

Nutzung erneuerbarer Energien in Extrembedingungen

Prof. Dr. Vera Schorbach

CC4E Ringvorlesung am 14.01.2025

Verwendung nur für Lehrzwecke!



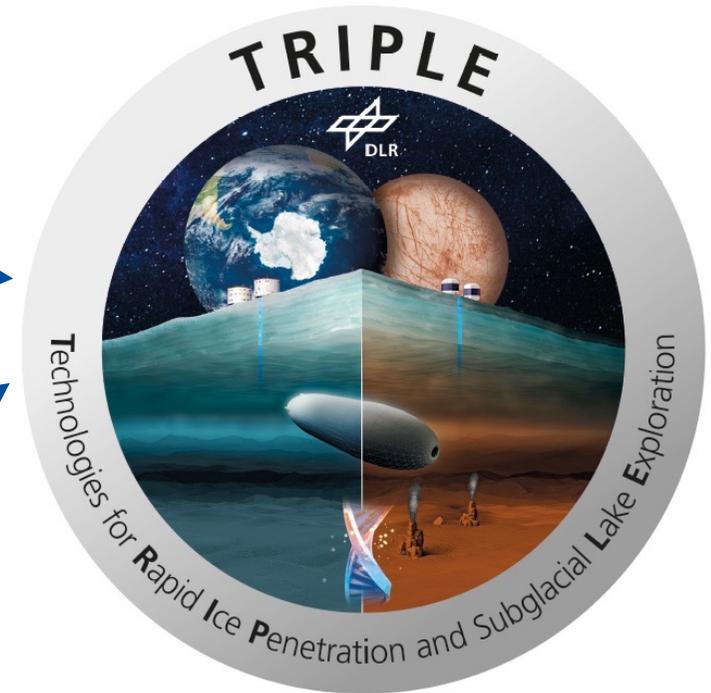
Alle Vorträge finden
Sie hier!

Inhalt

1. Erneuerbare in der Antarktis
2. ...auf dem Mars
3. ...und auf dem Jupitermond Europa

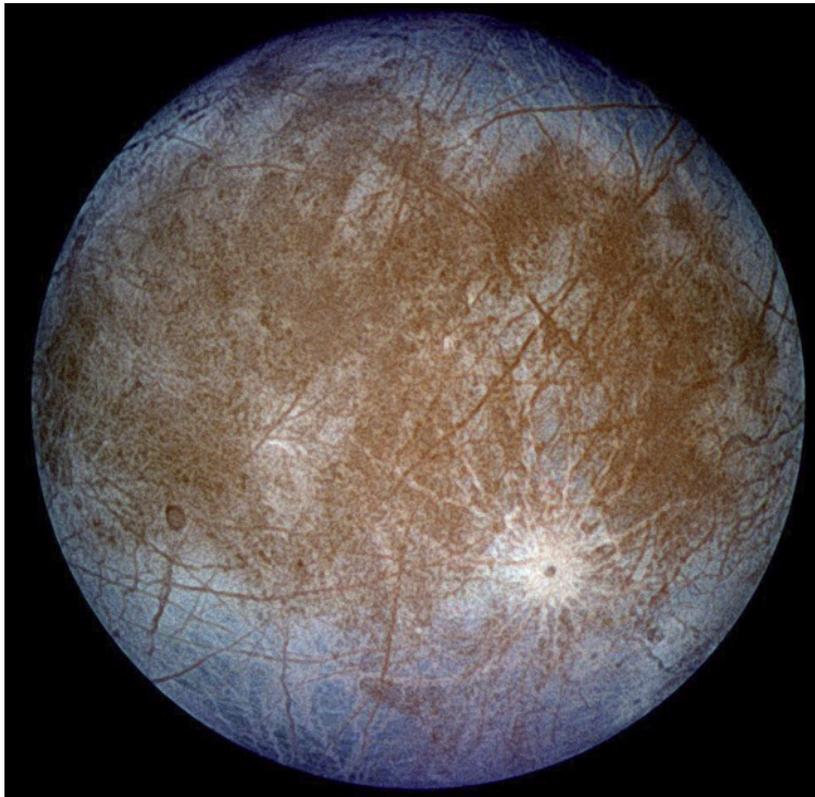
Inhalt

1. Erneuerbare in der Antarktis
2. ...auf dem Mars
3. ...und auf dem Jupitermond Europa



Kurzvorstellung TRIPLE Projektlinie

Das langfristige Ziel....

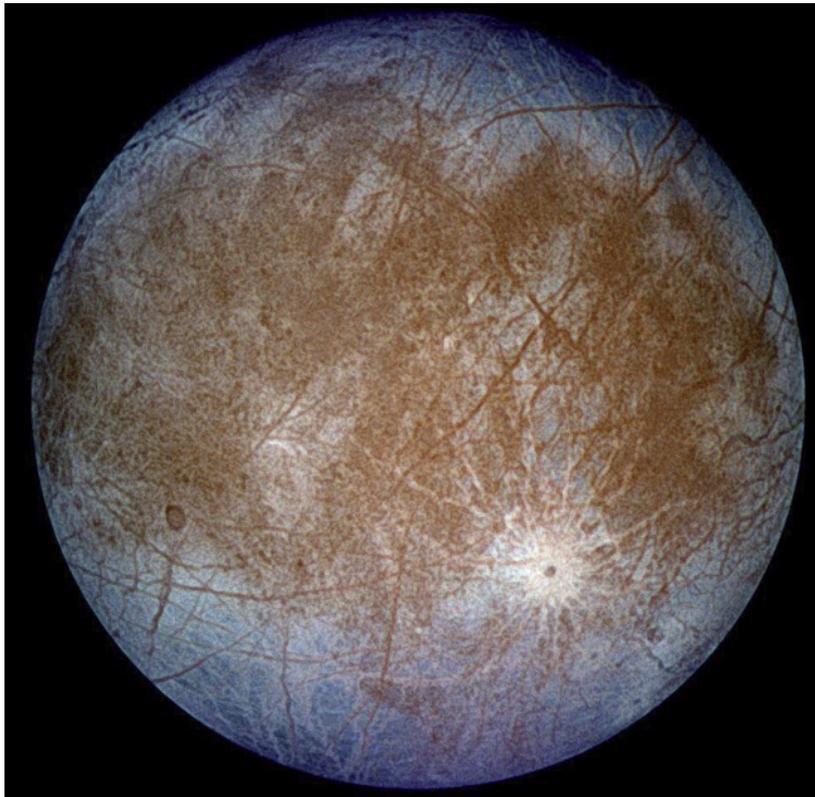


Jupitermond Europa aufgenommen durch Juno

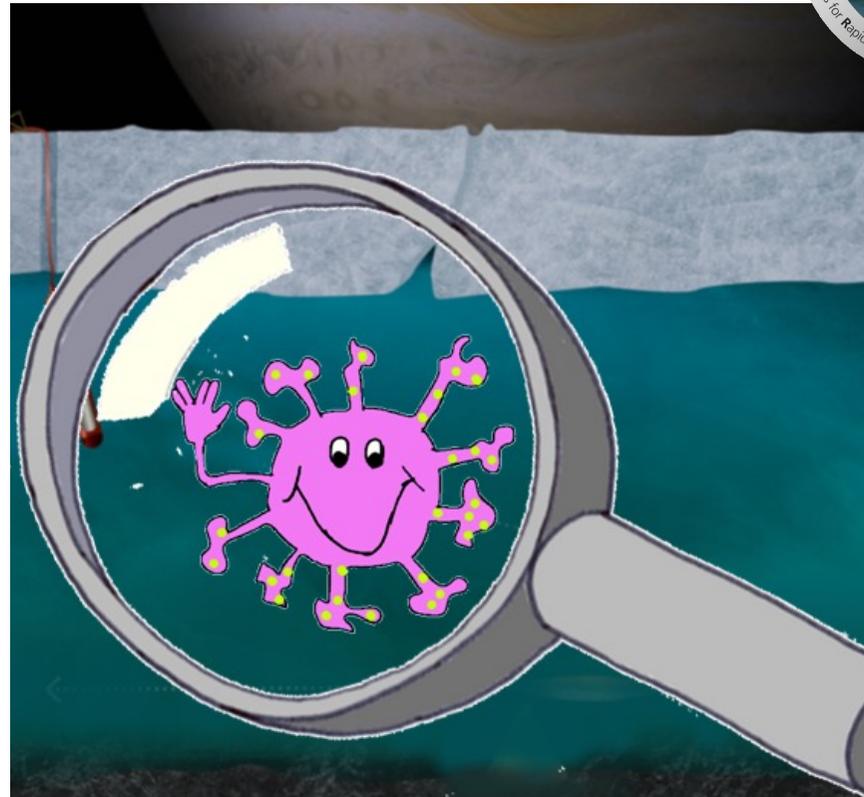
Verwendung nur für Lehrzwecke!

Kurzvorstellung TRIPLE Projektlinie

Das langfristige Ziel....



Jupitermond Europa aufgenommen durch Juno

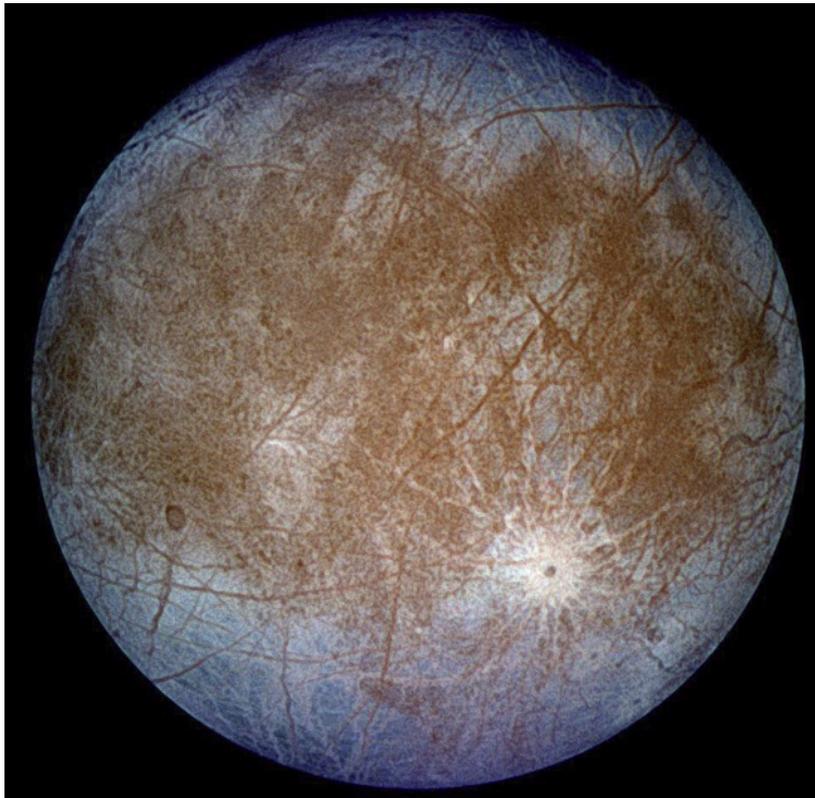
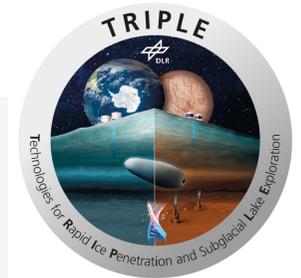


<https://science.nasa.gov>

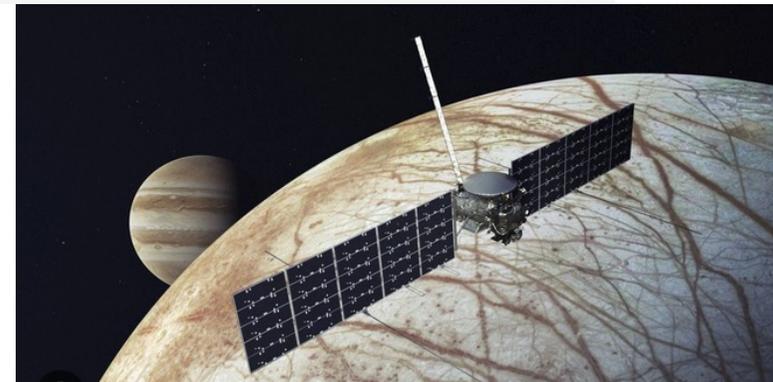
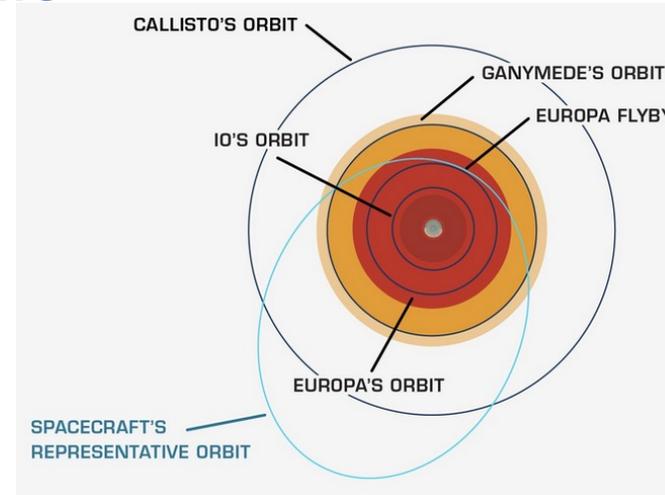
Verwendung nur für Lehrzwecke!

Kurzvorstellung TRIPLE Projektlinie

Das langfristige Ziel....



Jupitermond Europa aufgenommen durch Juno



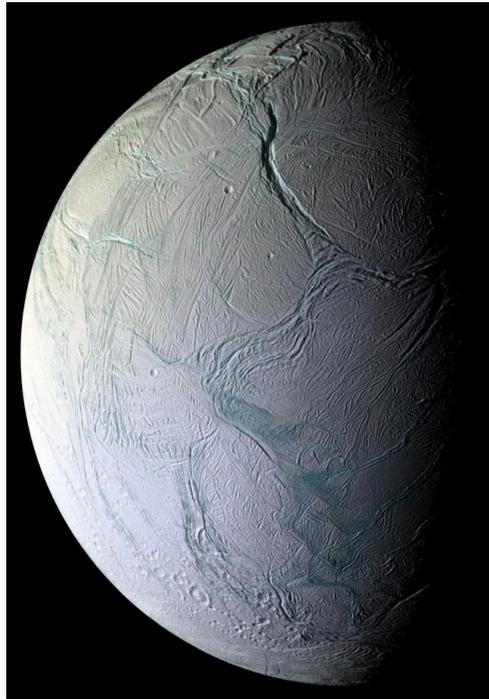
Europa Clipper seit Mitte Oktober unterwegs

<https://science.nasa.gov>

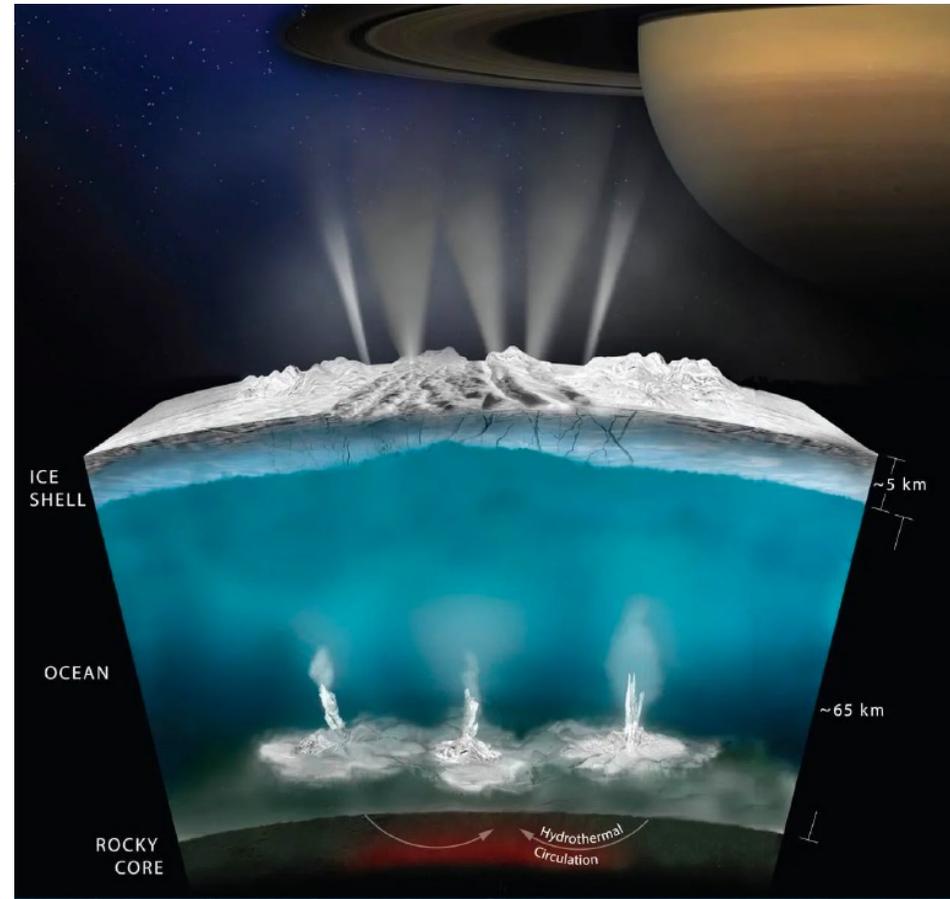
Verwendung nur für Lehrzwecke!

Kurzvorstellung TRIPLE Projektlinie

Das (noch) langfristige Ziel....



Saturnmond Enceladus
aufgenommen durch Cassini



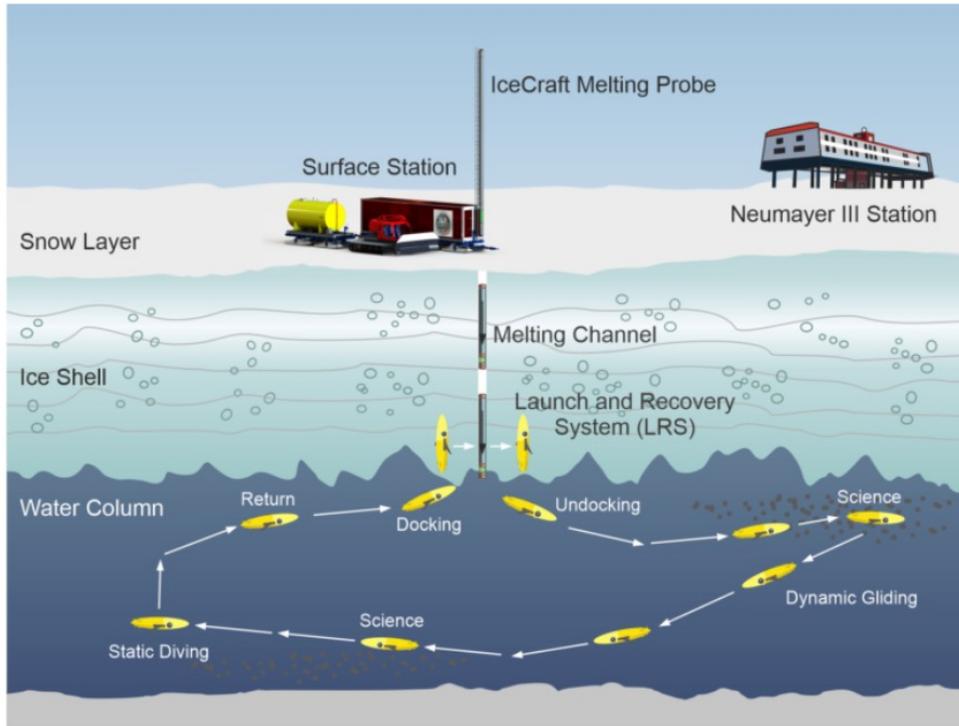
Bildquelle: JPL/NASA

Verwendung nur für Lehrzwecke!

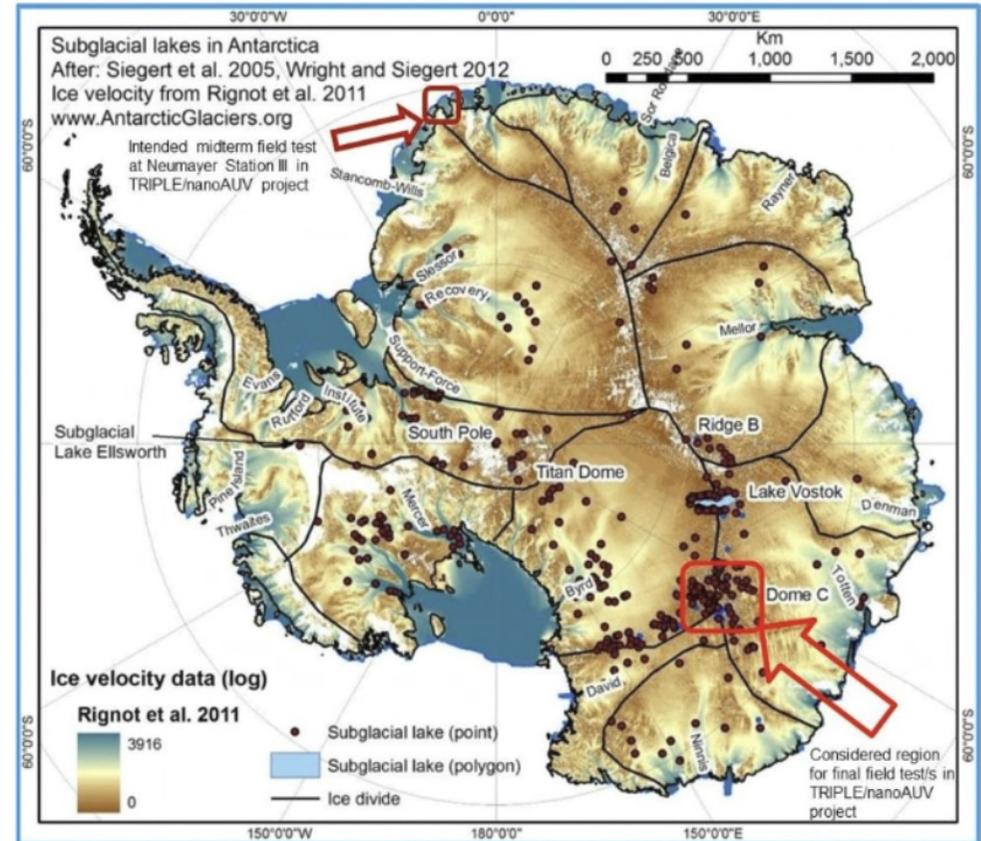
Kurzvorstellung TRIPLE Projektlinie

Kurzfristiges Ziel 2026

Mittelfristiges Ziel 2029 Dome C



Planned demonstration of the TRIPLE system at the Neumayer III Station (Antarctica) (Credits: Maximilian Nitsch/RWTH Aachen University).



Verwendung nur für Lehrzwecke!

Inhalte TRIPLE IceCraft-2



Schmelzsonde IceCraft-1 2023 in der Nähe der Neumayer Station

Verwendung nur für Lehrzwecke!

Inhalte TRIPLE IceCraft-2

Schmelzsonde IceCraft-1



Verwendung nur für Lehrzwecke!

Inhalte TRIPLE IceCraft-2

Ziele von IceCraft-2

- Die Sonde IceCraft-2 soll am Dome C eingesetzt werden können (Eisdicke ca. 3km) dafür ist eine Segmentierung des Kabels erforderlich
- Sehr kurze Missionszeit am Dome C (Hochebene auf ca. 3000m; max. 4 Wochen vor und nach Sommersonnenwende) -> höhere Schmelzleistung erforderlich
- **Erneuerbares Energiekonzept am Dome C (möglichst 90-100%)**
- Demonstration von IceCraft-2 im Feldtest 2026/27 an der Neumayer-Station **(mit 5-10% erneuerbarer Energieversorgung)**

1. Erneuerbare in der Antarktis

Standort der Neumayer III Station

Google Earth



Alfred Wegener Institut

Temperatur im Jahresmittel -16°C
Im Sommer an einigen Tagen größer 0°C
Extremwerte im Winter ca -50°C

Verwendung nur für Lehrzwecke!

1. Erneuerbare in der Antarktis

Energieversorgung der Neumayer III Station



4 Dieselgeneratoren je 160 kW elektrische Leistung, einer davon Reserve



Windenergieanlage mit 30kW Leistung

Dieserverbrauch pro Jahr ca. 300.000 Liter*

1. Erneuerbare in der Antarktis

- 91 Forschungsstationen (4000 Menschen im Sommer, 1000 im Winter)
- 29 der Forschungsstationen haben einen Teil der Energieversorgung aus Erneuerbaren
 - 5 davon haben einen erneuerbaren Anteil >50%
 - 3 haben eine 100% erneuerbare Energieversorgung (Princess Elisabet, Tor und Wasa)
- Der „Rest“ wird mit Dieselgeneratoren betrieben

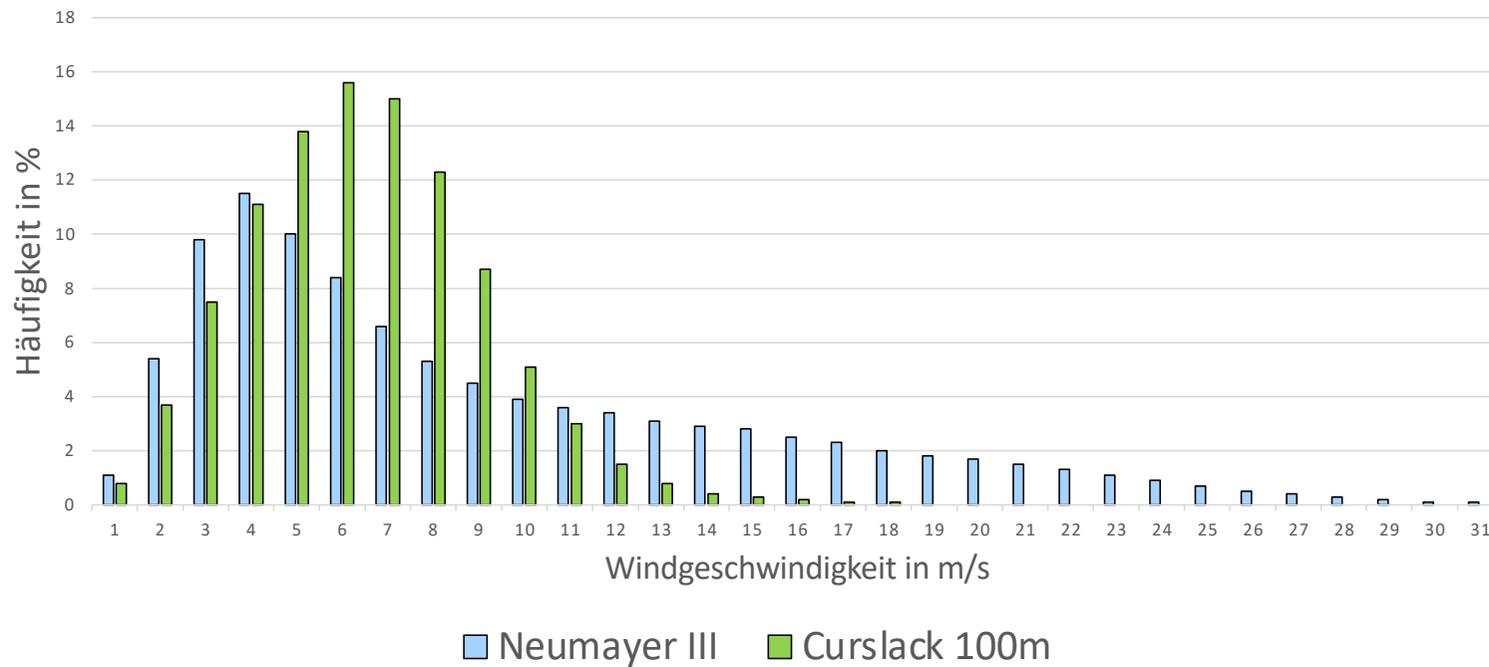
Ergebnisse einer Studie zur Amundsen-Scott Station am Südpol (ganzjährig, mittlere Leistung 170kW):
Erneuerbares Konzept (Wind, Solar, Li-Ion Speicher) spart 95% der jährlichen Dieselkosten ein und hätte sich nach 2 Jahren amortisiert.

Babinec, Susan, et al. "Techno-economic analysis of renewable energy generation at the South Pole." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 193 (2024): 114274.

1. Erneuerbare in der Antarktis

Vergleich Windgeschwindigkeit Neumayer III vs. HAW Windpark in Curslack

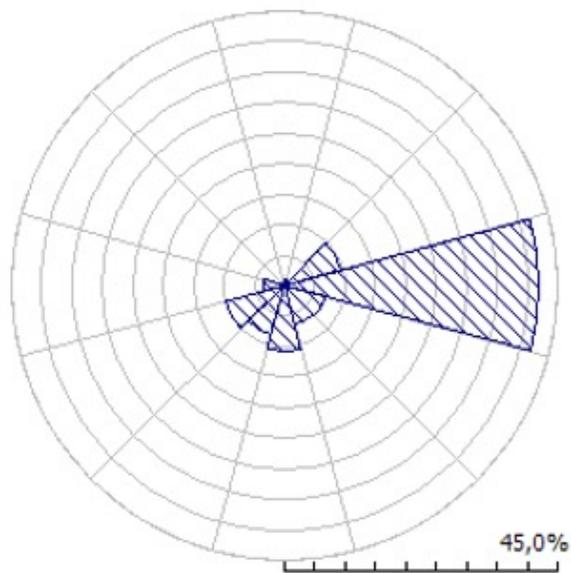
Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit zwischen HAW Windpark in Curslack (100m) und der Neumayer III (10m)



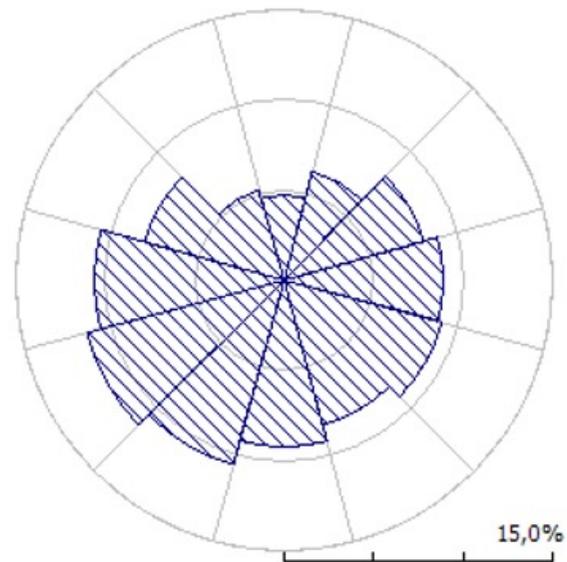
Verwendung nur für Lehrzwecke!

1. Erneuerbare in der Antarktis

Vergleich Windrichtung Neumayer III vs. HAW Windpark in Curslack



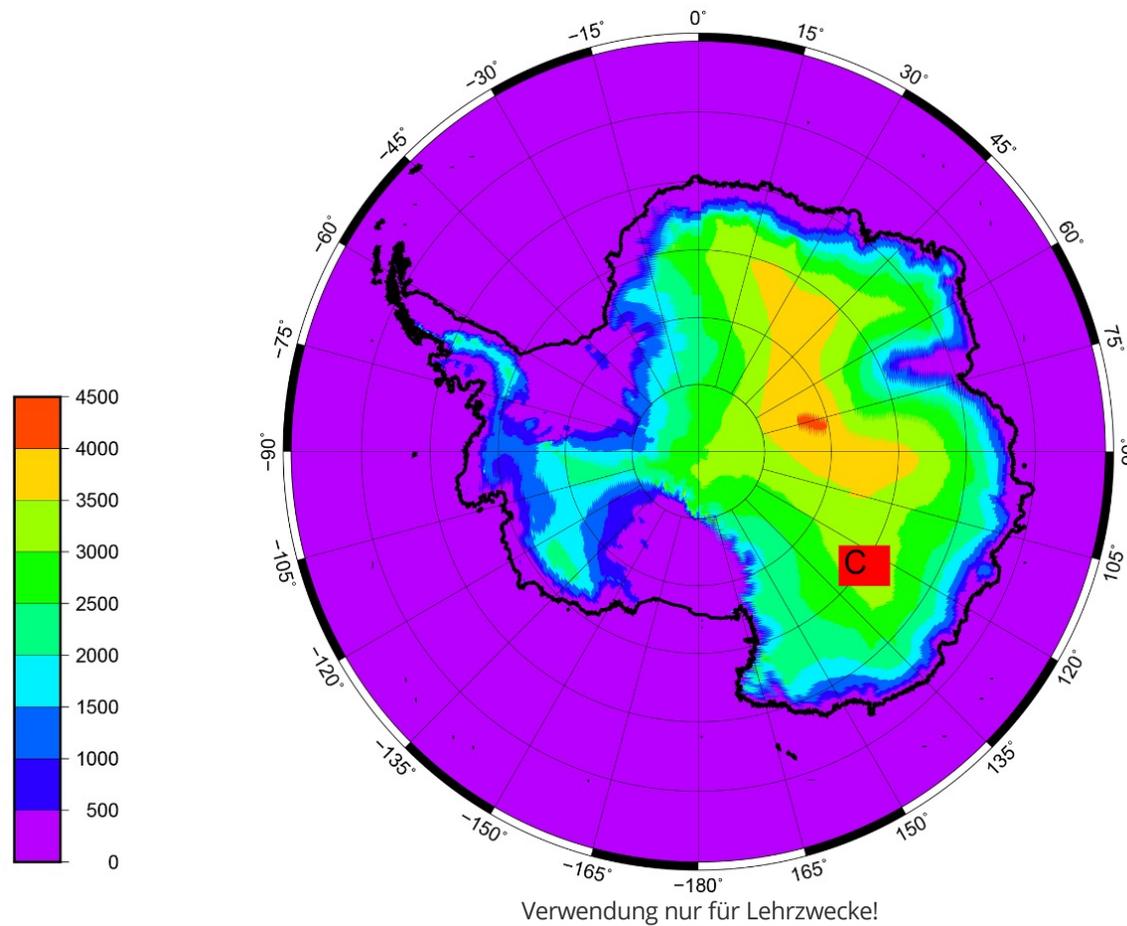
Neumayer III



Curslack

1. Erneuerbare in der Antarktis

Dome C



Genthon, Christophe, et al. "Ten years of temperature and wind observation on a 45-m tower at Dome C, East Antarctic plateau." *Earth System Science Data Discussions* 2021 (2021): 1-29.

1. Erneuerbare in der Antarktis

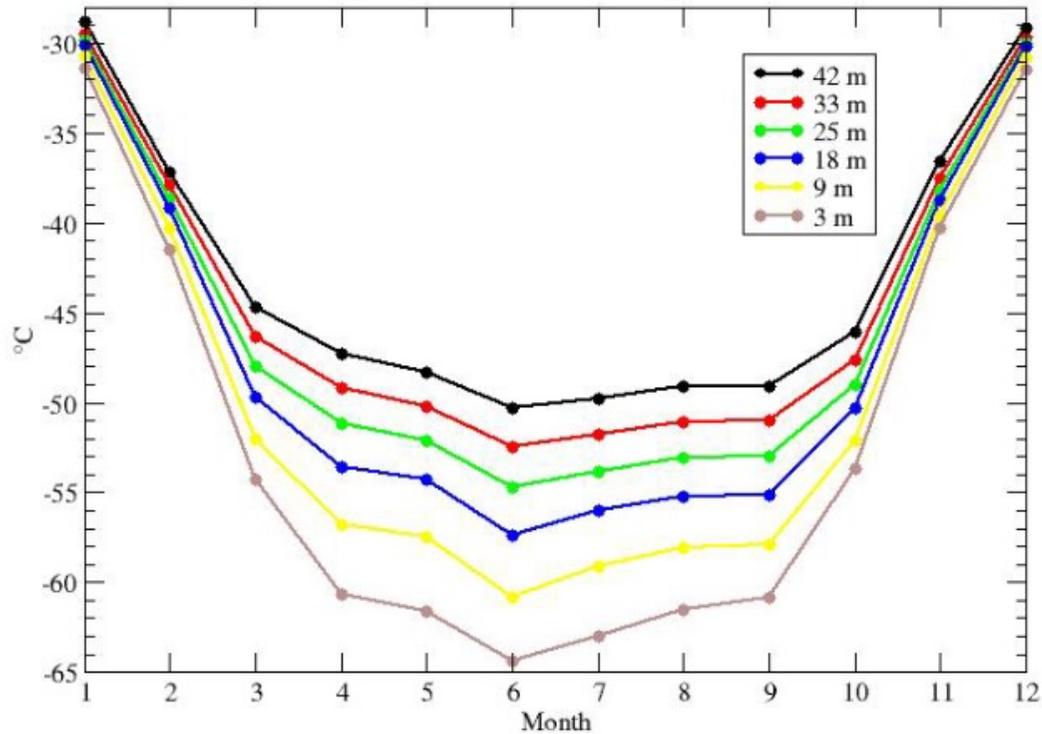
Concordia Station



Verwendung nur für Lehrzwecke!

1. Erneuerbare in der Antarktis

Temperaturen am DOME C

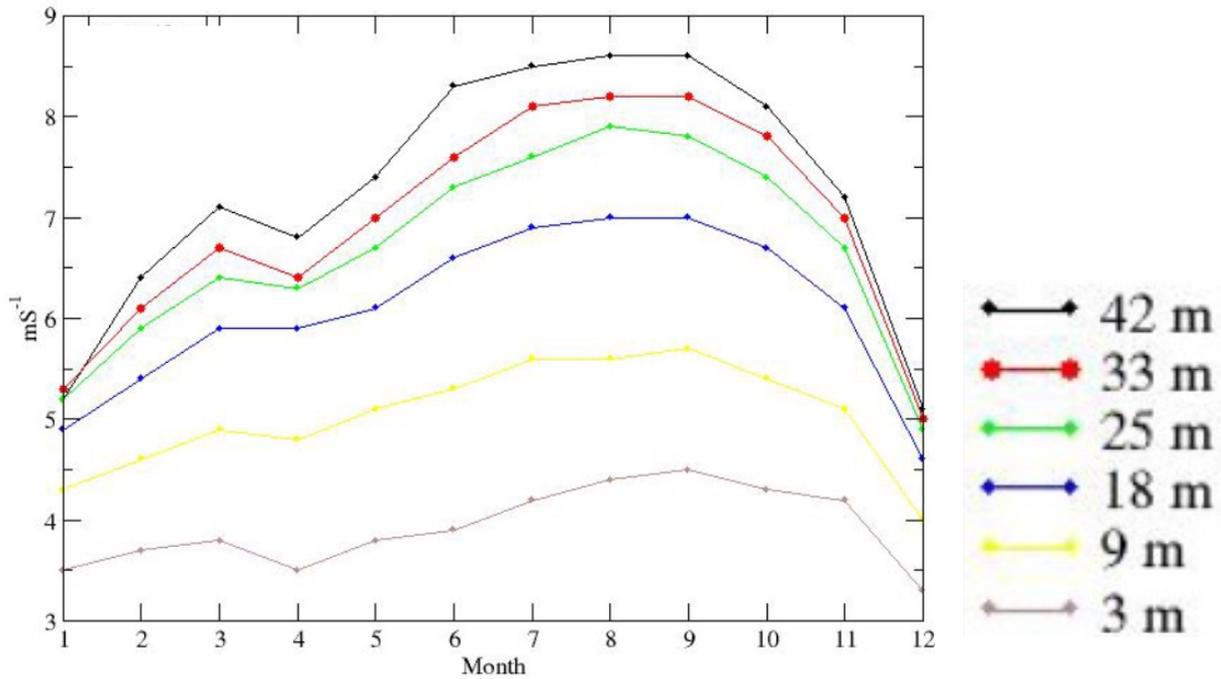


Mittlere monatliche Durchschnittstemperatur am Dome C auf verschiedenen Höhen

(1) Genthon, Christophe, et al. "Ten years of temperature and wind observation on a 45-m tower at Dome C, East Antarctic plateau." *Earth System Science Data Discussions* 2021 (2021): 1-29.

1. Erneuerbare in der Antarktis

Wind am Dome C



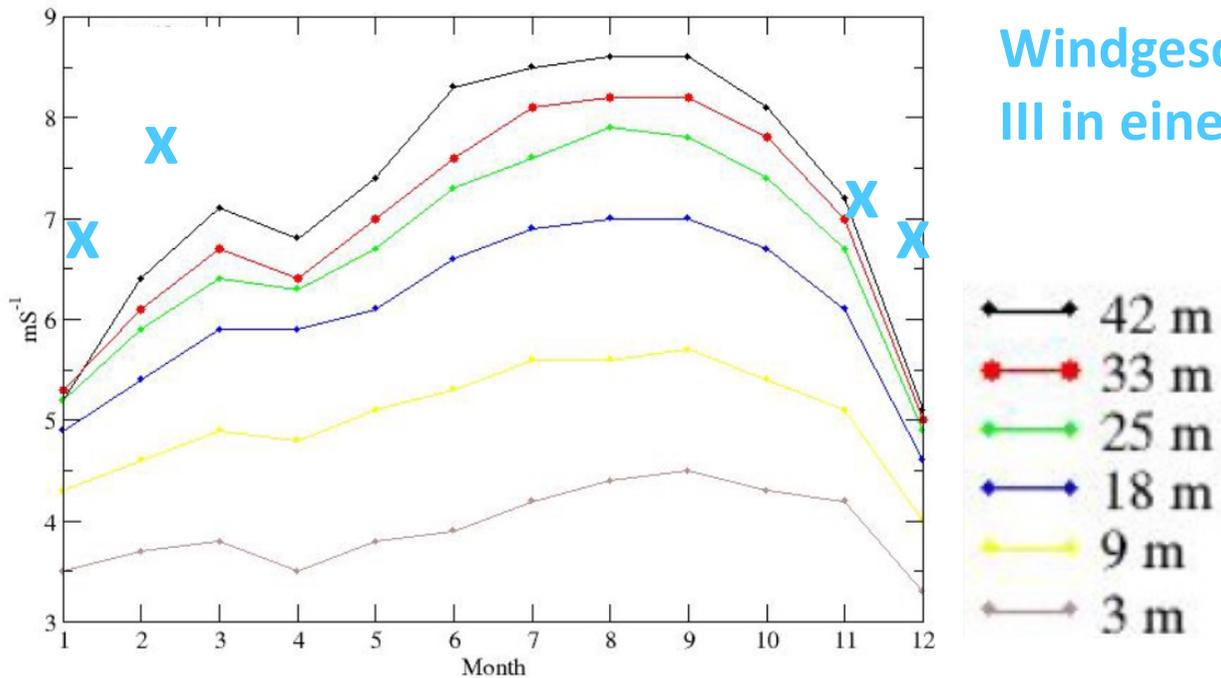
Mittlere monatliche Windgeschwindigkeit am Dome C in verschiedenen Höhen (1)

(1) Genthon, Christophe, et al. "Ten years of temperature and wind observation on a 45-m tower at Dome C, East Antarctic plateau." *Earth System Science Data Discussions* 2021 (2021): 1-29.

Verwendung nur für Lehrzwecke!

1. Erneuerbare in der Antarktis

Wind am Dome C



Mittlere monatliche
Windgeschwindigkeit an der Neumayer
III in einer Höhe von 10m (2)

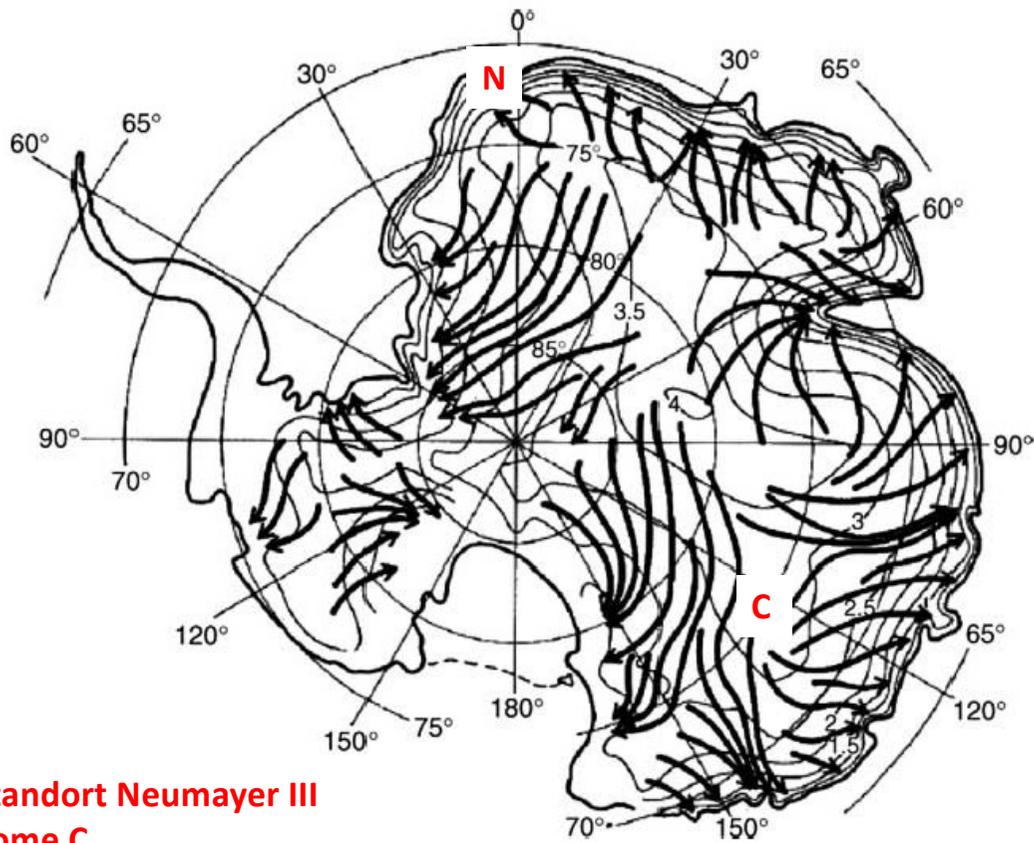
Mittlere monatliche Windgeschwindigkeit am Dome C in
verschiedenen Höhen (1)

Verwendung nur für Lehrzwecke!

(1) Genthon, Christophe, et al. "Ten years of temperature and wind observation on a 45-m tower at Dome C, East Antarctic plateau." *Earth System Science Data Discussions* 2021 (2021): 1-29.
(2) Rimbu, Norel, et al. "Daily to intraseasonal oscillations at Antarctic research station Neumayer." *Antarctic Science* 26.2 (2014): 193-204.

1. Erneuerbare in der Antarktis

Wind am Dome C



Smith Mountain Meteorology, 2003

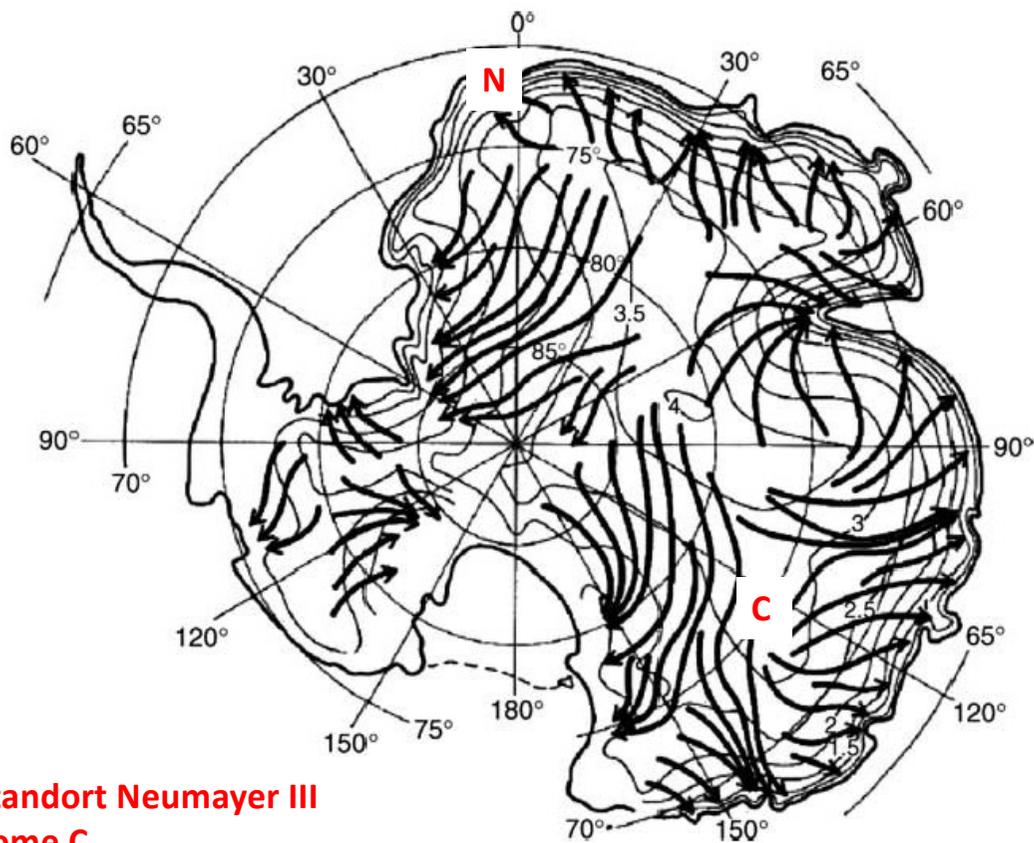
N: Standort Neumayer III
C: Dome C

Verwendung nur für Lehrzwecke!

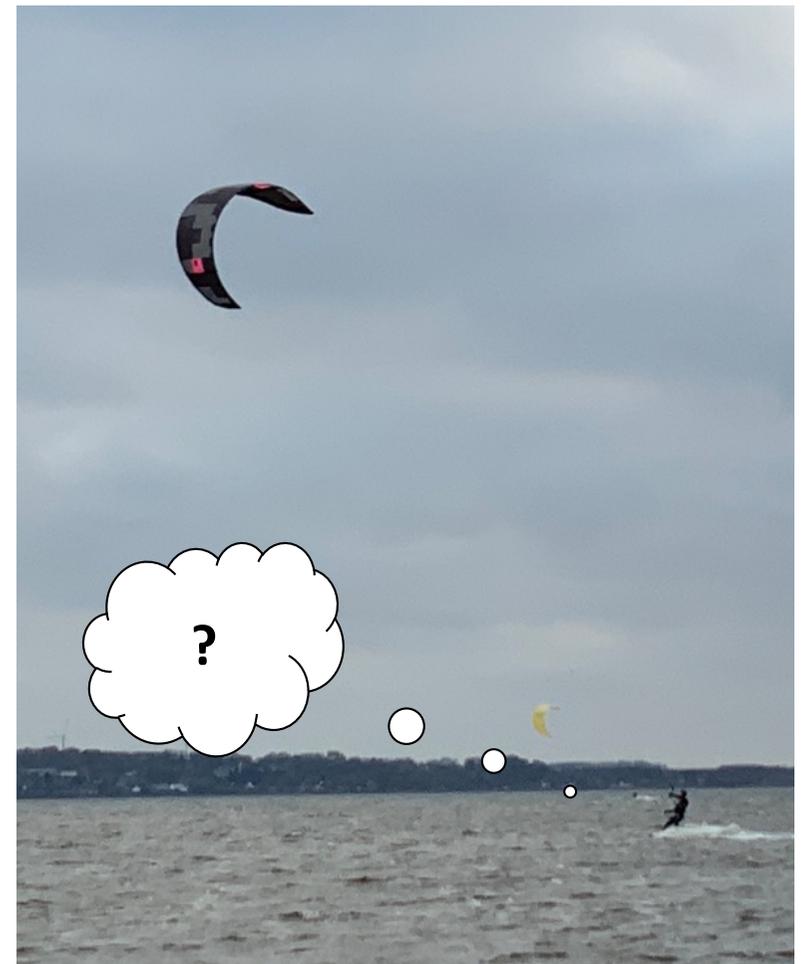
1. Erneuerbare in der Antarktis

Wind am Dome C

Smith Mountain Meteorology, 2003



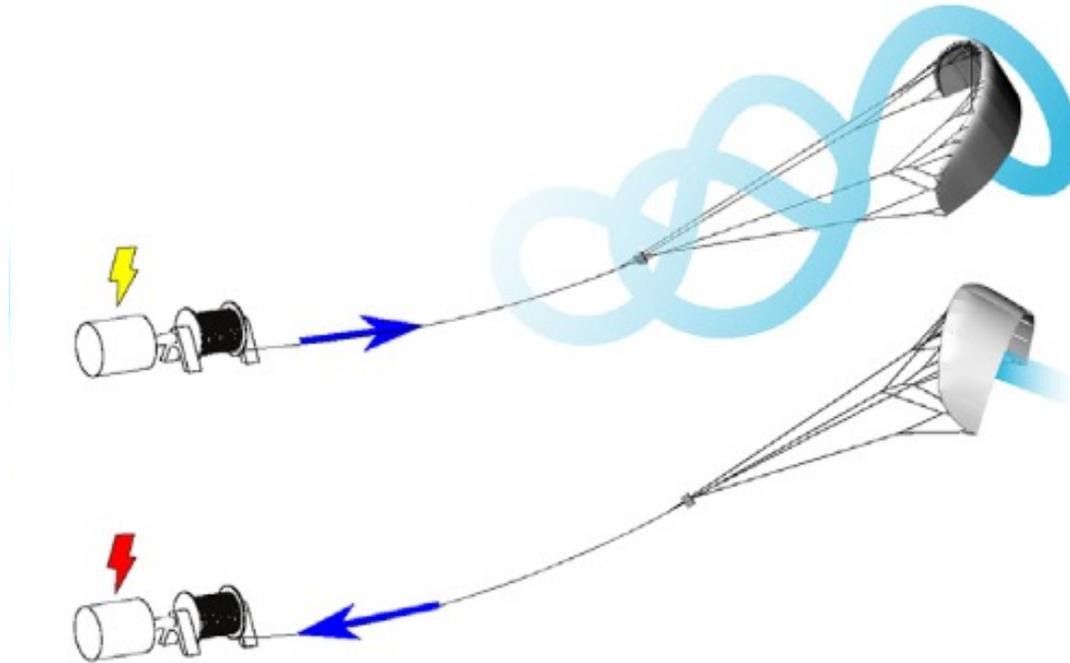
N: Standort Neumayer III
C: Dome C



Verwendung nur für Lehrzwecke!

1. Erneuerbare in der Antarktis

Flugwindenergieanlagen

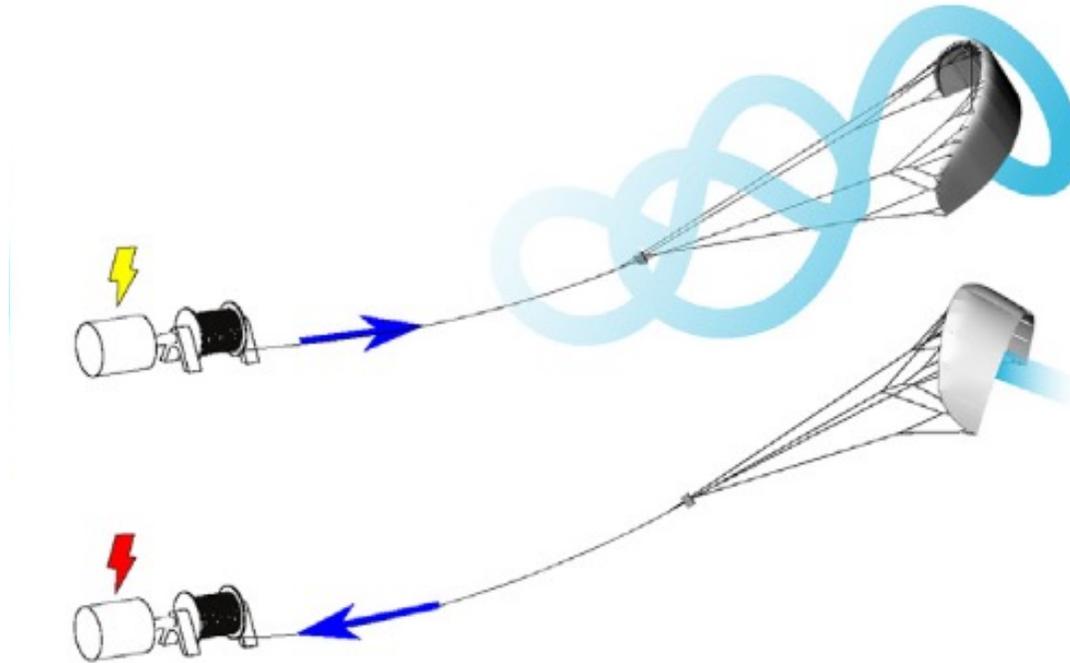


Stromerzeugung am Boden. **Traction phase:** Kite fliegt 8-Figuren mit großer Auftriebskraft. Generator am Boden wird über Leine (Tether) angetrieben. Wenn Leine „aufgebraucht“ ist, wird der Kite mit geringer Auftriebskraft vom Generator, der dann im Motorbetrieb arbeitet, wieder eingeholt (**Retraction phase**).

1. Erneuerbare in der Antarktis

Flugwindenergieanlagen

Bis zu ca. 90% Masseneinsparung gegenüber bodenfesten Windenergieanlagen



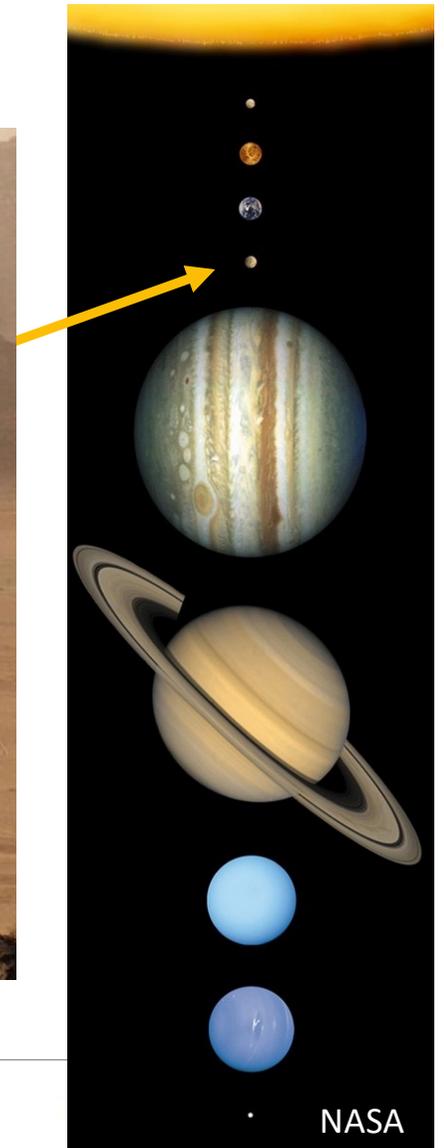
Stromerzeugung am Boden. **Traction phase:** Kite fliegt 8-Figuren mit großer Auftriebskraft. Generator am Boden wird über Leine (Tether) angetrieben. Wenn Leine „aufgebraucht“ ist, wird der Kite mit geringer Auftriebskraft vom Generator, der dann im Motorbetrieb arbeitet, wieder eingeholt (**Retraction phase**).

2. Erneuerbare auf dem Mars



Menschen auf dem Mars noch in diesem Jahrzehnt?

Verwendung nur für Lehrzwecke!



2. Erneuerbare auf dem Mars

Solarenergie auf dem Mars



Erster Marsrover Sojourner 1997



Opportunity 2004



Insight 2018

Verwendung nur für Lehrzwecke!

2. Erneuerbare auf dem Mars

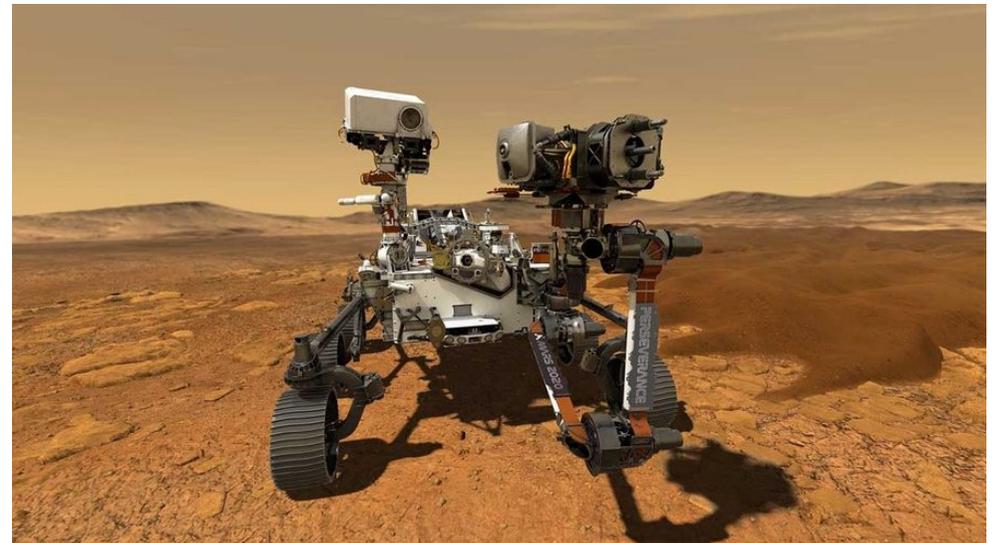
Leistungsbedarf: die Haupt-Herausforderung

Rover und Lander benötigen relativ wenig elektrische Leistung

Mars Science Laboratory (Curiosity) und Perseverance: **0,11kWe**

Viking 1 und 2: **0,03kWe**

Bisherige Missionen hatten entweder Radioisotopen-Generatoren oder Solarzellen.



Source: NASA, JPL Caltech

Perseverance

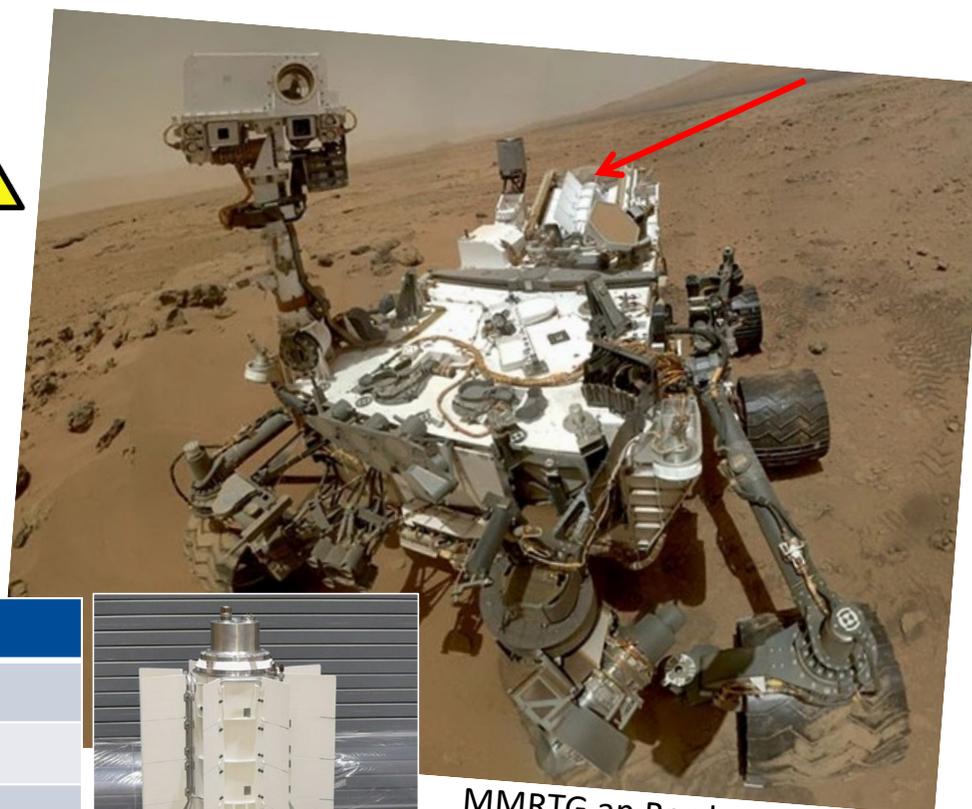
Für eine Crew mit 6 AstronautInnen wird eine durchschnittliche Leistung von 40kWe benötigt (wenn kein Treibstoff erzeugt wird)*

2. Erneuerbare auf dem Mars

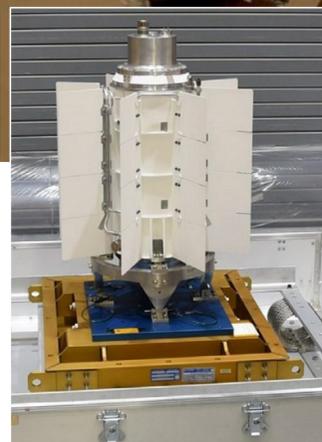
Exkurs: Was ist ein Radioisotopen-Generator?



- durch radioaktiven Zerfall entsteht in einem Radioisotopengenerator Wärme
- Thermoelemente erzeugen durch die Temperaturdifferenz eine elektrische Spannung
- ein häufig verwendeter Brennstoff ist Plutonium 238 mit einer Halbwertszeit von 87 Jahren
- seit 1961 bei 25 verschiedenen Weltraummissionen verwendet (u.a. die Voyager-Sonden)



MMRTG an Bord von Curiosity

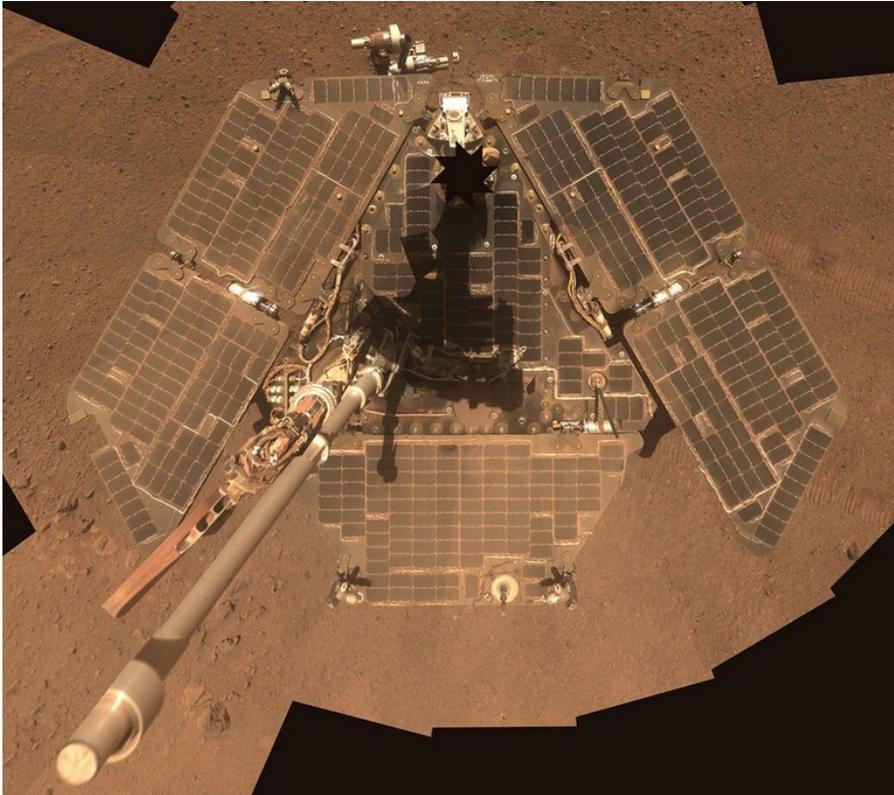


Eigenschaften des NASA Multi-Mission RTG	
Elektrische Leistung	110W
Thermische Leistung	1975W
Wirkungsgrad	6%
Brennstoffmenge (Pu 238)	3,48kg
Betriebsdauer	17 Jahre
Gesamtmasse	43,5kg

Liu et. Al. Comprehensive modeling and parametric analysis of Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator, 2023
NASA: Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG)

2. Erneuerbare auf dem Mars

Herausforderungen Solarzellen

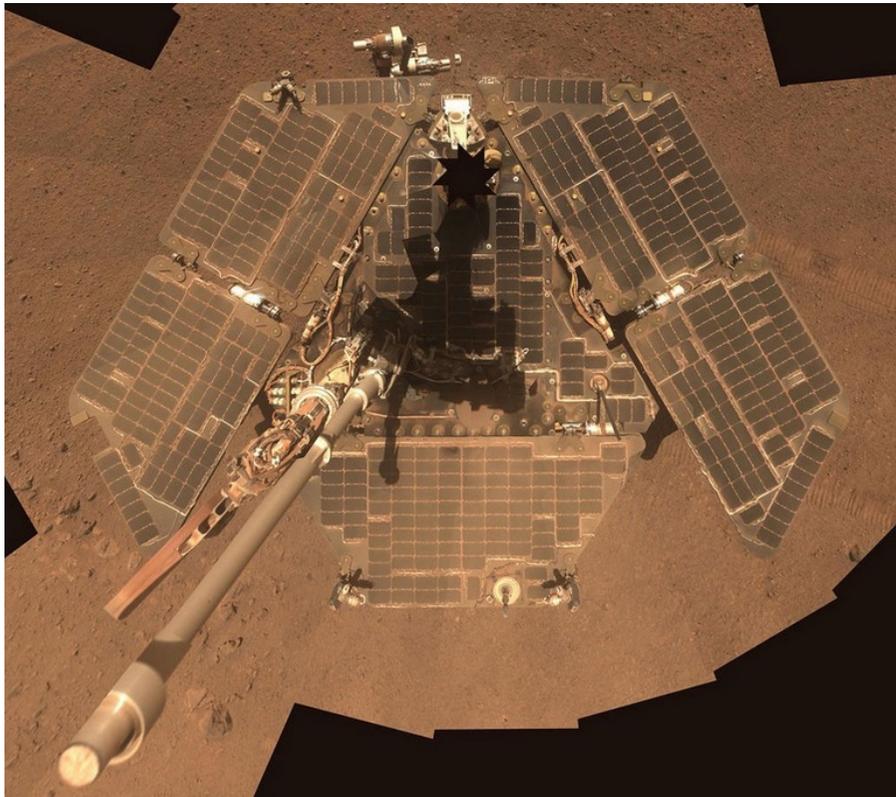


Selbstporträt von Opportunity

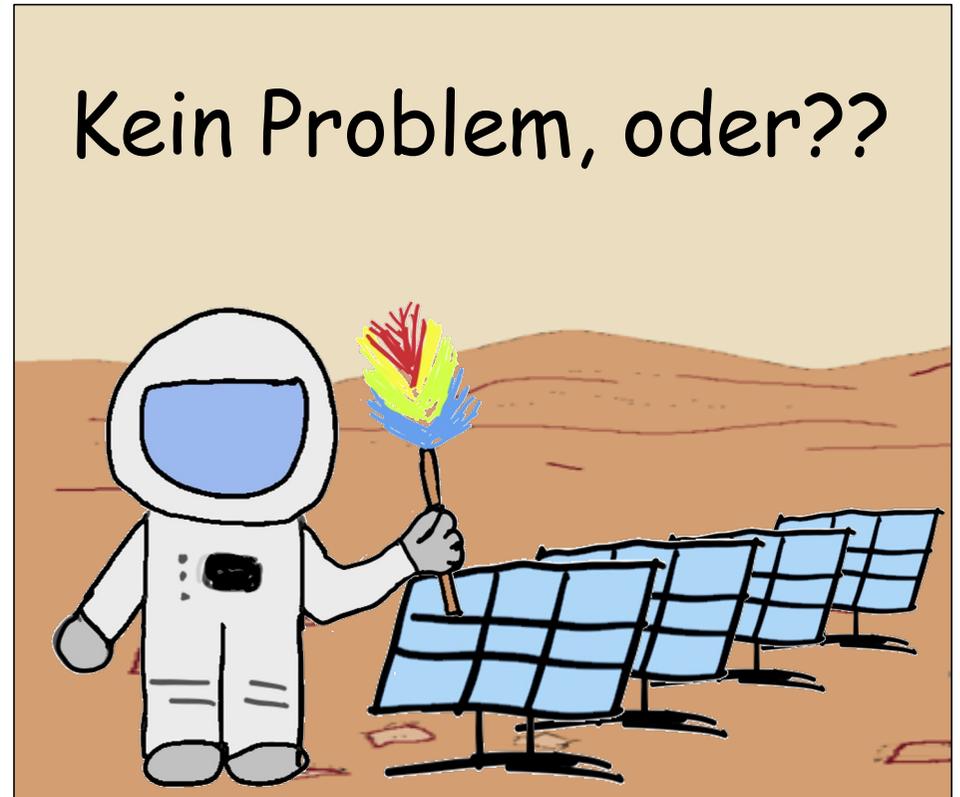
Verwendung nur für Lehrzwecke!

2. Erneuerbare auf dem Mars

Herausforderungen Solarzellen



Selbstporträt von Opportunity

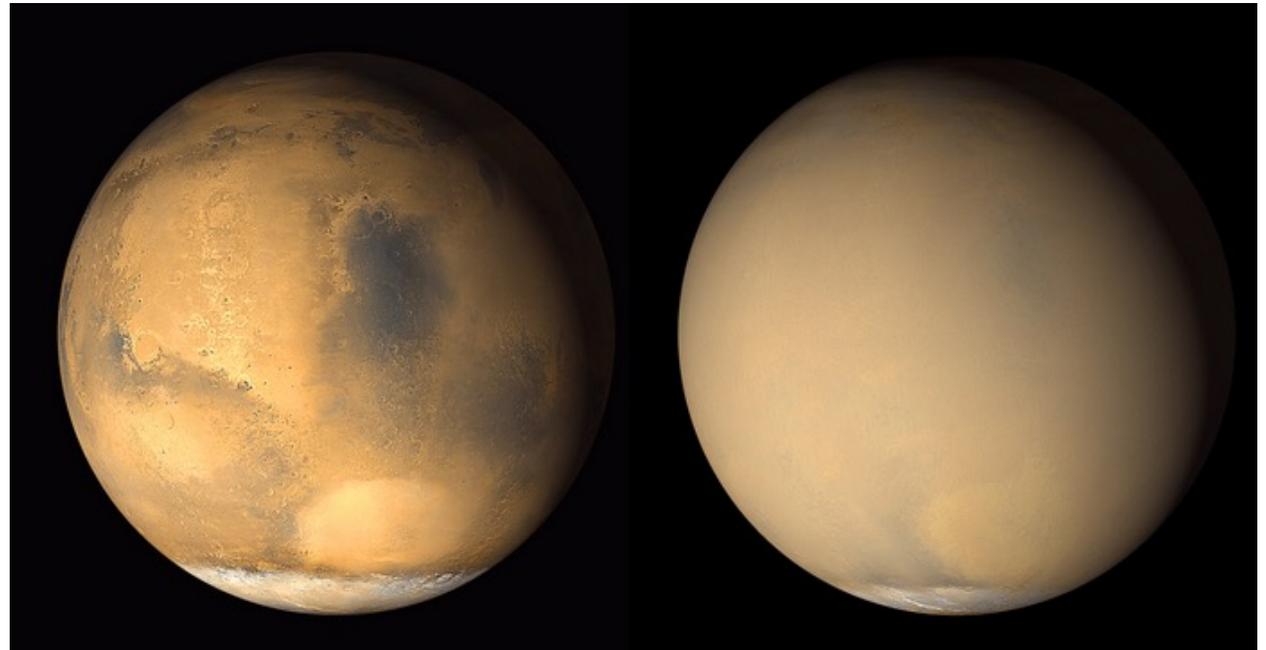


Verwendung nur für Lehrzwecke!

2. Erneuerbare auf dem Mars

Globale Staubstürme

- Treten einmal in 3 Jahren auf
- Dauern mehrere Wochen
- Hohe atmosphärische optische Dicke beeinträchtigt massiv den Ertrag von Solarzellen



Globaler Staubsturm 2001 aufgenommen von NASA's Mars Global Surveyor

2. Erneuerbare auf dem Mars

Wind ?

Mechanische Leistung einer Windenergieanlage

$$P = \frac{1}{2} c_p \rho A v^3$$

c_p : Leistungsbewert

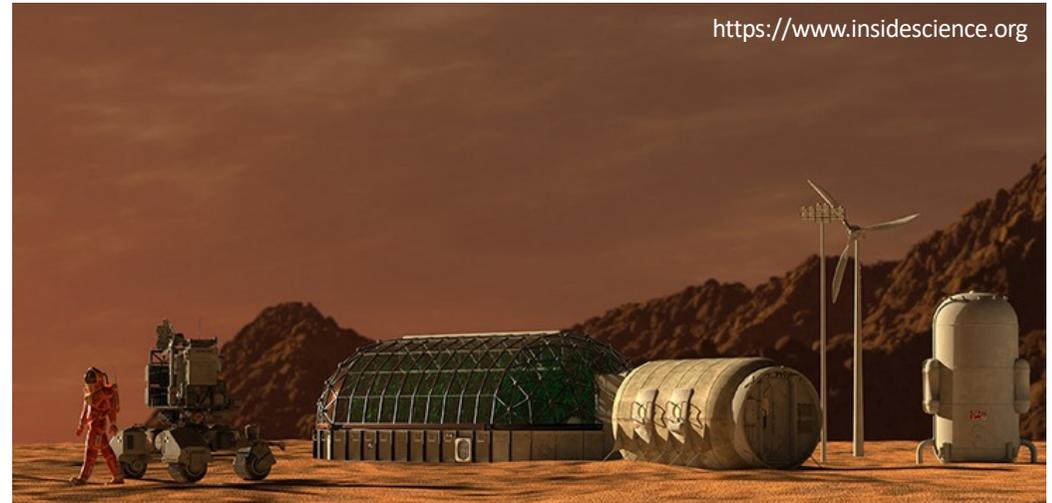
A : Rotorfläche

ρ : Luftdichte

v : Windgeschwindigkeit

Durchschnittliche Luftdichte auf dem Mars

0.018kg/m³ (Erde: **1.225kg/m³**)

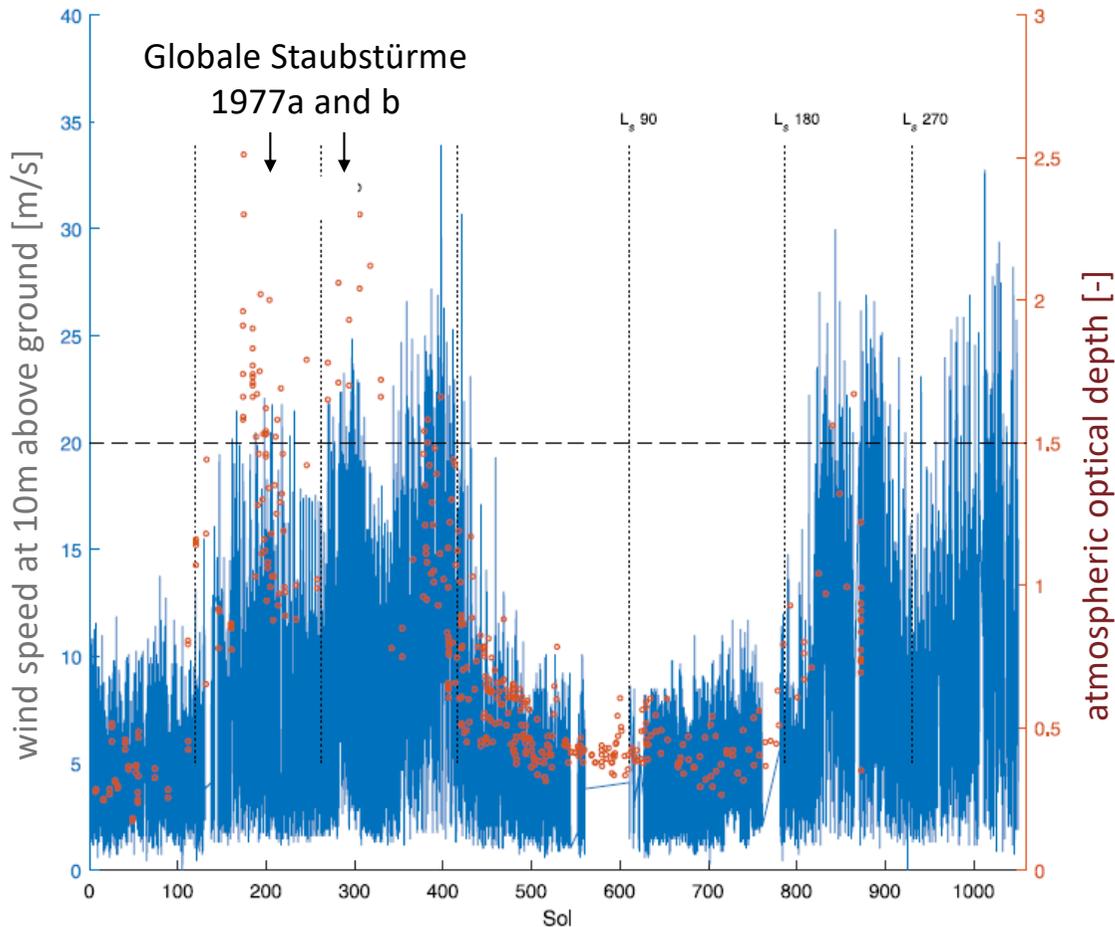


<https://www.insidescience.org>



<https://interestingengineering.com>

2. Erneuerbare auf dem Mars



Windgeschwindigkeit und atmosphärische optische Dicke (τ) an der Viking 2 Landestelle in einer Höhe von 10m.

Einfluss von τ auf die Strahlungsintensität: $I = I_0 e^{-\tau}$

Übrigbleibende Strahlungsintensität für verschiedene Werte von τ in Bezug zu $\tau = 0,5$ (Normalbedingung)

τ	Intensität
1	61%
1,5	37%
2	22%
2,5	14%

Verwendung nur für Lehrzwecke!

2. Erneuerbare auf dem Mars

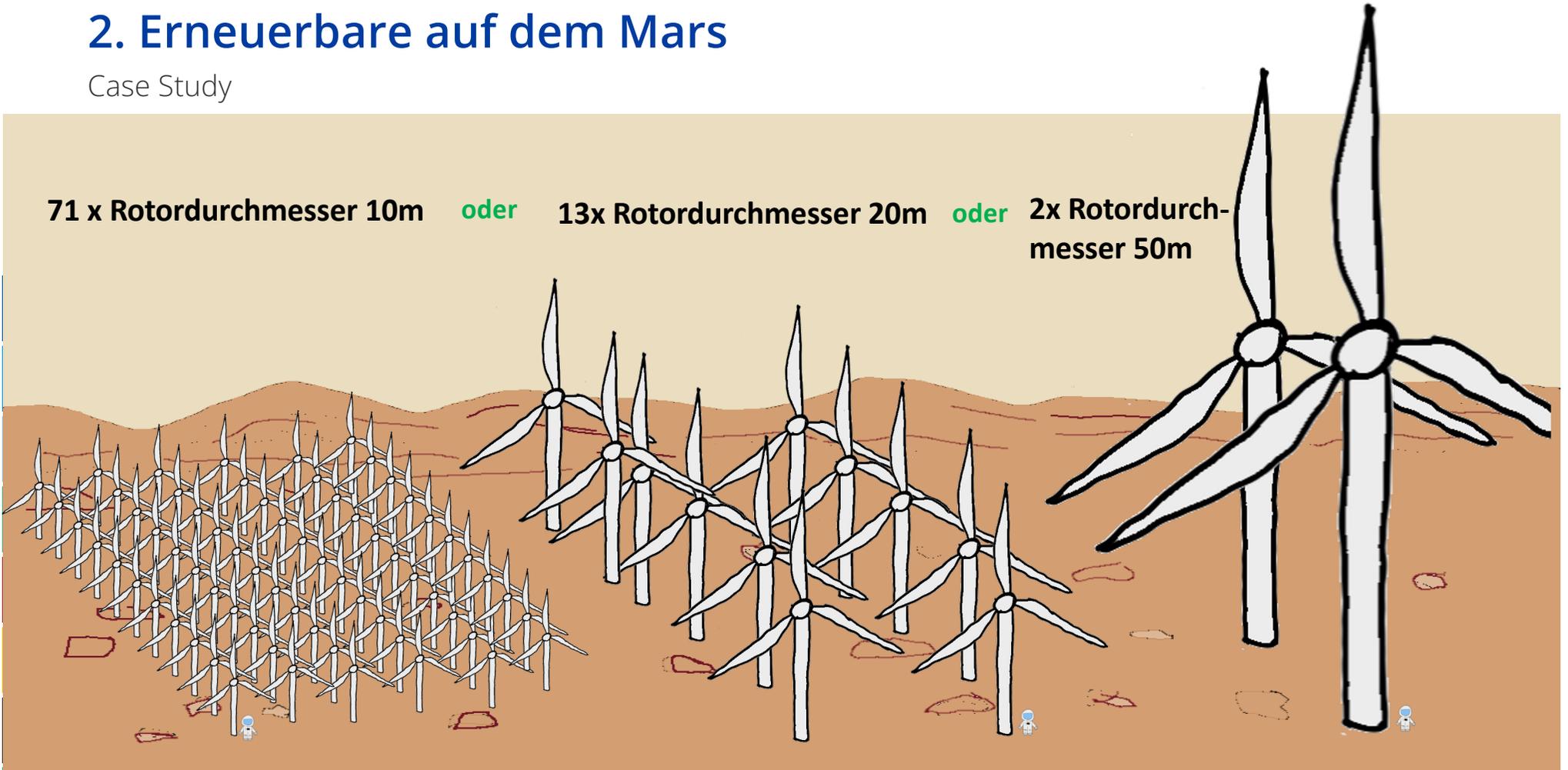
Case Study

Schätzfrage: Wie viele Windenergieanlagen werden benötigt, um an der Viking 2 Landestelle während des globalen Staubsturms 1977b eine durchschnittliche Leistung von 27kWe zu produzieren?

2. Erneuerbare auf dem Mars

Case Study

71 x Rotordurchmesser 10m **oder** 13x Rotordurchmesser 20m **oder** 2x Rotordurchmesser 50m



Verwendung nur für Lehrzwecke!

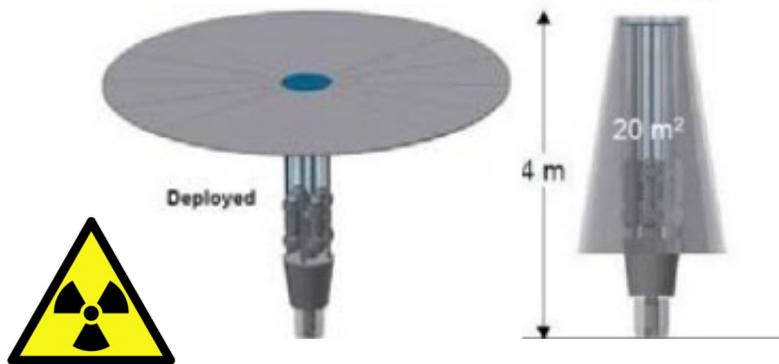
2. Erneuerbare auf dem Mars

Vorläufige Ergebnisse

- Risiko globaler Staubstürme mit massivem Einfluss auf den Ertrag von Solarzellen
- Höhere Windgeschwindigkeiten auf dem Mars gleichen die geringere Luftdichte nicht aus
- Atmosphärische optische Dicke und Windgeschwindigkeit korrelieren nicht sehr gut.
- Bodenfeste Windenergieanlagen wären wegen ihrer Anzahl bzw. Größe extrem herausfordernd

2. Erneuerbare auf dem Mars

Derzeitiges Konzept der NASA



Derzeitige Lösungsidee der NASA ist der Einsatz von Kernspaltungs-Reaktoren.
Project: KRUSTY: Kilowatt Reactor Using Stirling Technology
Leistung: 10kWe, Gewicht 1.8 t pro Stück

Herausforderung: Kernspaltung bisher nur sehr selten im Weltraum benutzt,
öffentliche Akzeptanz ?

→ **Können Erneuerbare eine Alternative sein?**

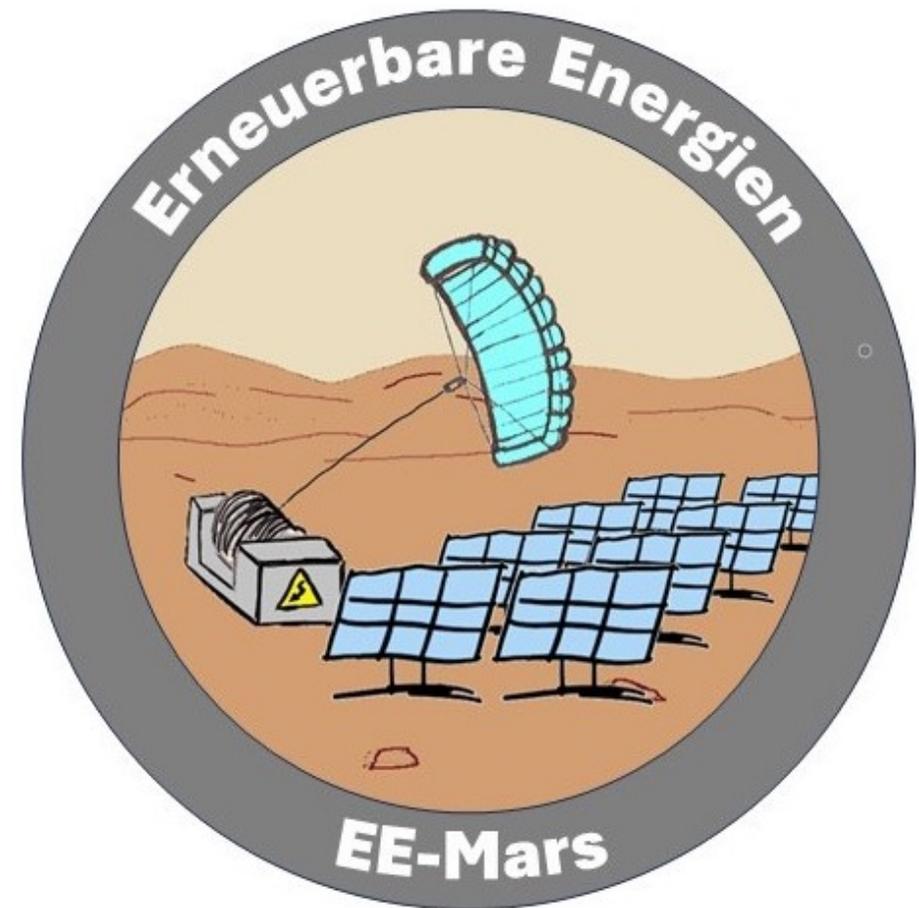
Verwendung nur für Lehrzwecke!

2. Erneuerbare auf dem Mars

Weiterer Forschungsbedarf

Ähnlich wie in der Antarktis gibt es gute Argumente für Flugwindenergieanlagen auf dem Mars (erreichen größere Höhen (mehr Wind) und haben ein sehr großes Potential für Gewichtseinsparungen.

Erneuerbares Energiekonzept als Kombination aus Solar, Wind und Speichertechnologien.



3. Erneuerbare auf Europa?

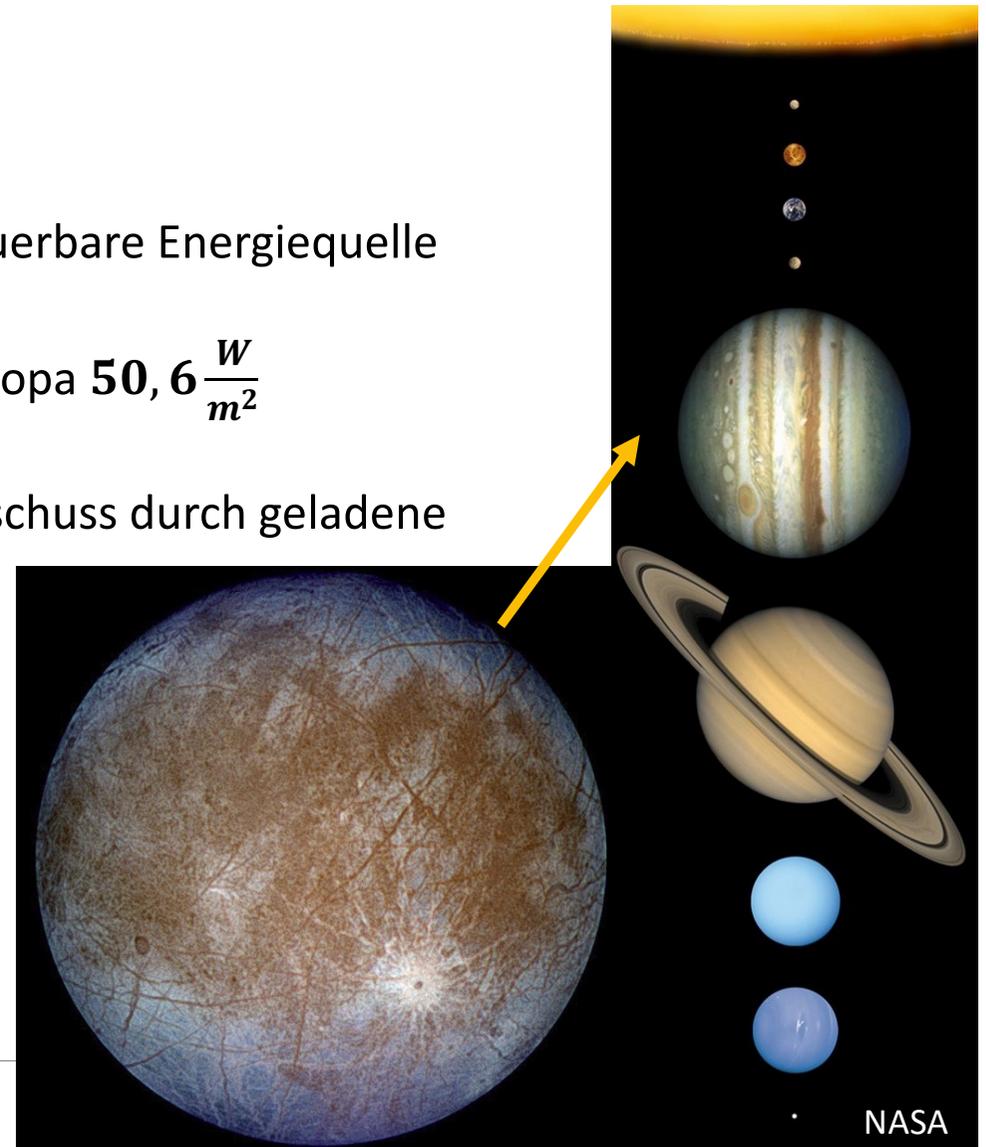
Herausforderungen

Keine Atmosphäre -> nur Solarenergie als erneuerbare Energiequelle

Mittlere Strahlungsleistung Erde $1367 \frac{W}{m^2}$, Europa $50,6 \frac{W}{m^2}$

Einfluss der Jupiter Magnetosphäre, starker Beschuss durch geladene Teilchen auf der Oberfläche von Europa

Verglichen mit anderen Landern relativ hoher Energiebedarf durch Schmelzsonde



3. Erneuerbare auf Europa?

Herausforderungen

Keine Atmosphäre -> nur Solarenergie als erneuerbare Energiequelle

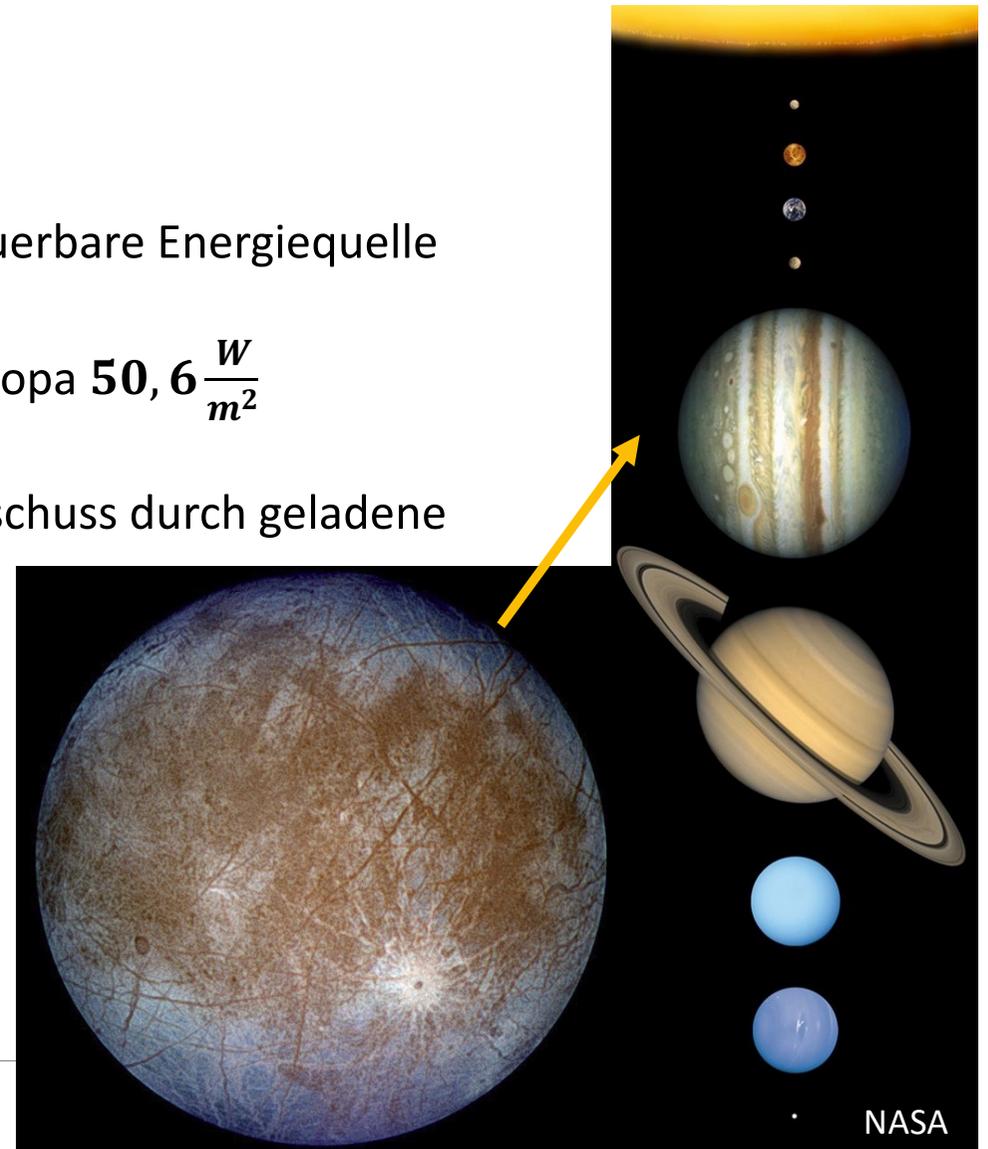
Mittlere Strahlungsleistung Erde $1367 \frac{W}{m^2}$, Europa $50,6 \frac{W}{m^2}$

Einfluss der Jupiter Magnetosphäre, starker Beschuss durch geladene Teilchen auf der Oberfläche von Europa

Verglichen mit anderen Landern relativ hoher Energiebedarf durch Schmelzsonde

Wieviele Quadratmeter Solarzellen wären erforderlich, um eine Schmelzsonde (5kW) auf Europa zu betreiben?

Verwendung nur für Lehrzwecke!



3. Erneuerbare auf Europa?

Annahmen für Solarertragsrechner auf Europa

- Annahme mittlere Leistung über Tag 5kW * (Speicher für Randzeiten benötigt)
- mittlerer Abstand Jupiter-Sonne
- Daten der Solarzellen von Clipper und JUICE
- Nur Kernschatten (kein Halbschatten) bei **Finsternissen** durch Jupiter

Verwendung nur für Lehrzwecke!

* Schüller, Kai, and Julia Kowalski. "Melting probe technology for subsurface exploration of extraterrestrial ice-critical refreezing length and the role of gravity." *Icarus* 317 (2019): 1-9.

3. Erneuerbare auf Europa?

Annahmen für Solarertragsrechner auf Europa

- Annahme mittlere Leistung über Tag 5kW * (Speicher für Randzeiten benötigt)
- mittlerer Abstand Jupiter-Sonne
- Daten der Solarzellen von Clipper und JUICE
- Nur Kernschatten (kein Halbschatten) bei **Finsternissen** durch Jupiter

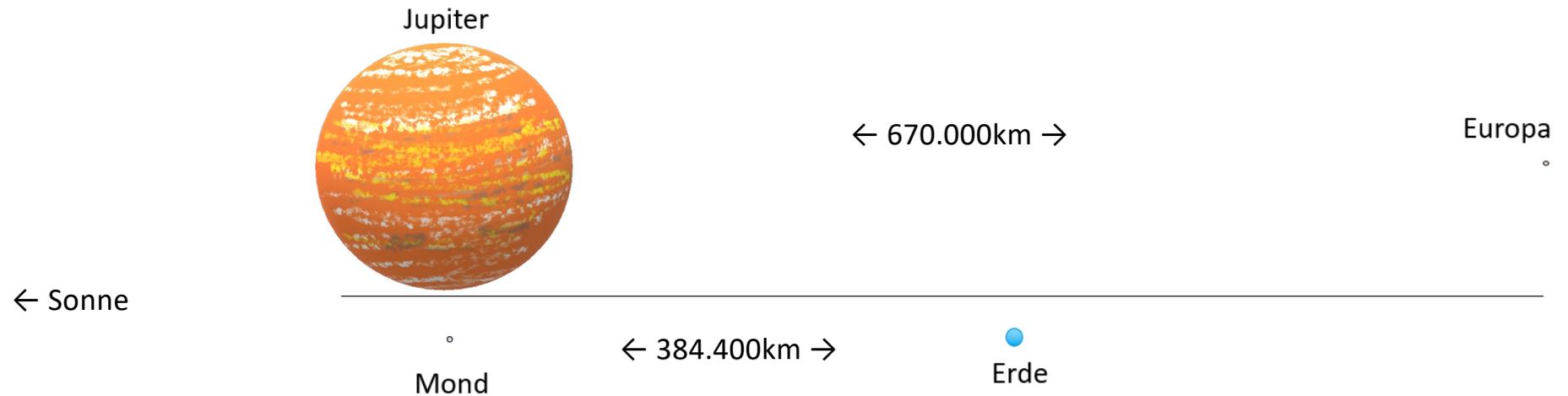


Verwendung nur für Lehrzwecke!

* Schüller, Kai, and Julia Kowalski. "Melting probe technology for subsurface exploration of extraterrestrial ice-critical refreezing length and the role of gravity." *Icarus* 317 (2019): 1-9.

3. Erneuerbare auf Europa?

Größenverhältnisse: Auswirkungen auf Finsternisse

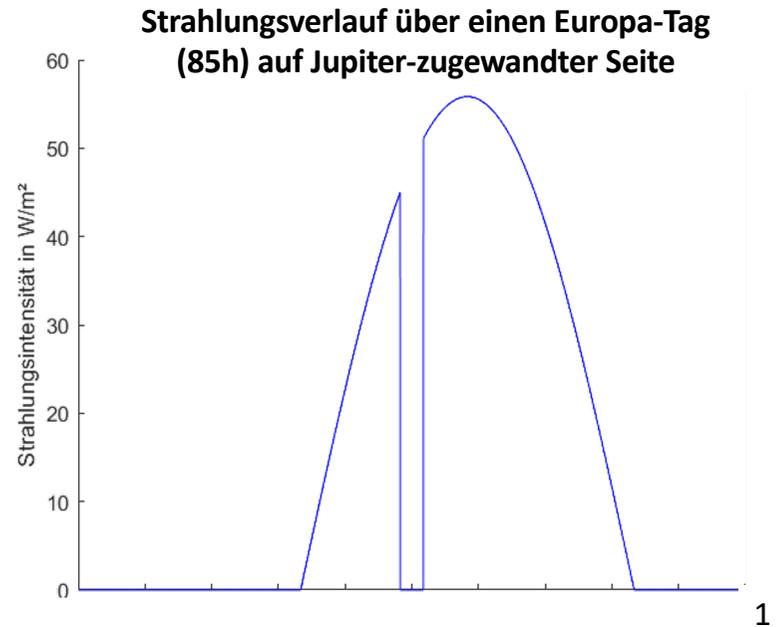
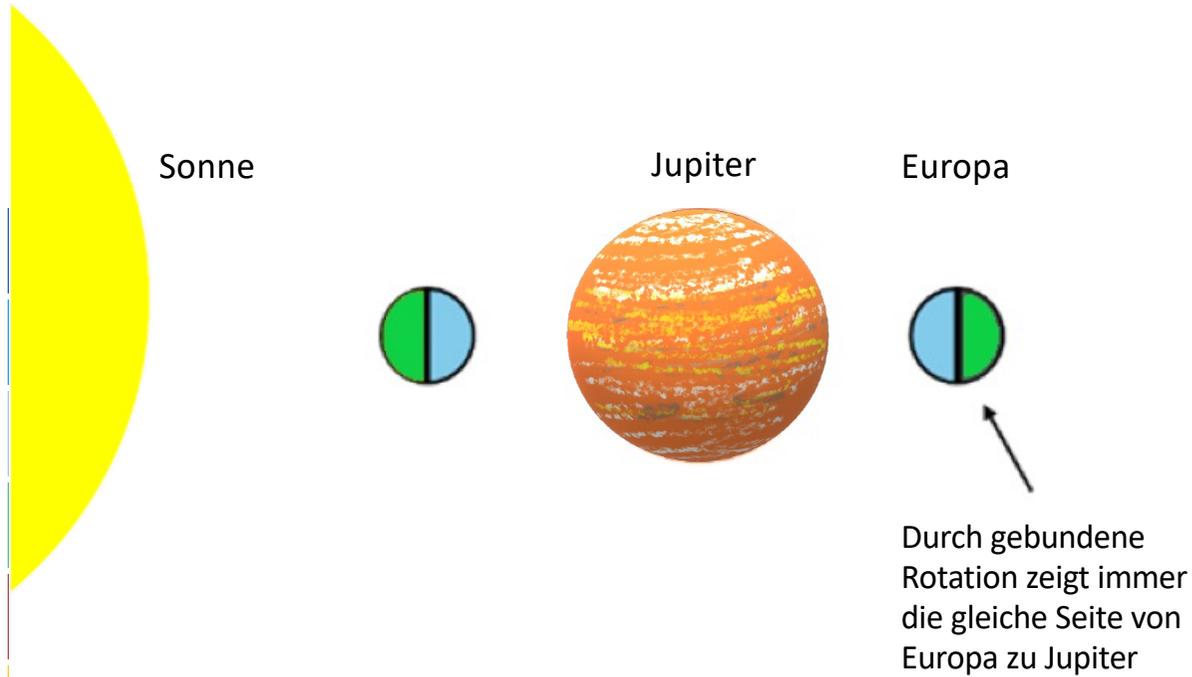


$$\begin{aligned} \varnothing_{Jupiter} &= 139.800\text{km} = 11 \cdot \varnothing_{Erde} \\ \varnothing_{Europa} &= 3121\text{km} \\ \varnothing_{Mond} &= 3474\text{km} \end{aligned}$$

Abstand Erde-Mond 384.400km
Abstand Europa-Jupiter 670.000km

3. Erneuerbare auf Europa?

Einfluss Längengrad -> Sonnenfinsternisse



3. Erneuerbare auf Europa?

Erste Ergebnisse

Bei mittags zur Sonne senkrechter Ausrichtung der Solarzellen (keine Nachführung) und halbtägigem Betrieb der Schmelzsonde bei mittlerer Leistung von 5kW (Speicher erforderlich)

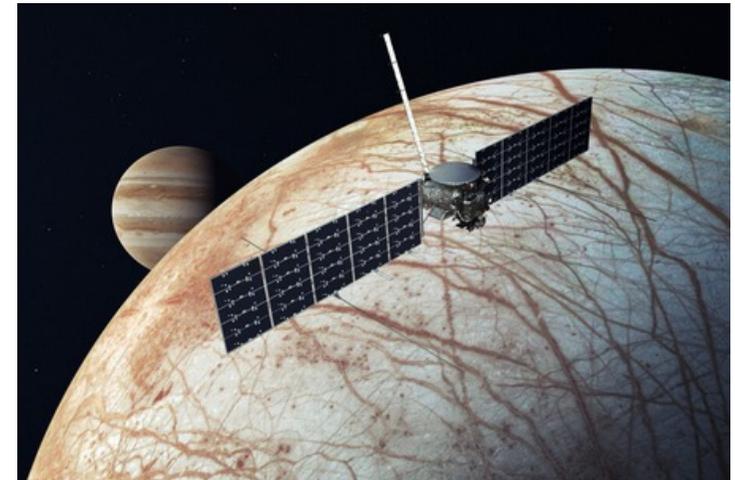
631 m²

Jupiterabgewandte
Seite

708 m²

Worst-case
Jupiterzugewandte
Seite

**Fussballfeld
105x68m= 7140m²**



**Fläche der Solarmodule von
Europa Clipper 102m² ***

3. Erneuerbare auf Europa?

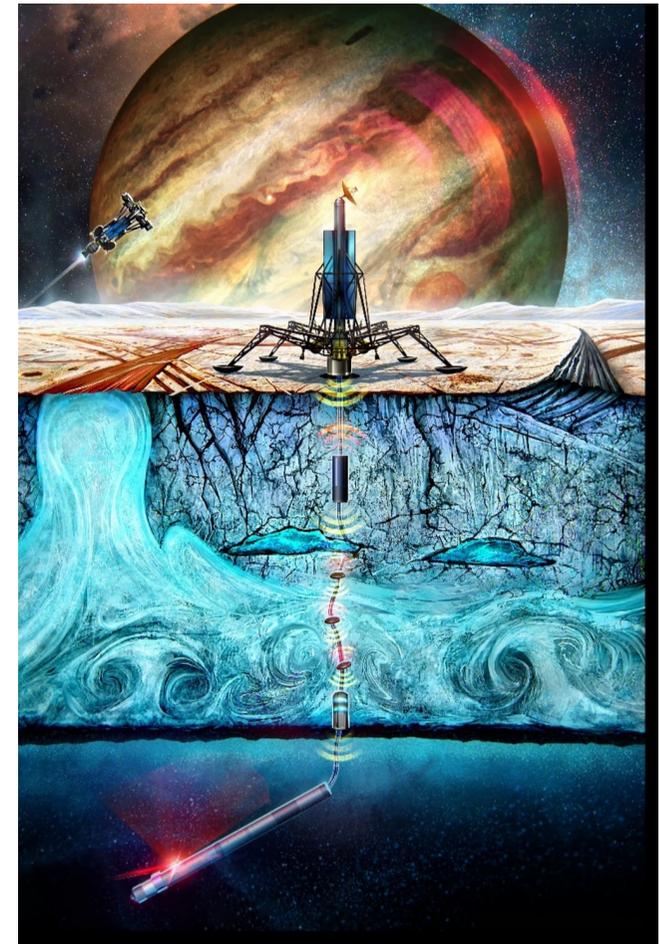
Alternatives Energieversorgungs-Konzept für eine Europa-Mission

Radioisotopen-Generator: elektrische Leistung eher gering
ABER thermische Leistung extrem groß (mit 2 RTG's könnten
5kW erreicht werden)

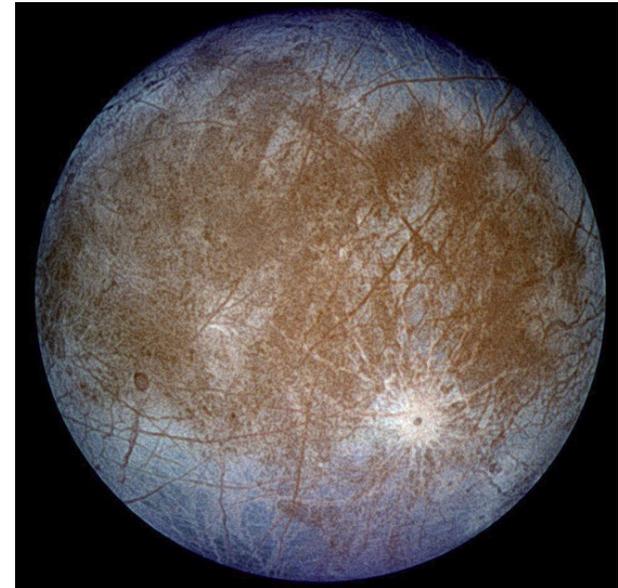
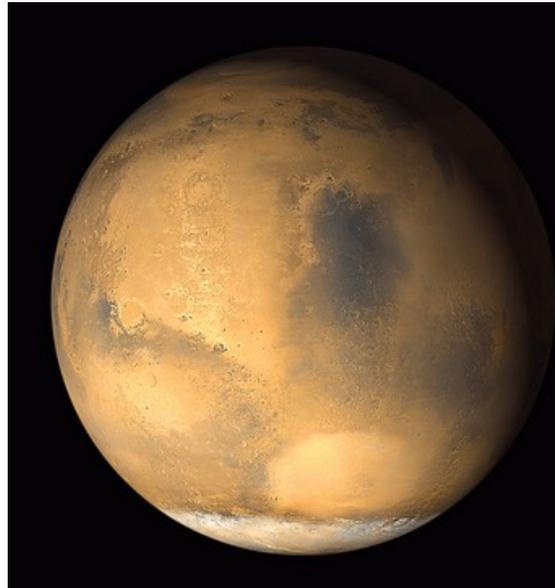
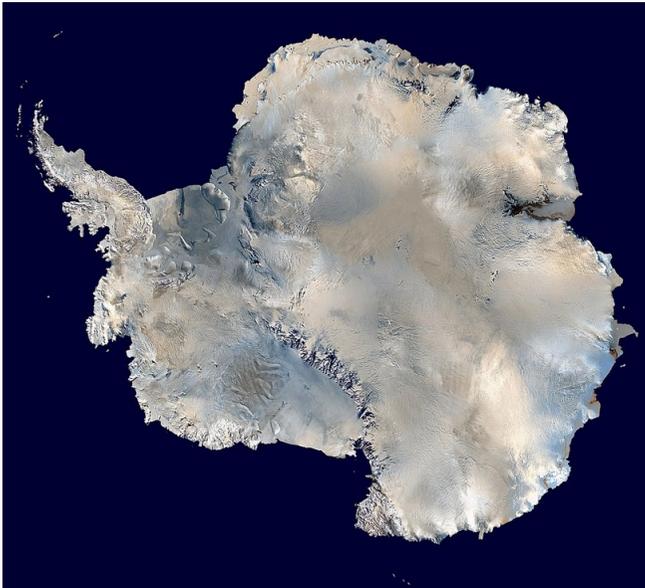
- + kein Kabel erforderlich (müsste mehrere km lang sein)
- thermische Leistung nicht regelbar

Bei Verwendung von Solarzellen müsste die Schmelzsonde
„am Stromkabel“ hängen, wie bei der Mission zur
Neumayer III und zum DOME C. Mehrgewicht, Dynamik der
Eisschicht ?

-> **Noch viele Herausforderungen**



Fazit



Auch unter Extrembedingungen sind erneuerbare Energien
Lösungsmöglichkeiten

Verwendung nur für Lehrzwecke!

Bildquelle: NASA

Danke für die Aufmerksamkeit!



www.cc4e.de