

Lasereffektoren großer Reichweite

Long range laser effectors

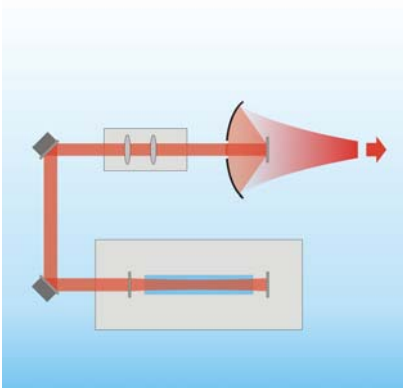
Archimedes von Syrakus setzt römische Schiffe mit Hilfe eines Brennspiegels in Brand (Wandgemälde, G. Parigi, Uffizien Florenz)

Archimedes of Syracuse sets roman ships on fire, using a burning mirror
(Wall painting, G. Parigi, Uffizi, Florence)



Komponenten eines Lasereffektors
unten: Strahlungsquelle (Wirklaser)
oben: Strahlformung und -führung

Components of a laser effector
bottom: radiation source (laser)
top: beam shaping and directing
(beam control)



Konzentriertes Licht (bzw. konzentrierte Strahlung) kann ein wirkungsvolles Werkzeug sein, welches nach der Legende schon Archimedes von Syrakus eingesetzt haben soll, um gegnerische Kriegsschiffe in Brand zu setzen. Laser liefern eine Strahlung, die sich besonders eignet, um zu hohen Leistungsdichten fokussiert zu werden. Gelingt es, die hohe Leistungsdichte über Entfernungen von einigen Kilometern zu erzielen, so ergibt sich für solche Lasereffektoren großer Reichweite ein sehr breites Einsatzspektrum. Der Laserstrahl ist masselos, zur räumlichen Ausrichtung muss lediglich ein Spiegel gedreht werden. Damit sind solche Systeme besonders geeignet, schnell bewegte Objekte – z.B. Flugkörper – mit Leistung zu beaufschlagen.

Neben der eigentlichen Strahlungsquelle – dem Laser – ist die Strahlformung und -führung eine wesentliche Komponente. Es muss nicht nur eine Nachführung des Strahls auf das Ziel gewährleistet werden, auch die Ausbreitung durch die Atmosphäre führt zu Störungen der Strahllage, die kompensiert werden müssen. Darüber hinaus führt die Atmosphäre zu weiteren Störungen, die gegebenenfalls den Einsatz einer adaptiven Optik erforderlich machen, um überhaupt die benötigten Leistungsdichten erzielen zu können. Daher sind nicht nur die Entwicklung geeigneter Laser und einer entsprechenden Optik für die Fokussierung über eine große Distanz, sondern auch Untersuchungen zum Einfluss atmosphärischer Störungen auf die Strahlausbreitung erforderlich.

Concentrated light (or concentrated radiation) can be an effective tool. According to legend, Archimedes of Syracuse used this technique to set the ships of the roman enemy on fire. Lasers deliver a radiation which is particularly suitable for focusing to high intensities. If it is possible to achieve high power densities over distances of several kilometers, one can address a very broad application spectrum with such long range laser effectors. The massless laser beams can easily be directed by simply turning a mirror. Therefore such systems are especially useful to apply power to fast moving objects such as missiles.

Apart from the radiation source itself – the laser – the optical system for beam shaping and beam directing is an essential component of the laser effector. Not only does it have to ensure the tracking of the target. The propagation through the atmosphere results in distortions of the beam positioning which also have to be compensated. In addition, the turbulence in air also leads to further distortions which may require an adaptive optic to enable the necessary power densities. Therefore it is not only necessary to develop suitable laser sources and optical systems for long range focusing, but also to conduct research on the influence of atmospheric distortions on beam propagation.

Strahlquellen

Während Archimedes als Strahlungsquelle die Sonne wählte, ist für einen Lasereffektor ein geeigneter Wirklaser erforderlich. Der Laser muss eine Wellenlänge haben, die in der Atmosphäre wenig absorbiert wird, er soll kompakt und effizient sein und er muss die Laserstrahlung mit einer hohen Strahlqualität erzeugen, um eine gute Fokussierbarkeit über große Distanzen zu gewährleisten.

Die vielversprechendsten Laserkonzepte, die diesen Anforderungen genügen, sind diodengepumpte Festkörperlaser. Die zunehmende Dominanz dieser Konzepte im Bereich der industriellen Lasermaterialbearbeitung ist auf Faktoren wie gute Fokussierbarkeit und hohe Effizienz zurückzuführen. Darüber hinaus ergeben sich wichtige Synergieeffekte aus den Entwicklungen für die Lasermaterialbearbeitung und für Lasereffektoren großer Reichweite.

Allerdings sind die Anforderungen an die Fokussierbarkeit für Lasereffektoren deutlich höher als für typische industrielle Hochleistungsanwendungen; für viele Anwendungsfelder werden Laserleistungen benötigt, die ein oder zwei Größenordnungen über den derzeit im industriellen Umfeld sinnvoll nutzbaren Leistungen liegen.

Als mögliche Laserdesigns werden zurzeit Slab-Laser, Faserlaser und Scheibenlaser untersucht. So wurde beispielsweise von Northrop Grumman durch Kombination mehrerer Slab-Verstärker eine Ausgangsleistung von 105 kW mit guter Strahlqualität demonstriert.

Der Faserlaser bietet derzeit die höchsten Ausgangsleistungen mit exzellenter Strahlqualität (bis zu 10 kW Grundmode). Dieses Design ist allerdings in der Leistung aus einer einzelnen Faser limitiert, da die Leistungsdichten in dem sehr kleinen Kern der Faser sehr hoch sind. Daher ist ein großer Teil der aktuellen Forschung auf Konzepte zur Kopplung vieler Fasern konzentriert - entweder als geometrische Kopplung (unter Verlust von Strahlqualität) oder als spektrale bzw. kohärente Kopplung (beides unter weitestgehender Erhaltung der Strahlqualität). Aufgrund der besonderen Anforderungen der spektralen oder kohärenten Kopplung sind in diesen Fällen die Leistungen pro Faser deutlich kleiner als 10 kW.

Radiation sources

Whereas Archimedes just used the sun as his radiation source, a suitable laser source is required for a laser effector. This laser has to work on a wavelength which is not attenuated in the atmosphere, it should be compact and efficient and the laser radiation has to be generated with high beam quality to ensure a good focusability over large distances.

The most promising laser concepts fulfilling these requirements are diode pumped solid state lasers. The increasing predominance of these concepts in the field of industrial laser material processing is due to factors such as good focusability and high efficiency. Additionally, there is an important synergy in the co-development of lasers for material processing and for long range laser effectors.

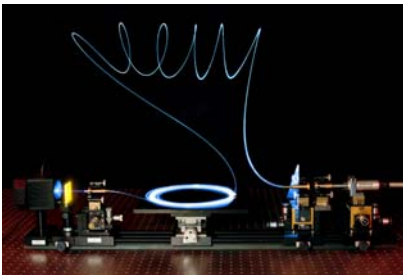
However, the requirements on focusability are significantly higher for laser effectors than for industrial high power laser applications. Furthermore, for many fields of application, the required laser power is one or two orders of magnitude above what can be used in a reasonable way for industrial application.

Possible designs for laser effectors currently under research are slab lasers, fiber lasers and Thin Disk lasers. For example, Northrop Grumman has demonstrated 105 kW laser power with good beam quality by combining the output of several amplifier chains based on slab lasers.

The fiber laser is the design which has proven to deliver the highest output power with excellent beam quality up to now (up to 10 kW fundamental mode). But this design is limited by the power available from one single fiber as the power densities in the very small core are extremely high. Therefore for fiber lasers, a lot of current research is concentrated on the coupling of several fibers. This is either possible by geometric coupling (losing beam quality) or by spectral coupling or coherent coupling (both more or less preserving beam quality). Due to the special requirements for spectral or coherent coupling the power per fiber is much smaller than 10 kW in these cases.

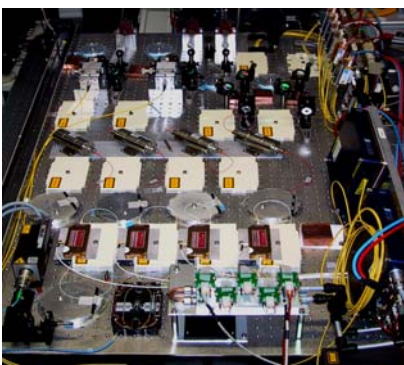
Faserlaser kleiner Leistung

Low power fiber laser



Laboraufbau für Experimente zur kohärenten Kopplung von vier Faserlaserverstärkern

Laboratory setup for experiments on coherent coupling of four fiber laser amplifiers



Scheibenlaser

Der Schwerpunkt der Quellenentwicklung für Lasereffektoren großer Reichweite am Institut für Technische Physik liegt im Bereich Scheibenlaser.

Bei diesem Design besteht das aktive Medium aus einer sehr dünnen Kristallscheibe mit einer Dicke von wenigen 100 μm (teilweise sogar unter 100 μm) und einem Durchmesser von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern. Diese Scheibe wird von einer Seite gekühlt und wird als „aktiver“ Spiegel im Laserresonator eingesetzt. Die höchst effiziente Wärmeabfuhr durch die Scheibenrückseite erlaubt einerseits sehr hohe Pumpleistungsdichten, andererseits wird aufgrund der Kollinearität von Laseremission und Temperaturgradient innerhalb der Scheibe die thermische Linsewirkung minimiert. Idealerweise erfolgt die Steigerung der Ausgangsleistung, indem man die aktive Fläche vergrößert und die Flächenleistungsdichten konstant hält. Damit bleiben sowohl die Temperaturen und die thermische Linse als auch die erforderliche Brillanz der Pumpdioden konstant.

Industrielle Lasersysteme, basierend auf diesem Design, sind mit bis zu 16 kW Dauerstrichleistung erhältlich; im Labor wurden bisher 500 W Grundmodeleistung und 1,5 kW mit einer um den Faktor 3 schlechteren Fokussierbarkeit erzielt.

Neben der Leistungsskalierung über die aktive Fläche im kontinuierlichen Betrieb bietet der Scheibenlaser einen weiteren Vorteil im Falle des gepulsten Betriebs: Hier kann die Energiedichte pro Fläche dank der Skalierung begrenzt werden. Dies ist besonders für Anwendungen vorteilhaft, bei denen Pulsenergien im Bereich von 100 mJ oder mehr bei zugleich hoher Strahlqualität und hoher mittlerer Leistung erzielt werden sollen. Dieser Vorteil kommt darüber hinaus auch für sehr kurze Pulse (wenige Pikosekunden Pulsdauer) zum Tragen, da bei großer aktiver Fläche auch die Spitzenintensitäten und somit die nichtlinearen Effekte im Lasermaterial minimiert werden.

Thin Disk Laser

The laser development for long range laser effectors at the Institute of Technical Physics is concentrated on Thin Disk lasers.

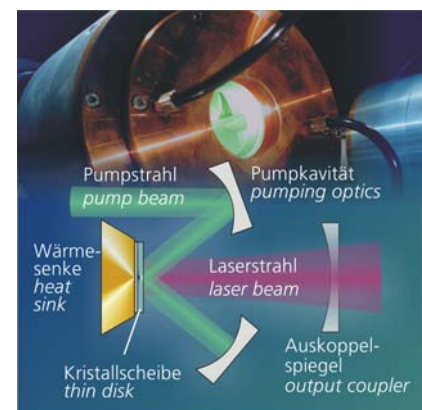
For Thin Disk lasers, the laser active medium is a thin disk of a few 100 μm thickness (in some cases even less than 100 μm) and a diameter between several millimeters and a few centimeters. This disk is cooled from one side and is used as an "active" mirror inside the laser resonator. On the one hand, the highly efficient heat dissipation through the disk's rear surface allows very high pump power densities. On the other hand, thermal lensing effects are minimized due to the collinearity of the thermal gradient within the disk and the laser beam propagation. Ideally, increased output powers are reached by increasing the active area and keeping the power densities constant. This keeps temperature and thermal lensing as well as the required brilliance of the pump diodes constant.

In practice, industrial grade laser systems based on the Thin Disk design are available with cw output powers of up to 16 kW. In the lab, 500 W of fundamental mode power and 1.5 kW with a three times worse focusability have been achieved

Apart from the power scalability in continuous operation by increasing the active area, the Thin Disk laser offers another advantage in pulsed operation: Here it is possible to limit the energy per area through the scaling behavior. This is especially advantageous for applications that need pulse energies of 100 mJ or even much more at high beam quality and high average power. This behavior is also advantageous for very short pulses (pulse durations of a few picoseconds), as the increased area also reduces the peak intensities and therefore the nonlinear effects inside the laser material.

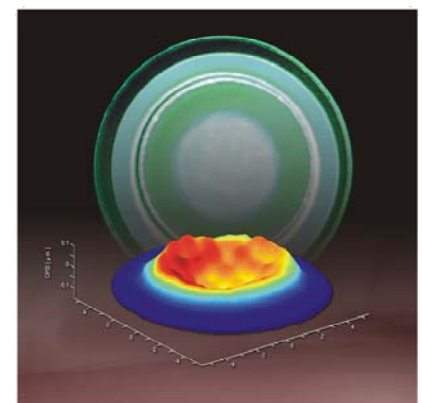
Prinzip des Scheibenlasers

Principle of the Thin Disk laser



Strahlprofil auf der Scheibe und Höhenprofil der thermischen Linse aus Simulations-rechnungen

Beam profile on the disk and height profile of the thermal lens derived from numerical calculations



**Laserfreistrahlstrecke:
130 m Propagationsstrecke mit ständiger
Aufzeichnung der atmosphärischen
Bedingungen**

**Laser propagation range:
130 m free space propagation distance with
continuous monitoring of atmospheric
conditions**



Experimenteller Aufbau zum Feintracking

Experimental setup for fine tracking



Tracking und Propagation

Mit der Laserfreistrahlstrecke am Standort Lampoldshausen verfügt das Institut für Technische Physik über eine Testeinrichtung, die hervorragend geeignet ist, um sowohl Propagationsuntersuchungen mit hohen Leistungen durchzuführen als auch verschiedene Kompensationsverfahren für atmosphärische Störungen zu untersuchen.

Unter anderem konnte durch Anwendung von Feintracking-Verfahren die Richtungsinstabilität eines Laserstrahls auf der Freistrahlstrecke auf weniger als $1 \mu\text{rad}$, das entspricht weniger als 1 mm auf 1 km Distanz, stabilisiert werden.

Anwendungen

Eine wichtige sicherheitstechnische Anwendung für Lasereffektoren großer Reichweite ist der Schutz von Einrichtungen gegen Beschuss mit Mörsergranaten oder Raketen. Denkbar ist auch ein Schutz von Flugzeugen in der Start- oder Landephase gegen Boden-Luftraketen.

Daneben ist auch die Leistungsübertragung mittels Strahlung zur Energieversorgung von Systemen ein mögliches Anwendungsfeld – z.B. solarzellenbetriebene UAVs, die dann auch nachts eingesetzt werden könnten (für Verkehrsüberwachung, Umweltmonitoring oder als Kommunikationsrelais). Auch Satelliten könnten so mit Energie versorgt werden. Die Energieversorgung mittels Lasern vom Boden aus könnte bei Satelliten insbesondere die Degradation der Solarzellen kompensieren und so die Einsatzdauer wesentlich erhöhen.

Tracking and Propagation

The laser propagation range of the Institute of Technical Physics (located in Lampoldshausen) provides a test range very well suited for high power laser propagation experiments as well as for testing different approaches for compensating atmospheric distortions.

One example is the application of a fine tracking approach on the test range which was able to reduce the beam positioning instability to less than $1 \mu\text{rad}$ – this is equivalent to less than 1 mm over a distance of 1 km.

Applications

An important application of long range laser effectors in the field of security technology is the protection of installations against mortar shells or rockets. It is also possible to use a laser effector to protect airplanes during take off or landing against surface-to-air missiles.

Another possible field of application is power transmission by radiation ("power beaming"). One example could be solar powered UAVs, which could now operate during the night thanks to power beaming (e.g. for traffic control, environmental monitoring or as communication relays). Also satellites could be powered from the ground in such a way. Power beaming to satellites could be of special interest to compensate the degradation of solar panels and increase the mission time significantly.



DLR

**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