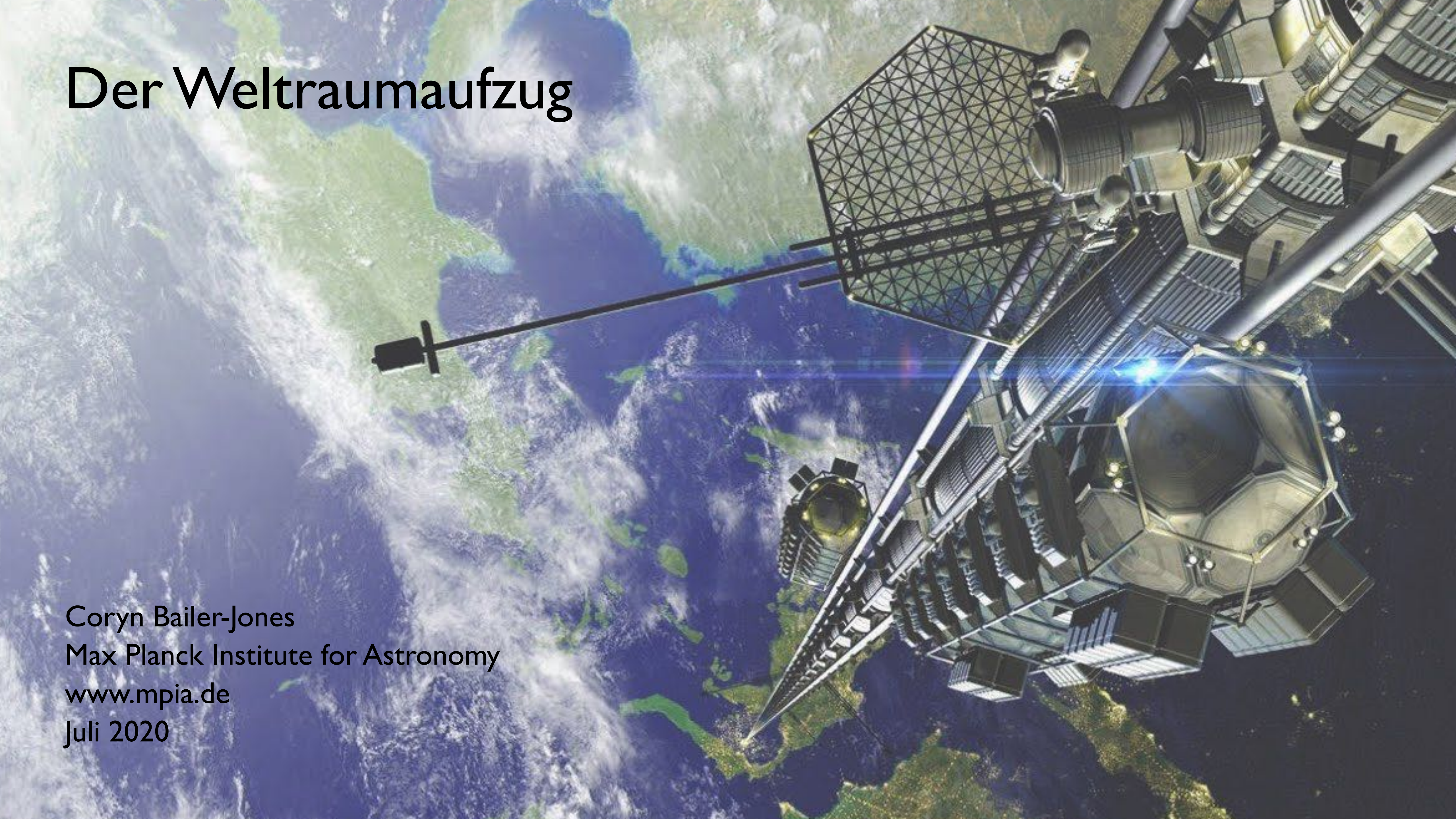


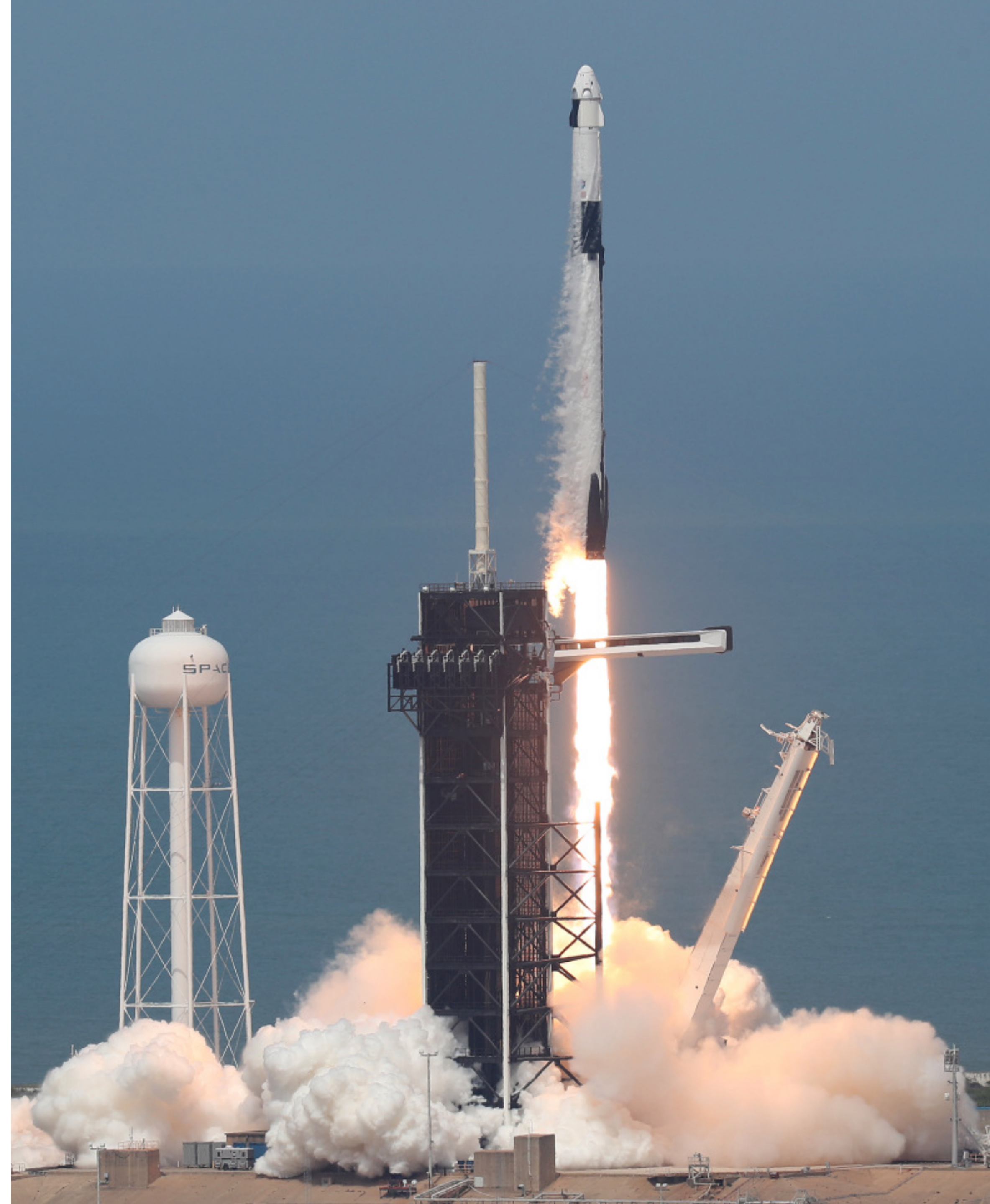
Der Weltraumaufzug

Coryn Bailer-Jones
Max Planck Institute for Astronomy
www.mpia.de
Juli 2020



Raketen

- SpaceX Falcon 9 + Dragon 2
- Rakete: 550 Tonnen
 - ▶ vorwiegend Treibstoff
- Nutzlast: 6 Tonnen bis ISS (400 km)
- Preis: \$60 Millionen
 - ▶ \$10.000 pro Kilogramm Nutzlast
- Kein wesentlicher Effizienzgewinn kann erwartet werden
- Was ist der Alternativ?

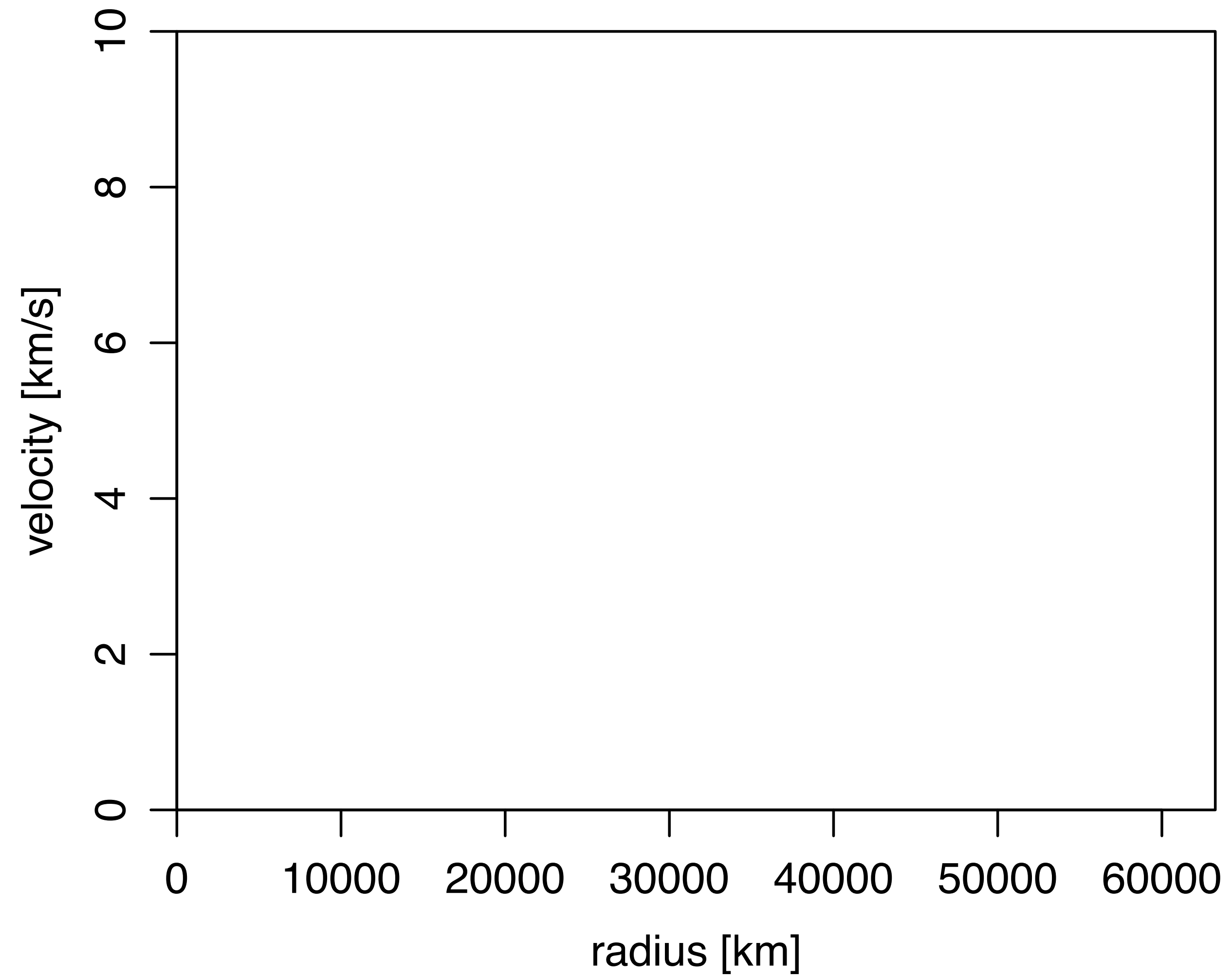


Hohe Türme

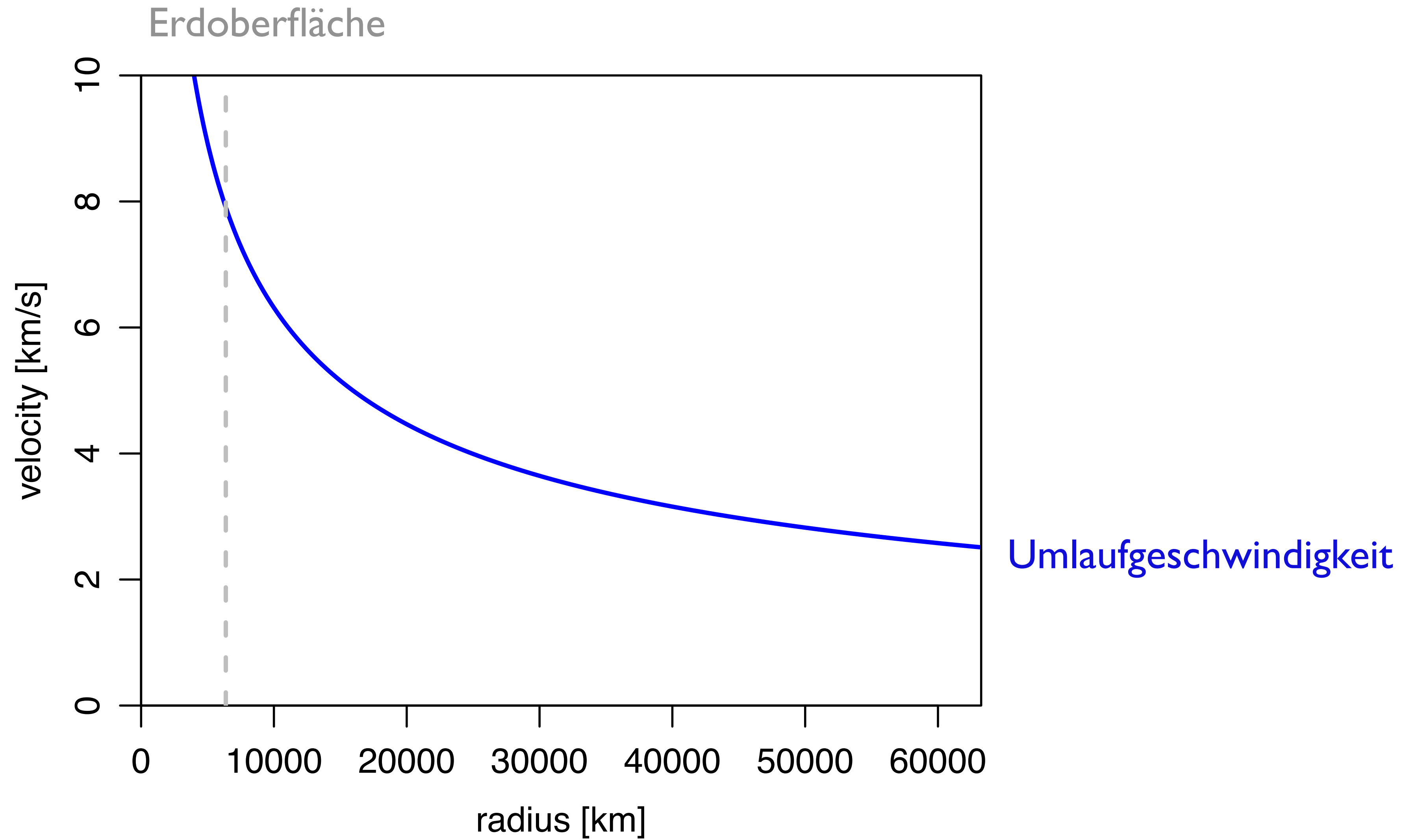


- Wie hoch können wir bauen?
- Kleine Türme stehen unter Druck
- Je höher der Turm, desto größer ist die Zentrifugalkraft aus der Erdrotation
- Ein *sehr* hoher Turm würde sogar unter Spannung stehen und ist eher wie ein Seil

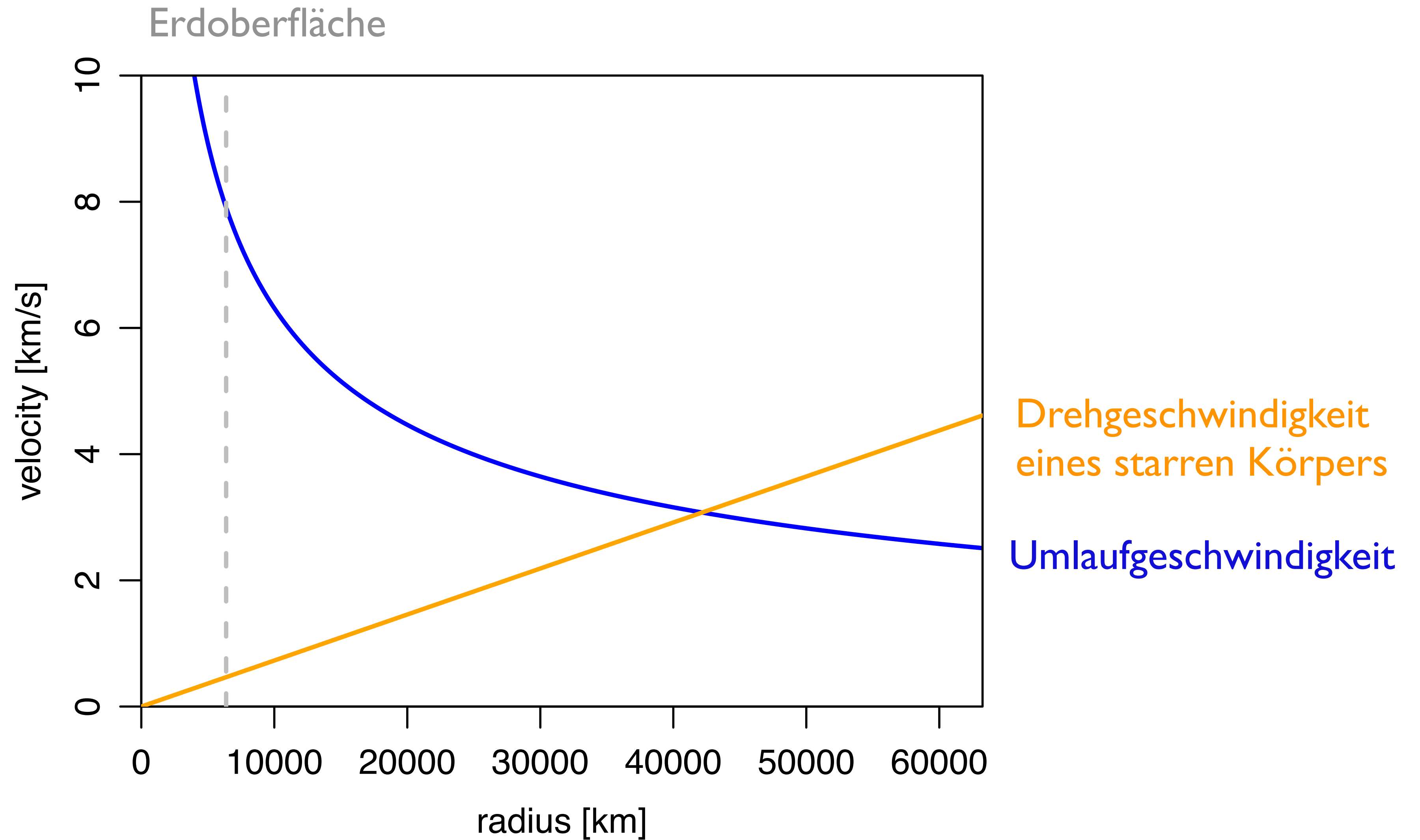
Erdumlaufbahn



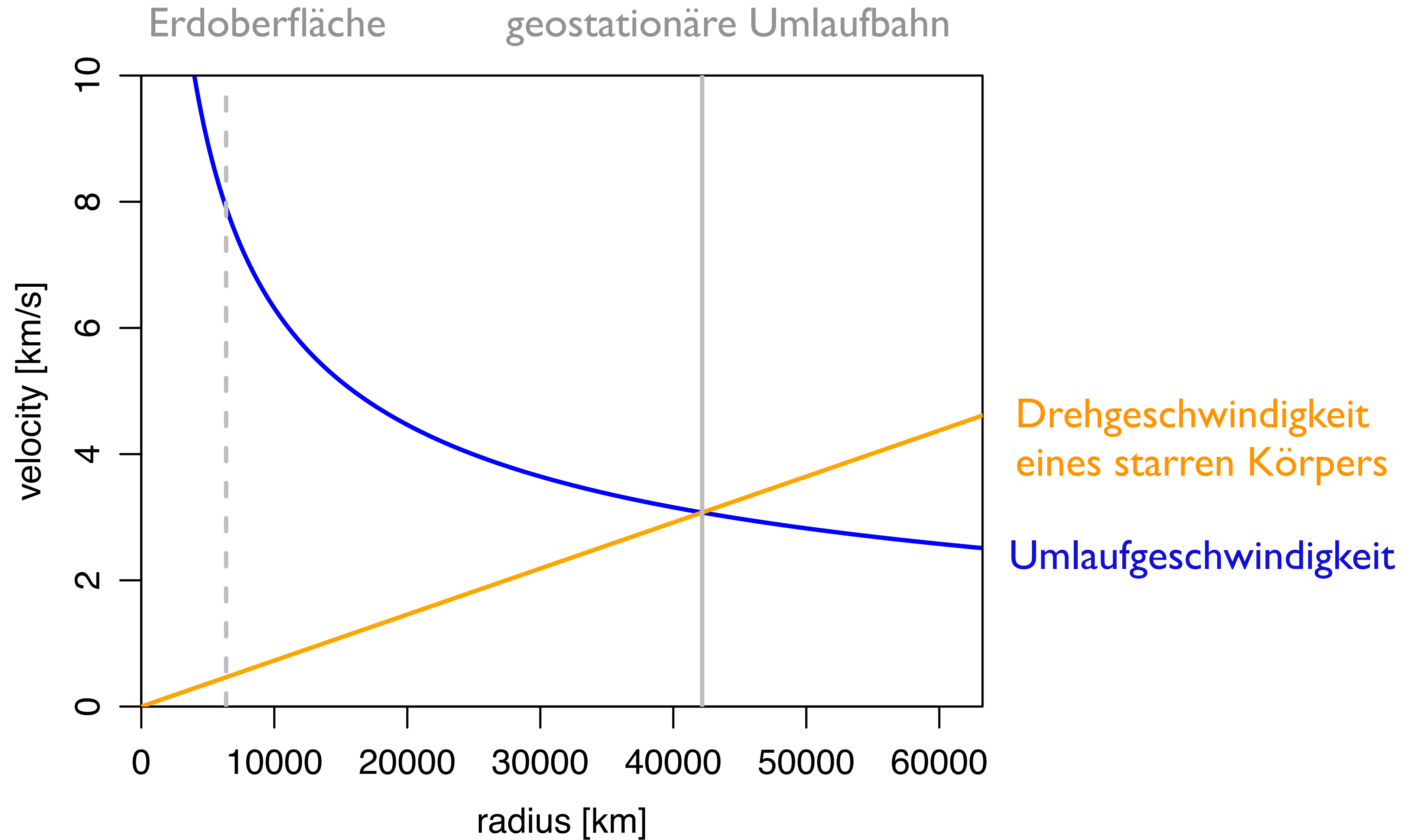
Erdumlaufbahn



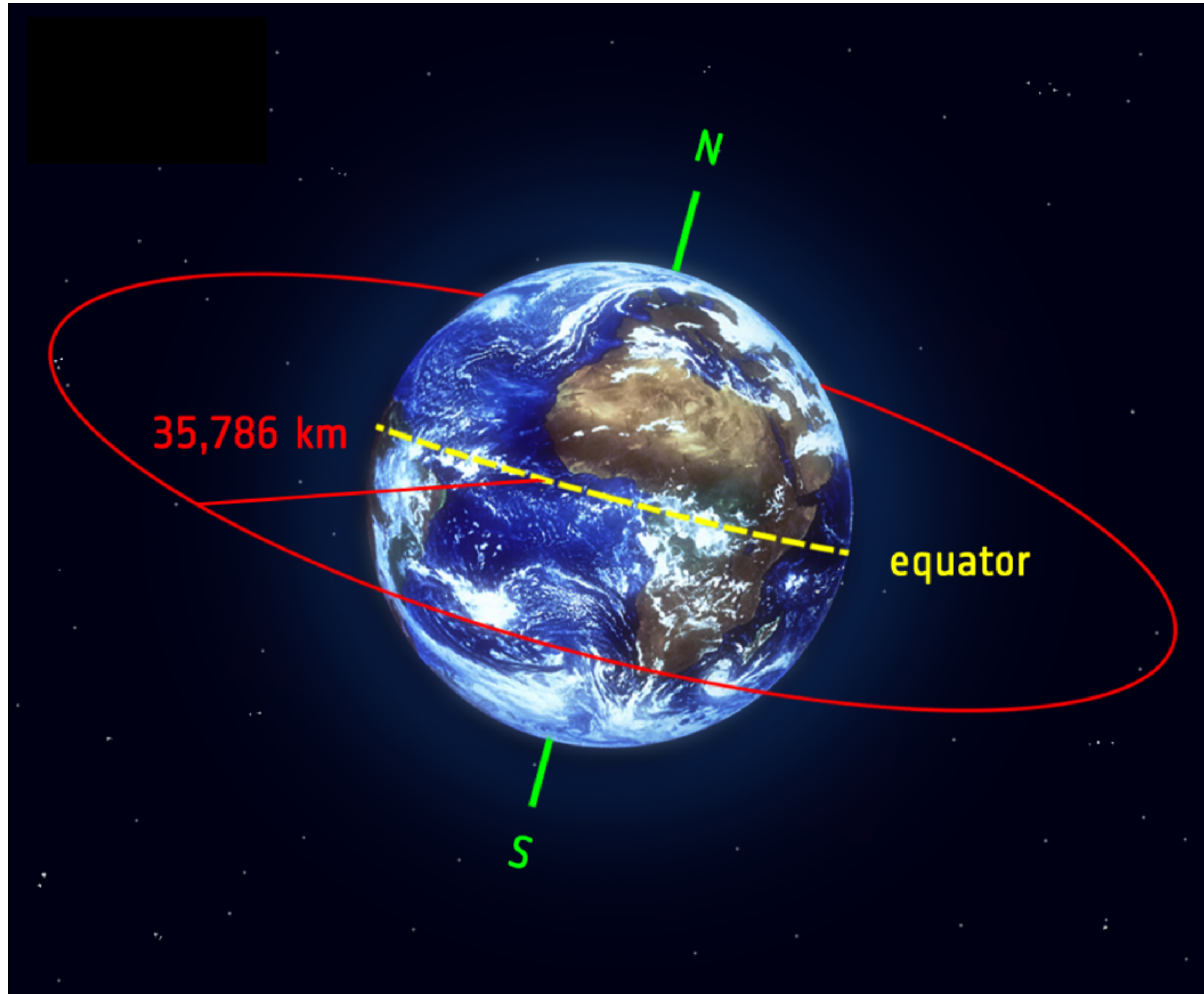
Erdumlaufbahn



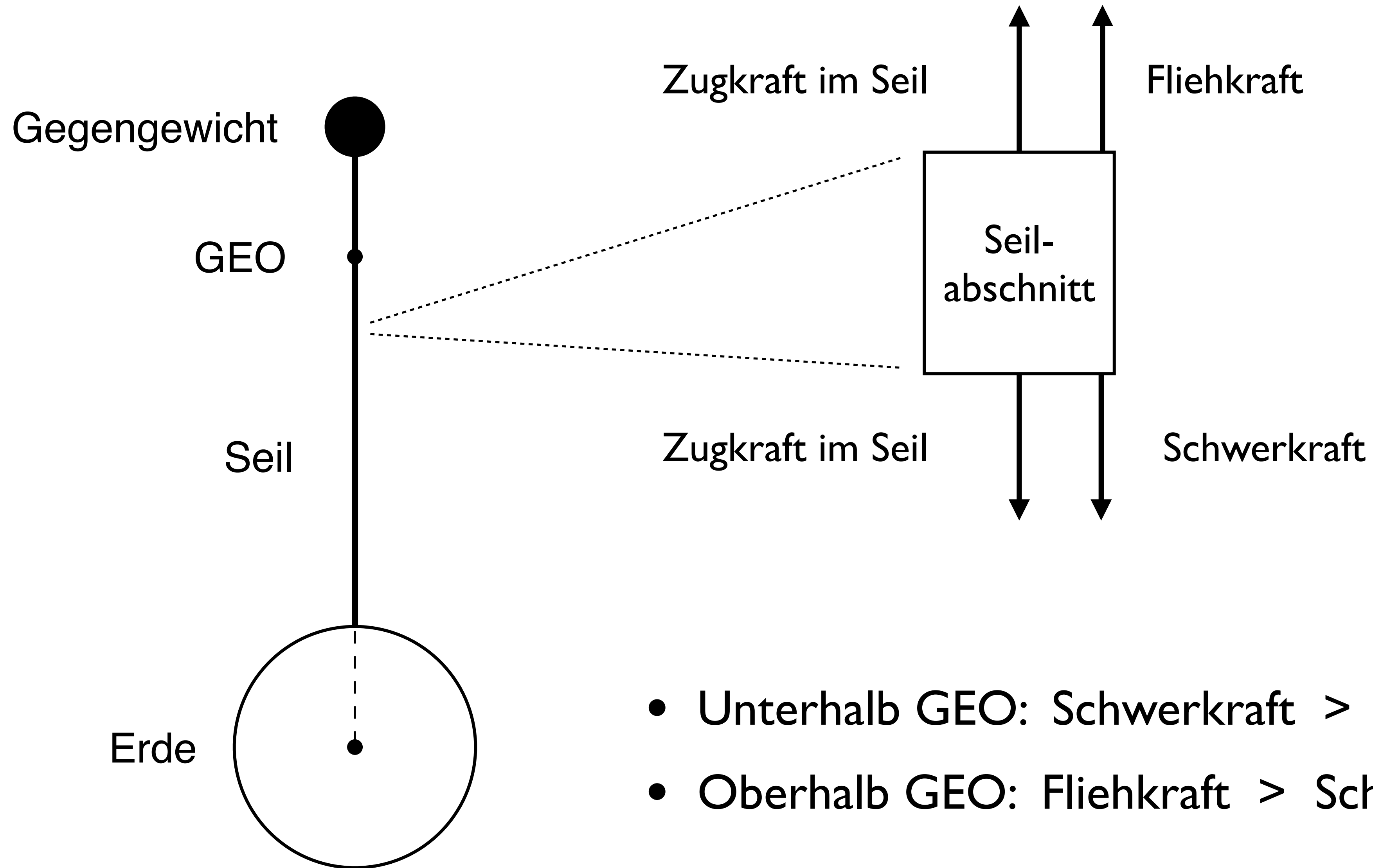
Erdumlaufbahn



Geostationäre Umlaufbahn



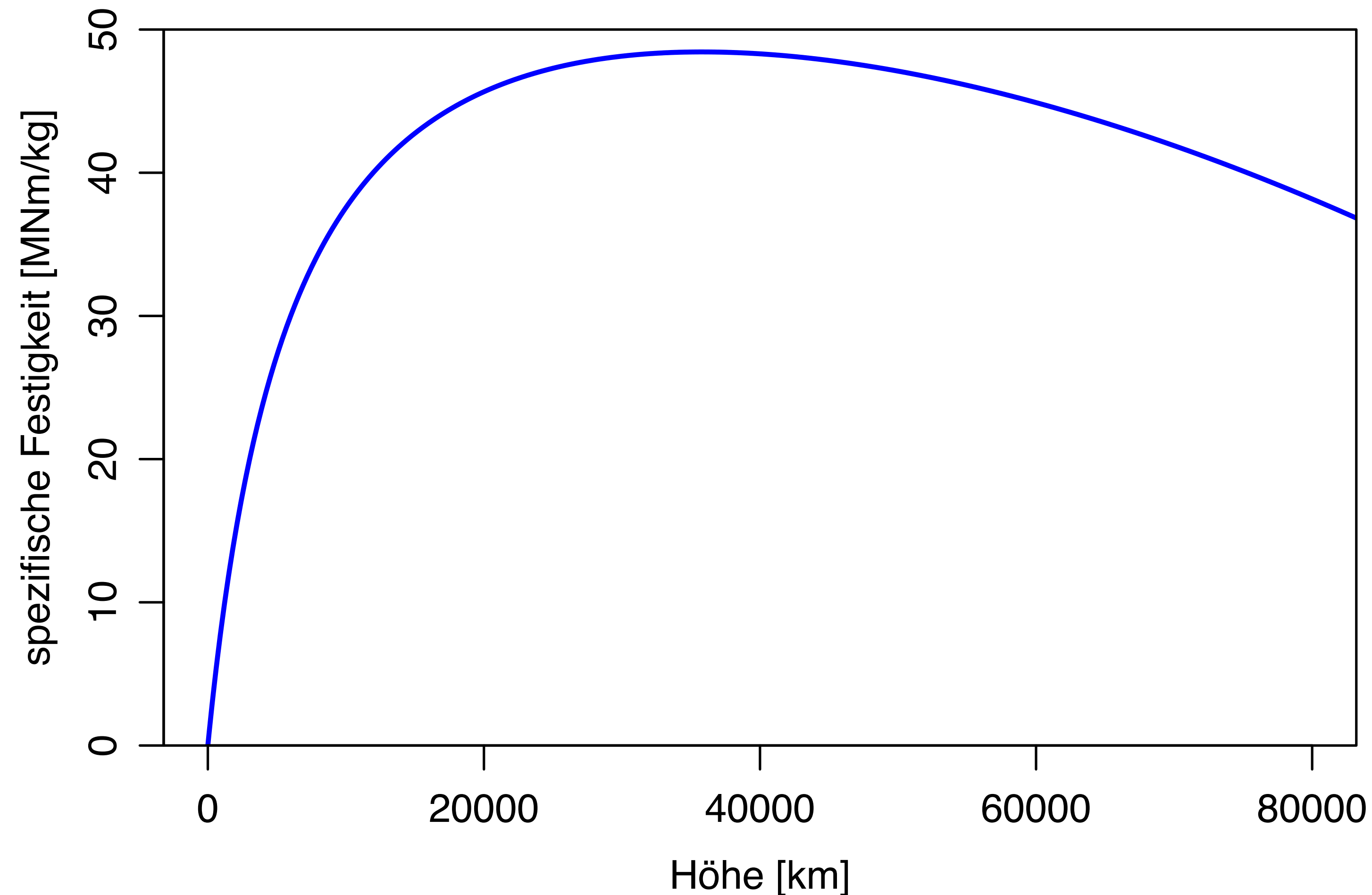
Das Seil



GEO = Höhe der geostationären Umlaufbahn

- Unterhalb GEO: $Schwerkraft > Fliehkraft$
- Oberhalb GEO: $Fliehkraft > Schwerkraft$

Das Seil steht unter (variabler) Spannung



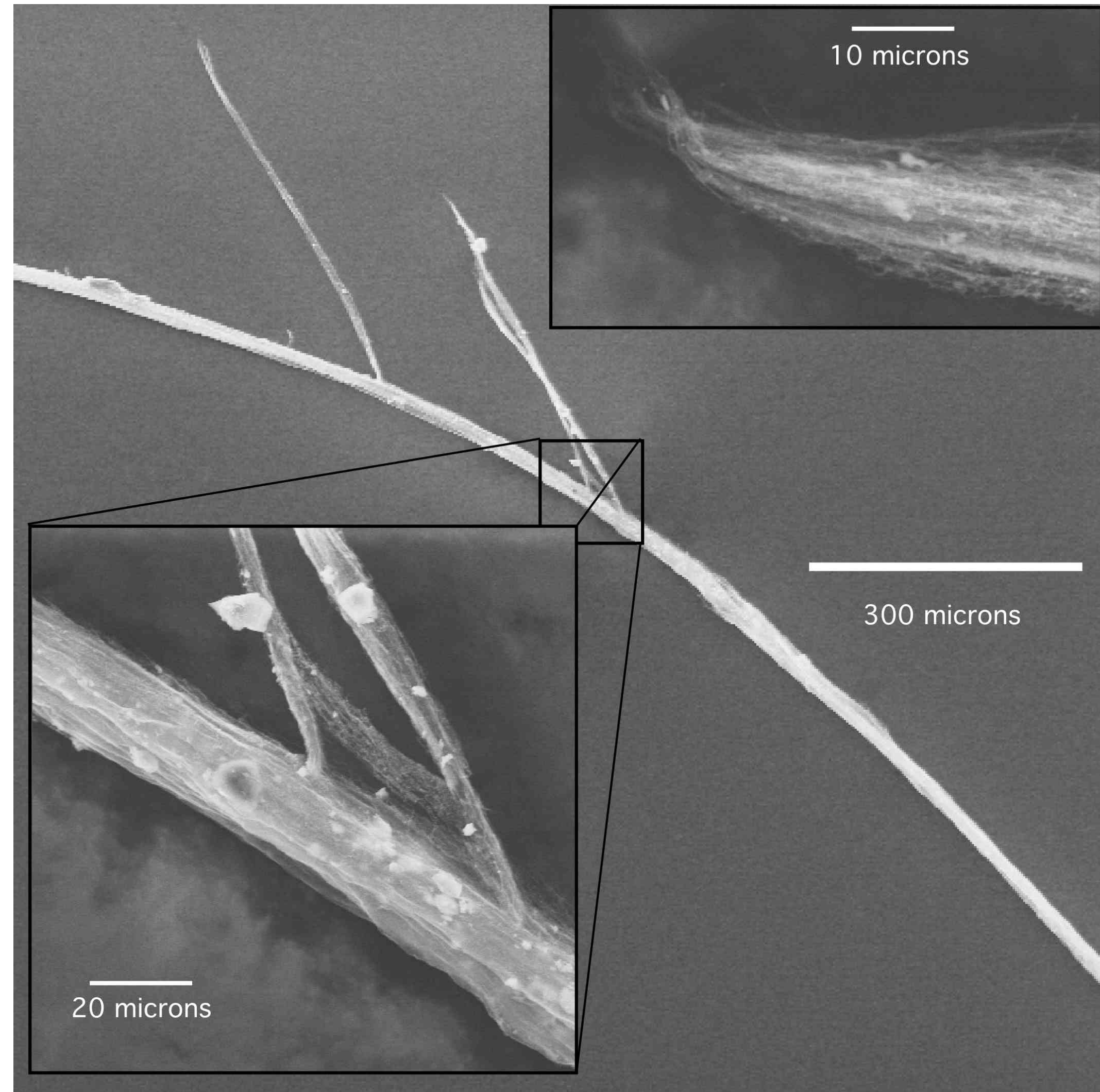
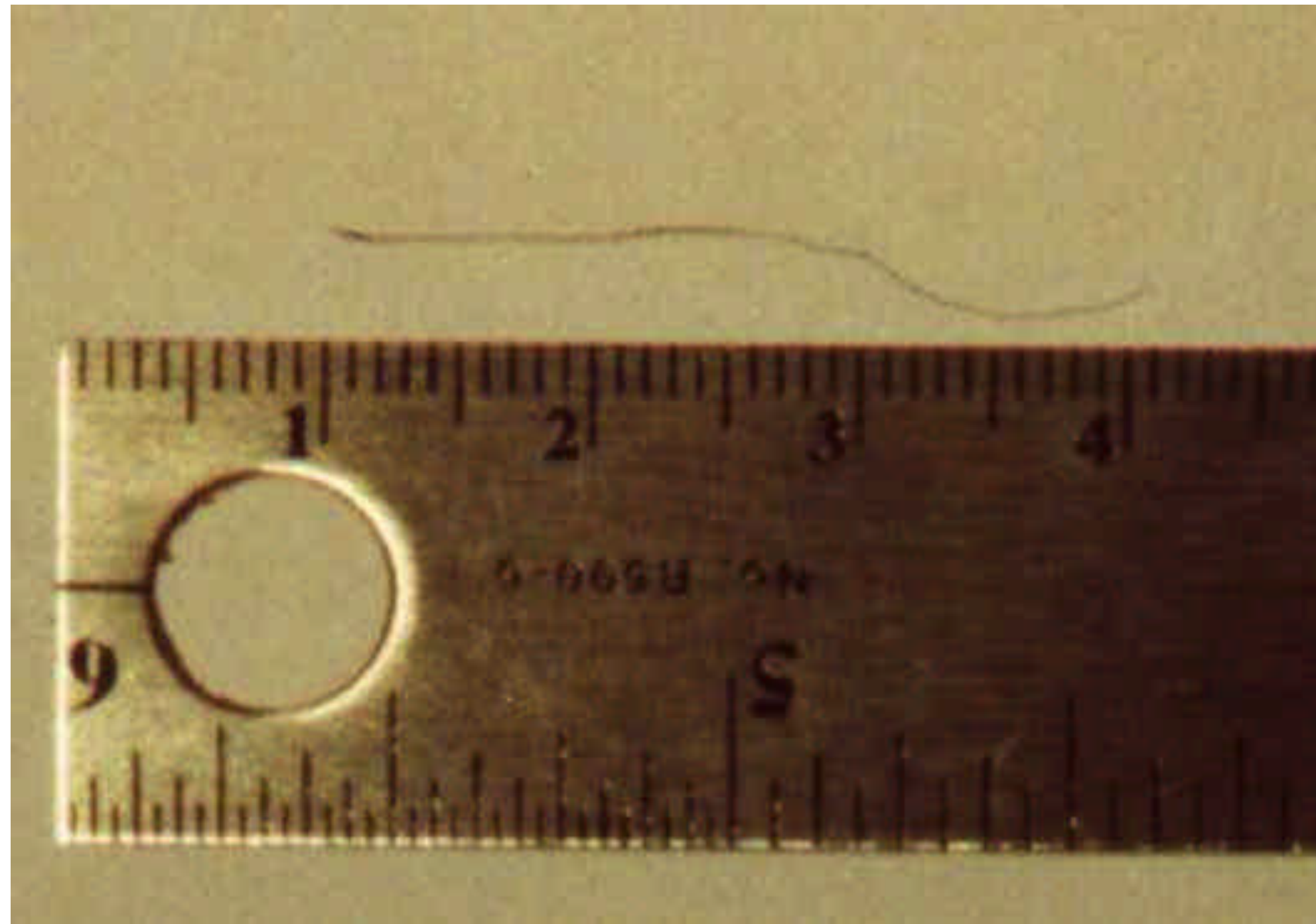
- Das Seil muss stark genug sein, um sein Eigengewicht und die Zentrifugalkraft zu tragen
- Ein dickeres Seil hilft nicht
- Das Material benötigt eine minimale spezifische Reißlast

Welche Materialien können wir verwenden?

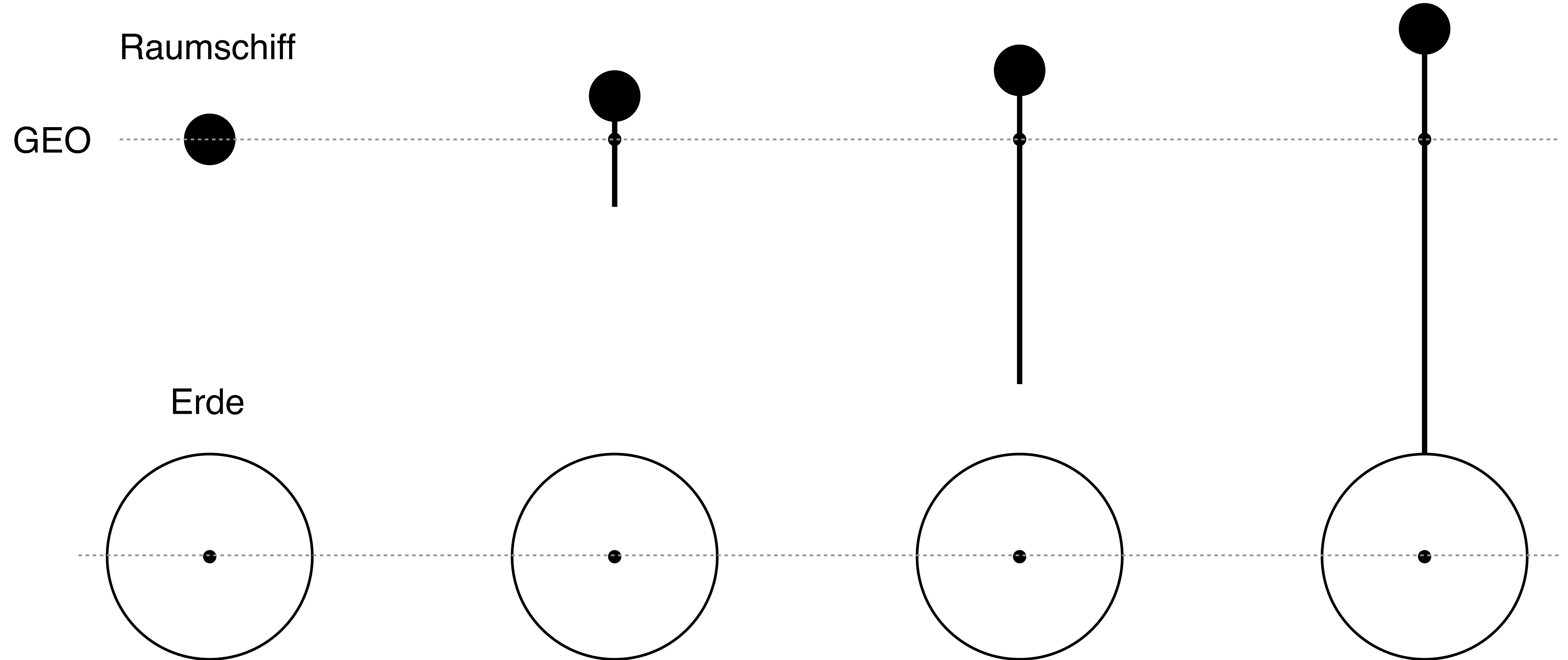
Benötigte spezifische Reißlast $\approx 50 \text{ MNm kg}^{-1}$

	Dichte	Reißlast	spezifische Reißlast
	kg m^{-3}	10^9 Pa	MNm kg^{-1}
Stahl	8000	2.5	0.3
Aramide (Kevlar)	1440	3.6	2.5
Spinnenseide	1300	1.0	0.8
Kohlenstoff-Nanoröhrchen	1300	130	100

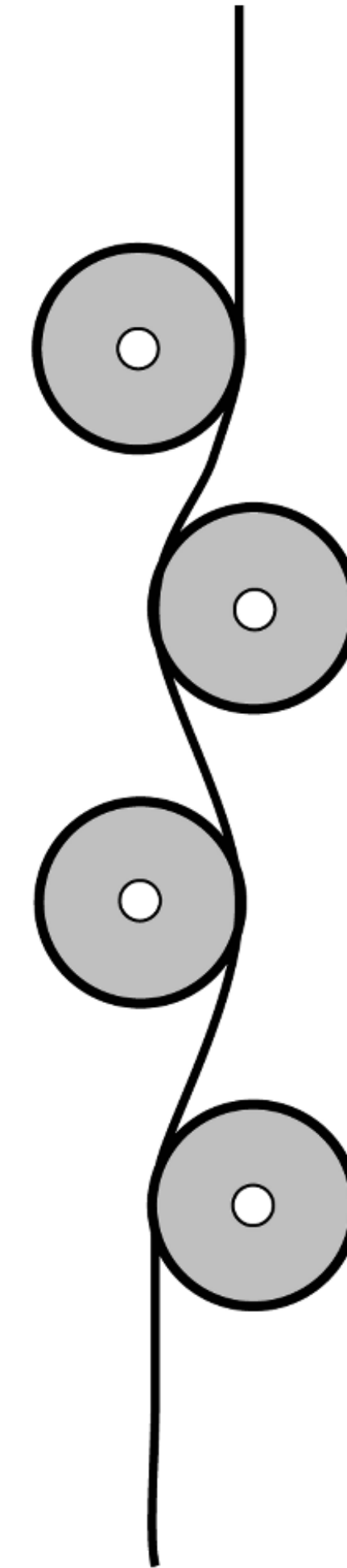
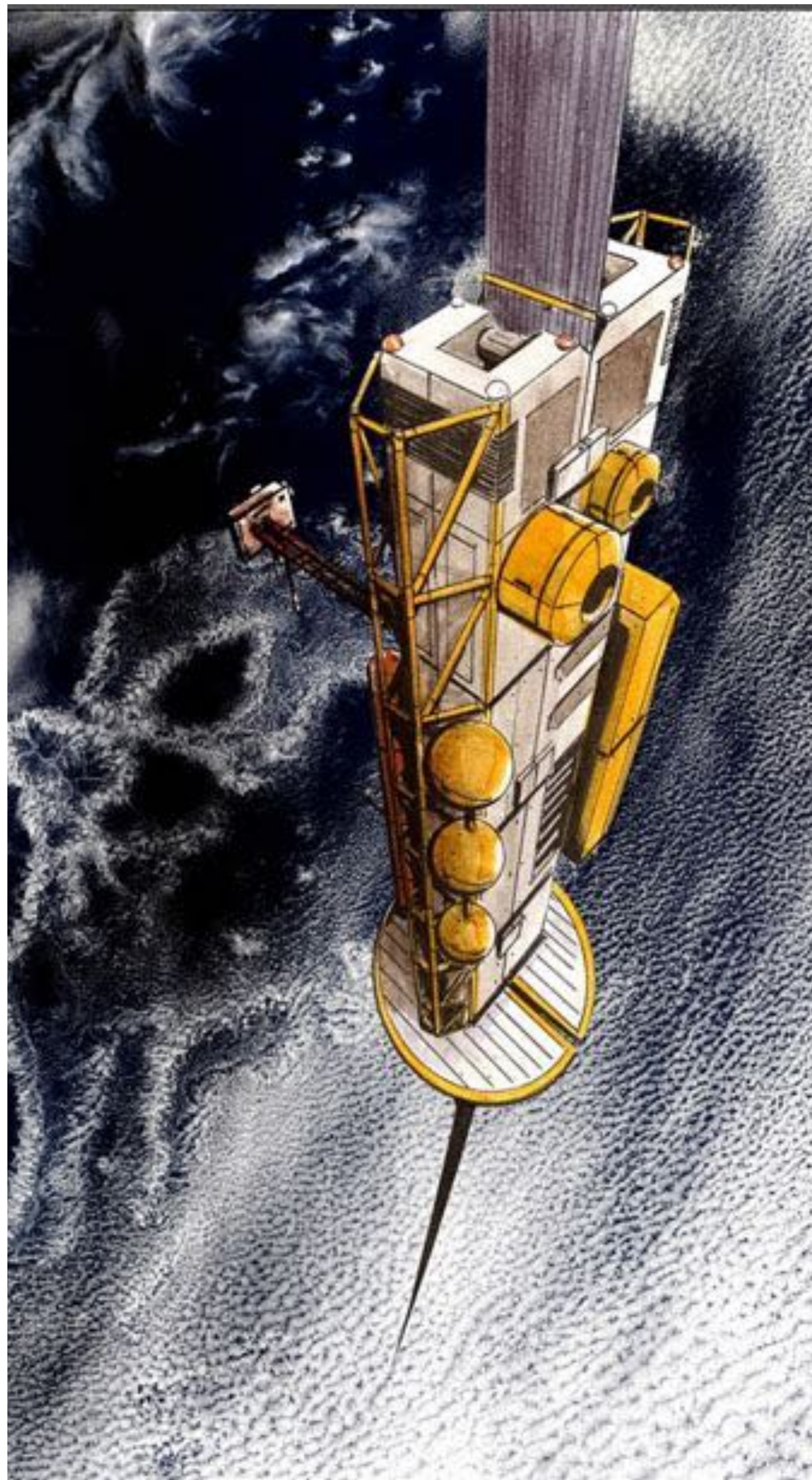
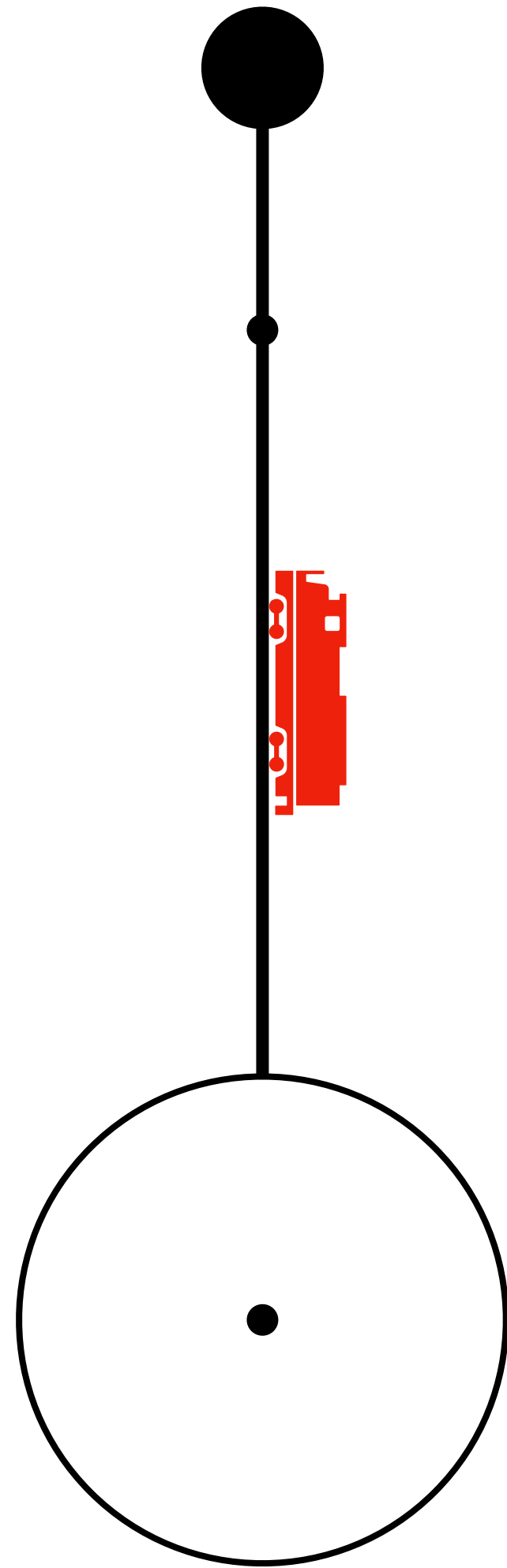
Kohlenstoff-Nanoröhrchen



Seil aufstellen



Der Lift

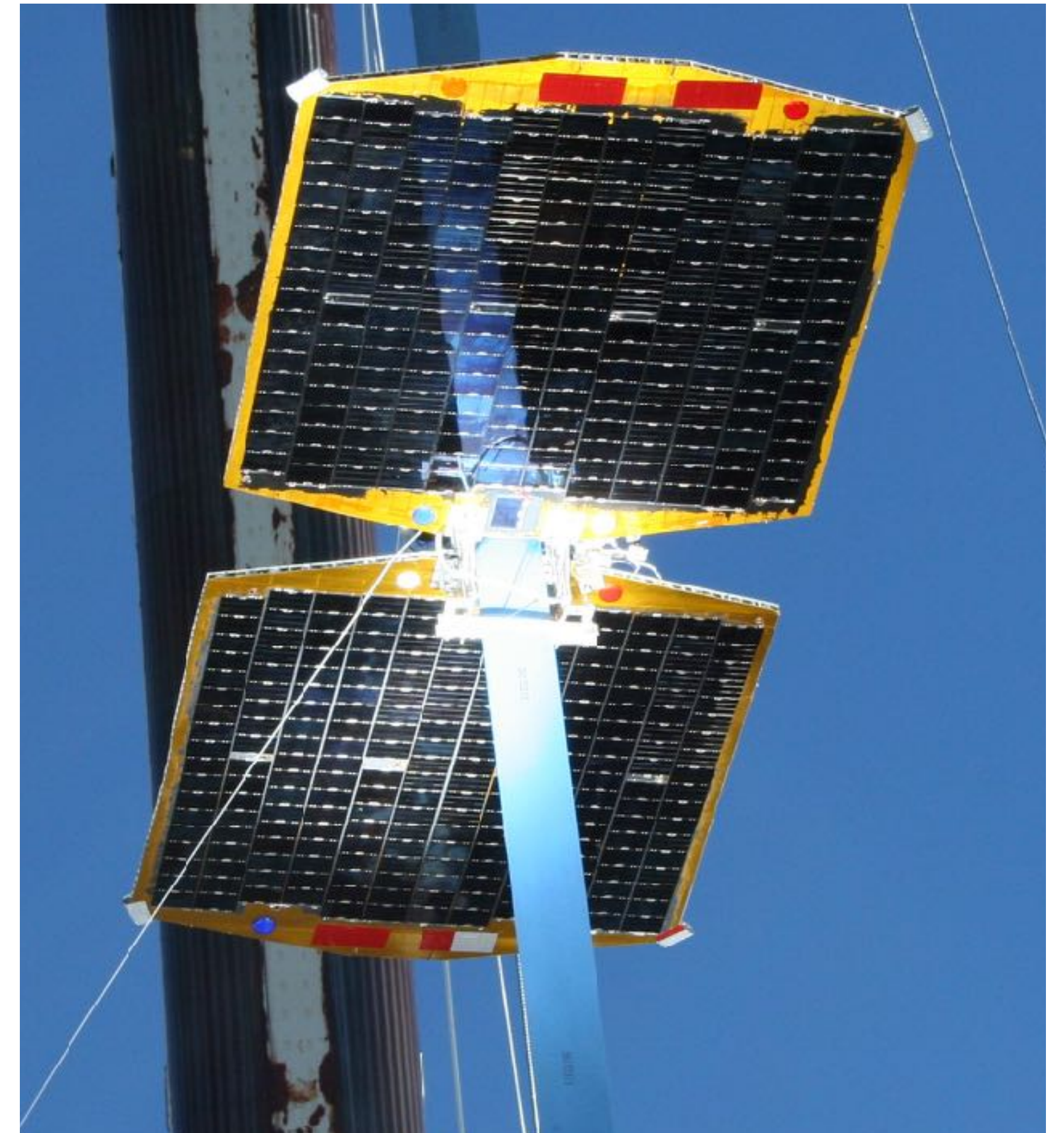
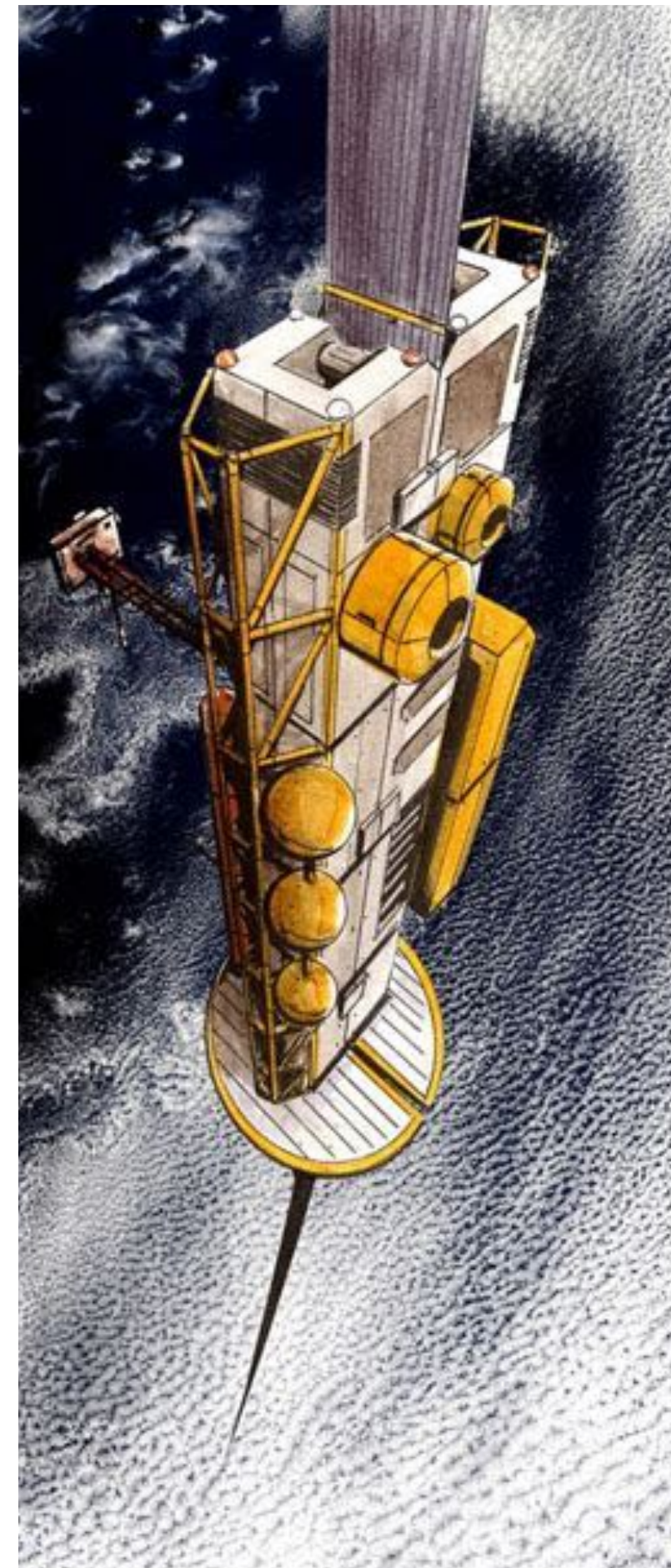


Wie groß ist das Seil?

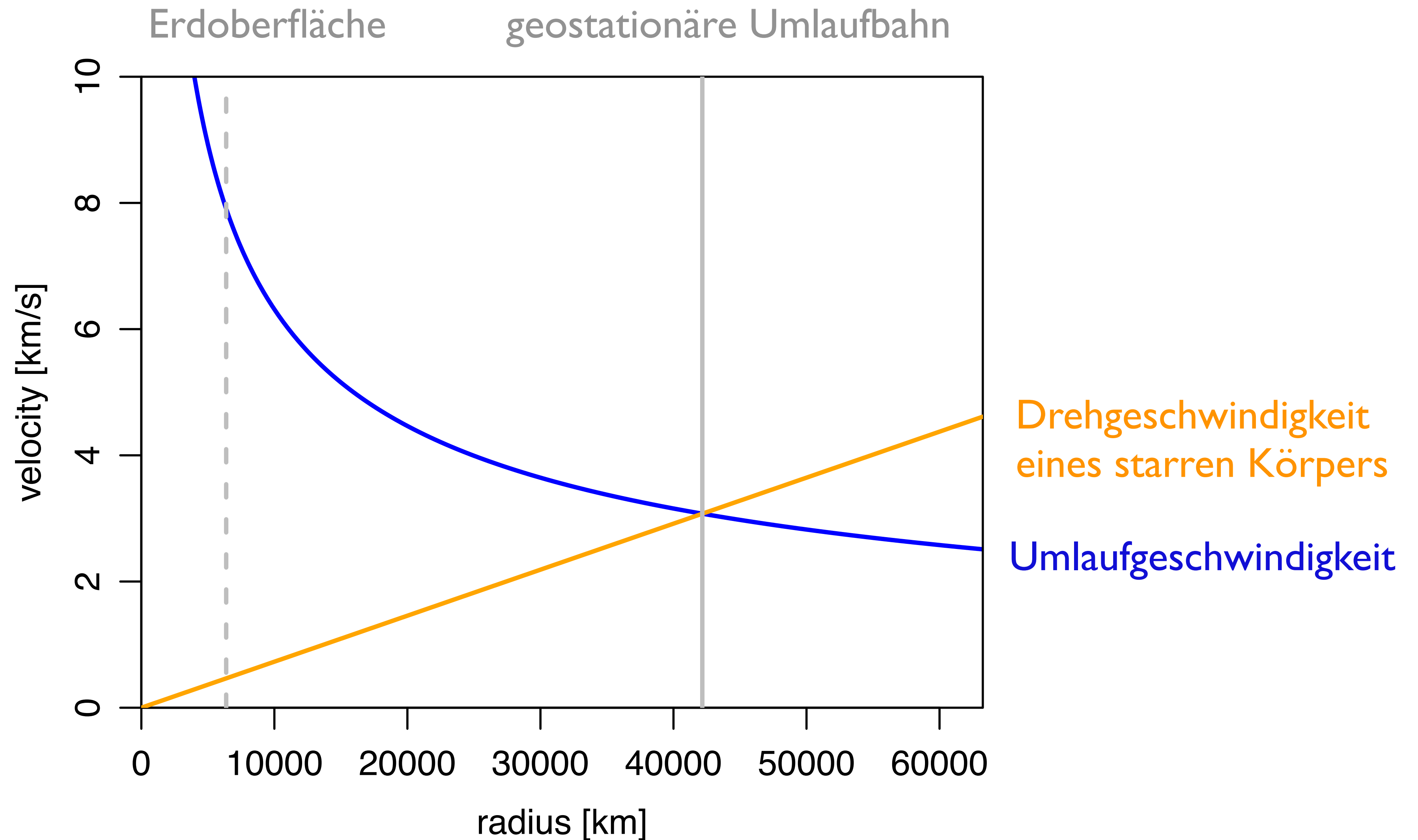
- Theorie: Seil mit konstanter, beliebig kleiner Querschnittsfläche
- Es muss aber auch den Lift tragen
- Praxis: Seil mit variabler Querschnittsfläche
- Für Kohlenstoff-Nanoröhrchen wäre circa $1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ ausreichend für einen Ein-Tonnen-Lift
 - ▶ Länge des Seils: 100 000 km
 - ▶ Masse des Seils: 100 Tonnen
 - ▶ Masse des Gegengewichts: 53 Tonnen

Der Lift

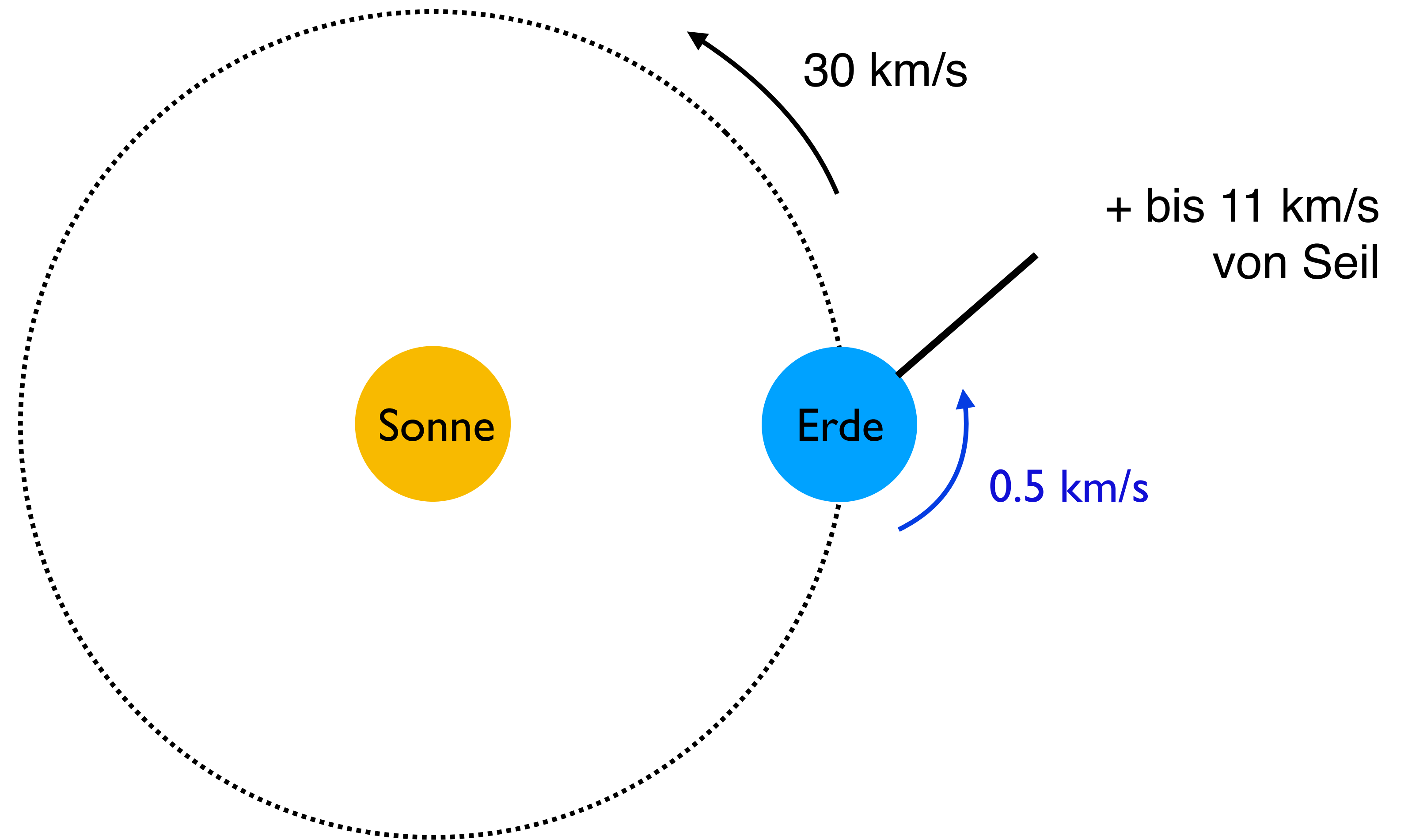
- 36 000 km bis zur geostationären Umlaufbahn
- Bei einer Geschwindigkeit von 100 m/s (360 km/h) benötigt man
 - ▶ 4 Tage Fahrzeit
 - ▶ 1MW Leistung für einen Ein-Tonnen-Lift
- Energiequelle: Elektrisch oder eventuell Laser



Satelliten ins Weltall bringen

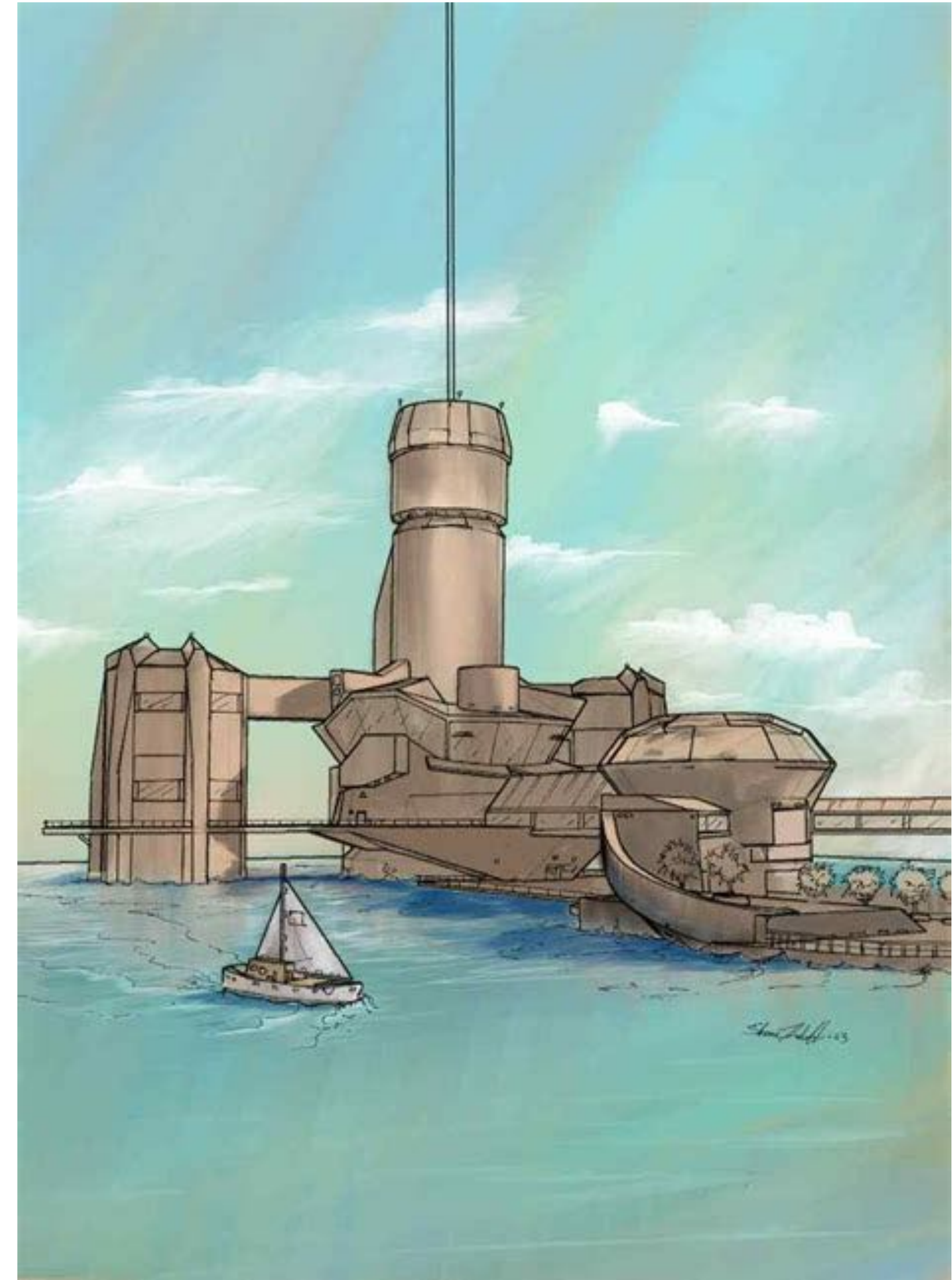


Satelliten ins Weltall bringen



Herausforderungen

- Sehr lange Kohlenstoff-Nanoröhrchen
- Energieversorgung
- Wetter (Wind, Blitzeinschläge)
- Erosion durch atomaren Sauerstoff
- Kollisionen mit Flugzeuge, Satelliten, Weltraumschrott, Meteoriten
- Basisstation sollte beweglich sein
- ...



Zusammenfassung

- Der Weltraumaufzug stellt ein effizienterer Weg ins Weltall als Raketen dar
- Ein sehr dünnes Seil (\sim mm) aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen
 - ▶ schwebt im Gleichgewicht zwischen Schwerkraft und Fliehkraft (kein Turm)
 - ▶ das bis jenseits der geostationären Umlaufbahn (36 000 km) reicht
- Lifts fahren das Seil hoch wie eine Bahn
- Satelliten können vom Seil aus gestartet werden
 - ▶ oder vom Ende des Seils in das Sonnensystem geschleudert werden
- Noch nicht baubar, aber vorstellbar
- Wissenschaftlich und wirtschaftlich sehr interessant
 - ▶ aber sollten wir so viel ins Weltall senden?

Mehr Information (auf Englisch)

- Meine Vorlesung *Physics of Interstellar Travel*
 - ▶ <https://keeper.mpdl.mpg.de/d/6594f221ee3144f68033/>
- Aravind 2007, Am. J. Phys. 75, 125 (link)
- Roman von Arthur C. Clarke

