

## Raketenantriebe - von Ziolkowski bis Warp-Antrieb (Teil2/3)

Bei **Elektrischen Triebwerken** wird das Stützmedium (Gas) durch elektrische Energie hoch erhitzt und gerichtet ausgestoßen. Allerdings können diese Triebwerke nur einen geringen Schub erzeugen, weshalb sie nicht bei Trägerraketen, sondern nur bei Satelliten (im Erdorbit) und Sonden (außerhalb des Erdorbits) zum Einsatz kommen. Befindet sich der Raumflugkörper in relativer Sonnennähe, lässt sich die Elektroenergie am günstigsten durch Solarzellen bereitstellen.

Nach dem Funktionsprinzip unterscheidet man in:

- **Elektrothermische** Antriebe  
Erhitzung des Treibstoffs (z.B. Wasserstoff oder Ammoniak) durch Widerstandsheizung oder Lichtbogen und Beschleunigung mittels Düse
- **Elektromagnetische** Antriebe  
Erhitzung des Treibstoffs wie oben und Beschleunigung des Plasmas in einem elektromagnetischen Feld
- **Elektrostatische** Antriebe  
Verdampfung (soweit erforderlich) und Ionisation des Treibstoffs (Quecksilber, Alkali-elemente, Edelgase) und Beschleunigung der Ionen in einem elektrostatischen Feld. Zur Vermeidung einer elektrischen Aufladung des Triebwerkes werden die Ionen hinter der Beschleunigungsstrecke mittels der bei der Ionisation entfernten Elektronen wieder neutralisiert.

Elektrothermisch und elektromagnetische Antriebe werden zu **Plasmaantrieben** zusammengefasst. Elektrostatische (auch Ionentriebwerke genannt) haben unter den elektrischen Raketenantrieben den weitesten Entwicklungsstand erreicht und sind seit 1990 im Einsatz.

Sehr erfolgreich eingesetzt wurde ein Ionentriebwerk bei der amerikanischen Asteroiden-Mission „Deep Space 1. Heute werden Ionentriebwerke vor allem genutzt, um die Umlaufbahnen von geostationären Satelliten stabil zu halten. Wegen der in Sonnennähe zur Verfügung stehenden Sonnenenergie sind die Ionentriebwerke auch für Missionen zu den Planeten Venus und Merkur sehr gut geeignet <sup>1</sup>.

In den USA wird an der Entwicklung eines neuartigen sogenannten magnetoplasma-dynamischen Antriebes (Sonderform des elektromagnetischen Triebwerks) unter der Bezeichnung VASIMIR (variable

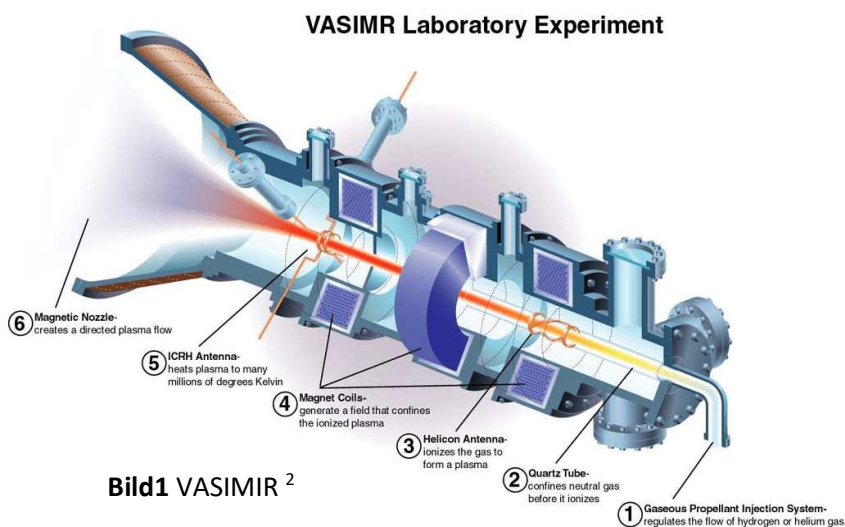
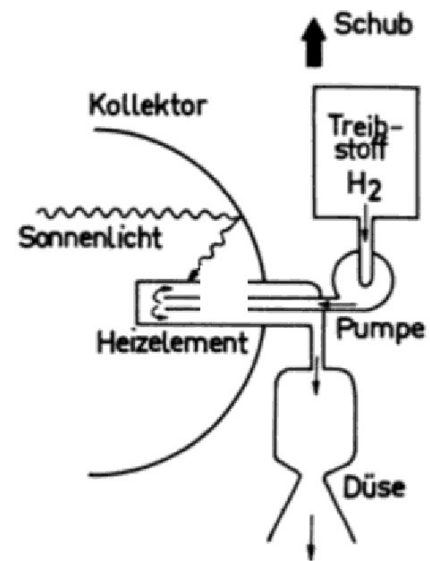


Bild1 VASIMIR <sup>2</sup>

specific impulse magnetoplasma rocket) gearbeitet (Bild 1). In getrennten Kammern wird das Plasma erzeugt, dann weiter erhitzt und schließlich in einer Düse beschleunigt. Damit kann das Verhältnis von spezifischem Impuls und Schub variiert werden (ähnlich der Getriebe-schaltung eines Autos). Ein Raumfahrzeug könnte

dadurch mit hohem Schub das Schwerfeld eines Planeten verlassen und anschließend durch Steigerung des Impulses eine hohe Geschwindigkeit über lange Strecken erreichen. Reisen innerhalb des Sonnensystems könnten damit wesentlich verkürzt werden (z.B. zum Mars in ca. 40 Tagen statt in 6 Monaten). Ein Hauptproblem bei der Entwicklung ist die Bereitstellung der erforderlichen hohen elektrischen Leistung.

Ein **Solarthermisches Triebwerk** (SOTV = Solar Orbiter Transfer Vehicle) befindet sich in Entwicklung (**Bild 2**). Hierbei wird durch zwei Parabolspiegel mittels der Sonnenstrahlung ein Graphitblock hoch erhitzt. Durch ihn strömt das Antriebsmittel (z.B. Wasserstoff). Als potentielle Anwendung wird der Wechsel von einer erdnahen in eine geostationäre Umlaufbahn (Satellit steht immer über dem gleichen Punkt auf der Erde) gesehen. Diese Triebwerksart ist besonders in der Nähe der Sonne geeignet.



**Bild 2** Schema eines Solarthermischen Triebwerks<sup>3</sup>

**Sonnensegel** unterscheiden sich grundsätzlich von den vorgenannten Antriebsprinzipien (**Bild 3**). Sie erzeugen nicht selbst die Antriebskraft, sondern nutzen den Strahlungsdruck der Sonne. Dieses Prinzip kennt man von Segelschiffen, die vom Wind angetrieben werden. Da die Antriebskraft wegen der geringen Masse der Teilchen (hauptsächlich Photonen/Licht) extrem gering ist, werden sehr große Flächen und lange Zeiten benötigt, um selbst kleine Massen merklich zu beschleunigen. Die Strahlungsintensität hängt quadratisch vom Sonnenabstand ab, so dass bei nahen Vorbeiflügen an der Sonne größere Beschleunigungen erreicht werden können. Schon Ziolkowski hatte 1924 ähnliche Ideen entwickelt. Seit 1993 wurde von verschiedenen Ländern eine Vielzahl von Systemen erprobt, u.a. wurde im August 2019 nur mittels eines Sonnensegelantriebs die Flughöhe eines Kleinstelliten in vier Tagen um knapp 2 km erhöht. Erstmals im Vakuum erprobt wurde diese Antriebsart von der japanischen Raumsonde IKAROS. Das Sonnensegel erzeugte dabei eine Geschwindigkeitserhöhung von 100m/s. Weitere Versuche folgten, wobei wichtig. Der kleine amerikanische Satellit LightSail 2 konnte mithilfe seines Sonnensegels sein Apogäum (größte Entfernung der Erdumlaufbahn) um ca. 2 km anheben. Dies war der erste erfolgreiche Versuch mit einem Sonnensegel in der Erdumlaufbahn. Die besonderen

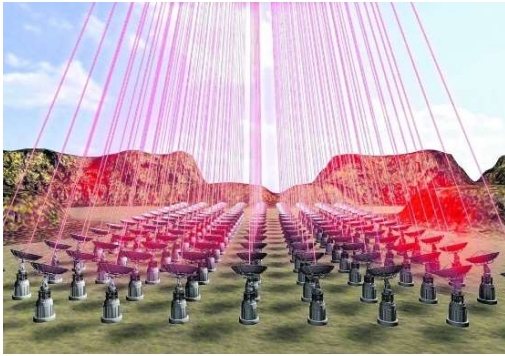


**Bild 3** Raumfahrt mit Licht<sup>4</sup>

technischen Herausforderungen des Sonnensegels sind ultraleichte Materialien für das Segel, sicheres Ausklappen des Segels sowie die stabile Formhaltung des Segels und seine Ausrichtung auf die Sonne. Geplant ist auch die Nutzung des Sonnenwindes als Gegenwind, also so wie man das Kreuzen gegen den Wind von der Schifffahrt kennt. Dies erfordert aber eine ausgeklügelte Steigerung zur Optimierung des Ausnutzens des Sonnenwindes<sup>5</sup>.

Eine Variation des vorgenannten Prinzips stellt das 2016 vorgestellte Forschungs- und Entwicklungsprojekt **Breakthrough Starshot** (Durchbruch Sternenschuss) dar, bei dem Kleinraumflugkörper mit Lichtsegeln mittels sehr starkem Laserlicht auf ein Fünftel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und zum nächstgelegenen Sternensystem Alpha Centauri geschickt werden sollen (**Bild 4**). Dort ermittelte Daten sollen dann zur Erde zurückgesendet werden.

Entwicklungs- und Reisezeit werden auf jeweils 20 Jahre geschätzt. Dazu kommt noch die Signallaufzeit (Abstand zu Alpha Centauri ca. 4,4 Lichtjahre). Trotz prominenter Unterstützer (u.a.



**Bild 5** Laserstrahlatterie zur Beschleunigung der Minisatelliten (künstlerische Darstellung) <sup>7</sup>

Stephen Hawking (†), Mark Zuckerberg, Juri Milner – russischer Milliardär) dürfte es aber noch ein

weiter Weg bis zu einer Umsetzung sein. Der Laser ist auf der Erde oder dem Mond stationär aufgebaut, so dass keine Triebwerke und kein Treibstoff zum Antrieb des Satelliten notwendigerweise in einen Orbit transportiert werden müssen (**Bild 5**). Eine besondere Herausforderung sind auch hier die Materialien, die durch den Laser stark erhitzt werden. Der Laser darf das Segel nicht zerstören.



**Bild 4** Minisatellit <sup>6</sup>

Die Laser können vielfach für weitere Satellitenmissionen wiederverwendet werden.

#### Quellen:

- <sup>1</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Ionenantrieb>
- <sup>2</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetoplasmadynamischer\\_Antrieb](https://de.wikipedia.org/wiki/Magnetoplasmadynamischer_Antrieb)
- <sup>3</sup> <https://books.google.de/books?id=SeaBwAAQBAJ&pg=PA13&lpg=PA13&dq=entwicklung+Solarthermischer+Triebwerke&source=bl&ots=oEAIxz1Je5&sig=ACfU3U0x7mPMCgFkRLlj7u3u0CUIHl1xyw&hl=de&sa=X&ved=2ahUKewjqqJqCpPpAhWBy6QKHcZ9BfkQ6AEwCHoECAoQAg#v=onepage&q=entwicklung%20Solarthermischer%20Triebwerke&f=false>
- <sup>4</sup> <https://www.br.de/mediathek/podcast/iq-wissenschaft-und-forschung/raumfahrt-mit-licht-wie-realistisch-ist-ein-antrieb-mit-sonnenenergie/1671917>
- <sup>5</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnensegel\\_\(Raumfahrt\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnensegel_(Raumfahrt))
- <sup>6</sup> <https://www.businessinsider.com/breakthrough-starshot-sprite-spacecraft-launch-2017-7?r=DE&IR=T>
- <sup>7</sup> <https://www.br.de/mediathek/podcast/iq-wissenschaft-und-forschung/raumfahrt-mit-licht-wie-realistisch-ist-ein-antrieb-mit-sonnenenergie/1671917>

Fortsetzung folgt ...