

## Signalverzögerungen durch die endliche Lichtgeschwindigkeit

Mit seiner unvorstellbar großen Geschwindigkeit von 300000 km/s durchleitet das Licht alle Distanzen, die im alltäglichen Leben der Menschen eine Rolle spielen, in nicht wahrnehmbaren Zeiten. Allerdings gehören die Auswirkungen der endlichen Lichtgeschwindigkeit schon längst zum technischen Erfahrungs- und Erlebnisbereich – etwa wenn in Anlagen zur ultraschnellen Signalverarbeitung die Kabellängen der Schaltkreise aufeinander abgestimmt werden müssen. Gelegentlich wird auch der aufmerksame „Normalbürger“ auf die Folgen der endlichen Lichtgeschwindigkeit aufmerksam. Mit Schülern kann man solche Gelegenheiten nutzen, um die Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit oder kosmischer Distanzen abzuschätzen.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Astronomie	Raumfahrt Kleinkörper	Apollo 11, Raumfahrtgeschichte, geostationäre Satelliten, Entfernung zum Erdmond
Fächerverknüpfung	Astro-Mathe Astro-Physik Astro-Sprache	Dreiecksberechnungen, Lichtgeschwindigkeit, Lichtlaufzeit, Leseübung/Hörübung in Englisch

### Schrecksekunde beim Lifereport aus Übersee

In der Anfangszeit von satellitengestützten Fernsehübertragungen - aber auch gelegentlich noch heute – konnte man das folgende merkwürdige „Kommunikationsverhalten“ beobachten: Der Moderator einer Fernsehsendung befragt einen Reporter, der gerade Neuigkeiten aus Übersee zu berichten hat. Doch der, scheinbar unhöflich, antwortete nicht sogleich, jedenfalls nicht mit der üblichen Geschwindigkeit eines Berichterstatters. Doch kaum hat der Moderator begonnen, sein Frage zu wiederholen, da legt der Reporter auch schon unbeeindruckt von der Nachfrage los und die Verwirrung ist komplett.

Woran liegt es? Bei solchen Fernsehübertragungen sind zumeist geostationäre Satelliten im Spiel, im einfachsten Fall lediglich ein Satellit. Geostationäre Satelliten befinden sich in einer Höhe von 35860 km über dem Erdäquator bzw. 42230 km über der Erdmitte. Das elektromagnetische Signal mit der Frage des Moderators muss zunächst zum Satelliten hinauf und anschließend wieder zum Standpunkt des Reporters auf die Erde zurück. Das ergibt eine Laufstrecke von rund 72000 km. Schließlich muss aber auch die Antwort des Reporters den gleichen Weg rückwärts ins Sendestudio laufen, also nochmals ca. 72000 km. Daraus ergibt sich schon eine Signalverzögerung von

$$t = \frac{s}{c} = \frac{2 \cdot 72000 \text{ km} \cdot s}{300000 \text{ km}} = 0,5 \text{ s} .$$

Unter Umständen ist der Reporter aber auf der anderen Seite der Erde. Dann kommt noch ein Satellit ins Spiel.

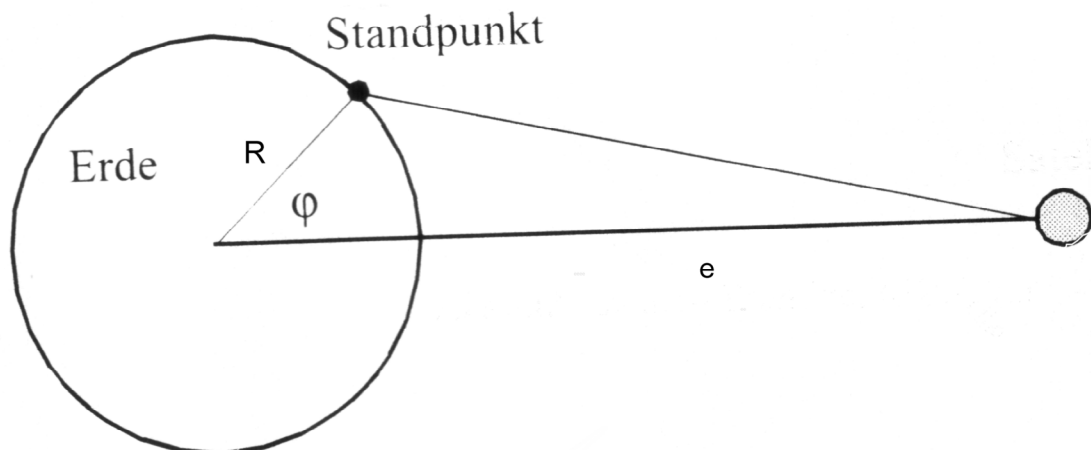
### Lichtgeschwindigkeitsmessung durch Zeitvergleich

Die eingangs geschilderte Erklärung für die Signalverzögerung bei Reportagen kann man für eine Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nutzen. Allerdings müssen dazu die Überlegungen zum Signalweg geometrisch verfeinert und die Messbedingungen optimiert werden. Die individuelle „Schrecksekunde“ bei einem Interview würde die Genauigkeit beeinträchtigen. Daher wird nur die Übertragungsverzögerung einer Sendung bestimmt, die wahlweise entweder auf einer vernachlässigbar kurzen terrestrischen Strecke ausgestrahlt wird (Empfang mit UKW-Antenne oder via Kabel) oder die via Satellit zu empfangen ist (z.B. Hauptnachrichtensendungen in ARD und ZDF über 3Sat).

Die Abbildung zeigt die Position eines geostationären Satelliten und den Standort der Sendestation, die näherungsweise mit dem Standort des Empfängers identisch ist. Im Dreieck Erde-Standort-Satellit gilt ( $\varphi$ : geographische Breite):

$$x = \sqrt{e^2 + R^2 - 2eR \cos \varphi} = 39000 \text{ km} .$$

Um die Verzögerungszeit aufzuzeichnen, benötigt man zwei Fernseher und eine Videokamera. Man stellt beide Fernseher nebeneinander und lässt ein Gerät über Satellitenempfang, das andere Gerät über terrestrischen Empfang laufen. Die Videokamera filmt beide Fernsehbilder. Sicher findet man schnell Bilddetails, die offenkundig im Satellitenfernseher etwas später abzulaufen scheinen. Lässt man die Videokamera die Aufnahmen im Einzelbildmodus abspielen, dann kann man aus der im Handbuch nachzulesenden Bildaufnahmegeschwindigkeit auf den Zeitversatz in den Aufnahmen schließen. Er sollte in der Größenordnung von 0,3 Sekunden liegen.



### Der schnelle US-Präsident

Nach der Landung von Neil Armstrong und Edwin Aldrin auf dem Mond im Juli 1969 führte der US-Präsident Nixon ein kurzes, inzwischen berühmt gewordenes Telefongespräch mit den beiden Astronauten. Von der Homepage der NASA kann man sich die Original Sound-Dateien und Mitschriften des Funkverkehrs zwischen der Erde und dem Mond herunterladen (Quelle: <http://science.ksc.nasa.gov/history/apollo/apollo-11>). Beim Anhören fallen die langen Pausen zwischen den Mitteilungen auf.

Das Telefongespräch zwischen Nixon und den Astronauten wird als **wav-Datei** zum Herunterladen angeboten.

Gesprächsmitschrift zum Ausdrucken:

**McCandless:** ...We'd like to get both of you in the field-of-view of the camera for a minute. Neil and Buzz, the President of the United States is in his office now and would like to say a few words to you. Over.

**Armstrong:** That would be an honor.

**McCandless:** All right. Go ahead, Mr. President. This is Houston. Out.

**Nixon:** Hello, Neil and Buzz. I'm talking to you by telephone from the Oval Room at the White House, and this certainly has to be the most historic telephone call ever made. I just can't tell you how proud we all are of what you (garbled). For every American, this has to be the proudest day of our lives. And for people all over the world, I am sure they, too, join with Americans in recognizing what an immense feat this is. Because of what you have done, the heavens have become a part of man's world. And as you talk to us from the Sea of Tranquility, it inspires us to redouble our efforts to bring peace and tranquility to Earth. For one priceless moment in the whole history of man, all the people on this Earth are truly one; one in their pride in what you have done, and one in our prayers that you will return safely to Earth.

**Armstrong:** Thank you, Mr. President. It's a great honor and privilege for us to be here representing not only the United States but men of peace of all nations, and with interests and the curiosity and with the vision for the future. It's an honor for us to be able to participate here today.

**Nixon:** And thank you very much and I look forward...All of us look forward to seeing you on the Hornet on Thursday.

**Aldrin:** I look forward to that very much, sir.

Aus den Pausen im Gespräch kann man bei bekannter Lichtgeschwindigkeit die Entfernung zum Erdmond abschätzen. Dazu muss man sich aber unbedingt tiefer in den Text einlesen und einhören, auch, um sich nicht von Hintergrundgeräuschen irritieren zu lassen. Für den Einsatz im Schulunterricht könnten sich daher folgende Hilfsfragen als nützlich erweisen:

Erläutere kurz den Inhalt des Telefongespräches!

Welche Personen sind daran beteiligt?

Welche Personen befinden sich auf der Erde, welche auf dem Erdmond?

Stoppe oder schätze mit Hilfe des Sekundenzeigers Deiner Uhr die Länge der Gesprächspausen und notiere diese!

Warum benötigen Armstrong und Aldrin immer viel Zeit zum Antworten, der Präsident aber meist nur einen kurzen Augenblick?

Welcher Astronaut reagiert am Schnellsten auf die Worte des Präsidenten? Wie viel Sekunden dauert dies in etwa?

Verwende diese Zeitangabe, um die Entfernung zum Mond abzuschätzen!

Die entsprechend der Aufgabe grob ermittelten Zeiten der Gesprächspausen sind:

McCandless-Armstrong: 7 s

McCandless-Nixon: <1 s

Nixon-Armstrong: 8 s

Armstrong-Nixon: ca.1 s

Nixon-Aldrin: ca. 3-4 s

Was ist beim Funkverkehr passiert? McCandless bereitet Armstrong auf das Gespräch mit dem Präsidenten vor, Armstrong antwortet, wie auch im Laufe der übrigen Unterhaltung, überlegt und bedächtig. Er benötigt immer 7-8 Sekunden für die Antwort. Die Funkwelle sollte zum Mond und wieder zurück mehr als 2 aber weniger als 3 Sekunden benötigen. Armstrong hat also zusätzlich einige Sekunden für die gedankliche Formulierung der Antwort gebraucht. Nixon reagiert mit einer für Gespräche üblichen Reaktionsverzögerung von ca. 1 Sekunde auf die einlaufenden Worte Armstrongs, eine Verzögerung durch die Signallaufzeit entfällt (das Tonbandgerät, das die Unterhaltung aufzeichnet, steht natürlich auf der Erde). Aldrins Gesprächspart ist nur sehr kurz, so dass er nicht erst lange nachdenken muss. Wir merken das an seiner deutlich kürzeren Antwortzeit im Vergleich zu Armstrong.

Geht man davon aus, dass bei Aldrin die Reaktionszeit zum Formulieren der Antwort in der Größenordnung von Nixons Reaktionszeit liegt, also ca. 1 Sekunde beträgt, dann kann man die Entfernung zum Mond aus der bekannten Lichtgeschwindigkeit abschätzen. Mit den oben ermittelten 3-4 Sekunden Gesprächspause findet man für die reine Lichtlaufzeit 2-3 Sekunden, also für die Mondstanz:

$$r = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t = 300000km - 450000km .$$

Tatsächlich ist der Mond im Mittel rund 380000 km von der Erde entfernt.