

Handreichung für Lehrpersonen:

Wo ist Apollo 11?

Klassen 10-13

Markus Nielbock

27. Juni 2019

Zusammenfassung

Die Schülerinnen und Schüler analysieren Audiodateien des Funkkontakts zwischen der NASA-Bodenstation in Houston, Texas und der Crew von Apollo 11 während der Mondlandung im Jahr 1969. Durch Echos in der Funkübertragung ermitteln sie die Signallaufzeit und somit die Entfernung zwischen Erde und Mond.

Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler

- machen sich mit dem Apollo-Programm vertraut,
- werten den Original-Funkverkehr des Apollo 11-Programms aus,
- errechnen die Signallaufzeit der Funkverbindung,
- vergleichen die ermittelte Mondentfernung mit dem tatsächlichen Wert.

Materialien

- Arbeitsblätter (erhältlich unter: <http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung>)
- Computer (PC, Laptop) mit Kopfhörer (je einer pro Gruppe), ggf. mit Internetzugang
- Software Audacity (<https://www.audacity.de/>)
- Audiodatei 175-AAA.mp3 (<https://archive.org/download/Apollo11Audio/175-AAA.mp3>)
- optional: Tabellenkalkulations-Software (Excel) für statistische Auswertung
- Taschenrechner
- Stift und Papier für Notizen

Stichworte

Mond, Apollo 11, Lichtgeschwindigkeit, Signallaufzeit, Ranging, Entfernung

Dauer

90 bis 150 Minuten (je nach Auswahl der zu analysierenden Passagen)

Hintergrund

Das Apollo-Programm

Das Apollo-Programm der NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) hatte das Ziel, innerhalb eines Jahrzehnts Menschen auf den Mond und wieder zurück zu bringen. Dieses Projekt war ein Resultat des Wettstreits der beiden Weltmächte, den USA und der UdSSR. Die Sowjetunion hatte mit Sputnik^a 1, dem ersten künstlichen Satelliten im Jahre 1957, sowie mit Juri Gagarin, der als erster Mensch 1961 ins All flog, einige bahnbrechende Erfolge in der Raumfahrt. Als Antwort darauf etablierten auch die USA ihr eigenes Weltraumprogramm. Wegen des offensichtlichen Vorsprungs der UdSSR in der erdnahen Raumfahrt strebten die USA schließlich die Landung von Menschen auf dem Mond an, um noch Aussichten zu haben, die Sowjetunion in der Raumfahrt zu überholen (Dupas und Logsdon 1994).

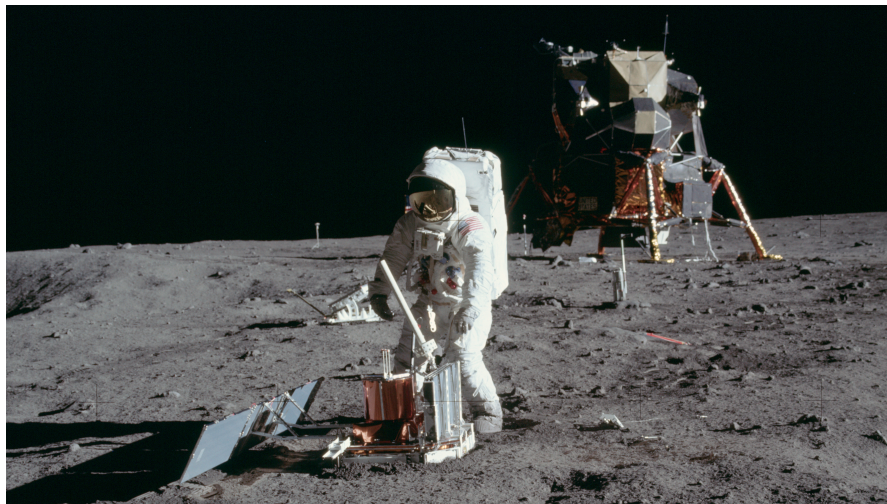


Abbildung 1: Die ersten Menschen landeten während der Apollo 11-Mission auf dem Mond. In diesem Bild nimmt Edwin Aldrin ein Seismometer auf dem Mond in Betrieb. Im Hintergrund steht das Landemodul (LM, Lunar Module) Eagle (Bild: NASA).

Von den 14 Flügen wurden drei (Apollo 4 bis 6) als Test ohne Besatzung durchgeführt. Neun von elf bemannten Apollo^b-Missionen flogen zum Mond, wobei sechs auf dem Mond landeten. Die erste Landung erfolgte mit Apollo 11 am 20. Juli 1969 (Abb. 1); mit Apollo 17 erkundete die vorerst letzte Besatzung im Dezember 1972 unseren Trabanten.

Apollo 11

Die Mission Apollo 11 startete am 16. Juli 1969 mit einer Saturn V-Rakete^c vom Kennedy Space Center in Florida (Orloff 2000, S. 92). Sie setzte sich aus der Kommandoeinheit (Command and Service Module, CSM), genannt Columbia, sowie der Landeeinheit (Lunar Module, LM), genannt Eagle zusammen. Die Besatzung bestand aus dem Kommandanten Neil Armstrong, dem Piloten der Landefähre Edwin Aldrin, sowie dem Piloten der Kommandoeinheit Michael Collins. Nach dem Abkoppeln des LM vom CSM landeten Armstrong und Aldrin am 20. Juli 1969 auf dem Mond (ebd., S. 94). Collins blieb während der gesamten Mission an Bord des CSM. Armstrong betrat nach etwa 7 Stunden am 21. Juli 1969 als erster Mensch den Mond. Aldrin folgte ihm wenige Minuten später. Nach etwa 21 1/2 Stunden traten die beiden Astronauten die Rückkehr zum CSM an. Die Landung auf der Erde erfolgte am 24. Juli 1969 durch eine geplante Wasserung im Pazifik (ebd., S. 98).



Abbildung 2: Die Besatzung der Apollo 11-Mission. Von links nach rechts: Neil Armstrong, Michael Collins, Edwin „Buzz“ Aldrin (Bild: NASA)

Bestimmung der Mondentfernung

Eines der Experimente, das mit Apollo 11 auf dem Mond aufgestellt wurde, ist der Reflektor (Abb. 3) mit dem man die Distanz zum Mond bestimmen kann (Soffel und Müller 1997). Hierbei wird die Laufzeit eines von der Erde ausgesandten Laserpulses gemessen, der von diesem Reflektor zur Erde zurück geworfen wird. Über die Lichtgeschwindigkeit erfolgt eine sehr genaue Bestimmung der Mondentfernung. Diese Methode nennt man „Ranging“. Bis dahin nutzte man eine ähnliche Technik, bei der mit Radar (Radio Detection and Ranging) ausgesandte Radiowellen von der Mondoberfläche reflektiert werden (B. S. Yaplee u. a. 1959; B. Yaplee u. a. 1958). Beide Methoden sind jedoch technisch sehr aufwendig und benötigen spezielle Apparaturen sowie eine ausgefeilte Analysetechnik.

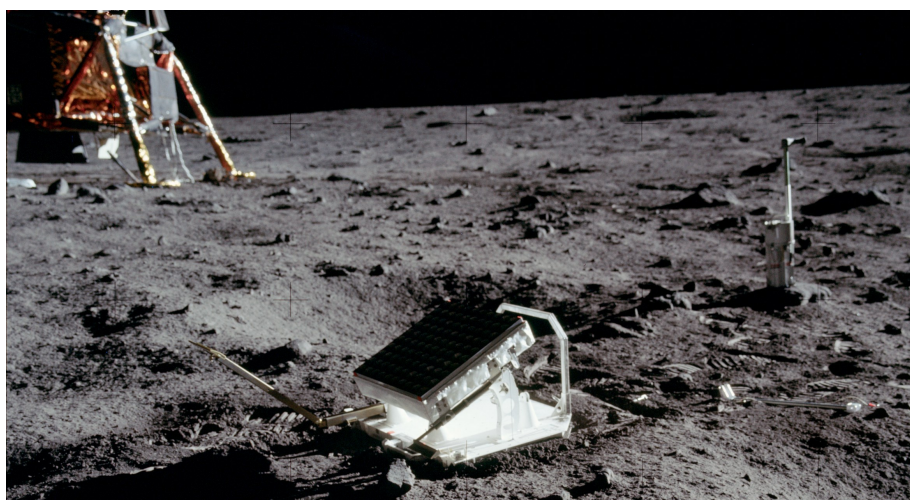


Abbildung 3: Mit dem Reflektor lässt sich seit der Landung von Apollo 11 die Entfernung des Mondes exakt durch Lunar Laser Ranging bestimmen (Bild: NASA).

Im Prinzip lässt sich jedoch jede Art von elektromagnetischen Signalen für eine Entfernungsbestimmung nutzen. Eine für den Schulunterricht recht spannende Variante ist die Analyse der Funksignale, die während der Apollo-Missionen zwischen der Besatzung und der Missionskontrolle am Erdboden ausgetauscht wurden. In manchen Fällen hört man das Echo des Signals eines Gesprächspartners, das durch die andere Seite über das Mikrofon wieder zum Ausgangspunkt zurück gesendet wird. Die Dauer zwischen der Originalbotschaft und dem Echo entspricht der doppelten Signallaufzeit zwischen Erde und Mond.

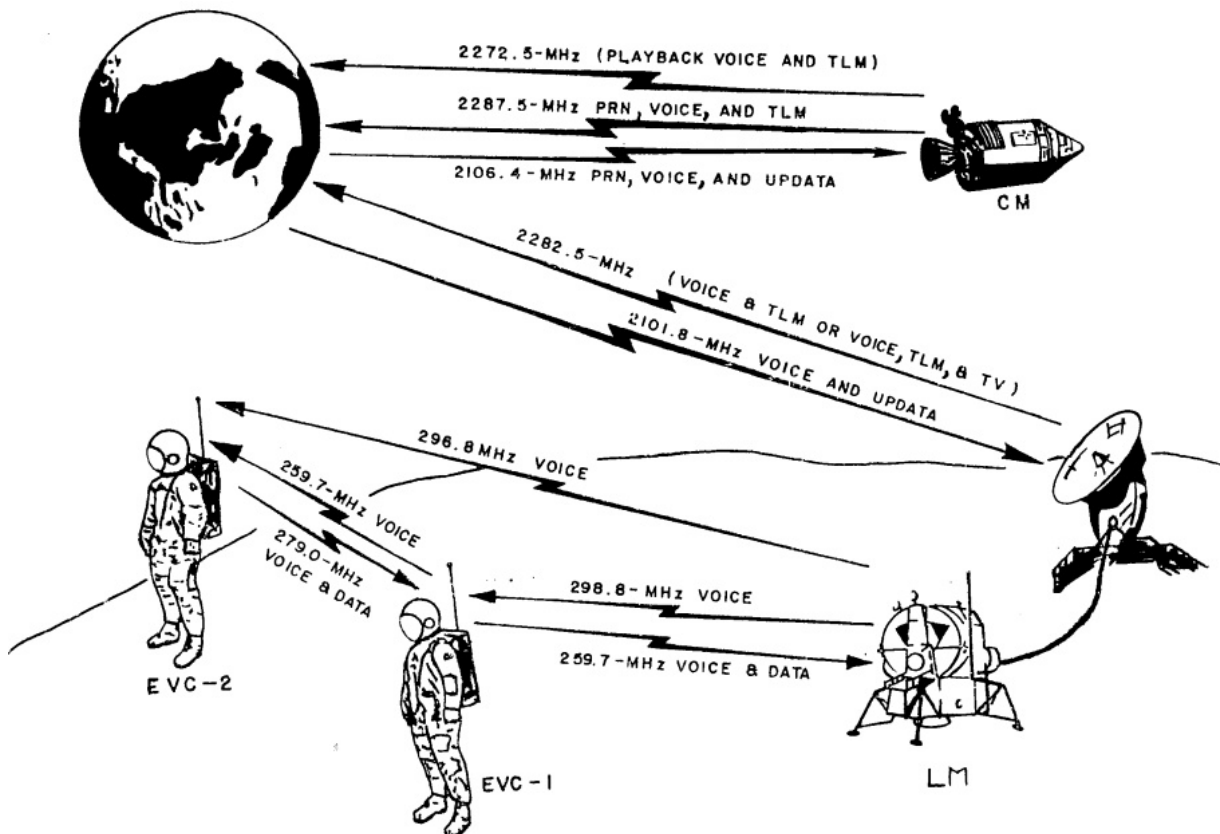


Abbildung 4: Übersicht der Funkverbindungen zwischen Apollo 11 und der Erde (Bild: NASA, Corliss (1974)).

Datenverkehr zwischen Apollo 11 und Erde

Während einer Apollo-Mission wurden Daten zwischen den Raumfahrzeugen und der Bodenkontrolle ausgetauscht. Sensoren schickten Informationen zum technischen Zustand der Ausrüstung sowie der Körperfunktionen der Astronauten zur Erde. Zudem tauschten sich die Astronauten mit der Missionskontrolle per Funkverkehr aus. Weiterhin wurden Fernsehbilder live von der Mondoberfläche zur Erde übermittelt. Dies alles benötigte eine komplexe Struktur aus verschiedenen Systemen zur Datenübertragung, die allmählich seit den ersten Raumflügen etabliert wurde. Der generelle Aufbau des Netzwerks für den Datenverkehr während der Apollo 11-Mission ist in Abb. 5 dargestellt.

Als Empfangs- und Relaisstationen dienten Radioantennen, Satelliten, Flugzeuge und Schiffe, die alle per Kabel- und Funkstrecken sowie Verteilerknoten miteinander verbunden waren. Dies führte neben der Signallaufzeit durch die Entfernung zwischen Erde und Mond zu einer zusätzlichen Verzögerung im Funk- und Datenverkehr.

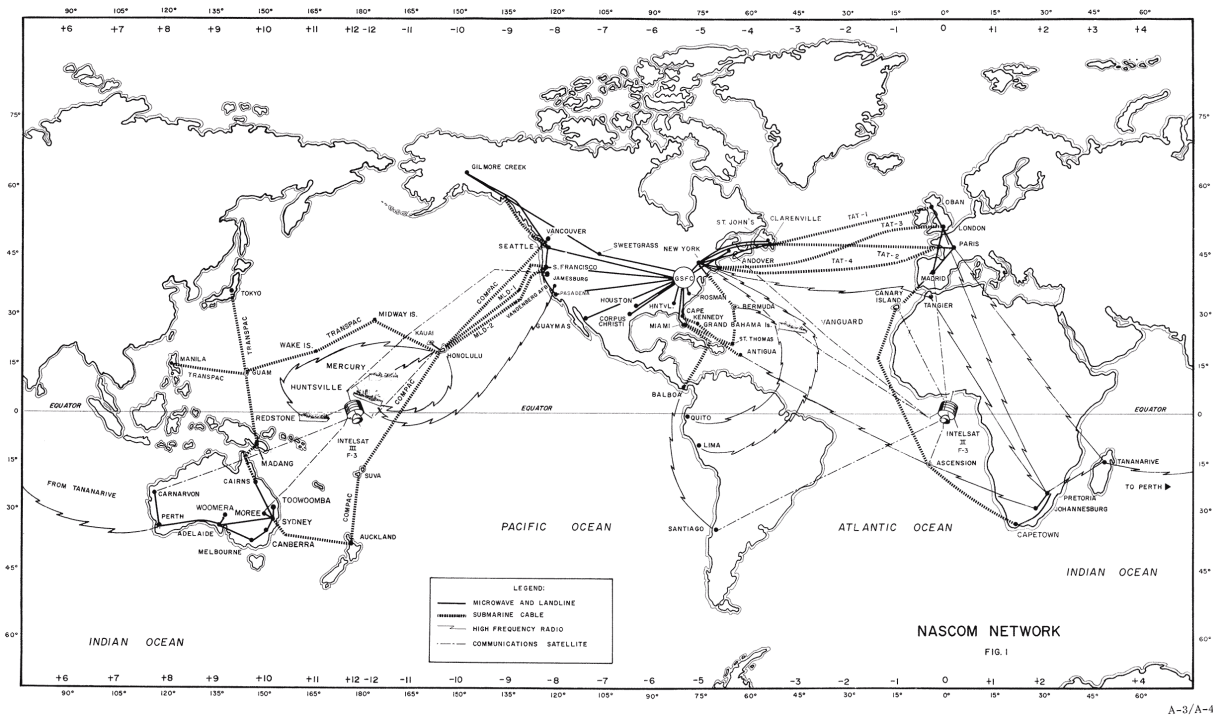


Abbildung 5: Übersichtskarte des Netzwerks von Datenverbindungen auf der Erde während der Apollo 11-Mission (Bild: NASA, Graham, Roberts und Wood (1970)).

Signallaufzeit und Lichtgeschwindigkeit

Elektromagnetische Wellen, wie auch Funk- und Radiowellen, breiten sich im Vakuum stets und in jedem Bezugssystem mit der konstanten Geschwindigkeit $c = 299792458 \text{ m/s}$, der Vakuumlichtgeschwindigkeit aus. Daher lässt sich aus der Laufzeit Δt eines Funksignals im Vakuum die zurückgelegte Strecke Δx ermitteln (Abb. 4).

$$\Delta x = c \cdot \Delta t \quad (1)$$

Unsicherheit der Messung und Statistik

Jede Messung ist geprägt von Unsicherheiten bei der Bestimmung des Messwerts. Diese Unsicherheiten können statistischer oder auch systematischer Natur sein. In der vorliegenden Aufgabe besteht die systematische Unsicherheit darin, dass die Dauer zwischen dem Ausgangssignal und seinem Echo nicht nur von der Signallaufzeit zwischen Mond und Erde bestimmt wird. Zusätzliche Verzögerungen wurden durch die Laufzeiten der Funk- und Kabelstrecken sowie der Signalverarbeitung auf der Erde hervorgerufen. Auch wenn man die Zeit zwischen Signal und Echo exakt messen könnte, ist das Ergebnis systematisch um einen bestimmten Wert verschoben. Dieser Einfluss wird in der vorliegenden Aufgabe zunächst vernachlässigt. Seine Größenordnung wird am Ende der Aufgabe bestimmt.

Statistische Unsicherheiten entspringen der Ungenauigkeit des Messprozesses selbst. Kein Wert kann exakt abgelesen oder bestimmt werden. Dadurch kommt es zu einer Streuung der Messwerte. Um dem wahren Wert x möglichst nahe zu kommen, bedient man sich statistischer Verfahren, die auf einer möglichst großen Anzahl von Messungen beruhen, die im Prinzip alle denselben Wert ergeben müssten, wäre der Messprozess perfekt präzise. Eine Messreihe ist daher eine Stichprobe

aller möglichen (unendlich vielen) Messungen. Geht man von einer zufälligen Verteilung der statistischen Unsicherheit der Einzelmessungen aus, sollten alle Werte gleichmäßig um den wahren Wert x streuen. Das Maß der Streuung ermöglicht eine Angabe über die Genauigkeit des ermittelten Werts.

Um sich dem wahren Wert einer Messreihe anzunähern, bietet sich die Bestimmung des *arithmetischen Mittels* \bar{x} an. \bar{x} ist der Wert den man erhielte, wenn \bar{x} mit der Anzahl der Messwerte n multipliziert denselben Wert ergäbe, wie wenn man alle Messwerte x_i aufaddiert.

$$\begin{aligned}n \cdot \bar{x} &= x_1 + x_2 + \dots + x_n = \sum_{i=1}^n x_i \\ \Leftrightarrow \bar{x} &= \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\end{aligned}\quad (2)$$

Eine Größe, die eine Aussage über die Qualität der Messreihe (Stichprobe) macht, ist die *Standardabweichung* s . Sie beschreibt die Streuung der Messwerte um den Mittelwert.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\quad (3)$$

Allerdings ist der Mittelwert \bar{x} einer Stichprobe nur eine Näherung für den wahren Wert x . Theoretisch gleicht der Mittelwert dem wahren Wert für eine unendliche Anzahl von Messungen. Inwieweit das arithmetische Mittel dem wahren Wert entspricht, wird durch die *Standardabweichung des Mittelwerts SEM* (auch Standardfehler des Mittelwerts) ausgedrückt. Die *SEM* gibt an, wie sehr alle möglichen Mittelwerte unendlich vieler Stichproben um den wahren Wert streuen.

$$SEM = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\quad (4)$$

Insbesondere gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} SEM = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{s}{\sqrt{n}} = 0\quad (5)$$

Das entspricht der vorherigen Aussage, dass für unendlich viele Messungen der Mittelwert dem wahren Wert entspricht. Somit lässt sich für den wahren Wert x schreiben:

$$x = \bar{x} \pm SEM\quad (6)$$

Vorbereitung der Aktivität

Hinweise für Lehrpersonen

Lesen Sie das Kapitel mit den Hintergrundinformationen sorgfältig. Zusätzliche Literatur finden Sie am Ende dieses Dokuments.

Machen Sie sich mit den Aufgaben der Schülerinnen und Schüler vertraut. Fertigen Sie ausreichend Kopien der Arbeitsblätter an. Für die Aktivität benötigen sie Taschenrechner.

Für die Auswertung werden zwingend Computer benötigt. Tablets sind ungeeignet. Die Software *Audacity* ist kostenlos für die Betriebssysteme Windows, MacOS und Linux erhältlich:

<https://www.audacity.de>

Die Nutzung ist intuitiv und schnell zu erlernen. Es ist jedoch ratsam, dass Sie vorab die Auswertung trainieren. Die Benutzeroberfläche ist in Abb. 6 dargestellt. Eine Anleitung finden Sie in der Beschreibung der Aufgabe.

Zusammengefasst wird eine Audiodatei eingeladen und mit der Software grafisch zeitaufgelöst dargestellt. Bei der Datei handelt es sich um eine digitalisierte Version eines Audiomitschnitts während der Apollo 11-Mission, die von der NASA kostenlos zum Download angeboten wird. Diese finden Sie zum Download auf der Projektseite

<https://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung>

oder im Internet Archive:

<https://archive.org/download/Apollo11Audio/175-AAA.mp3>

Weitere Dateien des Funkverkehrs erhalten Sie unter:

<https://archive.org/details/Apollo11Audio>

Die Schülerinnen und Schüler ermitteln mit der Software *Audacity* die Zeitmarken von einzelnen Funksignalen und deren Echos.

Teilen Sie die Schülerinnen und Schüler in Gruppen ein. Optimal wären Zweiergruppen. Die Gruppenstärke orientiert sich aber natürlich auch nach dem Verhältnis zwischen der Anzahl der vorhandenen Computer und den Lernenden. Möglichst sollten Kopfhörer bei der Auswertung der Audiodatei benutzt werden sollten, um die anderen Gruppen nicht zu beeinträchtigen. Beachten Sie, dass dadurch immer nur ein Mitglied einer Gruppe die Radiosignale hören kann. Soweit es die Zeit erlaubt, können sich die Gruppenmitglieder bei der Bedienung der Software abwechseln. Durch die Visualisierung der Töne können alle Mitglieder einer Gruppe gemeinsam die Daten analysieren.

Für eine Teilaufgabe (Ermittlung der tatsächlichen Mondentfernung am 21. Juli 1969) ist optional eine Internetverbindung erforderlich. Falls das nicht möglich ist, wird der Wert in der Aufgabe vorgegeben.

Thematische Einführung (Vorschlag)

Informationen und Videos zur Einstimmung auf das Apolloprogramm helfen bei der Annäherung an das Thema.

DLR: Best of Apollo - 50 Jahre Mondlandung
https://youtu.be/8iNq_S807K4 (3:41 min)

DLR_next – Apollo 11 – Mond Special
www.dlr.de/next-apollo

Fragen Sie die Schülerinnen und Schüler, was Sie über die Mondlandungen und das Apollo-Programm wissen und was sie daran interessiert. Stichpunkte können an der Tafel gesammelt werden.

Falls Sie ausreichend Zeit haben, lassen Sie die Lernenden im Internet über Apollo, insbesondere Apollo 11 recherchieren. Die Thematik lässt sich sehr gut durch Referate zu verschiedenen Themen der bemannten Raumfahrt innerhalb eines längeren Projekts behandeln.

Einen guten Überblick über die verschiedenen Phasen einer Apollo-Mission ermöglichen die folgenden drei Animationsvideos. Sie wurden in englischer Sprache verfasst, beinhalten jedoch deutsche Untertitel.

Wie das Apollo Raumschiff funktioniert: Teile 1 - 3
<https://youtu.be/8dpkmUjJ8xU> (3:57 min, Englisch)
<https://youtu.be/tl1KPjxKVqk> (5:17 min, Englisch)
https://youtu.be/qt_xoCXLXnI (4:01 min, Englisch)

Die originale Fernsehübertragung des Starts von Apollo 11 vom 16. Juli 1969 ist im folgenden Video zu sehen.

1969 Apollo 11 Saturn V launch, 1969 TV broadcast
<https://youtu.be/xdxzMPi19sU> (38:39 min, Englisch)

Die originalen Fernsehbilder der Apollo 11-Mission vom Mond werden von der NASA unter folgendem Link angeboten.

Apollo 11 HD Videos
https://www.nasa.gov/multimedia/hd/apollo11_hdpage.html

Alle Fotos, die jemals während des Apollo-Programms gemacht wurden, sind im Project Apollo Archive gesammelt und sind für jeden frei verfügbar.

Project Apollo Archive
<https://www.flickr.com/photos/projectapolloarchive/albums>

Aufgaben

Ziel

Viele Methoden zur Bestimmung der Entfernung des Mondes sind schwierig und benötigen einen großen technischen Aufwand. In dieser Aufgabe benutzen Sie das Konzept der Messung einer Signallaufzeit, dessen Geschwindigkeit bekannt ist.

Während der Apollo 11-Mission tauschten die Astronauten Informationen über Funk mit der Bodenstation auf der Erde aus. Funkwellen sind elektromagnetische Wellen wie das Licht. Sie breiten sich daher mit Lichtgeschwindigkeit aus.

An einigen Stellen der Gespräche kam es zu Echos. Gesprochene Wörter, die die Bodenkontrolle an die Crew von Apollo 11 geschickt hatte, wurden dort manchmal vom Mikrofon eines Astronauten erfasst und wieder zur Bodenstation zurück geschickt. Sie kamen also zugleich mit den Kommentaren der Astronauten auf der Erde an und erscheinen in der Aufzeichnung als Echo. Die Verzögerung zwischen der Originalnachricht und dem Echo entspricht damit der doppelten Signallaufzeit zwischen Erde und Mond.

Alle Funkverbindungen wurden während der Mondmission aufgezeichnet und stehen heute in digitalisierter Form zur Verfügung.

<https://archive.org/details/Apollo11Audio>

Sie werden den Sprechfunk an einigen Stellen auswerten und die Verzögerung zwischen den Nachrichten und ihren Echos bestimmen. Mit der Lichtgeschwindigkeit können Sie damit die Entfernung berechnen. Die Analyse erfolgt mit der Software *Audacity*, die den Ton grafisch darstellt. Einzelne Wörter oder gar Silben können damit markiert und deren Zeiten ermittelt werden.

Bedienung von Audacity

Audacity ist eine Software zum Schneiden und Bearbeiten von Audiodateien. Für die Auswertung sind aber nur einige Funktionen notwendig. Die für diese Aufgabe benötigte Audiodatei

<https://archive.org/download/Apollo11Audio/175-AAA.mp3>

wird Ihnen zur Verfügung gestellt. Sie können sie einladen, indem Sie entweder über den Menüpunkt Datei die Audiodatei auswählen oder einfach die Datei aus einem externen Dateimanager (z. B. Explorer bei Windows) in den Arbeitsbereich ziehen. Die Benutzeroberfläche nach dem Laden dieser Datei ist in Abb. 6 dargestellt.

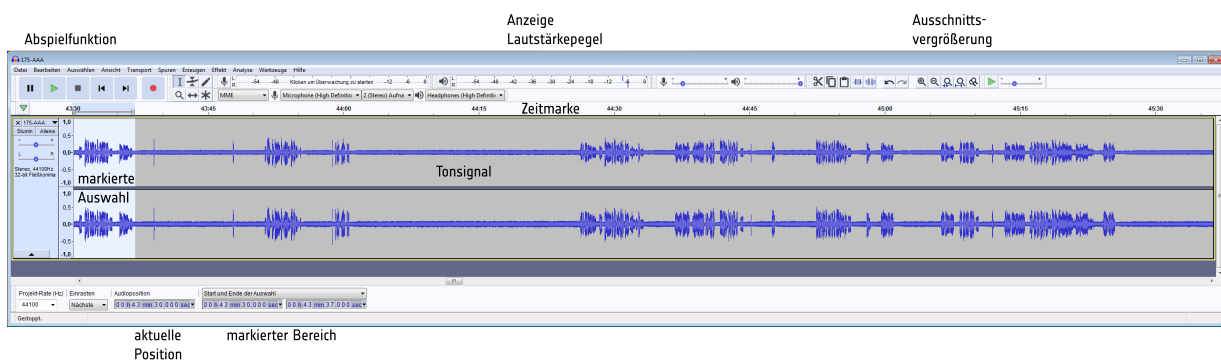


Abbildung 6: Benutzeroberfläche der Audioschnittsoftware *Audacity* mit Beschriftung der wichtigsten Funktionen.

Die einzelnen Tonkanäle werden im Arbeitsbereich dargestellt. Oberhalb der Darstellung des Tonsignals ist die Zeit ab Beginn der Datei angezeigt. Die Menüzeile enthält Schaltflächen zum Abspielen der Datei (links) und zum Hinein- und Herauszoomen (rechts). Klickt man mit der linken Maustaste in den Bereich des Tonsignals, kann die Audiodatei ab dieser Zeitmarke abgespielt werden. Diese Zeitmarke wird unten links als aktuelle Position angegeben.

Zusätzlich kann man mit der Computermaus durch Linksklicken und Ziehen einen Bereich markieren. Die Zeitspanne dieses Bereichs wird ebenfalls unten angezeigt. Beim Abspielen wird dann lediglich dieser Bereich wiedergegeben. Zudem lässt sich mit der Lupe mit den nach außen angedeuteten Pfeilen der Ausschnitt auf die verfügbare Ansicht vergrößern (Abb. 7). Das ist hilfreich, wenn bei der Auswertung die Signale einzelner Wörter und Silben identifiziert werden müssen. Die Lupe mit den nach innen gerichteten Pfeilen stellt das gesamte Audiosignal dar. Weiteres Hineinzoomen ist jederzeit möglich (Abb. 8).

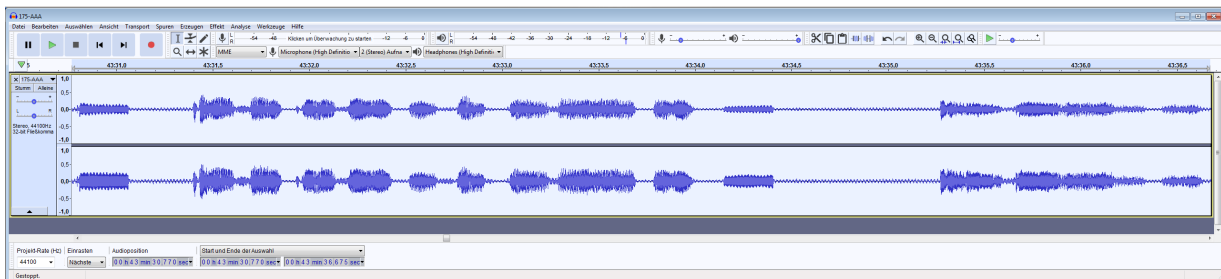


Abbildung 7: Vergrößerte Darstellung des Funkverkehrs.

Statt mit der Maus kann der zu markierende Bereich als Zahlenwerte für den Anfangs- und den Endzeitpunkt in der unteren Eingabemaske eingetragen werden.

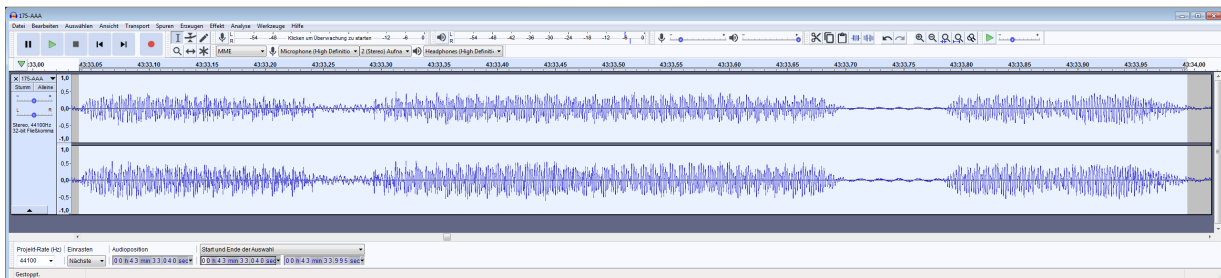


Abbildung 8: Vergrößerte Darstellung des Funkverkehrs.

Analyse der Audiodaten

Laden Sie die Audiodatei ein und bestimmen Sie mittels *Audacity* die Zeitintervalle zwischen verschiedenen Funkechos. Textpassagen, die Funkechos enthalten, sind in Tab. 1 aufgeführt.

Sie können unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Signallaufzeit ausprobieren. Oft ist es möglich, den Beginn oder das Ende einer Silbe mit entsprechendem Echo zu identifizieren. An vielen Stellen können Sie sogar sowohl den Anfang und das Ende einer Passage mit Echo ausfindig machen. Markieren Sie diese Stellen so gut Sie können und notieren Sie sich die Zeiten (Zeitangabe in der Benutzeroberfläche unten).

Tabelle 1: Liste mit Auszügen des Funkverkehrs zwischen der Bodenstation in Houston und der Apollo 11-Crew mit Echos. Die Zeitangaben der Audiodatei 175-AAA.mp3 sind in Stunden (h), Minuten (m) und Sekunden (s) ab Beginn der Datei. 0h00m00s entspricht dem 21.07.1969, 2h56m27s UT^d.

Textpassage	Zeitmarke	
	Beginn	Ende
Okay, this looks good, Neil.	0h34m25s	0h34m30s
Columbia, Columbia! This is Houston AOS. Over.	0h43m30s	0h43m37s
<i>Längere Unterhaltung zwischen Houston und Michael Collins.</i>	0h44m28s	0h45m26s
Sounded a little wet.	1h00m05s	1h00m10s
Columbia, this is Houston. Over.	1h01m12s	1h01m18s
Columbia, Columbia! This is Houston. Over.	1h45m51s	1h45m57s

Danach berechnen Sie für alle Signal-Echo-Paare die Zeitdifferenzen. Dadurch erhalten Sie eine Messreihe, die für jede analysierte Stelle eine Zeitdauer enthält.

Bestimmung des Mittelwerts

Wie auf Seite 5f. beschrieben, ist der Mittelwert eine gute Näherung für den gesuchten wahren Wert einer Messreihe. Er wird berechnet durch (Gl. 2):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ermitteln Sie den Mittelwert der von Ihnen erstellten Messreihe der Signallaufzeiten entsprechend dieser Rechenvorschrift. Optional können Sie eine Software zur Tabellenkalkulation wie MS Excel benutzen. Der Mittelwert wird dort mit der Funktion MITTELWERT bzw. AVERAGE berechnet.

Optional: Bestimmung der Standardabweichung

Berechnen Sie mit den Gleichungen 3 und 4 die Standardabweichungen der Messreihe und des Mittelwerts. Optional können Sie eine Software zur Tabellenkalkulation wie MS Excel benutzen. Die Standardabweichung der Messreihe wird dort mit der Funktion STABW.S bzw. STDEV.S berechnet. Die Länge der Messreihe wird durch die Funktion ANZAHL bzw. COUNT bestimmt.

Schreiben Sie gemäß Gl. 6 die durch Ihre Auswertung abgeleitete Signallaufzeit nieder.

Berechnung der Mondentfernung

Berechnen Sie nun mit Ihren Ergebnissen mittels Gl. 1 die Entfernung zwischen Erde und Mond. Bedenken Sie, dass die Funksignale den Weg zweimal durchlaufen. Geben Sie die Strecke in Kilometern an.

Option 1: Die tatsächliche Entfernung des Mondes zur Erde

Die mittlere Entfernung des Mondes beträgt für den Zeitraum der Messungen:

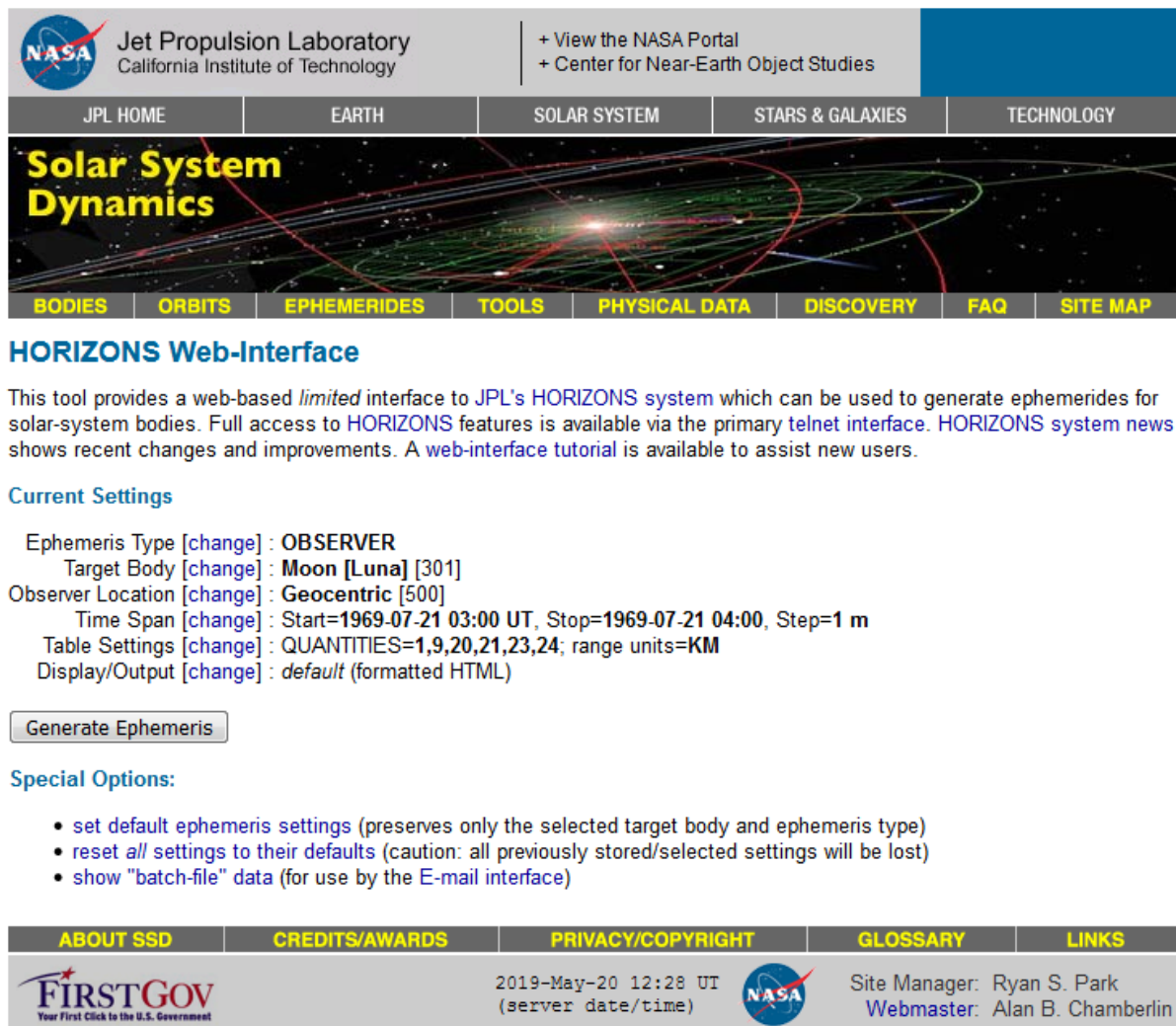
$$387932 \text{ km} \quad (7)$$

Option 2: Bestimmung der tatsächlichen Entfernung des Mondes zur Erde

Im Mittel ist der Mond etwa 384.400 km von der Erde entfernt. Wegen der leicht elliptischen Mondbahn verändert sich der Abstand jedoch ständig. Um die Analyse der Apollo-Funksignale zu verifizieren, wird der für den entsprechenden Zeitpunkt exakte Wert benötigt. Diesen kann man sich über eine Online-Abfrage berechnen lassen. Öffnen Sie dazu die Webseite:

<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>

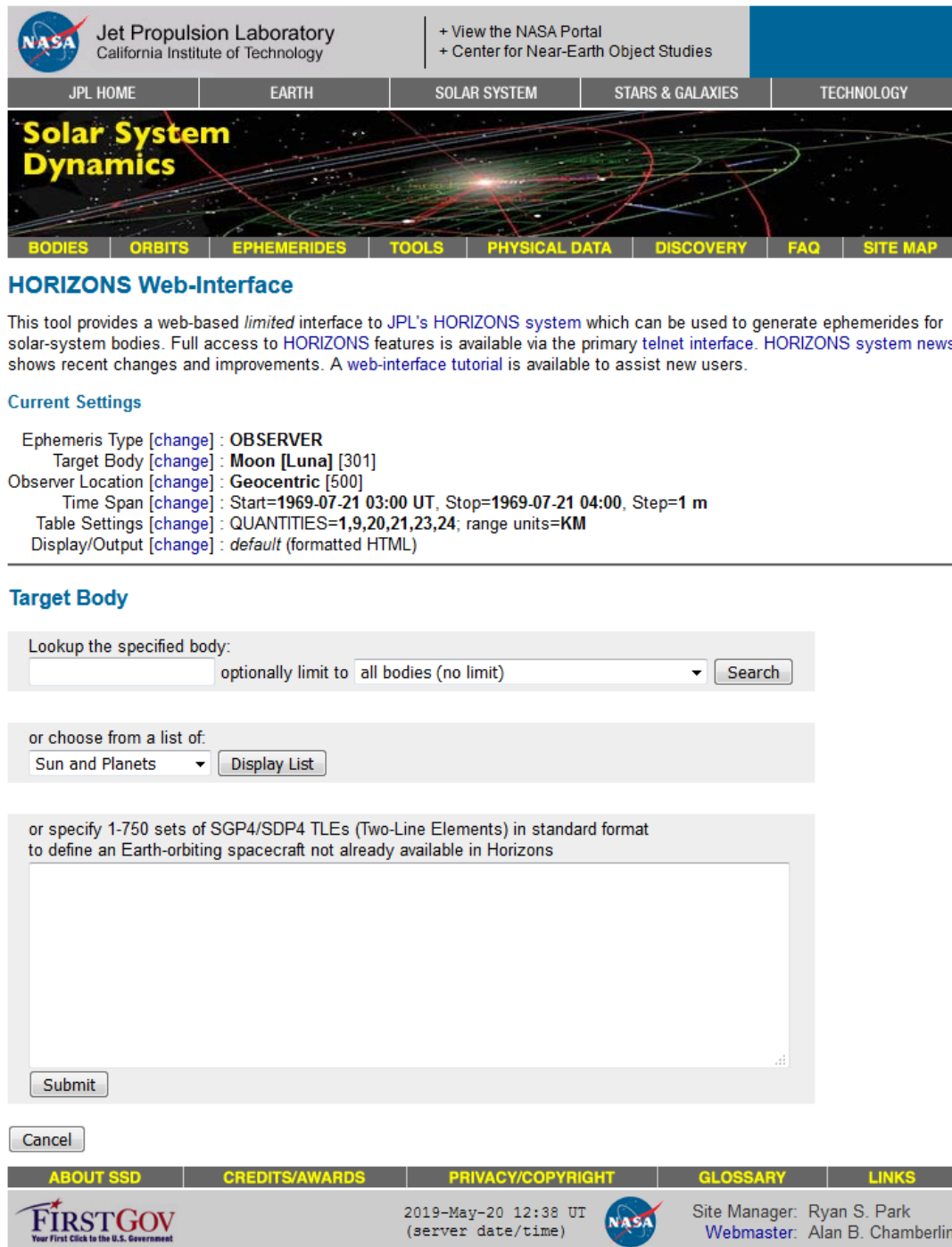
Um die Entfernung des Mondes zu ermitteln, müssen Sie zunächst die Ausgabeparameter (Abb. 9) einstellen. Das erfolgt durch einen Klick auf [change](#) neben den aufgelisteten Kategorien.



The screenshot shows the JPL Horizons web interface. At the top, there is a navigation bar with links for JPL HOME, EARTH, SOLAR SYSTEM, STARS & GALAXIES, and TECHNOLOGY. Below this is a banner for 'Solar System Dynamics' with sub-links for BODIES, ORBITS, EPHEMERIDES, TOOLS, PHYSICAL DATA, DISCOVERY, FAQ, and SITE MAP. The main content area displays 'Current Settings' for the ephemeris tool, including options for Ephemeris Type (OBSERVER), Target Body (Moon [Luna] [301]), Observer Location (Geocentric [500]), Time Span (Start=1969-07-21 03:00 UT, Stop=1969-07-21 04:00, Step=1 m), and Table Settings (QUANTITIES=1,9,20,21,23,24; range units=KM). A 'Generate Ephemeris' button is visible. Below the settings, there are 'Special Options' such as 'set default ephemeris settings', 'reset all settings to their defaults', and 'show "batch-file" data'. At the bottom, there is a footer with links for ABOUT SSD, CREDITS/AWARDS, PRIVACY/COPYRIGHT, GLOSSARY, and LINKS, along with a NASA logo and contact information for the Site Manager (Ryan S. Park) and Webmaster (Alan B. Chamberlin).

Abbildung 9: Benutzeroberfläche des JPL/Horizons-Webtools zur Bestimmung der Mondentfernung.

Bei Target Body geben Sie in der neu erscheinenden Eingabemaske (Abb. 10) unter *Lookup the specified body* den Namen Luna ein und klicken auf [Submit](#).



Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

+ View the NASA Portal
+ Center for Near-Earth Object Studies

JPL HOME | EARTH | SOLAR SYSTEM | STARS & GALAXIES | TECHNOLOGY

Solar System Dynamics

BODIES | ORBITS | EPHEMERIDES | TOOLS | PHYSICAL DATA | DISCOVERY | FAQ | SITE MAP

HORIZONS Web-Interface

This tool provides a web-based *limited* interface to JPL's HORIZONS system which can be used to generate ephemerides for solar-system bodies. Full access to HORIZONS features is available via the primary [telnet interface](#). HORIZONS system news shows recent changes and improvements. A [web-interface tutorial](#) is available to assist new users.

Current Settings

Ephemeris Type [\[change\]](#) : OBSERVER
 Target Body [\[change\]](#) : Moon [Luna] [301]
 Observer Location [\[change\]](#) : Geocentric [500]
 Time Span [\[change\]](#) : Start=1969-07-21 03:00 UT, Stop=1969-07-21 04:00, Step=1 m
 Table Settings [\[change\]](#) : QUANTITIES=1,9,20,21,23,24; range units=KM
 Display/Output [\[change\]](#) : default (formatted HTML)

Target Body

Lookup the specified body:
 optionally limit to

or choose from a list of:

or specify 1-750 sets of SGP4/SDP4 TLEs (Two-Line Elements) in standard format to define an Earth-orbiting spacecraft not already available in Horizons

ABOUT SSD | CREDITS/AWARDS | PRIVACY/COPYRIGHT | GLOSSARY | LINKS

FIRSTGOV
Your First Click to the U.S. Government

2019-May-20 12:38 UT
(server date/time)

NASA

Site Manager: Ryan S. Park
Webmaster: Alan B. Chamberlin

Abbildung 10: Benutzeroberfläche des JPL/Horizons-Webtools zur Festlegung des Objekts.

Bei Time Span geben Sie bitte als Startzeitpunkt 1969-07-21 03:30 UT, als Endzeitpunkt 1969-07-21 05:00 und als Schrittweite 1 Minute an.

Bei den Table Settings (Abb. 11) achten Sie darauf, dass der Parameter Nr. 20 (*Observer range & range-rate*) ausgewählt und bei den *range units* (untere Tabelle) kilometers eingestellt ist. Klicken Sie dann auf **Use settings**.

Table Settings

Select observer quantities from table below:
[switch to manual-entry list-of-numbers form]

Optionally preset observer quantities selection using one of the following:

1. <input checked="" type="checkbox"/> Astrometric RA & DEC	16. <input type="checkbox"/> Sub-Sun position angle & distance	* 31. <input type="checkbox"/> Observer ecliptic lon. & lat.
* 2. <input type="checkbox"/> Apparent RA & DEC	17. <input type="checkbox"/> North Pole position angle & distance	32. <input type="checkbox"/> North pole RA & DEC
3. <input type="checkbox"/> Rates; RA & DEC	18. <input type="checkbox"/> Heliocentric ecliptic lon. & lat.	33. <input type="checkbox"/> Galactic longitude & latitude
* 4. <input type="checkbox"/> Apparent AZ & EL	19. <input type="checkbox"/> Heliocentric range & range-rate	34. <input type="checkbox"/> Local apparent SOLAR time
5. <input type="checkbox"/> Rates; AZ & EL	20. <input type="checkbox"/> Observer range & range-rate	35. <input type="checkbox"/> Earth->obs. site light-time
6. <input type="checkbox"/> Satellite X & Y, pos. angle	21. <input checked="" type="checkbox"/> One-way (down-leg) light-time	> 36. <input type="checkbox"/> RA & DEC uncertainty
7. <input type="checkbox"/> Local apparent sidereal time	22. <input type="checkbox"/> Speed wrt Sun & observer	> 37. <input type="checkbox"/> Plane-of-sky error ellipse
8. <input type="checkbox"/> Airmass & extinction	23. <input checked="" type="checkbox"/> Sun-Observer-Target ELONG angle	> 38. <input type="checkbox"/> POS uncertainty (RSS)
9. <input checked="" type="checkbox"/> Visual mag. & Surface Brght	24. <input checked="" type="checkbox"/> Sun-Target-Observer ~PHASE angle	> 39. <input type="checkbox"/> Range & range-rate 3-sigmas
10. <input type="checkbox"/> Illuminated fraction	25. <input type="checkbox"/> Target-Observer-Moon angle/ Illum%	> 40. <input type="checkbox"/> Doppler & delay 3-sigmas
11. <input type="checkbox"/> Defect of illumination	26. <input type="checkbox"/> Observer-Primary-Target angle	41. <input type="checkbox"/> True anomaly angle
12. <input type="checkbox"/> Satellite angular separ/vis.	27. <input type="checkbox"/> Sun-Target radial & -vel pos. angle	42. <input type="checkbox"/> Local apparent hour angle
13. <input type="checkbox"/> Target angular diameter	28. <input type="checkbox"/> Orbit plane angle	43. <input type="checkbox"/> PHASE angle & bisector
14. <input type="checkbox"/> Observer sub-lon & sub-lat	29. <input type="checkbox"/> Constellation ID	
15. <input type="checkbox"/> Sun sub-longitude & sub-latitude	30. <input type="checkbox"/> Delta-T (TDB - UT)	

Notes:
* affected by optional atmospheric refraction setting (below)
> statistical value that uses orbit covariance if available

Observer quantities are described in the [HORIZONS documentation](#).

Optional observer-table settings:

date/time format :	calendar date/time -- display date/time in year-month-day and/or Julian-day format
time digits :	minutes (HH:MM) -- controls output precision of time
angle format :	hours/degrees minutes seconds -- select RA/Dec output format
output units :	km & km/s -- units for most output quantities
range units :	kilometers -- units for range-type quantities
refraction model :	airless model (no refraction) -- select atmospheric refraction model
airmass cut-off :	-- suppress output when airmass is greater than limit [1 to 38]
elevation cutoff :	(deg) -- suppress output when object elevation is less than limit [-90 to 90]
solar elong. cut-off :	- (deg) -- suppress output when solar elongation is outside (min,max) range [0 to 180, min to 180]
hour angle cutoff :	(h) -- suppress output when the local hour angle (LHA) exceeds value [0 to 12]
angular rate cutoff :	(arcsec/h) -- suppress output when the RA/Dec angular rate exceeds this value [0 to 100000]
suppress range-rate :	<input type="checkbox"/> -- suppress range-rate for range/range-rate output
skip daylight :	<input type="checkbox"/> -- suppress output during daylight
extra precision :	<input type="checkbox"/> -- output addition digits for RA/Dec quantities
RTS flag :	disable -- output data only at target rise/transit/set (RTS)
reference system :	ICRF/J2000.0 -- reference frame for geometric and astrometric quantities
CSV format :	<input type="checkbox"/> -- output data in Comma-Separated-Values (CSV) format
object page :	<input checked="" type="checkbox"/> -- include object information/data page on output

Abbildung 11: Benutzeroberfläche des JPL/Horizons-Webtools zur Festlegung der zu berechnenden Parameter.

In der Hauptansicht können Sie nun auf **Generate Ephemerides** klicken, und Sie erhalten die entsprechende Liste der Parameter (Abb. 12). Die Entfernung zwischen Erde und Mond (Parameter: δ_{ETM}) bezieht sich auf die jeweiligen Mittelpunkte der Himmelskörper.

```

Ephemeris / WWW_USER Mon May 20 12:30:47 2019 Pasadena, USA / Horizons
-----
Target body name: Moon (301) (source: DE431mx)
Center body name: Earth (399) (source: DE431mx)
Center-site name: GEOCENTRIC
-----
Start time : A.D. 1969-Jul-21 03:00:00.0000 UT
Stop time : A.D. 1969-Jul-21 04:00:00.0000 UT
Step-size : 1 minutes
-----
Target pole/equ : IAU MOON (East-longitude positive)
Target radii : 1787.4 x 1787.4 x 1787.4 km (Equator, meridian, pole)
Center geocentric : 0.0000000,0.0000000,0.0000000 (E-lon(deg),Eaz(deg),Alt(km))
Center cylindrical : 0.0000000,0.0000000,0.0000000 (E-lon(deg),Dxy(km),Dz(km))
Center pole/equ : High-precision EOP model (East-longitude positive)
Center radii : 6378.1 x 6378.1 x 6356.8 km (Equator, meridian, pole)
Target primary : Earth
Vis. interferer : MOON (R_eq=1787.400) km (source: DE431mx)
Rel. light bnd GM : Sun, EARTH (source: DE431mx)
Rel. light bnd GM : 1.3271E+11, 3.9860E+05 km^3/s^2
Atmos refraction: NO (AIRLESS)
RA format : HMS
Time format : CAL
EOP file : eop.190517-p190808
EOP coverage : DBM-BASED 1962-03-20 TO 2019-MAY-17. PREDICTS-> 2019-AUG-07
Units conversion: 1 au=149597870.700 km, c=299792.458 km/s, 1 day=86400.0 s
Table cut-offs 1: Elevation (-90.0deg<=NO), Airmass (>38.000<=NO), Daylight (NO)
Table cut-offs 2: Solar elongation ( 0.0,180.0<=NO), Local Hour Angle ( 0.0<=NO)
Table cut-offs 3: RA/DEC angular rate ( 0.0<=NO)
-----
Date (UT) HR:MM R.A. (ICRF/J2000.0) DEC AppMag S-brst delta deldot 1-way_L1 S-Q-T /r S-T-O
-----
$$$$
1969-Jul-21 03:00 12 41 03.09 -06 13 54.5 -9.38 5.87 8.8138999596E+05 -0.0574388 0.021578 72.2775 /T 106.5924
1969-Jul-21 03:01 12 41 05.00 -06 14 09.5 -9.38 5.87 8.8132554918E+05 -0.0574431 0.021578 72.2857 /T 106.5741
1969-Jul-21 03:02 12 41 06.90 -06 14 24.5 -9.38 5.87 8.8132102141E+05 -0.0574474 0.021578 72.2939 /T 106.5659
1969-Jul-21 03:03 12 41 08.81 -06 14 39.6 -9.38 5.87 8.8128654858E+05 -0.0574517 0.021578 72.3022 /T 106.5576
1969-Jul-21 03:04 12 41 10.71 -06 14 54.6 -9.38 5.87 8.8128195450E+05 -0.0574561 0.021577 72.3104 /T 106.5494
1969-Jul-21 03:05 12 41 12.62 -06 15 09.6 -9.38 5.87 8.8121775947E+05 -0.0574604 0.021577 72.3187 /T 106.5411
1969-Jul-21 03:06 12 41 14.52 -06 15 24.7 -9.38 5.87 8.8118311401E+05 -0.0574647 0.021577 72.3269 /T 106.5329
1969-Jul-21 03:07 12 41 16.43 -06 15 39.7 -9.38 5.87 8.8114863036E+05 -0.0574690 0.021577 72.3352 /T 106.5246
1969-Jul-21 03:08 12 41 18.33 -06 15 54.8 -9.38 5.87 8.8111414447E+05 -0.0574733 0.021577 72.3434 /T 106.5164
1969-Jul-21 03:09 12 41 20.24 -06 16 09.8 -9.38 5.87 8.8107965862E+05 -0.0574777 0.021576 72.3516 /T 106.5081
1969-Jul-21 03:10 12 41 22.14 -06 16 24.8 -9.38 5.87 8.8104516305E+05 -0.0574820 0.021576 72.3599 /T 106.4999
1969-Jul-21 03:11 12 41 24.05 -06 16 39.9 -9.38 5.87 8.8101067132E+05 -0.0574863 0.021576 72.3681 /T 106.4917
1969-Jul-21 03:12 12 41 25.95 -06 16 54.9 -9.38 5.87 8.8097617505E+05 -0.0574906 0.021576 72.3764 /T 106.4834
1969-Jul-21 03:13 12 41 27.86 -06 17 10.0 -9.38 5.87 8.8094167616E+05 -0.0574949 0.021576 72.3846 /T 106.4752
1969-Jul-21 03:14 12 41 29.77 -06 17 25.0 -9.38 5.87 8.8090717477E+05 -0.0574992 0.021576 72.3929 /T 106.4669
1969-Jul-21 03:15 12 41 31.67 -06 17 40.0 -9.39 5.87 8.8087267067E+05 -0.0575035 0.021575 72.4011 /T 106.4587
1969-Jul-21 03:16 12 41 33.58 -06 17 55.1 -9.39 5.87 8.8083816499E+05 -0.0575079 0.021575 72.4093 /T 106.4504
1969-Jul-21 03:17 12 41 35.48 -06 18 10.1 -9.39 5.87 8.8080365947E+05 -0.0575122 0.021575 72.4176 /T 106.4422
1969-Jul-21 03:18 12 41 37.39 -06 18 25.1 -9.39 5.87 8.8076914428E+05 -0.0575165 0.021575 72.4258 /T 106.4339
1969-Jul-21 03:19 12 41 39.30 -06 18 40.2 -9.39 5.87 8.8073462824E+05 -0.0575208 0.021575 72.4341 /T 106.4257
1969-Jul-21 03:20 12 41 41.20 -06 18 55.2 -9.39 5.87 8.8070011144E+05 -0.0575251 0.021574 72.4423 /T 106.4174
1969-Jul-21 03:21 12 41 43.11 -06 19 10.3 -9.39 5.87 8.8066559181E+05 -0.0575294 0.021574 72.4506 /T 106.4092
1969-Jul-21 03:22 12 41 45.01 -06 19 25.3 -9.39 5.87 8.8063106977E+05 -0.0575337 0.021574 72.4588 /T 106.4009
1969-Jul-21 03:23 12 41 46.92 -06 19 40.3 -9.39 5.87 8.8059654948E+05 -0.0575380 0.021574 72.4670 /T 106.3927
1969-Jul-21 03:24 12 41 48.83 -06 19 55.4 -9.39 5.87 8.8056201767E+05 -0.0575423 0.021574 72.4753 /T 106.3844
1969-Jul-21 03:25 12 41 50.73 -06 20 10.4 -9.39 5.87 8.8052748767E+05 -0.0575466 0.021573 72.4835 /T 106.3762
1969-Jul-21 03:26 12 41 52.64 -06 20 25.4 -9.39 5.87 8.8049295515E+05 -0.0575509 0.021573 72.4918 /T 106.3679
1969-Jul-21 03:27 12 41 54.55 -06 20 40.5 -9.39 5.87 8.8045842200E+05 -0.0575552 0.021573 72.5000 /T 106.3597
1969-Jul-21 03:28 12 41 56.45 -06 20 55.5 -9.39 5.87 8.8042388244E+05 -0.0575595 0.021573 72.5083 /T 106.3514
1969-Jul-21 03:29 12 41 58.36 -06 21 10.5 -9.39 5.87 8.8038934211E+05 -0.0575638 0.021573 72.5165 /T 106.3432
1969-Jul-21 03:30 12 42 00.27 -06 21 25.6 -9.38 5.87 8.8035480593E+05 -0.0575681 0.021572 72.5248 /T 106.3349
1969-Jul-21 03:31 12 42 02.17 -06 21 40.6 -9.39 5.87 8.8032028399E+05 -0.0575724 0.021572 72.5330 /T 106.3267
1969-Jul-21 03:32 12 42 04.08 -06 21 55.6 -9.39 5.87 8.8028576059E+05 -0.0575767 0.021572 72.5412 /T 106.3184
1969-Jul-21 03:33 12 42 05.99 -06 22 10.7 -9.39 5.87 8.8025123832E+05 -0.0575810 0.021572 72.5495 /T 106.3102
1969-Jul-21 03:34 12 42 07.89 -06 22 25.7 -9.39 5.87 8.8021670622E+05 -0.0575853 0.021572 72.5577 /T 106.3019
1969-Jul-21 03:35 12 42 09.80 -06 22 40.7 -9.39 5.87 8.8018218465E+05 -0.0575896 0.021571 72.5660 /T 106.2937
1969-Jul-21 03:36 12 42 11.71 -06 22 55.8 -9.38 5.87 8.8014766322E+05 -0.0575939 0.021571 72.5742 /T 106.2854
1969-Jul-21 03:37 12 42 13.62 -06 23 10.8 -9.39 5.87 8.8011314173E+05 -0.0575982 0.021571 72.5825 /T 106.2772
1969-Jul-21 03:38 12 42 15.52 -06 23 25.8 -9.39 5.87 8.8007862038E+05 -0.0576025 0.021571 72.5907 /T 106.2689
1969-Jul-21 03:39 12 42 17.43 -06 23 40.9 -9.39 5.87 8.8004409797E+05 -0.0576068 0.021571 72.5990 /T 106.2607
1969-Jul-21 03:40 12 42 19.34 -06 23 55.9 -9.40 5.87 8.8000957229E+05 -0.0576111 0.021571 72.6072 /T 106.2524
1969-Jul-21 03:41 12 42 21.25 -06 24 10.9 -9.40 5.87 8.7997504630E+05 -0.0576154 0.021570 72.6155 /T 106.2442
1969-Jul-21 03:42 12 42 23.15 -06 24 26.0 -9.40 5.87 8.7994052042E+05 -0.0576197 0.021570 72.6237 /T 106.2359
1969-Jul-21 03:43 12 42 25.06 -06 24 41.0 -9.40 5.87 8.7990599507E+05 -0.0576240 0.021570 72.6320 /T 106.2277
1969-Jul-21 03:44 12 42 26.97 -06 24 56.0 -9.40 5.87 8.7987147029E+05 -0.0576283 0.021570 72.6402 /T 106.2194
1969-Jul-21 03:45 12 42 28.88 -06 25 11.1 -9.40 5.87 8.7983694476E+05 -0.0576326 0.021570 72.6484 /T 106.2112
1969-Jul-21 03:46 12 42 30.78 -06 25 26.1 -9.40 5.87 8.7980141638E+05 -0.0576369 0.021569 72.6567 /T 106.2029
1969-Jul-21 03:47 12 42 32.69 -06 25 41.1 -9.40 5.87 8.7976689179E+05 -0.0576411 0.021569 72.6649 /T 106.1947
1969-Jul-21 03:48 12 42 34.60 -06 25 56.2 -9.40 5.86 8.7973236697E+05 -0.0576454 0.021569 72.6732 /T 106.1864
1969-Jul-21 03:49 12 42 36.51 -06 26 11.2 -9.40 5.86 8.7969784205E+05 -0.0576496 0.021569 72.6814 /T 106.1782
1969-Jul-21 03:50 12 42 38.42 -06 26 26.2 -9.40 5.86 8.7966331717E+05 -0.0576539 0.021569 72.6897 /T 106.1699
1969-Jul-21 03:51 12 42 40.32 -06 26 41.3 -9.40 5.86 8.7962880448E+05 -0.0576582 0.021568 72.6979 /T 106.1617
1969-Jul-21 03:52 12 42 42.23 -06 26 56.3 -9.40 5.86 8.7959429303E+05 -0.0576625 0.021568 72.7062 /T 106.1534
1969-Jul-21 03:53 12 42 44.14 -06 27 11.3 -9.40 5.86 8.7955978032E+05 -0.0576668 0.021568 72.7144 /T 106.1451
1969-Jul-21 03:54 12 42 46.05 -06 27 26.3 -9.40 5.86 8.7952526549E+05 -0.0576711 0.021568 72.7227 /T 106.1369
1969-Jul-21 03:55 12 42 47.96 -06 27 41.4 -9.40 5.86 8.7949075061E+05 -0.0576753 0.021568 72.7309 /T 106.1286
1969-Jul-21 03:56 12 42 49.86 -06 27 56.4 -9.40 5.86 8.7945623181E+05 -0.0576796 0.021567 72.7392 /T 106.1204
1969-Jul-21 03:57 12 42 51.77 -06 28 11.4 -9.40 5.86 8.7942171695E+05 -0.0576839 0.021567 72.7474 /T 106.1121
1969-Jul-21 03:58 12 42 53.68 -06 28 26.5 -9.40 5.86 8.7938720208E+05 -0.0576881 0.021567 72.7557 /T 106.1039
1969-Jul-21 03:59 12 42 55.59 -06 28 41.5 -9.40 5.86 8.7935268720E+05 -0.0576924 0.021567 72.7639 /T 106.0956
1969-Jul-21 04:00 12 42 57.50 -06 28 56.5 -9.40 5.86 8.7931817237E+05 -0.0576967 0.021567 72.7722 /T 106.0874
$$$$

```

Abbildung 12: Ausgabe der Bahnparameter des Mondes.

Im Rahmen der Genauigkeit der Analyse reicht es, lediglich einen Wert aus dieser Liste zu entnehmen. Dieser Wert sollte zeitlich etwa in der Mitte der verwendeten Passagen des Funkverkehrs liegen. Ein repräsentativer Wert wäre z. B. der für 4:00 Uhr.

Hinweis! Um den Schwierigkeitsgrad weiter zu erhöhen, können die Schülerinnen und Schüler anstatt einer mittleren wahren Entfernung für jede Messung der Signallaufzeit die jeweilige wahre Mondentfernung aus dieser Tabelle ableiten. Diese Werte können mit der für jede Messung getrennt zu ermittelnde Mondentfernung verglichen werden. Der Einfluss auf das Endergebnis ist jedoch gering.

Diskussion des Ergebnisses

Vergleichen Sie den von Ihnen ermittelten Wert für den Abstand des Mondes von der Erde mit dem wahren Wert. Diskutieren Sie mögliche Einflüsse auf die Differenz der beiden Werte.

Berechnen Sie die Differenz. Ermitteln Sie heraus die prozentuale Abweichung des Messergebnisses vom wahren Wert.

Berechnen Sie den Betrag der Signallaufzeit, der dieser Abweichung entspricht.

Lösung

Als Lösungsbeispiel werden aus Tab. 1 sieben Passagen analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst. Bei einer erneuten Auswertung können geringe Abweichungen auftreten.

Tabelle 2: Signallaufzeiten für sieben Passagen des Funkverkehrs zwischen Houston und Apollo 11.

Analysierte Textpassage	Nachricht (mm:ss)		Echo (mm:ss)		Differenz (s)	
	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Δt_1	Δt_2
looks good	34:26,051	34:26,489	34:28,696	34:29,050	2,645	2,561
Houston AOS. Over.	43:33,040	43:33,995	43:35,663	43:36,543	2,623	2,648
Houston	44:30,074	44:30,229	44:32,784	44:32,879	2,710	2,650
see the stars	45:18,613	45:19,137	45:21,255	45:21,806	2,642	2,669
wet	–	60:07,535	–	60:10,186	–	2,651
Houston. Over.	61:14,176	61:14,735	61:16,859	61:17,365	2,683	2,630
Houston	105:53,887	–	105:56,570	–	2,683	–

Mittelwert: 2,650 s

Standardabweichung: 0,037 s

SEM: 0,011 s (0,4%)

gemessene Entfernung: $\Delta x = c \cdot \frac{\Delta t}{2} = 397163 \text{ km}$ (für ungerundeten Mittelwert)

Standardabweichung: 5587 km

SEM: 1613 km

$$\Delta x_w - \Delta x_m = -9231 \text{ km}$$

$$\frac{\Delta x_w - \Delta x_m}{\Delta x_w} = 2,4\%$$

Der durch die Analyse der Funksignale ermittelte Wert für die Mondentfernung ist mehr als 9000 km zu groß.

Da jedoch der Abstand zwischen Sender und Empfänger tatsächlich geringer ist als die Entfernung zwischen den Mittelpunkten von Erde und Mond, ist die Abweichung sogar noch größer. Als Abschätzung können wir annehmen, dass sich die Gesprächspartner ungefähr auf den Oberflächen von Erde und Mond befinden. Bei einer direkten Funkverbindung vermindert sich somit der effektive Abstand der Gesprächspartner um den Radius der Erde plus den Radius des Mondes.

$$\Delta d = r_{\text{Erde}} + r_{\text{Mond}} = 6378 \text{ km} + 1783 \text{ km} = 8161 \text{ km}$$

Im Extremfall ist daher die Abweichung in der Mondentfernung um diesen Betrag erhöht, d. h. insgesamt kann er 17392 km betragen, also etwa einen halben Erdumfang. Das entspricht einer Signallaufzeit von 0,058 s und einer prozentualen Abweichung von 4,6% vom theoretischen Wert. Für ein Schalexperiment ist diese Unsicherheit jedoch akzeptabel.

Die Abweichung zwischen gemessener und tatsächlicher Mondentfernung lässt sich auf die Verzögerung des Signals während der Übertragung und Weiterleitung auf der Erde zurück führen. Funk- und Kabelstrecken sowie die Verarbeitung der Signale führen zu einer zusätzlichen effektiven Signallaufzeit, die sich in der Messung bemerkbar macht.

Endnoten

^aСпутник, russisch: Begleiter, Satellit

^bDer Name „Apollo“ wurde vom damaligen Leiter des NASA-Raumfahrtprogramms, Abe Silverstein nach dem Gott Apoll gewählt, der nach der griechisch-römischen Mythologie den Sonnenwagen zieht (Sapienza 2009).

^csiehe Material „Wie kamen die Astronauten von Apollo 11 zum Mond?“, Raum für Bildung, <http://www.haus-der-astronomie.de/raum-fuer-bildung>

^dUniversal Time: weltweite Referenzzeit, die sich am Nullmeridian orientiert

Literatur

- Corliss, William R. (1974). *Histories of the Space Tracking and Data Acquisition Network (STADAN), the Manned Space Flight Network (MSFN), and the NASA Communications Network (NASCOM)*. Technical Report NASA CR-140390. NASA, S. 360. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19750002909> (besucht am 06. 05. 2019).
- Dupas, Alain und John M. Logsdon (1994). *Gab es einen Wettlauf zum Mond?* Spektrum.de. URL: <https://www.spektrum.de/magazin/gab-es-einen-wettlauf-zum-mond/821729> (besucht am 03. 04. 2019).
- Girlanda, Luca (2009). „Echoes from the Moon“. In: *American Journal of Physics* 77.9, S. 854–857. ISSN: 0002-9505, 1943-2909. DOI: [10.1119/1.3098261](https://doi.org/10.1119/1.3098261). URL: <http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.3098261> (besucht am 17. 04. 2019).
- Graham, D. J., Carl O. Roberts und H. William Wood (1970). *Postmission Report on the AS-506 (Apollo 11) Mission: Manned Space Flight Network*. Greenbelt, Maryland, USA: Goddard Space Flight Center. URL: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/AS-506-PMR.pdf> (besucht am 06. 05. 2019).
- Orloff, Richard W (2000). *Apollo by the numbers: a statistical reference*. NASA SP-2000-4029. OCLC: 651892628. Washington, D.C.: National Aeronautics und Space Administration. ISBN: 0-16-050631-X. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010008244.pdf> (besucht am 05. 04. 2019).
- Sapienza, Jennifer (2009). *NASA - 1969 Apollo 11 News Release*. Unter Mitarb. von Emily Kennard, Brian Dunbar und Kathleen Zona. URL: https://www.nasa.gov/centers/glenn/about/history/apollo_press_release.html (besucht am 24. 04. 2019).
- Soffel, Michael H. und Jürgen Müller (1997). „Lasermessungen der Mondstanz“. In: *Sterne und Weltraum* 7/1997, S. 646–651. URL: <https://www.spektrum.de/inhaltsverzeichnis/juli-1997/1144985> (besucht am 17. 04. 2019).
- Yaplee, B. S. u. a. (1959). „A lunar radar study at 10-cm wavelength“. In: *Proceedings of the International Astronomical Union. Paris Symposium on Radio Astronomy*. Hrsg. von Ronald N. Bracewell. Bd. 9. IAU Symposium. Redwood City, California, USA: Stanford University Press, S. 19–28. DOI: [10.1017/S0074180900050506](https://doi.org/10.1017/S0074180900050506). URL: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0074180900050506 (besucht am 17. 04. 2019).
- Yaplee, B. u. a. (1958). „Radar Echoes from the Moon at a Wavelength of 10 CM“. In: *Proceedings of the IRE* 46.1, S. 293–297. ISSN: 0096-8390. DOI: [10.1109/JRPROC.1958.286790](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1958.286790). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4065257/> (besucht am 17. 04. 2019).

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei den Lehrpersonen Matthias Penselin, Florian Seitz, Inge Thiering und Martin Wetz für ihre wertvollen Hinweise, Kommentare und Änderungsvorschläge, die in die Erstellung dieses Materials eingeflossen sind. Weiterer Dank gilt Herrn Dr. Volker Kratzenberg-Annies für seine gewissenhafte Durchsicht.

Diese Ausarbeitung basiert auf der Veröffentlichung von Girlanda (2009), in der eine ähnliche Aktivität beschrieben 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.

