

## Unterwegs mit der Raumsonde Psyche

In Bezug auf den Beitrag „Raumsonde Psyche richtet Datenlaser auf die Erde“ in der Zeitschrift »Sterne und Weltraum« 11/2024, Rubrik: Nachrichten, S. 13, WIS-ID: 1571258, Zielgruppe: Mittelstufe – Oberstufe

Talha Coktasar

Raumsonden ermöglichen die Erforschung weit entfernter Objekte wie etwa des Asteroiden Psyche. In diesem WIS-Beitrag begleiten die Schülerinnen und Schüler die gleichnamige Sonde auf ihrer Reise zum Asteroiden und erarbeiten an verschiedenen Stationen grundlegende Kenntnisse zu den technischen Bestandteilen der Sonde und zur Mission selbst. Zur Vertiefung des SuW-Artikels, ist ein praktischer Teil zur Kommunikationstechnik vorgesehen, bei dem mithilfe von Mikrocontrollern eine vereinfachte optische Datenübertragung realisiert wird.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
<b>Astronomie</b>	<b>Raumfahrt, Kleinkörper</b>	<a href="#">Raumsonde</a> , <a href="#">Swing-by-Manöver</a> , <a href="#">Asteroid</a>
<b>Physik</b>	<b>Optik, Wellenoptik, Elektromagnetismus</b>	<a href="#">Wellennatur des Lichts</a> , <a href="#">Radiowellen</a> , <a href="#">Laser</a> , <a href="#">Elektromagnetisches Spektrum</a> , <a href="#">Hall-Effekt</a> , <a href="#">Elektrische Felder</a> , <a href="#">Magnetische Felder</a>
<b>Fächer- verknüpfung</b>	<b>Astro-Informatik Astro-Technik</b>	<a href="#">Mikrocontroller (Arduino)</a> , <a href="#">Programmieren</a> , <a href="#">Datenübertragung</a> , <a href="#">Kommunikationstechnik</a> , <a href="#">Elektrotechnik</a>
<b>Lehre allgemein</b>	<b>Kompetenzen Unterrichtsmittel Lehr-/Sozialformen</b>	<a href="#">Überblick zur Mission Psyche</a> , <a href="#">Vermittlung von Grundzügen der interplanetaren Kommunikation</a> , <a href="#">Verständnis aktueller Antriebskonzepte interplanetarer Raumsonden</a> <a href="#">Arbeitsblätter</a> , <a href="#">Aufgaben</a> , <a href="#">Bilder</a> , <a href="#">Lesetexte</a> , <a href="#">Programmiercodes</a> <a href="#">Stationenarbeit</a> , <a href="#">Projektarbeit</a>

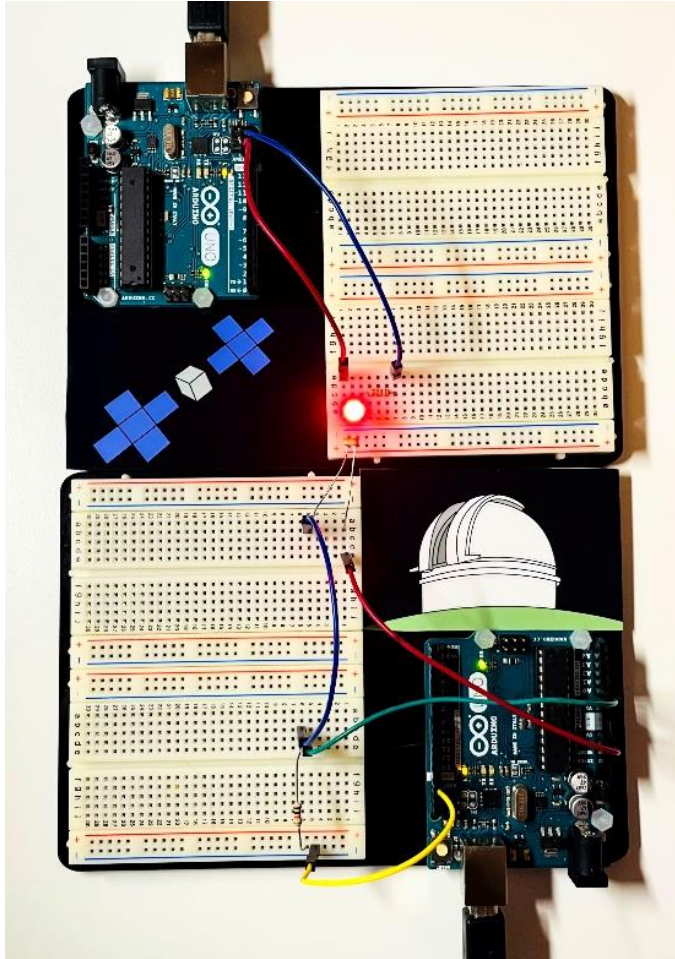


Abbildung 1:  
Arduino-Projekt zur Raumsonde Psyche.  
© Talha Coktasar.

## Überblick

Die NASA-Mission „Psyche“ zielt darauf ab, den gleichnamigen Asteroiden „16 Psyche“ zu untersuchen. Dieser ungewöhnliche, metallreiche Himmelskörper, der sich im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter befindet, soll zum großen Teil aus massivem Metall bestehen. Entdeckt wurde der Asteroid bereits 1852 durch den italienischen Astronomen Annibale de Gasparis. Durch das Studium von 16 Psyche erhoffen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mehr über die Bildung planetarer Kerne zu erfahren, da dieser ein Überbleibsel eines solchen Kerns sein könnte.

Die gleichnamige, unbemannte Raumsonde Psyche, die 16 Psyche umfassend untersuchen soll, wurde am 13.10.2023 von einer Falcon-Heavy-Rakete gestartet. Die Reise zum Asteroiden soll etwa 6 Jahre dauern, sodass sie im August 2029 nach 2,4 Milliarden Kilometern ihr Ziel erreichen soll. Unterwegs wird die Sonde im Mai 2026 ein Swing-by-Manöver am Mars vollziehen, um ihre Flugbahn anzupassen und dabei Treibstoff zu sparen. Nach der Ankunft wird Psyche den Asteroiden für insgesamt 26 Monate in vier verschiedenen Orbithöhen umkreisen, um die Oberflächenstruktur, die metallische Zusammensetzung oder auch ein mögliches Magnetfeld gründlich zu erforschen (vgl. Abb. 2).

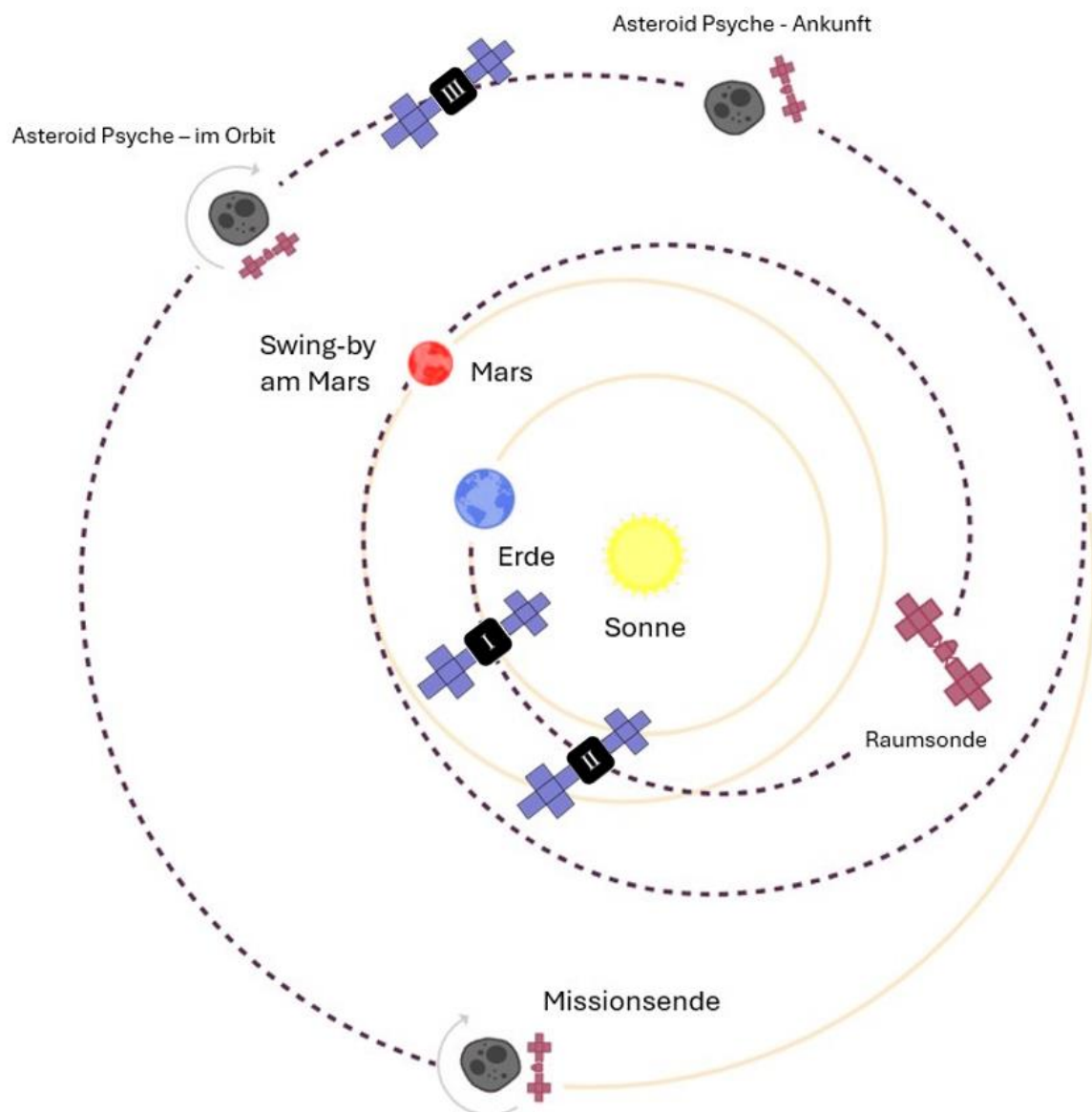


Abbildung 2: Psyches Missionsübersicht. © NASA / JPL (bearbeitet).

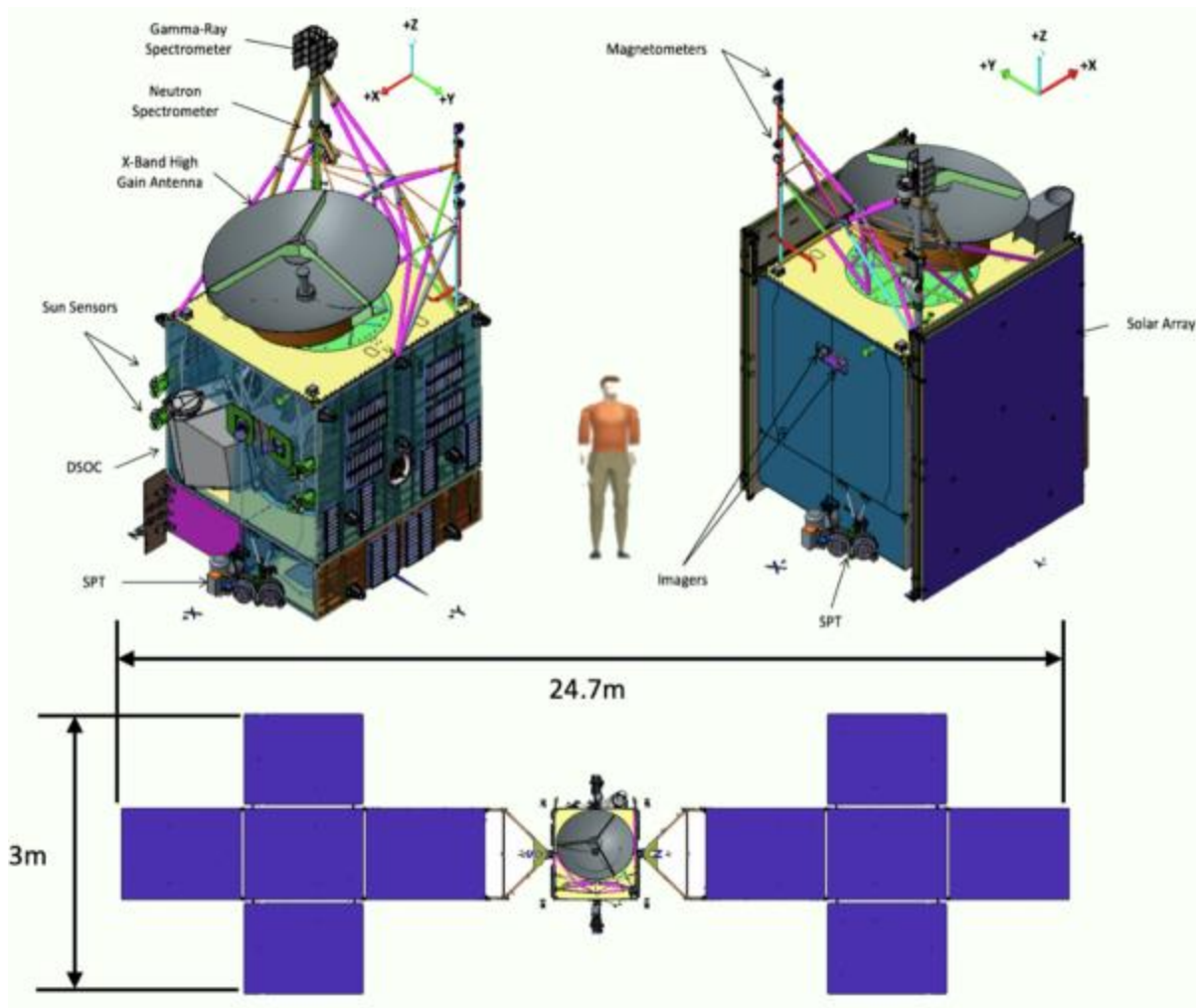


Abbildung 3: Konfiguration der Raumsonde (Stand 2019). © David Oh.

Zu diesem Vorhaben wurde die Raumsonde mit mehreren Instrumenten ausgestattet (vgl. Abb. 3).

### **Multispektrale Kamera:**

Diese Kamera hat die Aufgabe, detaillierte Bilder des Asteroiden zu machen und seine Oberfläche zu kartografieren (vgl. Abb. 4). Sie nimmt Bilder in verschiedenen Wellenlängenbereichen auf und kann so die Zusammensetzung der Oberfläche feststellen. Das Instrument besteht eigentlich aus einem Paar identischer Kameras, wobei die zweite Kamera die optische Navigation unterstützen soll.

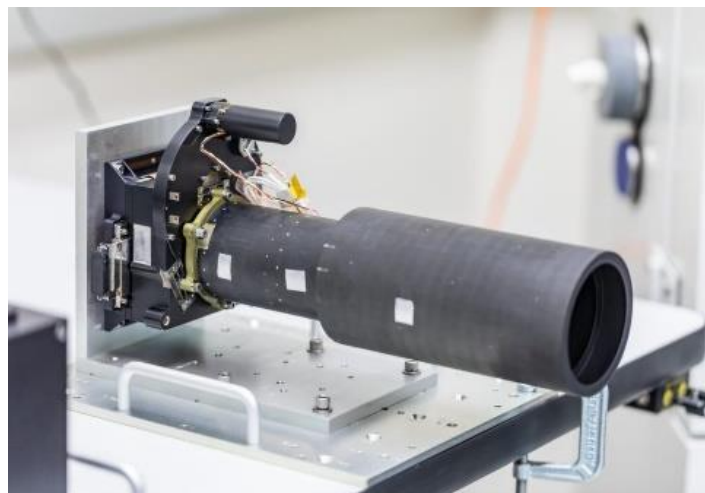


Abbildung 4: Multispektrale Kamera.  
© NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.

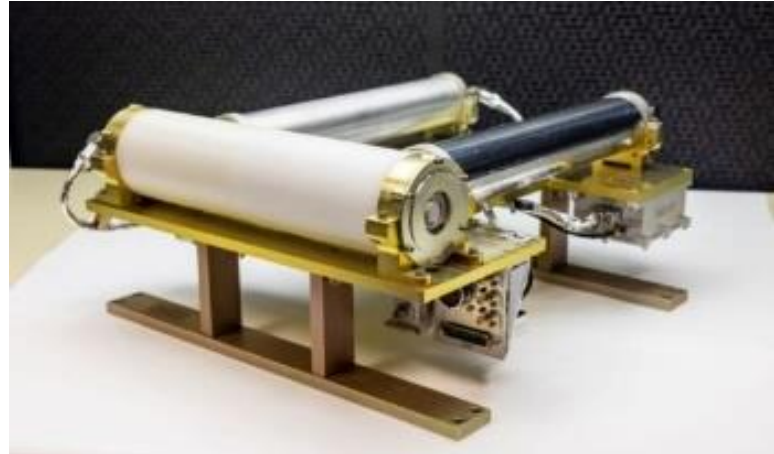
### ***Magnetometer:***

Das Magnetometer misst das Magnetfeld von 16 Psyche, falls vorhanden, und liefert dadurch wichtige Informationen über seine innere Struktur und damit darüber, ob der Asteroid ein Überbleibsel eines metallischen Kerns ist, ähnlich wie dem inneren Kern der Erde (vgl. Abb. 5).



**Abbildung 5: Psyches Magnetometer.**  
© NASA/JPL-Caltech.

### ***Gammastrahlen- und Neutronenspektrometer:***



**Abbildung 6: Psyches Gammastrahlen- und Neutronenspektrometer.**  
© Johns Hopkins APL/Ed Whitman.

Dieses Instrument analysiert die chemische Zusammensetzung der Oberfläche von 16 Psyche (vgl. Abb. 6). Wenn kosmische Strahlen auf die Oberfläche des Asteroiden treffen, erzeugen sie Strahlen in einem Wellenlängenbereich, den dieser Spektrometer messen kann. So lassen sich Rückschlüsse auf die Elemente in der obersten Schicht des Asteroiden ziehen.

### ***X-Band High-Gain-Antenne:***

Zum einen dient die Antenne zur Datenübertragung und zur Kommunikation mit der Erde im Radiowellenbereich. Darüber hinaus hilft sie das Gravitationsfeld von 16 Psyche zu messen. Wenn Psyche eine Umlaufbahn des Asteroiden erreicht, wird die Schwerkraft von 16 Psyche die Flugbahn der Raumsonde beeinflussen. Durch diese winzigen Veränderungen in Geschwindigkeit und Position können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Rückschlüsse auf die Masse, die innere Struktur sowie das Gravitationsfeld folgern.

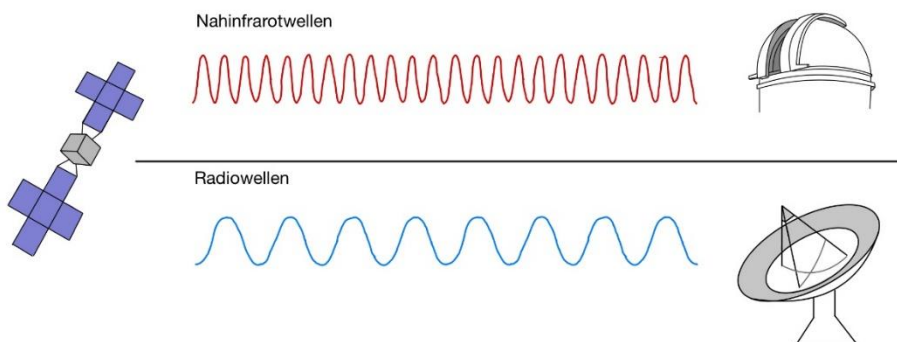
### **Deep Space Optical Communication (DSOC):**

Weltraummissionen werden zunehmend komplexer und es werden dabei mehr Daten gesammelt als je zuvor. Auf der Erde können solche Datenmengen problemlos über Glasfaserleitungen mit hohen Geschwindigkeiten übertragen werden. Diese Technologie wird nun auch für den Einsatz im Weltall weiterentwickelt. Das „Deep Space Optical Communication“-Projekt (kurz: DSOC) nutzt Laser für die Kommunikation und ermöglicht dadurch eine deutlich höhere Übertragungsrate (vgl. Abb. 7). Zum ersten Mal wird dabei optische Kommunikation über den Mond hinaus getestet. Für zukünftige Missionen bedeutet dies, dass Daten mit wesentlich höheren Raten übertragen werden können.



**Abbildung 7: Raumsonde Psyche mit DSOCs Flight Laser Transceiver. © NASA/Ben Smegelsky.**

Bisher setzt die NASA seit 1958 auf Radiowellen zur Kommunikation, die sich zwar ebenfalls mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, jedoch eine deutlich größere Wellenlänge bzw. niedrigere Frequenz als Nahinfrarotlaser (1550 nm) haben (vgl. Abb. 8). Die Informationsmenge, die pro Zeiteinheit übertragen werden kann, hängt direkt von Frequenz der Trägerwelle ab. Wellen mit hoher Frequenz können mehr Daten pro Zeiteinheit übertragen, weil man in kürzester Zeit mehr verschiedene Zustände senden kann. Ein Beispiel für die niedrige Übertragungsrate von Radiowellen ist die New Horizons-Mission, bei der die Übertragung aller Daten des Pluto-Vorbeiflugs, die rund 6,25 GB umfasste, mehr als 15 Monate dauerte. Optische Kommunikation könnte solche Zeiten drastisch verkürzen und die Effizienz zukünftiger Missionen erheblich steigern.



**Abbildung 8: Wellenlängen im Nahinfrarot- und Radiobereich im Vergleich. © Talha Coktasar.**

Langfristig besteht die Vision mit Astronauten auf dem Mars per Video in Echtzeit kommunizieren zu können. Die Psyche-Mission, die einen Swing-by am Mars durchführen wird, bietet eine ideale Gelegenheit, um die DSOC-Technologie unter realen Weltraumbedingungen zu testen. Optische Kommunikation wäre damit ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu bemannten Missionen im Weltraum, einschließlich potenzieller Mars-Expeditionen.

An Bord der Psyche-Sonde befindet sich der sogenannte „Flight Laser Transceiver“, der mit einem Teleskop mit einer Öffnungsweite von 22 cm sowohl als Sender als auch als Empfänger agiert. Auf der Erde sorgt ein Netzwerk aus zwei Stationen für die Kommunikation mit der Sonde: Als Sendestation fungiert der JPL Table Mountain Transmitter, während das 5,1 m große Caltech Palomar Observatory Hale Teleskop als Empfänger eingesetzt wird.

Die Lage der irdischen Stationen zeigt auch einen Nachteil dieser Lasertechnologie: Die optische Kommunikation ist stark abhängig von den Wetterbedingungen auf der Erde. Anders als Radiowellen können Lasersignale nicht durch Wolken dringen. Für eine erfolgreiche Datenübertragung muss die Erdatmosphäre klar sein, da Wolken oder Nebel die Lasersignale blockieren und die Verbindung zur Sonde unterbrechen können. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, dass Sende- und Empfangsstationen in Regionen mit stabilen, trockenen Wetterbedingungen platziert werden.

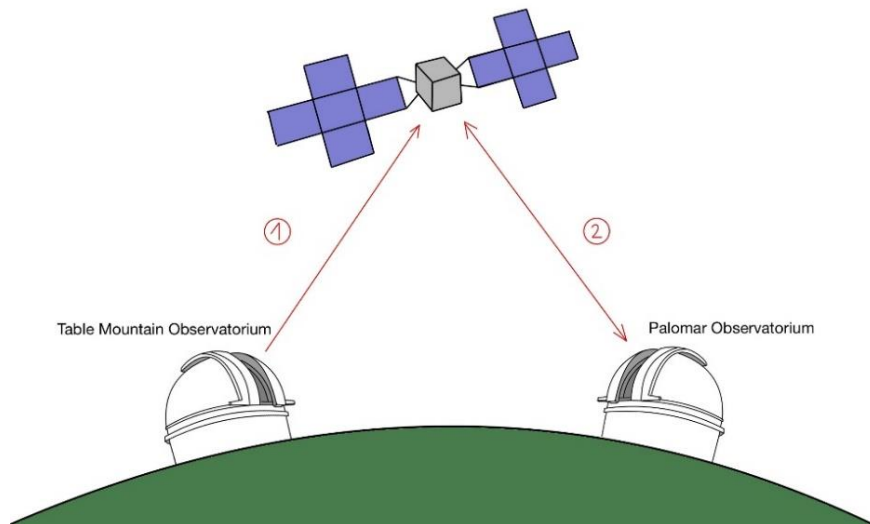


Abbildung 9: Funktionsweise des Deep Space Optical Communications (DSOC) Experiments. © Talha Coktasar.

Der Kommunikationsprozess beginnt mit einer Übertragung von der Erde zur Sonde – dies dient als Zeigerreferenz, um die Verbindung zu initialisieren. Neben diesem Leuchtsignal werden niederfrequente Daten zur Sonde geschickt (vgl. Abb. 9.1). Erst danach kann die Sonde ihre Daten zur Erde zurücksenden, da Sende- und Empfangsantenne exakt aufeinander ausgerichtet sein müssen. Das Hale-Teleskop des Palomar-Observatoriums empfängt dann die hochratigen Daten vom DSOC-Lasertransceiver der Raumsonde (vgl. Abb. 9.2).

Etwa einen Monat nach dem Start von Psyche konnte der erste Kontakt, das sogenannte „First Light“, zwischen den DSOC-Bodensystemen und dem Transceiver an Bord der Sonde hergestellt werden. Dabei wurden erfolgreich Testdaten aus einer Entfernung von fast 16 Millionen Kilometern übertragen. Am 11. Dezember 2023 folgte ein weiterer Meilenstein: Das erste hochauflösende Video wurde aus dem tiefen Weltraum zur Erde gesendet, aus einer Entfernung von ca. 31 Millionen Kilometern. Das Besondere an dem 15-sekündigen Video ist, dass es eine Katze zeigt, die spielerisch einem Lichtpunkt eines Laserpointers nachjagt (<https://www.youtube.com/watch?v=GvJtVomFs5Q>).

**Im Folgenden werden drei Stationen vorgestellt, an denen sich Schülerinnen und Schüler in verschiedene technische Details vertiefen können (vgl. Abb. 2: I-III).**

## I. Arduino-Projekt

### Überblick:

Im folgenden Arduino-Projekt wird die optische Kommunikation der Raumsonde Psyche in einer vereinfachten Form mithilfe von Mikrocontrollern nachgebildet. Dabei werden mehrere Vereinfachungen vorgenommen, um die Komplexität für den schulischen Einsatz zu reduzieren. Das Konzept konzentriert sich auf eine eindimensionale optische Kommunikation, bei der statt eines Lasers eine LED verwendet wird, um die Praktikabilität im Unterricht sicherzustellen. Als Empfänger kommt ein lichtempfindlicher Fotowiderstand zum Einsatz. Auf diese Weise kann ein Text durch das Blinken der LED und die Steuerung über einen Arduino-Code übertragen werden. Ein Arduino fungiert dabei als Sender und repräsentiert die Raumsonde Psyche, während ein zweiter Arduino als Empfänger auf der Erde agiert.

### Voraussetzungen:

Für die Durchführung des Projekts sind grundlegende Programmierkenntnisse erforderlich. Abhängig von den Vorkenntnissen können die Teilnehmer entweder mit der Programmiersprache C++ programmieren, wie es im Beispielcode realisiert wurde, oder eine blockbasierte, visuelle Programmierumgebung wie S4A (Scratch for Arduino) nutzen, die sich besonders für Einsteiger eignet.

### Material:

- Computer mit der Entwicklungsumgebung des Arduinos (<https://www.arduino.cc/en/software>)
- 2x Mikrocontroller (hier: Arduino Uno)
- LED (hier: rot)
- Passende Widerstände (220 Ohm und 10 kOhm)
- Fotowiderstand
- 2x Breadboards
- Jump-Wires

### Aufbau:

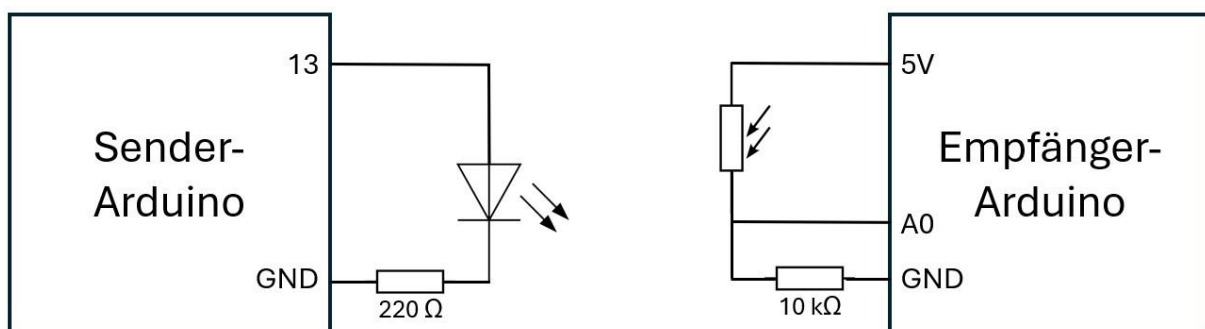


Abbildung 10: Schaltplan zum Arduino-Projekt. © Talha Coktasar.

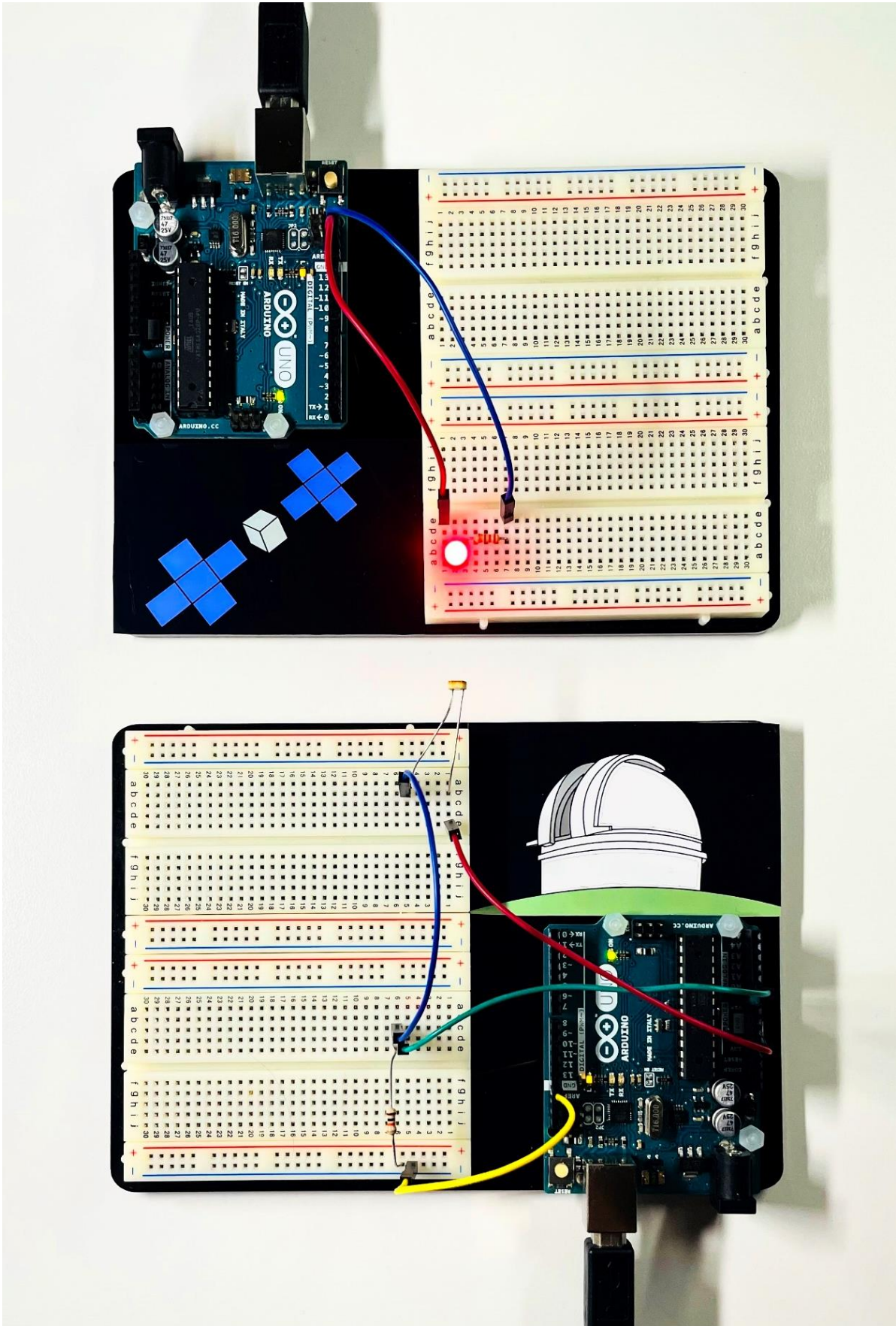


Abbildung 11: Aufbau des Arduino-Projekts. © Talha Coktasar.



**Beispielcodes:****Sender-Code:**

- Der Sender-Arduino liest eine Zeichenkette aus dem seriellen Monitor.
- Jedes Zeichen wird in eine 8-Bit-Binärfolge umgewandelt und über die LED durch Blinken übertragen.
- Vor der Übertragung sendet der Sender eine Startsequenz (hier: 1010101), damit der Empfänger weiß, wann ein neues Zeichen beginnt.
- Nach der Übertragung aller Zeichen wird ein langes HIGH-Signal gesendet, um das Ende zu kennzeichnen.

```
1 // Sender-Arduino Code
2
3 const int ledPin = 13; // Pin für die LED
4 const int delayTime = 300; // Zeit für ein Bit in Millisekunden
5
6 void setup() {
7     pinMode(ledPin, OUTPUT);
8     Serial.begin(9600);
9     Serial.println("Geben Sie eine Nachricht ein:");
10 }
11
12 void loop() {
13     if (Serial.available() > 0) {
14         String message = Serial.readString(); // Nachricht vom seriellen Monitor
15         for (int i = 0; i < message.length(); i++) {
16             char c = message.charAt(i); // Einzelnes Zeichen
17             sendChar(c); // Zeichen senden
18         }
19         // Ende der Übertragung markieren
20         digitalWrite(ledPin, HIGH);
21         delay(1000); // Lang anhaltendes Signal zum Ende der Übertragung
22         digitalWrite(ledPin, LOW);
23     }
24 }
25
26 // Funktion zum Senden eines einzelnen Zeichens als Binärfolge
27 void sendChar(char c) {
28     String binaryString = byteToBinary(c);
29
30     // Startsequenz senden (1010101)
31     sendStartSequence();
32
33     // Bit für Bit des Zeichens senden
34     for (int i = 0; i < 8; i++) {
35         if (binaryString.charAt(i) == '1') {
36             digitalWrite(ledPin, HIGH);
37         } else {
38             digitalWrite(ledPin, LOW);
39         }
40         delay(delayTime); // Wartezeit zwischen den Bits
41     }
42 }
```

Abbildung 12: Sender-Code. © Talha Coktasar.

```
43
44 // Funktion zur Umwandlung eines Zeichens in eine 8-Bit-Binärfolge
45 String byteToBinary(char c) {
46     String binaryString = "";
47     for (int i = 7; i >= 0; i--) {
48         binaryString += ((c >> i) & 1) ? "1" : "0";
49     }
50     return binaryString;
51 }
52
53 // Funktion zum Senden der Startsequenz (z.B. 1010101)
54 void sendStartSequence() {
55     int startBits[7] = {1, 0, 1, 0, 1, 0, 1}; // Startsequenz
56     for (int i = 0; i < 7; i++) {
57         digitalWrite(ledPin, startBits[i]);
58         delay(delayTime);
59     }
60 }
```

Abbildung 13: Sender-Code (Fortsetzung). © Talha Coktasar.

### Empfänger-Code:

- Der Empfänger-Arduino überwacht kontinuierlich den LDR und erkennt die Startsequenz (1010101).
- Sobald die Startsequenz erkannt wird, beginnt er, die nächsten 8 Bits zu lesen und diese in ein ASCII-Zeichen zu übersetzen.
- Das empfangene Zeichen wird im seriellen Monitor ausgegeben.

```
1 // Empfänger-Arduino Code
2
3 const int ldrPin = A0; // Pin für den LDR
4 const int threshold = 500; // Schwellenwert, um zwischen Licht an und aus zu unterscheiden
5 const int delayTime = 300; // Zeit für ein Bit in Millisekunden
6
7 void setup() {
8     Serial.begin(9600);
9 }
10
11 void loop() {
12     if (detectStartSequence()) {
13         char receivedChar = receiveChar();
14         Serial.print(receivedChar); // Empfangenes Zeichen ausgeben
15     }
16 }
17
18 // Funktion zum Empfangen eines Zeichens (8 Bits)
19 char receiveChar() {
20     String binaryString = "";
```

Abbildung 14: Empfänger-Code. © Talha Coktasar.

```
21
22 // 8 Bits empfangen
23 for (int i = 0; i < 8; i++) {
24     int ldrValue = analogRead(ldrPin);
25
26     if (ldrValue < threshold) {
27         binaryString += "0"; // Dunkelheit (LED aus)
28     } else {
29         binaryString += "1"; // Licht (LED an)
30     }
31     delay(delayTime); // Wartezeit zwischen den Bits
32 }
33
34 return binaryToChar(binaryString); // Binärfolge in Zeichen umwandeln
35 }
36
37 // Funktion zur Erkennung der Startsequenz (1010101)
38 bool detectStartSequence() {
39     int startBits[7] = {1, 0, 1, 0, 1, 0, 1}; // Startsequenz
40     for (int i = 0; i < 7; i++) {
41         int ldrValue = analogRead(ldrPin);
42         int bit = (ldrValue < threshold) ? 0 : 1;
43
44         if (bit != startBits[i]) {
45             return false; // Startsequenz nicht erkannt
46         }
47         delay(delayTime);
48     }
49     return true; // Startsequenz erkannt
50 }
51
52 // Funktion zur Umwandlung einer Binärfolge in ein Zeichen
53 char binaryToChar(String binaryString) {
54     char c = 0;
55     for (int i = 0; i < 8; i++) {
56         if (binaryString.charAt(i) == '1') {
57             c |= (1 << (7 - i)); // Bit setzen
58         }
59     }
60     return c;
61 }
```

Abbildung 15: Empfänger-Code (Fortsetzung). © Talha Coktasar.

### ***Wichtige Hinweise:***

Die Synchronisation zwischen Sender und Empfänger ist entscheidend, da es ohne eine genaue Abstimmung zu Datenverlust kommen kann. Das führt dazu, dass Zeichen entweder falsch oder gar nicht erkannt werden. Eine sinnvolle Startsequenz, z. B. eine festgelegte Bitfolge, sollte verwendet werden, um sicherzustellen, dass die Kommunikation korrekt initialisiert wird.

Je nach Umgebungslichtverhältnissen muss der Schwellenwert (Threshold) des Empfänger-Arduinos angepasst werden, um eine zuverlässige Erkennung der Signale zu gewährleisten. Dieser muss auch angepasst werden, wenn der Abstand von Sender und Empfänger verändert wird, da die Beleuchtungsstärke einer Lichtquelle mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Ein entsprechender Code zur Erfassung des Schwellenwerts sollte auf dem Empfänger-Arduino implementiert werden:

```
1  int sensorPin = A0; // Fotowiderstand ist an Pin A0 angeschlossen
2  int sensorValue; // Variable zum Speichern des ausgelesenen Wertes
3
4  void setup() {
5  |   Serial.begin(9600); // Serielle Kommunikation starten
6  | }
7
8  void loop() {
9  |   sensorValue = analogRead(sensorPin); // Lese den analogen Wert vom Fotowiderstand
10 |   Serial.println(sensorValue); // Gib den Wert auf dem seriellen Monitor aus
11 |   delay(100); // Warte 100 ms, bevor der nächste Wert ausgelesen wird
12 | }
```

Abbildung 16: Code zur Ermittlung der Lichtverhältnisse. © Talha Coktasar.

### ***Erweiterungsmöglichkeiten:***

Die Übertragungsgeschwindigkeit kann erhöht werden, indem die Verzögerungszeit (delay time) im Code angepasst wird. Für größere Distanzen eignet sich entweder eine sehr dunkle Umgebung oder der Einsatz eines Lasers anstelle der LED als Lichtquelle, der z.B. mithilfe von Krokodilklemmen einfach angeschlossen werden kann. Als Alternative zum Fotowiderstand kann auch eine Solarzelle als Empfänger verwendet werden, da sie empfindlicher auf Licht reagiert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, nicht nur Text, sondern auch Bilder zu übertragen, indem die Kommunikation entsprechend modifiziert und erweitert wird.

## II. Daten, Daten, Daten, ...

Der Unterschied in der Datenübertragung zwischen der Nutzung von Radio- und Nahinfrarotwellen wird bei der Betrachtung der Datenraten besonders deutlich. Zum Verständnis werden im Folgenden einige Begriffe eingeführt:

Die sogenannte Übertragungszeit gibt die Zeit an, die erforderlich ist, um eine bestimmte Datenmenge von der Quelle zu senden:

$$\text{Übertragungszeit} = \frac{\text{Datenmenge}}{\text{Datenrate}}$$

Diese Zeit ist nicht zu verwechseln mit der Ausbreitungszeit, die angibt wie lange das Signal benötigt, um von der Quelle zum Ziel zu gelangen, unabhängig von der Datenmenge. Sie hängt vom physikalischen Medium ab und ist begrenzt mit der Lichtgeschwindigkeit:

$$\text{Ausbreitungszeit} = \frac{\text{Distanz}}{\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}}$$

Vernachlässigt man weitere eventuelle Verzögerungen, ergibt sich daraus eine Gesamtzeit, die benötigt wird, um eine Datenmenge von der Quelle zum Ziel zu senden:

$$\text{Gesamtzeit} = \text{Übertragungszeit} + \text{Ausbreitungszeit}$$

### *Beispiel:*

Beim Vorbeiflug der Raumsonde New Horizons am ca. 5,9 Milliarden km entfernten Pluto konnten 2015 spektakuläre Bilder und Messdaten von Pluto und seinem Mond Charon aufgenommen werden. So wurden insgesamt rund 6,25 GB Daten in ca. 15 Monaten mithilfe von Radiowellen übertragen. Zur Berechnung der Übertragungsrate kann nun wie folgt vorgegangen werden:

- i. Datenmenge  $6,25 \text{ GB} \hat{=} 50 \text{ Gbit} \hat{=} 50 \cdot 10^6 \text{ kbit}$
- ii. Gesamtzeit  $15 \text{ Monate} \hat{=} 465 \text{ Tage} \hat{=} 40\,176\,000 \text{ s}$
- iii. Ausbreitungszeit  $= \frac{5,9 \cdot 10^{12} \text{ m}}{299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 19\,680 \text{ s}$
- iv. Übertragungszeit = Gesamtzeit – Ausbreitungszeit =  $40\,156\,320 \text{ s}$
- v. Datenrate  $= \frac{50 \cdot 10^6 \text{ kbit}}{40\,156\,320 \text{ s}} \approx 1,25 \frac{\text{kbit}}{\text{s}}$

Zum Vergleich: Die durchschnittliche Internetgeschwindigkeit in Deutschland lag im August 2024 bei rund  $90,63 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$ .



**Abbildung 17:** DSOCTeam reagiert auf erstes hochauflösendes Video, das am 11.12.2023 per Laser aus ca. 31 Millionen km Entfernung per Laser von der Psyche-Sonde zur Erde gesendet wurde.  
© NASA/JPL-Caltech.

### Aufgabe

- a) Mit dem sogenannten „Flight Laser Transceiver“ des DSOCTeam der Psyche-Raumsonde dauerte die Datenübertragung eines 15-sekündigen Katzenvideos (Dateigröße: 19,2 MB) aus einer Entfernung von 30,3 Millionen Kilometern lediglich 101,58 Sekunden. Berechne die Übertragungsrate.
- Nachdem das 15-sekündige Video der Katze „Taters“ empfangen wurde, leiteten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler es über das Internet an ihre Büros weiter – kurioserweise mit weniger Bandbreite als während der Übertragung aus dem All!
- b) In der Raumsonde Psyche ist auch ein Funksender installiert, der Informationen per Radiowellen mit  $360 \frac{\text{kbit}}{\text{s}}$  senden kann. Berechne die Gesamtzeit, die das 15-sekündige Katzenvideo aus Aufgabenteil a) von der Sonde bis zur Erde brauchen würde.

### Lösung:

- a) i. Datenmenge  $19,2 \text{ MB} \hat{=} 153,6 \text{ Mbit} \hat{=} 153\,600 \text{ kbit}$   
 ii. Ausbreitungszeit  $= \frac{30,3 \cdot 10^{12} \text{ m}}{299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 101 \text{ s}$   
 iii. Übertragungszeit = Gesamtzeit – Ausbreitungszeit =  $101,58 \text{ s} - 101 \text{ s} = 0,58 \text{ s}$   
 iv. Datenrate  $= \frac{153,6 \text{ Mbit}}{0,58 \text{ s}} \approx 267 \frac{\text{Mbit}}{\text{s}}$
- b) i. Übertragungszeit  $= \frac{153600 \text{ kbit}}{360 \frac{\text{kbit}}{\text{s}}} \approx 427 \text{ s}$   
 ii. Gesamtzeit = Übertragungszeit + Ausbreitungszeit =  $427 \text{ s} + 101 \text{ s} = 528 \text{ s}$

### III. Hall-Effekt-Antrieb

Die Raumsonde Psyche verwendet vier russische Hall-Effekt-Antriebe des Modells SPT-140 als primäres Antriebssystem (vgl. Abb. 18). Dabei steht SPT für „Stationary Plasma Thruster“ und die Nummer 140 für den Durchmesser in Millimetern. Diese Art von Antrieb ist bekannt für ihre Effizienz, da sie nur geringe Mengen an Treibstoff benötigen. Zwar ist der entstehende Schub kleiner als bei herkömmlichen chemischen Antrieben, kann jedoch über lange Zeiträume hinweg aufrechterhalten werden. Die nötige Energie liefern die an die Sonde angebrachten Solarzellen, die eine Fläche von ungefähr 75 m<sup>2</sup> aufspannen. Außerdem ist der geringe Verschleiß und damit die erhöhte Lebensdauer der Hall-Effekt-Antriebe eine Möglichkeit, um die Mission eventuell auf andere Planetoiden auszuweiten.

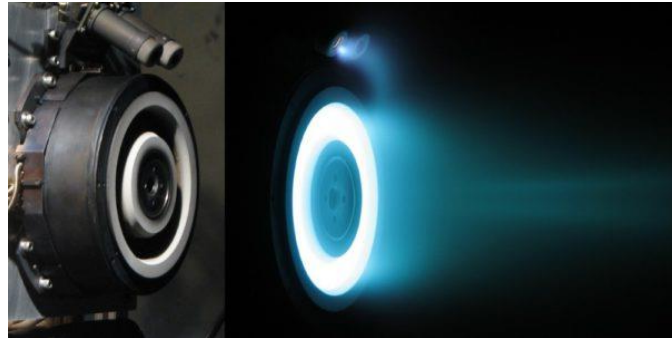


Abbildung 18: SPT-140 Hall-Effekt-Antrieb. © Maxar (links), NASA/JPL-Caltech (rechts).

Im Grunde nutzt der Hall-Effekt-Antrieb elektrische und magnetische Felder, um ionisiertes Gas, in diesem Fall Xenon, zu beschleunigen. In Abbildung 19 ist ein Querschnitt eines SPT-Hall-Effekt-Antriebs schematisch dargestellt, in der die Hauptbestandteile Entladungskanal (grau), Anode (orange) und Kathode zu erkennen sind.

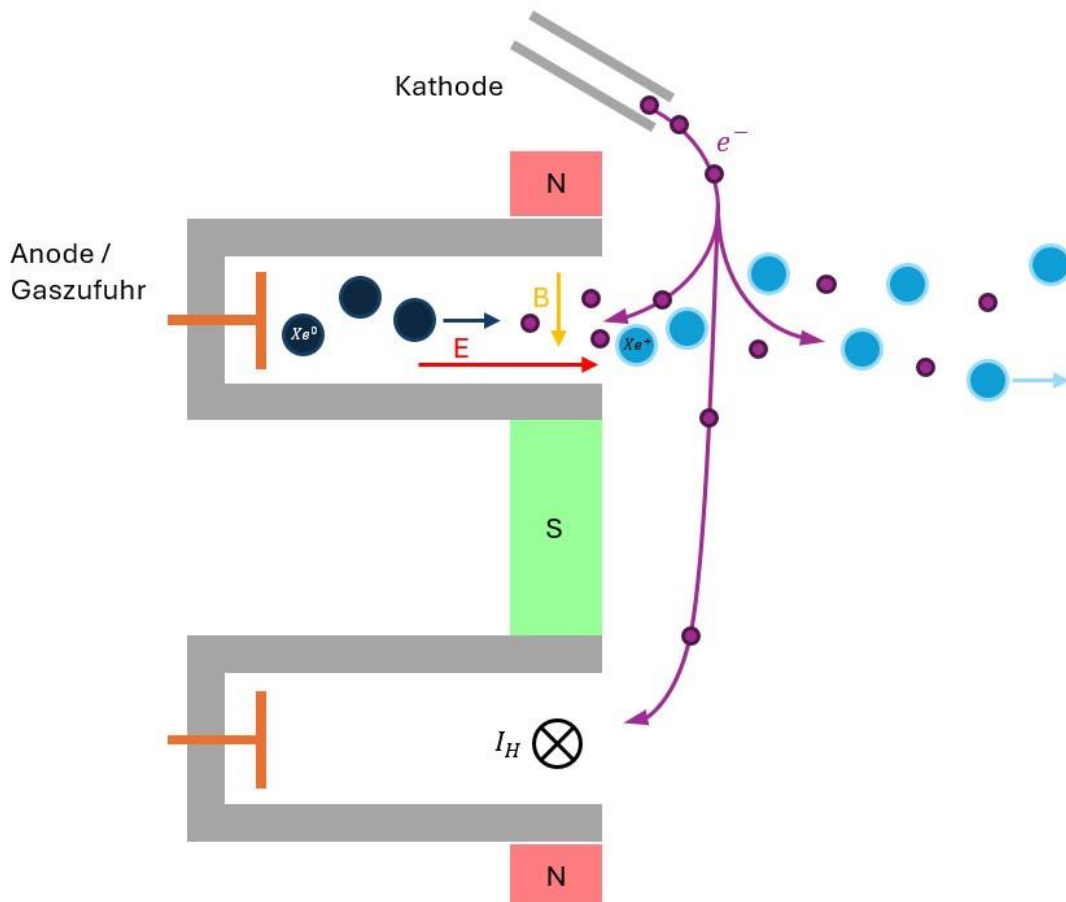
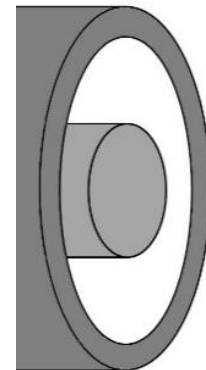


Abbildung 19: Schematische Darstellung eines SPT-Hall-Effekt-Antriebs. © Talha Coktasar.

Zunächst wird eine Spannung zwischen der sich außerhalb des Triebwerks befindenden Kathode und im Inneren des Triebwerks befinden Anode angelegt, wodurch ein elektrisches Feld (rot) entsteht. Elektronen, die von der Kathode in den Antrieb ausgestoßen werden, bewegen sich deshalb in Richtung Anode. Ein starkes Magnetfeld, das senkrecht zum elektrischen Feld steht, zwingt die Elektronen dazu, sich kreisförmig um das Triebwerk zu beschleunigen und den sogenannten Hall-Strom  $I_H$  zu erzeugen. Gleichzeitig wird durch die Anode in den Entladungskanal das neutrale Xenon-Gas eingespeist. Wenn nun die Elektronen auf neutrale Xenon-Atome treffen, führen einige Kollisionen dazu, dass Elektronen aus diesen Atomen geschlagen werden, wodurch positiv geladene Ionen  $Xe^+$  entstehen. Diese Ionen werden dann durch das elektrische Feld in Richtung des Ausgangs des Triebwerks beschleunigt, wodurch Schub erzeugt wird. Elektronen, die bei Kollisionen allmählich an Energie verlieren, bewegen sich schließlich zur Anode, um den Kreislauf zu schließen.

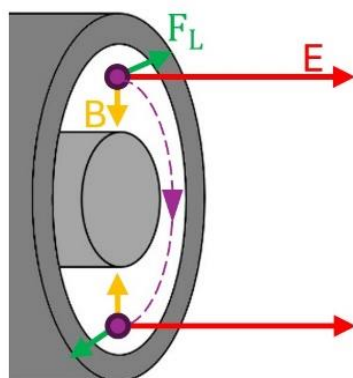
### Aufgabe

- Zeichne in die folgende Abbildung das E- und B-Feld aus Abbildung 19 ein und ermittle die Richtung der Lorentzkraft, welche auf die eintretenden Elektronen wirkt.
- Ein Hall-Effekt-Antrieb verwendet ionisiertes Xenon, um Schub zu erzeugen. Dabei werden Elektronen und positiv geladene Ionen durch das elektrische Feld beschleunigt. Erläutere, warum es wichtig ist, dass genügend Elektronen den entstehenden Ionenstrahl begleiten.



### Lösung

a)



- Es ist wichtig, dass genug Elektronen den Ionenstrahl folgen, um das System elektrisch neutral zu halten. Wenn das Triebwerk nur positiv geladene Ionen ausstößt, würde sich an der Austrittsstelle positive Ladung ansammeln, während im Triebwerk selbst negative Ladung zurückbleibt. Diese Ladungsdifferenz würde ein elektrisches Feld erzeugen, welches den Ionenfluss hemmt oder sogar stoppt. Der Schub würde dadurch abnehmen oder sogar vollständig abbrechen, da die Ionen zum Triebwerk zurückgezogen würden.



## Quellen

- <https://www.nasa.gov/general/new-horizons-returns-last-bits-of-2015-flyby-data-to-earth/> (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2020/03/20200713\\_fuenf-jahre-new-horizons-vorbeiflug-am-pluto](https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2020/03/20200713_fuenf-jahre-new-horizons-vorbeiflug-am-pluto) (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/New\\_Horizons](https://en.wikipedia.org/wiki/New_Horizons) (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://psyche.asu.edu/2020/03/02/why-does-the-psyche-spacecraft-look-like-that/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/224924/umfrage/internet-verbindungsgeschwindigkeit-in-ausgewahlten-weltweiten-laendern/> (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_time](https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_time) (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://theskylive.com/planetarium?objects=sun-moon-psychemission-mercury-venus-mars-jupiter-saturn-uranus-neptune-pluto&localdata=51.48%7C0%7CGreenwich%2C%20UK%7CEurope%2FLondon%7C0&obj=psychemission&h=14&m=45&date=2023-12-11#ra\[6.7406672394905645\]dec\[28.400019469196437\]fov\[50](https://theskylive.com/planetarium?objects=sun-moon-psychemission-mercury-venus-mars-jupiter-saturn-uranus-neptune-pluto&localdata=51.48%7C0%7CGreenwich%2C%20UK%7CEurope%2FLondon%7C0&obj=psychemission&h=14&m=45&date=2023-12-11#ra[6.7406672394905645]dec[28.400019469196437]fov[50) (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia26145-dsoc-team-members-react-to-the-first-hd-streaming-video-from-deep-space/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia24569-dsocs-flight-laser-transceiver/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/deep-space-optical-communications-dsoc/nasas-tech-demo-streams-first-video-from-deep-space-via-laser/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://psyche.asu.edu/timeline/#phase-e> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://psyche.asu.edu/mission/the-spacecraft/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://psyche.asu.edu/mission/instruments-science-investigations/> (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_communication\\_in\\_space](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_communication_in_space) (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/build-a-light-detector-inspired-by-space-communications/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.jpl.nasa.gov/edu/news/2024/1/29/the-nasa-cat-video-explained/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.youtube.com/watch?v=VsKgYmQS-Kw> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.youtube.com/watch?v=6WFj-CKldv4> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.jpl.nasa.gov/press-kits/psyche/dsoc/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.nasa.gov/mission/deep-space-optical-communications-dsoc/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.nasa.gov/missions/psyche-mission/nasas-deep-space-optical-comm-demo-sends-receives-first-data/> (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Ion\\_thruster](https://en.wikipedia.org/wiki/Ion_thruster) (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Hall-effect\\_thruster](https://en.wikipedia.org/wiki/Hall-effect_thruster) (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://psyche.asu.edu/2018/01/19/electric-thrusters-psyche-spacecraft-work/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.youtube.com/watch?v=mAfjmGMp43w> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://www.jpl.nasa.gov/news/solar-electric-propulsion-makes-nasas-psyche-spacecraft-go/> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://web.archive.org/web/20040122155512/http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2001/TM-2001-210676.pdf> (Zugriff: 06.10.2024)
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Hallantrieb> (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/a275de9b17e8ff642c742632a0c5f380\\_MIT16\\_522S15\\_Lecture16.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/16-522-space-propulsion-spring-2015/a275de9b17e8ff642c742632a0c5f380_MIT16_522S15_Lecture16.pdf) (Zugriff: 06.10.2024)
- [https://web.archive.org/web/20180624202411/https://iepc2017.org/sites/default/files/speaker-papers/iepc-2017-153\\_psyche\\_mission\\_overview\\_final\\_0.pdf](https://web.archive.org/web/20180624202411/https://iepc2017.org/sites/default/files/speaker-papers/iepc-2017-153_psyche_mission_overview_final_0.pdf) (Zugriff: 06.10.2024)

- Goebel, Dan M.; Katz, Ina (2008): Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. In: [https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series1/Goebel\\_cmprsd\\_opt.pdf](https://descanso.jpl.nasa.gov/SciTechBook/series1/Goebel_cmprsd_opt.pdf) (Zugriff: 06.10.2024)

*Weitere WIS-Materialien zur Astronomie und allen ihren Bezügen finden Sie unter der Adresse [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) (Fachgebiet Astronomie). Wir würden uns freuen, wenn Sie zum vorliegenden Beitrag Hinweise, Kritiken und Bewertungen an die Kontaktadresse des Autors ([t.coktasar@hotmail.de](mailto:t.coktasar@hotmail.de)) senden könnten.*