

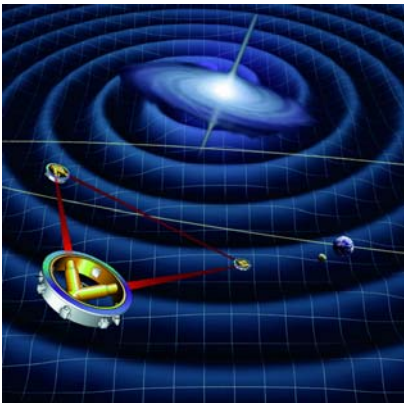


Präzise Raumfahrtantriebe mit gepulsten Lasern

Precise space thrusters using pulsed lasers

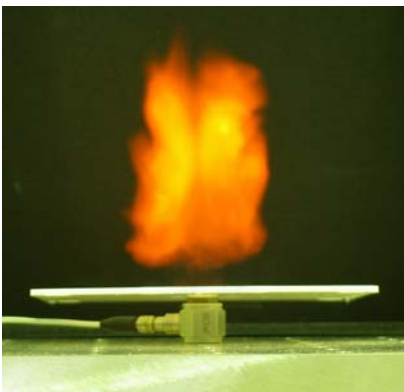
Messung von Gravitationswellen durch Interferometrie über ein Satelliten-Array (LISA), Bildquelle: ESA

Interferometric measurement of gravitational waves with a satellite array (LISA), Source: ESA



Messung des Impulsübertrages bei Laser-Material-Wechselwirkung (Ablation)

Measurement of momentum transfer by laser induced ablation



Die genaue Positionierung und Lagestabilisierung von Satelliten im Welt- raum ist nicht allein für Navigations- systeme von Bedeutung. Viele wis- senschaftliche Missionen sind auf die präzise Errichtung von Satellitenkon- stellationen angewiesen. So kann z.B. das Auflösungsvermögen eines Teleskops im Verbund mit weiteren Teleskopen eines Satelliten-Arrays um ein Vielfaches verbessert werden (synthetische Apertur). Die Anwen- dung interferometrischer Messtech- niken über große Distanzen im Welt- raum erlaubt ferner die präzise Ver- messung des Erdschwerefeldes bis hin zur Detektion von Gravitations- wellen. Diese Aufgaben erfordern eine äußerst präzise Kontrolle der Satellitenposition in der Schwerelo- sigkeit unter dem äußeren Einfluss von solarem Strahlungsdruck und molekularer Anströmung durch at- mosphärische Restgase. Als Energie- quelle für die benötigten Antriebe können weltraumqualifizierte Laser eingesetzt werden, die sich über Pulsenergie, Repetitionsrate, Puls- dauer und Wellenlänge präzise auf die Anforderungen eines laserge- stützten Antriebes abstimmen lassen.

Fokussierte Laserpulse erzeugen sehr hohe Spitzenintensitäten, die auf Mate- rialoberflächen (Target) zum Abtrag einer dünnen Schicht in Form von Dampf oder Plasma führen (laserinduzierte Ablation). Der Rückstoß des abgetragenen Materi- als auf das Target führt zu einem Impuls- übertrag, der sich materialabhängig präzise über Intensität, Pulsdauer und Wellenlänge konfigurieren lässt. Der Impulskoppelkoeffizient dient als Kenn- gröÙe zur Charakterisierung des laserge- stützten Antriebsprozesses und be- schreibt das Verhältnis von erzeugtem Schub zur mittleren Laserleistung.

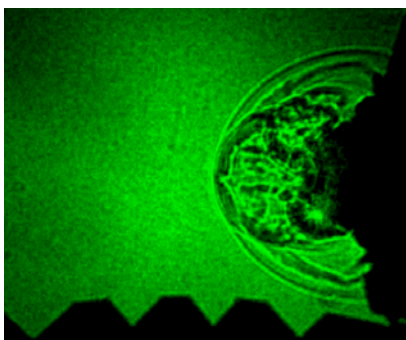
Precise satellite positioning and atti- tude control in space is not only required for navigation systems. Many scientific missions rely on ex- actly positioned satellite constella- tions e.g. a telescope's resolution can be vastly improved by combining several telescopes in a satellite array (synthetic aperture). Furthermore interferometric measurements over long distances in space enable pre- cise surveys of earth's gravity field and detection of gravitational waves. These tasks require very exact con- trol of satellite position in zero gra- vity taking into account external inter- ferences like solar wind and free molecular flow of residual atmos- pheric gases. Space qualified lasers can be used as the energy source for the required thrusters. The pulse energy, repetition rate and wave- length of the laser will be tailored to precisely match the thruster require- ments.

Focused laser pulses produce very high peak intensities, which lead to removal of a thin layer of material from a surface (target) creating plasma or vapor (laser induced ablation).

The recoil of the ablated material leads to momentum transfer to the target, which can be adjusted by changing intensity, pulse length and wavelength. The ratio of generated momentum to average laser power, the laser momentum cou- pling coefficient, is the figure of merit to characterize the laser propulsion process.

Schlierenaufnahme eines Ablationsjets mit vorausgehender Schockwelle unter reduziertem Druck

Schlieren image of an ablation jet with precursory shock wave under reduced pressure



Die Untersuchungen am Institut für Technische Physik zum laserablativen Antriebsprozess umfassen bisher u.a. Kooperationen mit der US Air Force, dem PSI Villigen, Schweiz und der Universität Nagoya, Japan. Polymere Materialien, die der Laserwellenlänge angepasst sind, sowie Komposite mit anderen Polymeren und Metallen werden im Hinblick auf Reproduzierbarkeit des Impulsübertrages, Einfluss komplexer Düsengeometrien, Plasmaabschirmung am Target und Ausbreitung des Ablationsjets analysiert. Um die Lage eines Satelliten mit möglichst kleinen Impuls-Bits hochgenau zu regeln, rücken metallische Treibstoffe von Aluminium bis hin zu Gold in den Mittelpunkt des Interesses. Die Ablation von Metallen resultiert zudem in einen hohen spezifischen Impuls.

The investigations at the Institute of Technical Physics in the field of laser ablative propulsion are accompanied by several international cooperations, e. g. with the US Air Force, the PSI Villigen, Switzerland and the Nagoya University, Japan. Polymer materials that are tailored with respect to laser wavelength as well as polymer composites are investigated with regard to reproducibility of momentum transfer, influence of complex thruster geometries, plasma shielding at the target and expansion of the ablation jet.

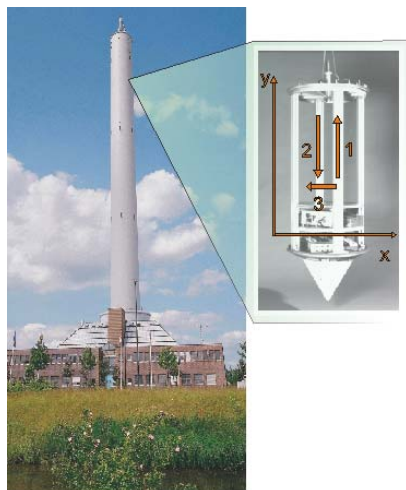
Precise satellite positioning calls for the smallest possible impulse bits and high specific impulse. Different metal targets from aluminum to gold are promising candidates to meet these requirements.

Ein Teststand mit einem Festkörperlaser steht für experimentelle Untersuchungen zur Verfügung. Die Experimente werden durch theoretische Modellierungen des Antriebsprozesses unterstützt und ergänzt. Die geplanten Analysen im Vakuum umfassen Messungen auf einer hochempfindlichen Schubwaage sowie Untersuchungen zur Ausbreitungscharakteristik des Ablationsjets. Für die Integration des Konzepts in ein störungsfreies Gesamtsystem ist die trägheitsfreie Führung des Laserstrahls durch aktive optische Systeme über die Targetfläche von entscheidender Bedeutung. Um die Stabilität des Systems für spätere Missionen zu gewährleisten, sind außerdem Langzeitmessungen zur gleichbleibend reproduzierbaren Performance vorgesehen.

Experimental investigations are carried out at a test bed employing a solid state laser. The experiments are supported and complemented by theoretical calculations on the propulsion process. The experimental setup includes a highly sensitive thrust gauge under vacuum conditions as well as devices for the analysis of the expansion velocity of the ablation jet. The development of an active optical system that allows for momentum conserving beam steering across the target surface is a prerequisite for the vibration-free integration of the thruster in the satellite system. For future missions the long term stability and the reproducibility of the system's performance have to be proven in extended endurance tests.

Experiment zum Mikroantrieb in der künstlichen Schwerelosigkeit einer Fallkapsel

Micro propulsion experiment in the artificial weightlessness of a drop capsule



Einen Meilenstein auf dem Weg zum Einsatz lasergestützter Mikroantriebe im Weltraum bildet das geplante Demonstrationsexperiment mit einem laserbewegten Testkörper in künstlicher Schwerelosigkeit am Fallturm Bremen. Es soll gleichzeitig die Möglichkeit aufzeigen, kleinere Massen in der Schwerelosigkeit des Weltraumes bei moderaten Laserleistungen über eine große Entfernung hinweg gezielt zu bewegen. Diese Variante des Antriebskonzeptes erlaubt den Betrieb eines Lasers auf einer orbitalen Basisstation zum Aussenden kleinerer lasergetriebener Sonden, z.B. für logistische Aufgaben im All (Material, Medikamente), aber auch zur Probenrücksendung mittels eines Traktorstrahls.

A milestone on the roadmap to laser ablation propulsion thrusters in space is the intended demonstration experiment in artificial weightlessness at the Bremen drop tower. It will show the laser controlled movement of a test mass. A second objective of this experiment is to prove the feasibility of moving small masses with moderate laser powers over large distances under zero-gravity conditions. With this type of thruster concept a laser that is installed at a remote space station could dispatch small space probes for logistic tasks in space (e.g. transport of materials, medication), and could also be used for sample return missions using a tractor beam.



Die Entwicklung gepulster Hochenergie-laser hat über die Entwicklung von Kleinantrieben hinaus neue langfristige Perspektiven für den Transport von kleineren Satelliten von einigen Kilogramm Startmasse von der Erde in eine erdnahe Umlaufbahn eröffnet. Die Fokussierbarkeit von Laserstrahlung über weite Distanzen ermöglicht den Antrieb eines Objekts von einer ortsfesten Basis aus. Durch das direkte Zustrahlen von Energie kann auf den Transport eines Energieträgers weitgehend verzichtet und damit ein günstigeres Masse/Nutzlast-Verhältnis erreicht werden. Diese Technologie erlaubt eine zeitnahe Realisierung örtlich flexibler Missionen mit kleinen Nutzlasten. Da die derzeitigen Kosten für den Transport einer Nutzlast in den Erdorbit in etwa ihrem Gegengewicht in Gold entsprechen, liegt ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie in der einmaligen Investition in eine wieder verwendbare Laserenergiequelle am Boden.

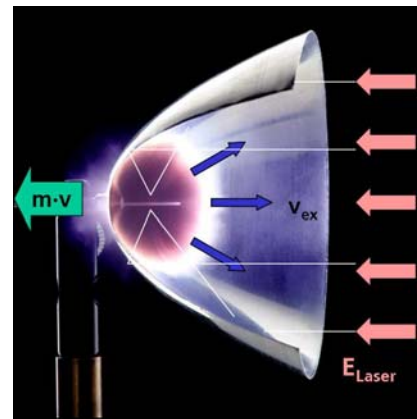
Außerhalb der Erdatmosphäre beruht das Antriebskonzept auf laserinduzierter Ablation eines passenden Treibstoffes, unterstützt durch angepasste Optiken und Düsengeometrien. Innerhalb der Erdatmosphäre ist es hingegen sogar möglich, allein durch die Plasmazündung in der Luft den notwendigen Schub zu erzeugen. So können auf diesem Flugabschnitt, auf dem starke Reibungskräfte auftreten, Treibstoff gespart und die Umweltbelastung minimiert werden. Bei der laserinduzierten Detonation wird die zugestrahlte Laserenergie durch die Brennkammer in Form eines Parabolspiegels in dessen Fokus konzentriert. Dort zündet aus dem Treibstoff, z.B. Luft, ein hochdichtes Plasma, das schnell expandiert. Es entsteht eine sphärische Schockwelle mit hohem Druck und hoher Temperatur, die das Gas (Treibstoff) in Bewegung setzt. Beim Auftreffen der Welle auf die Brennkammerwand schiebt das komprimierte Gas das „Lightcraft“ an, bis der Gasdruck auf Umgebungsdruck abgefallen ist. Zusätzlichen Schub erzeugt der aus der Brennkammer ausströmende Treibstoff (Impulserhaltung). Ein metallischer Zündstift wird auf der Symmetrieachse des Lightcrafts eingesetzt, um eine gleichmäßige, reproduzierbare Zündung des Detonationsprozesses sicher zu stellen. Durch diese Stabilisierung wurden mit einem leichten Flugkörper (60 Gramm) lasergetriebene Freiflüge ohne Treibstoff bis zur Höhe der Labordecke (7,8 Meter) realisiert.

The development of pulsed high energy lasers has opened up new long-term perspectives beyond the development of micro thrusters. Especially the transport of small satellites with masses of several kilograms from earth's surface to low earth orbits. The feasibility of focusing laser radiation at large distances allows for the remote propulsion of a device from a stationary basis. Since direct energy beaming widely replaces the transport of an energy source an improved mass-payload ratio can be achieved. This technology enables the realization of spatially flexible missions with small payloads on a short timescale. Since the cost for transport to low earth orbit is currently approximately the payloads' weight in gold a significant advantage of this technology will be the one-off investment in a reusable ground based laser source.

Outside the atmosphere the thruster relies on laser induced ablation of a suitable propellant together with adapted optics and thruster geometries. In atmosphere plasma detonation in ambient air alone can generate the required amount of thrust, which saves propellant during the part of the launch that is most affected by drag in the atmosphere and thus minimizes the impact on environment. A parabolic mirror serves as thrust chamber and concentrates the received laser pulse energy onto the propellant. In the focal region the propellant breaks down into a high-density, high temperature plasma, expands and generates thrust setting the gas (propellant) in motion. When the wave impinges on the wall of the thrust chamber, the compressed gas pushes the lightcraft until the pressure declines to ambient air pressure. For reasons of impulse conservation, additional thrust is generated from the gas streaming out of the thrust chamber. A metallic pin that is located at the lightcraft's axis of symmetry ensures a consistent reproducible ignition. With the aid of this stabilization mechanism laser propelled flights with heights up to the laboratory ceiling (7.8 m) with lightcrafts of small masses (60 grams) have been demonstrated.

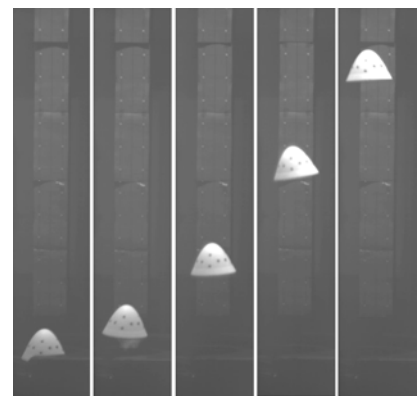
Ein Blick in die Brennkammer verdeutlicht das Antriebsprinzip des Impulsübertrages durch eine laserinduzierte Detonation

A view into the thrust chamber illustrates the propulsion principle of momentum transfer by laser-induced detonation



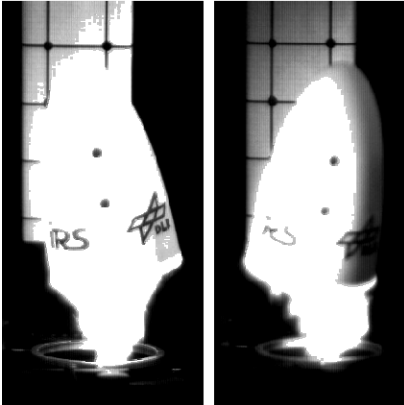
Highspeedkameraaufnahmen während der Beschleunigungsphase eines gepulsten Freifluges

High-speed camera recording during the acceleration phase of a pulsed free flight



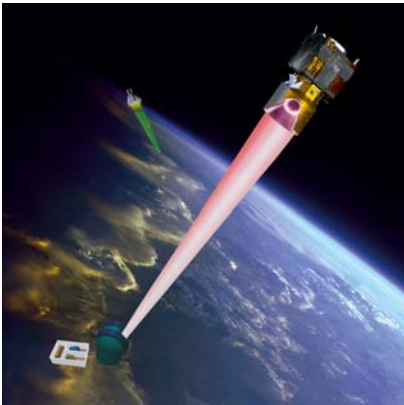
**Flugexperimente zur Schubvektorsteuerung
einer lasergetriebenen Rakete**

*Flight experiments on the thrust vector
steering of a laser-driven rocket*



**Schematische Ansicht des Starts eines
Kleinsatelliten durch einen erdgestützten
Hochenergielaser**

*Schematic view on the launch of a
small satellite by a ground-based
high energy laser*



Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gepulster Freiflüge des Lightcrafts zeigen innerhalb gewisser Grenzen eine Rückorientierung des Flugkörpers zum Laserstrahl bei Seitversatz oder Verkippung. Durch Berechnungen zur Intensitätsverteilung im Lightcraft lassen sich die dabei auftretenden Kräfte für dieses nichtlineare dynamische System modellieren. So können geeignete Eingangsparameter für stabile Flugbahnen sowie kritische Randbedingungen durch Berechnungen vorhergesagt werden. Eine aktive Flugregelung wird durch die Verkippung des Zündstiftes, bzw. des Treibstoffzylinders, gegen die Symmetrieachse des Lightcrafts erreicht, die eine Verschiebung des Schwerpunktes der Detonation in der Brennkammer bewirkt. Mit Hilfe dieser patentierten Technologie wurde eine Schubvektorsteuerung in den Flugkörper integriert, die eine fernsteuerbare Kontrolle des Flugverhaltens ermöglicht.

Für den Transport eines Satelliten in eine erdnahe Umlaufbahn bedarf es einer gepulsten Laserquelle mit einer mittleren Leistung von 1 MW pro Kilogramm Startmasse. Die Übertragung der Energie über große Distanzen (ca. 1000 km) ist unmittelbar verknüpft mit ausreichender Strahlqualität und einem geeigneten Strahlführungssystem, z.B. einem adaptiven Teleskop mit einem aktiven Trackingsystem und Turbulenzkompensation. Die fachliche Kompetenz am Institut für Technische Physik in den Bereichen Laserentwicklung, Strahlführung durch aktive optische Systeme und Weltraumqualifizierung optischer Komponenten ermöglicht die Erforschung langfristiger Perspektiven für alternative Antriebskonzepte von Kleinsatelliten durch bodengestützte Hochenergielaser und gleichzeitig die Erarbeitung vielversprechender Lösungen für aktuelle Entwicklungsanforderungen an Mikroantriebe zur Lageregelung mit mittleren Laserleistungen von einigen Watt.

High speed camera recordings of pulsed free flights of a lightcraft show that the craft exhibits beam riding properties within certain limits of lateral offset and inclination. Based on calculations of the intensity distribution inside the lightcraft this highly nonlinear dynamic system and the resulting forces have been numerically modeled. Thus suitable starting parameters for a stable flight as well as critical boundary conditions can be derived by calculations. Active flight control has been implemented by tilting the ignition pin or propellant with respect to the lightcrafts' axis of symmetry. This results in a shift of the centre of the detonation inside the thrust chamber. This patented technology was applied to integrate a thrust vector steering inside a small capsule and to perform remote controlled free flights.

For the transport of a satellite to low earth orbit a pulsed laser source with an average power of 1 MW per kilogram wet mass is required. The transport of energy over large distances (approx. 1000 km) requires sufficient beam quality and a suitable beam directing system e.g. an adaptive optics telescope with an active tracking system and atmospheric turbulence compensation. The Institute of Technical Physics' competence in laser development, beam control with active optical systems and space qualification of optical components is an outstanding prerequisite for future investigations on alternative thruster concepts for small satellites and perspectives of remote laser propulsion as well as the development and evaluation of micro thrusters for precise attitude control at laser power levels of a few Watts.



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Technische Physik
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Telefon: +49 (0)711 6862-773
Telefax: +49 (0)711 6862-788

www.DLR.de/tp