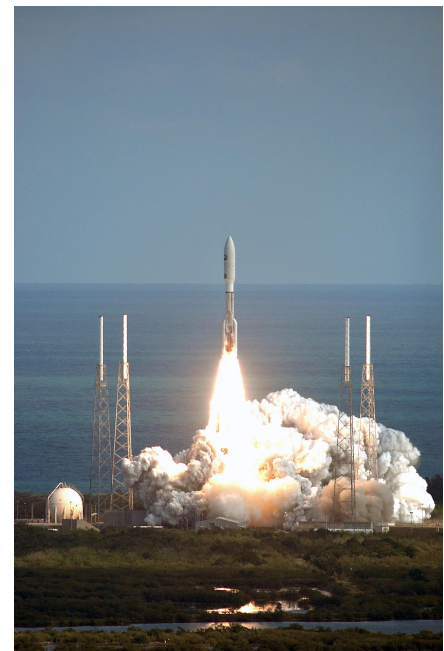


# Antriebsmethoden für die Raumfahrt

**Antriebsmethoden für die Raumfahrt** sind Techniken zur Geschwindigkeitsänderung von Flugkörpern (wie Raumfahrzeugen) im Weltraum. Es existieren sehr verschiedene Varianten mit zahlreichen Vor- und Nachteilen, als auch sehr unterschiedlichen Technologischen Reifegraden. Darunter technisch nahezu ausgereifte, in der Entwicklung befindliche und als auch nur theoretisch vorgeschlagene bzw. simulierte Methoden. Das Fachgebiet ist Schauplatz aktueller Forschung sowie zahlreicher populärwissenschaftlicher Spekulationen.

Bei den heute verwendeten Antrieben handelt es sich ausschließlich um Rückstoßantriebe im Rahmen des dritten Newtonschen Axioms. Von diesen in der Praxis befindlichen Raketenantrieben sind die häufigsten die chemischen Antriebe (Wärme- und Kinetikmaschinen mit Verbrennung), worunter die Feststoff- und Flüssigkeitstriebwerke fallen. Es gibt in der Gruppe der Raketentriebwerke auch elektrische und nukleare Varianten, sowie Ausführungen mit Kaltgas.

Im folgenden Übersichtsartikel werden als Alternativkonzepte zu den Raketenantrieben Start- und Abschussmechanismen, Methoden ohne Treibstoffbedarf sowie theoretische Methoden behandelt.



Start der Atlas V 551 mit New Horizons an Bord mit chemischen Raketenantrieb. Ein RD-180 und fünf Feststoffbooster.

## Notwendigkeit

Um eine stabile Umlaufbahn um die Erde (oder einen anderen Körper) einzunehmen, ist das Erreichen der ersten kosmischen Geschwindigkeit notwendig. Körper im All selbst bewegen sich auf Keplerbahnen. Um den Orbit eines Körpers zu ändern, ist eine Geschwindigkeitsänderung nötig. Dieses  $\Delta v$  muss gemäß der Ziolkowski-Gleichung von dem Raumfahrzeug aufgebracht werden:

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_1}$$

Dabei ist  $\Delta v$  die Geschwindigkeitsänderung,  $v_e$  die effektive Ausströmgeschwindigkeit,  $m_0$  die Startmasse und  $m_1$  die Brennschlussmasse. Die effektive Ausströmgeschwindigkeit ergibt sich aus dem spezifischen Impuls:

$$v_e = I_{sp} \cdot g_0$$

Wobei  $g_0$  die Fallbeschleunigung der Erde ist.

Da zum Erreichen eines Zieles in der Regel das mehrmalige Wechseln der Umlaufbahn nötig ist, kann ein so genannter *delta-v-Bedarf* definiert werden, welcher die Summe aller Geschwindigkeitsänderungen ist, die das Raumschiff aufbringen muss, um zum Ziel zu gelangen. Wie aus den Formeln ersichtlich ist, sollte der spezifische Impuls möglichst groß sein, um die Startmasse möglichst klein zu halten.

## Antriebskonzepte

Das Ziel eines Antriebes ist die Bereitstellung von  $\Delta v$ , das heißt Geschwindigkeitsänderung des Raumfahrzeugs. Da in der Raumfahrt sehr große Distanzen überbrückt werden müssen, sollte auch die Geschwindigkeit des Raumschiffes sehr groß sein und somit auch der spezifische Impuls des Antriebssystems. Andererseits sollte ein Antriebssystem auch nennenswerte Schubkraft erzeugen, um die Reisezeit so kurz wie möglich zu halten. Dies ist besonders bei bemannten Missionen wichtig.

Die Auflistung ist folgendermaßen aufgebaut:

- Technologischer Reifegrad / Verwendungszweck: fliegt bereits ("F"; TLR: 8-9), erforscht ("E"; TLR: 3-7), theoretisch ("T"; TLR 0-2)
- Erläuterung und Überblick, *Details im Fachartikel*
- Isp: ungefähre maximaler spezifischer Impuls
- Schub: ungefähre Schubbereich des Antriebssystems in Newton.

## Gasantrieb

Hier wird Inertgas unter Druck gespeichert. Der Druck ist eine (oder die einzige) Energiequelle des Treibstoffes.

### Kaltgasantrieb

*Verwendung: Lageregelung (F)*

Beim Kaltgasantrieb wird ein unter Druck stehendes Gas, aufgrund der hohen Masse meist Stickstoff, aus einem Behälter über Düsen entspannt.

- Isp:  $\approx 68$  s
- Schub:  $\approx 111$  N

### Solarthermisch

*Verwendung: Antrieb (E)*

Bei einem solarthermischen Antrieb konzentrieren zwei aufblasbare Parabolspiegel die Sonnenstrahlung auf einen Graphitblock, durch den Wasserstoff geleitet wird, der dadurch auf etwa 2800 Kelvin aufgeheizt wird.

- Isp: 900 s
- Schub: 1–100 N

### Lightcraft

*Verwendung: Start von Kleinsatelliten (E)*

Das Konzept des Lightcrafts ist eine Art Antrieb durch Laser: Das Raumfahrzeug bekommt durch einen auf der Erdoberfläche befindlichen Laser oder Maser Energie zur Beschleunigung zugeführt. Der Strahl trifft dazu auf einen Reflektor und erzeugt dort hohe Temperaturen, was zur Expansion des am Reflektor befindlichen Treibstoffes führt; die Ausdehnung des Treibstoffes übergibt einen Teil des Impulses an den Flugkörper. Beim Flug innerhalb der Erdatmosphäre sollen die darin befindlichen Gase ausreichen, sodass der Treibstoff des Flugkörpers erst in größeren Höhen notwendig wird. Das Konzept soll für Kleinsatelliten verwendet werden. Das momentan größte Hindernis ist, dass die benötigte Laserstärke nicht bereitgestellt werden kann.

- Isp: unbekannt
  - Schub: unbekannt
-

## Chemische Antriebe

Chemische Antriebe beziehen ihre Energie aus der exothermen Reaktion von chemischen Elementen. Die Abgase werden anschließend durch eine Lavaldüse entspannt. Chemische Antriebe sind schubstark, haben aber eine im Vergleich mit anderen Antrieben geringe Ausströmgeschwindigkeit.

### Feststoff

*Verwendung: Start, Antrieb (F)*

Bei den existierenden chemischen Varianten liegt beim Feststoffraketenantriebwerk der Treibstoff in fester Form vor, der Treibstofftank ist hierbei auch die Verbrennungskammer. Festtreibstoffe können homogene oder auch heterogene Feststoffe (Composits) sein, die neben dem Brennstoff und dem Oxidator noch andere Zusätze (Stabilisatoren) enthalten. Für Feststoffraketen, wie sie in der Raumfahrt üblich sind, werden meistens spezielle gießfähige Gemische aus Ammoniumperchlorat (APCP) oder Natrium- bzw. Ammoniumnitrat, Aluminiumpulver, Kunstharz (Polybutadiene, Polyurethane etc. als Bindesubstanz) und eventuell geringen Mengen Eisenoxid als Katalysator verwendet. Diese ergeben nach dem Gießen einen festen, aber plastischen Körper (Treibsatz), was Riss- und Lunkerbildung stark vermindert und so die Transport und Handhabung sehr sicher macht. Zunehmend wird anstelle oder zusätzlich zu Aluminium auch Lithium, Beryllium, Bor oder Magnesium verwendet.

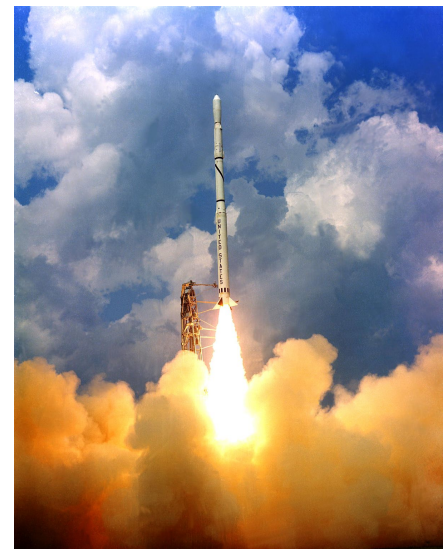
- Isp: 265 s
- Schub: 1–1000 kN

### Monergol

*Verwendung: Lageregelung, Antrieb (F)*

Bei monergolen Flüssigtreibstoffen handelt es sich um nur eine flüssige Komponente. Monergole werden durch das Hinzubringen eines Katalysators zum Zerfall gebracht, weswegen für Monergole auch der Begriff Katargole zulässig ist. Ein Beispiel für ein Katargol ist Hydrazin, welches zum Beispiel für Lageregelungssysteme von Raumflugkörpern verwendet wird. Hierbei wird Hydrazin mit Hilfe eines Katalysators (Aluminiumoxid) zu Stickstoff und Wasserstoff zersetzt.

- Isp: 222 s
- Schub: 0,1–100 N



Start einer Scout-Feststoffrakete

Monergole weisen i.d.R. eine schlechtere Effizienz als Diergole aus, d. h. sie benötigen für dasselbe *Delta-V* mehr Treibstoff, allerdings können sie dies wieder durch weniger komplexe Systeme und geringere Systemmasse ausgleichen (z. B. Wegfall des Pumpensystems der zweiten Treibstoffkomponente). Erst bei langen Missionen, bei denen viel Treibstoff benötigt wird, reicht dies nicht mehr.

### Diergol

*Verwendung: Lageregelung, Antrieb, Start (F)*

Bei Diergolen existieren zwei Komponenten des Treibstoffes, die gesondert gelagert werden. Der Treibstoff wird unmittelbar vor dem Verbrennungsprozess gesteuert in eine Brennkammer gepumpt. Dort reagieren die Stoffe miteinander.

- Isp: 450 s
- Schub: 0,1–1000 kN



Testlauf eines SSME-Triebwerks als Beispiel eines Diergol-Antriebs

### Triergol

*Verwendung: Antrieb, Start (E)*

Triergolsysteme (Dreistoffsysteme) enthalten Diergolsysteme (zwei Komponenten), denen noch zusätzlich Wasserstoff oder Metallpulver (Lithium, Aluminium, Beryllium) zur Erhöhung des spezifischen Impulses zugeführt wird. Diese Treibstoffsysteme wurden zwar bisher gut untersucht, jedoch wegen des drei Tanks benötigenden komplexen Aufbaus von Triebwerk und Rakete nie praktisch eingesetzt.

- Isp: 500 s
- Schub: 1–1000 kN

### Hybridrakete

*Verwendung: Antrieb (E), Start (F)*

Bei Hybridraketenantrieben liegt sowohl flüssiger als auch fester Treibstoff vor. Als Hybridtreibstoff (Lithergol) bezeichnet man eine Mischantrieb aus einem festen Treibstoff, meistens aus Kunststoff, zum Beispiel Hydroxyl-Terminierte Poly-Butadien (HTPB) oder Lithiumhydrid und einem flüssigen Oxidator. Dieser ist meistens Salpetersäure, flüssiger Sauerstoff, Distickstoffmonoxid oder eine Mischung aus flüssigem Sauerstoff und flüssigem Fluor (FLOX). Der flüssige Treibstoff wird dem Festen kontrolliert zugeführt. Damit wird die Regel- und Abschaltbarkeit des Triebwerks hergestellt, was bei reinen Feststoffraketen technisch nicht möglich ist.

- Isp: 420 s
- Schub: 5–1000 kN

## Luftatmend

*Verwendung: Start (E)*

Ein luftatmendes Raketentriebwerk wird zum Aufstieg aus der Erdatmosphäre benutzt. Der Vorteil ist, dass der Luftsauerstoff als Oxidator benutzt werden kann und nicht mitgeführt werden muss. Für große Höhen muss allerdings weiterhin ein Oxidator mitgeführt werden, da der Luftsauerstoff zum Betrieb des Triebwerks nicht mehr ausreicht.

- Isp: 450–2800 s
- Schub:  $\approx 300$  kN



Das X-30 war als luftatmendes Raumflugzeug geplant

## Allotrope

*Verwendung: Start, Antrieb (E)*

Die Verwendung des Sauerstoffallotrops Ozon als Oxidator würde die Ausströmgeschwindigkeit erhöhen. Da Ozon aber instabil ist, ist eine Lagerung sehr schwer wenn nicht unmöglich. Das Allotrop Tetrasauerstoff soll stabiler sein. Damit wären spezifische Impulse von bis zu 564 s im Vakuum möglich.

- Isp: 500–564 s
- Schub: 1–1000 kN

## Metastabile Elemente

*Verwendung: Start, Antrieb (E)*

Man versucht ebenfalls, metastabile Wasserstoffradikale als Treibstoff zu verwenden. Um die Stabilität des Elements zu erhöhen, werden sie unter den flüssigen Wasserstoff gemischt. Wird diese Kombination (mit theoretischen 15,4 % Radikalen) mit flüssigem Wasserstoff verbrannt, können spezifische Impulse von bis zu 750 s im Vakuum entstehen. An der Universität d'Orsay in Paris wurde testweise metastabiles Helium erzeugt und als Bose-Einstein-Kondensat gespeichert. Die Reaktion von metastabilem Helium zu Helium würde spezifische Impulse von 2825 s möglich machen.

- Isp: 750–2825 s
- Schub:  $\approx 1000$  kN

## Elektrische Antriebe

Elektrische Antriebe verwenden elektrische Energie, um ein Raumschiff anzutreiben. Dies kann durch Aufheizung oder Ionisierung des Treibstoffes (hier Stützmasse genannt) geschehen. Generell sind elektrische Antriebe schubschwach, ein Start von der Oberfläche eines Planeten ist damit unmöglich. Um möglichst hohe Leistungen zu erbringen, muss auch die Energiezufuhr möglichst groß sein. Die Energie kann durch Solarzellen oder Radioisotopengeneratoren und, bei großen Energiemengen, durch Kernreaktoren erzeugt werden.

### Widerstandsbeheiztes Triebwerk

*Verwendung: Lageregelung, Bahnregelung (F)*

Bei einem widerstandsbeheizten Triebwerk wird der Treibstoff durch einen stromdurchflossenen Widerstand aufgeheizt. Dies kann zum Beispiel ein Wolframdraht sein, das Prinzip gleicht dem eines Tauchsieders.

- Isp: 1000 s
- Schub: 152 mN @ 1 kW

### Thermisches Lichtbogentriebwerk

*Verwendung: Lageregelung, Bahnregelung, Antrieb (F)*

Zwischen einer Kathode und einer Anode wird ein thermischer Lichtbogen gebildet. Durch den Lichtbogen fließt der Treibstoff, welcher dadurch stark aufgeheizt wird (ca. 5.000 K). Das heiße Gas wird anschließend durch eine Düse expandiert. Der Schub wird nur durch den thermischen Effekt der Expansion erzeugt und nicht durch Magnetfelder (im Unterschied zum MPD).

- Isp: 2000 s
- Schub: 3,35 N @ 30 kW

### Feldemissionstriebwerk

*Verwendung: Lageregelung (F)*

Das Feldemissionstriebwerk verwendet zwei sehr nahe beieinander liegende Platten, zwischen denen ein flüssiges Metall (Cäsium) durch Kapillarkräfte zur Spitze fließt. Die Platten sind positiv geladen. In etwas Abstand zur Spitze befinden sich zwei weitere Platten, die negativ geladen sind. Das elektrische Feld zwischen beiden ionisiert den Treibstoff und beschleunigt ihn. Dieses Triebwerk kann sehr schubschwach und leicht sein.

- Isp: 12.000 s
- Schub: 1 mN @ 60 W

### Ionen-Triebwerke

*Verwendung: Lageregelung, Bahnregelung, Antrieb (F)*

Die Radiofrequenz-Ionen-Triebwerke (RIT) erzeugen durch elektromagnetische Wellen ein Plasma, die positiv geladenen Teilchen werden anschließend durch Gitter nach außen beschleunigt. Nach der Passage des sogenannten Neutralisators, der dem Strahl wieder Elektronen zuführt und ihn somit elektrisch neutral macht, werden die Teilchen ausgestoßen. Als Stützmasse wird Xenon verwendet. Das HiPEP der NASA fällt in diese Kategorie, ebenso die RIT-Triebwerke aus Deutschland.<sup>[1]</sup>

- Isp: 6000–9150 s
- Schub: 600 mN @ 34,6 kW



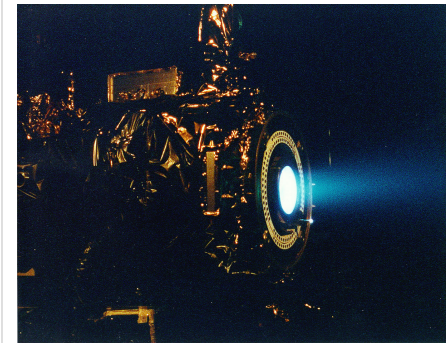


### Kaufmann-Triebwerk

*Verwendung: Lageregelung, Bahnregelung, Antrieb (F)*

Das Kaufmann-Triebwerk erzeugt durch einen Lichtbogen ein Plasma, die positiv geladenen Teilchen werden anschließend durch Gitter nach außen beschleunigt. Nach der Passage des sogenannten Neutralisators, der dem Strahl wieder Elektronen zuführt und ihn somit elektrisch neutral macht, werden die Teilchen ausgestoßen. Als Treibstoff wird Xenon oder Quecksilber verwendet. Das NSTAR der NASA ist ein solches Triebwerk.

- Isp: 3100 s
- Schub: 92 mN @ 2,6 kW



Test eines NSTAR-Triebwerks

### Hallantrieb

*Verwendung: Lageregelung, Bahnregelung, Antrieb (F)*

Halltriebwerke (Hall-Effect-Thruster) bestehen aus einem ringförmigen Beschleunigungskanal, der durch konzentrisch gelegene Magneten von einem Magnetfeld durchzogen ist. An einem Ende befindet sich eine Hohlkathode. Eine extern angebrachte Kathode fungiert als Quelle für Elektronen, welche durch den Potentialunterschied zur Anode beschleunigt, und im starken Magnetfeld gefangen werden. Zusätzlich kommt es zu einer Azimutaldrift durch den Hall-Effekt. Durch die Hohlkathode wird der neutrale Treibstoff eingespeist, und durch Stöße mit den gefangenen Elektronen ionisiert. Das zwischen den Elektroden wirkende elektrische Feld beschleunigt diese Ionen, so dass diese mit hoher Geschwindigkeit ausgestoßen werden können. Zur Neutralisation des Ionenstrahls fungieren Elektronen, die ebenfalls von der Kathode emittiert werden. Als mögliche Treibstoffe kommen vor allem Edelgase wie Xenon, Krypton oder Argon in Frage, ebenso aber auch metallische Treibstoffe wie Bismut, Zink oder Magnesium. Es werden 2 Arten von Hallantrieben unterschieden: SPT (Stationary Plasma Thruster) sowie TAL (Thruster with Anode Layer), die sich vor allem in Materialien und Geometrie unterscheiden. Bisher wurden vor allem SPT auf zahlreichen Satellitenmissionen eingesetzt, u.a. auch auf der ESA-Mission SMART-1.<sup>[2][3]</sup>

- Isp: 1640 s
- Schub: 68 mN @ 1,2 kW

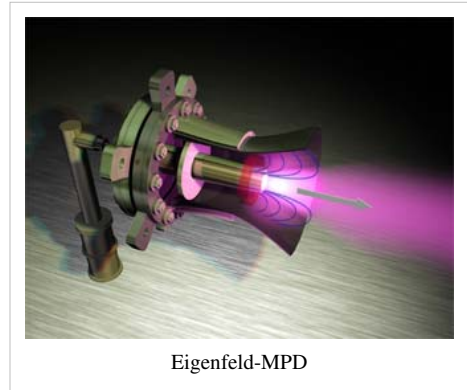


Hallantrieb in Betrieb

## Magnetoplasmadynamisches Triebwerk

*Verwendung: Bahnregelung (F), Antrieb (E)*

Magnetoplasmadynamische Triebwerke (MPD) bestehen aus einer trichterförmigen Anode, in deren Mitte eine stabförmige Kathode angebracht ist. Wird Spannung zwischen beiden Elektroden angelegt, wird die sich im Trichter befindende Stützmasse ionisiert und erlaubt so einen Stromfluss radial durch das Gas zur Kathode. Durch den Stromfluss wird nun ein starkes Magnetfeld erzeugt. Die Leistung kann durch das Anlegen eines weiteren externen Magnetfeldes gesteigert werden. Die Wechselwirkung zwischen dem elektrisch erzeugten Magnetfeld um die Brennkammer und den ionisierten Plasmateilchen beschleunigt diese in axialer Richtung und lässt sie mit hoher Geschwindigkeit entweichen. Als Grundlage für das Plasma eignen sich vor allem Argon, Lithium und Wasserstoff.



- Isp:  $\approx 4000$  s
- Schub:  $\approx 300$  mN @ 12 kW

## Gepulstes Plasmatriebwerk

*Verwendung: Lageregelung (F), Bahnregelung, Antrieb (E)*

Gepulste Plasmatriebwerke (Pulsed Plasma Thruster) sind Raumfahrtantriebe, die instationär oder quasistationär (gepulst) betrieben werden können. Dazu werden Kondensatoren als Energiespeicher mitgeführt. Der Aufbau ähnelt einer Railgun. Als Treibstoff wird meist PTFE verwendet, welches in fester Form vorliegt. Die zu Schienen geformten Elektroden werden unter Spannung gesetzt, und mittels einer Zündkerze wird die Hauptentladung des Kondensators gestartet. Dabei wird von der Treibstoffoberfläche eine kleine Menge ablatiert und ionisiert. Die dabei entstehende Plasmawolke wird entweder durch elektromagnetische Lorenzkraft, oder durch gasdynamische Kräfte beschleunigt um Schub zu erzeugen. Die von der Spannungsquelle zwischen den Pulsen bezogene elektrische Leistung ist vergleichsweise gering. Von dieser unterscheidet sich die Pulsleistung zur Einkopplung ins Plasma, welche durch sehr kurze Entladungsdauern einige Megawatt betragen kann.

- Isp: 2500 s
- Schub: 1 mN @ 60 W

## PIT

*Verwendung: Antrieb (E)*

Das Induktive Flachspulentriebwerk (Pulsed Inductive Thruster) ist ein gepulstes Triebwerk. Eine flache Ansammlung von Spulen ist mit Kondensatoren verbunden. Zuerst wird gasförmiger Treibstoff (meist Argon, auch Ammoniak) auf die Spulen geblasen. Dann werden die Kondensatoren schlagartig entladen, der Treibstoff wird zu Plasma. Das Magnetfeld der Spulen induziert ein Gegenfeld im Plasma, das dadurch fortgeschleudert wird.

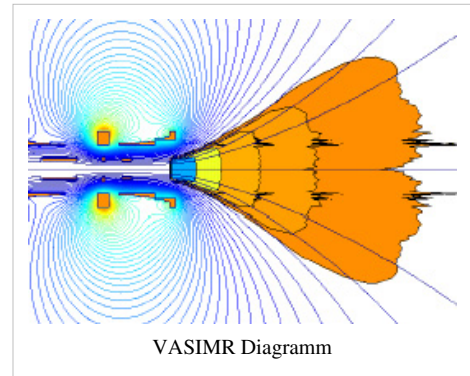
- Isp: 2000–8000 s
- Schub:  $\approx 92$  mN @ 20 kW<sup>[4]</sup>



## VASIMR

*Verwendung: Antrieb (E)*

Relativ neu ist das Antriebskonzept des früheren Astronauten Franklin Ramon Chang-Diaz. Seine *Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket (VASIMR)* verwendet elektrische Energie, um Plasma zu erzeugen, zu erhitzen und zu beschleunigen. Der Treibstoff wird zuerst mit RF-Antennen ionisiert, dann mit RF-Antennen erhitzt. Anschließend wird das Plasma durch eine magnetische Düse entspannt. Damit ist eine Variation des Verhältnisses zwischen spezifischem Impuls und Schub möglich, analog zu der Getriebebeschaltung eines Radfahrzeugs.



- Isp: 5.000–30.000 s
- Schub: 5 N @ 5.000 s & 200 kW

## Magnetfeldoszillationsantrieb

*Verwendung: Antrieb (E)*

Der Magnetfeldoszillationsantrieb (Magnetic Field Oscillating Amplified Thruster) verwendet Alfvén-Wellen, um durch veränderliche Magnetfelder in elektrisch leitfähigen Medien (z. B. Plasma, salziges Wasser etc.) Dichtewellen hervorzurufen. Diese Wellen sind in der Lage, Teilchen im Medium mit sich mitzureißen und sie auf sehr hohe Geschwindigkeiten (bzw. hohe Energien) zu beschleunigen. Dazu besteht das gesamte MOA-System aus Plasmaquelle, Zentralrohr, Primärspule, Sekundärspule und einer Versorgungs- und Steuerungseinheit. Die Plasmaquelle erzeugt einen kontinuierlichen Strom ionisierter Teilchen, die im Zentralrohr in Richtung Austrittsdüse driften. Diese Teilchen können z. B. Stickstoff- oder Wasserstoffmoleküle, aber auch Atome der Edelgase Argon oder Xenon sein. Da sie ionisiert sind, reagieren sie auf die beiden Magnetfelder, welche durch die Primär- und die Sekundärspule aufgespannt werden. Dabei ist die Primärspule permanent in Betrieb und formt die magnetische Austrittsdüse, während die Sekundärspule zyklisch ein- und ausgeschaltet wird, um die Feldlinien im Gesamtsystem zu deformieren. Diese Verformung erzeugt die Alfvén-Wellen, welche im nächsten Schritt dem Transport und der Kompression des Antriebsmediums dienen.

- Isp: 2.400–13.120 s
- Schub: 237–13 mN @ 11,16 kW<sup>[5]</sup>

## HDLT

*Verwendung: Antrieb (E)*

Der Helicon Double Layer Thruster wurde an der Australian National University erfunden. Der Antrieb wird mit Hilfe der ESA weiterentwickelt. Beim HDLT wird ein Gas in ein divergierendes magnetisches Feld, welches eine Düse formt, gebracht und mit RF-Antennen ionisiert. Das dadurch entstehende Plasma wird dadurch herausbeschleunigt. Als Treibstoff kommen Argon, Wasserstoff oder Krypton zum Einsatz.

- Isp: 4000 s<sup>[6]</sup>
- Schub: 0,X N @ X kW

## Nukleare Antriebe

Nukleare Antriebe beziehen ihre Energie aus Kernzerfall, Spaltung, Fusion oder Annihilation. Sie sind in Bezug auf Schub *und* Ausströmgeschwindigkeit die leistungsstärksten Antriebe, aber politisch umstritten.

### Radioisotopenantrieb

*Verwendung: Antrieb (E)*

Beim Radioisotopenantrieb strömt ein Gas mit geringer molarer Masse durch ein Radioisotop, zum Beispiel  $^{238}\text{Pu}$  oder  $^{90}\text{Sr}$ . Durch den natürlichen Zerfall erwärmt sich dieses und somit auch das Gas. Das Gas wird anschließend durch eine Lavaldüse entspannt. Arbeiten dazu gab es beispielsweise im Projekt *Poodle* von 1961 bis 1965 in den USA.

- Isp: 800 s
- Schub: 1–10 N

### Festkernreaktor

*Verwendung: Antrieb (E)*

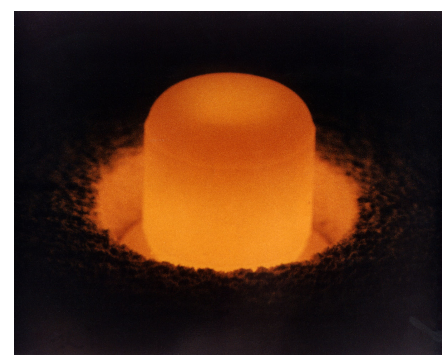
Bei den nuklearen Raketenantrieben ist der Kernspaltungsantrieb zu erwähnen, bei dem durch nukleare Reaktionen hohe Temperaturen erzeugt werden, die dann zum Ausstoß einer Stützmasse dienen. Mittels Kernspaltung wird Wasserstoff oder Ammoniak extrem erhitzt und anschließend unter Druck ausgestoßen. Dazu gehört das von 1954 bis 1972 laufende Projekt NERVA der NASA, sowie 1992 Timberwind im Rahmen der SDI-Initiative. Auch die Sowjetunion arbeitete mit dem Triebwerk RD-0410 in der Vergangenheit an Kernspaltungsantrieben mit festem Kern für die Raumfahrt.

- Isp: 1000 s
- Schub: 100–1000 kN

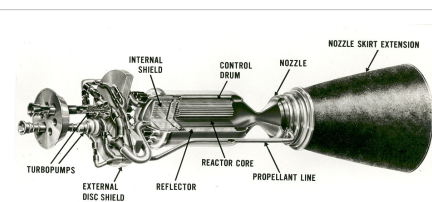
### Gaskernreaktor

*Verwendung: Antrieb (T)*

Wie oben bereits erwähnt muss die Temperatur im Reaktor erhöht werden, um die Antriebsleistung zu steigern. Da das spaltbare Material durch seine Schmelztemperatur eine natürliche Temperaturgrenze für Festkernreaktoren festsetzt, gibt es Überlegungen, Reaktoren mit gasförmigem Kern zu entwickeln, so genannte Gaskernreaktoren. Damit ließen sich Ausströmgeschwindigkeiten für Impulse bis 5000 s erzielen. Der Nachteil ist jedoch, dass der Kern offen liegt und somit stets ein Brennstoffverlust durch die Austrittsdüse vorhanden ist. Um dies zu verhindern wurden auch geschlossene Gaskernreaktoren angedacht, wo das heiße reaktive Plasma in Quarzröhren gefüllt wird. Ein Brennstoffverlust findet hier nicht statt, allerdings reduziert sich der Impuls auf 2000 s.



Durch Zerfallsenergie glühendes Pellet aus Plutoniumdioxid



NERVA Kernspaltungs-Raketentriebwerk (NASA)



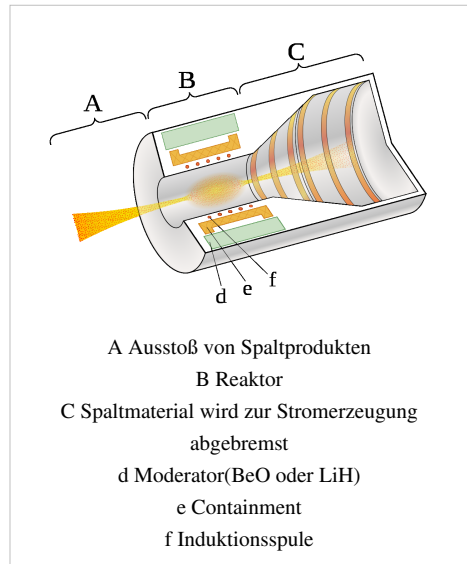
Testlauf des NRX A-1 Kernspaltungs-Raketentriebwerks (NASA, September 1964)

- Isp: 5.000 s
- Schub: 100–1000 kN

### Antrieb durch Spaltprodukte

*Verwendung: Antrieb (T)*

Da bei einem Gaskernreaktor mit offenem Kern immer ein Teil des Brennstoffes die Düse verlässt, gibt es die Möglichkeit, die Ausströmgeschwindigkeit des Antriebes weiter zu erhöhen, indem man nur die Spaltprodukte selbst ausstößt (Fission-fragment rocket). Die radioaktiven Partikel werden dabei mit Hilfe von Magnetfeldern zur Reaktion gebracht und von den Wänden ferngehalten. Die Spaltprodukte werden anschließend ausgestoßen.



- Isp: 100.000 s
- Schub: X kN

### Nuklearer Pulsantrieb

*Verwendung: Antrieb (E)*

Das Konzept wurde in den 1950er und 1960er Jahren vorgeschlagen. So haben das Orion- und Daedalus-Projekt Raumschiffe vorgesehen, die alle paar Sekunden eine nukleare Explosion am Heck auslösen. Das Raumschiff wäre dann durch die Sprengwirkung nach vorne geschoben worden. Der Vorteil eines solchen Antriebes ist die Einfachheit des Konzepts, das sich schon mit heutigen Technologien realisieren ließe, wobei letzte Fragen bezüglich des Strahlenschutzes für die Crew und das Raumschiff selbst nicht abschließend geklärt sind.

Zu Beginn der 1960er Jahre laufende Forschungen wurden aus politischen und rechtlichen Gründen, insbesondere aufgrund des Vertrages zum Verbot von Nuklearwaffentests in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser abgebrochen. Sie könnten wegen der notwendigen Vertragsänderungen nur in der internationalen Gemeinschaft wieder aufgenommen werden.

- Isp: 3.000–10.000 s
- Schub: 100–10.000 kN

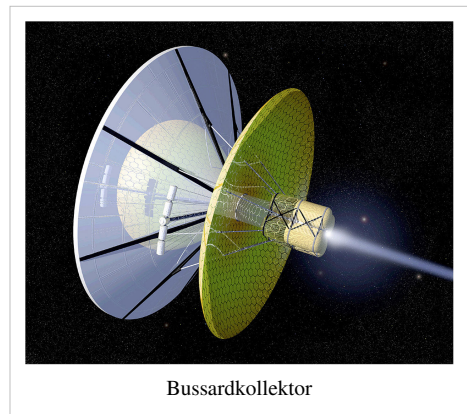


## Fusionsantrieb

Verwendung: Antrieb (T)

Dieser Antrieb ist ähnlich dem Kernspaltungsantrieb, außer dass die Energie aus Kernfusion gewonnen wird und somit wesentlich höher ist. Die Energie der Kernfusion wird mittels Neutronenstößen an ein niedermolekulares Gas, zum Beispiel Wasserstoff, weitergegeben. Die „Asche“ der Fusion wird ebenfalls in den Abgasstrahl gemischt, das dadurch entstehende heiße Plasma wird mittels einer magnetischen Düse entspannt.

Der vom Physiker Robert W. Bussard vorgeschlagene Bussard-Ramjet funktioniert ähnlich wie ein Ramjet. Ein Bussardkollektor sammelt mittels eines magnetischen Kraftfeldes interstellares Gas ein (hauptsächlich Wasserstoff) und leitet dies zu einem Polywell Kernfusionsreaktor. Die Fusionsprodukte werden anschließend ausgestoßen. Der große Vorteil dieses Konzepts ist, dass das Raumschiff nur eine bestimmte Treibstoffmenge mit sich führen muss, nämlich genug, um die Mindesteinsammelgeschwindigkeit zu erreichen. Dafür ist allerdings eine Proton-Proton-Reaktion nötig.



- Isp: 47.000 s
- Schub: 30 kN

## Photonenrakete

Verwendung: Antrieb (T)

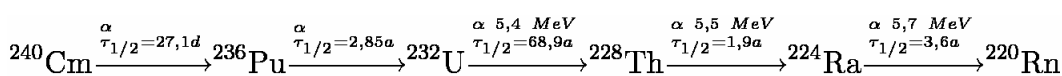
Bei einer Photonenrakete, u. a. vorgeschlagen von Eugen Sänger<sup>[7][8]</sup>, würde ein Atomreaktor eine schwarze Fläche so stark erhitzen, dass die Schwarzkörperstrahlung der Fläche Schubkraft erzeugt. Der Nachteil besteht darin, dass sehr hohe Energiemengen notwendig sind, um winzigste Schubkräfte zu erzeugen. Da die Rakete durch die Kernspaltung/-fusion/-annihilation Masse verliert, sind die spezifischen Impulse niedrig. Der Radiator (die schwarze Fläche) würde aus Wolfram oder Graphit bestehen. Photonenraketen sind technologisch machbar, aber ineffektiv.

- Isp: reaktorabhängig
- Schub:  $\approx 300 \text{ MW/N}$

## Fissionssegel

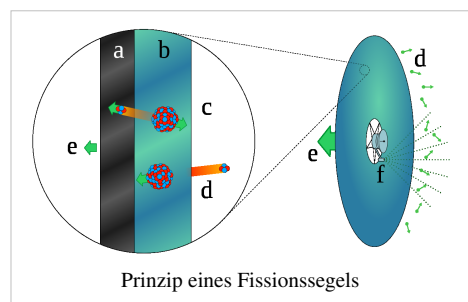
Verwendung: Antrieb (T)

Das Fissionssegel wurde von Robert L. Forward vorgeschlagen. Dabei wird eine möglichst große und möglichst leichte strahlungsabsorbierende Fläche auf einer Seite mit Radioisotopen, am besten Alpha-Strahlern, beschichtet. Durch den natürlichen Zerfall der Radioisotope werden Helium-Kerne (Alphastrahlung) frei, die nur in eine Richtung davonfliegen können. Das Prinzip ähnelt einem Sonnensegel, funktioniert aber auch ohne Sonnenlicht. Das Segel kann zum Beispiel mit  $^{240}\text{Cm}$  beschichtet werden, das in Kernspaltungsreaktoren als Abfallprodukt anfällt, so dass folgende Reaktion abläuft:



wobei das Endprodukt  $^{220}\text{Rn}$  gasförmig ist und entweicht. Damit lassen sich ungefähr folgende Leistungsdaten erzielen:

- Isp:  $\approx 40.000 \text{ s}$



- Schub:  $\approx 10 \text{ N/km}^2$

### **Nukleare Salzwasserrakete**

*Verwendung: Antrieb (T)*

Die nukleare Salzwasserrakete wurde von Robert Zubrin vorgeschlagen. Dabei wird Wasser ein wenig (20 %) Uran- oder Plutoniumsalz beigemischt. Damit die kritische Masse nicht erreicht wird, wird das Salzwasser in verschiedenste kleine Behälter aufgeteilt, die mit Neutronenabsorbern ausgekleidet sind. Aus den verschiedensten Behältnissen wird das Salzwasser in eine Reaktionskammer gepumpt. Dort wird die kritische Masse des Uran- bzw. Plutoniumsalzes schließlich erreicht, und die nukleare Kettenreaktion beginnt. Das Wasser, in dem die Salze gelöst sind, wirkt gleichzeitig als Moderator und Stützmasse. Die Kettenreaktion erzeugt eine enorme Hitze, die das Wasser verdampfen lässt, das Wasserdampf-Spaltstoff-Gemisch verlässt den Antrieb durch eine Lavaldüse. Der Vorteil des Antriebskonzeptes sind der niedrige Spaltstoffverbrauch im Vergleich zum reinen Antrieb mit Spaltprodukten und der hohe Schub und spezifische Impuls. Der Nachteil ist die enorme Hitzeentwicklung durch die nukleare Kettenreaktion, so dass der maximale Neutronenfluss erst außerhalb der Reaktionskammer stattfinden darf.

- Isp: 10.000 s
- Schub: 10 MN

### **Antimaterieantrieb**

*Verwendung: Antrieb (T)*

Die Energie für diesen Antrieb würde durch eine Paarvernichtung von Materie und Antimaterie geliefert werden. Bei diesem Prozess wird die gesamte Ruheenergie der Teilchen vollständig freigesetzt. Dabei wird in eine Wolke aus Materie ein wenig Antimaterie geschossen. Die Materie erhitzt sich dadurch enorm, Kernfusionsprozesse setzen ein und erhitzen die Materie weiter. Diese wird anschließend durch eine magnetische Düse ausgestoßen.

Das größte Problem aus der heutigen Sicht stellt die Erzeugung und Lagerung von Antimaterie dar. Da die Produktion soviel Energie verbraucht, wie die Reaktion später liefert, scheidet eine Produktion an Bord des Raumschiffs aus. Die Antimaterie müsste mitgeführt werden. Mit dem jetzigen Stand der Technik ist ein Antimaterieantrieb nicht möglich, da man keine Möglichkeit kennt, größere Mengen an Antimaterie zu erzeugen. Für einen Flug zum Mars und zurück wären nur etwa 0,1 Gramm Antiprotonen nötig, doch selbst die Herstellung dieser geringen Menge Antiprotonen ist derzeit utopisch.

- Isp:  $\approx 400.000 \text{ s}$
  - Schub:  $100 \text{ kN}^{[9]}$
-



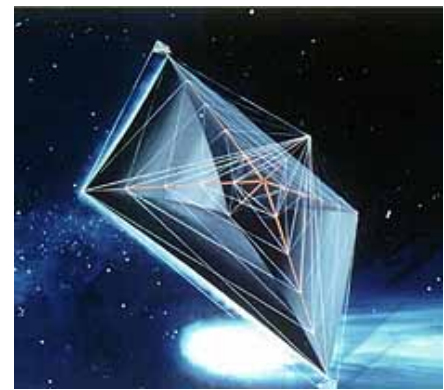
## Antriebe ohne Treibstoff

Im folgenden werden Antriebsmethoden vorgestellt, bei denen der Raumflugkörper selbst keinen Treibstoff verbraucht. Da er durch die unten genannten Methoden trotzdem eine Geschwindigkeitsänderung ( $\Delta v$ ) erfährt, ist der spezifische Impuls gemäß der Raketengrundgleichung stets unendlich.

### Sonnensegel

*Verwendung: Lageregelung, Antrieb ( $F$ )*

Sogenannte Sonnensegel befinden sich in der Entwicklung und sollen sich den Effekt des Strahlungsdrucks zunutze machen, indem sie mit einem großen Segel elektromagnetische Strahlung einfangen und davon angetrieben werden. Der Schub wäre dabei minimal (und nähme mit der Entfernung von der Strahlungsquelle quadratisch ab), jedoch wäre er ohne Treibstoffverbrauch entstanden und bliebe stetig, solange der Einfluss von Strahlungsquellen mit dem Segel genutzt wird. Bei einem Lasersegel wird mit einem Laserstrahl auf das Segel gezielt.



Künstlerische Umsetzung der Idee eines  
Sonnensegels

- Isp: unendlich
- Schub: 9 N/km<sup>2</sup> @ 1 AE

### Tether

*Verwendung: Bahnregelung ( $F$ )*

Tethers sind lange Seile, die im Weltall rechtwinklig zum Magnetfeld eines Planeten ausgelegt werden. Bewegt sich ein elektrischer Leiter durch ein Magnetfeld, wird in ihn Spannung induziert. Somit kann sich ein Satellit, der lange Tethers auslegt, darüber mit Energie versorgen. Der Nutzen dieses Effekts wird allerdings dadurch eingeschränkt, dass der Leiter, in dem die Spannung induziert wird, selbst ein dem Erdmagnetfeld entgegengesetztes Feld erzeugt. Dadurch kommt es zu einer Abbremsung des gesamten Systems aus Raumflugkörper und Tether (Lenzsche Regel). Dementsprechend kann ein Tether, durch den ein starker Strom fließt, auch zur Beschleunigung eines Satelliten beitragen, da auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld eine Kraft wirkt (Lorentzkraft). Untersuchungen zeigen, dass solche elektrischen Tether trotz nur langsamer Bahnänderungen aufgrund der Treibstoffersparnis effektiv sein können, um den Satelliten zu beschleunigen oder abzubremesen. Ebenfalls ist es mit Tethers möglich, Satelliten „abzuseilen“.



Shuttlemissionen STS-46 und STS-75 bei der  
Erprobung des „Tethered Satellite Systems“ (TSS)

- Isp: unendlich
- Schub (elektrisch): X mN
- Schub (manuell): X kN



## Trägerschiffe

*Verwendung: Start (E)*

Zur Reduzierung der zum Start benötigten Treibstoffmassen gibt es Konzepte, Trägerflugzeuge, zum Beispiel Raumflugzeuge, zur Beförderung des Raumschiffes in eine gewisse Höhe zu nutzen. Ebenfalls denkbar sind Höhenballons. Siehe auch die Unterstufe von Sänger (Raumtransportsystem).

- Isp: unendlich (bezogen auf das Raumschiff)
- Schub: X MN

## Weltraumkanone

*Verwendung: (unbemannter) Start/Transport (E)*

Als Transportmöglichkeit für beschleunigungsresistente Nutzladung, wie Satelliten, in den Orbit werden auch ballistische Methoden seit Jules Vernes Vision der *Weltraumkanone* (en <sup>[10]</sup>) diskutiert und erforscht. Vorteile gegenüber Raketentechnik wären deutlich reduzierte Kosten über einen höheren Nutzlast-Anteil und auch ein geringeres Unfallrisiko, u. a. da kein hochexplosiver Raketentreibstoff mitgeführt würde. Eines der ersten Projekten war das HARP-Projekt<sup>[11]</sup> von Gerald Bull bei dem mit optimierter Artillerie-Technik 3 km/s Maximalgeschwindigkeit und 180 km Höhe erreicht wurden, also bereits ein Suborbitaler Flug. Ein Nachfolgeprojekt der 1990er, SHARP, arbeitete mit Leichtgaskanonen-Technik und peilte Maximalgeschwindigkeiten von 7 km/s an. Nach dem Ende des finanzierten SHARP-Forschungsprojekt wurde von Projektmitarbeitern die Firma *Quicklaunch* <sup>[12]</sup> ausgegründet, welche versucht diese Technik weiterzuentwickeln und zu kommerzialisieren. Auch die Railgun-Technologie wird in Erwägung gezogen.<sup>[13][14]</sup>

- Isp: unendlich
- Schub: ? kN (sehr hoch)



HARP, Prototyp einer Weltraumkanone der 1960er.

## Weltraumlift

*Verwendung: Start (E)*

Ein weiterer Vorschlag ist der eines Weltraumliftes, einer Art Aufzug, welcher, am Erdboden beginnend, aus der Erdatmosphäre heraus bis in den Weltraum führen soll. Nachdem im Jahr 1895 das (nach heutiger Auffassung technisch unmögliche) Errichten eines Turmes (engl. *space fountain*) bis in den Weltraum vorgeschlagen war, wurde die 1957 zum Weltraumlift (engl. *space elevator*) abgewandelte Idee in den letzten Jahren wissenschaftlich zahlreich betrachtet. Das Konzept beinhaltet in heutigen Ausführungen ein festes Seil, das auf der Erdoberfläche verankert würde und an dessen anderem Ende ein Gewicht knapp oberhalb der geostationären Umlaufbahn hänge, wobei die Zentripetalkraft das Seil strammzöge und einen daran auf- und



Ein Weltraumliftkonzept

abfahrenden Aufzug ermöglichen sollte. Ein zentrales Problem ist die Festigkeit des Seiles – die Festigkeitswerte konnten jedoch in letzter Zeit deutlich verbessert werden. Beispielsweise Graphen oder Kohlenstoffnanoröhren erreichen die notwendigen Festigkeitswerte.

- Isp: unendlich
- Schub: unbekannt

### Elektromagnetisches Katapult

*Verwendung: Start (E)*

Es gibt einen wissenschaftlichen Vorschlag für ein elektromagnetisches Katapult (engl. *mass driver*). Ein solches elektromagnetisches Katapult ließe sich mit dem Prinzip einer Coilgun oder Railgun im größeren Maßstab vergleichen: Das abzuschießende Objekt wird auf einer Startvorrichtung, beispielsweise einer Schienenform, befestigt, und darauf beschleunigt, bis es am Ende der Vorrichtung zum freien Flug kommt. Ein elektromagnetisches Katapult kann zum Beispiel von der Mondoberfläche Satelliten und Raumfahrzeuge in die Mondumlaufbahn befördern. Die ESA untersucht ein System mit einem Raketenschlitten als Starthilfe für Hopper.

- Isp: unendlich
- Schub: 100–10.000 kN



Eine künstlerische Umsetzung der Idee eines elektromagnetischen Katapultes (NASA)

### Magnetsegel

*Verwendung: Antrieb (E)*

Bei einem Magnetsegel (engl. *magsail*) wird ein statisches magnetisches Feld durch einen Supraleiter erzeugt, um die geladenen Partikel des Sonnenwindes abzulenken, um ein Raumfahrzeug anzutreiben. Mit einem Magnetsegel ist es auch möglich, sich von der Magnetosphäre eines Planeten anziehen oder abstoßen zu lassen. Ebenso ist es möglich, Ströme in das aufgefangene Plasma einzubringen, um das Magnetfeld zu verformen und zu verstärken. Dieser Ansatz wird M2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion) genannt. Ein weiterer Ansatz besteht darin, einen Plasmastrahl auf das Raumfahrzeug zu schießen. Dieser Ansatz ähnelt dem Laser-Materie-Segel und wird MagBeam genannt.

- Isp: unendlich
- Schub: 70 N bei 30 Wb @ 1 AE<sup>[15]</sup>



Die Magnetosphäre der Erde lenkt die geladenen Partikel des Sonnenwindes ab

### Materiesegel

*Verwendung: Antrieb (T)*

Ein Materie-Strahler, z. B. ein Teilchen-Linearbeschleuniger, ruht auf einer großen Masse (Mond, Asteroid). Von hier aus zielt ein gut gebündelter Teilchenstrahl auf das Materiesegel des Raumschiffes und beschleunigt dieses dadurch. Da die Geschwindigkeit des Teilchenstrahls an die Geschwindigkeit des Raumschiffes angepasst werden kann (maximale Impulsübertragung), ist die Energieeffizienz wesentlich höher als beim Lasersegel. Zudem kann ein Teil des Materiestroms vom Raumschiff aufgefangen werden. Das Raumschiff kann mit leeren „Treibstofftanks“ starten und füllt diese während der Beschleunigung. Am Zielort angelangt, könnte es mit diesem aufgesammelten Treibstoff bremsen.

- Isp: unendlich
- Schub: 1–1000 mN

## Literatur

- Marc G. Millis (et al.): *Frontiers of Propulsion Science*. American Inst. of Aeronautics & Astronautics, Reston 2009, ISBN 1-56347-956-7, Zusammenfassung <sup>[16]</sup> (pdf; 1,2 MB)
- Martin Tajmar: *Advanced space propulsion systems*. Springer, Wien 2003, ISBN 3-211-83862-7
- Paul A. Czysz: *Future spacecraft propulsion systems*. Springer, Berlin 2006, ISBN 3-540-23161-7
- Claudio Bruno, Antonio G. Accettura: *Advanced Propulsion Systems and Technologies, Today to 2020*. American Inst. of Aeronautics & Astronautics, Reston 2007, ISBN 9781563479298
- Eugen Sänger: *Raumfahrt - Technische Überholung des Krieges*; Artikel in *Aussenpolitik - Zeitschrift für internationale Fragen*, 1958, Heft 4
- Michael Marshall: Engage the x drive - Ten ways to traverse deep space. <sup>[17]</sup> NewScientist, 21. Dezember 2009
- Kelvin F. Long: *Deep space propulsion*. Springer, New York 2012, ISBN 978-1-4614-0606-8.

## Weblinks

- Greg Goebel: Spaceflight Propulsion (public domain) <sup>[18]</sup> Umfangreiche Darstellung von Antriebsmechanismen für die Raumfahrt (engl.)
- ESA Advanced Concepts Team Homepage <sup>[19]</sup>
- NASA Institute for Advanced Concepts <sup>[20]</sup>
- American Institute of Aeronautics and Astronautics Presentation on Advanced Propulsion Concepts, Mai 2008, (PDF; 4,4 MB) <sup>[21]</sup>
- M. Tajmar: *Advanced Space Propulsion Systems*. <sup>[22]</sup> TU Wien, abgerufen am 17. Dezember 2008 (PDF; 5,1 MB, englisch).
- Space, Propulsion and Energy Sciences International Forum 2009, AIP Conference Proceedings abstracts <sup>[23]</sup>
- Millis, Marc G.; Maclay, (et al.): *Study of Vacuum Energy Physics for Breakthrough Propulsion*. <sup>[24]</sup> 2004, NASA Technical Reports Server, abgerufen 4. September 2012
- Advanced Propulsion Study <sup>[25]</sup> Air Force Research Laboratory, 2004 (pdf, abgerufen 30. Mai 2009; 4,86 MB)

## Quellen

- [1] <http://cs.astrium.eads.net/sp/SpacecraftPropulsion/Rita/RIT-10.html>
- [2] Electric Spacecraft Propulsion - Hall Effect Thrusters (<http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=34201&fbodylongid=1538>) sci.esa.int
- [3] Dan M. Goebel, et al.: Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. ([http://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series1/Goebel\\_cmprsd\\_opt.pdf](http://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series1/Goebel_cmprsd_opt.pdf)) pdf, jpl.nasa.gov, abgerufen am 1. Februar 2013
- [4] The PIT MkV Pulsed Inductive Thruster (PDF; 2,6 MB) ([http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930023164\\_1993023164.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930023164_1993023164.pdf))
- [5] <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008AIPC..969..518F>
- [6] Helicon Double Layer Thruster
- [7] Sänger, Eugen (1956). Zur Mechanik der Photonen-Strahlantriebe. München.; R. Oldenbourg. pp. 92.
- [8] Sänger, Eugen (1957). Zur Strahlungsphysik der Photonen-Strahlantriebe und Waffenstrahlen. München: R. Oldenbourg. pp. 173.
- [9] ANTIPROTON-CATALYZED MICROFISSION/FUSION PROPULSION SYSTEMS FOR EXPLORATION OF THE OUTER SOLAR SYSTEM AND BEYOND (Pdf; 753 kB) (<http://www.engr.psu.edu/antimatter/Papers/ICAN.pdf>)
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_gun](http://en.wikipedia.org/wiki/Space_gun)
- [11] The HARP Project and the Martlet (<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Smartlet.htm>) auf nasa.gov (engl.)
- [12] <http://quicklaunchinc.com/>
- [13] NASA's Next-Gen Spacelaunch System Could Launch Scramjets from a Massive Railgun (<http://www.popsci.com/technology/article/2010-09/nasas-next-gen-spacelaunch-system-could-launch-scramjets-massive-railgun>) popsci.com; Railguns for space launch (<http://nextbigfuture.com/2008/02/railguns-for-space-launch.html>) nextbigfuture.com

- 
- [14] Ian R. McNab: Launch to Space With an Electromagnetic Railgun (<http://research.lifeboat.com/ieee.em.pdf>) IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 39, NO. 1, JANUARY 2003, S.295ff, pdf abgerufen am 29. Januar 2012
  - [15] [http://www.psfc.mit.edu/library1/catalog/reports/2000/05ja/05ja026/05ja026\\_full.pdf](http://www.psfc.mit.edu/library1/catalog/reports/2000/05ja/05ja026/05ja026_full.pdf)
  - [16] <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1101/1101.1063.pdf>
  - [17] <http://www.newscientist.com/article/dn18283-engage-the-x-drive-ten-ways-to-traverse-deep-space.html?full=true>
  - [18] <http://www.vectorsite.net/tarokt.html>
  - [19] <http://www.esa.int/gsp/ACT/index.htm>
  - [20] <http://www.niac.usra.edu/index.html>
  - [21] <http://www.intalek.com/Papers/AdvSpacePropulsionForInterstellarTravel2008.pdf>
  - [22] [http://www.ilsb.tuwien.ac.at/~tajmar/ASPS\\_transparencies\\_03.pdf](http://www.ilsb.tuwien.ac.at/~tajmar/ASPS_transparencies_03.pdf)
  - [23] <http://proceedings.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=APCPCS&Volume=1103&Issue=1>
  - [24] <http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=20040171927&q=Ns%3DNASA-Center%26N%3D4294949091%26No%3D10>
  - [25] <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA426465&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>
-

# Quelle(n) und Bearbeiter des/der Artikel(s)

**Antriebsmethoden für die Raumfahrt** *Quelle:* <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=128524421> *Bearbeiter:* Abrisskante, Acky69, Aineias, Aka, Andy king50, Asdert, Bernd vdB, BerndP, Cepheiden, Chaddy, CommonsDelinker, Derwok, Ephraim33, Gardini, GiordanoBruno, Grabert, Gravitophoton, Hajo Keffer, Hans Dunkelberg, Henristosch, Hkoeln, Horst Gräbner, Horst-schlaemma, Inkowik, JøMa, Kadeka, Karl Bednarik, Ki833x9, Klimper, Kuebi, Lorienn.Mentee, Luftie, Mark Schuhmann, Matzematik, Mikered, Moros, NeonZero, Nerdi, Ramgo, Raumfahrtingenieur, Regi51, Rjh, RobertLechner, Rr2000, Satnav, Schwijker, Se4598, Segelboot, Shaddim, Spacebirdy, Spuk968, Steamjoe, Succu, Tank16, Tschäfer, Uwe W., Varina, WortUmBruch, ZeroGRanger, 42 anonyme Bearbeitungen

# Quelle(n), Lizenz(en) und Autor(en) des Bildes

**Bild:New Horizons Liftoff.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:New\\_Horizons\\_Liftoff.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:New_Horizons_Liftoff.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA/Kim Shiflett

**Bild:Scout launch vehicle.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Scout\\_launch\\_vehicle.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Scout_launch_vehicle.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Bricktop, GDK, Hegen, Huntster, Morio, Sophus Bie

**Datei:Shuttle Main Engine Test Firing.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Shuttle\\_Main\\_Engine\\_Test\\_Firing.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Shuttle_Main_Engine_Test_Firing.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**File:X-30 NASP 3.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:X-30\\_NASP\\_3.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:X-30_NASP_3.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* James Schultz

**File:HiPEP thruster working.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HiPEP\\_thruster\\_working.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HiPEP_thruster_working.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA Photo taken by Christian Carpenter of QSS Group, Inc. Original uploader was JustinWick at en.wikipedia

**Bild:Ion Engine Test Firing - GPN-2000-000482.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ion\\_Engine\\_Test\\_Firing\\_-\\_GPN-2000-000482.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ion_Engine_Test_Firing_-_GPN-2000-000482.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**File:HallThruster 2.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HallThruster\\_2.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HallThruster_2.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Dstaack at en.wikipedia

**Datei:Self-field MPD thruster-CGI illustration.jpeg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Self-field\\_MPD\\_thruster-CGI\\_illustration.jpeg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Self-field_MPD_thruster-CGI_illustration.jpeg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**File:VASIMR diagram.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VASIMR\\_diagram.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VASIMR_diagram.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Aarchiba at en.wikipedia

**Bild:Plutonium pellet.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Plutonium\\_pellet.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Plutonium_pellet.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Adam Cuerden, Bomazi, Craigboy, D-Kuru, Fastfission, Mav, Rlevse, Uwe W.

**Bild:Nerva - nuclear rocket engine.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nerva\\_-\\_nuclear\\_rocket\\_engine.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nerva_-_nuclear_rocket_engine.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**Bild:196409 nuclear thermal engine NRX A-1 being test fired.png** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:196409\\_nuclear\\_thermal\\_engine\\_NRX\\_A-1\\_being\\_test\\_fired.png](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:196409_nuclear_thermal_engine_NRX_A-1_being_test_fired.png) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**Image:Dusty plasma bed reactor.svg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dusty\\_plasma\\_bed\\_reactor.svg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dusty_plasma_bed_reactor.svg) *Lizenz:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Bearbeiter:* Duckysmokton, WikipediaMaster

**Bild:NASA-project-orion-artist.jpg** *Quelle:* <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:NASA-project-orion-artist.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**Bild:Bussard Interstellar Ramjet Engine.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bussard\\_Interstellar\\_Ramjet\\_Engine.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bussard_Interstellar_Ramjet_Engine.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

**Datei:Fission sail.svg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fission\\_sail.svg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fission_sail.svg) *Lizenz:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Bearbeiter:* Duckysmokton

**Bild:Ssunsail.jpg** *Quelle:* <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ssunsail.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Huntster, Inductiveload, Nerdi

**Datei:STS-75 Tethered Satellite System deployment.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:STS-75\\_Tethered\\_Satellite\\_System\\_deployment.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:STS-75_Tethered_Satellite_System_deployment.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA Johnson Space Center (NASA-JSC), Image-ID: sts075-701-087

**Bild:Project Harp.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Project\\_Harp.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Project_Harp.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Noahcs at en.wikipedia

**Datei:Nasa space elev.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nasa\\_space\\_elev.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nasa_space_elev.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Bricktop, Bryan Derksen, Edward, KGyST, Marcok

**Bild:Lunar base concept drawing s78 23252.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lunar\\_base\\_concept\\_drawing\\_s78\\_23252.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lunar_base_concept_drawing_s78_23252.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* ArnoldReinhold, Beaucouplusunetre, Edward, Grayshi, Nilfanion, Shizhao, Square87, 1 anonyme Bearbeitungen

**Image:Magnetosphere rendition.jpg** *Quelle:* [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Magnetosphere\\_rendition.jpg](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Magnetosphere_rendition.jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA

# Lizenz

**Wichtiger Hinweis zu den Lizenzen**  
Die nachfolgenden Lizenzen beziehen sich auf den Artikeltext. Im Artikel gezeigte Bilder und Grafiken können unter einer anderen Lizenz stehen sowie von Autoren erstellt worden sein, die nicht in der Autorenliste erscheinen. Durch eine noch vorhandene technische Einschränkung werden die Lizenzinformationen für Bilder und Grafiken daher nicht angezeigt. An der Behebung dieser Einschränkung wird gearbeitet. Das PDF ist daher nur für den privaten Gebrauch bestimmt. Eine Weiterverbreitung kann eine Urheberrechtsverletzung bedeuten.

**Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported - Deed**  
Diese "Commons Deed" ist lediglich eine vereinfachte Zusammenfassung des rechtsverbindlichen Lizenzvertrages ([http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Lizenzbestimmungen\\_Commons\\_Attribution-ShareAlike\\_3.0\\_Unported](http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Lizenzbestimmungen_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_Unported)) in allgemeinverständlicher Sprache.  
Sie dürfen:

- das Werk bzw. den Inhalt **vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen**
- **Abwandlungen und Bearbeitungen** des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen

Zu den folgenden Bedingungen:

- **Namensnennung** — Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen.
- **Weitergabe unter gleichen Bedingungen** — Wenn Sie das lizenzierte Werk bzw. den lizenzierten Inhalt bearbeiten, abwandeln oder in anderer Weise erkennbar als Grundlage für eigenes Schaffen verwenden, dürfen Sie die daraufhin neu entstandenen Werke bzw. Inhalte nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrages identisch, vergleichbar oder kompatibel sind.

Wobei gilt:

- **Verzichtserklärung** — Jede der vorgenannten Bedingungen kann aufgehoben werden, sofern Sie die ausdrückliche Einwilligung des Rechteinhabers dazu erhalten.
- **Sonstige Rechte** — Die Lizenz hat keinerlei Einfluss auf die folgenden Rechte:
  - Die gesetzlichen Schranken des Urheberrechts und sonstigen Befugnisse zur privaten Nutzung;
  - Das Urheberpersönlichkeitsrecht des Rechteinhabers;
  - Rechte anderer Personen, entweder am Lizenzgegenstand selber oder bezüglich seiner Verwendung, zum Beispiel Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen.
- **Hinweis** — Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen alle Lizenzbedingungen mitteilen, die für dieses Werk gelten. Am einfachsten ist es, an entsprechender Stelle einen Link auf <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de> einzubinden.

**Haftungsbeschränkung**  
Die „Commons Deed“ ist kein Lizenzvertrag. Sie ist lediglich ein Referenztext, der den zugrundeliegenden Lizenzvertrag übersichtlich und in allgemeinverständlicher Sprache, aber auch stark vereinfacht wiedergibt. Die Deed selbst entfaltet keine juristische Wirkung und erscheint im eigentlichen Lizenzvertrag nicht.

## GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002

Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.  
51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA  
Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies  
of this license document, but changing it is not allowed.

**0. PREAMBLE**  
The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

## 1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties; any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

## 2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

## 3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is required, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

## 4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- **A.** Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- **B.** List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- **C.** State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- **D.** Preserve all the copyright notices of the Document.
- **E.** Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- **F.** Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- **G.** Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- **H.** Include an unaltered copy of this License.
- **I.** Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- **J.** Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- **K.** For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- **L.** Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
- **M.** Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- **N.** Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
- **O.** Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

## 5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

## 6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

## 7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

## 8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

## 9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

## 10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

## ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled

"GNU Free Documentation License". If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with...Texts." line with this: with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the

Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.



---

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.

---