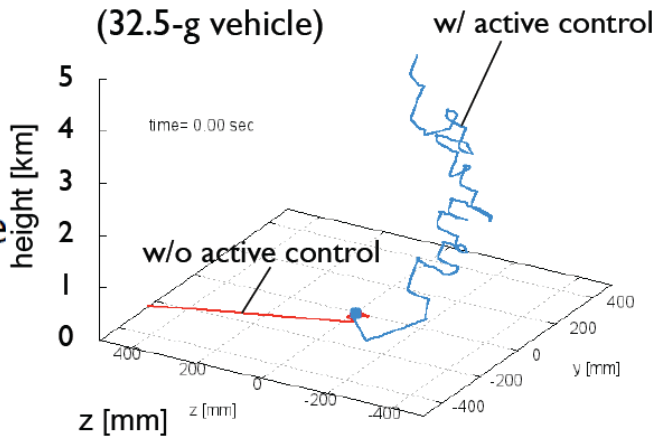


Flugstabilisierung

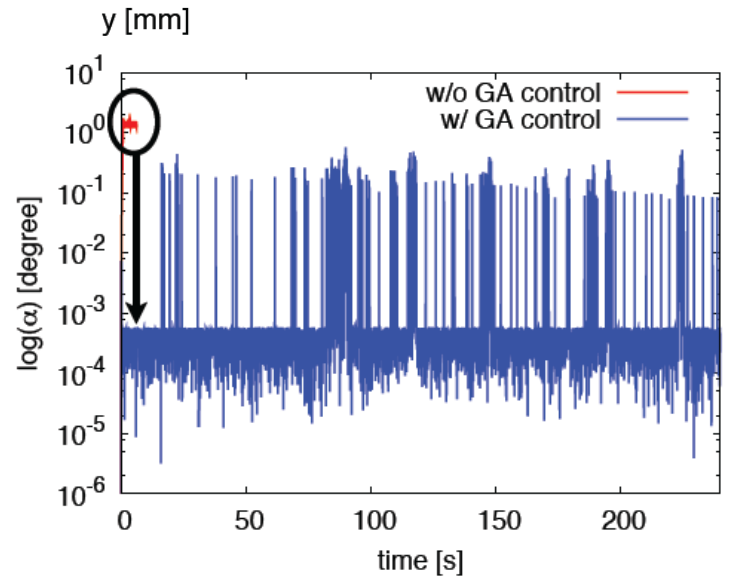


```

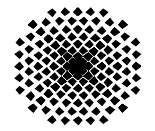
    graph TD
      A[candidates of laser incidence] --> B[solve 6-DOF EOM]
      B --> C[select optimal laser incidence]
    
```



M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014



α : angular offset

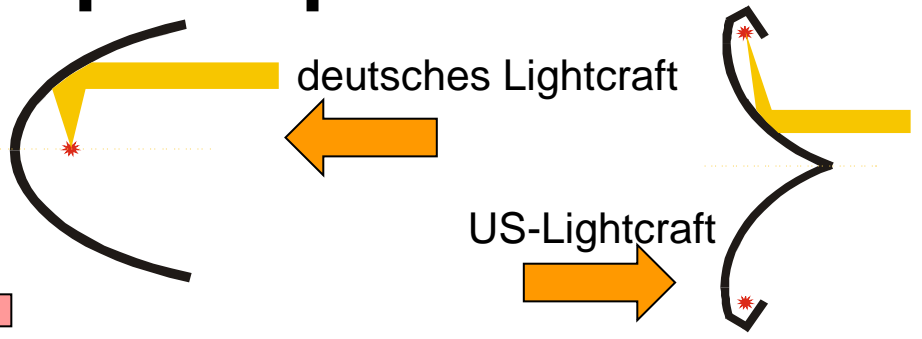
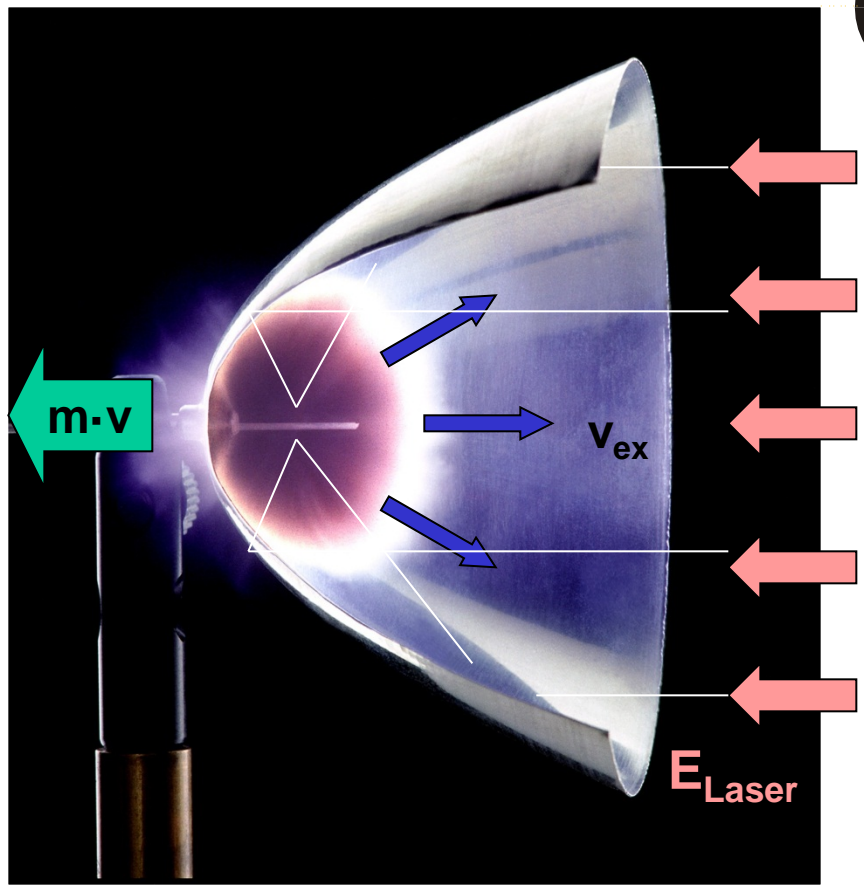


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



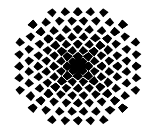
Funktionsprinzip



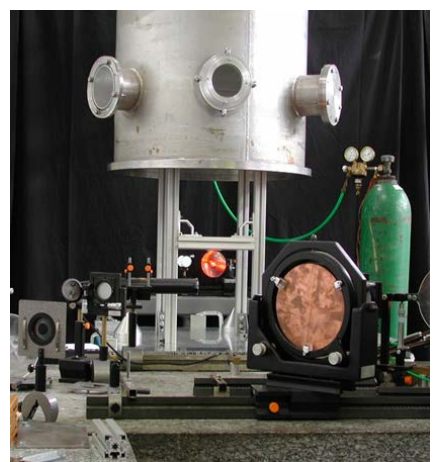
Laserpulsenergie $E_L = 20 \dots 200 \text{ J}$
 Pulsdauer $\sim 8 \dots 12 \mu\text{s}$

- ⇒ Fokusintensität $> 10^7 \text{ W/cm}^2$
- ⇒ Plasmazündung
- ⇒ Schnell expandierendes Plasma
- ⇒ Impulsübertrag durch Druckanstieg und ausströmende Materie (Treibstoff/Luft)

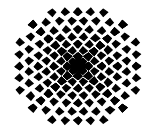
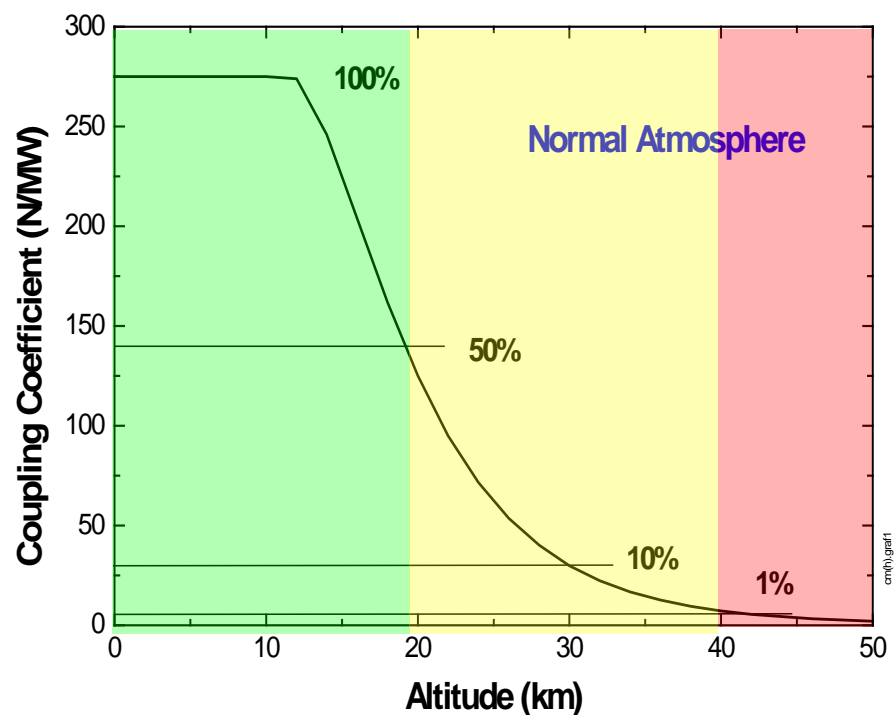
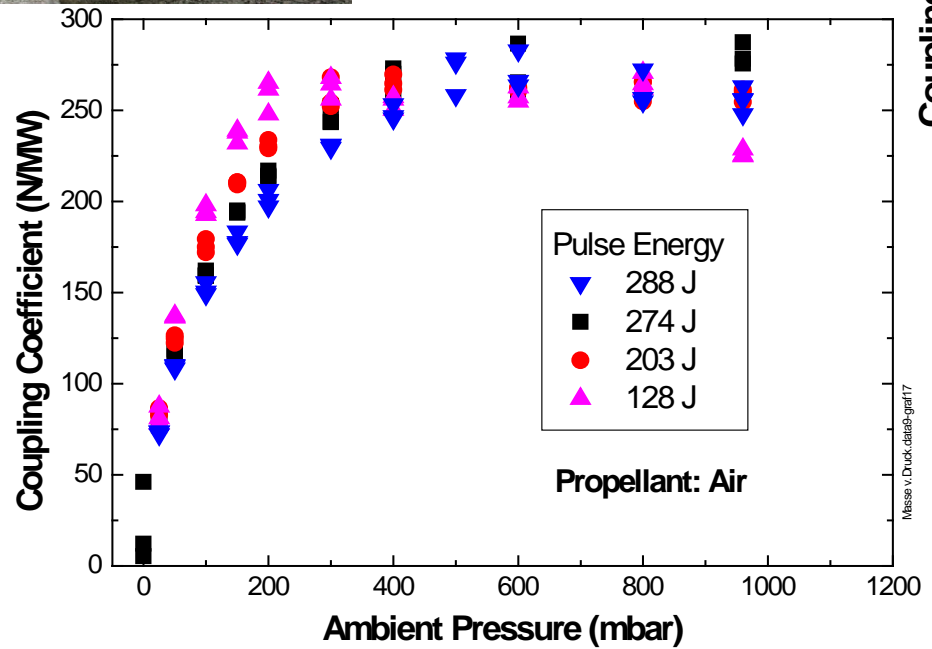
Air Plasma



Höhensimulation – ohne Treibstoff



Ballistisches Pendel im Vakuumtank

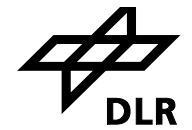
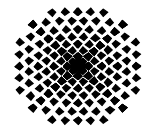
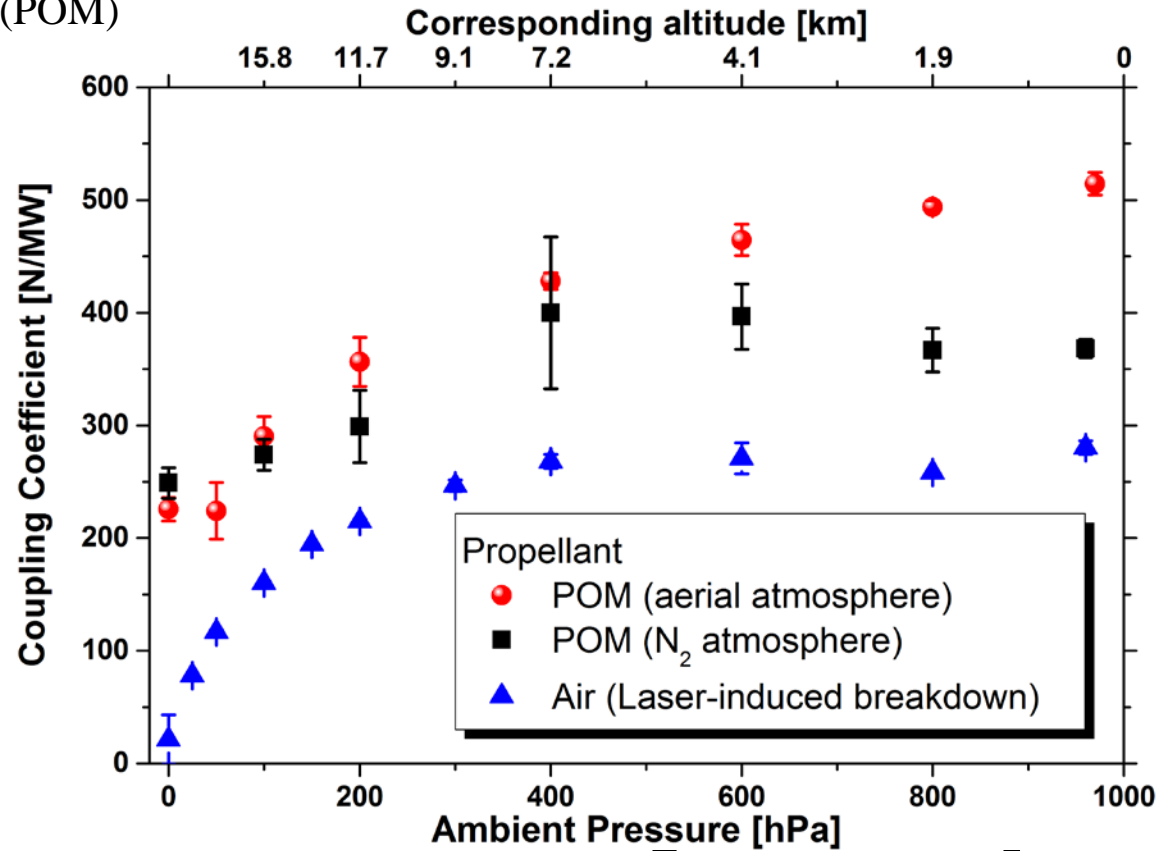
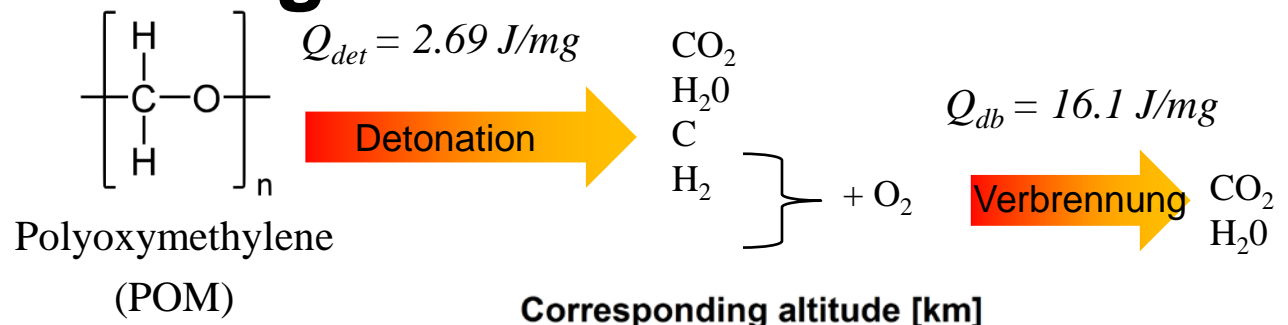
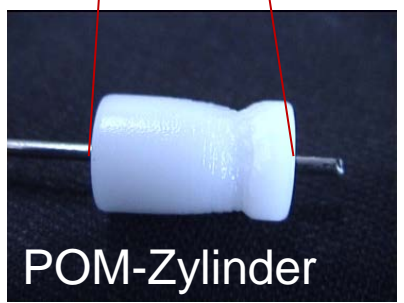
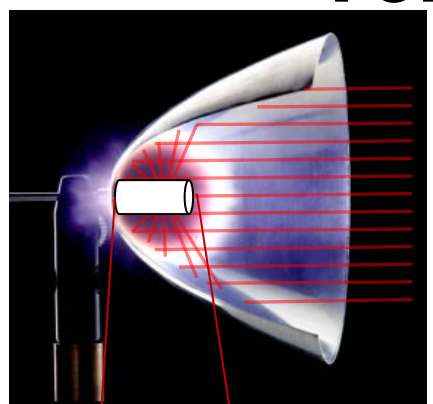


Universität Stuttgart

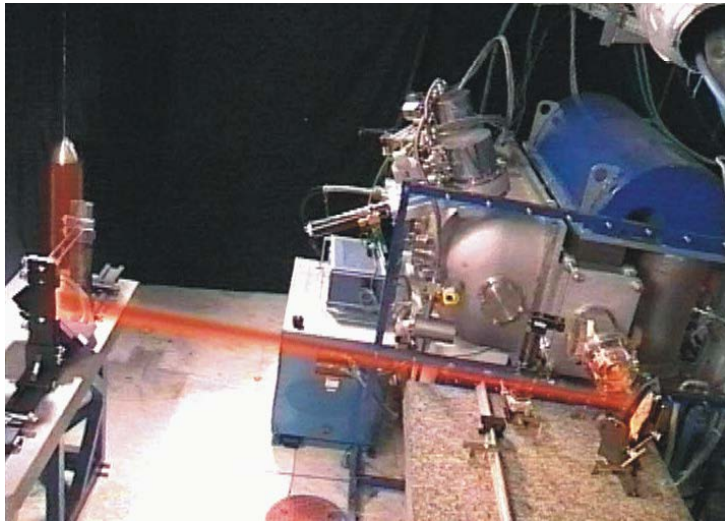
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



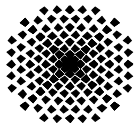
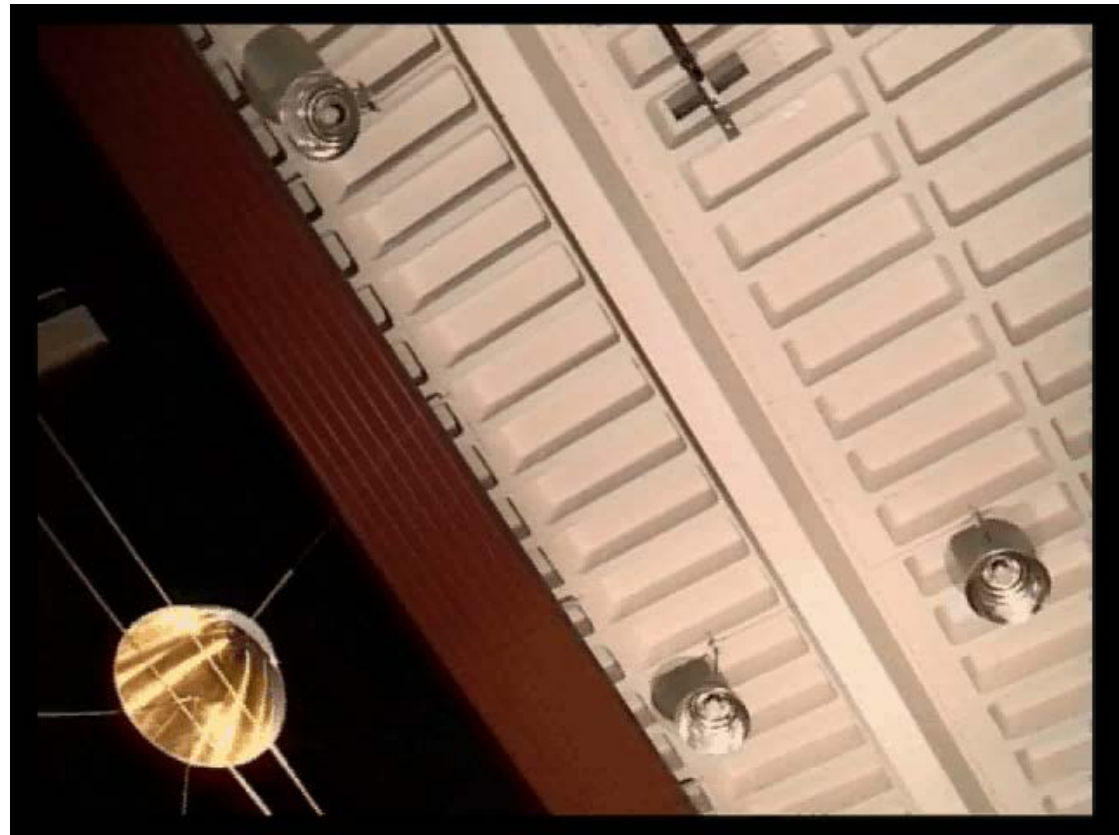
Verwendung von Treibstoff



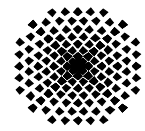
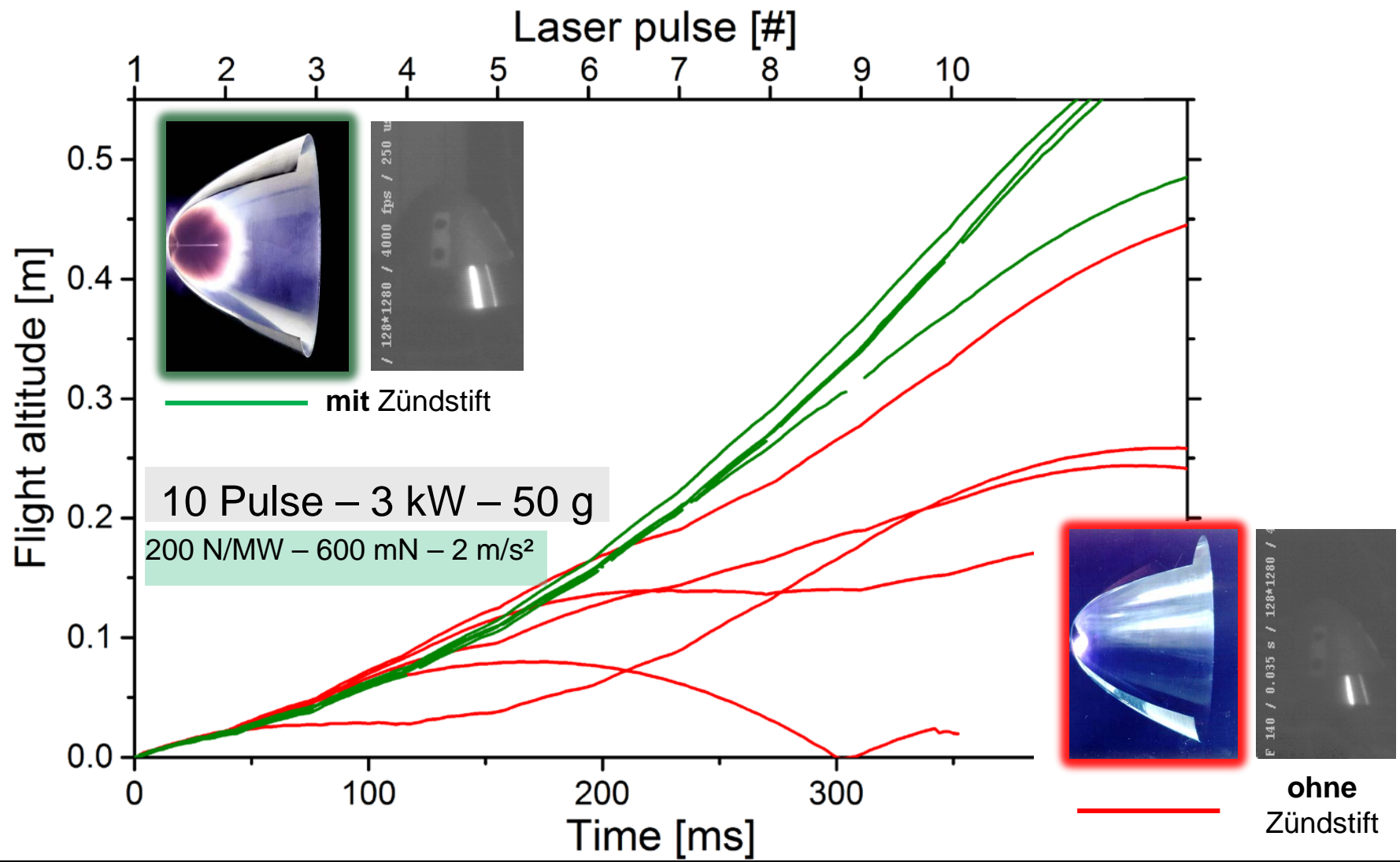
Drahtgeführte Flugexperimente



- Flughöhe 6 m
- 8 Pulse, 80 J, 15 Hz
- Beschleunigung $\sim 1g$
- $m = 22 \dots 55 \text{ g}$
- Schub $T = 1,05 \text{ N}$
- Ohne Treibstoff
- drahtgeführt



Freiflugexperimente ohne Spin

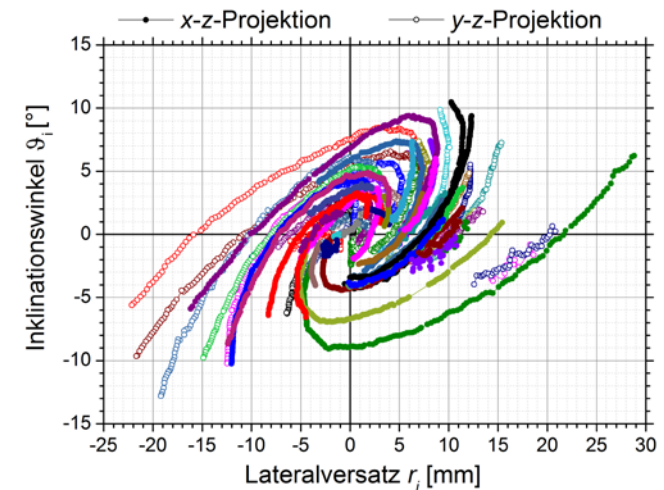
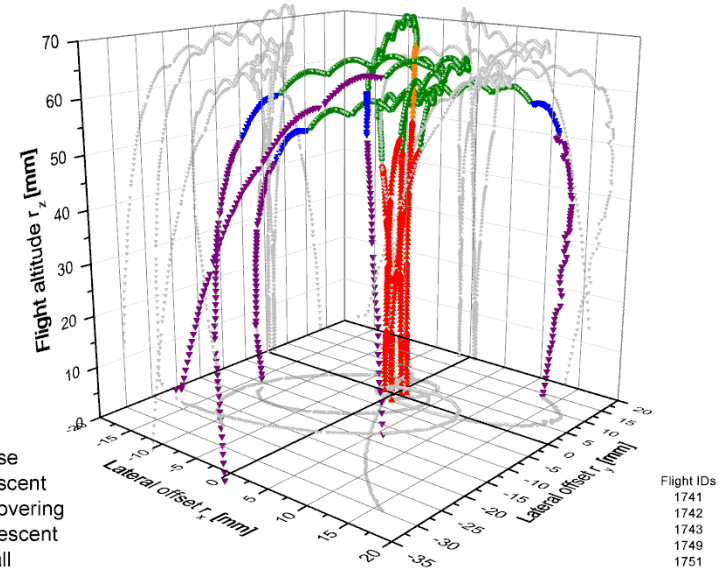
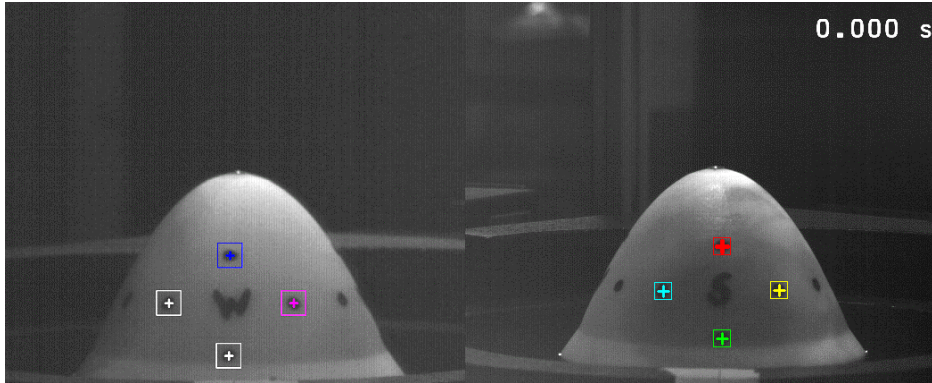


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



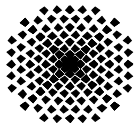
Trajektorienanalyse



- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (500 Bilder/s) aus 2 Perspektiven (45°-Spiegel)
- Rekonstruktion von Trajektorie und räumlicher Orientierung
- Bestimmung der Impulskomponenten

S. Scharring et al, Beam-Riding Analysis of a Parabolic Laser-thermal Thruster, AIP Conf. Proc. **1402**, 115 – 131 (2011)

S. Scharring, Dissertation, Universität Stuttgart (2013)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Aerospace Laser Propulsion Engine

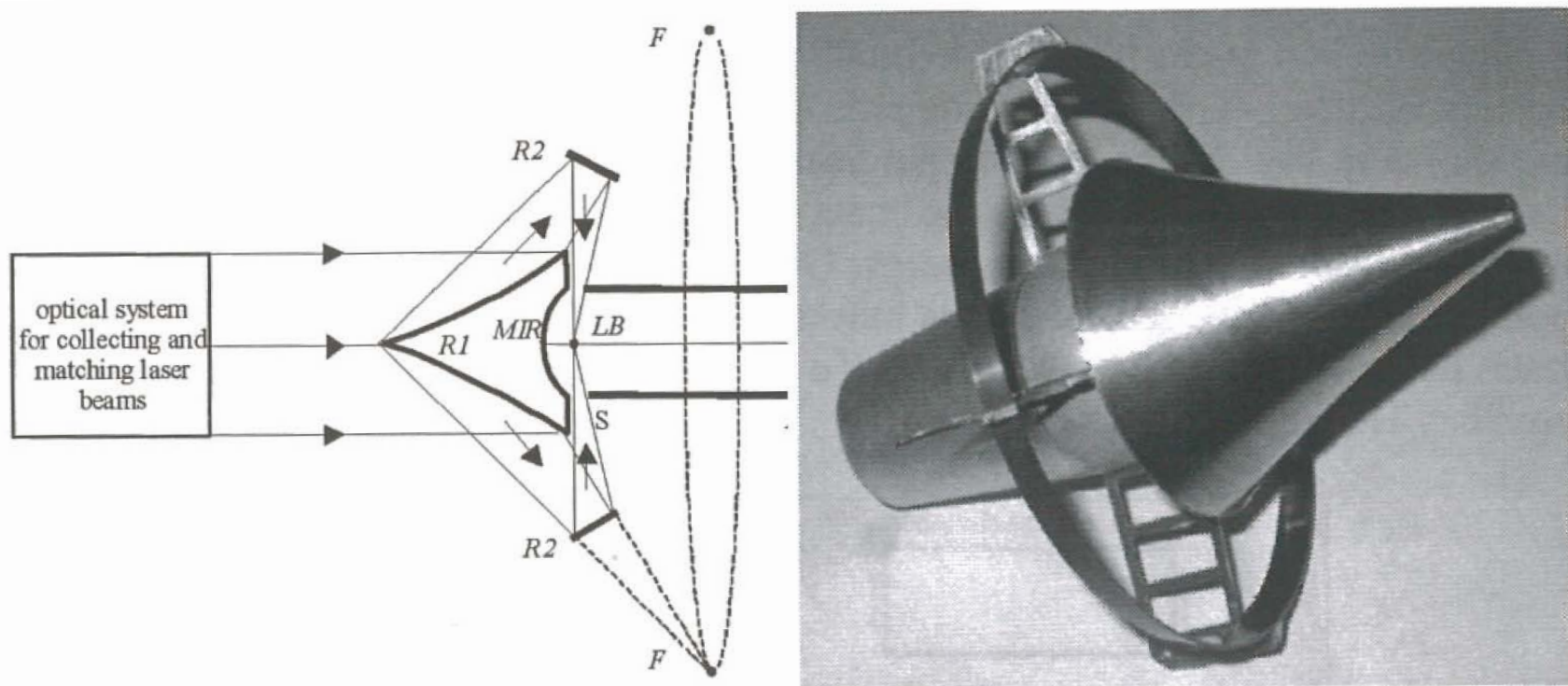
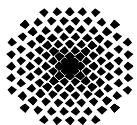


FIGURE 1. General Optical Scheme, Assembling, and a Photo of the ASLPE Model.

- Traktorstrahl
- gepulst & cw-Betrieb möglich
- CHO-Polymere als Treibstoffe

Yu. A. Rezunkov et al, Performance Characteristics of Laser Propulsion Engine Operating both in CW and in Repetitively-Pulsed Modes, AIP Conf. Proc. **830**: 3 – 13 (2006)

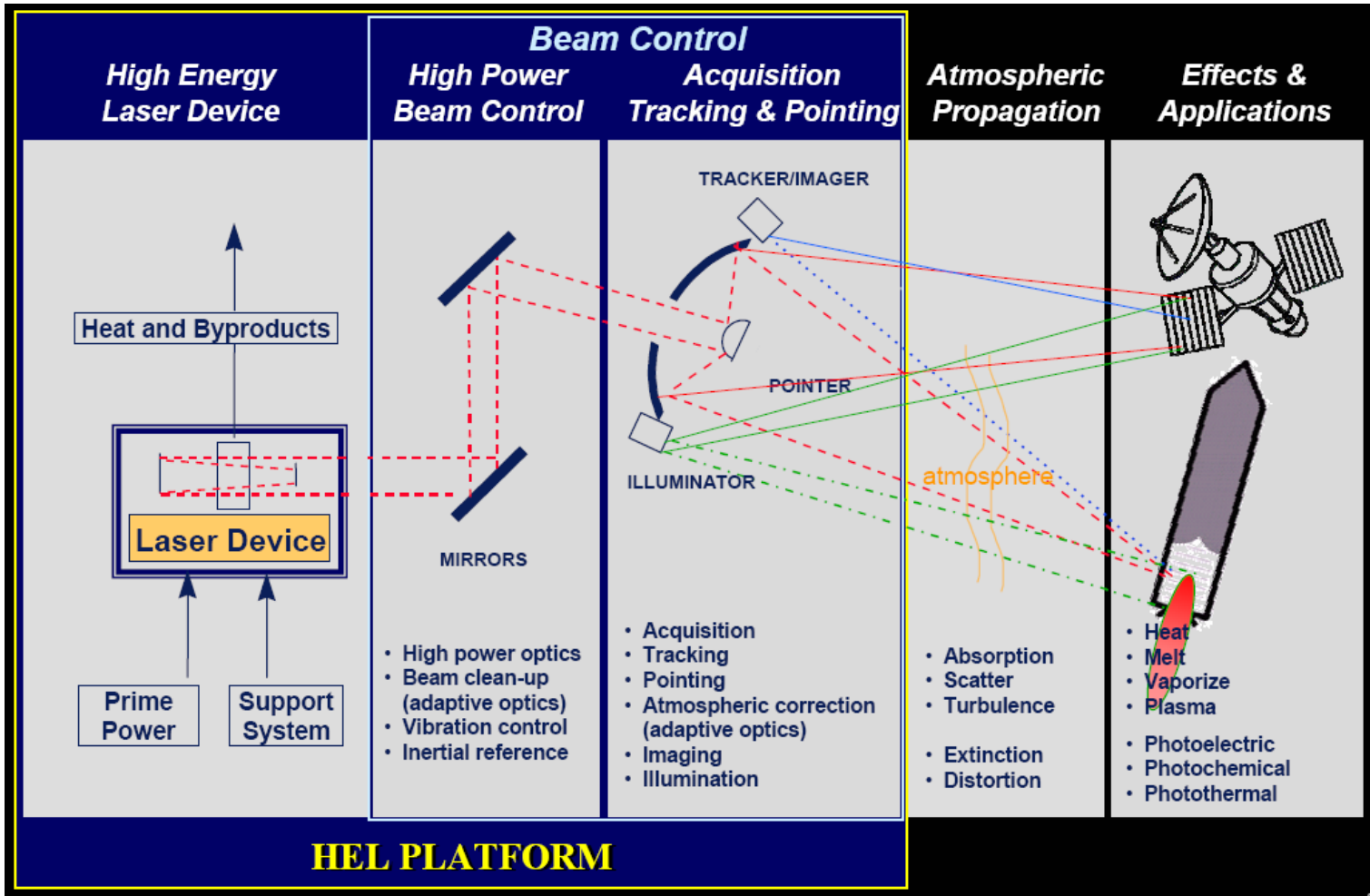


Universität
Stuttgart

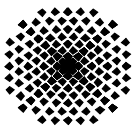
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzeptionelle Überlegungen



J.R. Cook, Atmospheric Applications of High Energy Lasers, Proc. Of XV International Symposium on GCL-HPL 2004 Prague



Universität Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Energiebilanz

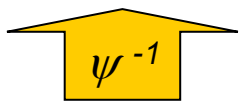
$$E_{kin} = 1/2 mv^2 = \eta_{prop} \psi^{-1} \alpha \beta \gamma \delta \cdot E_{wall}$$



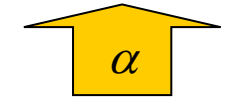
Antriebseffizienz



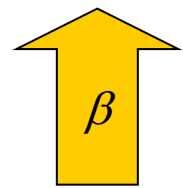
Mechanische Effizienz



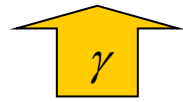
Expansionseffizienz



Absorptionseffizienz



Transmissionseffizienz



Laserwirkungsgrad



• Kinetische Energie des Lightcrafts

• Energiekopplung zum Lightcraft

• Kinetische Energie des Treibstoffjets

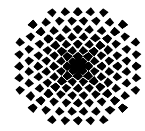
• Innere Energie des Treibstoffes



• Laserpulsenergie am Treibstoff

• Ursprüngliche Laserpulsenergie

• Elektrische Energie



Constant momentum mission

Dynamische Anpassung:

$$V_{jet} = V_{rocket}$$

anstelle von

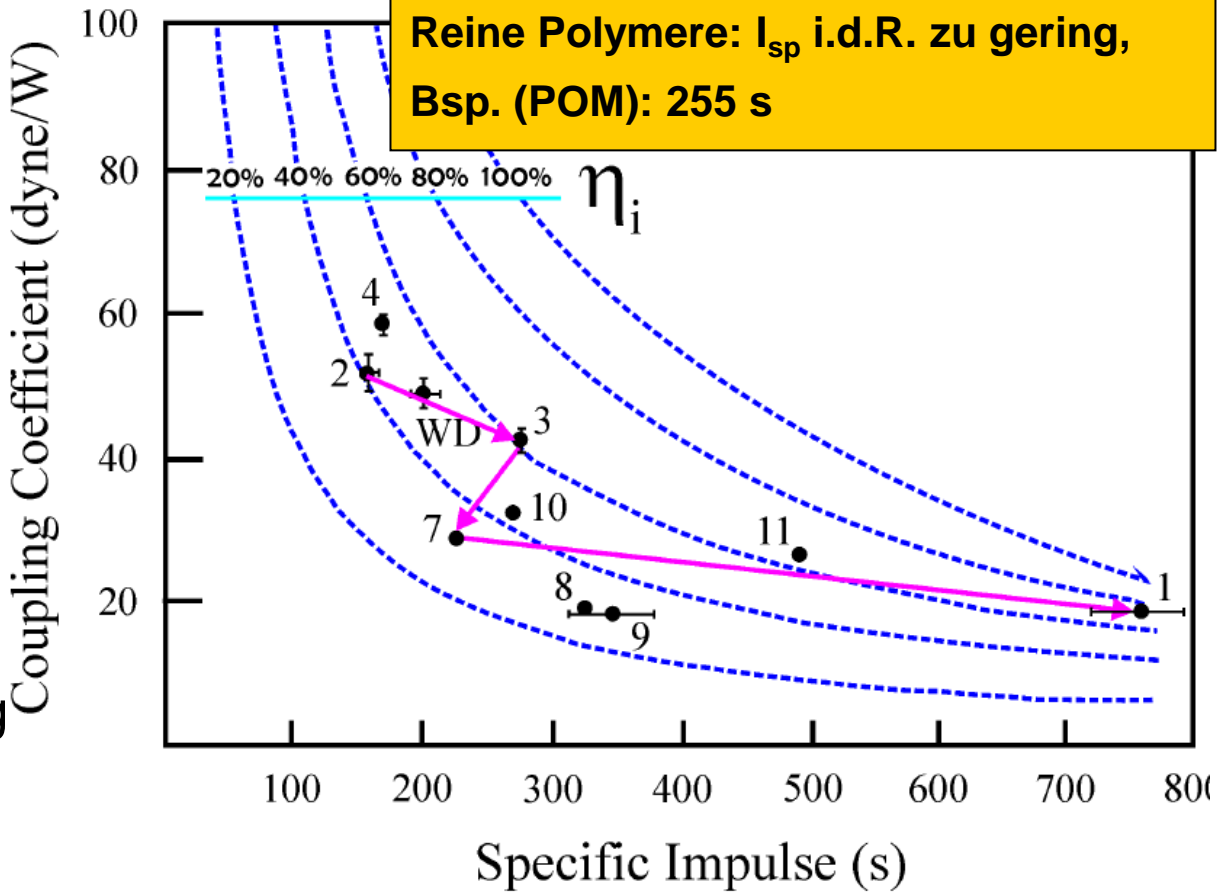
$$V_{jet} = \text{const.}$$

Hohes c_m : 485 N/MW
Ammoniumperchlorid (AP)

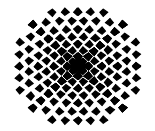
Hoher I_{sp} : 754 s
Teflon (PFTE)

Zeitliche Variation der
Treibstoffzusammensetzung

Einstufiger Flug in LEO: $I_{sp} > 600s$
Reine Polymere: I_{sp} i.d.R. zu gering,
Bsp. (POM): 255 s



Larson, C.W., Mead, F.B, Knecht, S.D., Laser Propulsion and the Constant Momentum Mission, AIP Conf. Proc. **702**, 216 – 227 (2004)
 Pakhomov, A.V., Mahaffy, K.E., Binary Solid Propellants for Constant Momentum Missions, AIP Conf. Proc. **997**, 266 – 279 (2008)



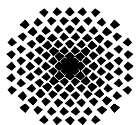
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

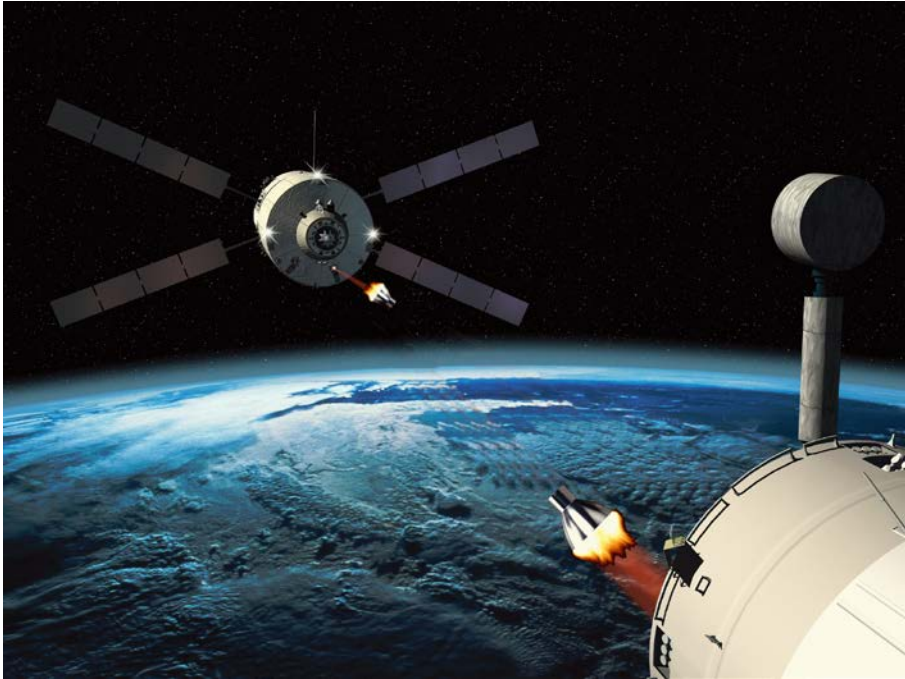


Systembetrachtungen

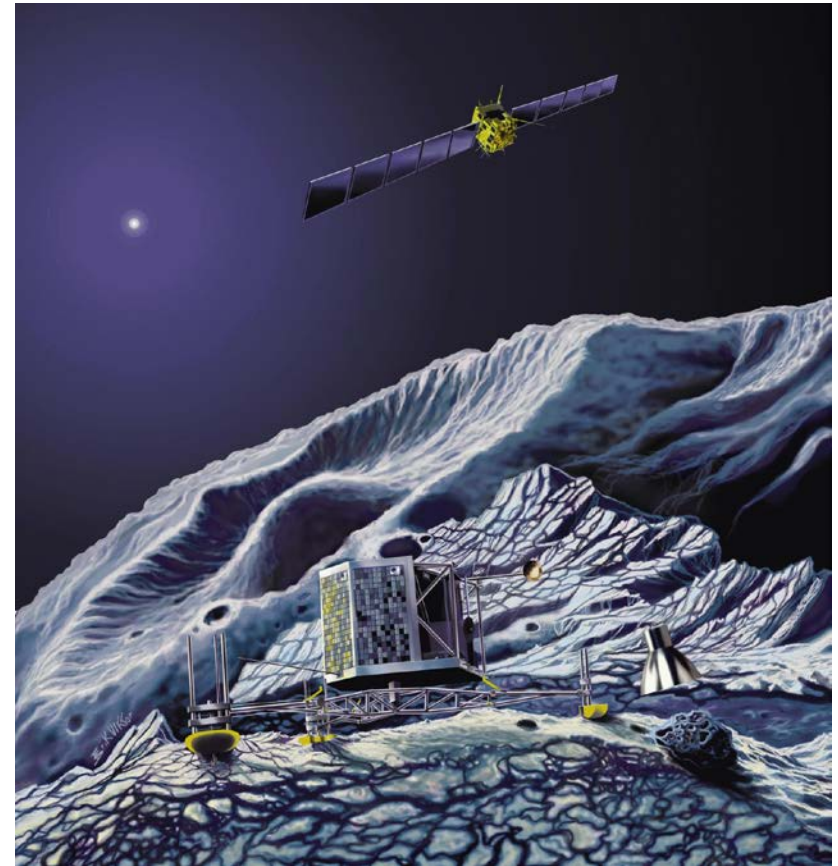
- Teleskop mit einer Reichweite bis zu 1000 km
- adaptive Optik erforderlich
- Mittlere optische Laserleistung:
 - 0,2 ... 1 MW / kg Nutzlast
 - hohe Anfangsinvestition
- Externe Energiequelle:
 - günstiges Masse/Nutzlast-Verhältnis
 - Einfache Antriebstechnologie
 - geringe Startkosten
 - hohe Startfolge



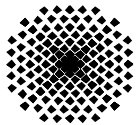
Weltraumgestützte Alternativen



Logistische Missionen



Probenrücksendung



Inhalt

1 Einleitung

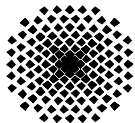
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

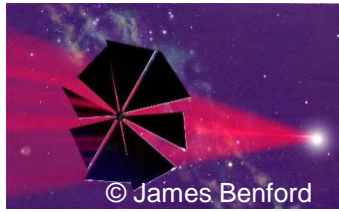
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

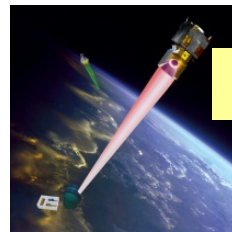
4 Zusammenfassung



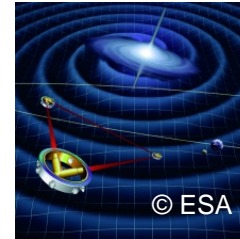
Skalierung und Anwendungsgebiete



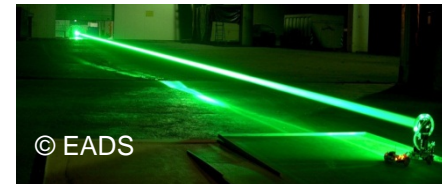
Photonenantrieb



Lightcraft



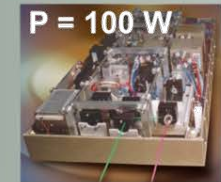
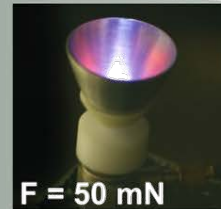
- Mikroantriebe
- Debris removal
- Photovoltaik + Laser



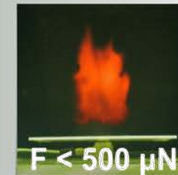
$$C_m = \frac{\text{thrust}}{\text{laser power}}$$



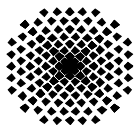
Langfristige Vision



Mittelfristige Anwendung



Derzeitige Entwicklung



Unkonventionelle Antriebe & Ideen

Das Brechen von Regeln ist der erste Schritt zur Innovation.

Wie wird aus einer Raupe ein Schmetterling? - Erste Aufgabe: Treten Sie nicht drauf.

Üben Sie die Erste Hilfe der Ideenrettung: Don't criticize, improve.

„Geht nicht!“ heißt oft, dass die Idee nicht verstanden wurde.

Das Bekannte zu verlassen, braucht immer außergewöhnliche Kraft.

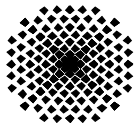
Vor jedem Erfolg steht nicht nur die Bereitschaft zu scheitern, sondern tatsächlich das Scheitern.

Alte Ideen stehen neue Ideen immer im Weg. Das Normale ist der Kampf neuer Ideen gegen alte Ex-Ideen.

Jeder Mensch hat zu jedem Begriff ein Vorurteil.

Wer berechnet, was es kostet, nichts zu riskieren?

Martin Gaedt, Rock your idea, Murmann Verlag (2016)



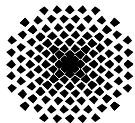
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Abbildungsnachweis

- DLR – Institut für Technische Physik: Seite 15, 20, 22, 24, 26, 36, 38, 40, 42, 45, 51, 52, 68 – 73, 76, 78, 79, 88 – 93, 98, 100, 101
- Seite 19:
 - Quander Metall- und Lasertechnik, <http://www.quander.de/lasertechnik/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Entertainment Weekly, <http://www.telegraph.co.uk/film/star-wars-the-force-awakens/facts-characters-best-scenes/> zuletzt aufgerufen: 12.01.2016
 - EPA (Handout), in Die Presse.com, Aufblasbarer Weltraumaufzug soll 200 Kilometer hoch werden, 19.06.2009 , <http://diepresse.com/home/science/488552/Aufblasbarer-Weltraumaufzug-bis-in-200-Kilometer-Hohe>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Ascending Technologies, in: online Focus, Mini-Hubschrauber - Verkehrsüberwachung per Fernsteuerung, 01.02.2012, http://www.focus.de/auto/news/mini-hubschrauber-verkehrsuerberwachung-per-fernsteuerung_aid_709334.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Dr. med. Inken Lamcke, Femto- Lasik – PRK, 2013, <http://www.augenarzt-berlin.com/femto-lasik-prk/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Nations Wiki, Death Star I, http://nations.wikia.com/wiki/Death_Star_I, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Bundeshandelsschule und Bundeshandelsschule Völkermarkt, Photonenantrieb, <http://www.hak-vk.at/index.php?id=2861>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 21:
 - The New York Times, Arthur R. Kantrowitz, Whose Wide-Ranging Research Had Many Applications, Is Dead at 95, 9.12. 2008, http://www.nytimes.com/2008/12/09/science/09kantrowitz.html?_r=0, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Apogee Books, Author Biographies – Leik Myrabo, http://www.apogeespacebooks.com/Author_Bios/leik_myrabo.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 25:
 - NASA – National Space Science Data Center, Sputnik 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1957-001B>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Smithsonian National Air and Space Museum,
 - Heise Foto, Erich Kapfenberger, Dampfklok, <http://www.heise.de/foto/galerie/foto/Dampfklok-cc8ca0aab40ec62ada6180479fac5c82/>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Bahnbilder aus dem Rhein-Main-Gebiet, Kai Hesse, http://www.bahnbilder.net/bilder/03-10-07/IMG_6597.jpg, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 28:
 - Thomas Edwards, The history of the laser, 2011, http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2011.web.dir/Thomas_Edwards/History.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - APS Physics, Focus: Invention of the Maser and Laser, 2005, <http://physics.aps.org/story/v15/st4>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 29:
 - Deutscher Schaustellerbund in: Impulse, 22.11.2013, <http://www.impulse.de/leben/talfahrt-fur-wilde-karusselle-wie-sich-das-geschafft-der-schausteller-verandert>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - Best Greetings, e-Cards, Orkut Scraps, Glitter Graphics 4 All- Copy and Paste, <http://easyscraps.blogspot.de/2010/09/free-emoticons-for-orkut.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - SmilieCenter, Big smilies 0031, http://www.smiliecenter.de/0/big/big_smilies_0001.htm, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014



Abbildungsnachweis

- Seite 34: Wikipedia in http://www.klangspiel.ch/laser_pointer_red_774/, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 35: National Ignition Facility, <https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery>, zuletzt aufgerufen: 27.01.2017,
- RP Photonics Encyclopedia – YAG Lasers, http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 36: BATOP Optoelectronics, <http://www.batop.com/information/microchip-laser.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 42: FAS Space Policy Project – Airborne Laser, <http://www.fas.org/spp/starwars/program/abl.htm>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 45: Lisa Pathfinder Mission, EADS Astrium, <http://gallery.astrium.eads.net/app/photopro.sk/astrium/detail?docid=92>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 46: MIT, Archimedes Death Ray: Idea Feasibility Testing, October, 2005, http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 52: Breakthrough Starshot, <http://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>
- Seite 68: Edge-Wave IS-Series, <http://www.edge-wave.de/web/produkte/short-pulse-systeme/is-serie/>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 69: SFB 716, Laserablation in Metallen, <http://www.sfb716.uni-stuttgart.de/forschung/teilprojekte/projektbereich-b/b5/ergebnisse.html>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014

