

# Space Mining

P.J. Klar  
I. Physikalisches Institut, JLU

Mühlleithen, 15. März 2023



# Definition Space Mining?



SPACE GENERATION  
ADVISORY COUNCIL

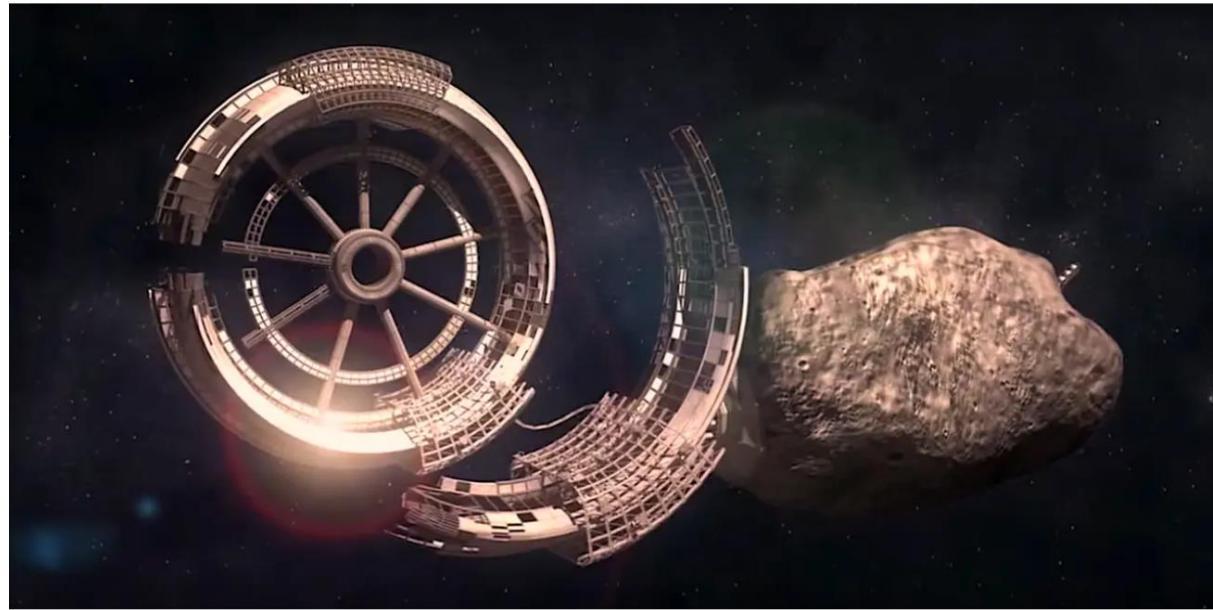
- Space mining comprises the exploration, exploitation and utilization of natural resources to be found in the Moon, other planets and near-Earth asteroids (NEAs); primarily, what can be encountered is a rich diversity of useful materials such as minerals, gases (mainly Helium-3), metals and water.
- Space Mining is envisaged to be key to the future of space exploration, as it may sustain human life in the long term by providing energy and raw materials - manufactured from space mining findings - and, consequently, it may enable the future and deeper exploration of outer space.
- In hindsight, harvesting space resources has proved its great potential, as evidenced by the samples and data brought back from the reiterative expeditions to the Moon and NEAs by space powers like the United States, Japan, the former Soviet Union and, most recently, China; which proved the mineral wealth of lunar rocks and dust, and showed the existence of large deposits of water ice in lunar poles.

# Inhalt

- Space Mining: Science Fiction oder Science
- Grundlagen zum Raumflug und zu Asteroiden
- Bisherige wissenschaftliche Missionen mit „Space Mining“
- Beispiel für eine Strategie zum richtigen Space Mining von Asteroiden
- Fazit

# Goldman Sachs: space-mining for platinum is 'more realistic than perceived'

Jim Edwards Apr 6, 2017, 12:46 PM



An artist's impression of an asteroid mine, created by Deep Space Industries, a company based in California and Luxembourg. [Deep Space Industries](#)

“ Space mining could be more realistic than perceived. Water and platinum group metals that are abundant on asteroids are highly disruptive from a technological and economic standpoint. “

“ While the psychological barrier of mining asteroids is high, the actual financial and technological barriers are far lower. “

# Überlegung von Goldman Sachs - 50 Mrd \$ an PGM



Bild vom M-Typ Asteroiden  
21 Lutetia (Durchmesser 50 km) aufgenommen bei  
der ESA Rosetta Mission  
@ ESA

(PGM = platin group metals)

- M-Asteroid mit 500 m Durchmesser hat ein Volumen  $V$  von:  
$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = 6,55 \cdot 10^7 \text{ m}^3$$
- Bei typischer Asteroidendichte von  $3,5 \text{ t/m}^3$  ergibt sich eine Masse  $M$  des Asteroiden von:  
$$M = \rho \cdot V = 2,29 \cdot 10^8 \text{ t}$$
- M-Typ Asteroiden können PGM-Konzentrationen von  $C_{\text{PGM}} = 10 \text{ ppm}$  (10 Gramm pro Tonne) besitzen, damit ergibt sich eine Masse  $M_{\text{PGM}}$  an PGM von:  
$$M_{\text{PGM}} = C_{\text{PGM}} \cdot M = 2,29 \cdot 10^6 \text{ kg}$$
- Bei einem Preis von etwa 25.000 \$/kg für Pt in 2017 ergibt sich ein Wert von:

**57 Mrd \$**

# Space Mining Science Fiction oder Science

# Star Trek: The Devil in the Dark (S1, Ep. 25/26) (1966)



Abbau von Seltenen  
Erden und Edelmetallen  
auf anderen Planeten

**Star Trek: The Devil in the Dark (S1, Ep. 25/26) (1966).** The crew of *The Enterprise* responds to a distress call from the mining colony on Janus VI. The planet has long been known to have enough precious metals and rare earth elements to supply the needs of a thousand other planets. The opening of a new level to mine a large source of pergum uncovers a vast deposit of silicon nodules. But it also disturbs the Horta, a pulsating botryoidal rock monster that threatens the whole operation. Now miners are too scared to work and production has stopped. If the Federation wants its pergum, something must be done. A touch of Spock mind-probing reveals the silicon nodules to be the Horta's eggs and she is simply defending her nest.

# Moon Zero Two (1969)



**Moon Zero Two (1969).** It's the year 2021 and the Moon is a bustling outpost in the process of being colonised. A salvager is hired to move a sapphire-laden asteroid parked in lunar orbit down to the surface to be mined. The mineral will be used to improve the rocket technology that will help colonise Mercury and the Jovian moons. When a miner mysteriously disappears, his sister enlists the salvager to help find out what happened. It turns out he was murdered after discovering a massive deposit of nickel where the asteroid was to be brought down. This movie was marketed as the first ever space western: expect lots of shoot-outs between brightly-suited astronauts and some rather racy costumes on the girls.

# Alien (1979)



Transport von  
aufbereitetem Metallerz  
zur Erde

**Alien (1979).** In 2122, the commercial space barge Nostromo is hauling a mobile refinery of mineral ore back to Earth. The crew is brought out of cryo-sleep by the ship's computer a few months earlier than planned to respond to a supposed distress call from a derelict ship on a nearby moon. But the ship is being used to retrieve a sample of alien life known to exist on the moon and the crew is expendable. We never get to see any mining activity but we do witness the emergence of a vicious xenomorphic alien—but nothing Ripley can't handle. This film is only included because it is, perhaps, the most influential sci-fi space thriller ever made.

# Outland (1981)



**Outland (1981).** Set in the near future on a titanium mining outpost on Jupiter's moon Io, a Federal Marshall on a tour of duty uncovers a drug ring supplying powerful amphetamines to the miners. The drug enables miners to work for days on end to maintain the mine's record productivity as well as sustain the miners' huge bonuses, so no-one is complaining. But months of use is resulting in cases of psychosis and suicide and the Marshall is determined to close it all down, singlehandedly if necessary. Great effort was put into creating the look and feel of a mining operation, just don't expect to see any ore being dug up. It's really just a big space western with all guns blazing—exactly what the filmmaker said he was shooting for.

# Moon 44 (1990)



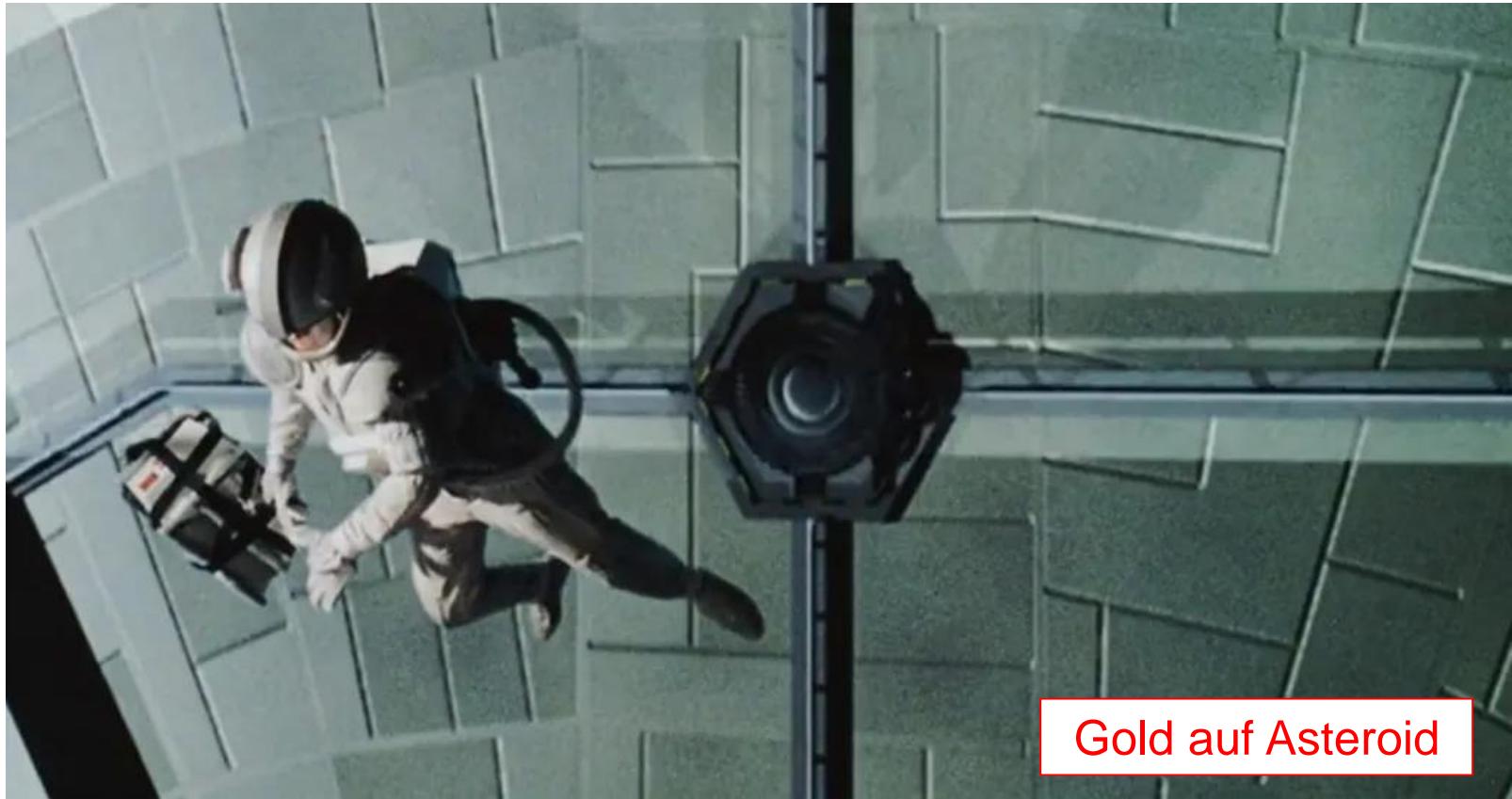
**Moon 44 (1990).** It's the year 2038 and all of Earth's natural resources have been used up. Huge corporations are fighting for control of the richest planetary bodies to mine and there's a battle to take control of the mining operations far away on Moon 44. When a film starts with the text crawl "multinational corporations have taken control of the universe", I think you know what to expect. So I'll surrender now. Having said that, it's not too bad to watch, just make sure the volume and subtitles are off.

# Precious Find (1996)



**Precious Find (1996).** It's year 2049 and Moon City resembles an outpost in the wild, wild west. Three strangers join forces to find gold, known as "the precious", on Asteroid 18. One is an eager young prospector, the second has a spectral map that will lead them to it, and the third owns the space hauler that will get them there. A cyborg Samurai jumper and his henchmen land on the asteroid to steal the precious find but fall fate to what look like the monsters from *Tremors*.

# The Cusp (1996)



**The Cusp (1996).** In the not too distant future, Earth's bloated population of 26 billion has exhausted its natural resources. A massive metal asteroid is being moved into a lunar trojan orbit for mining, but not everyone is convinced this will save the Earth. A band of environmental extremists plan an Armageddon that will reset the clock and cleanse the planet of everything except basic bacteria. One supporter has infiltrated the crew of the asteroid mission and is reprogramming the coordinates to mask the asteroid's true speed and trajectory—it's now coming in too fast to be captured by Earth's orbit and impact is certain. The last legitimate crew member has to try and nudge it just enough to prevent the catastrophe.

# Battlestar Galactica (2004)



**Battlestar Galactica: The Hand of God (S2, Ep. 10) (2004).** Early on in this cult TV series, the fleet is running low on its main fuel source of tylium and ships are out scouting for supplies in nearby star systems. But tylium is an incredibly rare ore and without new resources they will have to use the last of their supply to jump to the nearest planetary system in the hope it will harbour a habitable planet, otherwise everyone will perish. A last ditch attempt at sweeping the asteroid field detects a deposit that might supply enough tylium to last a couple of years. The only problem is the Cylons are already mining it and it's the only tylium ore within 12 light years. Can they blow up the base without the radioactive fallout rendering the tylium inert? Let's just say it's fracking, but not as we know it.

# A Day on the Asteroid (2009)



**A Day on the Asteroid (2009).** The year is 3032 and a Groucho Marx lookalike Chief Inspector is sent to the asteroid mining colony Palermus IV to investigate disturbances in the space-time continuum related to wormhole activities taking place on the asteroid. Meanwhile, the Commissar is making preparations for the arrival of a well-known speaker from the past. There's a catchy song at 4:20 delivered by this Neil Young-like soundalike Inspector who makes it clear that...*there's something going on on this asteroid*. I'll warn you now: it's a very unique P-type asteroid and any mining activity taking place here would only yield plasticine.

# Moon (2009)

[https://www.youtube.com/watch?v=WWoDBcSW4\\_c](https://www.youtube.com/watch?v=WWoDBcSW4_c)



**Moon (2009).** It's not far in the future and the Earth is in the throes of a fuel crisis. The sole crew member on a lunar mining base is almost at the end of his three year contract, shipping canisters of harvested helium-3 back to Earth. Waking up inside the base after crashing his buggy, he suspects all may not be as it seems. Back at the crash site he finds he's still lying injured in the rover, and there's the startling realisation that they are clones. The company is rearing duplicates in a huge facility below ground that replaces clones at the end of every contract—and the end of a contract means the incinerator. Back home, their progenitor has no idea he was cloned fifteen years prior...until one of the clones stows away in a shipment pod to Earth.

# Infini (2015)



**Infini (2015).** On a frozen planet in the far reaches of the galaxy, the outpost O.I. Infini mines a mineral aggregate called opus, a highly volatile energy source found only there. After it mysteriously kills 1,600 miners, all shipments are halted. If just one payload is exposed to Earth's atmosphere it would cause a global catastrophe. It is later discovered to be a frozen organic lifeform that when thawed becomes a predatory primordial ooze. One rogue survivor has prepped a payload to be shipped to Earth via a slipstream which will transport it hundreds of thousands of light years in minutes. Travelling in the opposite direction (and with a bit of time dilation) a Search and Rescue team has 24 hours to stop the shipment. It's more a biological hazard than a mining movie.

# The Expanse (2015-2021)

[https://www.youtube.com/watch?v=M0QwBp\\_da28](https://www.youtube.com/watch?v=M0QwBp_da28)



Abbau von  
Asteroiden im  
Asteroidengürtel

**The Expanse (2015–2021).** A saga set sometime after the 23<sup>rd</sup> century when the vast majority of the Solar System has been colonised. The inner planets control resources mined from the asteroid belt and beyond, to the detriment of those who live and work out there. The three largest powers—Earth, Mars and the Outer Planets Alliance—coexist on the brink of war. Following separate leads in overlapping stories, a Cererian cop, a UN politician and the multi-national crew of a commandeered Martian gunship uncover stealth technology, weaponised asteroids and a two billion year old self-replicating protomolecule that can build ring gates to other planetary systems. A mass of asteroid name-dropping and more mining in the opening episodes than a geologist can shake a pick at.

# Prospect (2018)



Edelsteinabbau  
auf Mond

**Prospect (2018).** A freelance prospector and his young daughter travel to a lush green moon in search of rare gemstones. The stones known as orolacks grow in pods of poisonous spores underground and the prospector has been hired to harvest a massive deposit known as the queen's lair. When her father is killed by rival prospectors, the girl teams up with one of the culprits and the story follows their journey through the forest, literally risking life and limb in search of the treasure. Battling a band of unstable settlers and an attempt to trade the girl into slavery for a caseload of the gems, the pair escape in a mercenary spaceship with nothing but their lives.

# Moon Crash (2022)



**Moon Crash (2022).** A disaster during a mining operation on the Moon sends huge chunks of moon rock into space. Hundreds of pieces are heading for Earth, destroying major cities around the globe. But the largest piece is still on its way and threatens to destroy the planet. By repurposing equipment from the mining operation, they might be able to fire an EM pulse to deflect the rock away from Earth.

# Gefahr für die Erde durch Asteroiden



<https://www.youtube.com/watch?v=ZyyrfB8s5cY>

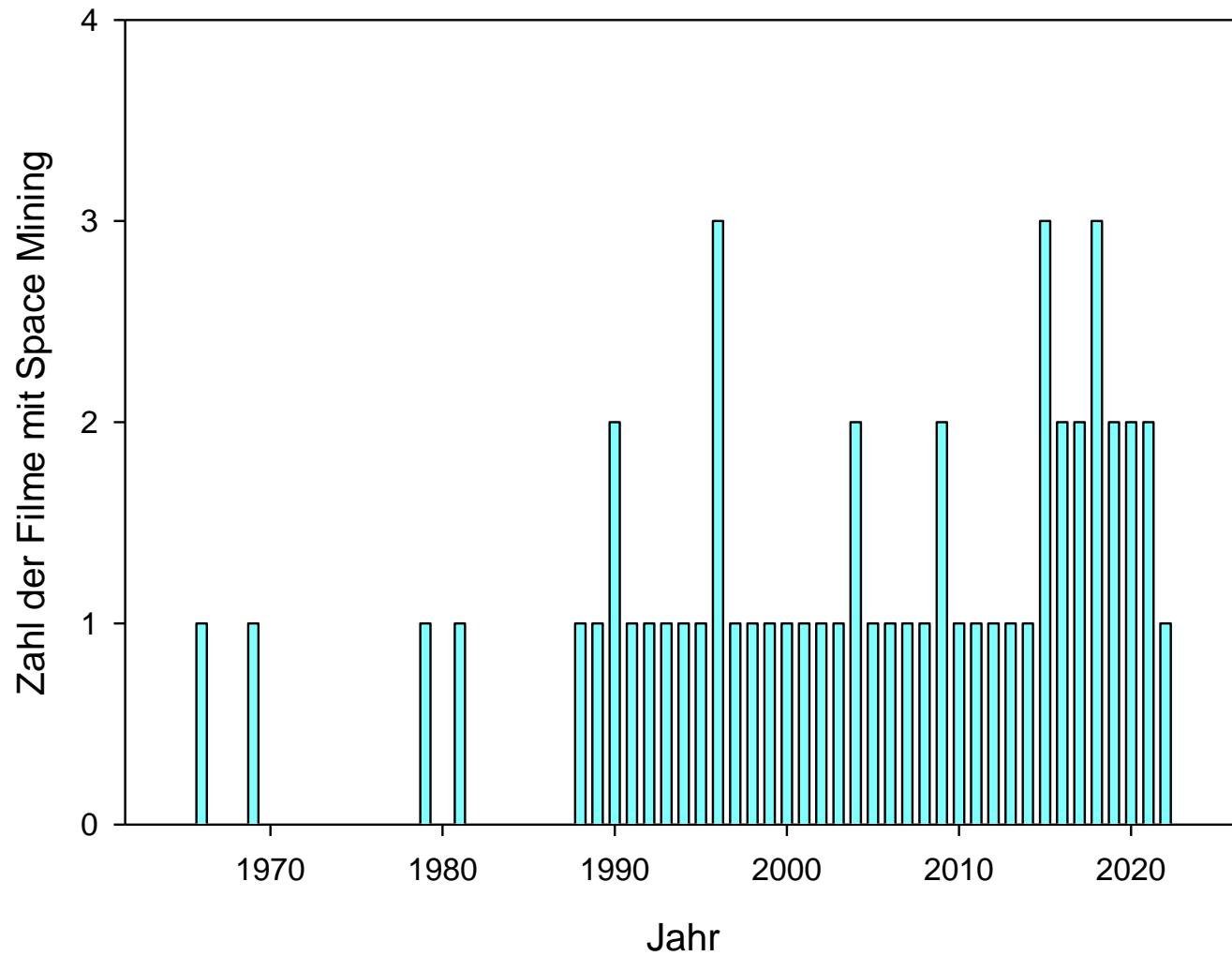
# Red Dwarf (1988-2021)



Nix!  
Nur Setting

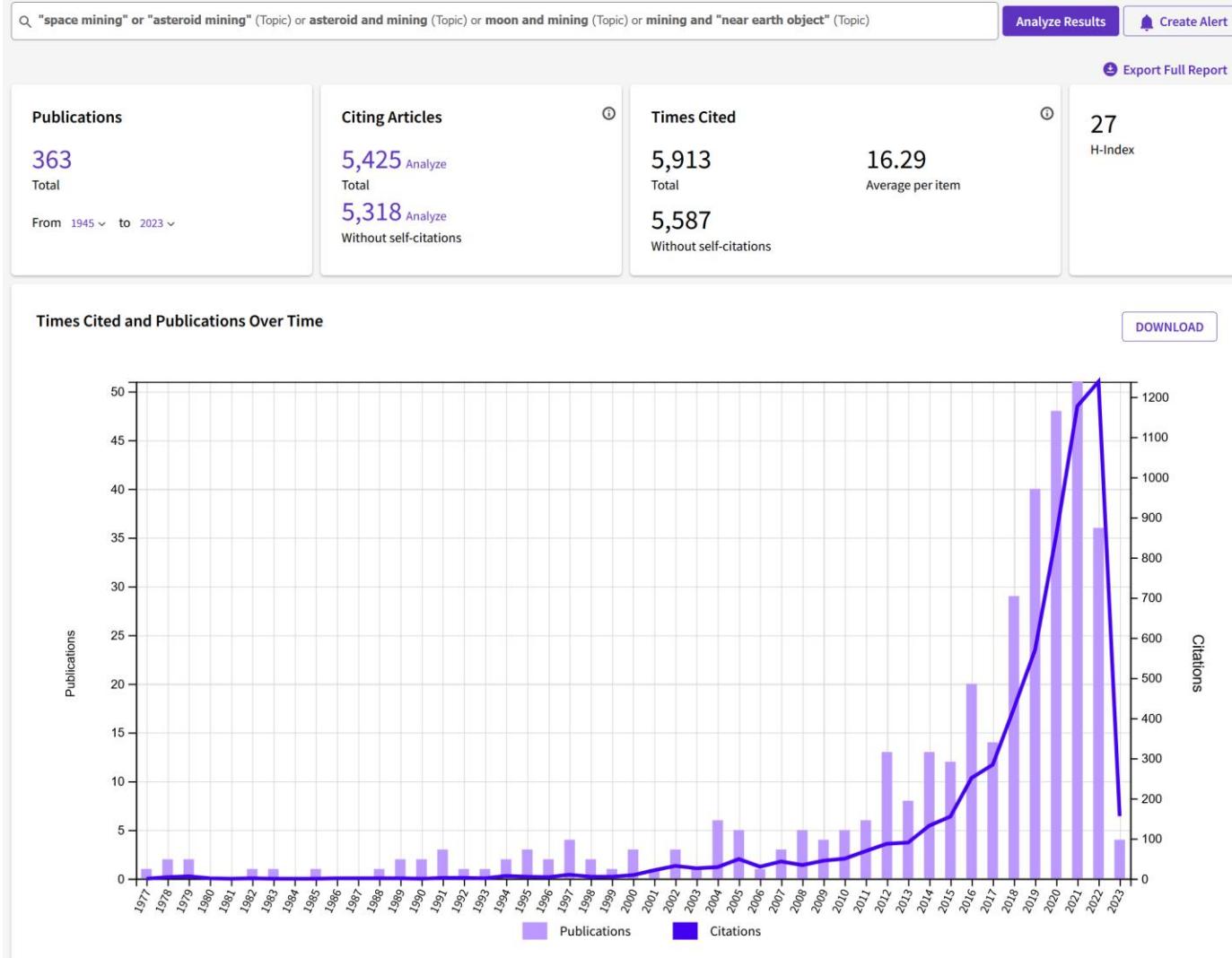
**Red Dwarf (1988–2021).** Cult TV sitcom set three million years in the future on a space mining barge. But the show has nothing whatsoever to do with the eponymous spaceship's long-abandoned mining pursuits and is included in this list for completeness. It's a miscellany of adventures involving the crew that remains after eons of suspended animation following a radiation accident: a technician, a hologram, a humanoid cat, a mechanoid robot and a senile computer. Voted Best Returning TV Sitcom by the British Comedy Guide more than once during the dozen or more series of its interrupted run.

# Filme mit Space Mining



# Web of Science - 11. März 2023

## Citation Report



# Grundlagen des Raumflugs

# Bewegung von Himmelsobjekten in unserem Sonnensystem

- Die Gravitation zwischen den Himmelskörpern bestimmt ihre Bewegungen.
- Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Sonne.
- Der Mond oder Satelliten bewegen sich auf elliptischen Bahnen um die Erde.
- Satelliten, Kometen, Asteroiden bewegen sich auf elliptischen, paraboloiden oder hyperboloiden Bahnen.

Die Himmelsobjekte auf ihren Bahnen weisen große Unterschiede  $\Delta v$  in ihren Geschwindigkeiten auf.

Ein Raumfahrzeug muss  $\Delta v$  beim Flug von einem zu einem anderen Himmelsobjekt überwinden.

Damit ein Himmelsobjekt seine Bahn zu wechselt, ist ein  $\Delta v$  erforderlich.



# Bewegung von Himmelsobjekten in unserem Sonnensystem



## 3. Keplersche Gesetz:

Die Quadrate (zweite Potenzen) der Umlaufzeiten zweier Planeten um das gleiche Zentralgestirn verhalten sich wie die Kuben (dritte Potenzen) der großen Bahnhalbachsen.

→  $\Delta v$  zwischen Himmelsobjekten ist zeitabhängig!

# Grundlage der Fortbewegung von Raumfahrzeugen

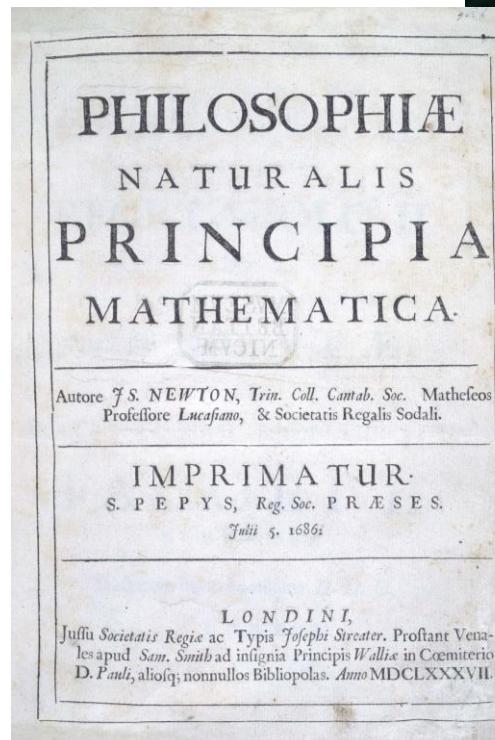
## Die Newtonschen Axiome (1686)

Klassische Mechanik oder Newtonsche Mechanik basierend auf den drei Newtonschen Axiomen.

**Axiom III:** Ein Körper der Masse  $m$ , auf den keine resultierende Kraft  $F$  wirkt, ruht oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit.

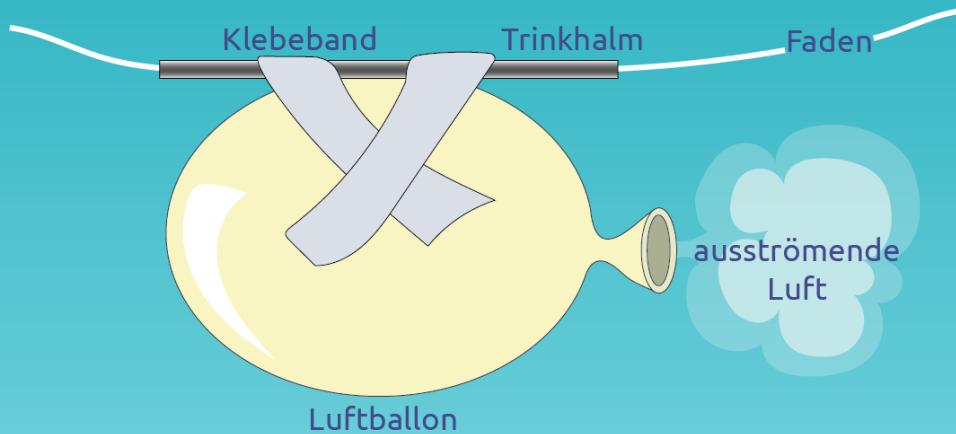
**Axiom III:** Ist die resultierende Kraft  $F$  auf einen Körper der Masse  $m$  nicht Null, dann wird der Körper beschleunigt in Richtung der Kraft mit  $a = F/m$ .

**Axiom III:** (*actio = reactio*) Übt ein Körper 1 auf einen Körper 2 eine Kraft  $F$  aus, dann übt 2 auf 1 die vom Betrag gleiche, aber entgegengesetzte Kraft  $-F$  aus.



Isaac Newton  
(1642-1727)  
Porträt von Godfrey Kneller

# Schub von Raumfahrtantrieben



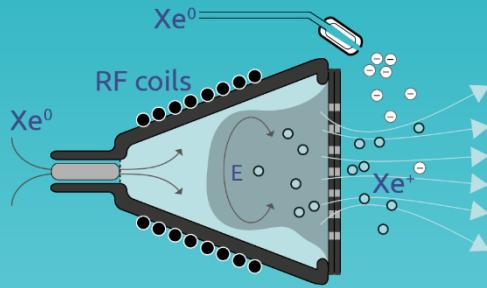
$$T = \frac{dm}{dt} \cdot w$$

- Alle Raumfahrtantriebe werfen etwas weg oder stoßen Masse aus, um das Raumfahrzeug fortzubewegen. → Rückstoßprinzip
- Die resultierende Kraft, die auf das Raumfahrzeug wirkt, ist der Schub  $T$ .

Großer Schub heißt entweder hohe Ausströmgeschwindigkeit  $w$  des Treibstoffs oder großer Treibstoffausstoß pro Zeiteinheit  $dm/dt$ .

# Arten von Raumfahrtantrieben

## Elektrische Antriebe

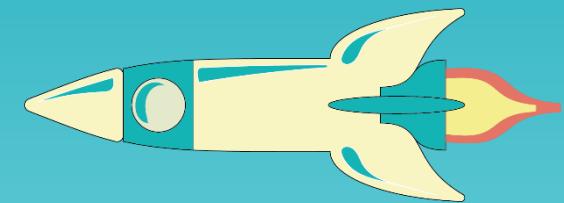


$$T = 1 \text{ N}$$
$$w = 30.000 \text{ m/s}$$

Niedrige Schübe  
Hohe Masseneffizienz  
Externe Energiezufluss

**Langstreckenläufer**

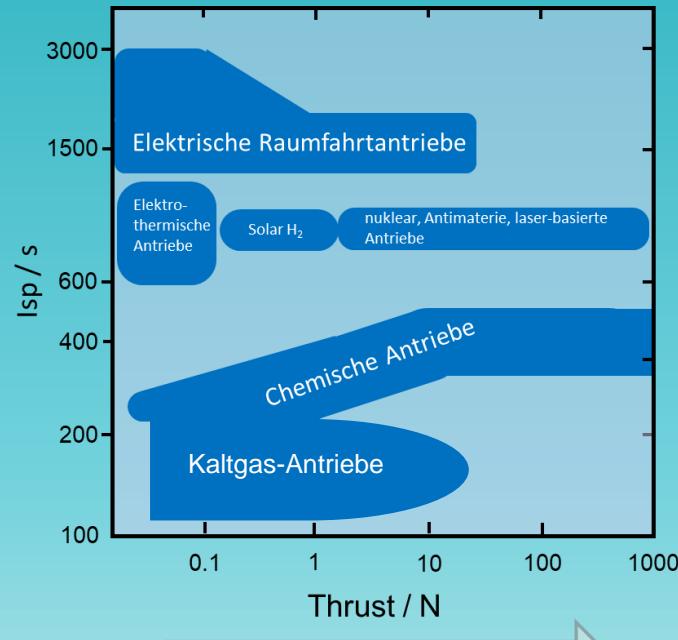
## Chemische Antriebe



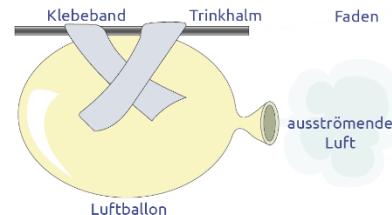
$$T = 1 \text{ MN}$$
$$w = 3.000 \text{ m/s}$$

Hohe Schübe  
Schlechte Masseneffizienz  
Chemische Energiespeicherung

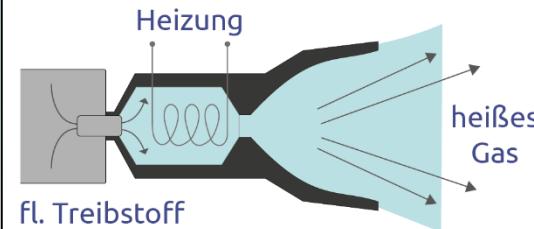
**Sprinter**



## Kaltgas-Antriebe



## Elektrothermische Antriebe



# Ziolkovskis Raketengleichung 1903

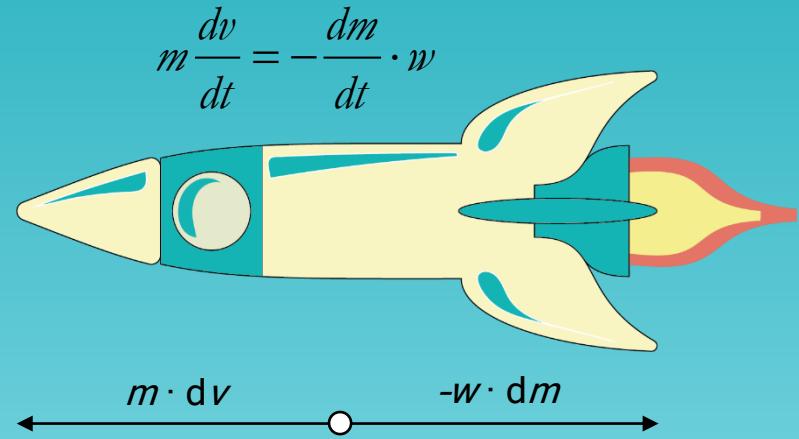


Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski  
(1857-1935)

Größere Austrittsgeschwindigkeit  $w$  bedeutet weniger Treibstoffmasse  $m_T$  für gleiches  $\Delta v$  bei gleicher Nutzlast  $m_N$ .

Je größer die Nutzlast, desto mehr Treibstoff wird benötigt, um das gleiche  $\Delta v$  bei fester Austrittsgeschwindigkeit  $w$  zu erreichen.

Je kleiner das  $\Delta v$ , desto weniger Treibstoff  $m_T$  wird bei gleichem  $w$  bei gleicher Nutzlast benötigt.



## Raketengleichung

$$\Delta v = v_f - v_i = w \cdot \ln \left( \frac{m_T + m_N}{m_N} \right)$$

$w$ : Austrittsgeschwindigkeit des Treibstoffs  
 $m_N$ : Nutzlast  
 $m_T$ : Treibstoffmasse  
 $\Delta v$ : Geschwindigkeitsänderung

# Kenngrößen für die Antriebsauswahl bei Missionen

## Verfügbare Leistung $P$ [W]

- Interne Quelle (chemischer Treibstoff)
- Nuklearreaktor (an Bord)
- Solarpaneele
- Terrestrische Quelle (LASER)

## Schub pro Leistung [N/W]

$$\eta = \frac{T}{P}$$

*Leistungseffizienz*

## Spezifischer Impuls [1/s]

$$Isp = \frac{1}{g} \frac{T}{\dot{m}}$$

*Masseneffizienz*

- Ressourcen im Weltraum sind typischerweise limitiert, z.B. die verfügbare Leistung
- Höherer Schub bei gleicher Leistung erlaubt schnelleren Orbittransfer (*Leistungseffizienz = Zeiteffizienz*).
- Masse ist im Weltraum teuer, großes Verhältnis zwischen Nutzlast und Gesamtmasse wünschenswert.
- Hoher spezifischer Impuls heißt weniger Treibstoff für den gleichen Schub (*Masseneffizienz*).

Manövriieren im Weltraum ist ein  
Kompromiss!

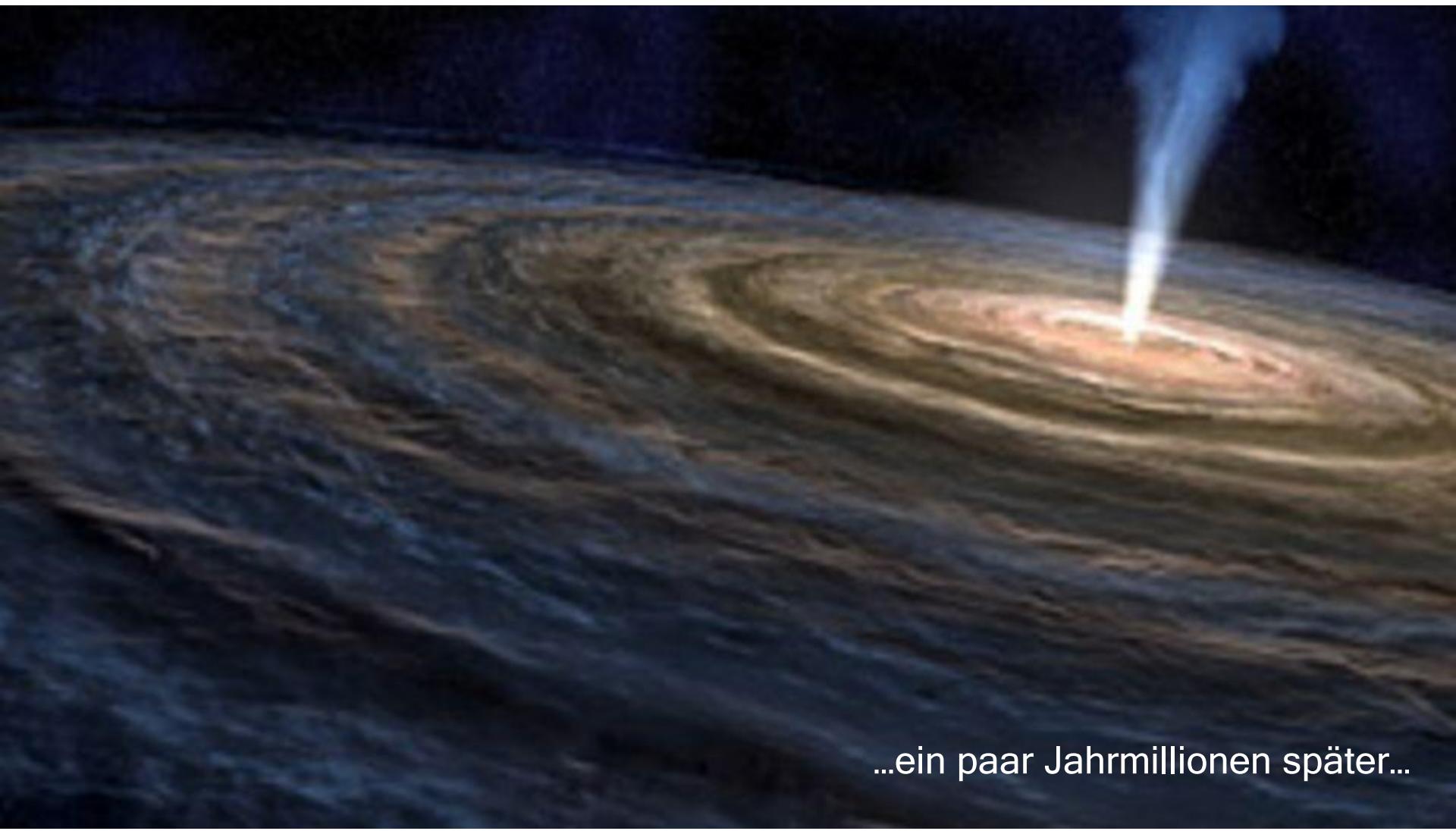
# Grundlagen zu Asteroiden

# Entstehung des Sonnensystems - Kosmischer Nebel aus Sternenstaub



Vor 4.6 Mrd Jahren...

# Entstehung unseres Sonnensystems - Kollaps zu rotierender Scheibe



...ein paar Jahrmillionen später...

# Entstehung unseres Sonnensystems - Kondensation zu Planetoiden und Asteroiden



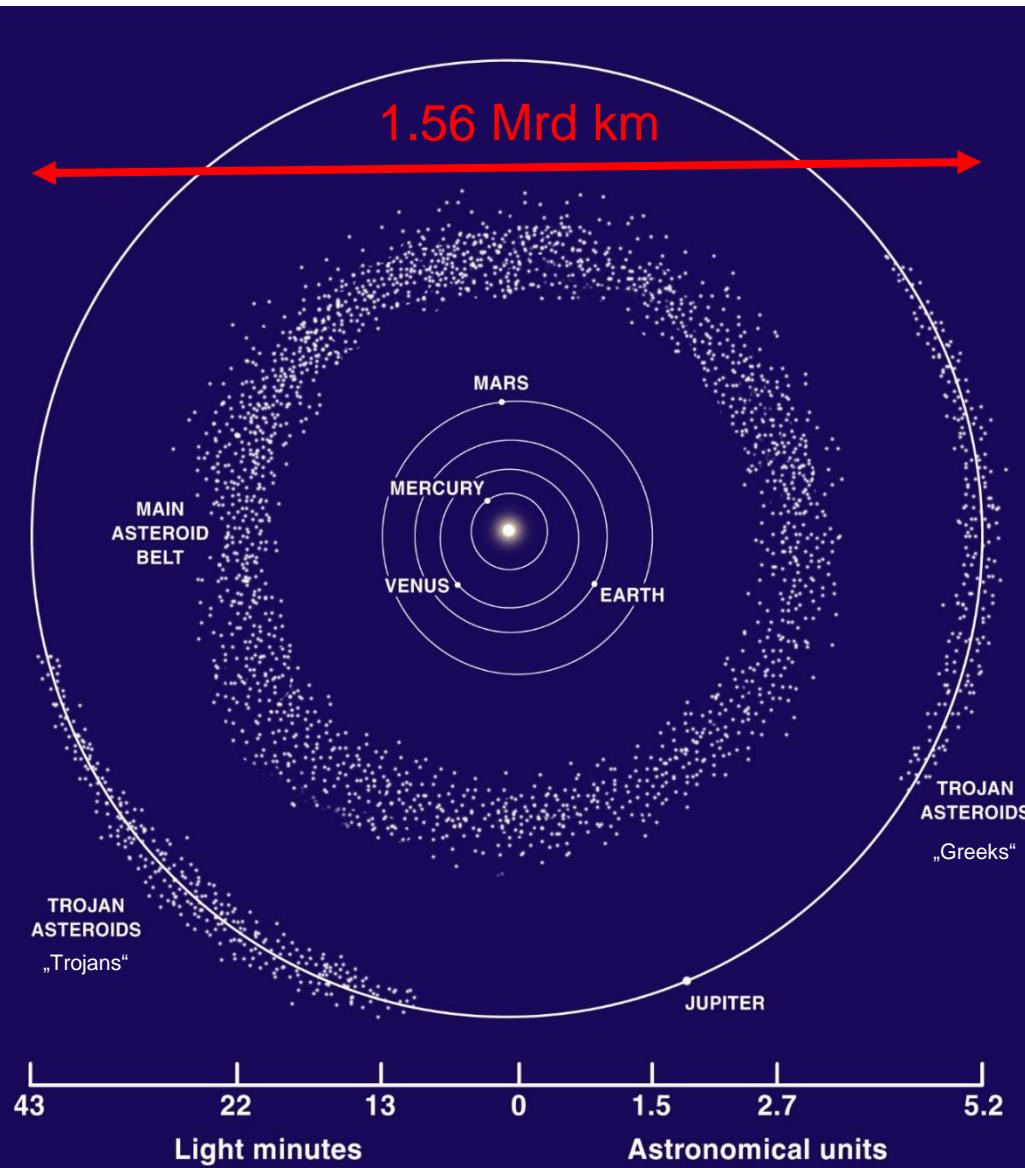
...nach rund 20 Millionen Jahren...

# Entstehung unseres Sonnensystems - Kondensation zu Planeten, Planetoiden und Asteroiden



...heute

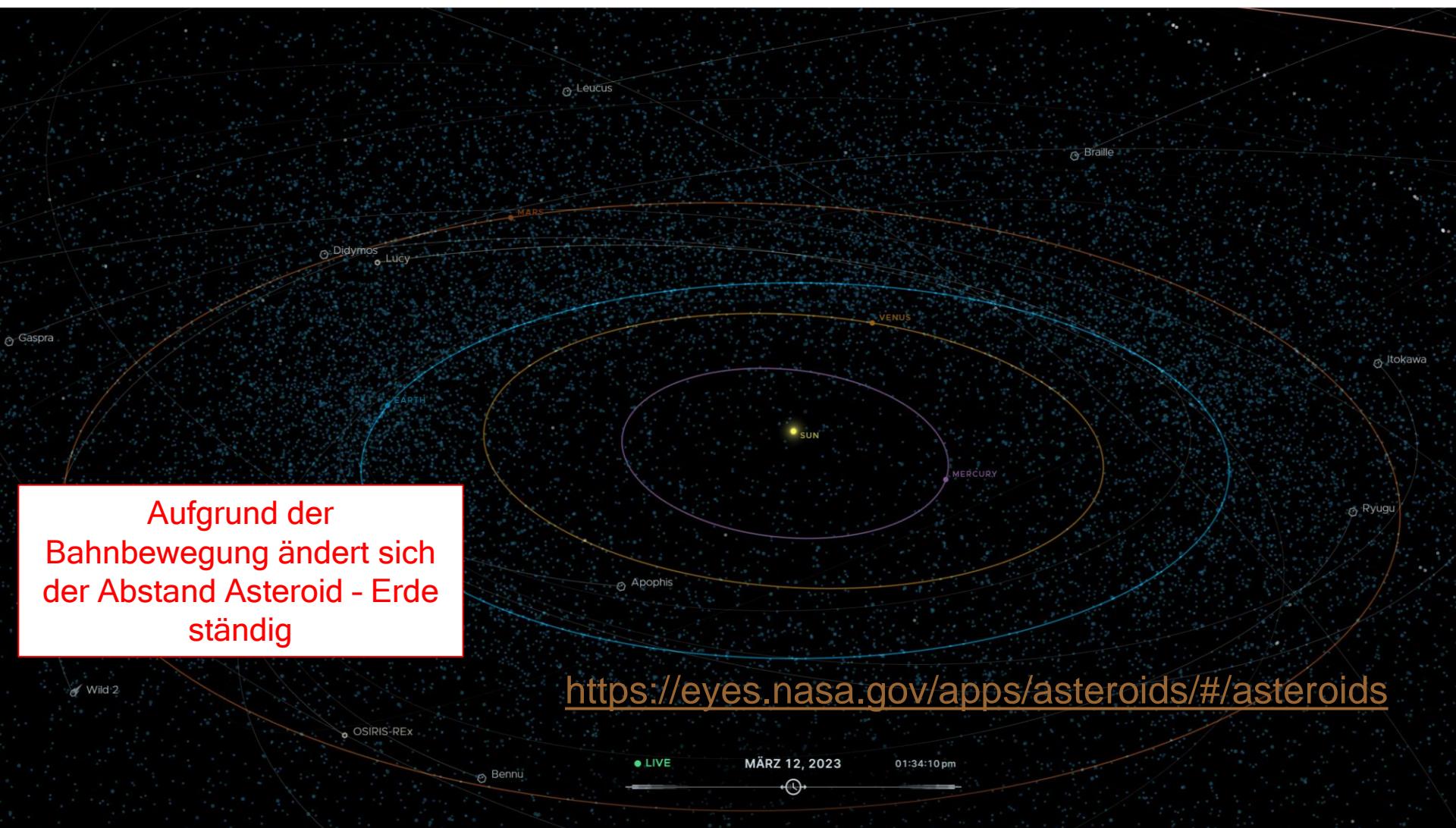
# Welche Arten von Asteroiden gibt es?



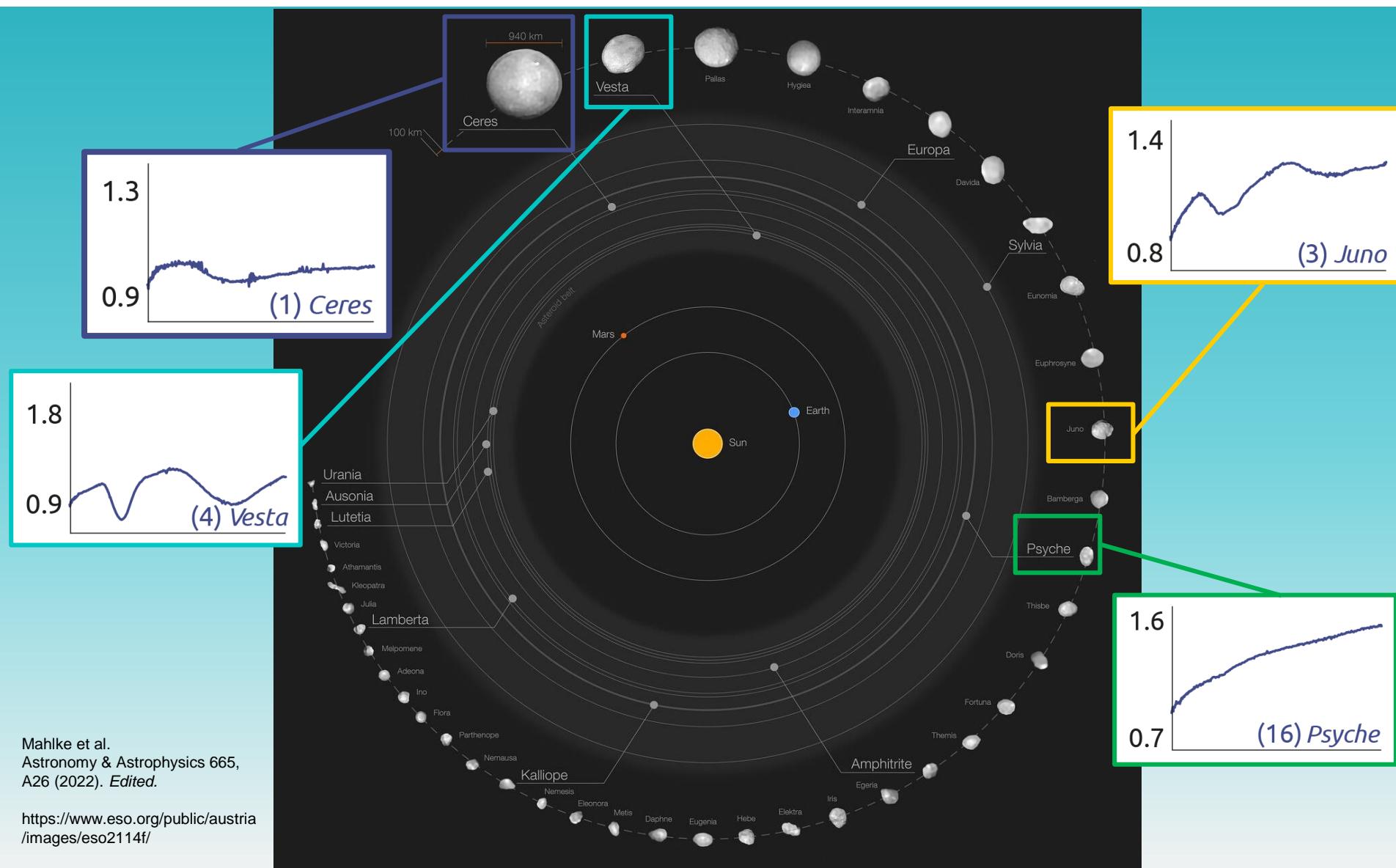
**Asteroid**  
**= kondensierter Sternenstaub**

- Asteroiden variieren in Größe und Form
- 1-Meter-Felsen bis zu Zwergplaneten mit fast 1000 km Durchmesser
- etwa 1 Million bekannte Asteroiden
- Im Astroidenhauptgürtel zwischen Mars und Jupiter, etwa 2 bis 4 AE von der Sonne entfernt, befinden die meisten Asteroiden
- etwa 30.000 in Erdnähe (1.3 AE von der Sonne, NEO = Near Earth Objects).
- sehr nahe Asteroiden (PHA, potentially hazardous asteroids)

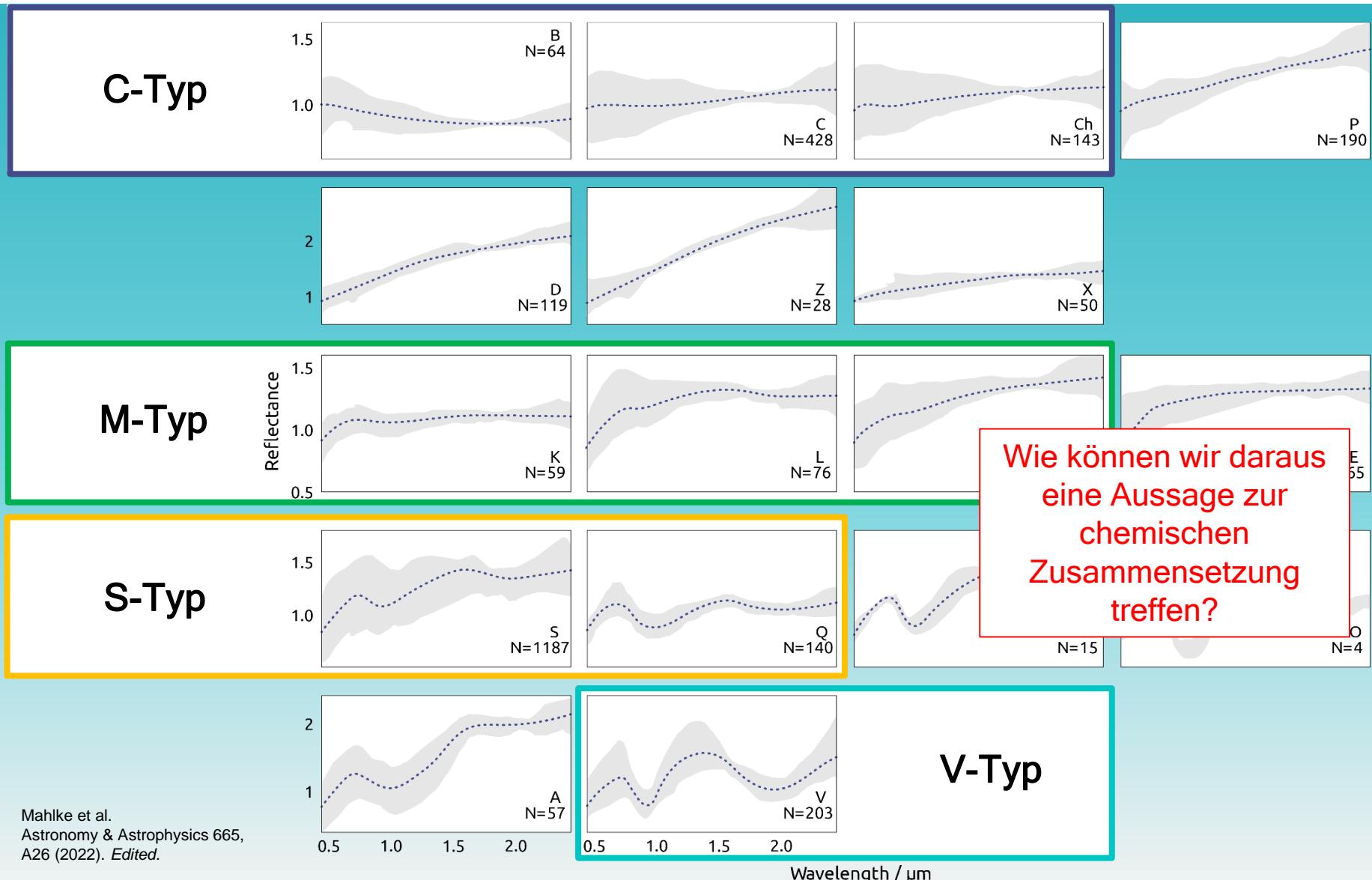
# Was und wo sind die Asteroiden?



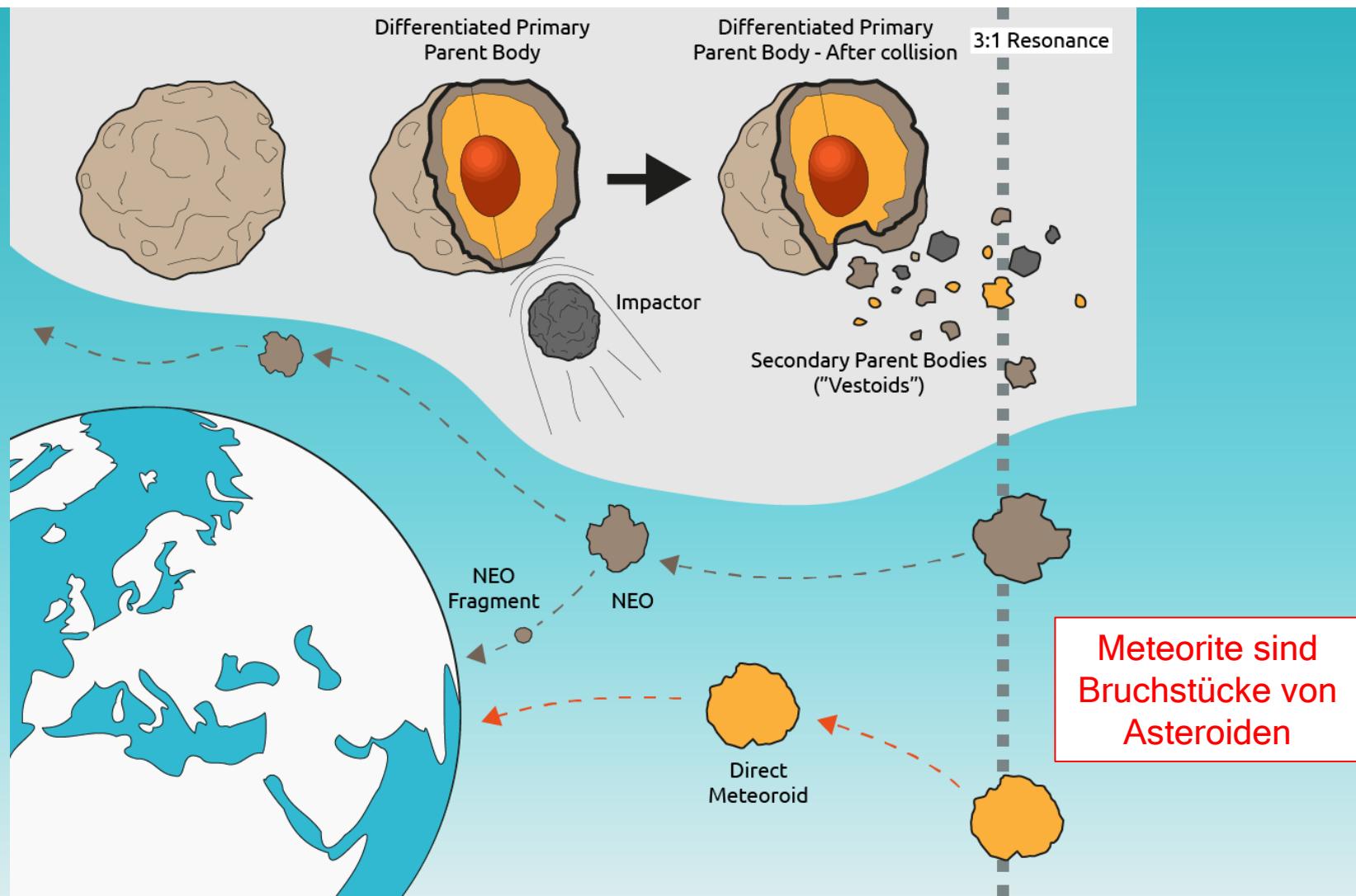
# Klassifizierung von Asteroiden nach spektralem Reflektionsverhalten (0.5 - 2.5 $\mu\text{m}$ ) & Albedo?



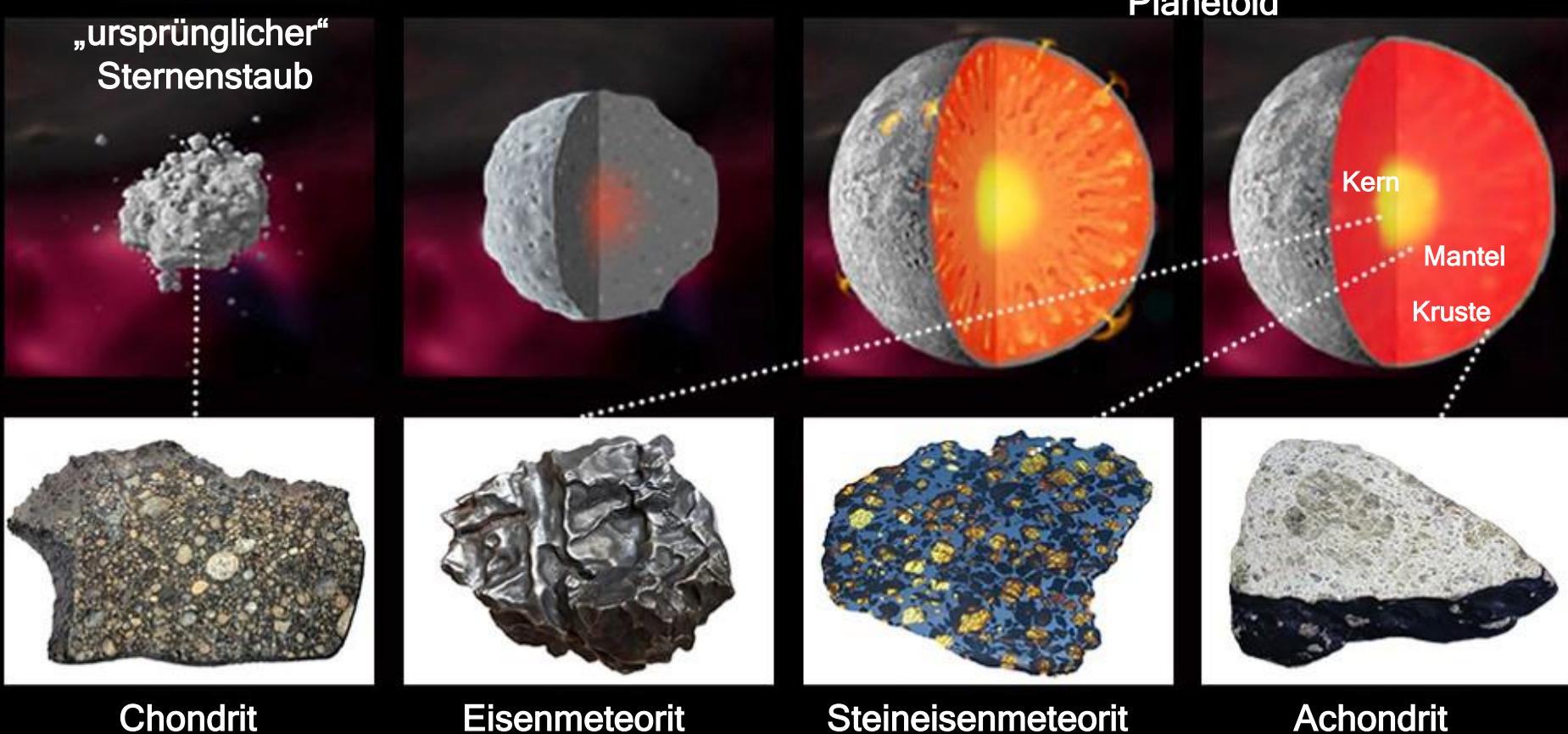
# Taxonomie von Asteroiden nach Mahlke 2022



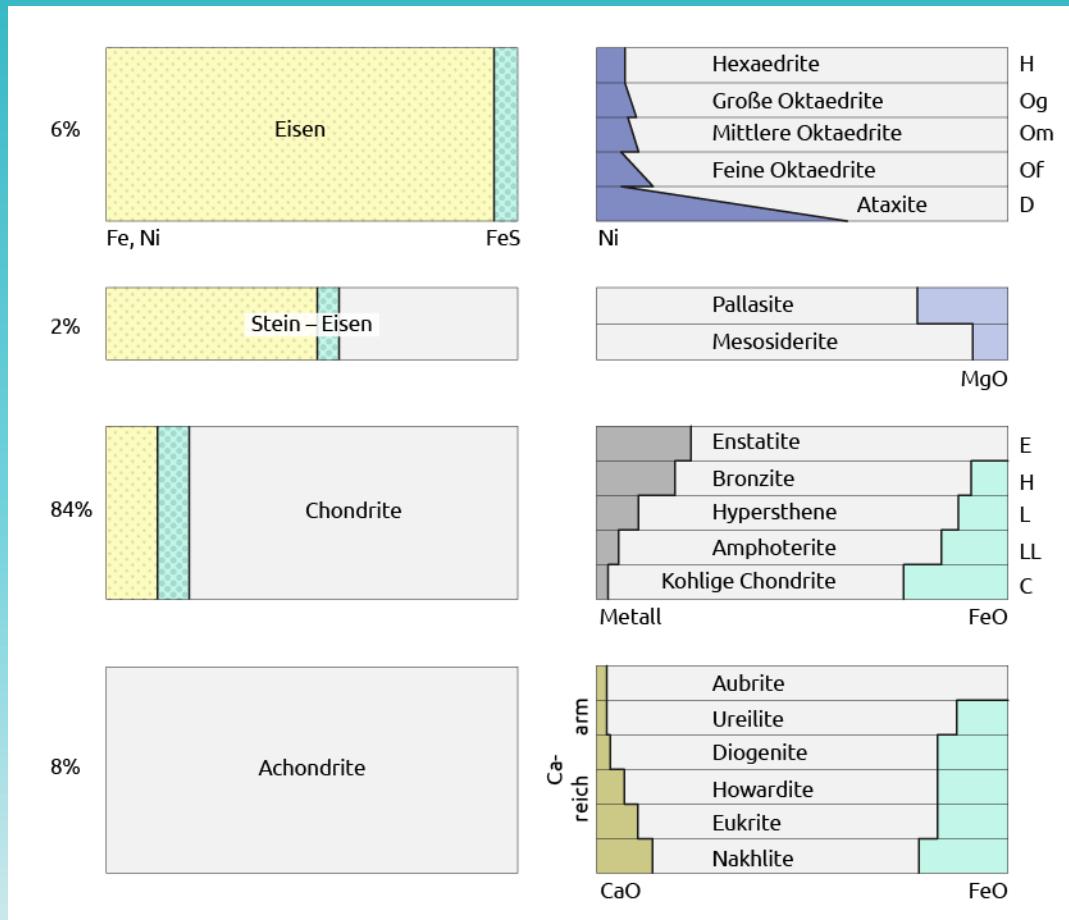
# Zusammenhang zwischen Asteroid & Meteorit



# Klassifizierung von Meteoriten

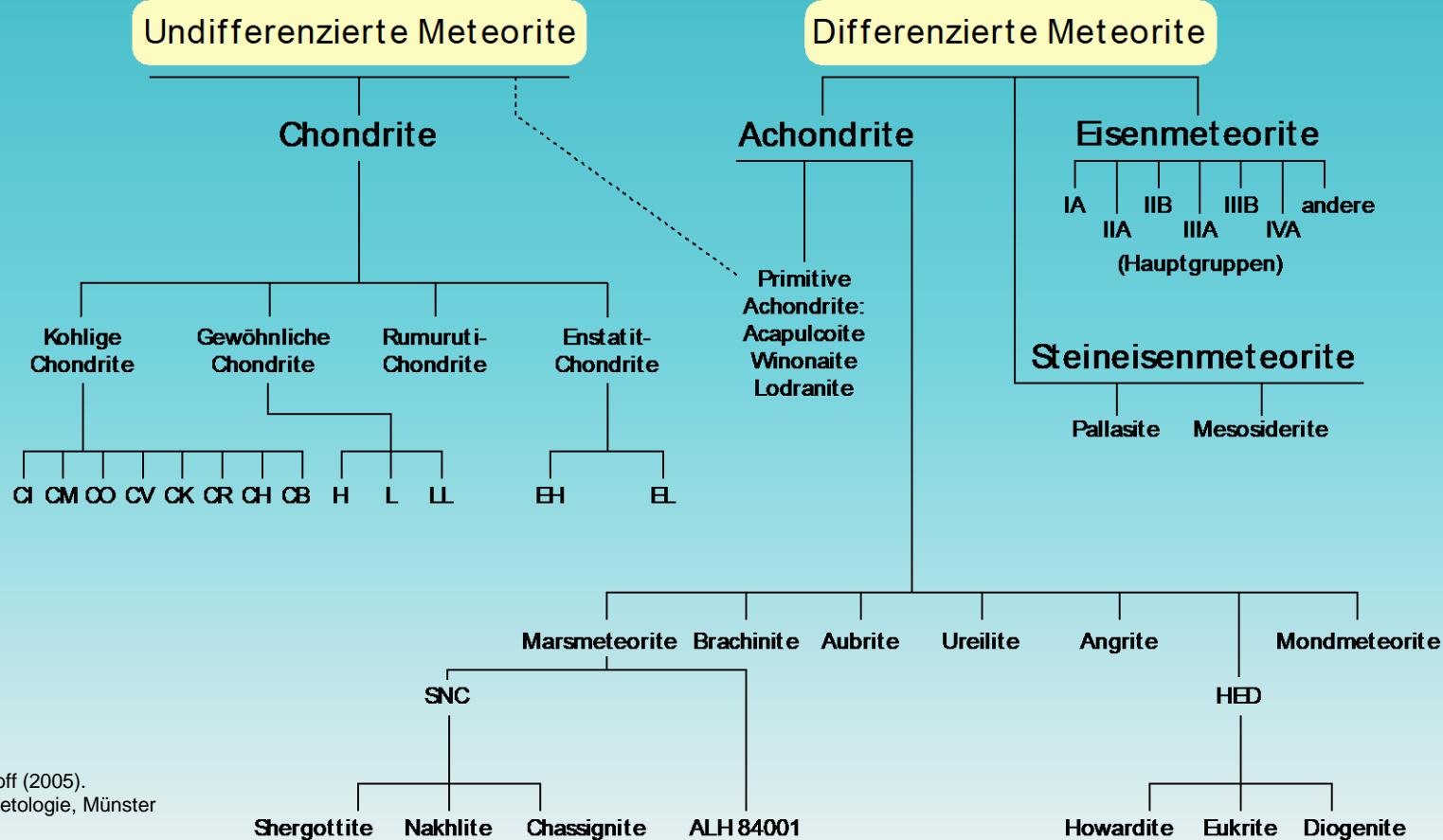


# Materialuntersuchung an Meteoriten

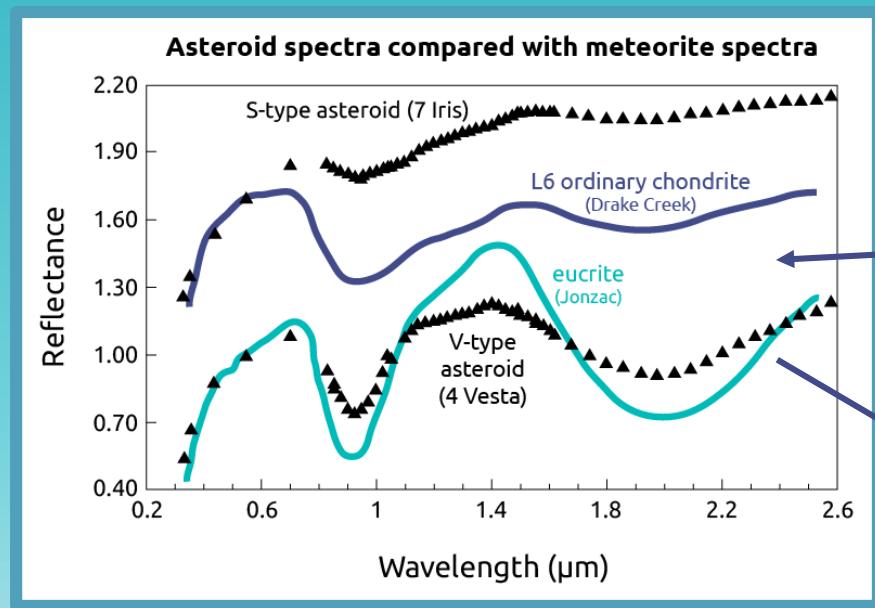


# Klassifizierung von Meteoriten

## Klassifikation der Meteorite



# Chemische Zusammensetzung von Asteroiden



(From Clark et al., (2002) Asteroid Space Weathering And Regolith Evolution, in Asteroids III, p. 585-599). Edited.

Die chemische Zusammensetzung von Asteroiden kann (noch) nicht direkt gemessen werden → Risiko

Chemische  
Zusammensetzung  
Asteorid

Spektrale Respons  
Asteroid

Vergleich

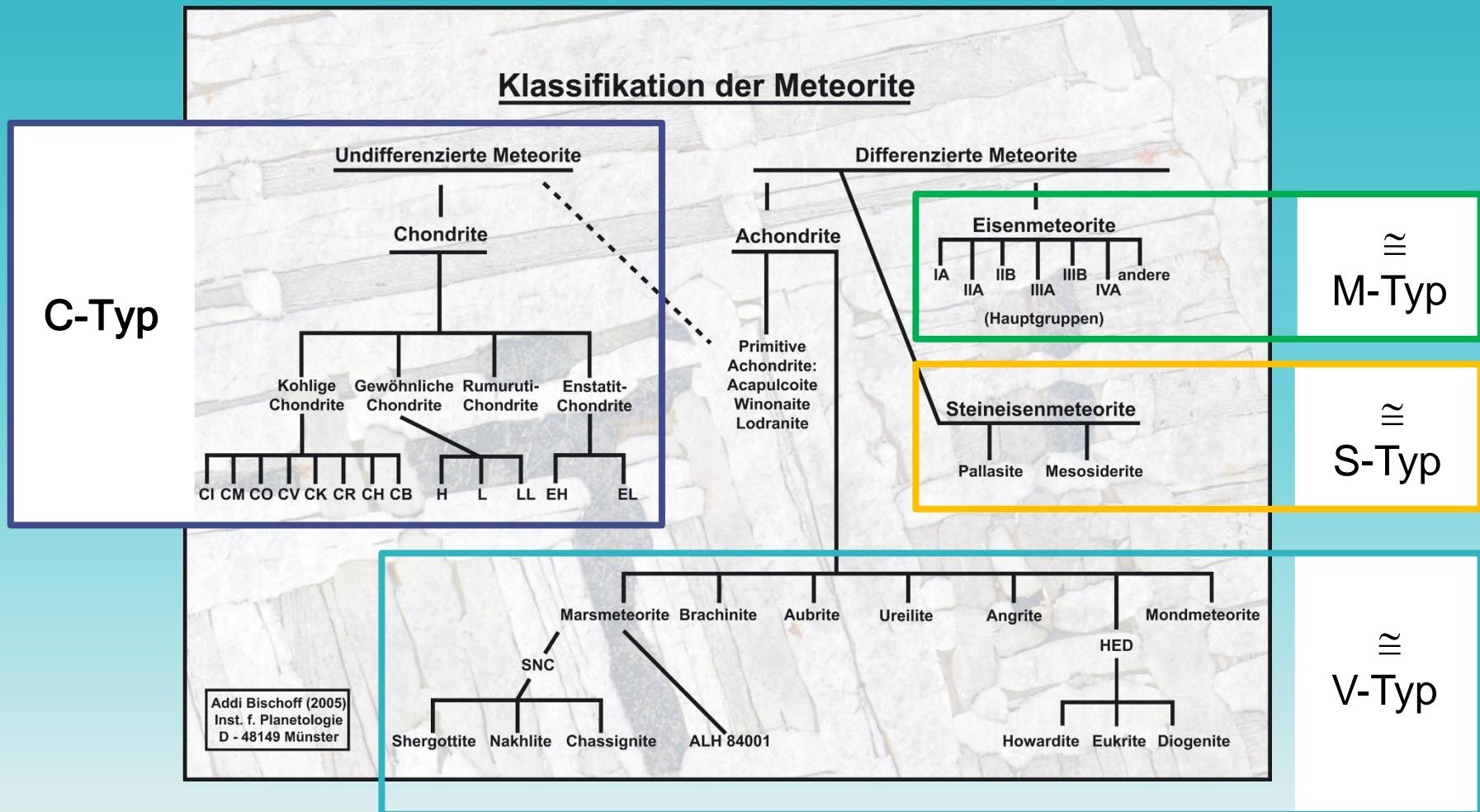
Spektrale Respons  
Meteorit

Chem. Analytik

Chemische  
Zusammensetzung  
Meteorit

Rückchluss

# Klassifizierung von Meteoriten



# Typische Elemente in Asteroiden

	Mineral	C2-Typ	C1-Typ	S-Typ	M-Typ
Metalle	Fe	10.7%	0.1%	13%	88%
	Ni	1.4%	-	1.5%	10%
	Co	0.11%	-	0.1%	0.5%
Flüchtig	C	1.4%	2.5%	3%	
	H <sub>2</sub> O	5.7%	12%	0.15%	
	S	1.3%	2%	11.5%	
Oxide	FeO	15.4%	22%	10%	
	SiO <sub>2</sub>	33.8%	28%	38%	
	MgO	23.8%	20%	24%	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.4%	2.1%	2.1%	
	Na <sub>2</sub> O	0.55%	0.3%	0.9%	
	K <sub>2</sub> O	0.04%	0.04%	0.1%	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28%	0.23%	0.28%	

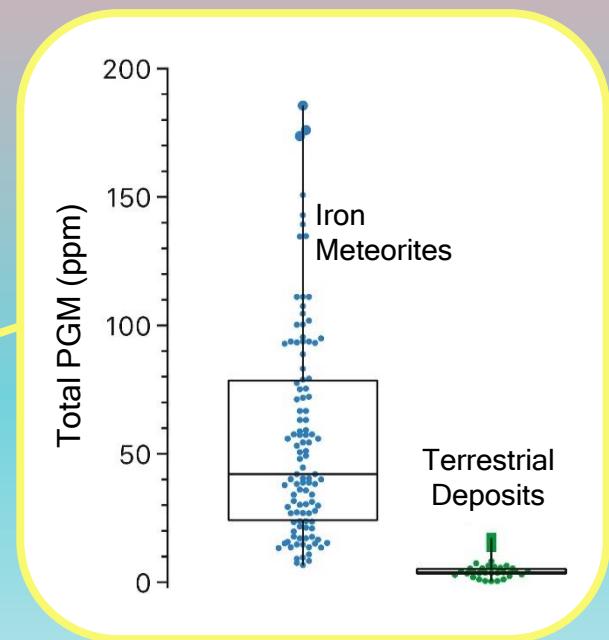
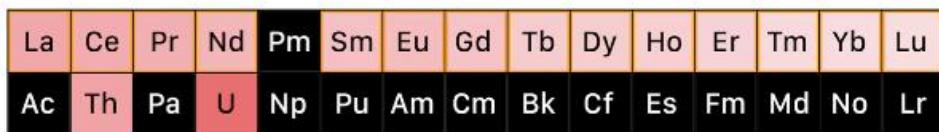
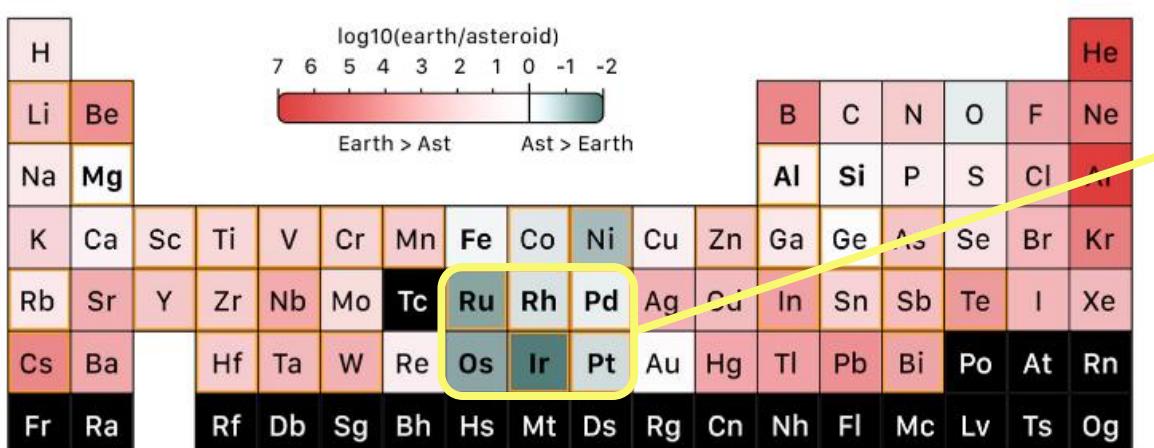
## Einsatzmöglichkeiten

- PGM für den Export zur Erde
- Baustoffe im Weltraum: SiO<sub>2</sub>, Fe etc
- Wasser, Phosphor, C für Pflanzenzucht im Weltraum als Nahrungsmittel für Menschen
- Energie: Elektrolyse von Wasser, Si-Photovoltaik
- Wasserspaltung: Raketentreibstoff

# Variation des PGM-Gehalts in M-Asteroiden

Der Gehalt an PGM ist in M-Asteroiden im Mittel 10x höher als in den besten Erzen auf der Erde

Der Gehalt kann aber von M-Asteroid zu M-Asteroid stark schwanken. → Risiko

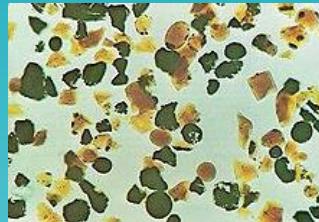


# Bisherige wissenschaftliche Missionen mit „Space Mining“

# Wissenschaftliche Missionen zum Mond

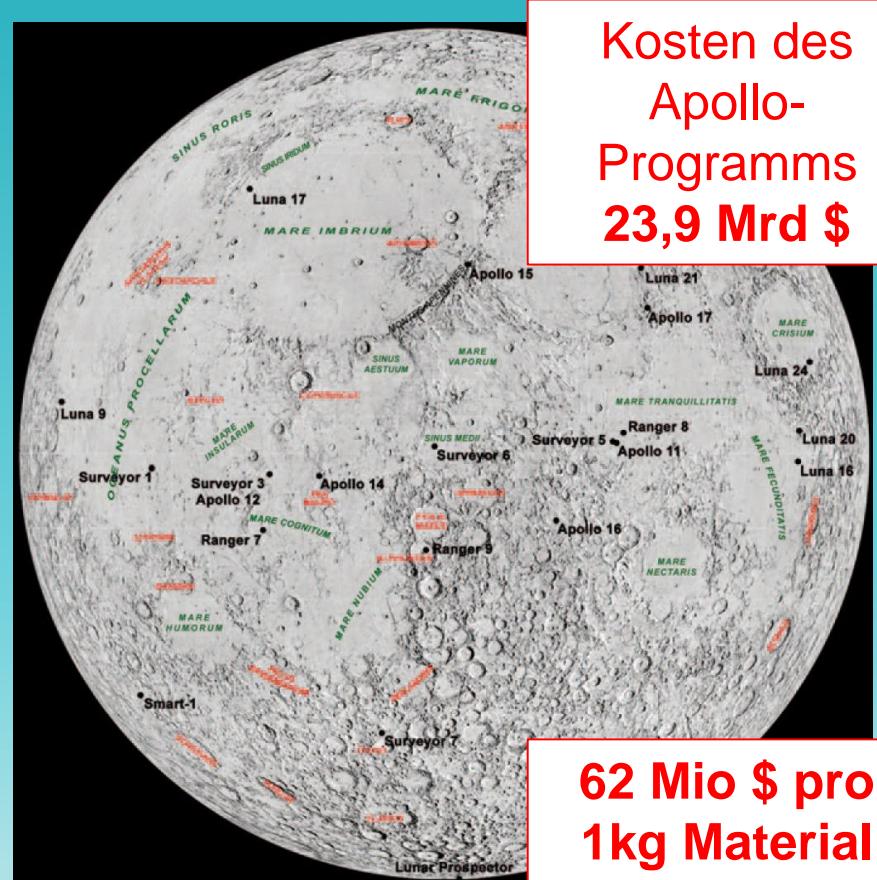


Genesis-Rock Apollo 15



Oranger Boden Apollo 17

Mondmission	Probenmenge	Jahr
Apollo 11	22 kg	1969
Apollo 12	34 kg	1969
Luna 16	0,101 kg	1970
Apollo 14	43 kg	1971
Apollo 15	77 kg	1971
Luna 20	0,055 kg	1972
Apollo 16	95 kg	1972
Apollo 17	111 kg	1972
Luna 24	0,170 kg	1976
Chang'e 5	1,731 kg	2020



Vorderseite des Mondes. Nord ist oben. Die Mondlandschaften sind grün und die Krater rot eingetragen. Außerdem sind die Landeplätze der sechs bemannten Apollo-Missionen und der meisten unbemannten Sonden markiert, die den Mond erreichten.  
(© USGS/DLR/M. Wählisch/S. Pieth)

# Chinesische Mission Chang'e 5



<https://www.youtube.com/watch?v=xMet268iaKc>

# NASA-Mission Stardust (1999-2011)

## Ziel der Mission

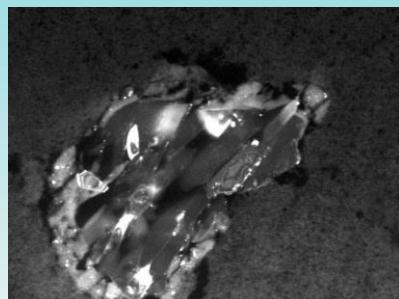
- Einfangen von Partikeln aus der Koma des Kometen Wild 2 sowie interstellaren Staubs.

## Erfolg

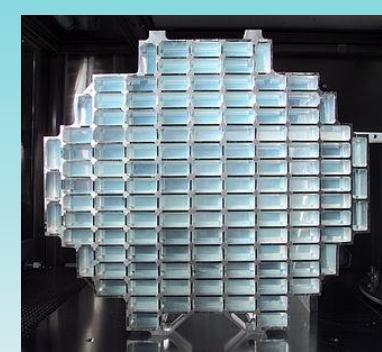
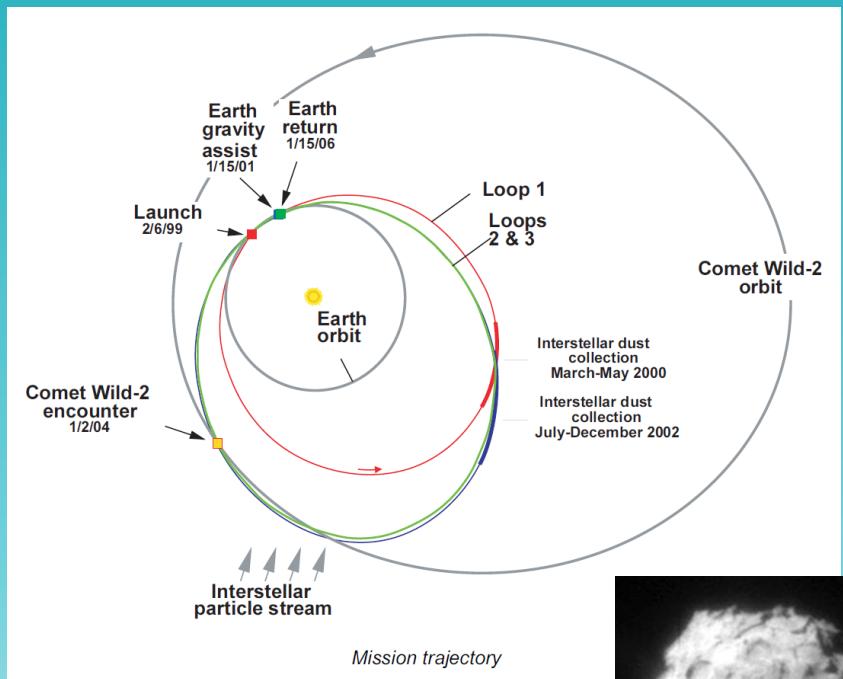
- Die Proben wurden im Januar 2006 zur Erde gebracht.
- etwa 150 Partikel mit  $\varnothing$  150  $\mu\text{m}$ , enthalten u.a. fl.  $\text{H}_2\text{O}$  und Aminosäure Glycin

## Kosten

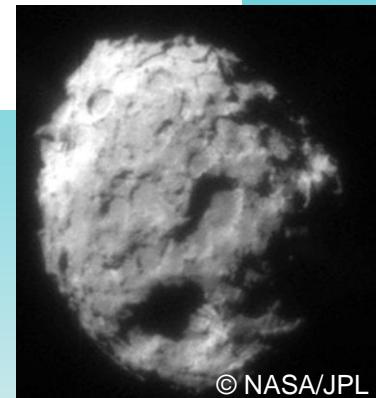
- etwa 200 Mio. \$



Staubpartikel



Staubpartikelkollektor mit Aerogelblöcken



© NASA/JPL  
Komet Wild 2 in 500 km Entfernung

# JAXA-Mission Hayabusa (2003-2010)

## Ziel der Mission

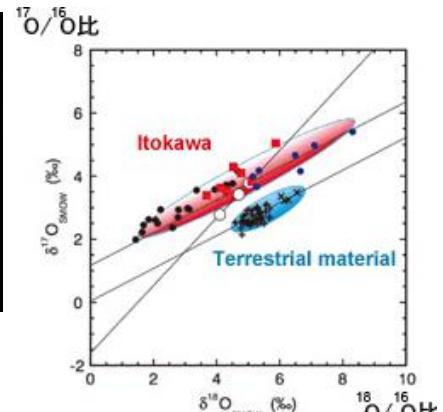
- Exploration des Asteroiden Itokawa mit Probenentnahme

## Erfolg

- Trichterförmiger Staubfänger, bei dessen Bodenberührung ein Geschoss auf die Oberfläche abgefeuert und der Probenbehälter kurzzeitig geöffnet wurde, um aufgewirbeltes Material aufzufangen.
- etwa 1500 Partikel mit  $\varnothing 10 \mu\text{m}$ , typisch für S-Typ Asteroid

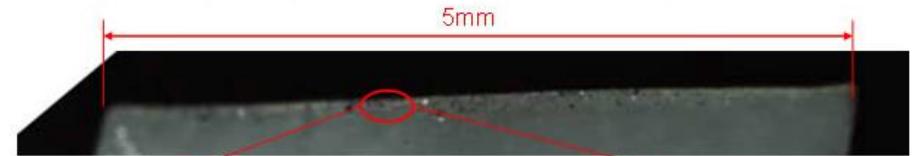
## Kosten

- etwa 100 Mio. \$

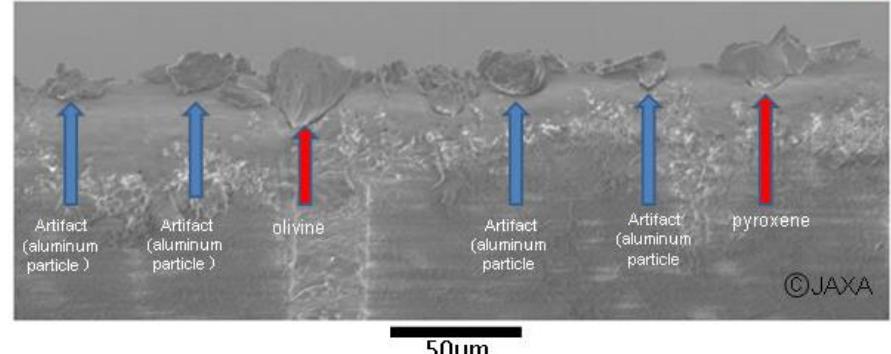


The special spatula observed by scanning electron microscope (SEM)

1. The edge of the special spatula observed by optical microscope



2. A closeup picture of a portion highlighted by a red circle, which is observed by scanning electron microscope (SEM)



# JAXA-Mission Hayabusa II (seit 2014)

## Ziel der Mission

- Flug zum Asteroiden Ryugu zur Probenentnahme und Rücksendung, Weiterflug zu den Asteroiden 2001 CC21 und 1998 KY26.

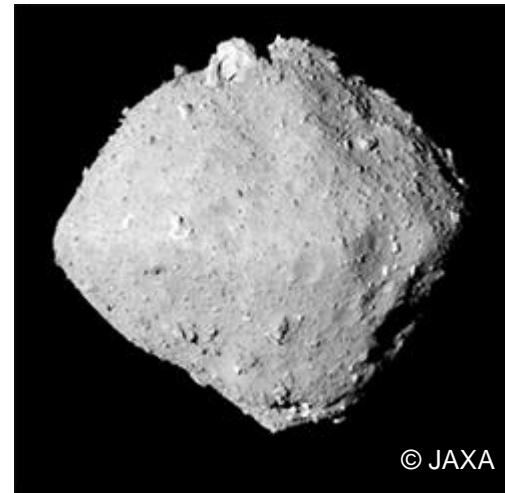
## Erfolg

- Die Proben wurden im Dezember 2020 zur Erde gebracht.
- 5.4 g Gramm Material, auch enthalten 10 Typen Aminosäuren

## Kosten

- etwa 200 Mio. \$

**40 Mrd \$  
pro 1 kg  
Material**



Durchmesser Ø 880 m



# JAXA-Mission Hayabusa II (seit 2014)



@CNES

[https://www.youtube.com/results?search\\_query=Hayabusa+2](https://www.youtube.com/results?search_query=Hayabusa+2)

# NASA-Mission OSIRIS-REx (seit 2016)

## Ziel der Mission

- U.a. Exploration des Asteroiden Bennu mit Probenentnahme und Rücksendung.

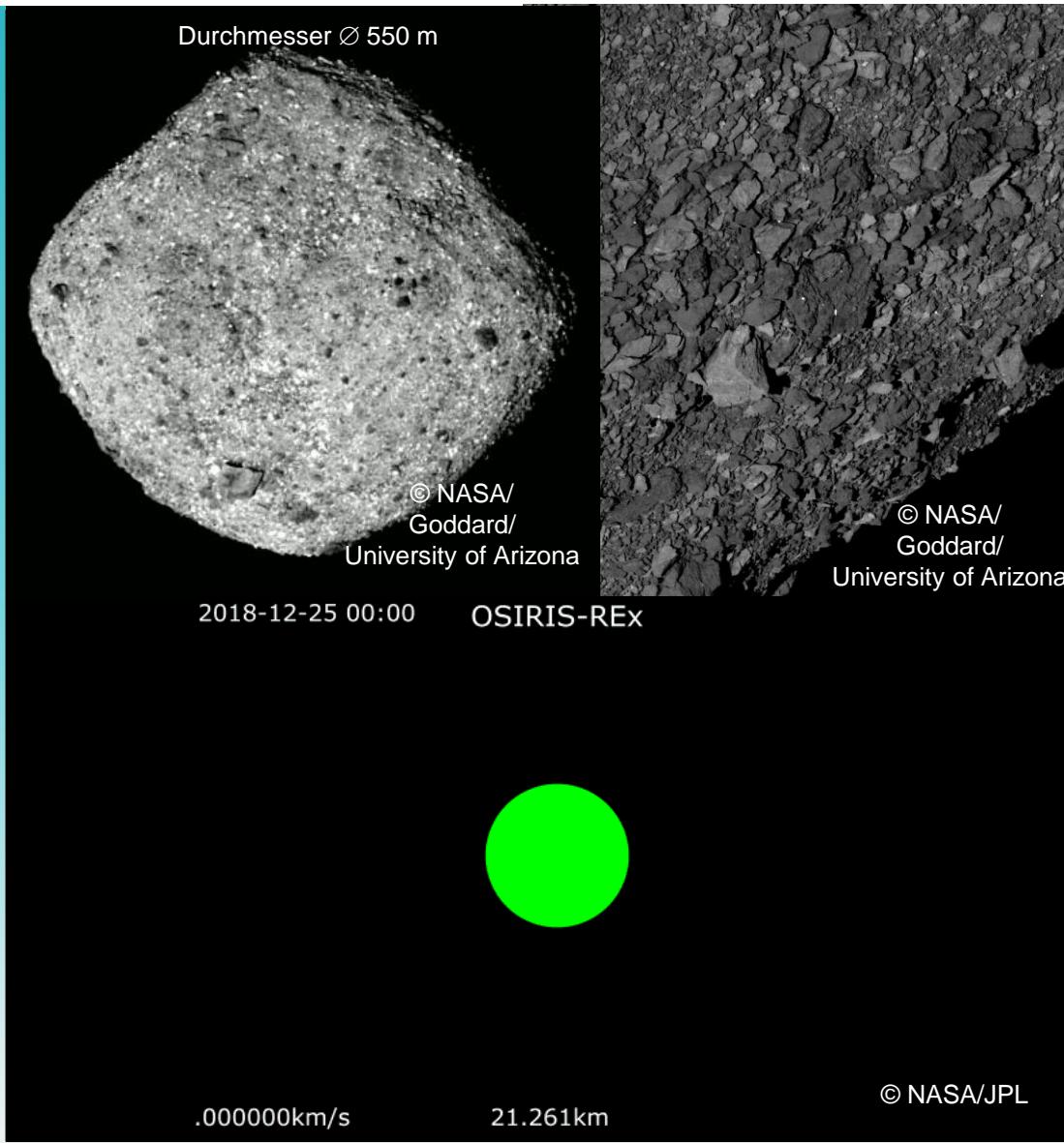
## Erfolg

- Die Proben wurden im Oktober 2020 genommen und sind auf dem Weg zur Erde.
- Erwartung etwa 100 g Material

## Kosten

- etwa 200 Mio. \$

**2 Mrd \$  
pro 1 kg  
Material**



# Strategie zum Space Mining von Asteroiden

# Marktwirtschaftliche Auswahl des Asteroiden

## Raketengleichung

$$\Delta v = v_f - v_i = w \cdot \ln\left(\frac{m_T + m_N}{m_N}\right)$$

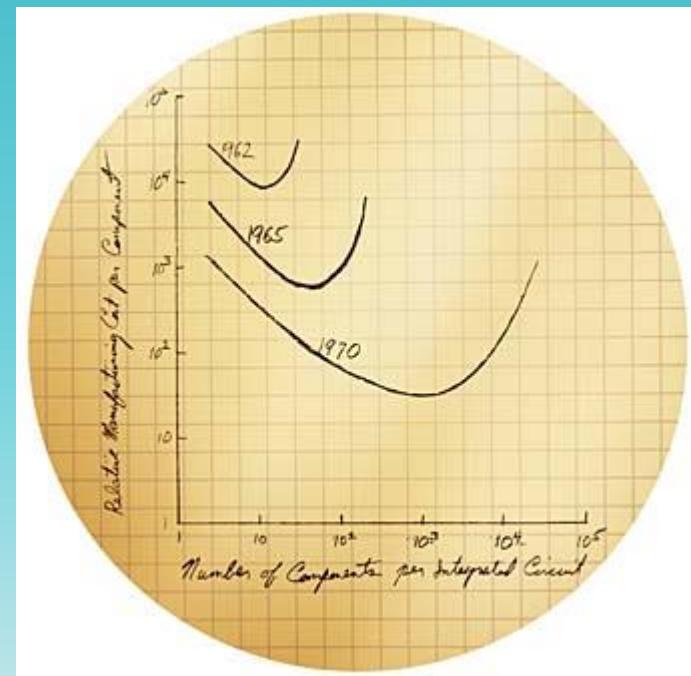
### Kernaussagen

- Je kleiner der Asteroid, desto weniger Treibstoff benötigt man.
- Je kleiner das  $\Delta v$ , desto weniger Treibstoff benötigt man.

Aber auch weitere Randbedingungen:

- Je kleiner der Asteroid, desto geringer der Profit.
- Ab einer gewissen Größe übersteigt das Projekt die aktuelle technologische Machbarkeit.

Asteroid-Mining folgt einem  
„Moore'sches Gesetz“



Copyright © 2005 Intel Corporation

# Kosten für technologische machbare Mission

## Aktuelle technologische Machbarkeit:

- Asteroid wiegt 500 t, Durchmesser etwa 10 m  
(z.B. M-Typ nach Abschätzung oben: etwa 0.5 Mio \$ an PGM)

Auswahlkriterium: Kosten für notwendiges  $\Delta v$  für Erde - Einfangort -Erde

Einfangort	$\Delta v$	Treibstoff H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	Treibstoffkosten
Asteroidengürtel	9.8 km/s	35.900 t	144 Mrd \$
Mars-Nähe	5.3 km/s	3700 t	15 Mrd \$
NEA (near Earth asteroid)	1.5 km/s	80 t	1.1 Mrd \$
PHA (potentially hazardous asteroid)	0.2 km/s	13 t	52 Mio \$

Die technologisch umsetzbare Mission ist aktuell noch unwirtschaftlich, aber Launchkosten fallen.

Wissenschaftliche Missionen zum Erproben sind sinnvoll → KISS-Studie 2012

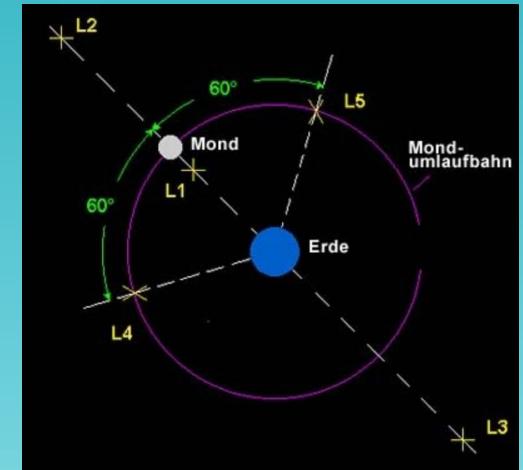
# Ergebnis des Keck Institute of Space Studies

## Vorschlag: Asteroid Capture Return (ACR) Mission

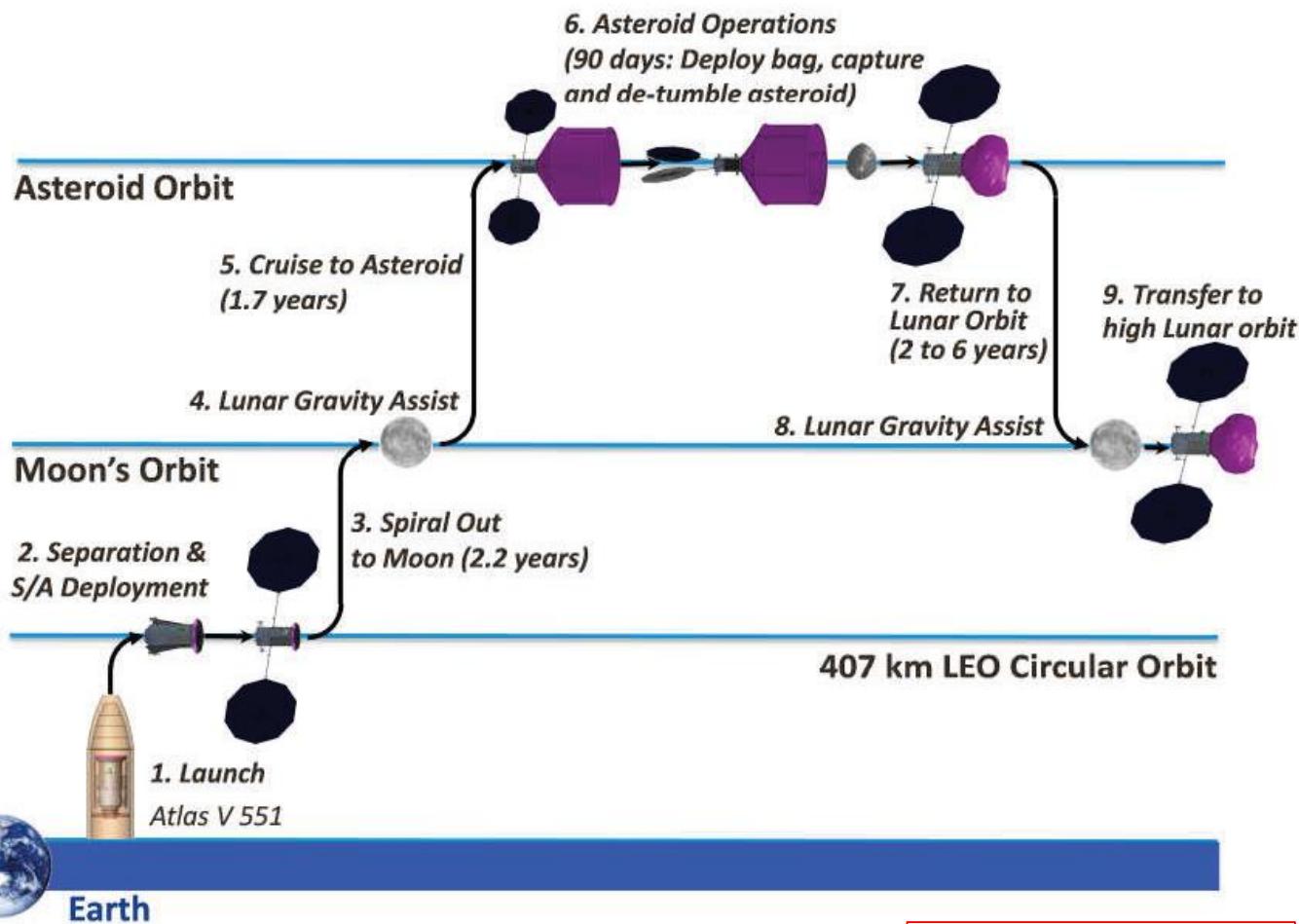
- C-Typ PHA Asteroid von 500 t, Durchmesser etwa 7 m zum Lagrange-Punkt L2 des Erde-Mond Systems (nicht zur Erdoberfläche!) bringen, also 60.000 km vom Mond entfernt.

Dazu müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie identifiziert man geeignete Kandidaten und wie viele gibt es pro Jahr?
- Wie fängt man einen 500 t schweres rotierendes Objekt ein?
- Wie bekommt man es sicher zurück Richtung Erde und parkt es in einem hohen lunar Orbit?
- Wie verarbeitet man den Asteroiden?



# Umsetzung der ACR-Mission



Atlas V551  
Rakete in LEO  
1 Tag

Unbemanntes  
SEP-Raumfahrzeug  
zu Asteroid  
2 Jahre

am Asteroid  
1) Analyse  
2) Einfang  
90 Tage

Rücktransport  
Asteroid zu L2 EM  
2-6 Jahre

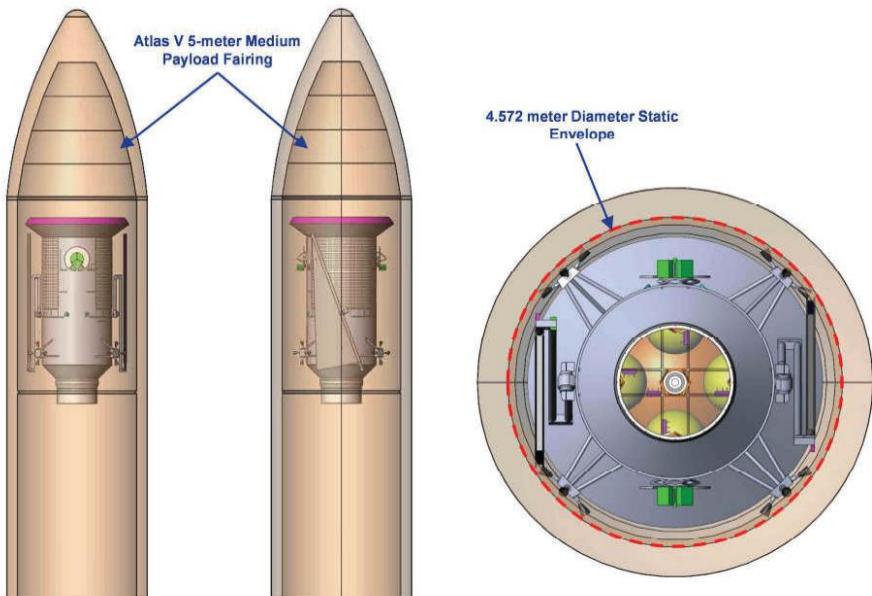
Analyse &  
Verarbeitung an L2  
EM  
2-6 Jahre

5200 \$  
pro 1 kg  
Material

## Kennzahlen:

Zahl der möglichen Ziele (500 t Asteroid) pro Jahr: 5  
Missionsdauer: knapp 10 Jahre      Kosten: 2,6 Mrd \$

# Atlas V 551



KISS-Studie 2012

Höhe	65,5 m
Durchmesser	3,81 m
Startmasse	587 Tonnen
Nutzlast LEO	19 Tonnen
Stufen	2 (+ Kickstufe)
Booster	bis zu 5



@ NASA

<http://mediaarchive.ksc.nasa.gov/detail.cfm?mediaid=27711>

# Atlas V 551

## 1. Stufe

	<b>Atlas CCB</b>
Typ	Flüssigkeitsraketentriebwerk
Höhe	32,46 m
Triebwerk	RD-180 oder RD-170
Treibstoff	RP-1 / LOX
Treibstoffmasse	284 Tonnen
Brenndauer	253 Sekunden
Maximalschub	<b>4,152 MN</b>

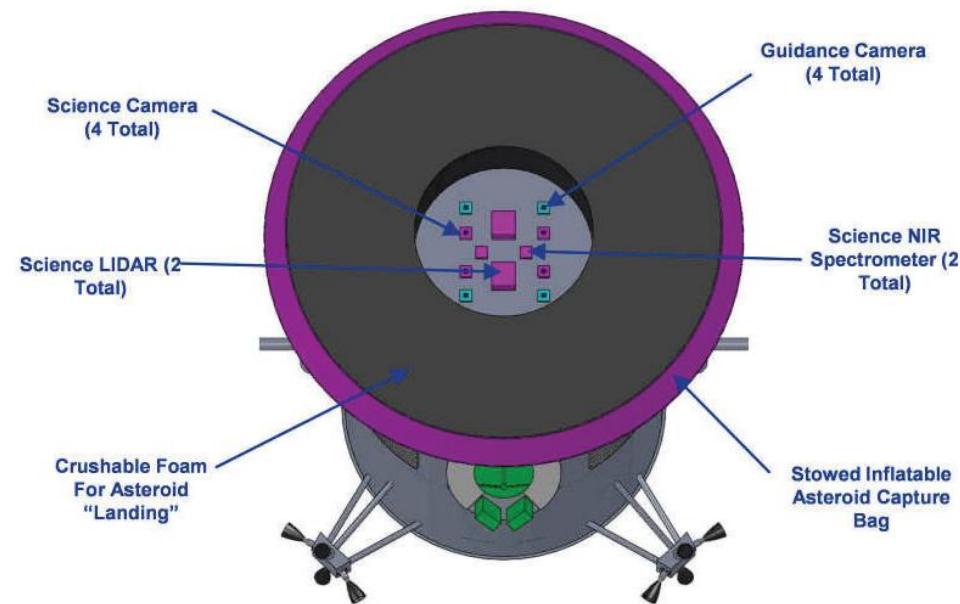
## 2. Stufe

	<b>Centaur-3(5)-SEC</b>
Typ	Flüssigkeitsraketentriebwerk
Höhe	12,68 m
Triebwerk	RL10A-4-2 oder RL10C-1
Treibstoff	LH2 / LOX
Treibstoffmasse	20.8 Tonnen
Brenndauer	842 Sekunden (RL10A-4-2)
Maximalschub	<b>99,2 kN</b>

**Sprinter**



# Körper des SEP-Raumfahrzeug (Masse 5.5 t + 13 t Xe)

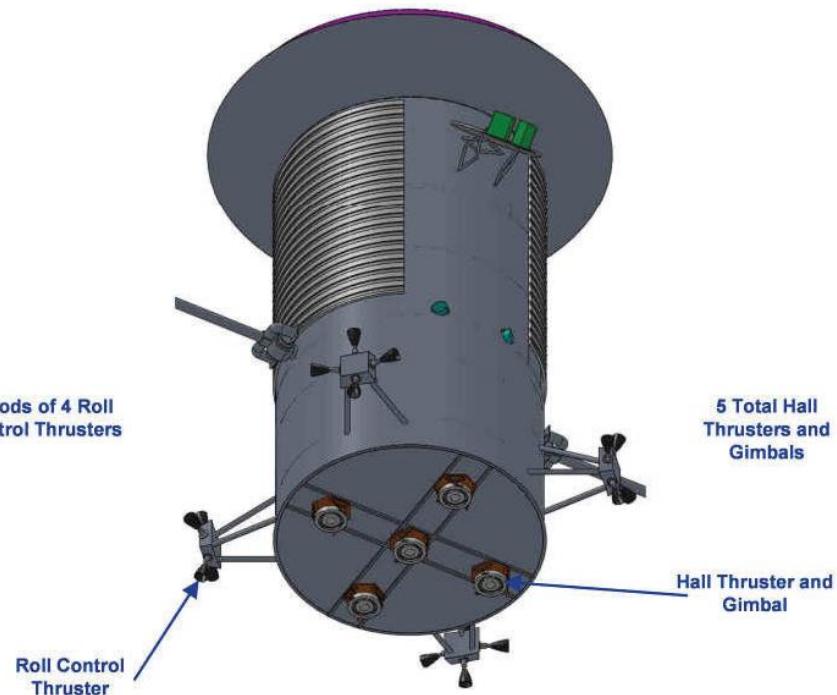


## 5 Hall-Triebwerke

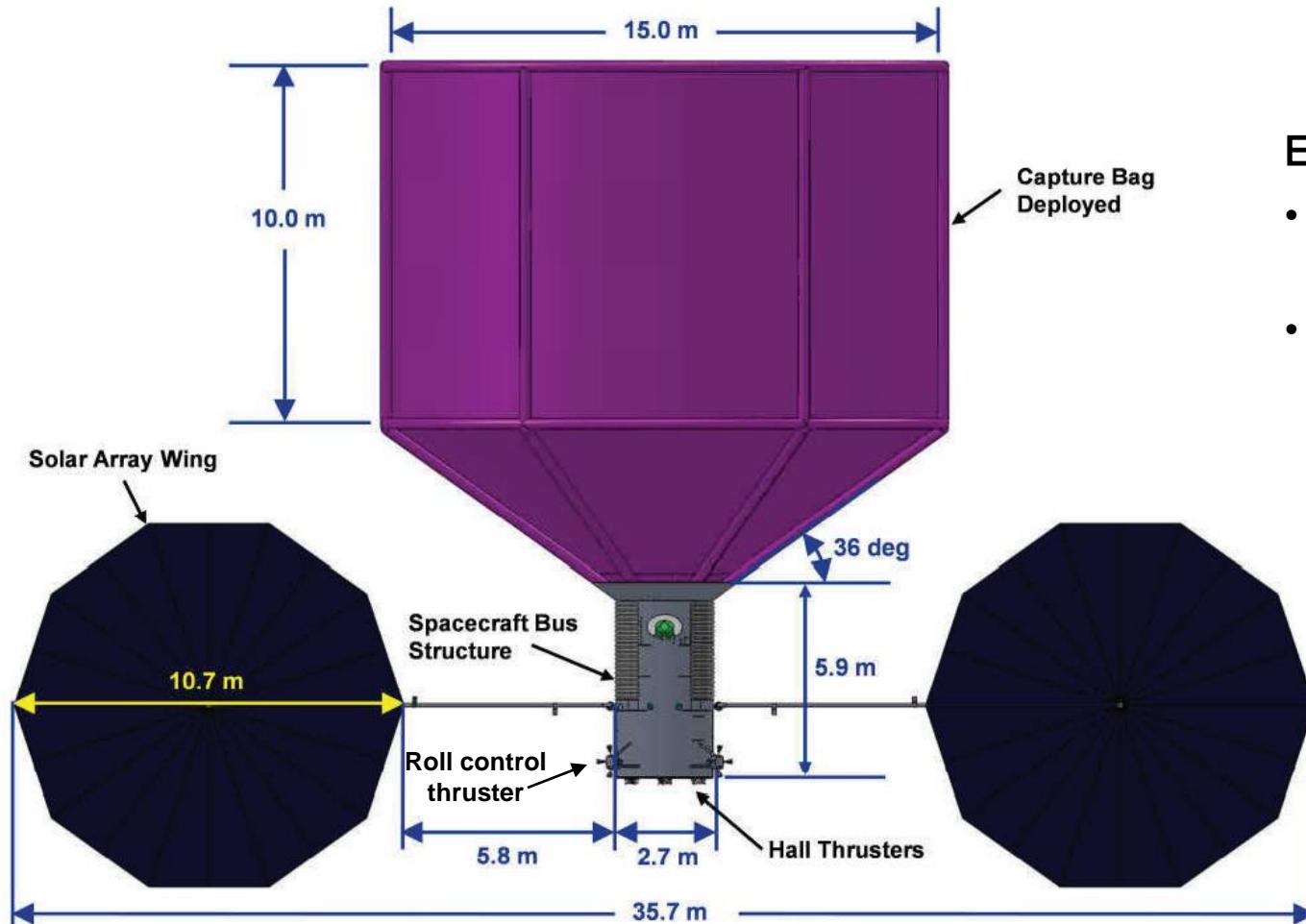
Durchmesser	etwa 30 cm
Treibstoff:	<b>Langläufer</b>
Schub	max. je 200 N
Isp	$3000 \text{ s}^{-1}$
Leistungsbedarf	je 10 kW

## Diagnostik

- Kameras
- NIR Spektrometer
- LIDAR  
(Light detection and ranging)



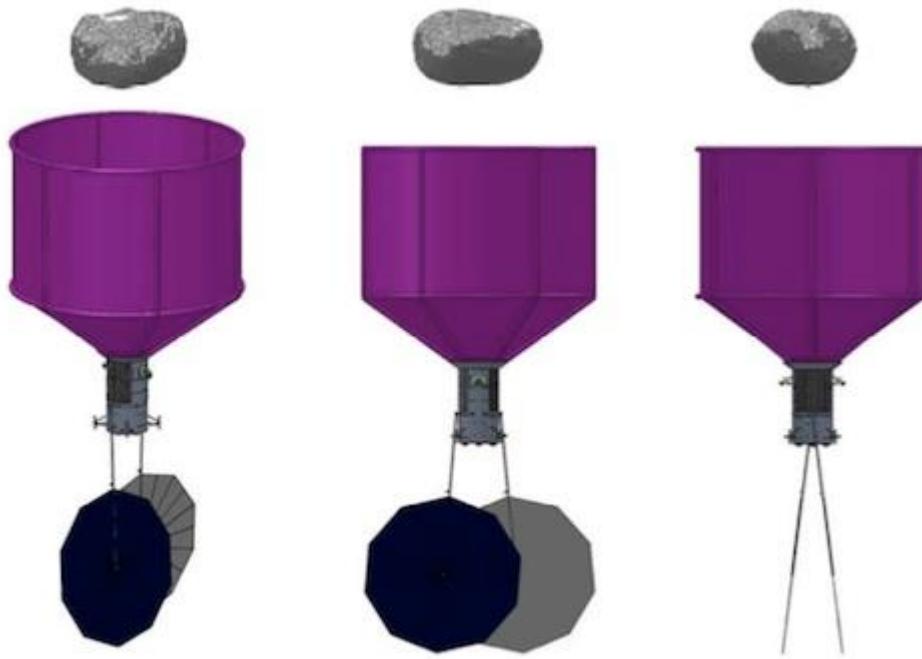
# SEP-Raumfahrzeug mit Einfangwerkzeug



## Einfangwerkzeug

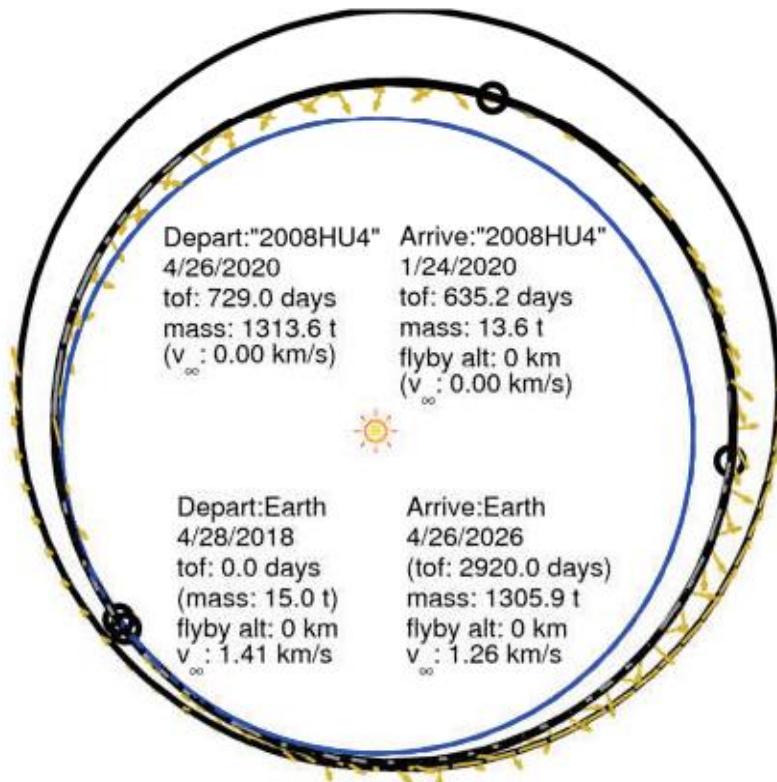
- Kontrollierbarer und verschließbarer Sack
- Zusatztriebwerke zur Kompensation der Rotation

# Einfang des Asteroiden



<https://www.youtube.com/watch?v=ejIXRFzXgsg&t=56s>

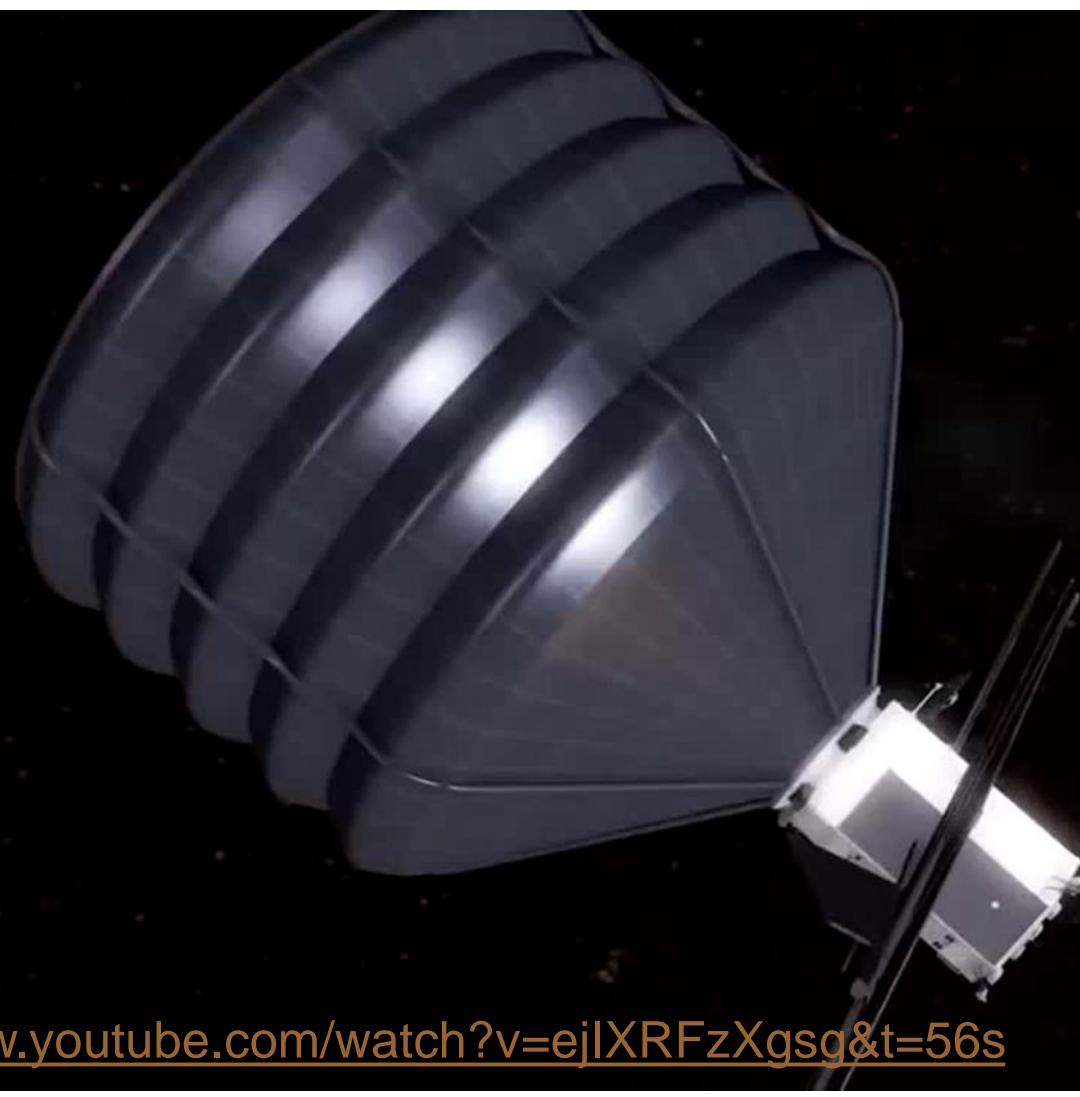
# Keck-Studie 2012: Asteroideneinfang



Designation	Returned Mass, t	Xe, t (no Spiral)	Earth Escape	Flight Time, yr (no spiral)	Arrival C3, km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
2008 HU4	250	5.0	4/27/2022	4.0	1.8
2008 HU4	400	5.2	4/27/2021	5.0	1.7
2008 HU4	650	6.5	4/27/2020	6.0	1.6
2008 HU4	950	8.9 <sup>a</sup>	4/28/2019	7.0	1.6
2008 HU4	1300	9.1 <sup>a</sup>	4/28/2018	8.0	1.6
2008 HU4	200	8.7 <sup>a</sup>	8/15/2017	8.0	0.0 <sup>b</sup>

Bahn des Asteroide muss gut bekannt sein.  
Wegen Relativbewegung von Erde - Raumfahrzeug - Asteroid  
gibt es nur wenige gute Startzeitfenster

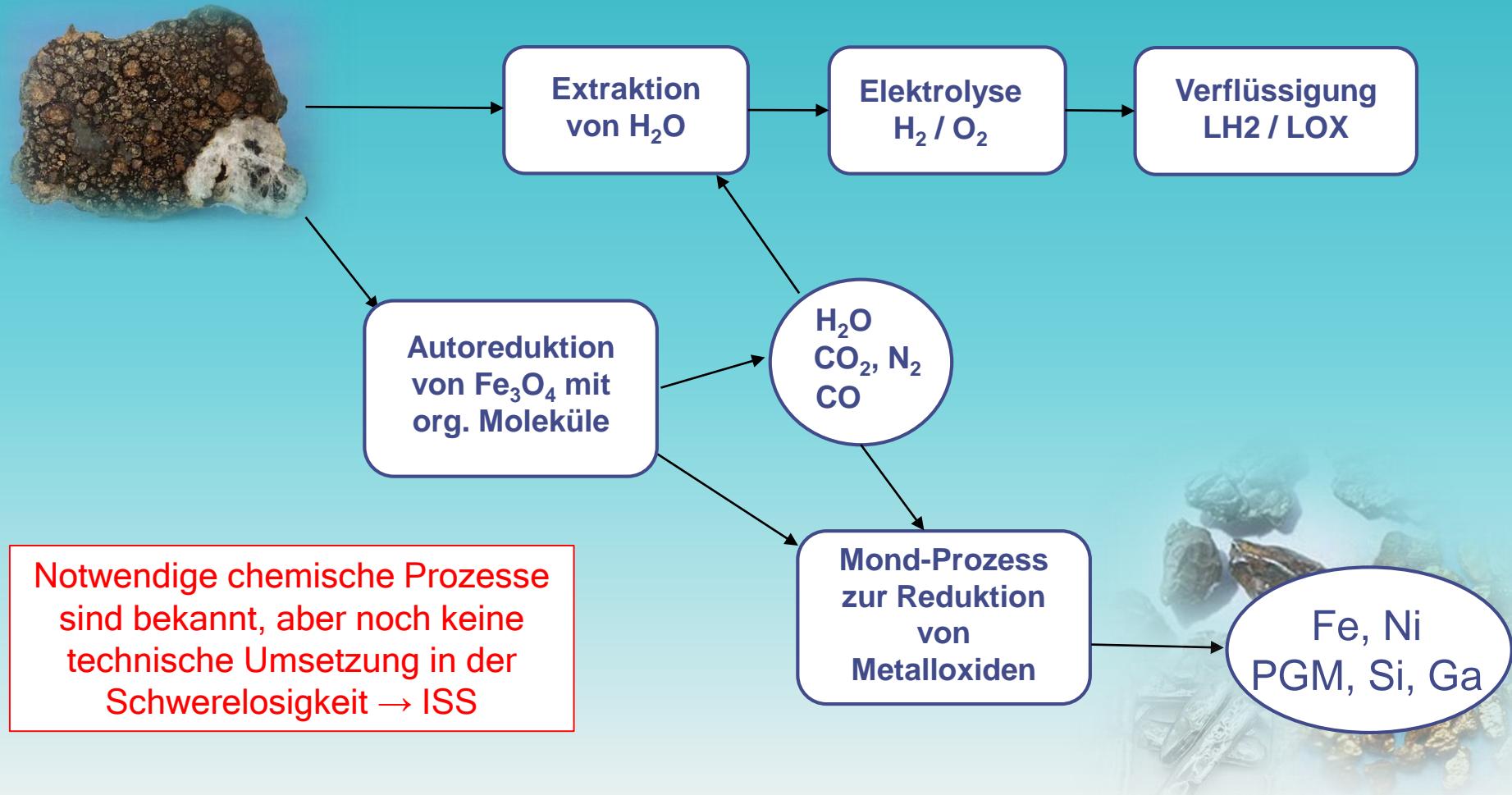
# Einfang des Asteroiden



<https://www.youtube.com/watch?v=ejlXRFzXgsg&t=56s>

# Aufarbeitung eines Asteroiden

... eine Herausforderung wegen der fehlenden Gravitation.



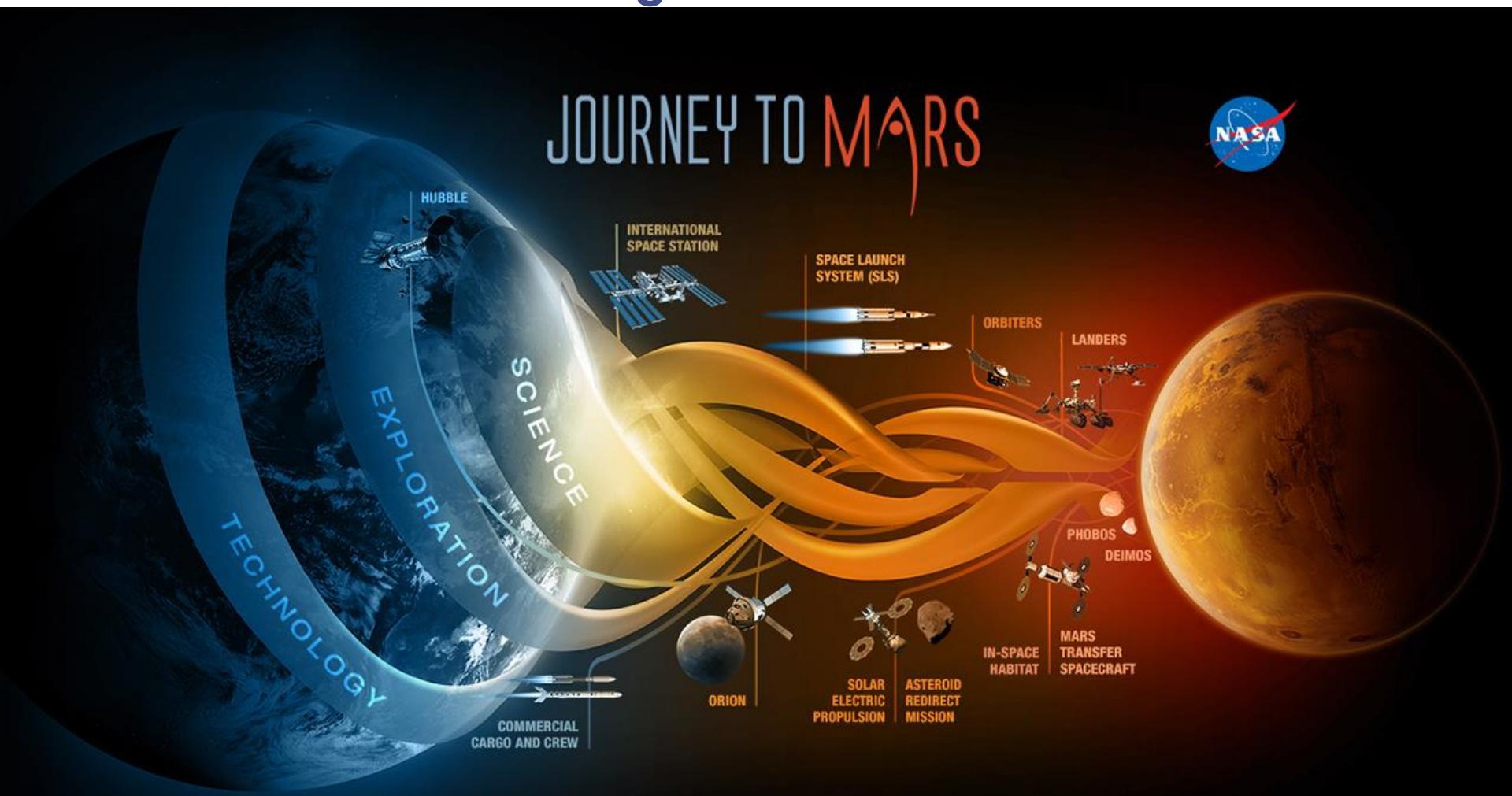
# Mehrwert einer ACR-Mission für Weltraumnutzung

- ACR-Mission liefert Informationen über Asteroidenstruktur, Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften, die für nachfolgende Deep-Space-Missionen essentiell sind.
- Am rücktransportierten Asteroiden können neue Techniken für Deep-Space in Erdnähe (geringere Kosten und geringeres Risiko) erprobt werden.
- Aufbereitung von Asteroidmaterial könnte im Weltraum erprobt werden als Basis für spätere längere Deep-Space Missionen und kommerzielles Space Mining.
- Die gleiche Menge Material von der Erde zum L2 EM zu schaffen ist viel teurer als die Asteroidenmission selbst!
- So aufbereitetes Asteroidenmaterial würde in Reichweite des Erde-Mond L2, NASAs ausgewähltem Wegpunkt zum Mond und Mars, zur Verfügung stehen bzw. könnte durch ACR-Folgemissionen ergänzt werden.
- Werbemöglichkeit für die Raumfahrt in der breiten Öffentlichkeit



© NASA / AMA, Inc.

# Aktuelle NASA-Strategie



Im Kontext der Gesamtstrategie ist Space Mining Wirklichkeit.  
Kommerzielles Space Mining ist allerdings noch unrentabel.