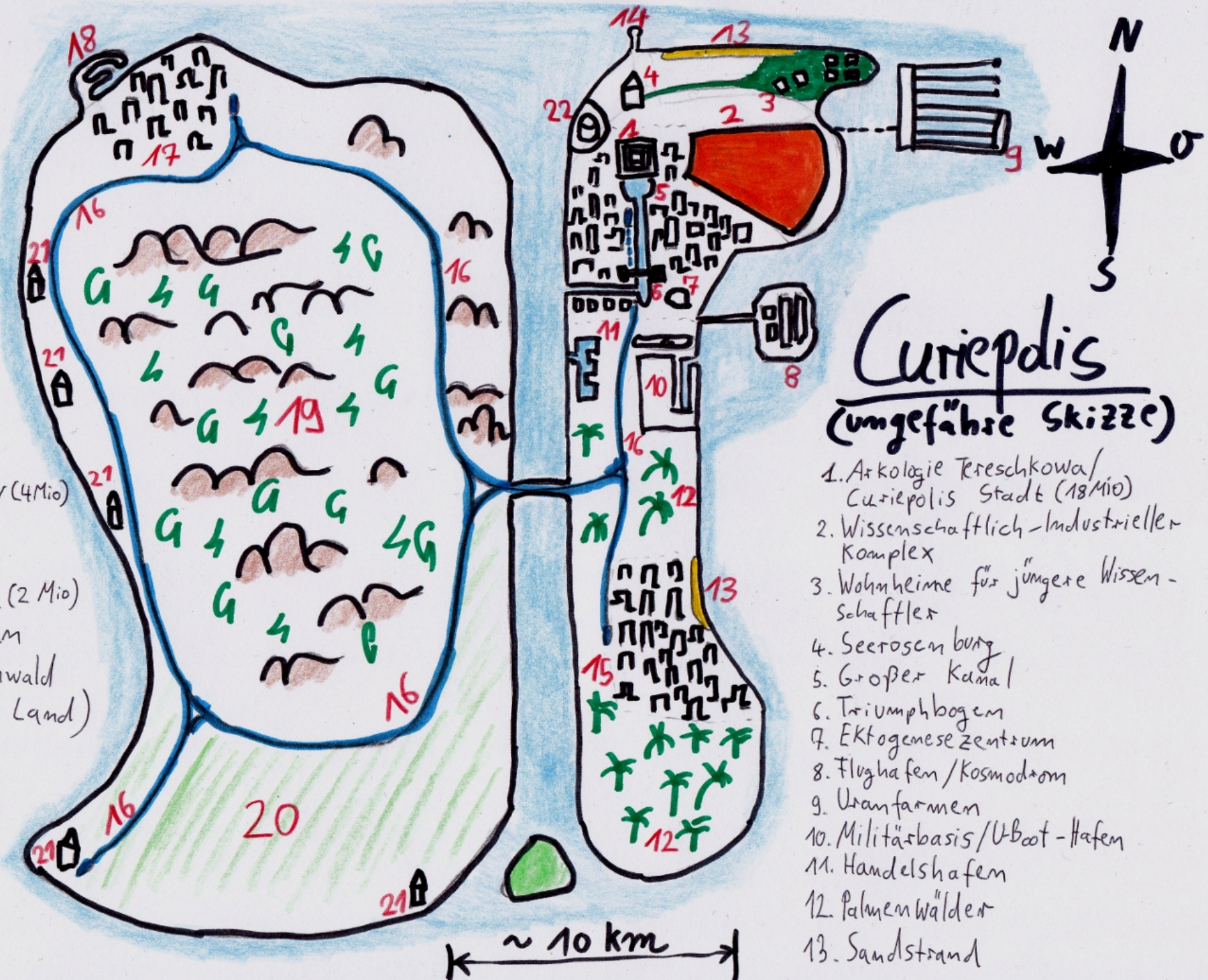


Kernenergie und Raumfahrt

Fabian Herrmann



↖ Nach Japan



Curiepolis

(ungefähre Skizze)

- 14. Leuchtturm
- 15. Nereide City (4 Mio)
- 16. Maglev
- 17. New Chiba (2 Mio)
- 18. Handelshafen
- 19. Hügel / Mischwald
(Das Offene Land)
- 20. Grasland
- 21. Kleinstädte
- 22. Sternwarte

- 1. Arkologie Terschowa / Curiepolis Stadt (18 Mio)
- 2. Wissenschaftlich-Industrieller Komplex
- 3. Wohnheime für jüngere Wissenschaftler
- 4. Seerosen burg
- 5. Großer Kanal
- 6. Triumphbogen
- 7. Ektogenesezentrum
- 8. Flughafen / Kosmodrom
- 9. Uranfarmen
- 10. Militärbasis / U-Boot-Hafen
- 11. Handelshafen
- 12. Palmenwälder
- 13. Sandstrand

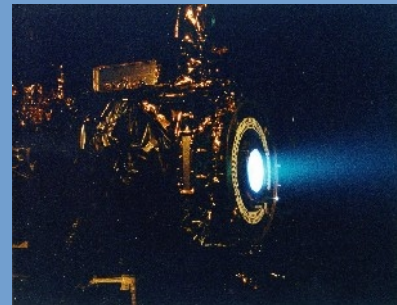
← ~ 10 km →



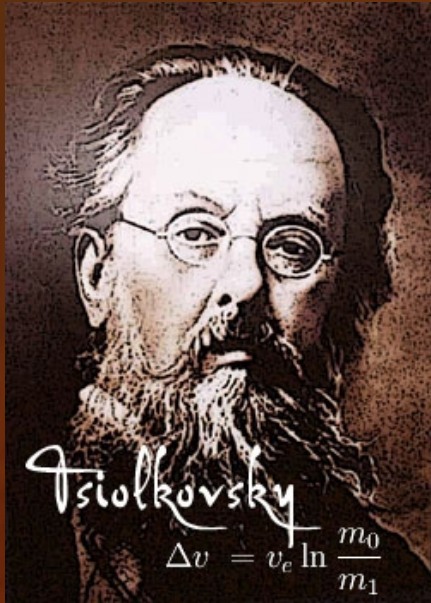


Raketen heutzutage

- Zwei Haupttypen:
- **Chemische Raketen:** Niedrige Rückstoßgeschwindigkeit (einige km/s) aber hohe Schubkraft (hoher Massendurchfluss). Delta v kann durch Stufenbauweise auf bis über 10 km/s gesteigert werden.
- **Elektrische Raketen (Ionenrakete):** Höhere Rückstoßgeschwindigkeit (einige 10 bis 100 km/s) aber extrem niedrige Schubkräfte (geringer Massendurchfluss).



Ein Schluck Mathematik mit Konstantin Ziolkowski



Raketenformel:

$$\Delta v = v_0 * \ln \left(\frac{M_{voll}}{M_{leer}} \right)$$

Die Geschwindigkeitsänderung „Delta V“ ist die wichtigste Kenngröße der Rakete.

Die Reichweite ist bei allen Raumfahrzeugen unendlich da es im Weltraum keine Reibung gibt.

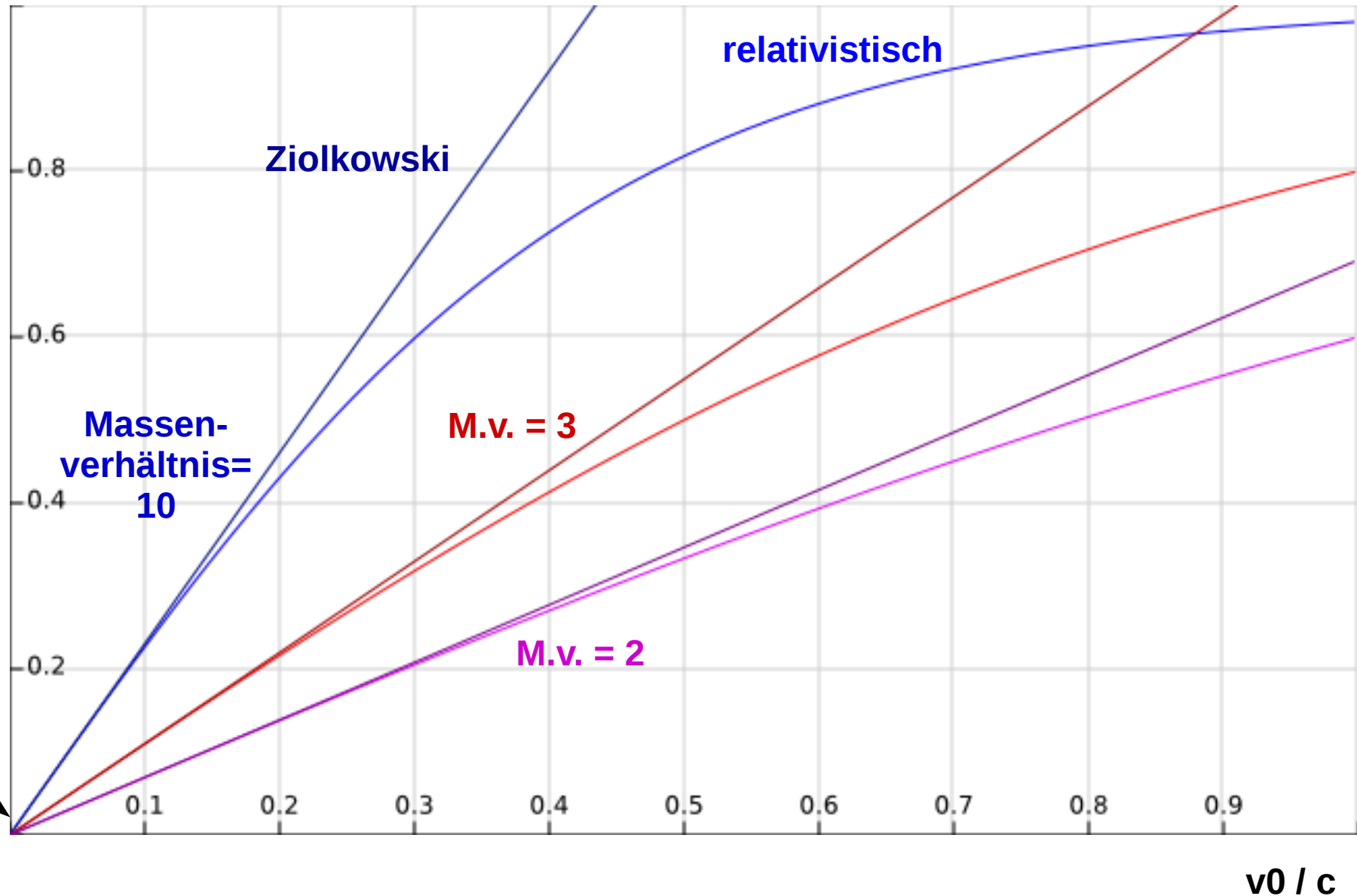
In Worten: Die von einer Rakete erzielbare Geschwindigkeitsänderung („Delta V“) ist gleich der Geschwindigkeit, mit der sie die Reaktionsmasse ausstößt mal dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses der Masse der betankten Rakete zu der der leeren.

Relativistische Form für
Delta v nahe Lichtgeschw. c:

$$\frac{\Delta v}{c} = \tanh \left(\frac{v_0}{c} \ln \frac{M_{voll}}{M_{leer}} \right)$$

Delta v als Funktion von Rückstoßstrahlgeschwindigkeit v_0

Delta v / c



Wie stark müssen relativistische Triebwerke sein?

1. Schwach relativistisch: $\Delta V = 10\% c = 30.000 \text{ km/s}$

Massenverhältnis sei 10 (z. B. 1000 t Trockenmasse, 9000 t Reaktionsmasse).

$$30.000 \text{ km/s} = v_0 * \ln(10)$$

$$v_0 = \frac{30.000 \text{ km/s}}{\ln(10)} \approx 13.000 \text{ km/s}$$

2. Hochrelativistisch: $\Delta V = 90\% c = 270.000 \text{ km/s}$

Massenverhältnis sei 10 (z. B. 1000 t Trockenmasse, 9000 t Reaktionsmasse).

$$0.9 = \tanh\left(\frac{v_0}{c} \ln 10\right)$$

$$\frac{v_0}{c} = \operatorname{artanh}(0.9) / \ln 10 \approx 0.64 \quad v_0 \approx 190.000 \text{ km/s}$$

Wie stark müssen relativistische Triebwerke sein?

1. Schwach relativistisch: $\Delta V = 10\% c = 30.000 \text{ km/s}$

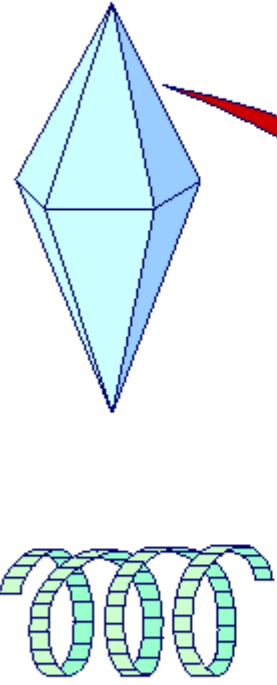



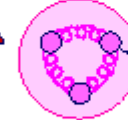



Die Rückstoßgeschwindigkeit erreicht bei chemischen Raketen maximal 4.5 km/s (H_2 / O_2), bei Ionenraketen um 100 km/s.

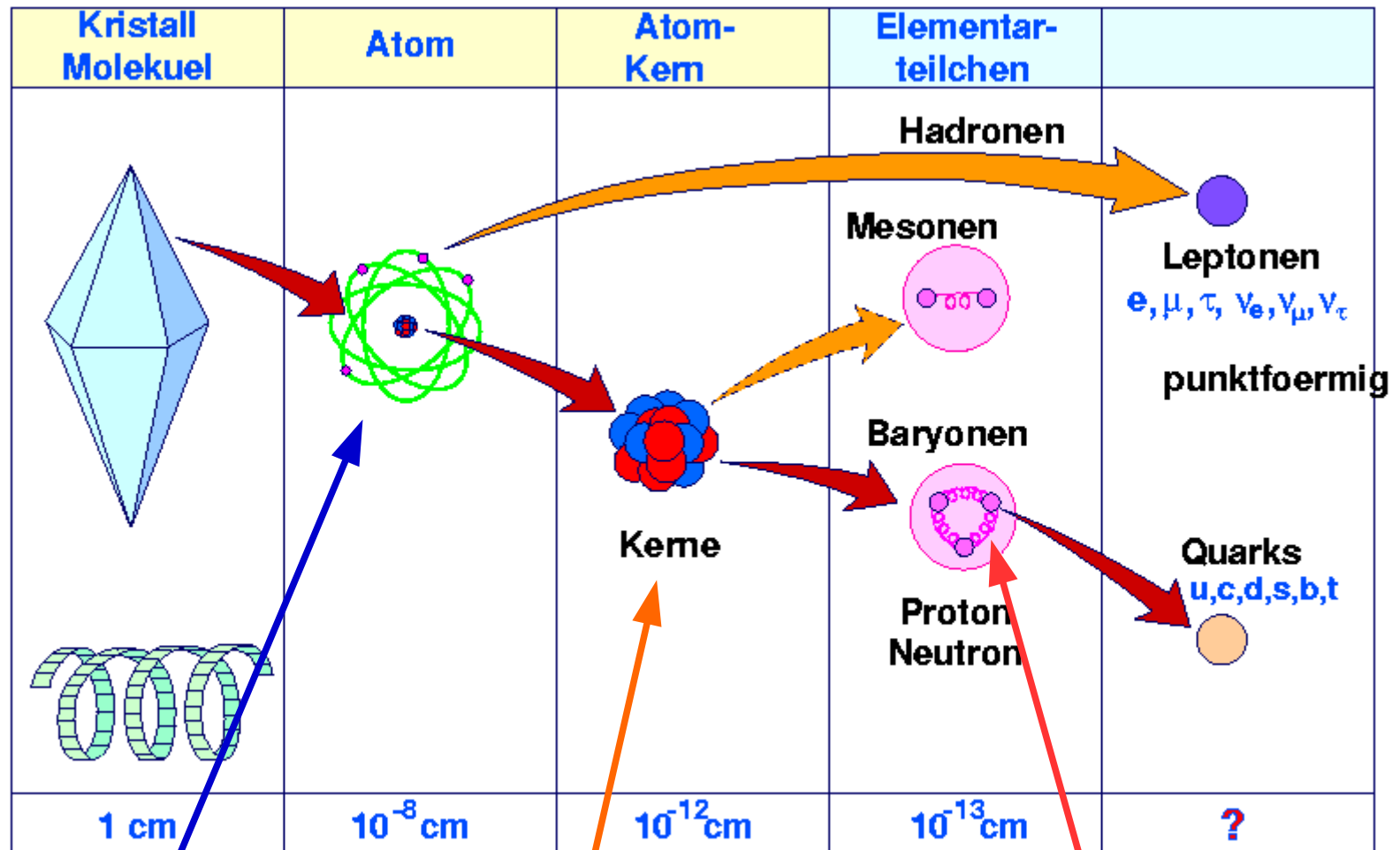
Kennen wir Prozesse, die Materie auf mehrere 1000 km/s beschleunigen?!

$$\frac{v_0}{c} = \text{artanh}(0.9) / \ln 10 \approx 0.64 \quad v_0 \approx 190.000 \text{ km/s}$$

Energiedichten der Naturkräfte

Kristall Molekuel	Atom	Atom- Kern	Elementar- teilchen	
			<p>Hadronen</p> <p>Mesonen</p>  <p>Baryonen</p>  <p>Proton Neutron</p>	<p>Leptonen $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ punktfoermig</p> <p>Quarks u, c, d, s, b, t</p> 
1 cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm	?

Energiedichten der Naturkräfte

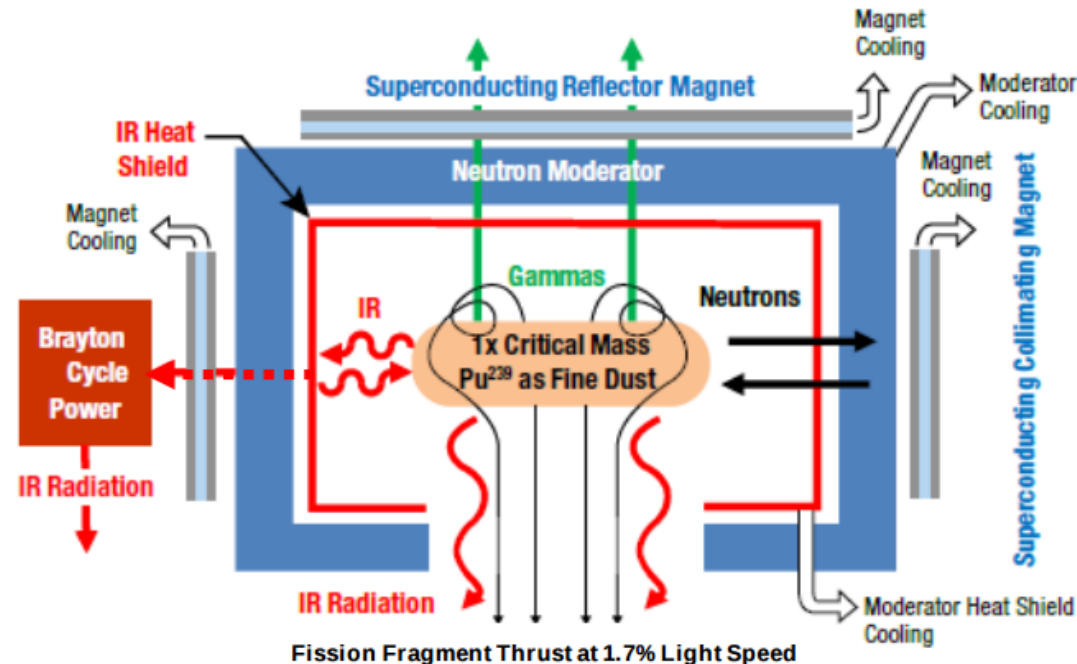


Elektromagnetismus:
Kräfte der Chemie.
Energie: ~ 1 eV/Teilchen,
entspricht 14 km/s

Glukonenfeld
Randbereich:
Kernkraft.
Energie:
 ~ 1 MeV/Teilchen,
entspricht 14.000 km/s

Glukonenfeld
Innenbereich:
Energie der
Ruhemasse: $E = mc^2$
 ~ 1 GeV/Teilchen,
entspr. Lichtgeschwindigkeit!

Spaltprodukte-Rakete



Spaltprodukte werden ausgestoßen, direkte Nutzung der Kernenergie ohne zwischengeschalteten Kühlkreislauf.

Schubkraft: $1.7 \cdot 10^{-7} \text{ N / W}$ (thermische Leistung).
 Großer Leistungsreaktor: 3 GW \rightarrow 512 N.

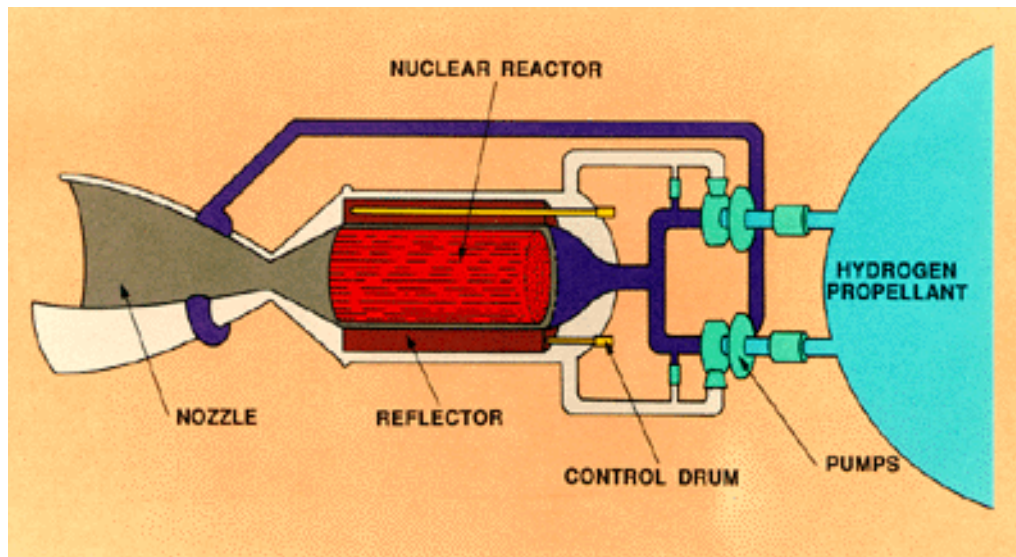
Z. B. Massenverhältnis 1.1: $\Delta v = 14.000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times \ln(1.1) \approx 1330 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Dauer Beschleunigung/Abbremsen: 100 t bei 500 N \rightarrow je 4 Jahre bis 650 km/s.

Geht etwas mehr Schubkraft?

Wir können – gewissermaßen wie bei einer Gangschaltung – die Schubkraft erhöhen, indem wir die Energie der Spaltprodukte auf eine größere Materieportion übertragen. Die Rückstoßgeschwindigkeit sinkt entsprechend!

Prinzip der nuklear-thermischen Rakete:



Ein Gas (Bsp. Wasserstoff) wird als Kühlmittel durch einen Kernreaktor geleitet, wodurch es erhitzt wird und sich stark ausdehnt.

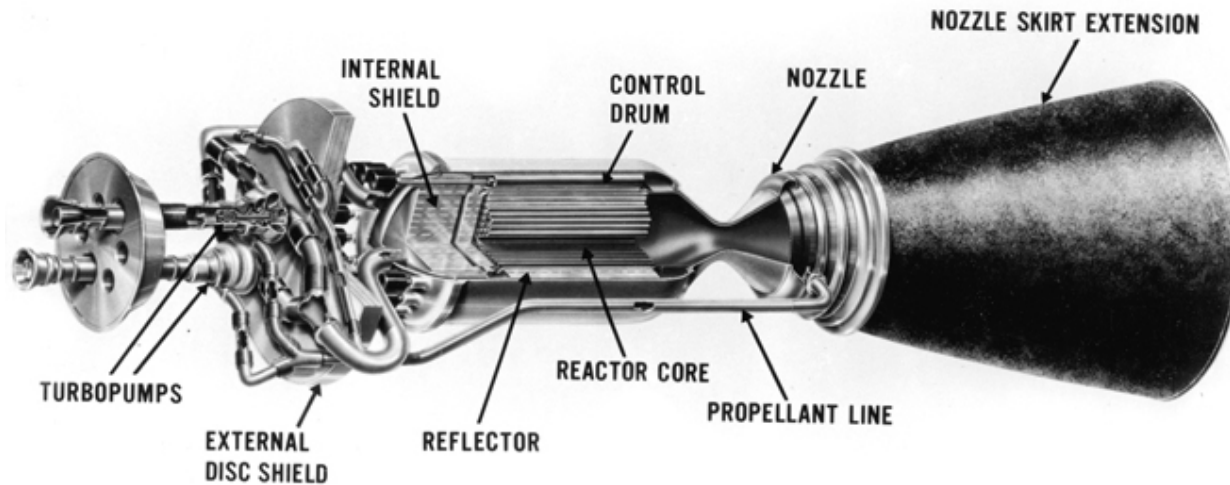
Als Rückstoßmasse strömt es aus der Düse.

$$\text{Rückstoßgeschwindigkeit: } v_0 = \sqrt{\frac{f T}{A}} \times 90 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Bsp. H}_2: f = 5, A = 2, \\ T = 3000 \text{ K} \rightarrow v_0 = 7800 \text{ m/s}$$

wobei T = Reaktortemperatur in Kelvin, A = Atomgewicht der Gasmoleküle, f = Freiheitsgrade der Moleküle: 3 bei Einzelatomen, 5 bei zweiatomigem Molekül mit Symmetrieachse...

NASA-Projekte Rover und NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application)

NERVA ENGINE



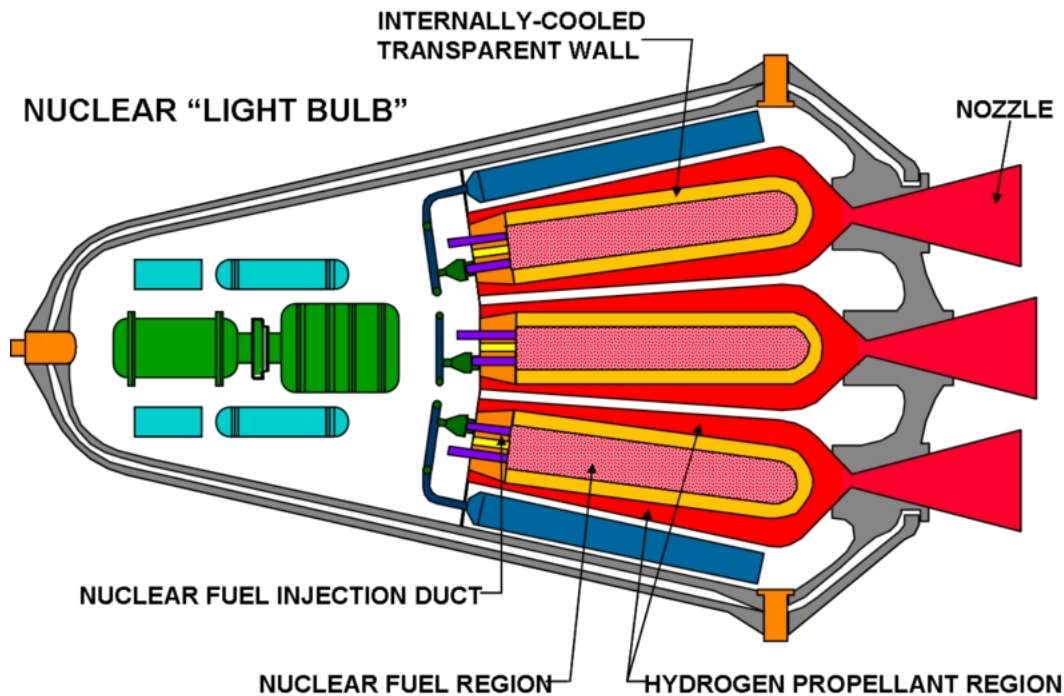
Bodengebundene Experimente der NASA mit Festkern-Nuklearraketentriebwerken von 1952 – 72.

Unten rechts: Statischer Triebwerkstest.

Ergebnisse der Experimente waren vielversprechend.

Mehr als $T = 4000 \text{ K}$ / $v_0 = 10 \text{ km/s}$ scheint mit dieser Technik aber nicht möglich! → Andere Möglichkeiten?

Gaskernreaktor



Visionärer Entwurf: „Liberty Ship“
1000 t Nutzlast in niedrige Kreisbahn
+ kontrollierte Landung auf Strahl
mit einstufiger Rakete.

„Nukleare Glühbirne“: Gas- oder plasmaförmiges Uran- oder Plutonium in Quarzglaskolben.

Rückstoß- und Kühlungsmedium: Wasserstoff mit bis zu $v_0 = 50$ km/s. Schubkraft ähnlich chemische Raketen.

Für interplanetare Missionen geeignet, nicht interstellar.



Gepulster Nuklearantrieb: Orion



Antrieb durch
Fusionsexplosionen
hinter dem Schiff
(ca. 1 / Sekunde).

Prallplatte und
Stoßdämpfersystem
verwandeln Stöße in
gleichförmige
Beschleunigung.

**Möglichkeit, ein großes
beinahe-interstellares
Schiff mit vorhandener(!!)
Technik zu bauen.**

Orion-Pulsantrieb

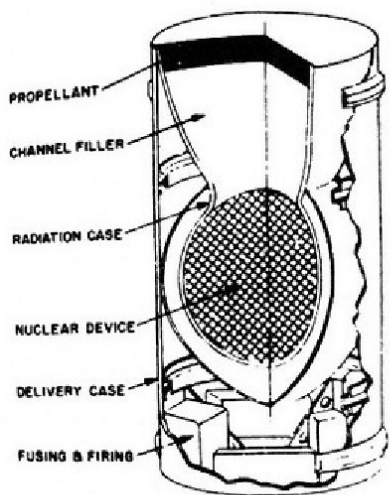
ermöglicht riesige, schnelle Raketen.

Wie schnell, wie riesig?

Energiedichte Lithiumdeuterit:
50 kt TNT / kg

$$F_{Schub} = 300 \sqrt{\frac{W_{spreng}}{kt} \times \frac{m_{spreng}}{kg}} \text{ t bei } 1 \text{ g}$$

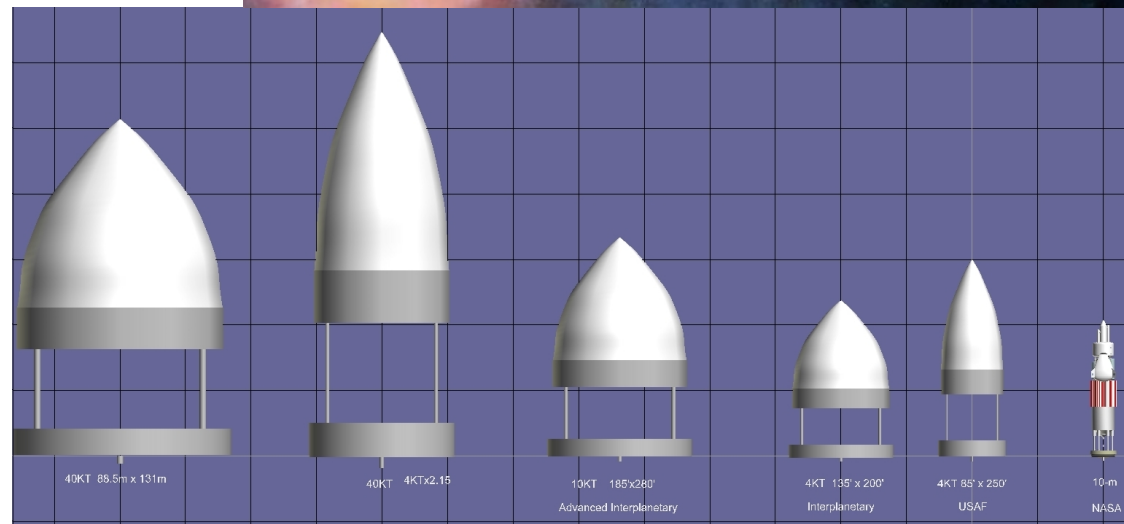
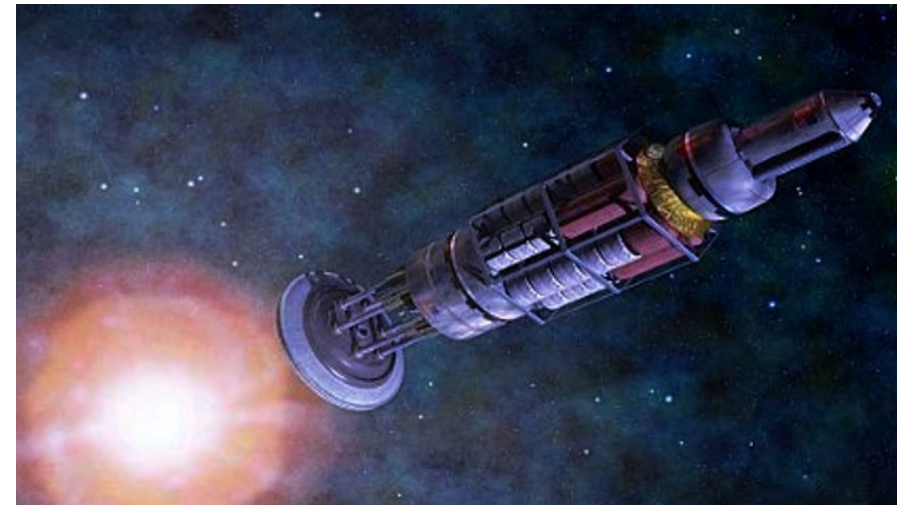
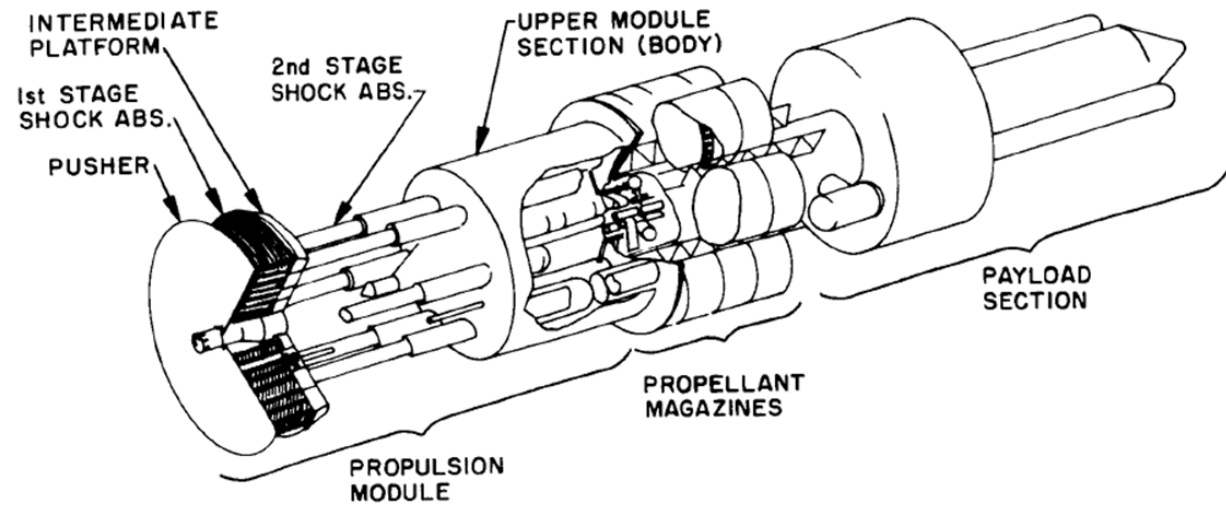
$$\Delta v = 3000 \sqrt{\frac{W_{spreng}/kt}{m_{spreng}/kg}} \ln \frac{M_{voll}}{M_{leer}} \frac{km}{s}$$



Fuel Element



Airforce Design



Orion-Pulsantrieb

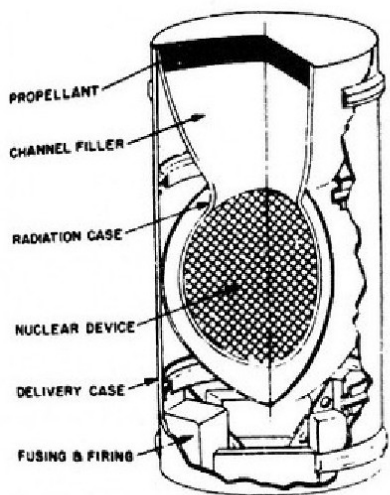
ermöglicht riesige, schnelle Raketen.

Wie schnell, wie riesig?

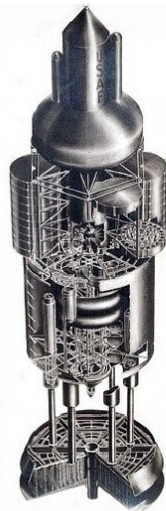
Energiedichte Lithiumdeuterit:
50 kt TNT / kg

$$F_{Schub} = 300 \sqrt{\frac{W_{spreng}}{kt} \times \frac{m_{spreng}}{kg}} \text{ t bei } 1 \text{ g}$$

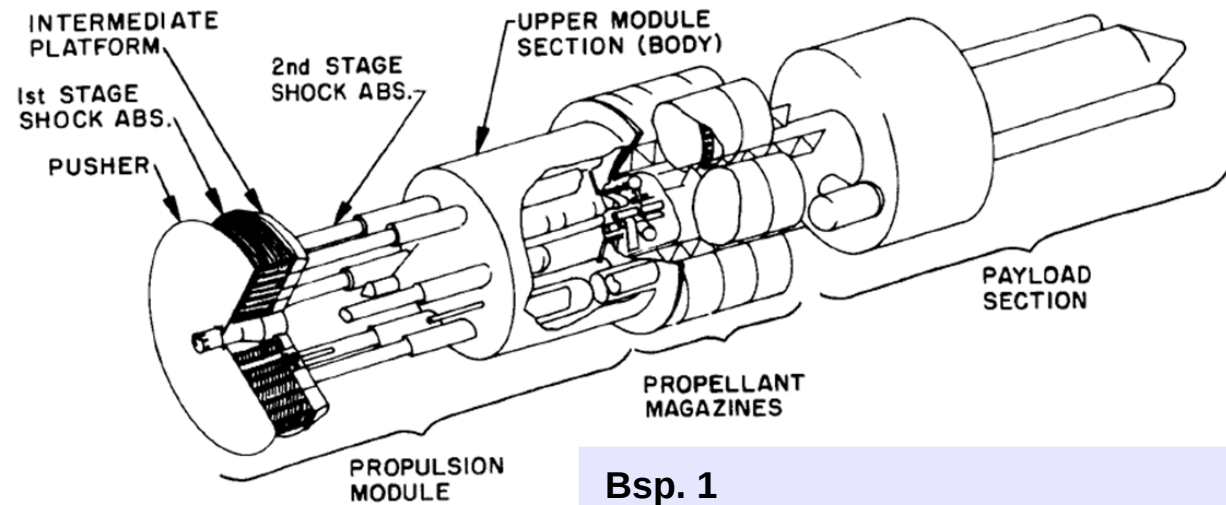
$$\Delta v = 3000 \sqrt{\frac{W_{spreng}/kt}{m_{spreng}/kg}} \ln \frac{M_{voll}}{M_{leer}} \frac{km}{s}$$



Fuel Element



Airforce Design

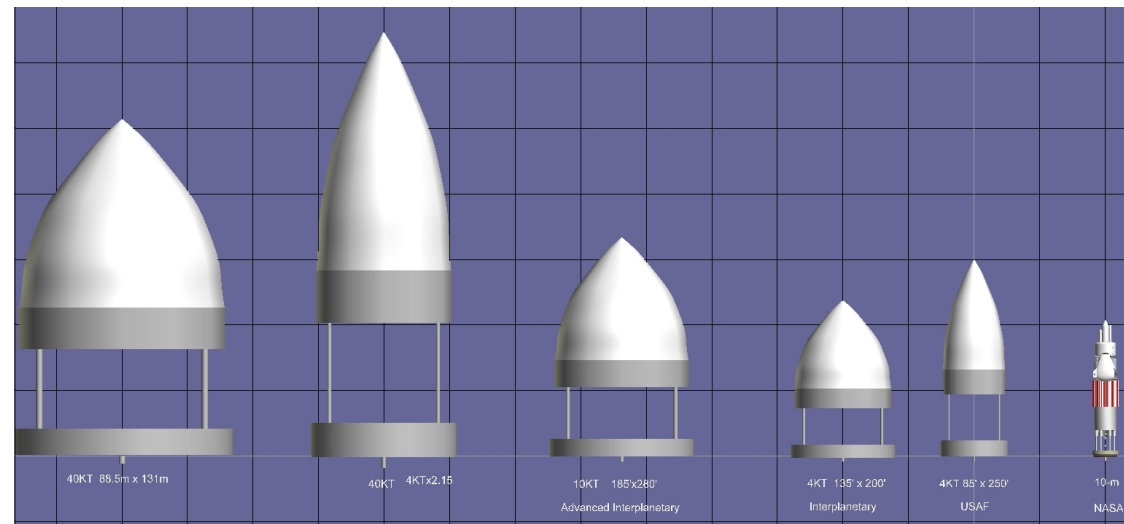


Bsp. 1

$W_{spr} = 10 \text{ kt}$, $m_{spr} = 50 \text{ kg}$
 Massenverhältnis = 2
 → $F \sim 6700 \text{ t @ } 1 \text{ g}$
 → $\Delta v \sim 900 \text{ km / s}$


Bsp. 2

$W_{spr} = 1.5 \text{ Mt}$, $m_{spr} = 1000 \text{ kg}$
 Massenverhältnis = 10
 → $F \sim 370,000 \text{ t @ } 1 \text{ g}$
 → $\Delta v \sim 8500 \text{ km / s}$



Im Welt kann man keine
Kühltürme bauen!
(Es gibt keine flüssige
Phase im Vakuum.)

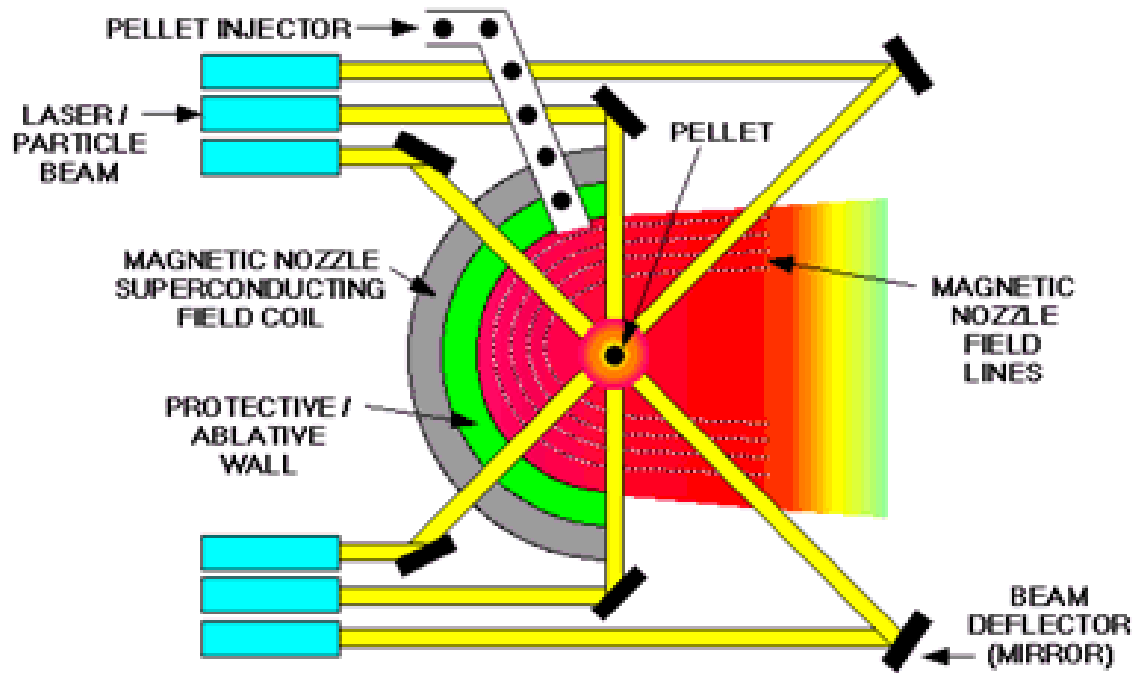
Jede
Wärmekraftmaschine
erzeugt Abwärme, die
„entsorgt“ werden
muss.

A detailed illustration of a rocket launch. The rocket is angled upwards, with its engines firing, creating a large, bright orange and yellow plume of fire and smoke. The rocket's body is covered in large, rectangular heat shields that are also glowing with heat. The background is a dark, starry space with a small crescent moon visible in the upper right corner.

Ein Schiff mit starker Wärmequelle an
Bord braucht riesige Abstrahler.
(In der Realität aber eher dunkelrot- als
weißglühend.)

Verbesserungen des Orion-Antriebs?

Verkleinerung der Sprengsätze und Eliminierung des Spaltzünders.



- Statt kompletter Wasserstoffbomben: **Kleine Kapseln mit Fusionsbrennstoff (D+T, D+D, D+3He, D+6Li...)**
- Zündung mit Laser- oder Teilchenstrahlen.
- Bündelung des Plasmas mit Magnetfeld.
- Ähnlich einseitig offener Trägheitsfusionsreaktor (Bsp. National Ignition Facility)

Rückstoßgeschw. max (D+3He): 9% c (!!)

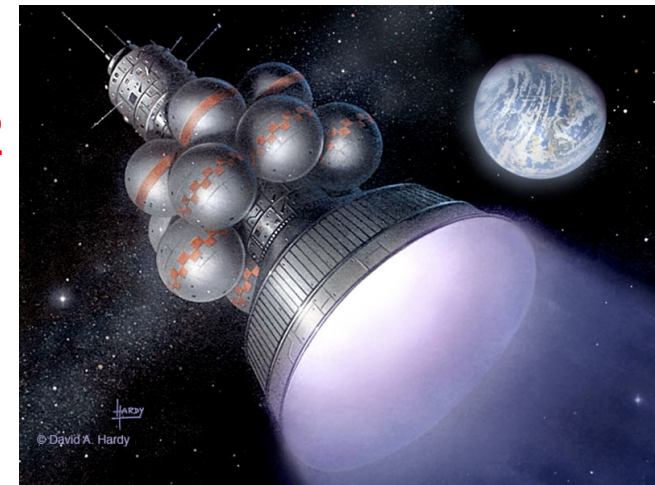
$$\frac{\Delta v}{c} = \tanh \left(0.09 \ln \frac{m_{\text{voll}}}{m_{\text{leer}}} \right) \quad \frac{m_{\text{voll}}}{m_{\text{leer}}} = 4 \rightarrow \frac{\Delta v}{c} = 0.12$$

1 Mio t. Schiff, Beschleunigung mit 1 g:

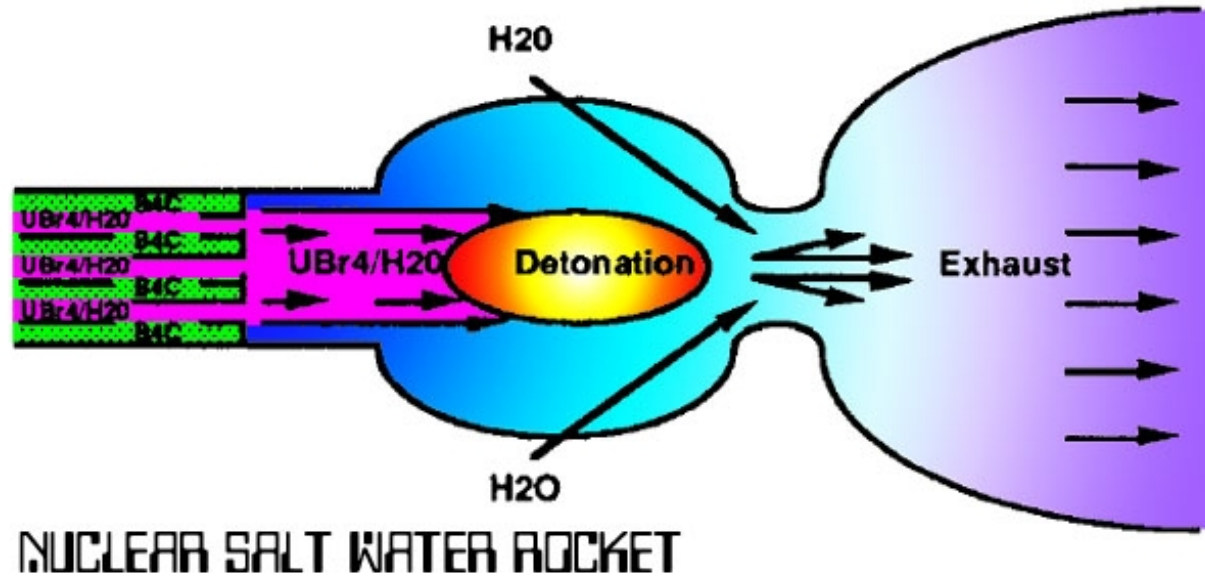
370 kg Fusionstreibstoff / s.

→ 135 Mio GW ~ 7500 x Weltenergieverbrauch (2016)

Projekt Daedalus/Icarus



Gleichförmig abbrennender Orion ohne Fusionsstufe: Nukleare Salzwasserrakete nach Zubrin



- Brennstoff: Uran- oder Plutoniumsalz in wässriger Lösung.
- Brennkammer ummantelt mit Neutronenreflektoren.
- Konstant brennende nukleare Detonation.
- Schub und Rückstoßgeschwindigkeit ähnlich Orion, aber kontinuierlich.
- Viele Physiker stellen in Frage, ob dieses Triebwerk eingeschaltet werden kann, ohne das ganze Schiff in 1 Mikrosekunde in eine Plasmawolke zu verwandeln.

Sehr häufiger populärer Irrtum:

„Raketen können die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten, weil ihre Masse bei Annäherung an sie gegen Unendlich geht“.

Dies gilt nur wenn der Rakete die Energie irgendwie von außen zugeführt wird (Lichtsegel, Laser...).

„Normale“ Raketen, die ihre Energiequelle mitführen, werden bei Beschleunigung nicht massereicher (wegen Reaktionsmassenausstoß werden sie sogar leichter), da ihr Energiegehalt konstant bleibt, es wird lediglich die innere Energie des Antriebssystems in eine andere Form (Bewegungsenergie) umgewandelt. Sie können die Lichtgeschwindigkeit nicht überschreiten, da sie, um sie zu erreichen, ihre gesamte Masse (einschließlich Nutzlast, Astronauten, Koch und Katze) in Antriebsenergie umwandeln müssten.

Energiezufuhr von außen



Mitfliegender Energievorrat



$$E = m c^2$$

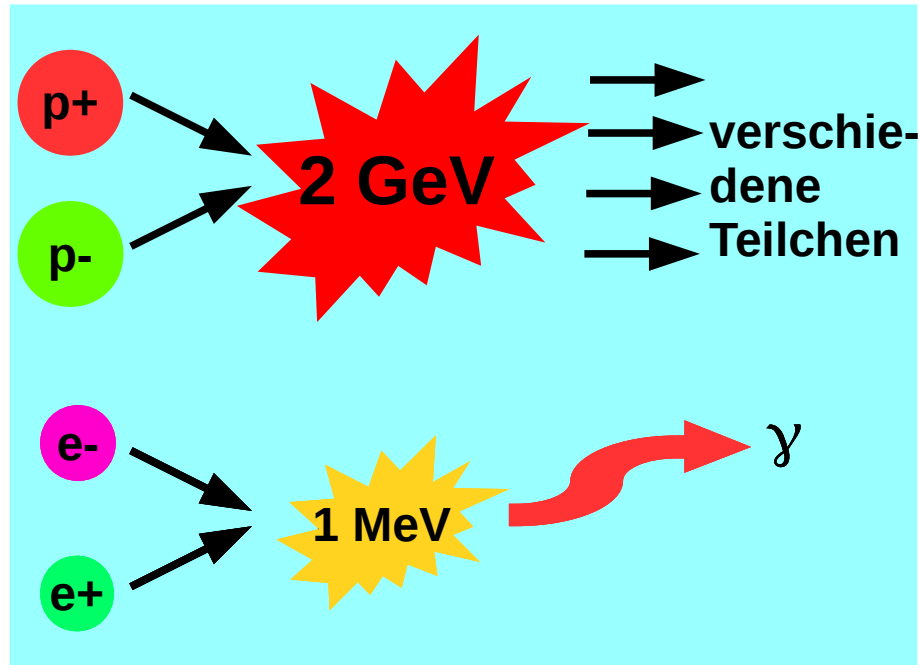
Einsteins bekannteste Formel: Energie ist gleich Masse mal Lichtgeschwindigkeit hoch 2.

Sie bedeutet: Die von außen(!) wahrnehmbare Masse eines Objektes ist seinem kompletten Energiegehalt proportional.

Die im Materie enthaltene Energie (und damit ihre Masse) stammt überwiegend aus dem Gluonenfeld, das Protonen und Neutronen innerlich zusammenhält und in den Atomkernen aneinander bindet. Die Formel gilt jedoch auch für alle anderen Energieformen.

Der gesamte Energieverbrauch aller Deutschen in einem Jahr entspricht einer Masse von 154 kg.

Antimaterie



Gleicht „gewöhnlicher“ Materie bis auf Ladung:

Antiprotonen – negativ

Antielektroen (Positronen) – positiv.

Kontakt mit Materie:

Nach bekannter Physik **stärkste mögliche Energiefreisetzung** nach der Formel

$$E = (m_1 + m_2) c^2$$

(m_1 = Masse Antimaterie, m_2 = Masse Materie.)

Probleme:

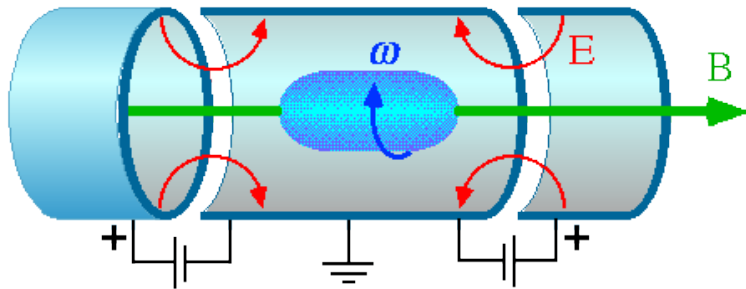
- Antimaterie wird nicht in großer Menge in der Natur gefunden – muß unter Energieaufwand hergestellt werden. **Energiespeicher, keine Energiequelle.**
- Sehr schwierig zu lagern. Kontakt mit Behälterwand → Explosion in Kernbombenstärke oder stärker (**1 g = Hiroshima, 1 kg = Tsar Bomba, 50 Mt.**)

Antriebsmöglichkeiten:

- Reaktionsprodukte M+AM als Rückstoßmedium. **Nur geladene Teilchen aus p+/p- sind lenkbar (60% der Reaktionsprodukte).**
- Mithilfe von M+AM-Reaktion Rückstoßmedium erhitzen und ausstoßen.
- AM zur Katalyse anderer Kernreaktionen nutzen, z. B. **AM-katalysierte Fusion.**

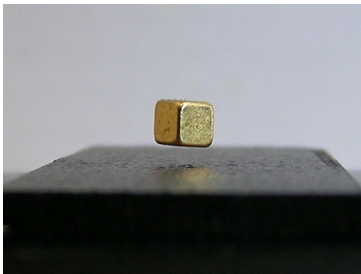
Antimateriespeicher

Penning-Falle



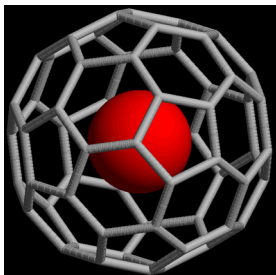
- Speicherung geladener Teilchen in überlagerten elektrischen und magnetischen Feldern.
- Wird heute genutzt, um geringe Mengen an Antiprotonen (einige 1000) einzuschließen.
- Nur geringe Speicherdichte möglich, für Raumfahrt wahrscheinlich ungenügend.

Diamagnetisches Schweben



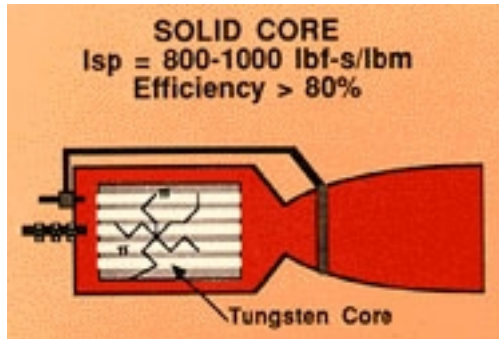
- Schneeball aus gefrorenem Antiwasserstoff wird von inhomogenem Magnetfeld abgestoßen, kann dadurch zum Schweben gebracht werden.
- Entnahme von Antimaterie durch Abdampfen mittels Laser.

Einsperren in Fullerenen

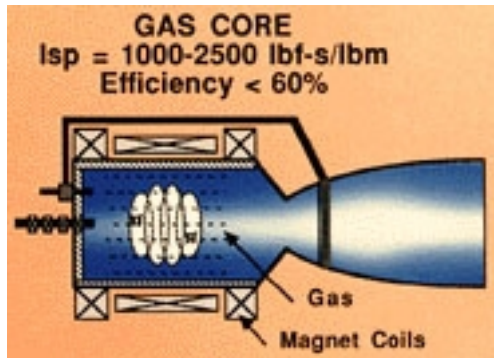


- Antiteilchen werden in Fußballmoleküle gesperrt.
- Bei 1 Positron in jedem 10. Fulleren: Energiedichte $\sim 6000\times$ TNT.

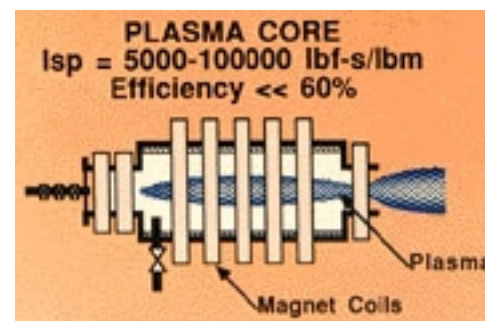
Antimaterierakete



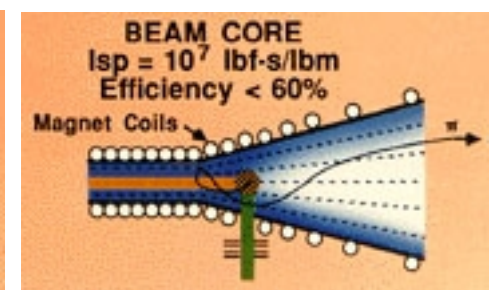
$v_0 \sim 10 \text{ km/s}$



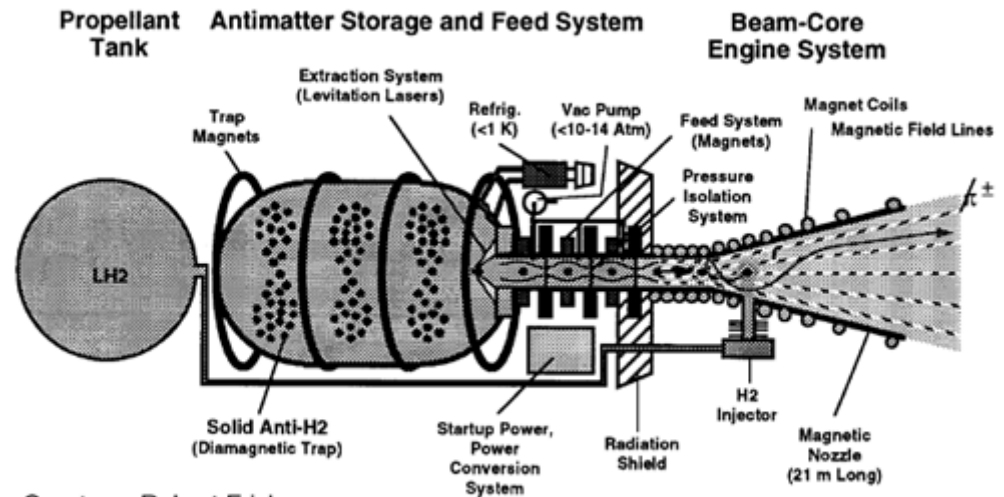
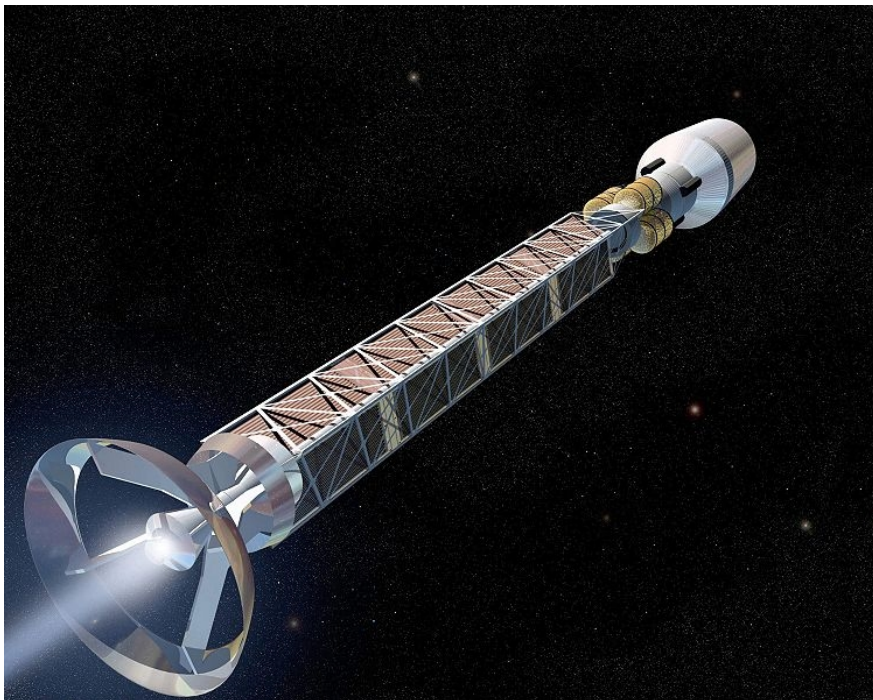
$v_0 \text{ bis } 25 \text{ km/s}$



$v_0 \text{ bis } 1000 \text{ km/s}$



$v_0 \text{ bis nahe } c$



Courtesy: Robert Frisbee

Bussard-Ramjet

Riesiger Magnettrichter saugt dünnes interstellares Wasserstoffplasma an, das als Fusionsbrennstoff d

Geschwindigkeiten beliebig
nahe c möglich.

Dank RT kann Mannschaft während ihrer
Lebenszeit jeden(!) Ort im beobachtbaren
Universum erreichen.

Arbeitet umso effizienter, je schneller das Schiff fliegt.

Sehr hypothetische Technologie.





Vielen Dank!
Texte, Slides, Infos ab Montag auf
nuklearia.de