

**Arbeitsblätter:**

# Die Stromversorgung der ISS

**Markus Nielbock**

22. Januar 2019



**Abbildung 1:** Die ISS im Jahre 2011 (Bild: NASA).

## Einleitung

In dieser Übung wirst du die Aufgabe einer Sicherheitsingenieurin oder eines Sicherheitsingenieurs im Kontrollzentrum der NASA übernehmen und die Versorgung der Internationalen Raumstation (ISS) überwachen und auswerten. Hierzu benutzt du echte Daten aus der Telemetrie der ISS, also ihre technischen Parameter, die ständig zur Erde gesendet werden. Daraus berechnest du die momentane elektrische Leistung, die der ISS zur Verfügung steht. Ohne eine ausreichende Stromversorgung könnten auf der ISS Systeme ausfallen, die für das Überleben und die wissenschaftlichen Experimente wichtig sind. Der elektrische Strom wird über die großen Sonnensegel erzeugt, die sich während des Orbits der ISS um die Erde stets zur Sonne ausrichten.

## Materialien

- Arbeitsblätter
- Stift
- Taschenrechner
- Computer/Tablet/Smartphone mit Internetzugang (optional)

## Dauer

90 Minuten

## Aktivität: Solarstrom auf der ISS

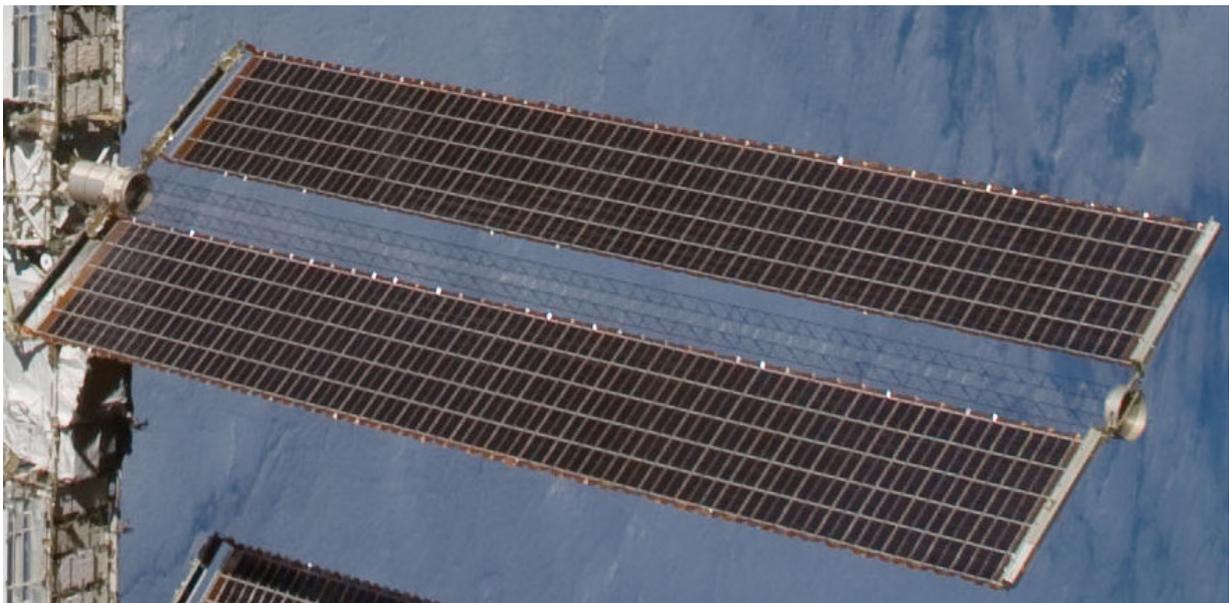
### Aufgaben

Die Aufgabe besteht aus folgenden Teilschritten:

- Berechnung der Kollektorfläche der ISS
- Berechnung der maximal zur Stromerzeugung vorhandenen Strahlungsleistung der Sonne
- Ermittlung von Spannung und Stromstärke, die von den Solarzellen erzeugt werden
- Berechnung der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung
- Beantwortung von Fragen

### 1. Fläche der Solarzellen

Entlang der Gerüststruktur der ISS (Abb. 1) sind 16 Sonnenkollektoren aus jeweils 16400 Solarzellen angebracht. Jeder Kollektor ist ca. 33,9 m lang und etwa 4,7 m breit. Je zwei Kollektoren sind zu einem Flügel verbaut. Sie lassen sich nach dem ständig wechselnden Sonnenstand ausrichten, um so optimal mit Licht versorgt zu werden (Abb. 2). Lies hierzu auch das entsprechende Kapitel auf Seite 11.

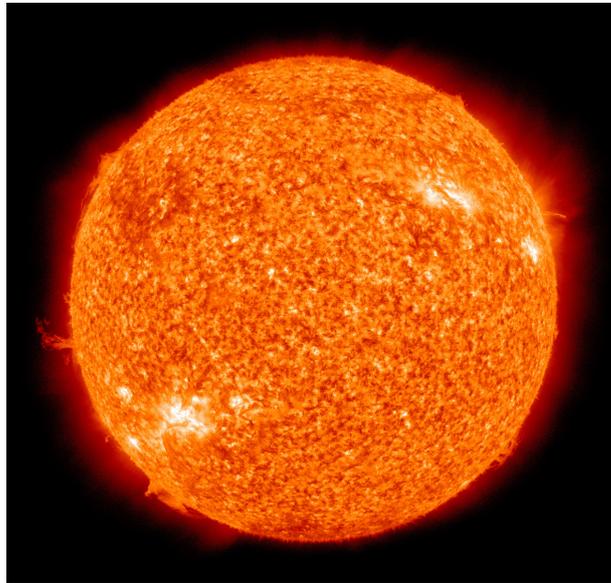


**Abbildung 2:** Die ISS ist mit 16 Sonnenkollektoren ausgestattet, von denen je zwei zu einem zusammenhängenden Modul verbaut sind. Jedes dieser acht Module kann durch Drehen entlang der Längsachse zur Sonne ausgerichtet werden (Bild: NASA).

Aus den Längenangaben im Text oben sollst du nun die Flächen der Sonnenkollektoren ausrechnen. Um diese Aufgabe zu lösen, musst du dich erinnern, wie man den Flächeninhalt eines Rechtecks bestimmt. Berechne die Fläche eines der 16 Sonnenkollektoren und die Gesamtfläche aller Solarmodule.

## 2. Maximale Leistung

Die Sonne gibt permanent Strahlung ab. Diese hat eine Strahlungsleistung  $P$  bzw. eine Leuchtkraft  $L$ , die am Ort der Erde eine Intensität  $\mathcal{I}$  in Höhe der Solarkonstante  $E_0$  erzielt. Intensität ist ein Maß für die auf eine Fläche einfallende Strahlungsleistung. Lies hierzu auch das entsprechende Kapitel auf Seite 10.

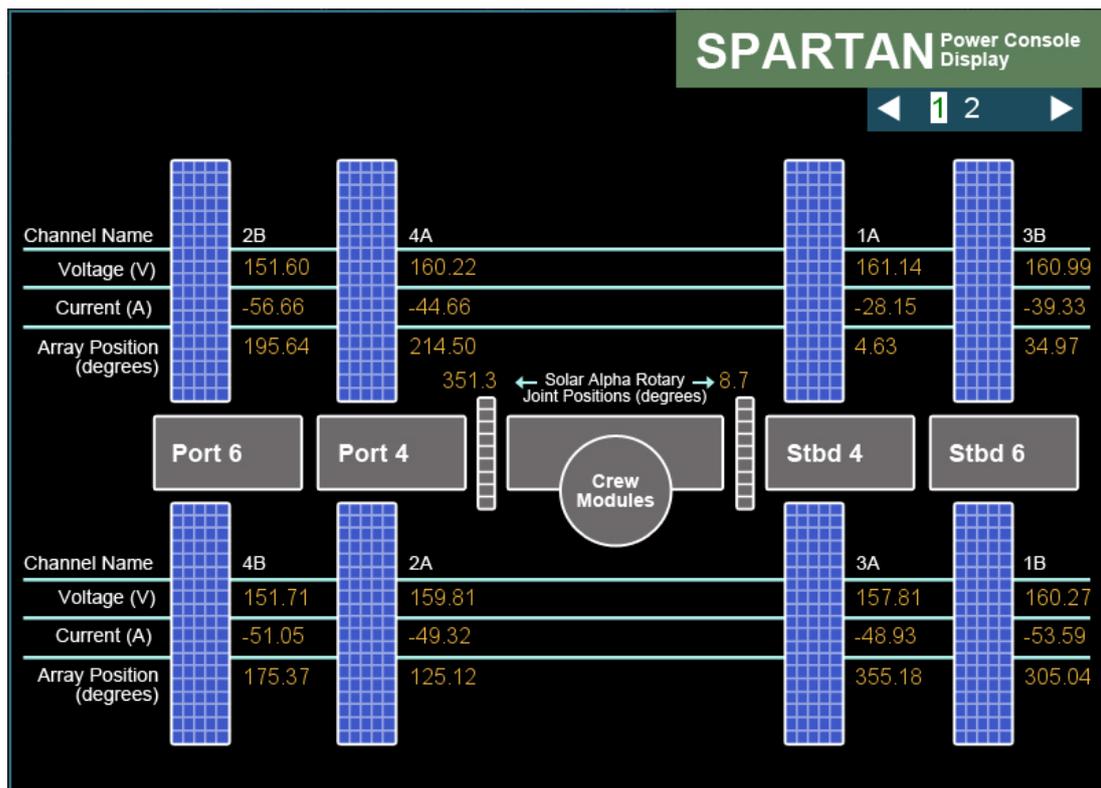


**Abbildung 3:** Eine Aufnahme der Sonne vom Solar Dynamics Observatory, einer Sonde im Weltall, die ständig die Sonne beobachtet (Bild: NASA/SDO (AIA)).

Wie hoch ist die pro Kollektor empfangene Strahlungsleistung, wenn man die Solarkonstante  $E_0$  zugrunde legt? Der Wirkungsgrad  $\eta$  gibt an, welcher Anteil der empfangenen Strahlungsleistung eine Solarzelle in elektrische Leistung umsetzen kann. Berechne unter der Annahme von  $\eta = 0.145$  die maximal erreichbare elektrische Leistung für eines der 16 Sonnenkollektoren. Fall du mehr über die Grundlagen der Elektrizität wissen willst, lies hierzu das Kapitel auf Seite 9.

### 3a. Momentane Leistung (Online-Variante)

Die Stromversorgung durch die Solarzellen auf der ISS wird durch verschiedene Systeme geregelt und überwacht. Das elektrische Bordsystem (EPS, Electrical Power System) regelt die Versorgung. Das SPARTAN (Station Power, Articulation and Thermal Control) ermöglicht die Überwachung der wichtigsten Parameter (Abb. 4). Für jedes Solarmodul bestehend aus je zwei Kollektorflächen wird die aktuell erzeugte Spannung (engl. Voltage) und Stromstärke (engl. Current) dargestellt. Zudem werden die Rotationswinkel der Module zur Ausrichtung auf die Sonne aufgeführt.



**Abbildung 4:** Die SPARTAN-Konsole dient zur Überwachung der elektrischen Versorgung der ISS (Bild: NASA, ISSLIVE).

Die englischsprachige Internetseite <https://isslive.com> enthält verschiedene Informationen rund um die ISS. Als Besonderheit ermöglicht sie einen einfachen Zugriff auf die Telemetrie der ISS und stellt sie in Form von übersichtlichen Konsolen dar. Die Telemetrie ist ein Datenstrom, der die technischen Parameter der ISS enthält. Wir werden für diese Aufgabe die Daten des EPS nutzen, die unter der Rubrik SPARTAN erscheint.

Wähle die Seite mit einem Computer, Tablet oder einem Smartphone an. Du gelangst zur SPARTAN-Konsole (Abb. 4) über die Felder *LiveData* und anschließend *SPARTAN*. Die Konsole zeigt die Lage der acht Solarmodule, die mit je zwei Solarzellenflächen kombiniert sind. Sie sind wie in Tab. 1 bezeichnet. In ähnlicher Weise kontrolliert ein Techniker der NASA im Kontrollzentrum den Zustand des Systems. Schau dir die Werte zur elektrischen Spannung und Stromstärke an und notiere sie in Tab. 1. Berechne dann die elektrische Leistung  $P$  für jedes Modul und die Summe daraus. Trage die Werte in der Tabelle ein. Falls du eine Auffrischung brauchst, wie man eine elektrische Leistung berechnet, lies das entsprechende Kapitel auf Seite 9.

**Tabelle 1:** Tabelle für die Spannungen und Stromstärken der acht Solarmodule.

Modul	$U$ (V)	$I$ (A)	$P$ (W)
1 A			
B			
2 A			
B			
3 A			
B			
4 A			
B			
Gesamt			

### 3b. Momentane Leistung (Offline-Variante)

Die Stromversorgung durch die Solarzellen auf der ISS wird durch verschiedene Systeme geregelt und überwacht. Das elektrische Bordsystem (EPS, Electrical Power System) regelt die Versorgung. Das SPARTAN (Station Power, Articulation and Thermal Control) ermöglicht die Überwachung der wichtigsten Parameter (Abb. 4). Für jedes Solarmodul bestehend aus je zwei Kollektorflächen wird die aktuell erzeugte Spannung (engl. Voltage) und Stromstärke (engl. Current) dargestellt. Zudem werden die Rotationswinkel der Module zur Ausrichtung auf die Sonne aufgeführt. Die acht Module sind wie in Tab. 1 bezeichnet.

In ähnlicher Weise kontrolliert ein Techniker der NASA im Kontrollzentrum den Zustand des Systems. Schau dir die Werte zur elektrischen Spannung und Stromstärke an und notiere Sie in Tab. 1. Berechne dann die elektrische Leistung  $P$  für jedes Modul und die Summe daraus. Trage die Werte in der Tabelle ein. Falls du eine Auffrischung brauchst, wie man eine elektrische Leistung berechnet, lies das entsprechende Kapitel auf Seite 9.

#### 4. Auslastung

Die derzeit maximale elektrische Leistung, die die Solarzellen liefern, beträgt insgesamt 120 kW oder 120 000 W. Berechne die momentane prozentuale Auslastung. Den aktuellen Wert entnimmst du Aufgabe 3.

#### 5. Diskussion

Was könnten die Gründe sein, wenn die Solarzellen nicht unter maximaler Auslastung arbeiten?

Die ISS befindet sich zeitweise im Erdschatten. Dort empfangen die Solarzellen kein Sonnenlicht. Woher bekommt die ISS dann den elektrischen Strom?

## Hintergrund

### Die Internationale Raumstation

Seit 1998 wird die Internationale Raumstation (ISS, Abb. 1) aufgebaut und mittels einzelner Module (Abb. 5) ständig erweitert. Ihr Betrieb ist bis mindestens 2024 vorgesehen, wahrscheinlich aber sogar bis 2028 möglich. Die gesamte Struktur hat eine Masse von 420 t. Sie ist 109 m lang, 73 m breit und 45 m hoch. Auf einer Bahnhöhe von etwa 400 km benötigt die ISS für eine Erdumrundung ungefähr 92 Minuten.

### ISS-Konfiguration

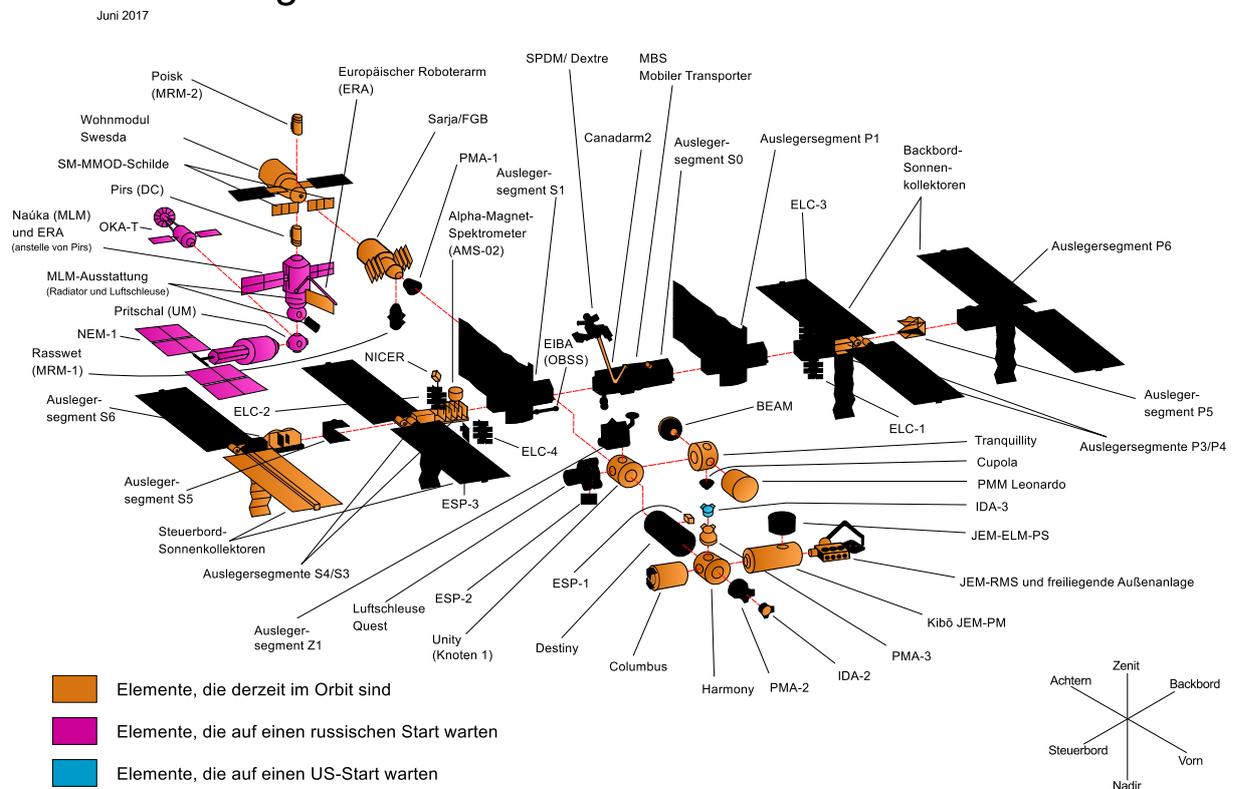


Abbildung 5: Die Module der ISS im Juni 2017 (Bild: NASA).

Die ISS ist ein internationales Projekt mit derzeit 15 beteiligten Nationen. Sie dient als wissenschaftliches Forschungslabor für Fragestellungen, in denen der Einfluss der Gravitation eine wichtige Rolle spielt. Es werden aber auch medizinische Themen der Astronautik behandelt, um langfristige Missionen innerhalb des Sonnensystems vorzubereiten.

In Abb. 5 erkennt man neben den verschiedenen Modulen auch die Sonnenkollektoren, die die ISS mit Strom versorgen. Diese Übung befasst sich mit der Stromversorgung der ISS. Daher werden nachfolgend einige Grundlagen der Elektrizität erläutert, die bei der Lösung der Aufgaben hilfreich sind.

## Grundbegriffe der Elektrizität

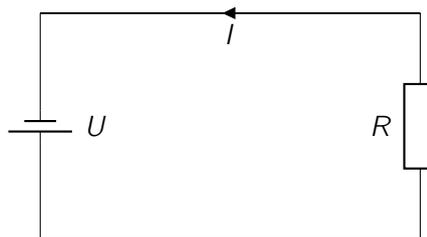
Der Elektromagnetismus ist eine der vier Grundkräfte der Physik. Er setzt sich aus der Elektrizität und dem Magnetismus zusammen. Der Grundbaustein der Elektrizität ist die elektrische Ladung, die entweder positiv oder negativ sein kann. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Unterschiedliche Ladungen ziehen sich an. Die Ladung eines Elektrons  $e$  wird hierbei als Elementarladung angesehen. Sie ist eine Naturkonstante. Ihre Einheit ist das Coulomb C, benannt nach dem französischen Physiker Charles Augustin de Coulomb.

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Das Formelzeichen für die Ladung ist  $Q$ . Pole mit unterschiedlichen Ladungen, haben das Bestreben, ein Gleichgewicht herzustellen, indem sie Ladungen austauschen. Wenn ein elektrischer Strom fließt, wandern Ladungsträger von einem Pol zum anderen. Das Vermögen, durch den Austausch von Ladungen elektrischen Strom aufrecht zu erhalten, nennt man die elektrische Spannung  $U$ . So sind in einer Batterie Ladungsträger getrennt angeordnet, so dass sie eine Spannung erzeugen. Innerhalb der Batterie kann kein Ausgleich stattfinden. Verbindet man die beiden externen elektrischen Pole mit einem elektrischen Leiter, bewegen sich die Ladungen. Es fließt ein Strom. Der elektrische Strom kann wegen der Bewegung der Ladungsträger somit als zeitliche Veränderung der Ladung interpretiert werden. Man bezeichnet diese Variation als Stromstärke, die mit  $I$  bezeichnet wird. Die Stärke eines Stroms hängt davon ab, wie viele Ladungsträger transportiert werden und wie schnell sie wandern. Die Einheit ist das Ampere A. Fließen Ladungen von 1 Coulomb pro Sekunde durch den Stromleiter, entspricht das einer Stromstärke von 1 Ampere, benannt nach dem französischen Physiker André-Marie Ampère.

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Schaltet man einen Verbraucher dazwischen, z. B. eine Lampe oder einen Motor, verrichtet der elektrische Strom Arbeit. Dabei entnimmt jeder Verbraucher dem elektrischen Strom Energie. Das wirkt sich wie ein Widerstand  $R$  aus, der bei gegebener Spannung  $U$  die Stromstärke  $I$  beeinflusst.



$$U = R \cdot I$$

Der Widerstand ist dabei eine Eigenschaft des Verbrauchers und hat die Einheit Ohm ( $\Omega$ ), benannt nach dem deutschen Physiker Georg Simon Ohm. Bei einer Glühlampe hängt der Widerstand vom Material sowie der Länge und der Dicke des Drahts ab. Die Einheit der Spannung ist das Volt V, benannt nach dem italienischen Physiker Alessandro Volta. Die dabei verrichtete Arbeit entspricht einer elektrischen Leistung  $P$ , die von der am Verbraucher anliegenden Spannung als auch von der Stromstärke abhängt. Ihre Einheit ist wie überall in der Physik das Watt (W), benannt nach dem schottischen Wissenschaftler und Ingenieur James Watt.

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Somit erzeugt ein Motor, der bei einer Spannung von 1 V eine Stromstärke von 1 A erfährt, eine elektrische Leistung von 1 W.

## Leuchtkraft der Sonne und die Solarkonstante

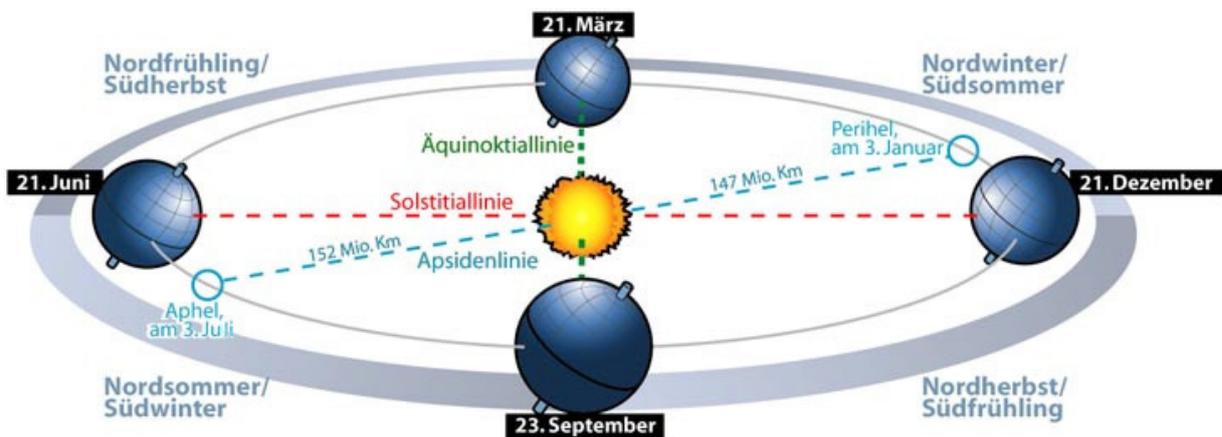
Die Sonne ist wie alle Sterne ein heißer Gasball (Abb. 3). An ihrer Oberfläche beträgt die Temperatur 5778 K bzw. 6051 °C. Dabei gibt sie ständig Strahlung mit einer bestimmten Leistung ab, also Energie pro Zeiteinheit. Bei Sternen nennt man diese Größe *Leuchtkraft*  $L$ . Die Einheit ist wie bei der üblichen Leistung das Watt.

$$L_{\odot} = 3,845 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Gegenüber den hellsten Sternen im Universum ist das aber relativ wenig. Wir können uns mal genauer ansehen, was diese Leuchtkraft bezogen auf die Oberfläche der Sonne bedeutet. Ihr Radius beträgt  $R_{\odot} = 695\,508 \text{ km}$ . Die Strahlungsleistung pro Flächenelement wird als Intensität  $\mathcal{I}$  bezeichnet. Die Oberfläche der Sonne kann über die Formel für die Kugeloberfläche  $O = 4 \cdot \pi \cdot r^2$  berechnet werden.

$$\mathcal{I}_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{O_{\odot}} = \frac{L_{\odot}}{4 \cdot \pi \cdot R_{\odot}^2}$$

Umgerechnet sind dies 6300 W/cm<sup>2</sup>. Die Gleichung zeigt auch, dass die gemessene Intensität vom Radius der betrachteten Kugel abhängt. Da für diese Übungseinheit wichtig ist, wie groß die Intensität am Ort der Erde ist, müssen wir eine Kugel betrachten, deren Radius dem Abstand der Erde von der Sonne entspricht. Dieser beträgt im Mittel  $1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}$ .



**Abbildung 6:** Darstellung der Bahn der Erde um die Sonne (Bild: Horst Frank ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jahreszeiten99\\_DE2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jahreszeiten99_DE2.jpg)), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>).

Für die Intensität am Ort der Erde findet man dann:

$$\mathcal{I}_{\text{Erde}} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Dies ist die sogenannte Solarkonstante ( $E_0$ ). Sie gilt streng nur für den mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde. Wegen der leicht exzentrischen Erdbahn (Abb. 6) variiert der tatsächliche Wert der Intensität der Sonne im Laufe eines Jahres zwischen 1325 und 1420 W/m<sup>2</sup>.

## Stromversorgung auf der ISS

Die Stromversorgung der ISS wird durch Solarenergie über Sonnensegel gewährleistet. Die Solarzellen wandeln die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie um. Entlang der Gerüststruktur der ISS sind 16 Sonnenkollektoren aus jeweils 16 400 Solarzellen angebracht. Jeder Kollektor ist ca. 33,9 m lang und etwa 4,7 m breit. Je zwei Kollektoren sind zu einem Flügel verbaut, die entsprechend dem aktuellen Sonnenstand ausgerichtet werden (Abb. 7).



**Abbildung 7:** Foto der ISS aus dem Jahr 2009. Man erkennt die Solarmodule, die jeweils aus zwei einzelnen Kollektorflächen bestehen. Die Module drehen sich um ihre Längsachse um sich nach dem Sonnenstand auszurichten (Bild: NASA).

Die Solarkonstante gibt an, wie viel Strahlungsleistung auf die Solarzellen fällt und maximal für die Stromerzeugung zur Verfügung steht. Allerdings ist keine Solarzelle in der Lage, die auftreffende Strahlung vollständig in eine elektrische Leistung umzusetzen. Die Verluste sind teilweise erheblich. Das liegt auch daran, dass nur ein kleiner Teil des Lichtspektrums verwertet werden kann. Der Wirkungsgrad  $\eta$  gibt an, welcher Prozentsatz der eintreffenden Strahlungsleistung tatsächlich in Elektrizität umgewandelt werden kann. Für die Kollektoren der ISS gilt ein Wert von 14,5%. Weitere Werte sind in Tab. 2 aufgeführt.

**Tabelle 2:** Wirkungsgrade verschiedener Typen von Solarzellen.

Zellmaterial	Maximaler Wirkungsgrad im Labor	Maximaler Wirkungsgrad (Serienproduktion)	Typischer Modulwirkungsgrad
Monokristallines Silizium	25,0%	22,9%	16%
Polykristallines Silizium	20,4%	17,8%	15%
Amorphes Silizium	12,5%	7,6%	6%
CIS/CIGS <sup>a</sup>	20,4%	15,1%	12%
CdTe	18,7%	12,8%	11%
Konzentratorzelle	43,6 – 44,7%	40,0%	30%

<sup>a</sup> Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid bzw. Kupfer-Indium-Disulfid.

Während ihres Orbits um die Erde befindet sich die ISS zeitweise im Erdschatten. Dann empfangen die Solarzellen kein Sonnenlicht, um daraus elektrischen Strom zu produzieren. Stattdessen liefern Batterien die notwendige Versorgung mit Elektrizität. Sie werden durch die Solarmodule geladen, während die ISS von der Sonne beleuchtet wird.

Diese Unterrichtsmaterialien sind im Rahmen des Projekts *Raum für Bildung* am Haus der Astronomie in Heidelberg entstanden. Weitere Materialien des Projekts finden Sie unter:

<http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung> und <http://www.dlr.de/next>

Das Projekt findet in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt statt und wird von der Joachim Herz Stiftung gefördert.