Tobias Schüttler (tobias.schuettler@lmu.de)

Andrea Lisa Nagel

Simone Zepp

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

DLR

Das Projekt SatTec, dem die vorliegende Arbeit zuzuordnen ist, wird mit Mitteln des Bundes-Ministeriums für Wirtschaft und Energie durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Förderkennzeichen 50RO1601 gefördert. Den Projektpartnern des DLR gilt ein herzlicher Dank für die konstruktive Diskussion und die Unterstützung bei der Erprobung des entwickelten Konzeptes im Schülerlabor.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 4

I. Satelliten und ihre Anwendungen 5

1. Freier Fall- Wie entsteht Schwerelosigkeit? 6
2. Die Grundlage der Satellitenbewegung: Das Gravitationsgesetz 8
3. Der waagerechte Wurf 10
4. Kreisbewegung im geostationären Orbit 12
5. Die Kepler-Gesetze 14
6. Unser Sonnensystem 16

II. Angewandte Satellitenfernerkundung 21

1. Farben und Farbmischung 22
   a) Wie entsteht ein Farbbild 22
   b) Additive und Subtraktive Farbmischung 22
   c) Reflexion – Transmission – Absorption 23
2. Sehen wie ein Satellit (1): Was unsere Augen im All sehen könnten 24
   a) Echtfarbenbilder 24
   b) Räumliche Auflösung 25
3. Sehen wie ein Satellit (2): Informationen aus dem Unsichtbaren 26
   a) Elektromagnetisches Spektrum 26
   b) Vegetationsanalysen 28
4. Auswertung von Satellitenbildern LEOWorks 30
   a) Einführung in LEOWorks 30
   b) Katastrophenkartierung – Bestimmung der Waldbrandfläche von Nurri 32

III. Das Europäische Satellitennavigationssystem Galileo 35

1. Die Erde – Kugel, Ei oder Kartoffel? 36
2. Navigieren wie Christoph Kolumbus 38
   a) Orientierung an physikalischen Merkmalen der Erde 38
   b) Orientierung an den Gestirnen 40
3. Ortung mit (Funk-) Signalen 44
4. Satellitenortung 46

Abbildungsverzeichnis 50

Vorwort

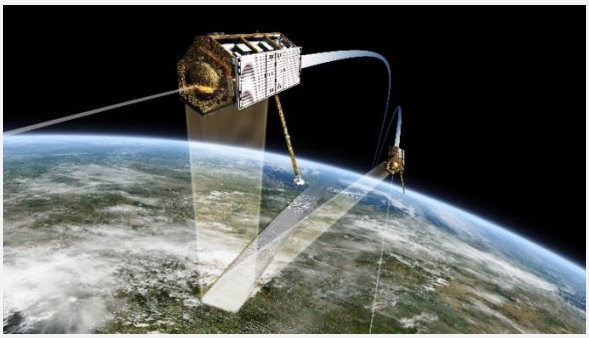
Dieses Schülerheft behandelt im ersten Kapitel die Grundlagen der Orbitalmechanik am Beispiel des deutschen Satellitenpaars TerraSAR-X und TanDEM-X. Physikalische Inhalte sind dabei das Newton'sche Gravitationsgesetz, die Bewegung im Schwerefeld (insbesondere der waagerechte Wurf und die Kreisbewegung im Schwerefeld) sowie die Keplergesetze. Abgerundet wird das Kapitel mit einem Blick in unser Sonnensystem. Das Kapitel richte sich an Schüler*innen der Mittel- und Oberstufe und ist in seinen Themen recht nah an den üblichen Physik-Lehrplänen zu dieser Thematik gestaltet.

Eine der wohl wichtigsten und ältesten Anwendungen der Satellitentechnologien ist die Fernerkundung der Erde. Das zweite Kapitel des Schülerhefts zeigt am Beispiel der Sentinel (Wächter) Satelliten des europäischen Copernicus Programms, wie Fernerkundung funktioniert und auf welchen strahlungsphysikalischen Gesetzmäßigkeiten sie beruht. Dabei wird neben der Zusammensetzung von weißem Licht aus verschiedenen Spektralfarben auch dessen Wechselwirkung mit Materie (Reflexion, Transmission und Absorption) behandelt. Ein Blick in den unsichtbaren Teil des Sonnenspektrums, insbesondere im nahem Ultravioletten und Infraroten, zeigt dessen enorme Bedeutung für die Fernerkundung. Ein konkretes Anwendungsbeispiel zur Kartierung eines Waldbrandes rundet das Kapitel ab. Von der Schwierigkeit und den Themen her kann man dieses Kapitel gut in der Mittelstufe einordnen. Es verbindet die Fächer Physik, Geographie und Informatik mit einem Schwerpunkt auf dem erstgenannten.

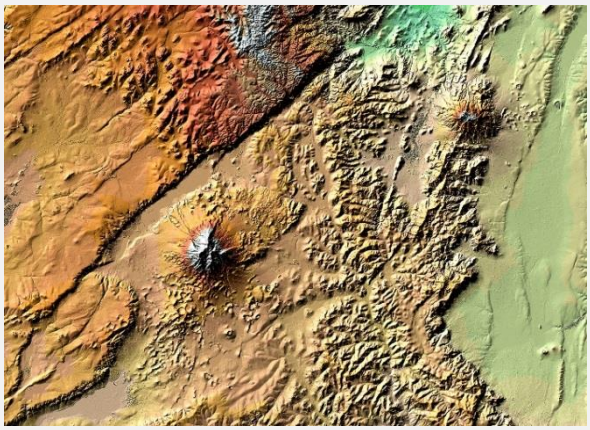
Das dritte Kapitel dieses Schülerhefts behandelt die für unseren Alltag mittlerweile immens wichtig gewordene Satellitennavigation am Beispiel des europäischen Galileo Systems. Dazu werden neben den Grundlagen der Ortung mit Hilfe von Satelliten auch andere Navigationsverfahren, wie solche mit Kompass und Sextant sowie deren physikalischen und geographischen Grundlagen vorgestellt. Das Kapitel verbindet die Fächer Physik, Geographie und Mathematik und richtet sich an Schüler*innen der Mittel- und Oberstufe.

I. Satelliten und ihre Anwendungen

TanDEM-X – Die Erde in drei Dimensionen

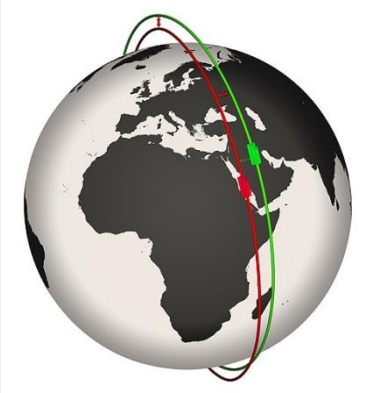


Seit gut zehn Jahren umrunden die Zwillingssatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X unseren Planeten und liefern Oberflächenaufnahmen der Erde in bislang einzigartiger Qualität und Auflösung. Im Jahr 2007 startete TerraSAR-X ins All, der mit einem Radarsystem die Erde beobachtet. Drei Jahre später folgte der nahezu baugleiche TanDEM-X. Die Satelliten sind fünf Meter lang und haben einen Durchmesser von 2,4 Metern. Ihr sechseckiger Querschnitt passt genau unter die Nutzlastverkleidung der DNEPR-Rakete. Die 80 Zentimeter breite SAR-Antenne ist rechts zur Satellitenbahn auf die Erde ausgerichtet.



Erst beide Satelliten zusammen sind –ähnlich wie unsere Augen- in der Lage, ein dreidimensionales Bild von der Erdoberfläche zu erzeugen. Forscher nennen diese Art der Betrachtung interferometrische Vermessung. Das Radarsystem liefert –anders als optische Fernrohre oder Spiegelteleskope- kein sichtbares Bild, sondern lediglich Daten. Sehr viele Daten. Rund 400 Terabyte senden die Satelliten an weltweit verteilte Bodenstationen. Rohdaten, die aufgearbeitet drei Petabyte (= 3000 Terabyte) ergeben.

Aus diesem gigantischen Datenberg entstand in mehrjähriger Aufbereitung das erste hochpräzise Höhenmodell der gesamten Erde. Seit dem Start des deutschen Satellitenpaars hat sich der Blick auf die Welt verändert. Aber nicht nur Wissenschaftler aus aller Welt interessieren sich für die Radardaten. Da diese Strahlungsart im Gegensatz zu sichtbarem Licht auch Wolken durchdringen kann, kann man damit auch die Auswirkungen von Umweltkatastrophen wie Überschwemmungen sehr gut beobachten und den Betroffenen schnelle Hilfe zukommen lassen.



Um dreidimensionale Aufnahmen der Erdoberfläche erstellen zu können, müssen die Satelliten nebeneinander her fliegen. Aus physikalischen Gründen ist das aber gar nicht so einfach. Die Wissenschaftler vom Raumfahrtkontrollzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen haben sich daher eine ganz spezielle Formation einfallen lassen: Die Satellitenorbits, in einer Höhe von 514 Kilometern, sind leicht gegeneinander versetzt und bilden auf diese Weise eine Doppelhelix. Dabei kommt TanDEM-X seinem Satellitenbruder sehr nahe: Bis auf 120 Meter nähern sich die beiden Satelliten an. Warum man Satelliten nicht einfach nebeneinander her fliegen lassen kann, welche physikalischen Regeln für ihre Flugbahnen gelten und warum das Wort „Fallen“ eigentlich viel besser zur Bewegung von Satelliten passt als „Fliegen“ wird im Folgenden erläutert.

1. Freier Fall- Wie entsteht Schwerelosigkeit?

Warum herrscht auf der Internationalen Raumstation (ISS) Schwerelosigkeit? Viele Menschen glauben die Antwort zu kennen: Weil sie so weit weg ist – im Weltall – und es dort keine Erdanziehungskraft gibt. Das ist aber falsch! Die ISS fliegt in einer Höhe von gerade einmal 400 Kilometern über der Erde und dort ist die Erdanziehungskraft fast genauso groß wie auf dem Erdboden. Die Erde zieht ja sogar den Mond an und dieser ist rund 400.000 Kilometern von uns entfernt. Dass die Astronauten also auf der ISS scheinbar schwerelos schweben hat einen anderen Grund.

Hierzu ein kleines Gedankenexperiment:

An einem Baum hängt ein Apfel, in den sich ein kleiner Wurm eine Höhle gefressen hat. Nun fällt der Apfel mitsamt dem Wurm im freien Fall herunter. Der Apfel fällt genauso schnell wie der Wurm darin, welcher also frei in seiner Höhle zu schweben beginnt. Würde der Wurm sich auf einer Waage befinden, so würde diese während des freien Falls „0 kg“ anzeigen, denn der Wurm bringt sein Gewicht nicht mehr auf die Waage – er fühlt sich schwerelos!

Angenommen, man könnte nun den Apfel mit einer übermenschlichen Kraft bis hinter den Horizont werfen, sodass er um die Erde herum fällt. Dann befände er sich die ganze Zeit im freien Fall auf die Erde, würde sie aber niemals treffen. Nach der obigen Überlegung würde sich der Wurm dann die ganze Zeit, während er die Erde umrundet, schwerelos fühlen. Dies kann nun auf die ISS übertragen werden, denn auch sie fällt mit einer enormen Geschwindigkeit von etwa 28.000 km/h im freien Fall um die Erde herum und daher fühlen sich die Astronauten auf der ISS schwerelos.

In den folgenden Experimenten mit einer Fallbox kannst du selbst Schwerelosigkeitsexperimente wie auf der ISS durchführen – nur viel kürzer. Führe die Experimente nacheinander durch und notiere deine Beobachtungen. Versuche physikalische Erklärungen für deine Beobachtungen zu finden und schreibe sie ebenfalls auf.

1. Eine Waage im freien Fall.

Beobachtung:

_____

_____

Begründung:

_____

_____

2. Kerzenflamme im freien Fall.

Beobachtung:

_____

_____

Begründung:

_____

_____

3. Schokolinsen im freien Fall.

Beobachtung:

_____

_____

Begründung:

_____

_____

Der Zusammenhang zwischen Fallhöhe h und Fallzeit t wird durch die Gleichung $h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$ beschrieben. Wobei g die Erdbeschleunigung ist. Aus welcher Höhe müsste die Fallkapsel herunterfallen, um eine Sekunde Schwerelosigkeit zu erzeugen? Ist das Ergebnis realistisch?

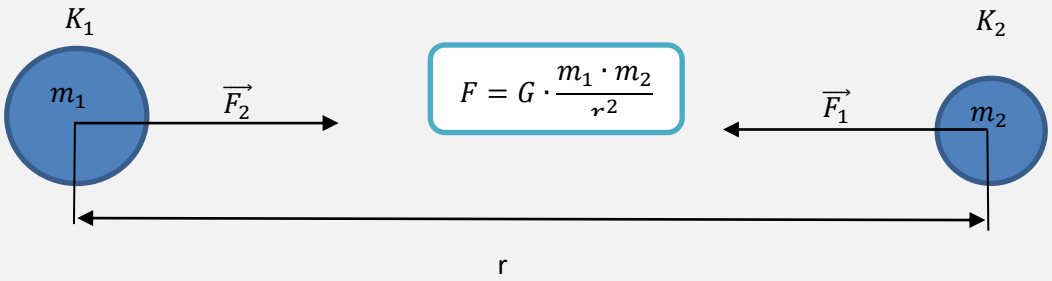
🕮 Für Brainies:

In der Schwerelosigkeit verteilen sich die Körperflüssigkeiten, wie Blut und Gewebeflüssigkeiten, anders im Organismus. Sie werden jetzt nicht mehr durch die Schwerkraft nach unten gezogen, was auf der Erde zu einer ausgewogenen Verteilung von Kopf bis Fuß führt, sondern sie sammeln sich verstärkt im Oberkörper an. Deshalb haben Astronauten während der ersten Tage auf der ISS oft ein aufgeschwemmtes Gesicht, das sogenannte „puffy face“. Dies hat wiederum zur Folge, dass auch die Schleimhäute in Mund und Nase wie bei einem Schnupfen angeschwollen sind. Die Astronauten schmecken daher auf der ISS weniger intensiv und müssen ihr Essen beispielweise deutlich mehr würzen.

2. Die Grundlage der Satellitenbewegung: Das Gravitationsgesetz

Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Satellitenbewegung wurden bereits zu einer Zeit gefunden, in der noch kein Mensch ernsthaft über so etwas wie Raumfahrt nachdachte. Auch Der tatsächliche Weg, wie der berühmte englische Mathematiker, Physiker und Astronom Sir Isaac Newton die Gesetze der (Himmels-) Mechanik fand ist nicht mehr rekonstruierbar. Man erzählt sich aber folgende Legende: Wir schreiben das Jahr 1666. Es ist ein warmer Sommertag. Newton sitzt im Garten unter einem Apfelbaum. Es weht ein laues Lüftchen. Ein Apfel löst sich vom Baum und fällt herunter. Newton beobachtet den fallenden Apfel und auf einmal wird ihm klar: Der Mond und alle Himmelsköper machen genau dasselbe! Sie fallen auf die Erde bzw. die Sonne, aber sie fallen wegen ihrer hohen Bahngeschwindigkeit an ihren Zentralkörpern vorbei!

Aber wieso fallen Dinge überhaupt auf den Boden? Offensichtlich werden Dinge von der Erde angezogen, d.h. es muss eine Anziehungskraft geben zwischen der Erde und allen anderen Dingen. Denn nicht nur der Apfel wird von der Erde angezogen, sondern auch der Mond. Das Gravitationsgesetz besagt: Wegen seiner Masse m_1 zieht ein Körper K_1 einen anderen Körper K_2 (Masse m_2) mit der Kraft $\overrightarrow{F_1}$ an. Umgekehrt zieht aber auch K_2 den Körper K_1 mit der Kraft $\overrightarrow{F_2}$ an. Beide Kräfte sind gleichgroß, wirken aber in entgegengesetzter Richtung. Ihre Beträge hängen ab von den Massen der Körper und davon in welchem Abstand *r* sich diese, genauer gesagt deren Schwerpunkte, voneinander befinden. Das Gravitationsgesetz lautet:

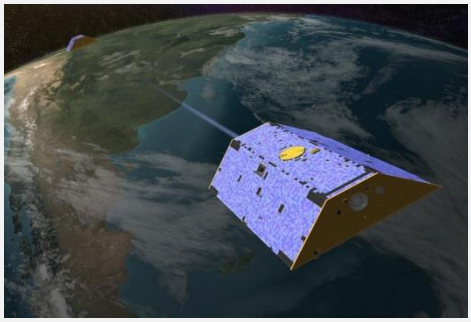


Mit der Gravitationskonstante $G = 6{,}674 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg \cdot s}^2}$

Berechne den Betrag der Kraft zwischen dem TanDEM-X-Satelliten ($m_{DEM} = 1330\ \mathrm{kg}$) und der Erde $m_E = 5{,}97 \cdot 10^{24}\ \mathrm{kg}$. Der Erdradius ist $R_E = 6370\mathrm{km}$, die Bahnhöhe des Satelliten $h = 514\ \mathrm{km}$. Vergleiche mit der Gewichtskraft auf den Satelliten am Erdboden vor dem Start. ($F_G = m \cdot g$)

Berechne den Betrag der Kraft zwischen dem TanDEM-X- und dem TerraSAR-X-Satelliten, wenn sie sich im kleinstmöglichen Abstand ($d = 120\ \mathrm{m}$) voneinander befinden. Wie viele Tage würde es theoretisch dauern, bis diese Kraft die Satelliten zusammengezogen hätte? Gehe vereinfachen davon aus, dass beide Satelliten dieselbe Masse ($m = 1300\ \mathrm{kg}$) haben und vernachlässige andere Störfaktoren.

Die Anziehungskräfte zwischen Massen können wir im Alltag – mal abgesehen von der Erdanziehung – normalerweise nicht wahrnehmen. Sie sind einfach zu gering und andere Effekte machen deren direkte Messung schwierig. Satelliten bewegen sich auf ihren Orbits nahezu ohne Reibungseinflüsse durch das Weltall, daher eignen sie sich besonders gut, um Gravitationseffekte zu messen. Das vom DLR betriebene Satellitenpaar GRACE-FO (Gravity Recovery And Climate Experiment – Follow On) wurde am 22.5.2018 gestartet, um das Schwerefeld der Erde sehr genau zu vermessen. Dieses ist nicht ganz homogen, da die Materie der Erde nicht gleichmäßig verteilt ist. Aus den Daten kann beispielsweise der Rückgang des Eises in der Antarktis infolge des Klimawandels bestimmt werden. Sie geben zudem wichtige Hinweise auf die Verteilung und Veränderung des Grundwassers.



Bei der Mission fliegen zwei Satelliten in einem geringen Abstand von 220 km hintereinander her. Sie sind über eine Mikrowellenfunkstrecke miteinander verbunden. Damit wird auf wenige Tausendstel Millimeter genau gemessen, wie sich der Abstand zwischen den Satelliten ändert. Nähert sich beispielsweise der vorausfliegende Satellit einem Bereich mit großer Gravitation, so wird er etwas schneller und der Abstand vergrößert sich. Das gleiche geschieht mit dem zweiten Satelliten, wenn er denselben Bereich überfliegt und er nähert sich wieder um den gleichen Betrag an. Dieses gegenseitige Verfolgen aber nie Einholen der Satelliten brachte ihnen auch ihre Spitznamen „Tom und Jerry“ ein.

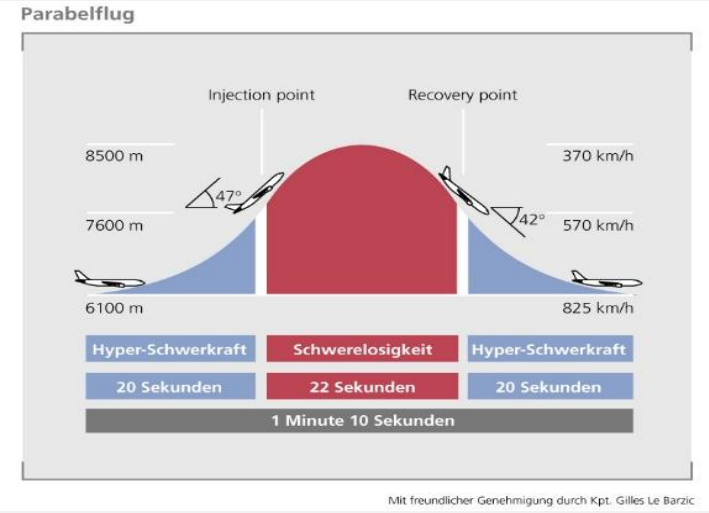
🕮 Für Brainies:

Mit Hilfe der Kepler-Gesetze, welche bereits um 1619 durch Messung der Planetenbewegung gefunden wurden, kann das Gravitationsgesetz hergeleitet werden:

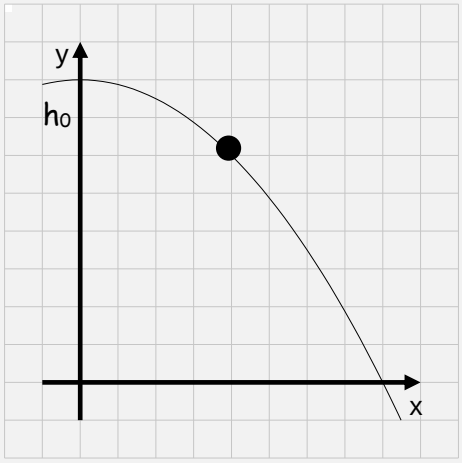
Für die Zentripetalkraft der Kreisbewegung gilt: $F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r}$, für die Bahngeschwindigkeit auf einer Kreisbahn: $v = \frac{2\pi r}{T}$. Eingesetzt erhalten wir: $F = m \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2}{r \cdot T^2} = m \cdot \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r}{T^2}$. Das dritte Keplersche Gesetz besagt: $\frac{T^2}{r^3} = C = konstant. \Rightarrow T^2 = C \cdot r^3$, wobei die Konstante C von der Masse des Zentralkörpers abhängig ist. Eingesetzt ergibt sich $F = m \cdot \frac{4 \cdot \pi^2}{C \cdot r^2}$. Durch Erweiterungen und Umstellungen erhalten wir das Gravitationsgesetz: $F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.

3. Der waagerechte Wurf

Um Astronauten auf ihren Aufenthalt auf der Raumstation ISS vorzubereiten und für kostengünstige Schwerelosigkeitsexperimente, führt man so genannte Parabelflüge durch. Ein spezielles Flugzeug fliegt dabei den Weg einer zur Erde geöffneten Parabel: Die Piloten ziehen das Flugzeug aus dem Horizontalfug steil nach oben und regeln dann die Schubkraft der Triebwerke so, dass die Maschine die Flugbahn eines „geworfenen Steins“ beschreibt. Am Scheitel der Parabel wird eine maximale Höhe von rund 8.500 Metern erreicht. Im Inneren des Flugzeuges kann man auf diese Weise für etwa 20 Sekunden Experimente unter Schwerelosigkeitsbedingungen durchführen.



Warum aber nennt man dieses Verfahren Parabelflug? Wir betrachten dazu die Situation, wenn ein Körper horizontal aus einer bestimmten Höhe h_0 abgeworfen wird. Man spricht dann von einem waagerechten oder horizontalen Wurf. Die Bewegung kann aus drei verschiedenen Perspektiven betrachtet werden:



Von oben: Das entspricht einer geradlinigen Bewegung in x-Richtung mit der Geschwindigkeit v_0, also $x = v_0 \cdot t$

Von vorne: Das sieht aus wie ein freier Fall nach unten:

$$y = h_0 - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Der Wurf kann aber auch **von der Seite** betrachtet werden. Dies entspricht einer Überlagerung der Bewegung in x- und in y-Richtung.

Stelle die Höhe y als Funktion der Wurfweite x dar. Begründe damit, dass die Bahn beim waagerechten Wurf eine (halbe) Parabelbahn ist.

Die Parabelbahn entsteht auch, wenn ein Körper schräg nach oben geworfen wird – man spricht dann auch von einer Wurfparabel. Sobald man den (wie auch immer!) geworfenen Körper loslässt, wirken auf ihn nur noch die Luftreibungskraft und die Schwerkraft.

Begründe mit Hilfe der Überlegungen zum freien Fall, warum man sich beim Parabelflug auf der gesamten Parabel, also insbesondere auch schon beim aufsteigenden Teil, schwerelos fühlt.

Nimm mit Hilfe der App „Viana“ einen waagerechten Wurf auf. Werte deine Messung aus, indem du die Flugbahn markierst. Gib die Gleichung der Wurfparabel an.

Stelle die Gleichung für die „Wurfparabel“ des Parabelflugs (Seite10) auf.

In Kapitel 1. hast du Experimente mit der Fallbox durchgeführt. Wiederhole diese Experimente. Lass diesmal jedoch die Box nicht einfach nur senkrecht fallen, sondern wirf sie einem/ einer Partner*in zu. Aber bitte nicht fallen lassen! Notiere deine Beobachtungen und begründe sie.

Beobachtung:

_____

_____

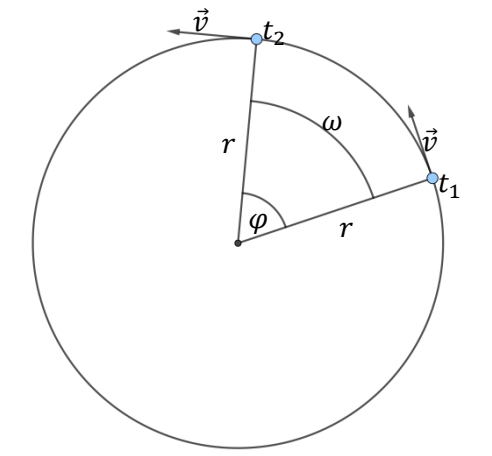
Begründung:

_____

_____

4. Kreisbewegung im geostationären Orbit

Satelliten werden heutzutage für sehr viele Zwecke verwendet. Ein altbekannter ist das Satellitenfernsehen. Dabei wird das Fernsehsignal von einer Bodenstation an den Satelliten und von diesem aus an die Nutzer übertragen. Es wäre jedoch ziemlich unpraktisch, wenn diese ständig ihre Empfangsantenne drehen müssten, um dem Satelliten zu folgen – Satelliten bewegen sich ja immer am Himmel! Zum Glück gibt es aber einen ganz besonderen Satellitenorbit, der dieses Problem sehr elegant löst: im so genannten geostationären Orbit (GEO) fliegen Satelliten genau mit der Drehung der Erde über dem Äquator. Dadurch sieht es so aus, als würden sie immer über derselben Stelle der Erde stehen. Das hat den Vorteil, dass Satellitenschüsseln direkt zum Satelliten fest ausgerichtet werden können. Geostationäre Satelliten sind typischer Weise Kommunikations-, Wetter- und Fernsehsatelliten.



Die Vorteile des GEO machen ihn sehr beliebt bei Satellitenbetreibern und so muss mittlerweile gut darauf geachtet werden, dass sich die immer zahlreicher werdenden geostationären Satelliten nicht in die Quere kommen! Um die Bewegung entlang einer Kreisbahn wie dem GEO zu beschreiben, verwendet man neben dem Bahnradius *r* der und der Umlaufdauer *T* auch die so genannte Winkelgeschwindigkeit ω. Im Falle der gleichförmigen Kreisbewegung, bei der die Rotation weder schneller noch langsamer wird, gilt für diese: $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Für einen Satelliten im GEO gilt: $\omega = \frac{2\pi}{24h}$ bzw. ein Vollwinkel (2π) pro Tag.

Die Geschwindigkeit, mit der sich der Satellit entlang der Kreisbahn bewegt, wird Bahngeschwindigkeit $\vec{v}$ genannt. Bei der gleichförmigen Kreisbewegung legt der Körper in einer Umlaufdauer *T* einen vollen Kreisbogen $U = 2\pi \cdot r$ zurück. Daher gilt: $v = \frac{2\pi \cdot r}{T} = \omega \cdot r$.
Die Anzahl der Umdrehungen, die auf der Kreisbahn pro Sekunde zurückgelegt werden, wird auch als Frequenz f oder als Drehzahl bezeichnet. Es gilt die Formel $f = \frac{1}{T}$ mit der Einheit $[f] = \frac{1}{s} = 1\text{Hz}$. Insgesamt gilt also der Zusammenhang $\omega = 2\pi \cdot f$.

Berechne die Winkelgeschwindigkeit, die Frequenz und die Bahngeschwindigkeit für einen geostationären Satelliten (Bahnhöhe $h = 36.000\ \text{km}$) und die ISS in Grundeinheiten. Vergleiche die Ergebnisse. Hinweis: die ISS hat eine mittlere Bahnhöhe von $h = 408\ \text{km}$ über dem Erdboden und eine Umlaufzeit von $t = 93\ \text{min}$.

Lege dein Smartphone auf eine sich drehende Scheibe oder in eine Salatschleuder. Miss dabei mit Hilfe der phyphox-App die Zentripetalbeschleunigung. Behalte den Radius bei jeder Messung bei und verändere nur die Winkelgeschwindigkeit. Welche Aussage kannst Du dann über die Beschleunigung treffen? Die Formel für die Zentripetalbeschleunigung lautet $a = \omega^2 \cdot r$ mit der Einheit $[a] = 1\frac{m}{s^2}$.

Damit sich ein Körper auf einer Kreisbahn bewegt, muss auf ihn eine Haltekraft wirken. Diese heißt Zentripetalkraft $\overrightarrow{F_Z}$. Es gilt: $F_Z = m \cdot \omega^2 \cdot r$.
Bergründe rechnerisch, warum auch mit folgender Formel gerechnet werden kann, wenn man die Bahngeschwindigkeit v kennt, aber nicht die Winkelgeschwindigkeit: $F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r}$.

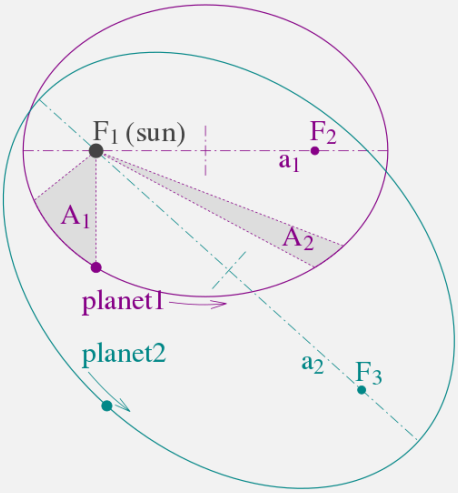
Berechne jeweils den Betrag der Zentripetalkraft welche die folgenden Satelliten auf ihrer Bahn hält. Was fällt dir auf? Woher kommt die Zentripetalkraft, warum fliegen die Satelliten nicht einfach weg?

Satellit	**Bahnhöhe**	**Umlaufzeit**	**Masse**
Terra-SAR-X	**514 km**	**95 min**	**1230 kg**
Galileo-FOC	**23.222 km**	**14 h 5 min**	**732,8 kg**
Eutelsat 9B	**35.786 km**	**24 h**	**5175 kg**

Lasse die kleine Kugel (s. Abbildung rechts) mit Hilfe der selbstgebauten Apparatur vertikal rotieren. Verändere dabei vorsichtig (!) die Winkelgeschwindigkeit und damit auch den Bahnradius. Was kannst du beobachten?

5. Die Kepler-Gesetze

Der Astronom Johannes Kepler (1571-1630) entdeckte die Gesetzmäßigkeiten, welche die Bewegung der Planeten um die Sonne beschreiben. Dazu nutzte er die besten verfügbaren astronomischen Messdaten Tycho Brahes und entwickelte die mathematische Beschreibung auf Basis des neuen kopernikanischen Weltbildes. Bei diesem befindet sich im Gegensatz zum alten Ptolemäischen Weltbild nicht die Erde sondern die Sonne im Zentrum und alle Planeten umkreisen sie. Seine ersten beiden Gesetze veröffentlichte Kepler in seiner Schrift „Astronomia Nova“. Zudem erkannte er, dass die Planeten sich nicht auf Kreisbahnen, sondern auf elliptischen Bahnen bewegen.



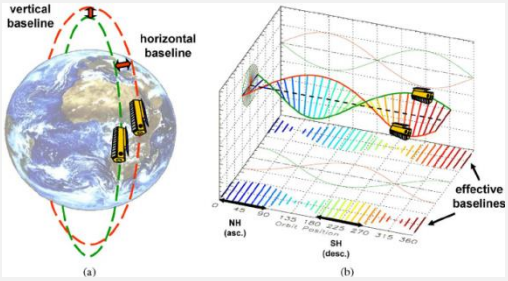
1. Kepler-Gesetz	2. Kepler-Gesetz	3. Kepler-Gesetz
Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen. In einem gemeinsamen Brennpunkt steht die Sonne.	Die Verbindungslinie Sonne-Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleich große Flächen: $\frac{A_1}{\Delta t} = \frac{A_2}{\Delta t} = \text{konstant}$	Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen ihrer Bahnen: $\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$

Leite mit Hilfe des Gravitationsgesetzes das 3. Kepler-Gesetz für den Spezialfall der Kreisbewegung her. Nimm dabei vereinfachend an, dass sich die Sonne selbst nicht bewegt.

Die Keplergesetze gelten nicht nur für die Planetenbewegung sondern für jeden Himmelsköper, der sich alleine aufgrund der Gravitation um einen Zentralkörper bewegt. Bei künstlichen Satelliten ist der Zentralkörper die Erde. Man bezeichnet den Quotienten $C = \frac{T^2}{a^3}$ als Kepler-Konstante. Begründe, dass man diese auch direkt aus der Masse M des Zentralkörpers und der Gravitationskonstante G berechnen kann, bzw. dass gilt: $C = \frac{4\pi^2}{G \cdot M}$. Berechne C für die Erde und die Sonne.

Begründe physikalisch, warum die TanDEM-X-Satelliten nicht „nebeneinanderher“ fliegen können.

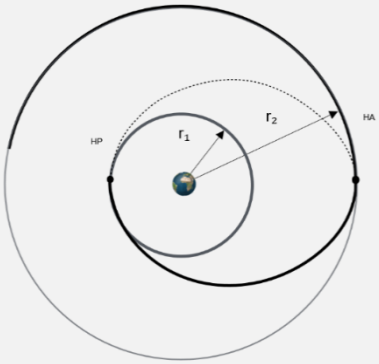
Um die Erdoberfläche in drei Dimensionen vermessen zu können, müssen sich die TanDEM-X-Satelliten nebeneinander befinden. TerraSAR-X hat einen nahezu exakt kreisförmigen Orbit mit einer Höhe von 514.8 km. Sein „Zwillingsbruder“ TanDEM-X hat einen dazu leicht versetzten elliptischen Orbit. Das führt dazu, dass die Satelliten von der Erde aus gesehen fast immer etwas versetzt nebeneinander sind. Aus dem 2. Kepler-Gesetz folgt, dass die Bahngeschwindigkeit eines Satelliten nur auf einer Kreisbahn konstant ist aber nicht auf einer elliptischen Bahn: Je näher der Satellit der Erde kommt, desto schneller wird er.



Begründe die sich ändernde Geschwindigkeit eines Satelliten mit einem stark elliptischen Orbit mit Hilfe des 2. Kepler-Gesetzes. Was bedeutet das ganz konkret für das TanDEM-X-Satellitenpaar?

🕮 Für Brainies: Wie wird ein Satellit in den geostationären Orbit gebracht?

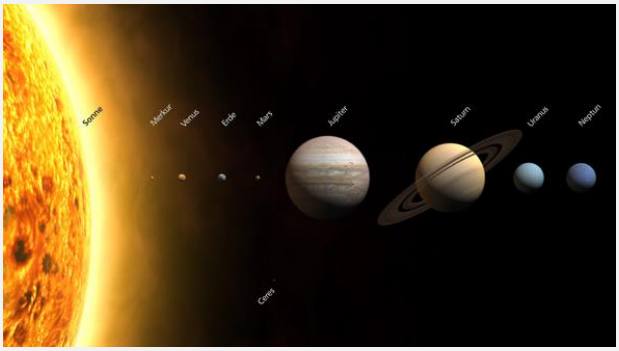
Um einen Satelliten in einen erdfernen Orbit zu bringen, hat der deutsche Ingenieur Walter Hohmann 1925 (also 32 Jahre bevor der erste Satellit ins Weltall gestartet ist!) eine besonders energiesparende Lösung vorgeschlagen.



Der Einschuss erfolgt in drei Schritten: zuerst wird der Satellit mit einer Trägerrakete, wie der europäischen Ariane V in einen kreisförmigen, erdnahen Orbit mit etwa 200 km Höhe gebracht. Die Rakete sollte dabei möglichst nahe am Äquator in Richtung Osten starten, um die Geschwindigkeit der sich drehenden Erde auszunutzen.

Von dem Punkt aus, der dem zukünftigen Ziel im erdfernen Orbit gegenüberliegt (HP in der Abbildung), wird nun im zweiten Schritt die Raketenoberstufe so gezündet, dass der Satellit tangential zur Kreisbahn beschleunigt wird. Dadurch ändert sich die Satellitenbahn und wird zu einer stark exzentrischen Ellipse des so genannten Transferorbits. Hat der Satellit seinen Zielpunkt (HA) im erdfernen Orbit erreicht, so wird die Oberstufe im dritten Schritt ein letztes Mal gezündet und zwar genau so stark, dass der elliptische Transferorbit zu einer Kreisbahn wird. Dieser Hohmann-Transfer wird übrigens auch verwendet, um zu anderen Planeten, beispielsweise zum Mars zu gelangen.

6. Unser Sonnensystem



„**M**ein **V**ater **e**rklärt **m**ir **j**eden **S**onntag **u**nseren **N**achthimmel.“ Dieser Merksatz ist wohl fast jedem bekannt. Er gibt uns die Reihenfolge der Planeten unseres Sonnensystems an. Die Anfangsbuchstaben der einzelnen Wörter sind dabei auch die Anfangsbuchstaben der Planeten: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun. Im Zentrum der Planetenkonstellation steht die Sonne. Aber warum ist das so? Hierzu ein kleines Experiment.

Befülle eine Schale mit Wasser und stelle sie auf den Tisch. Gib nun etwas grob gemahlenen Pfeffer hinzu. Beschreibe deine Beobachtung.

Bringe nun das Wasser mit Hilfe eines Stabes oder Stiftes gegen den Uhrzeigersinn in Drehung. Beschreibe auch hier deine Beobachtung.

Ähnlich wie bei diesem Experiment hat sich aus einer Gas- und Staubwolke, die sich zu drehen begann, unser Sonnensystem gebildet. Die Materie verdichtete sich dabei immer mehr und so formte sich in der Mitte zuerst die Sonne. Nach aktuellen Studien folgte recht schnell der riesige Planet Jupiter, der den inneren Bereich des Planetensystems mit seiner enormen Schwerkraft wie ein gigantischer, kosmischer Staubsauger leerfegte. So ist auch zu erklären, warum die inneren Planeten relativ klein sind und wir nicht gezwungen sind auf einer riesigen Supererde zu leben. Das wäre im Übrigen, wegen der dann viel größeren Anziehungskraft, gar nicht in der uns bekannten Weise möglich! In diesem Sinne kann es durchaus sein, dass wir die Möglichkeit, auf unserer Erde zu leben, zu einem großen Teil der Anziehungskraft von Jupiter verdanken.

Die Schwerebeschleunigung g an der Oberfläche eines Körpers mit Masse M und Radius R kann man mit der Formel $g = \frac{G \cdot M}{R^2}$ berechnen. Leite diese Formel aus dem Gravitationsgesetz her.

Die Schwerebeschleunigung von Jupiter beträgt an seiner Oberfläche ca. $g_{Jupiter} \approx 23\,\frac{m}{s^2}$. Nenne Gründe, warum man diesen Wert nicht direkt mit dem Wert für die Erde vergleichen kann.

Der Exoplanet Gliese 876 d hat nach aktuellen Messungen eine Masse von etwa 7 Erdmassen und ist ca. 1,5 Erdradien groß. Berechne den Wert der Schwerebeschleunigung auf der Oberfläche des Planeten. Welche Bedeutung hätte es für das Leben auf der Erde, wenn die Erdbeschleunigung so groß wäre wie auf Gliese 876 d?

Im März 2004 startete die Sonde Rosetta vom europäischen Weltraumbahnhof in Kourou und begab sich auf eine zehn Jahre dauernde Reise zum Kometen „Tschuri“. Dort setzte sie im November 2014 den kleinen nur etwa 100 kg leichten Kometenlander Philae ab. Die Mission war aus vielen Gründen extrem herausfordernd. Ein Aspekt war die äußerst geringe Schwerkraft des Kometen. Dieser ist nur etwa ca. 4 km × 3,5 km × 3,5 km groß. Seine Form erinnert ein wenig an die einer Badeente. Der Komet ist so klein, dass Philae dort nur so viel wie ein vier Gramm schweres DIN-A4 Blatt Papier auf der Erde wiegt.

Bestimme mit den Angaben im Text die Schwerebeschleunigung des Kometen Tschuri und dessen ungefähre Masse.

📖 **Für Brainies: Fluchtgeschwindigkeiten**

Um die Erde in einem geschlossenen, kreisförmigen Orbit zu umkreisen, benötigt ein Satellit eine bestimmte Geschwindigkeit. Die Zentripetalkraft ist dann gerade gleich der Gravitationskraft, also $m \cdot \frac{v_1^2}{r} = G\,\frac{m \cdot M}{r^2}$. Durch Umstellen nach der Geschwindigkeit erhält man: $v_1 = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$. Um das Gravitationspotential der Erde verlassen zu können, müssen Raumsonden jedoch noch etwas schneller fliegen. Ihre Kinetische Energie muss dann so groß sein, dass die potentielle Energie im Gravitationsfeld überwunden werden kann, also $\frac{1}{2} m \cdot v_2^2 = \frac{G \cdot m \cdot M}{r} \Rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{2G \cdot M}{r}} = \sqrt{2} \cdot v_1$.

☝ Achtung: Niemals mit dem bloßen Auge oder technischen Hilfsmittel (z.B. Lupe o.Ä.) in die Sonne blicken. Die Augen können dadurch sehr schwer geschädigt werden.

Jupiter ist so groß, dass Du ihn nachts sehr gut mit einem einfachen Fernglas beobachten kannst. Im Internet findest Du Angaben zur Sichtbarkeit verschiedener Himmelsobjekte, auch der ISS und anderer künstlicher Satelliten. Im Folgenden kannst Du mit Hilfe des Internetportals DLR_next Steckbriefe der Sonne und der Planeten erstellen. Als spannende Ergänzung empfehlen wir aber auch selbst mal einen Blick in den Nachthimmel zu werfen! Dort gibt es übrigens noch viel Neues und bislang unerklärtes zu entdecken. Ein Beispiel:

Die Sonne dreht sich an ihrem „Äquator“ in etwa 25 Tagen um sich selbst. In den südlichen und nördlichen Regionen dauert die Rotation mit 31 Tagen allerdings deutlich länger. Die Ursachen dieser so genannten differentiellen Rotation, welche auch bei den Gasplaneten beobachtet werden kann, sind noch nicht vollständig geklärt. Folgende Fragen kannst Du aber selbst beantworten:

1. Warum leuchten Kometen und wie entsteht ihr Schweif?
2. Was sind Asteroiden und warum sind sie „potentielle Killer“?
3. Welche Besonderheiten herrschen bezüglich Wetter und Atmosphäre auf dem Mond?
4. Wie entsteht eine Sternschnuppe?
5. Warum ist es für uns Menschen wichtig, die Planeten des Sonnensystems zu erforschen?

Starte auf https://www.dlr.de/next die virtuelle Reise durch das Sonnensystem. Fülle damit die folgenden Steckbriefe aus.

Merkur

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Oberflächentemperatur:

Aufbau:

Venus

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Oberflächentemperatur:

Atmosphäre und Wetter:

Erde

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Oberflächentemperatur:

Atmosphäre und Wetter:

Mars

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Oberflächentemperatur:

Monde:

Jupiter

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Mittlerer Durchmesser:

Aufbau:

Saturn

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Aufbau:

Wichtigste Monde:

Uranus

Mittlere Entfernung von der Sonne:

Atmosphäre:

Besonderheit der Rotationsachse und Folgen:

Neptun

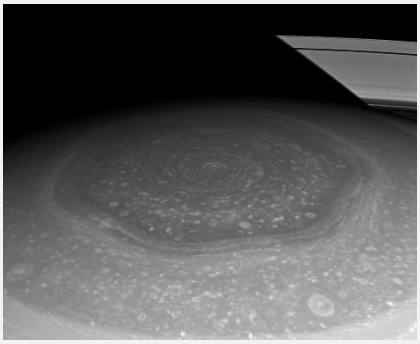
Mittlere Entfernung von der Sonne:

Umlaufdauer:

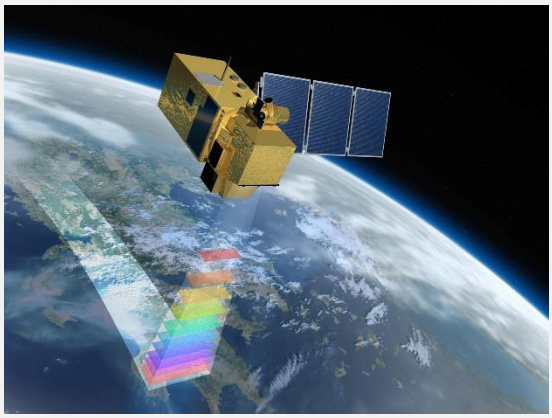
Atmosphäre:

🕮 Für Brainies:

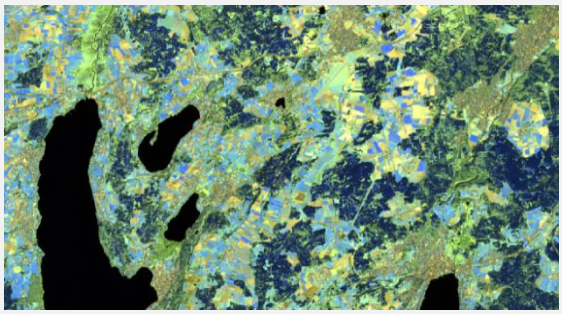
Die Sonde Cassini lieferte beeindruckende Bilder von einem Sturm auf dem Saturn. Der Sturm hat die Form eines Sechsecks. Ein bisher ungelöstes Phänomen. Sein Durchmesser beträgt ca. 30.000 km und die Geschwindigkeit bis zu 320 km/h. In dem Sechseck entstehen kleine Wirbel, die in die entgegenentsetze Richtung des Sturms rotieren und dabei einen Durchmesser von bis zu 3.500 km erreichen.



II. Angewandte Satellitenfernerkundung



Bei der Fernerkundung sammelt man Informationen über die Erde durch berührungslose Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-) Felder. Die Informationen über die Erde kann man der reflektierten oder direkt ausgesendeten Strahlung entnehmen. Als Messplattformen kommen neben Flugzeugen vor allem Satelliten, welche die Erde in viel größerer Höhe umkreisen, zum Einsatz. Für Europa – und die ganze Welt – von großer Bedeutung ist das Fernerkundungsprogramm Copernicus, welches eine Vielzahl an Informationen zu umwelt- und sicherheitsrelevanten Fragestellungen liefert. Sentinel-2 A & B sind zwei kürzlich gestartete Fernerkundungssatelliten dieses Programms und liefern sehr hoch aufgelöste Daten der Erdoberfläche. Sie sind so ausgelegt, dass sie nahezu die gesamte Erdoberfläche in nur fünf Tagen einmal komplett auf ihren Bildern erfassen können.



Fernerkundung funktioniert im Prinzip ähnlich wie das menschliche Sehen. Das Auge sammelt kontaktlos Informationen über die Farbe und Form von Objekten. Dies ist möglich, da die Sonne Licht auf die Erde sendet, welches alle Regenbogenfarben beinhaltet. Jede Oberfläche reflektiert einen unterschiedlichen Anteil der Strahlung, welchen unsere Augen dann aufnehmen. Mit Hilfe der Rezeptoren auf unserer Netzhaut ist es uns möglich unterschiedliche Farben wahrzunehmen. Auch die Fernerkundungssatelliten „sehen“ nach einem ähnlichen Prinzip. Sie können allerdings neben den mit dem menschlichen Auge sichtbaren Farben zusätzlich andere für uns unsichtbare Teile des Sonnenlichts „sehen“ und uns so noch mehr Informationen über die Erdoberfläche zugänglich machen.

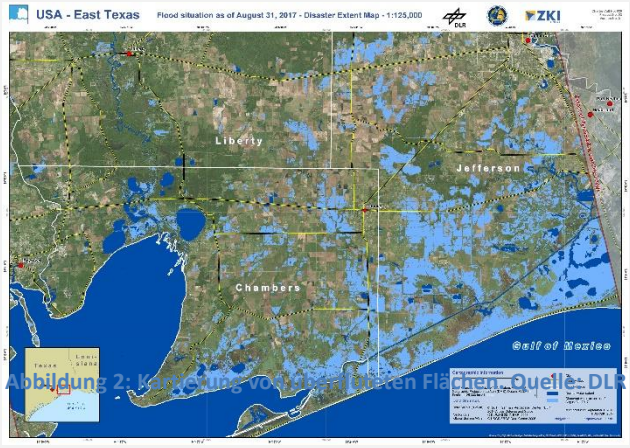


Abbildung 2: Karte [illegible] roten Flächen. Quelle: DLR

Derzeit existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Satellitensystemen, welche aus dem All Informationen über die Erde sammeln und uns so beispielsweise bei der Einschätzung von Naturkatastrophen helfen. Da die Satelliten im All eine große Fläche immer wieder beobachten, können beispielsweise bei einem Waldbrand schnell und aus sicherer Entfernung die Ausmaße der Feuer bestimmt werden. Auch bei Überflutungen liefern Satelliten wertvolle Informationen, die dabei helfen, Rettungseinsätze vor Ort besser zu koordinieren. Beispielsweise kann man überflutete Straßen auf den Satellitenbildern gut identifizieren kann und so eine bessere Einschätzung der Situation erhalten.

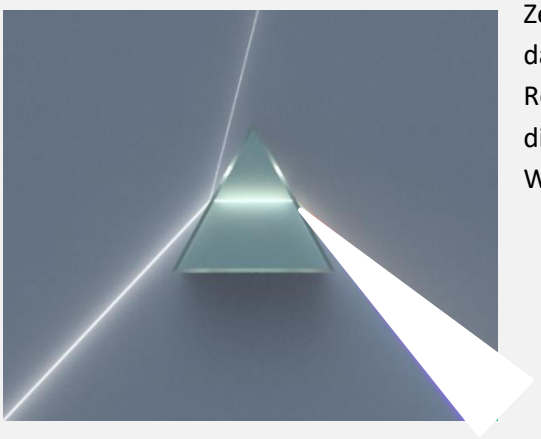
Die folgenden Seiten sollen Dir mit vielen Experimenten dabei helfen, zu verstehen, wie die Satellitenfernerkundung funktioniert. Am Ende wirst Du sogar in der Lage sein, mit echten, aktuellen Satellitendaten Umweltkatastrophen zu kartieren und Bilder Deiner Heimatregion zu erstellen. Zuvor ist es aber wichtig, sich erst einmal mit den physikalischen Grundlagen auseinanderzusetzen.

1. Farben und Farbmischung

a) Wie entsteht ein Farbbild

Das für unser Auge weiß erscheinende Sonnenlicht beinhaltet das Licht aller Farben. Man kann dies beispielsweise bei einem Regenbogen beobachten. Hier wird durch Lichtbrechung an Wassertröpfchen in der Atmosphäre das weiße Sonnenlicht in dessen Spektralfarben aufgespalten.

Künstlich lässt sich das Sonnenlicht oder das Licht einer ähnlichen Lichtquelle mit Hilfe eines Glasprismas aufspalten:



Zeichne in die nebenstehende Abbildung ein, in welche Farben das weiße Licht mittels Prisma zerlegt wird. Beachte die richtige Reihenfolge! Recherchiere, welche Farbe die größte und welche die kleinste Wellenlänge repräsentiert. Gib jeweils den Wellenlängenbereich an.

_____

_____

Leitet man eine beliebige, reine Spektralfarbe erneut durch ein Prisma, so kann diese nicht weiter zerlegt werden. Man nennt diese einzelnen Anteile des Sonnenlichts auch reine Farben.

b) Additive und Subtraktive Farbmischung

Das Sonnenlicht erscheint also für das menschliche Auge weiß, ist aber tatsächlich eine Mischung aus Licht verschiedener Farben. Als Farbmischung bezeichnet man die Herstellung einer Mischfarbe durch Mischen von zwei oder mehreren Ausgangsfarben. Die Erzeugung einer Mischfarbe kann nach zwei Prinzipien erfolgen:

- Die **additive Farbmischung** ist die Überlagerung von Licht mehrerer Lichtquellen mit verschiedenen Farben. Die Grundfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) ergeben weiß. (RGB-System)
- Die **subtraktive Farbmischung** erfolgt, wenn man aus dem Licht einer Lichtquelle bestimmte Farben des Lichts entfernt. In der Technik werden häufig die Farben Cyan, Magenta und Geld genutzt.

Um die beiden Farbmischungen und vor allem die für die Fernerkundung wichtige additive Farbmischung zu verstehen eignen sich die folgenden Versuche:

1) Versuch zur additiven Farbmischung: Befestige je eine Filterfolie vor der eigeschalteten Lampe eines Handys und strahle damit eine helle Oberfläche an. Vervollständige damit die fehlenden Einträge:

Blau + **Rot** = _____	**Grün** + **Blau** + **Rot** = _____
Blau + **Grün** = _____	**Grün** + **Rot** = _____

2) Versuch zur subtraktiven Farbmischung: Lege abwechselnd verschiedene Filterfolien auf eine helle Oberfläche (beispielsweise weiß leuchtender Handybildschirm) und vervollständige die folgenden Einträge:

Cyan + **Magenta** = _____	**Gelb** + **Cyan** + **Magenta** = _____
Cyan + **Gelb** = _____	**Gelb** + **Magenta** = _____

Die subtraktive und die additive Farbmischung finden in unterschiedlichen Gebieten unseres Alltags Anwendung. Nenne je zwei Beispiele aus unserem Alltag für die additive und die subtraktive Farbmischung:

Additive Farbmischung: _____

Subtraktive Farbmischung: _____

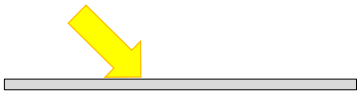
c) Reflexion – Transmission – Absorption

Strahlung kann auf verschiedene Arten mit Materie wechselwirken:

- Unter **Reflexion** versteht man das komplette Zurückwerfen der einfallenden Strahlung.
- Die **Transmission** bezeichnet den Durchgang von Strahlen durch ein Medium ohne, dass die Eigenschaften der Strahlung verändert werden.
- Die **Absorption** beschreibt die Aufnahme von Strahlung durch einen Körper.

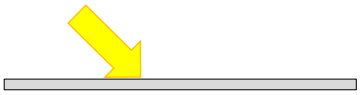
Stelle die drei Möglichkeiten, wie Licht mit einem Objekt wechselwirken kann, grafisch dar und nenne jeweils ein Materialbeispiel.

Reflexion:



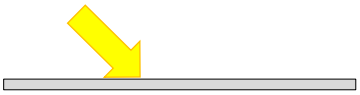
_____

Transmission:



_____

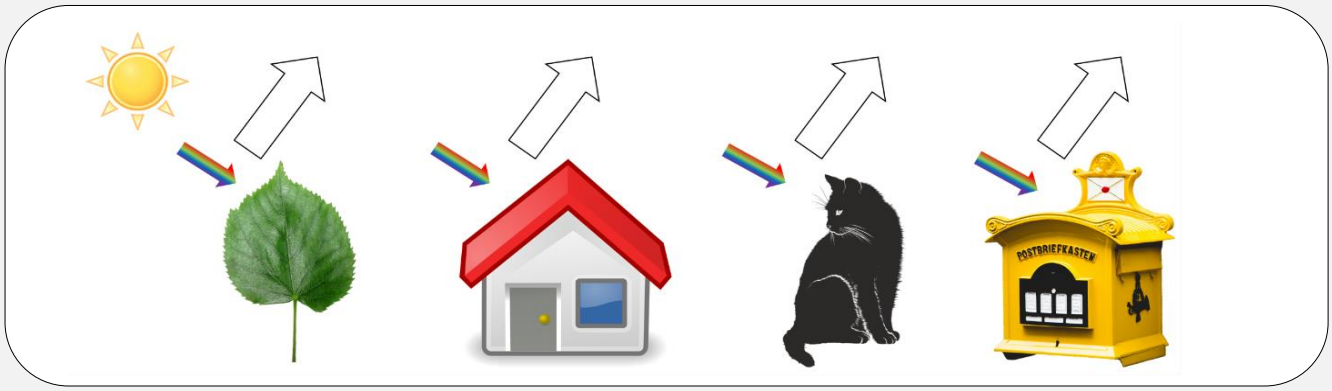
Absorption:



_____

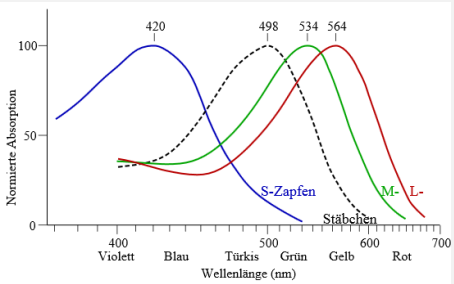
Betrachtet man das Sonnenlicht als Zusammensetzung aus Licht aller Farben, kann man damit nachvollziehen, warum uns Oberflächen in verschiedenen Farben erscheinen. Ein grünes Blatt, beispielsweise, sehen wir in der Farbe Grün, da es in erster Linie das rote und das blaue Licht der Sonne absorbiert. Die Energie des blauen und roten Lichts wird dabei zur Photosynthese genutzt. Das grüne Licht wird (zumindest teilweise) reflektiert und kann von unseren Augen aufgenommen werden. Die Farbe einer Oberfläche wird also immer durch diejenigen Farben bestimmt, welche besonders stark von ihr reflektiert werden.

Zeichne in die Pfeile die reflektierten RGB-Anteile des einfallenden Sonnenlichts ein.



🕮 Für Brainies:

Die additive Farbmischung nutzt man auch bei Farbdisplays. Dabei sind die einzelnen Lichtquellen (Pixel) des Bildschirms so klein und liegen so nahe beieinander, dass sie von unserem Auge nicht mehr einzeln aufgelöst werden können. Wir nehmen daher Mischfarben mehrerer Punkte zusammen wahr, sodass ein farbiges Bild entsteht. Die Rezeptoren unserer Netzhaut können übrigens ebenfalls keine Mischfarben sondern nur Blau, Grün und Rot unterscheiden. Die schöne Bunte Welt, welche wir scheinbar wahrnehmen, entsteht erst in unserm Gehirn, wo die Nervenreize überlagert werden.



2. Sehen wie ein Satellit (1): Was unsere Augen im All sehen könnten

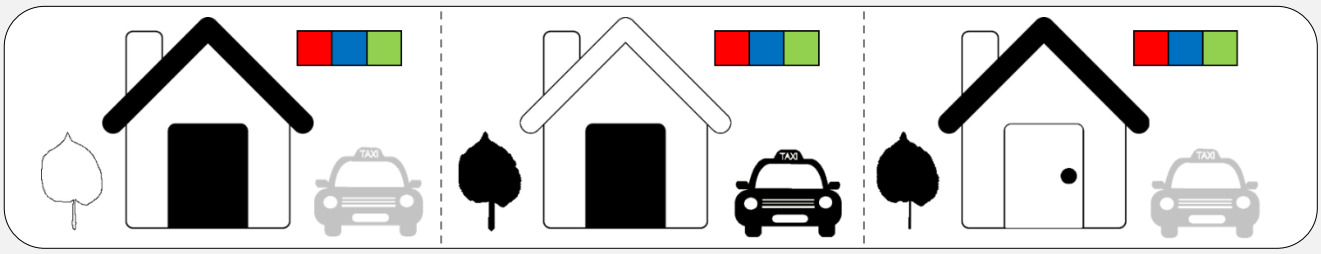
a) Echtfarbenbilder

Ähnlich wie das menschliche Auge „sieht“ auch ein Fernerkundungssatellit die Umgebung nicht in gemischten Farben, sondern misst die Reflexionen einzeln im Blauen, Grünen und Roten und zusätzlich noch in für uns unsichtbaren Wellenlängenbereichen, wie Infrarot oder Ultraviolett.

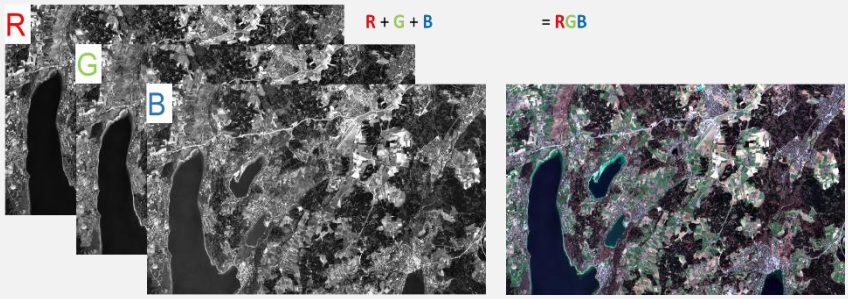
Dabei wird in jedem Spektralbereich (bzw. jeder „Farbe“), den ein Fernerkundungssensor aufnimmt, ein eigens Bild gespeichert, das aus Grautönen besteht. Man nennt dies auch Grauwertbild. Reflektiert eine Fläche sehr viel Licht eines Spektralbereichs, beispielsweise grün, erscheinen die Flächen auf dem Grauwertbild des zugehörigen, in diesem Fall des grünen, Kanals besonders hell. Flächen die wenig bis kein grünes Licht reflektieren, erscheinen im Grauwertbild grau bis schwarz. Die Anzahl der „Farben“ (auch unsichtbare!) die ein Sensor „sehen“ kann, bestimmt seine sogenannte spektrale Auflösung. Je mehr Kanäle ein Sensor hat, je mehr Spektralfarben er also sieht, desto höher ist die spektrale Auflösung.

Um aus den Grauwertbildern eines Satelliten ein Bild zu erhalten, das so aussieht, wie man es selbst aus dem All sehen würde, müssen die Bilder der Spektralbereiche Rot, Grün und Blau übereinandergelegt werden. Die additive Mischung der Informationen ergibt so ein Bild, wie wir es kennen.

Die Skizze zeigt drei Grauwertbilder, aufgenommen in den Kanälen Rot, Grün und Blau. Ordne den Grauwertbildern die richtigen Farbkanäle zu:



Bei Satellitenbildern nennt man ein so zusammengestelltes Bild „RGB-Echtfarbenbild“. Die Abbildung zeigt dir die Entstehung eines RGB-Echtfarbenbildes aus den einzelnen Grauwertbildern. Es zeigt eine Gegend südöstlich von München.



Auf einem solchen RGB-Echtfarbenbild ist es uns möglich, Oberflächen anhand von ganz bestimmten Eigenschaften voneinander zu unterscheiden. Nenne mindestens drei Eigenschaften, durch welche man zum Beispiel Vegetation von anderen Oberflächen unterscheiden kann.

Oft fällt es dem menschlichen Auge allerdings schwer, farblich ähnliche, vor allem dunkle, Landoberflächen korrekt voneinander zu unterscheiden. Beispielsweise haben die Seen im Bild eine ähnliche Farbe wie die Waldflächen. Allein anhand der Farbe ist es daher nur schwer möglich, Oberflächen richtig zu klassifizieren.

b) Räumliche Auflösung

Die sogenannte räumliche Auflösung gibt an, wie gut Fernerkundungssensoren verschiedene Objekte auf der Erde räumlich voneinander trennen können. Die Kantenlänge eines Bildpixels (kleinste Informationseinheit) entspricht dann einer bestimmten Länge in der realen Welt. Die folgende Abbildung zeigt jeweils eine Aufnahme der Allianzarena in München, aufgenommen von unterschiedlichen Sensoren mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen. Während es im linken Bild schwerfällt, das Fußballstadion zu erkennen, ist es im rechten Bild ganz einfach. Je höher die räumliche Auflösung, bzw. je kleiner die Kantenlänge eines Bildpixels in der Realität ist, desto besser können einzelne Objekte im Bild erkannt werden. Während im linken Bild mit einer Auflösung von 30 m nur unterschiedliche Farben zu erkennen sind, lässt die mittlere Abbildung mit einer Auflösung von 10 m bereits ein Fußballstadion, umgeben von Parkplätzen und Straßen, erahnen. Erst im rechten Bild mit einer Auflösung unter einem Meter sind auf den Parkplätzen und Straßen auch einzelne Autos und einzelne Bäume erkennbar.

Je mehr Bildpunkte ein Sensor erfasst, desto mehr Informationen können auf der Aufnahme abgebildet werden.

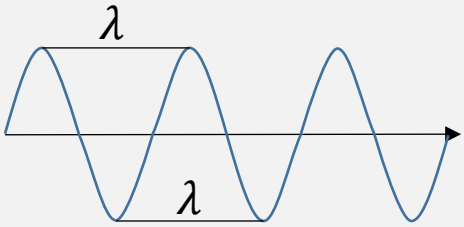
Die Optik des Sensors, welcher die untenstehende Abbildung aufgenommen hat, hat einen Aufnahmewinkel von 120° und befand sich zum Zeitpunkt der Aufnahme auf einer Höhe von 900 m über Grund. Der Chip hat 2304x1536 Pixel. Berechne die Auflösung eines Pixels des Bildes in Metern.

Du möchtest mit dem Sensor die Stadt München (Nord-Süd-Ausdehnung: 20,7 km; Ost-West-Ausdehnung: 26,9 km) in einem Bild sehen können. In welcher Höhe müsste sich der Sensor dazu mindestens befinden?

🕮 **Für Brainies:** Die räumliche Auflösung von Satelliten wird bereits bei der Missionsplanung, also der Überlegung, welche Eigenschaften der Satellit untersuchen soll, festgelegt. Möchte man beispielsweise die Entwicklung von Städten beobachten, muss der Sensor über eine hohe räumliche Auflösung von wenigen Metern Pixellänge verfügen, da man nur so in den Bildern einzelne Häuser identifizieren kann. Möchte man hingegen die Entwicklung der Küstenlinie für ganz Europa über mehrere Jahrzehnte untersuchen, ist es ausreichend, wenn der Sensor über eine geringere Auflösung von 10-50 m verfügt, da sich in vielen Küstenabschnitten der Tidenbereich über mehrere Meter erstreckt.

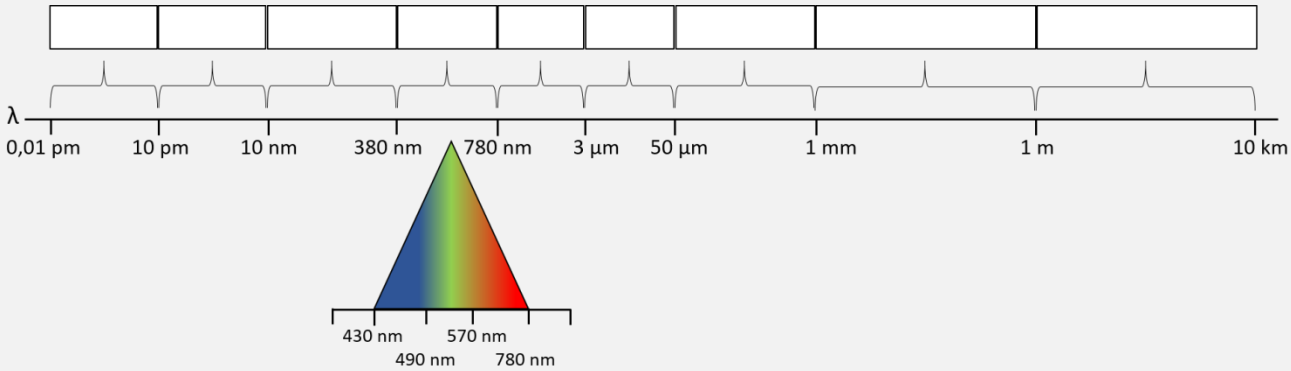
3. Sehen wie ein Satellit (2): Informationen aus dem Unsichtbaren

a) Elektromagnetisches Spektrum



Die Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung wird im Wellenmodell physikalisch richtig beschrieben. Als Wellenlänge (λ) einer periodischen Welle bezeichnet man den kleinsten Abstand zweier Punkte gleicher Phase der Welle. Zwei Punkte haben die gleiche Phase, wenn sie im zeitlichen Ablauf dieselbe Auslenkung und die gleiche Bewegungsrichtung haben. Besonders einfach kann man die Wellenlänge auch als Abstand zwischen zwei benachbarten Wellenbergen bzw. –tälern beschreiben.

Die Strahlung der Sonne wird anhand der jeweiligen Wellenlänge in verschiedene Bereiche unterteilt. Das Intensitätsmaximum der Strahlung liegt bei etwa λ=500 nm (blau-grünes Licht), auf welches sich auch das menschliche Auge angepasst hat. Man bezeichnet den vergleichsweise kleinen Bereich von λ=400 nm (violett) bis λ=750 nm (rot) als sichtbares Licht (englisch: Visible (VIS)). Neben diesem enthält das Sonnenlicht auch die ultraviolette, Röntgen- und Gamma-Strahlung sowie das Nahe (NIR), Mittlere (MIR) und Ferne (FIR) Infrarot. Auch die Mikrowellen sind Teil des elektromagnetischen Spektrums. Trage die einzelnen Strahlungsarten



passend zur Wellenlänge in die freien Kästen ein.

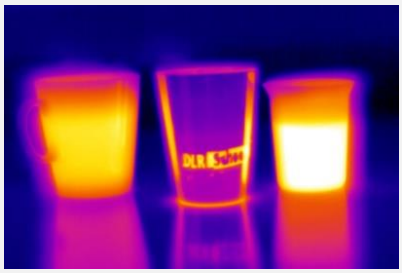
Die verschiedenen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums werden neben der Wellenlänge auch anhand der Frequenz unterschieden. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit: $c = 299\,792\,458\ \frac{m}{s}$) elektromagnetischer Wellen in Luft nahezu unabhängig von der Wellenlänge ist, sind die Wellenlänge λ und die Frequenz f indirekt proportional zueinander:

$$c = \lambda \cdot f$$

Berechne die Frequenzen für sichtbares Licht mit den Farben Rot, Grün und Blau und den Frequenzbereich der Mikrowellenstrahlung.

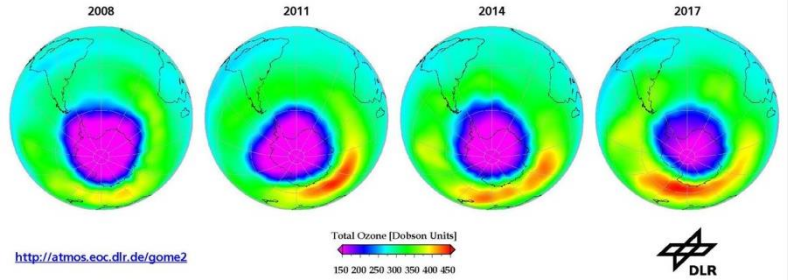
Für unsere Augen ist bis auf das sichtbare Licht alle übrigen Anteile des elektromagnetischen Spektrums unsichtbar. Mit einer einfachen Digitalkamera (Webcam oder Kamera von vielen Handys) kann man jedoch auch nahes Infrarot, welches beispielsweise bei Fernbedienungen verwendet wird, sichtbar machen.

Untersuche die Strahlung einer Infrarotfernbedienung mit Deinem Smartphone. Verdunkle dazu den Raum und sieh Dir an, wie unterschiedliche Objekte (z.B. verschiedenfarbige Stifte, Pflanzen, Flüssigkeiten) die Infrarotstrahlung reflektieren bzw. absorbieren. Notiere Deine Beobachtungen.



Digitalkameras können lediglich einen sehr kleinen Bereich der nahen Infrarotstrahlung (bis etwa 1000 nm) sichtbar machen. Als Wärmebildkameras eignen sie sich nicht, da die zugehörige thermale Infrarotstrahlung eine etwa zehnmal so große Wellenlänge (um 10 µm) hat. Speziell für diesen Zweck gebaute Wärmebildkameras werden beispielsweise von der Feuerwehr oder im Gebäudemanagement eingesetzt. In der Fernerkundung werden Thermalsensoren beispielsweise zur Indetifizierung von Bränden auf der Erde oder zur Untersuchung von Wolken genutzt.

Auch die UV-Strahlung ist für den Menschen unsichtbar und dennoch von großer Bedeutung. Sie ist einerseits wichtig für den Organismus, beispielsweise bei der Produktion von Vitamin-D. In zu großen Mengen (und die sind sehr schnelle erreicht!) ist sie jedoch äußerst gefährlich und Ursache von Hauterkrankungen bis hin zu Hautkrebs. Dagegen hilft angepasste Kleidung, entsprechendes Verhalten und Sonnencreme



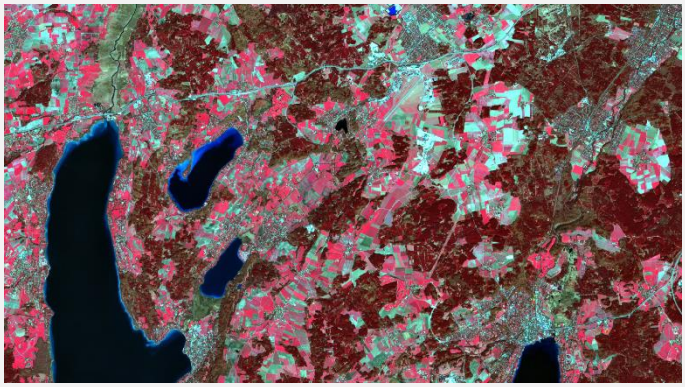
Ein natürlicher UV-Filter ist die Ozonschicht in der Atmosphäre in etwa 10 bis 50 km Höhe. Ohne diese schützende Hülle wäre das Leben, wie wir es kennen, auf der Erde unmöglich. In den letzten Jahrzehnten wurde die Ozonschicht durch menschliche Einflüsse zunehmend dünner. Vor allem der unkontrollierte Ausstoß von FCKW-Gasen (Fluorchlorkohlenwasserstoff), welche den Zerfall der Ozonmoleküle (O_3) beschleunigen, führte zu dem aus den Medien bekannten *Ozonloch*. Durch ein internationales Emissionsverbot im Jahre 1987 regeneriert sich die Ozonschicht langsam wieder. Die Dicke der Ozonschicht wird in sogenannten Dobson-Units (DU) angegeben und vom Boden aber vor allem auch von Satelliten aus gemessen.

UV-Strahlung kann man mit Hilfe von fluoreszierenden Materialien nachweisen. Als Quelle für UV-A Strahlung können Schwarzlichtlampen verwendet werden. Untersuche damit unterschiedliche Materialien (z.B. Geldscheine, Tonic Water, Vollwaschmittel…). Finde (mindestens) drei fluoreszierende Materialien.
Vorsicht: Nie direkt mit dem ungeschützten Auge ins Schwarzlicht blicken!

🕮 **Für Brainies:** Die Entdeckung des UV-Lichts geht auf den deutschen Naturwissenschaftler Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) zurück. Ritter war einer der Begründer der Elektrochemie und erfand um 1800 den ersten Akkumulator. Die Entdeckung der UV-Strahlung geht zurück auf Experimente zur Schwärzung von Silbersalzen durch Sonnenlicht. Vor allem die Strahlen jenseits des violetten Wellenlängenbereichs schwärzen Silberchloridpapier sehr effektiv. Ritter nannte die Strahlen erst „de-oxidierende Strahlen“, was vor allem die chemische Wirkungskraft hervorheben sollte. Bis in das 19. Jahrhundert wurden die UV-Strahlen auch als Chemische Strahlung bezeichnet.

b) Vegetationsanalysen

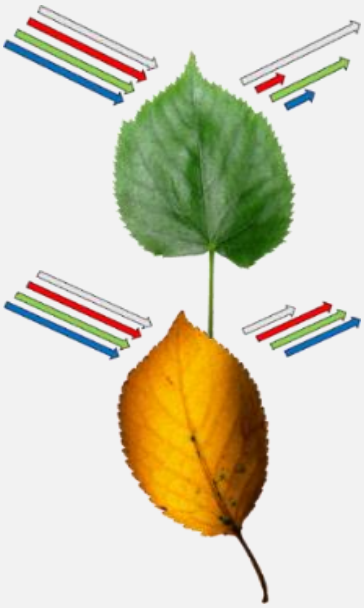
Wie sich bereits gezeigt hat, ist ein RGB-Echtfarbenbild nur bedingt geeignet, um vor allem dunkle Landoberflächen voneinander zu unterscheiden. Beispielsweise sind dichte Wälder ähnlich dunkel wie Gewässerflächen, sodass eine Unterscheidung nur durch die Farbe nicht möglich ist. Daher sind die meisten Fernerkundungssensoren auch für unsichtbare Wellenlängenbereiche empfindlich. Vor allem das nahe Infrarot (NIR), welches unmittelbar an den Roten Spektralbereich anschließt, ist für Landschaftsanalysen von besonderer Bedeutung. Nebenstehend siehst du ein sogenanntes NIR-Falschfarbenbild, welches dem Bild auf Seite 4 entspricht. Hier werden nicht die vom Satelliten gemessenen Reflexionen im sichtbaren blauen, grünen und roten Wellenlängenbereich miteinander gemischt, sondern die im Grünen und Roten sowie im NIR zu einem Falschfarbenbild kombiniert. In diesem Bild wurden die Reflexionen im NIR in roter Farbe dargestellt. Falschfarbenbilder zeigen demnach die Landbedeckungen in „falschen“ Farben im Vergleich zu dem, was das menschliche Auge wahrnimmt.



Gib an, welche Art Landoberfläche in einem NIR-Falschfarbenbild besonders rot (also eigentlich „infrarot“) erscheint.

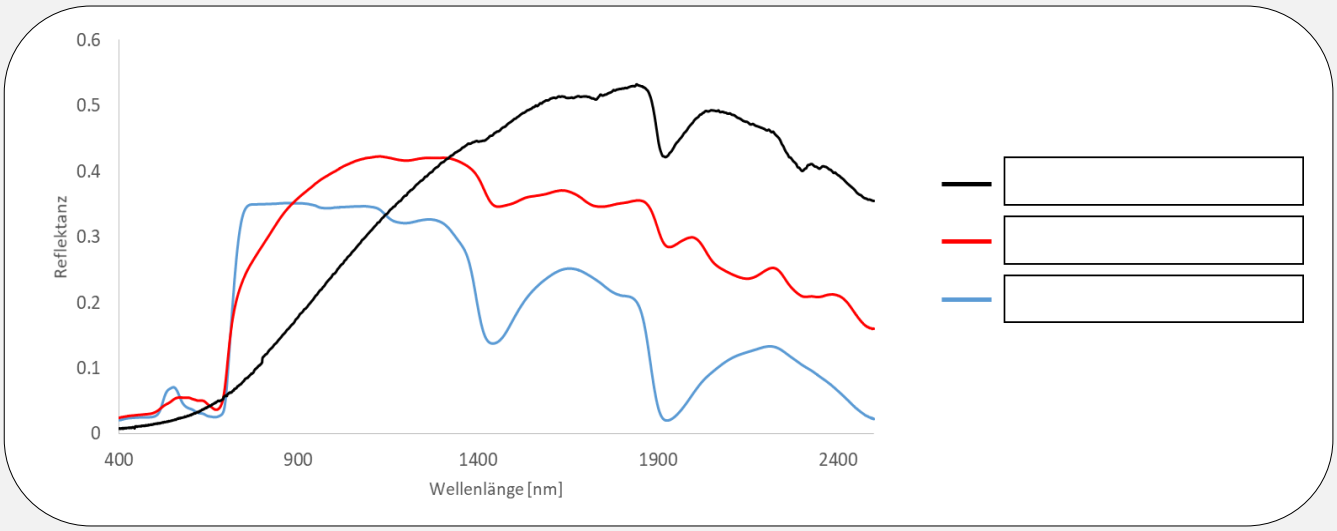
Gesunde Vegetation absorbiert sichtbares Sonnenlicht zum Großteil, um damit bei der Photosynthese Energie zu gewinnen. Strahlung im nahen Infraroten (NIR) Spektralbereich hingegen trägt nicht zur Photosynthese bei und wird fast vollständig reflektiert. Dieser Effekt ist nach seinem Entdecker Robert Williams Wood als sogenannter Wood-Effekt bekannt. Bei der Infrarotfotografie wird er für besonders stimmungsvolle Bilder genutzt. Gesunde Blätter erscheinen im NIR strahlend weiß, ähnlich wie Schnee im sichtbaren Licht. Dies liegt daran, dass die Infrarotstrahlung das Blattgrün (Chlorophyll) durchdringt und an den vielen Zellwänden im Inneren des Blatts in alle Richtungen gestreut wird.

Vitale Vegetation zeichnet sich demnach aus durch eine sehr starke Reflexion der Sonnenstrahlung im NIR und eine sehr schwache Reflexion im sichtbaren Bereich, vor allem von blauem und rotem Licht. An diesem für gesunde Pflanzen typischen Reflexionsverhalten kann man Vegetation auf einem NIR-Falschfarbenbild auch besonders gut erkennen. Nimmt der Wassergehalt einer Pflanze, beispielsweise durch zu hohe Temperaturen, ab, ändern sich auch ihr Absorptions- und Reflexionsverhalten. Während nun zwar immer noch der Großteil des einfallenden roten und blauen Lichts absorbiert wird, da die Pflanze noch immer Photosynthese betreiben kann, nimmt sie nun auch einen Teil der NIR Strahlung auf. Ist die Vegetation hingegen vollständig ausgetrocknet, so ist im sichtbaren Spektrum nun nicht mehr das typische Absorptionsverhalten zu erkennen.



Als Maß dafür, wie „gut“ eine Oberfläche Strahlung mit bestimmter Wellenlänge reflektiert, steht deren so genannte Reflektanz ρ. Diese gibt an, welcher Anteil der Strahlung einer bestimmten Wellenlänge an der Oberfläche reflektiert wird: $\rho = \frac{P_r}{P_0}$. Dabei ist P_0 die einfallende Leistung und P_r die reflektierte Leistung.

Im Diagramm sind die Reflexionsspektren von unterschiedlich vitaler Vegetation in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Markiere auf der Achse der Wellenlänge die Bereiche „sichtbares Licht“ und „Infrarot“. Ordne den Spektren die Vegetationsstufen „vitale Vegetation“, „austrocknende Vegetation“ und „trockene Vegetation“ zu

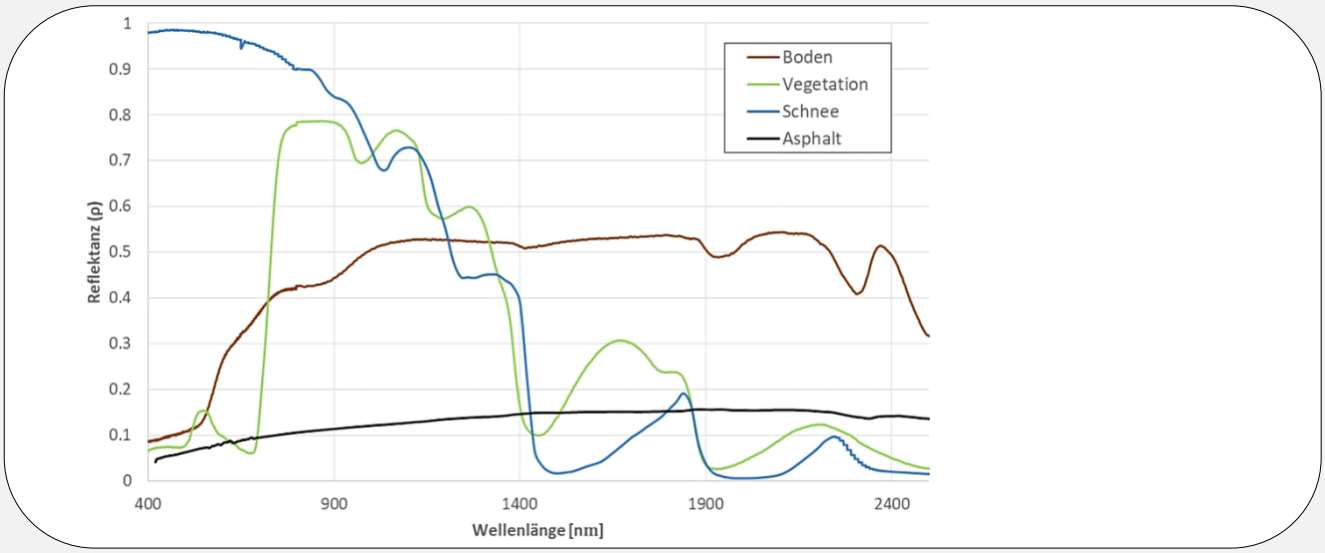


Um vom Satelliten aus die Vitalität der beobachteten Vegetation zu messen, nutzt man ihr charakteristisches Reflexionsverhalten. Vereinfacht wird dies durch die Verwendung von Kennzahlen, so genannten Indizes. Diese werden in der Fernerkundung genutzt, um unterschiedliche Landoberflächen anhand ihres jeweiligen typischen Reflexionsverhaltens voneinander zu unterscheiden. Einer der bekanntesten Indizes ist der sogenannte NDVI (Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex). Dabei nutzt man die Tatsache, dass Blätter gesunder Pflanzen das sichtbare Licht, vor allem in den Farben Rot und Blau, zur Photosynthese fast vollständig absorbieren, während nahe Infrarotstrahlung fast vollständig reflektiert wird:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

NDVI	Oberfläche
$\mathrm{NDVI} < 0$	Wasser, Schnee, Wolken
$\mathrm{NDVI} \approx 0$	Erdboden
$0 < \mathrm{NDVI} < 0{,}5$	nicht vitale Vegetation
$\mathrm{NDVI} > 0{,}7$	vitale Vegetation

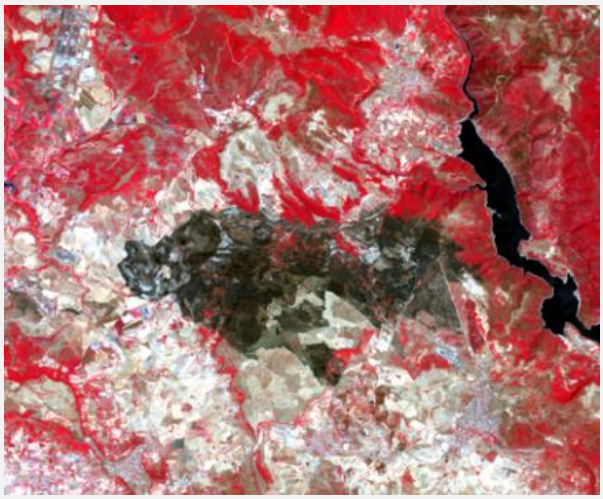
Die Differenz der Reflektanzen wird zur Normierung auf ein Intervall von -1 bis +1 durch deren Summe geteilt. Ein hoher NDVI nahe 1 steht so für gesunde, vitale Vegetation. Berechne die verschiedenen NDVI-Werte für die Landoberflächen Boden, gesunde Vegetation, Schnee und Asphalt:



4. Auswertung von Satellitenbildern LEOWorks

Im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen beschäftigt sich eine Abteilung mit der Analyse von Umweltkatastrophen. Das sog. „Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation“ (ZKI) leistet mit einem durchgängig verfügbaren Service eine schnelle Beschaffung, Aufbereitung und Analyse von Satellitenbilddaten bei Natur- und Umweltkatastrophen weltweit und liefert innerhalb weniger Stunden wertvolle Informationen für die Hilfskräfte vor Ort in den Krisengebieten.

Mit Deinem Wissen über Fernerkundung kannst Du nun in die Rolle eines Fernerkundungsexperten am ZKI schlüpfen und Satellitendaten analysieren, welche das Ausmaß einer Naturkatastrophe zeigen.

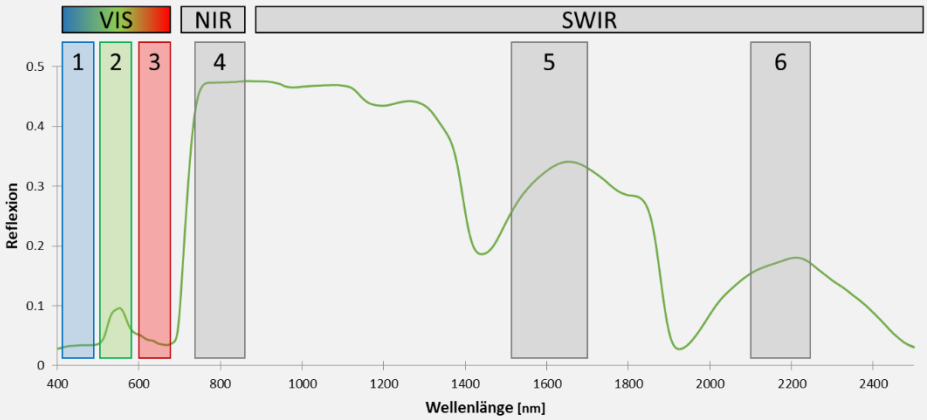


Der Waldbrand bei Nurri auf Sardinien (Italien) am 27.07.2016 hat eine große Fläche betroffen. Viele zuvor auch landwirtschaftlich genutzte Bereiche sind durch das Feuer zerstört worden. Um Hilfen zu beantragen, möchten die Menschen vor Ort wissen, welche Ausmaße das Feuer hatte und wie viele Flächen zerstört wurden. Deshalb wirst Du beauftragt als Experte der Satellitenfernerkundung die verbrannten Waldflächen vom 27.07.2016 zu lokalisieren und zu vermessen.

Zur Auswertung der Daten verwenden wir im Folgenden die Software LEOWorks. Das Programm wurde von der Europäischen Weltraumagentur (ESA) speziell für SchülerInnen entwickelt. Hiermit können Daten von Fernerkundungssensoren betrachtet und analysiert werden. Nach einer Einführung in die Funktionen der Software erfolgt die Kartierung der Waldbrandfläche.

a) Einführung in LEOWorks

Die benötigten Daten werden von der Lehrkraft bereitgestellt. Die Sentinel-2 Szene zeigt einen Ausschnitt um die Zugspitze in den Alpen mit den folgenden Wellenlängenverteilungen (die Zahlen zeigen die jeweiligen Kanäle der Bilder):



Zuerst sollen die Daten geladen und dargestellt werden.

1. Lade die bereitgestellte Szene in LEOWorks.
   File → Open → Single File Dataset → Ok → Ok
2. Öffne das erste Band der Szene per Doppelklick. Welche Oberflächen kannst du identifizieren?
   Doppelklick auf Bänder, um diese zu öffnen

3. Stelle die Szene als RGB-Echtfarbenbild dar. (Falls ein Bild sehr dunkel erscheint, kannst du mit Hilfe der sogenannten „color Manipulation“ oder dem „interactive streching“ die Bildqualität verbessern.)
   View → New RGB View
   Tools → Color Manipulation / *Tools → Interactive Streching*
4. Mit verschiedenen Falschfarbenbildern können unterschiedliche Oberflächen hervorgehoben werden, um diese visuell zu analysieren. Erstelle die Falschfarbenkombinationen 5 – 4 – 3 und 4 – 3 – 2. Welche der Kombinationen ermöglicht die Analyse der Oberflächen „offener Boden und Gesteinsflächen“ und welche Kombination die Analyse der Oberfläche „Vegetation“?
   View → New RGB View

Vegetation:	offener Boden und Gesteinsflächen:

5. Wie groß ist die Auflösung eines Pixels?
   Tools → measure

6. Suche in der Szene den Eibsee und ermittle dessen ungefähre Fläche.
   Tools → measure → area

Untersuche die Vegetation in der Region mithilfe des Normalisierten Differenzierten Vegetationsindex NDVI.

7. Berechne den NDVI und ermittle typische Werte für die Klassen „Siedlung“, „Gestein“, „Gewässer“, „abgeerntetes Feld“ und „Wald“.
   Tools → NDVI → Compute

8. Wie unterscheidet sich besonders vitale Vegetation von weniger vitalen Vegetation. Finde im Bild Beispiele und Spektren für verschiedene Vegetationsstufen.
   Inspect → Spectrum View

b) Katastrophenkartierung – Bestimmung der Waldbrandfläche von Nurri

Wird das ZKI im Katastrophenfall alarmiert, werden zunächst alle verfügbaren Satellitenbilder der betroffenen Region aus den internen Archiven gesucht. Am einfachsten ist die Identifizierung der Schäden, indem man die Situation unmittelbar vor einer Umweltkatastrophe mit der Situation unmittelbar danach vergleicht. So kann man annehmen, dass die Veränderungen im Bild direkt auf die Umweltkatastrophe zurückzuführen sind. Man muss allerdings bei der Auswahl der Bilder auf eventuelle Wolkenbedeckung achten, da Wolken zwischen dem Erdboden und dem Satelliten für die reflektierte Strahlung nicht durchlässig sind.

Für den Waldbrand bei Nurri am 27.07.2016 stehen zwei Sentinel-2 Szenen, welche die Situation wenige Tage davor (18.07.2016) und kurz danach (28.07.2016) zeigen zur Analyse zur Verfügung.

Zuerst sollen die Szenen dargestellt und eine geeignete Visualisierung gefunden werden.

1. Lade die beiden Szenen in LEOWorks
   File → Open → Single File Dataset → Ok → Ok
2. Betrachte zuerst beide Szenen. Untersuche sowohl die einzelnen Bänder, als auch verschiedene Farbkombinationen. Findest du die Brandfläche? (Falls ein Bild sehr dunkel erscheint, kannst du mit Hilfe der „*color manupulation*“ oder dem „*interactive streching*“ die Bildqualität verbessern.)
   Doppelklick auf Bänder, um diese zu öffnen
   Tools → Color Manipulation / *Tools → Interactive Streching*
3. Erstelle ein Echtfarbenbild beider Szenen und vergleiche die Situation vor und nach dem Waldbrand.
   View → New RGB View
4. Erstelle ein Falschfarbenbild, in dem sich die verbrannten Flächen gut von den nicht verbrannten unterscheiden. Tipp: Überlege dir, welche Oberflächenart von dem Brand besonders stark verändert wird. Welche Kanalkombination ist dafür besonders gut geeignet?
   View → New RGB View

Da Waldbrände vor allem die Vegetation verändern, eignet sich der Normalisierte Differenzierte Vegetationsindex, um verbrannte Flächen von nicht betroffenen Flächen zu unterscheiden.

5. Berechne den NDVI für die beiden Szenen vor und nach dem Waldbrand.
   Tools → NDVI → Compute
6. Um die Ausmaße des Waldbrandes besser identifizieren zu können, hilft ein Differenzbild der beiden Szenen. Erkläre jeweils die Bedeutung positiver und negativer Werte in dieser Aufnahme.
   Tools → Band arithmetics → Edit Expression → Ok
7. Welche Werte haben die verbrannten Flächen, welche die nicht verbrannten. Finde einen Schwellwert, welcher die verbrannten Flächen vom Rest trennt.
   Inspect → Pixel info

8. Um den Inhalt der verbrannten Fläche abschätzen zu können, soll eine Maske erstellt werden, welche nur die betroffenen Flächen beinhaltet:
   Erstelle mit dem oben gefundenen Schwellwert eine Maske, um nur die verbrannten Flächen darzustellen.
   Tools → Band arithmetics → Edit Expression → Ok

Durch diese recht einfachen Analyseschritte können für Hilfseinrichtungen schnell Kartierungen erstellt werden, die im Ernstfall auch Leben retten können, da der Blick von oben ein umfassenderes Bild über die Situation im Krisengebiet liefert. Neben dem NDVI existiert ein weiterer Index, welcher bei der Analyse der verbrannten Flächen hilft. Der sogenannte Normalisierte Burn Ratio (NBR) nutzt statt der Reflektanz im roten Wellenlängenbereich die im Mittleren Infrarot (Short Wave Infrared, SWIR): $NBR = \frac{\rho_{NIR}-\rho_{SWIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{SWIR}}$.

Die verwendeten Wellenlängen zeigen die größten Veränderungen bei von Feuer betroffenen Oberflächen. Während durch die Information im NIR Aussagen über die Veränderung in Bezug auf Vegetation also Chlorophyllgehalt einer Oberfläche ermöglicht werden, lässt die Reflektanz im SWIR unter anderem Rückschlüsse auf den Wassergehalt von Oberflächen zu. Durch Kombination der beiden Informationen können so verbrannte Flächen identifiziert werden.

9. Berechne den NBR sowohl für die Szene vor als auch nach dem Waldbrand
   Tools → Band arithmetics → Edit Expression → Ok (das SWIR-Band entspricht dem 6. Kanal)

Sollen nun Aussagen über die Schwere des Brandes getroffen werden, um Beispielsweise direkt nach einem Brand Ersthelfer schnell vor Ort zu unterstützen, dient der Vergleich des NBR-Verhältnisses vor (pre) und nach (post) dem Brand. Der sogenannte Delta NBR wird wie folgt berechnet: $\Delta NBR = \left(\frac{\rho_{NIR}-\rho_{SWIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{SWIR}}\right)_{pre} - \left(\frac{\rho_{NIR}-\rho_{SWIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{SWIR}}\right)_{post}$ und ermöglicht eine Abschätzung der Schwere der Auswirkungen eines Brandes.

10. Berechne den ΔNBR sowohl für die Szene vor als auch nach dem Waldbrand
    Tools → Band arithmetics → Edit Expression → Ok

    Die schwere des Waldbrandes kann mit Hilfe von unterschiedlichen ΔNBR-Werten abgeschätzt werden:

ΔNBR	**Brandschwere**
< -0,25	Hohes Wachstum nach Feuer
-0,25 - -0,1	Geringes Wachstum nach Feuer
-0,1 – 0,1	Unverbrannte Flächen
0,1 – 0,27	Geringe Schäden durch den Brand
0,27 – 0,44	Moderat-geringe Schäden durch den Brand
0,44 – 0,66	Moderat-hohe Schäden durch den Brand
> 0,66	Hohe Schäden durch den Brand

11. Der Großteil der Fläche war von keinen bis geringen Schäden durch das Feuer betroffen. Schätze ab, welche Fläche von moderat-geringen und von moderat-hohen Schäden durch das Feuer betroffen sind.
    Tools → measure → area

🕮 **Für Brainies:** Auf der Homepage www.*SatTec.org* findest du im Downloadbereich weitere spannende Fallstudien zur Analyse von Fernerkundungsdaten. Beispielsweise gibt es die Möglichkeit den Gletscherrückgang seit 1985 auf der Zugspitze zu analysieren.

III. Das Europäische Satellitennavigationssystem Galileo

Als Satellitennavigation (auch Satellitenortung) bezeichnet man Verfahren der Ortung und Navigation mit Hilfe von Satelliten (GNSS, Global Navigation Satellite System). Dabei werden Signale aus dem All genutzt, um die Position auf der Erde auf wenige Meter genau zu bestimmen. Ein Computer berechnet aus dieser Position auf Basis von Kartenmaterial dann eine Route zum gewünschten Ziel (Zielführung). Somit besteht ein Satellitennavigationssystem, wie es beispielsweise in Smartphones oder im „Navi“ im Auto eingesetzt wird, streng genommen immer aus einer Kombination aus Ortungs- und Zielführungssystem. Im Folgenden soll es in erster Linie um die Ortung mit Hilfe von Satellitensignalen, wie beim europäischen Galileosystem, gehen.

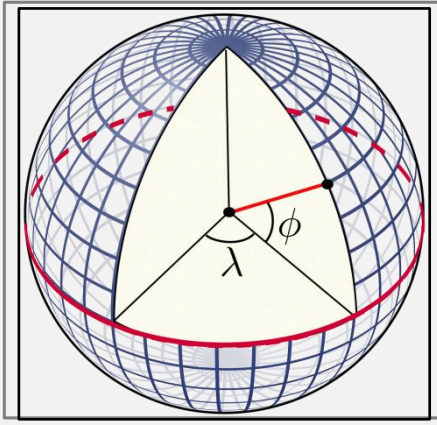
Seit im Jahr 2000 die künstliche Signalverschlechterung „Selective Availability“ beim US-amerikanischen Global Positioning System GPS abgeschaltet wurde, hat die Technologie der Satellitennavigation Einzug in viele Bereiche unseres Alltags genommen. Neben den bereits erwähnten Navigationssystemen in Fahrzeugen und Smartphones werden GNSS-Empfänger in allen möglichen Freizeitbereichen, wie Outdoorsport, aber vor allem auch für professionelle Anwendungen eingesetzt. Zu nennen wären hier beispielsweise die See- und Luftfahrt, das Flottenmanagement von Transportfirmen, Sicherheits- und Rettungsdienste oder auch die Landwirtschaft. Beim so genannten „Precision Farming“ werden landwirtschaftliche Maschinen über GNSS-Empfänger gesteuert, wodurch beispielsweise der Einsatz von Dünger und Schädlingsbekämpfungsmitteln genauestens überwacht werden kann. Dies nutzt dem Geldbeutel der Landwirte ebenso wie der Umwelt.

Derzeit stehen zwei voll funktionsfähige GNSS zur Verfügung: das US-amerikanische GPS und das russische GLONASS. Auf Grund der vielfältigen auch sicherheitsrelevanten Anwendungsbereiche entschied sich die Europäische Kommission Ende des letzten Jahrtausends für den Aufbau eines eigenen Satellitennavigationssystems. Die Besonderheit: als einziges GNSS ist Galileo vollständig unter ziviler Kontrolle. Nach einigen, vor allem politischen, Anlaufschwierigkeiten, wurde inzwischen mit dem dritten Start einer Ariane 5 ES Rakete die Zahl der im Orbit befindlichen Galileosatelliten auf 26 erhöht. Das System ist damit voraussichtlich ab 2020 voll einsatzbereit. Die folgenden Seiten sollen Dir mit vielen Experimenten dabei helfen, zu verstehen, wie die Ortung mit Satelliten funktioniert. Denn obwohl die praktische Umsetzung dieser Technik überaus komplex und anspruchsvoll ist, sind doch die Grundprinzipien überraschend einfach.

1. Die Erde – Kugel, Ei oder Kartoffel?

Vom Mond aus gesehen erscheint die Erde als perfekte blaue Kugel – ein Anblick wie er sich bislang nur den wenigen Apolloastronauten bot. Das historische Foto der Mission Apollo 8 aus dem Jahre 1968 zeigt die blaue Erdkugel über der zerklüfteten Mondoberfläche. Zur Orientierung auf der Erdoberfläche werden daher so genannte Kugelkoordinaten verwendet. Im Gegensatz zu den kartesischen Koordinaten, welche die Position in Abständen entlang der drei Raumachsen (x, y und z) angeben werden auf der Erdoberfläche Positionen mit Hilfe von Winkeln bestimmt.

Gib an, was man unter den Begriffen „Längen- und Breitenkreise“ versteht. Was ist jeweils deren „Nullpunkt“?



Längenkreise: _____

_____

Breitenkreise: _____

_____

Für die Angabe der Koordinaten sind drei Darstellungsformen üblich (siehe Tabelle), wobei als Dezimaltrennzeichen meist die englische Schreibweise mit einem Punkt anstatt einem Komma verwendet wird. Die Sprechweise ist beispielsweise „41 Grad 58 Minuten 46 Sekunden nördlicher Breite, 13 Grad 36 Minuten 5 Sekunden östlicher Länge“.

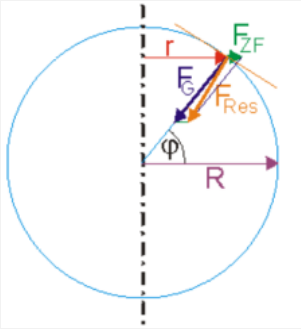
Grad, Minuten, Sekunden	48°5'10.3"N 11°16'51.4"O		
Grad, Minuten		38°48.17‘N 104°31.475‘W	
Grad (Dezimal)			20.88143°S 55.44929°O
Ortsname/ Bedeutung			

Vervollständige die Tabelle und finde heraus, um welche Orte es sich handelt und was diese Orte mit Satellitennavigation zu tun haben. Hinweis: Die Einteilung ist: 60‘ = 1° und 60‘‘ = 1‘.

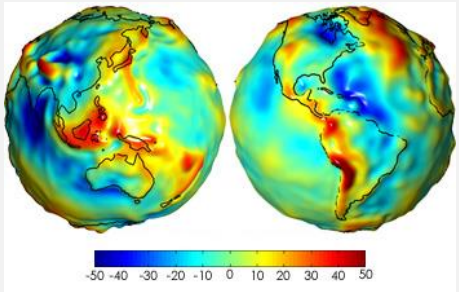
Um zusätzlich zur Position auf der Erdoberfläche auch Höhenangeben machen zu können, wird meist der mittlere Meeresspiegel als Nullniveau verwendet. Diese Festlegung orientiert sich an der physikalischen Definition von Höhe, nach der zwischen zwei Orten auf gleicher Höhe kein Wasser fließt. Gleich hohe Orte befinden sich demnach im gleichen Schwerepotential. Dieses kann vereinfacht durch die Schwerebeschleunigung g (auch Ortsfaktor genannt) beschrieben werden. Nach dem Newton'schen Gravitationsgesetz ist $g = \frac{G \cdot M_{Erde}}{r^2}$, wobei $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\mathrm{m}^3\mathrm{kg}^{-1}\mathrm{s}^{-2}$ die Gravitationskonstante ist, $M_{Erde} = 5{,}974 \cdot 10^{24}\,\mathrm{kg}$, die Erdmasse und r der Abstand vom Erdmittelpunkt.
Berechne die Schwerebeschleunigung g am Äquator ($R_A = 6378\,\mathrm{km}$) und am Nordpol ($R_P = 6357\,\mathrm{km}$). In Deutschland wird üblicherweise mit $g = 9{,}81\mathrm{ms}^{-2}$ gerechnet. Welchem Erdradius entspricht dieser Wert?

Wie kommt es, dass die Erde an den Polen gegenüber dem Äquator um ca. 21 km abgeflacht ist? Der Grund dafür ist die Rotation der Erde um ihre Achse. Da die Erde in ihrem inneren nicht fest sondern zähflüssig ist, kann sie sich ein wenig verformen. Sie wird jedoch durch die Schwerkraft zusammengehalten. Die Drehbewegung ist in Äquatornähe am schnellsten, sodass dort eine vergleichsweise hohe Zentripetalkraft für die Kreisbewegung erforderlich ist. Diese kommt von der Schwerkraft oder anders ausgedrückt: Am Äquator wird ein gewisser Teil der Schwerkraft, welche die Erde zusammenhält (!), als Zentripetalkraft für deren Rotationsbewegung benötigt. An den Polen nicht. Daher kann dort die Schwerkraft die Erde etwas stärker zusammenziehen. Zur Verdeutlichung hilft folgendes Experiment: Fülle einen kugelrunden Luftballon mit Wasser, lege ihn in ein großes Gefäß und drehe ihn schnell mit der Hand an. Was beobachtest du?

🕮 Für Brainies:



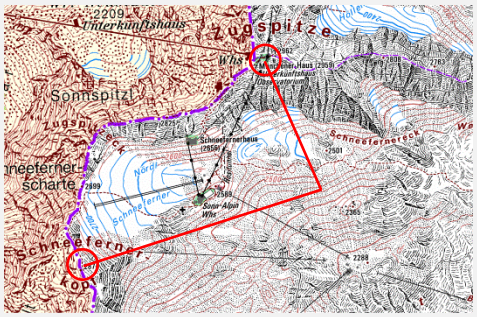
Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die Erde eher die Form einer rotierenden Ellipse hat. Die exakte Berechnung der Form dieses so genannten Rotationsellipsoids ist mathematisch anspruchsvoll. Allerdings können die auftretenden Kräfte abgeschätzt werden. Betrachte dazu die Abbildung rechts. In dieser ist anstelle der Zentripetalkraft deren gleichgroße Gegenkraft (die so genannte Zentrifugalkraft) eingezeichnet. An einem Ort der geographischen Breite φ ist der Abstand zur Rotationsachse $r = R \cdot cos\varphi$. Die Zentripetalbeschleunigung ist $a_z = \omega^2 \cdot r = \omega^2 \cdot R \cdot cos\varphi$ und damit am Äquator ($\varphi = 0°$) am größten. Für $\varphi = 45°$ gilt: $r = 6370\mathrm{km} \cdot cos45° \approx 4500\mathrm{km}$. Daraus erhält man eine Zentrifugalbeschleunigung $a_z = (7{,}27 \cdot 10^{-5}\mathrm{s}^{-1})^2 \cdot 4{,}5 \cdot 10^6\mathrm{m} \approx 0{,}024\mathrm{ms}^{-2}$. Dieser Wert ist gegenüber der Schwerebeschleunigung sehr klein (siehe auch www.leifiphysik.de).



Mittlerweile wurde die Gestalt der Erde mit Hilfe von Satelliten bis auf wenige Zentimeter genau vermessen. Dabei muss unterschieden werden zwischen der geometrischen Form der Erde mit ihren Gebirgen und Tälern und der nicht immer identischen Form des Erdschwerefeldes (so genannter Geoid, Abbildung links). Das Radarsatellitenpaar TerraSAR-X und TanDEM-X des DLR liefert die Daten für ein extrem hoch aufgelöstes dreidimensionales Geländemodell der Erde (Digital Elevation Model). Die deutsch-amerikanische Mission GRACE, welche ebenfalls aus zwei Satelliten besteht, vermisst das Schwerefeld der Erde mit größter Präzision. Es zeigt sich, dass die Erde eher die Form einer Kartoffel hat als die eines Ellipsoiden oder gar einer Kugel. Möchte man mit GNSS auf wenige Meter genau navigieren, muss dies berücksichtigt werden.

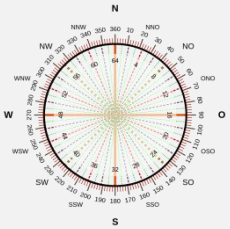
2. Navigieren wie Christoph Kolumbus

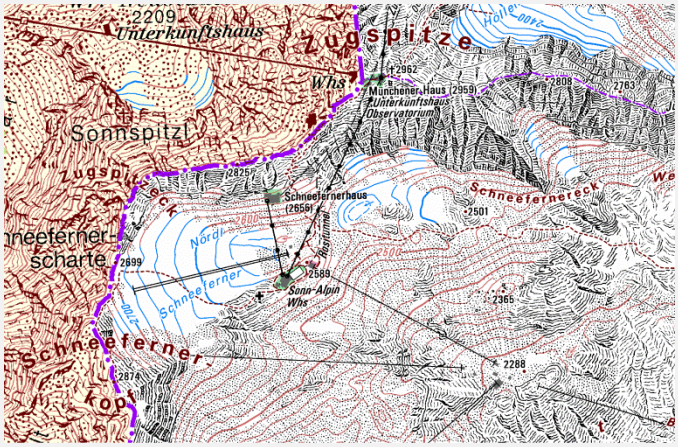
a) Orientierung an physikalischen Merkmalen der Erde



Auf ihrem Weg zur Zugspitze haben Bergsteiger im dichten Nebel den Weg verloren und versuchen nun ihre Position zu bestimmen. Als es plötzlich kurz aufklart, können sie rechts von sich den Zugsitzgipfel und links den Schneefernerkopf erkennen. Durch Richtungspeilung zu den beiden Gipfeln ist es ihnen prinzipiell möglich ihre Position einigermaßen exakt auf einer Karte zu bestimmen. Nur: Wie kann man eine Richtung auf der Erde exakt bestimmen? Dabei hilft das Erdmagnetfeld.

Untersuche das Magnetfeld der Erde mit Hilfe der Simulation: http://phet.colorado.edu/sims/faraday/magnet-and-compass_de.jnlp und zeichne es in die linke Abbildung der Erde ein.





Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung.

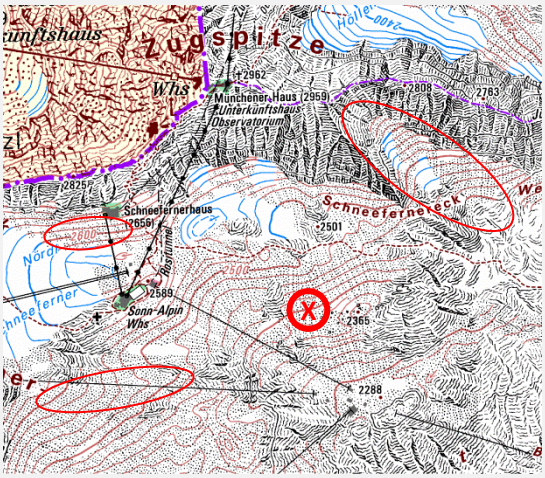
Eine Kompassnadel zeigt auf der Erde immer recht genau in Richtung Norden – zumindest solange keine störenden metallischen oder magnetischen Gegenstände in der Nähe sind. Problematisch bei der Navigation mit dem Kompass ist jedoch die eingeschränkte Ablesegenauigkeit, welche bei Amateurgeräten in einem Bereich von etwa $\pm 2°$ liegt – je nach Übung!

Eine andere Bergsteigergruppe hat sich ebenfalls auf dem Zugspitzplatt verlaufen. Sie misst zum Zugspitzgipfel die Peilung 0° und zum Schneefernerkopf 270°. Ermittle ihre Position auf der Karte durch Konstruktion und schätze den Fehlerbereich der Messung mit Hilfe des Maßstabs (rechts unten auf der Karte) ab.

🕮 Für Brainies:

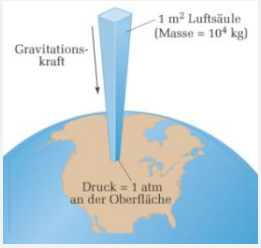
Das Erdmagnetfeld lenkt den hochenergetischen Teilchenstrom der Sonne ab und wird durch diesen geformt. Der so genannte „Sonnenwind“ ist auch verantwortlich für das wunderschöne Phänomen der Polarlichter. Diese entstehen, wenn die schnellen Elektronen oder Protonen des Sonnenwinds auf die Erdatmosphäre treffen und dort mit Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen wechselwirken. Da die Moleküle nur Strahlung mit ganz bestimmten Energien abgeben können, erstrahlen Polarlichter immer in denselben Farben (meist grün). Es treten allerdings auch solche im nicht sichtbaren Spektrum auf.

Eine andere Orientierungshilfe erhalten Bergsteiger durch die Messung ihrer Höhe. Betrachten wir dazu einen Detailausschnitt der Karte vom Zugspitzplatt. Die Karte ist mit so genannten Höhenlinien versehen, welche Bereiche gleicher Höhe miteinander verbinden. Die Bergsteiger befinden sich laut Karte in einer Höhe von knapp 2400 m.



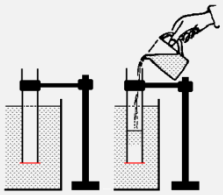
Welche weiteren Informationen über das Gelände kannst du den Höhenlinien auf der Karte entnehmen? Überlege dazu, welche Bedeutung es hat, wenn viele Höhenlinien sehr dicht beieinanderliegen.

Die Höhenmessung erfolgt meist indirekt durch eine Messung des Luftdrucks. Dieser entsteht durch die Gewichtskraft, welche auf die Erdatmosphäre wirkt. Je höher man sich auf der Erde (oder auch in der Luft) befindet, desto geringer ist der dort vorherrschende Luftdruck, da man weniger Luft über und mehr unter sich hat. Der Zusammenhang ist jedoch nicht linear. Mit einem entsprechend eingestellten Messgerät, einem Barometer, kann man den Luftdruck bestimmen und anhand von Tabellenwerten in eine entsprechende Höhe umrechnen. Um die Wirkung des Luftdrucks zu zeigen, eignen sich folgende Versuche



1) Fülle ein Glas zu etwa 2/3 mit Wasser und lege eine Postkarte darauf. Drehe das Glas um und halte dabei die Postkarte fest, so dass kein Wasser herausläuft. Lasse nun die Postkarte los. Beschreibe deine Beobachtung und begründe das Versuchsergebnis.

2) Ein Glaszylinder mit unten anliegendem Glasplättchen (rot) wird in Wasser getaucht. Nun füllt man den Glaszylinder innen mit Wasser. Untersuche, wie hoch du den Glaszylinder mit Wasser füllen kannst, bis das Glasplättchen abfällt. Begründe dein Ergebnis.



🕮 Für Brainies:

Mit der Formel für den Schweredruck $p = \rho \cdot g \cdot h$ und der Definition des Drucks $p = \frac{F}{A}$ kannst du sogar berechnen, bei welcher Füllhöhe das Glasplättchen abfällt.

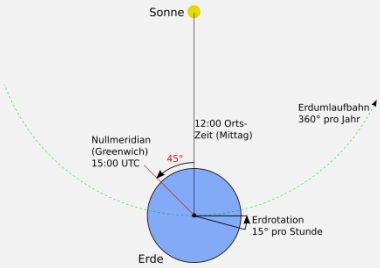
b) Orientierung an den Gestirnen

Auf hoher See ist es nicht möglich, sich an markanten Geländepunkten wie Berggipfeln zu orientieren – man sieht keine. Zwar kann man mithilfe eines Kompasses einen Kurs einigermaßen genau halten – was aber, wenn man diesen, beispielsweise in einem Sturm, einmal verliert? Kleine Abweichungen können sich dann über lange Distanzen aufsummieren und führen dazu, dass man nicht am eigentlich geplanten Ziel ankommt.

Ein Schiff fährt von Bremerhaven auf kürzester Route nach Aberdeen in Großbritannien. Dabei legt es etwa 800 km zurück. Schätze durch eine Rechnung ab, um wie viele Kilometer das Schiff an Aberdeen vorbeifährt, wenn es nur um 1° vom Kurs abkommt. Hinweis: Erstelle eine Skizze.

Die Abweichung wird umso größer, je weiter man fährt. Es ist also notwendig, die eigene Position immer wieder zu aktualisieren und dabei hilft der Blick nach oben. Durch den Stand der Gestirne, insbesondere der Sonne, können die geographische Länge und Breite direkt bestimmt werden.

(1) Das Längenproblem



Den Längengrad, also den Winkel der eigenen Position bezogen auf den Nullmeridian, erhält man fast direkt aus der Drehung der Erde um ihre eigene Achse. Die Grundidee ist, dass die Tageszeit, welche durch die Erdrotation entsteht (Sonnenauf- und –untergang), davon abhängig ist, auf welchem Längengrad man sich befindet. Nehmen wir beispielsweise an, in Greenwich (durch diesen Londoner Stadtteil verläuft aus historischen Gründen der Nullmeridian) ist es gerade 12:00 Uhr mittags. Das bedeutet, dass die Sonne dort an ihrem höchsten Punkt steht. Gleichzeitig ist es in Görlitz (15° Ost) laut Sonnenstand bereits 13:00 Uhr – die Sonne ist bereits (scheinbar!) etwas weitergewandert. Bei den Kindern in Buenos Aires (ca. 60° West) beginnt hingegen grade der Schulunterricht (8:00 Uhr) während sie in Peking (116° Ost) schon wieder ins Bett gehen.

Zur Bestimmung der geographischen Länge benötigt man also eigentlich nur eine Uhr mit Greenwich-Zeit. Wenn die Sonne am eigenen Ort ihren höchsten Punkt (Zenit) durchläuft, liest man auf dieser Referenz-Uhr die angezeigte Greenwich-Zeit ab und kann daraus auf den eigenen Längengrad schließen.

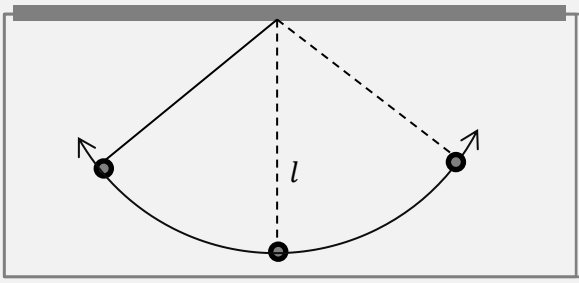
Berechne, um welchen Winkel sich die Erde in einer Minute dreht und vervollständige die Tabelle.

Aktuelle Referenz-Uhrzeit in Greenwich (am eigenen Ort steht die Sonne im Zenit)	17:00Uhr			04:15
Längengrad		150° E		
Ein möglicher Ort			Los Angeles	

Ausreichend genaue Uhren waren bis weit ins 18. Jahrhundert hinein nur als Pendeluhren realisierbar. Sie nutzen die gleichmäßige Schwingung eines Pendels als Taktgeber der Uhr.

Untersuche mit einem Fadenpendel den Zusammenhang zwischen der Pendellänge und der Schwingungsdauer der Pendelschwingung. Erstelle ein Pendel mit Schwingungsdauer $T = 1\text{s}$. Wovon hängt die Schwingungsdauer ab? Wie könnte ein Pendel als Uhr verwendet werden? Welche Genauigkeit hätte diese Uhr in etwa? Welche technischen Probleme kannst du dir dabei vorstellen und wie könnte man sie lösen?

Bis zur Erfindung der Quarzuhr, Mitte des 20. Jahrhunderts, blieb die Pendeluhr der genaueste Uhrentyp. Zur Steigerung der Ganggenauigkeit wurden viele, zum Teil mechanisch überaus komplexe Tricks angewandt. Beispielsweise wurden neue Metalllegierungen entwickelt, deren Länge sich unter Temperatureinflüssen nur minimal verändert. Dies war nötig um auf Uhrenfehler unter 1 Sekunde pro Woche und weniger zu kommen. Die Pendellänge gibt zusammen mit der Schwerebeschleunigung die Periodendauer der Pendelschwingung vor. Dabei gilt der Zusammenhang:



Schwingungsfrequenz: $f =$

Schwingungsdauer: $T =$

Durch immer ausgefeiltere technische Verbesserungen gelang es William Shortt 1921 die Ganggenauigkeit von Pendeluhren auf unter 0,01 Sekunden/Tag zu verbessern. Erst durch die in den 1930-er Jahren erfundene Quarzuhr konnte die Genauigkeit nochmals gesteigert werden. Quarzuhren verwenden als Taktgeber einen so genannten Schwingquarz. Das ist ein elektronisches Bauelement, welches durch Anlegen eines elektrischen Wechselfeldes zu überaus gleichmäßigen Schwingungen angeregt werden kann.

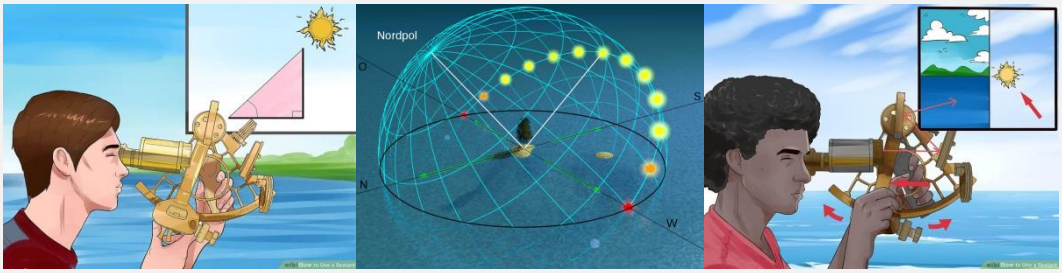
Moderne, temperaturstabilisierte Quarzuhren erreichen Ganggenauigkeiten von 10^{-8} und besser. Das bedeutet, dass sie pro Sekunde um nur etwa 10 Nanosekunden (=10^{-8} s) falsch gehen. Berechne, um wie viele Sekunden eine solche Uhr pro Tag, pro Woche und pro Jahr falsch geht.

🕮 **Für Brainies:**

Pendeluhren sind für Schiffe wegen deren Eigenbewegung nicht geeignet. Es war daher lange Zeit nicht möglich, die geographische Länge tatsächlich durch Zeitmessung zu bestimmen. Dieses so genannte „Längenproblem“ wurde erst 1775 durch das vom englischen Uhrmacher John Harrison entworfene Chronometer H4 gelöst. Die mechanische Uhr erreichte auch unter den ungünstigen Bedingungen der Seefahrt eine Ganggenauigkeit um 1 Sekunde/Tag und war damit zur Bestimmung des Längengrades geeignet. Das Antriebsprinzip der Uhr wird auch heute noch in modernen Chronometern angewendet.

(2) Messung der geographischen Breite

Ein weiteres Problem bei der Messung des Längengrades ist, dass man mit bloßem Auge nur grob abschätzen kann, wann die Sonne am höchsten über dem Horizont steht, wann es also exakt 12:00 Uhr Ortszeit ist. Mit einem so genannten Sextanten kann man dazu den Sonnenstand über dem Horizont direkt messen.



Miss den Sonnenstand an deinem Heimatort mit einem Sextanten.

☝ **Achtung: Niemals ohne einen geeigneten, speziellen Sonnenfilter in die Sonne blicken! Schwerste Augenverletzungen können die Folge sein!**

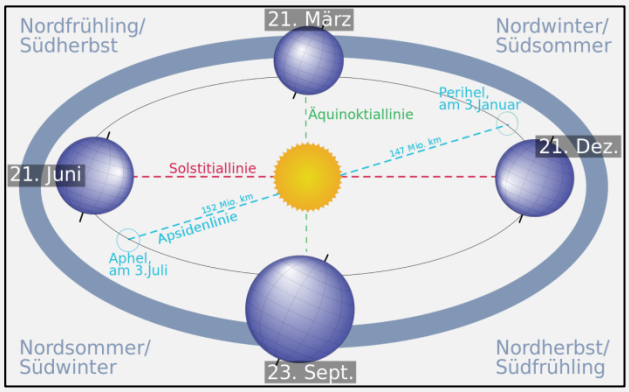
Datum			
Uhrzeit (Winterzeit!)	11:00	12:00	13:00
Horizontwinkel			

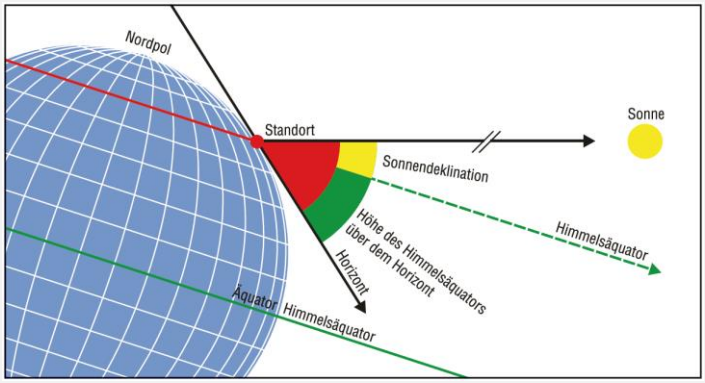
Wie würde sich das Ergebnis ändern, wenn du diese Messung (a) am Nordkap (71°N) oder (b) in drei Monaten durchführen würdest?

(a)

(b)

Der Grund für den je nach Breitengrad und Jahreszeit unterschiedlichen Horizontwinkel ist die Neigung der Erdachse um 23,5° zusammen mit ihrer jährlichen Bewegung um die Sonne.





Datum	δ	Datum	δ
21.1.	– 19°58‘	21.7.	+ 20°31‘
21.2.	– 10°40‘	21.8.	+ 12°13‘
21.3.	+ 00°06‘	21.9.	+ 00°49‘
21.4.	+ 11°44‘	21.10.	– 10°34‘
21.5.	+ 20°07‘	21.11.	– 19°50‘
21.6.	+ 23°26‘	21.12.	– 23°26‘

Dies führt dazu, dass die Sonne, je nach Jahreszeit, unterschiedlich hoch am Himmel erscheint. Am Äquator steht sie am 21. März und am 23. September um 12:00 Uhr mittags genau senkrecht über dem Horizont, am 21. Juni und 21. Dezember erreicht sie wegen der Neigung der Erdachse „nur“ 90° - 23,5° = 66,5°. Die Schwankung der Sonnenhöhe um maximal $\pm$ 23,5° im Verlauf des Jahres wird Sonnendeklination δ genannt. Man kann sie Tabellen entnehmen. Sie ist letztlich verantwortlich für die Entstehung der Jahreszeiten: Im Sommer ist der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung größer und die Tage sind länger.

Neben der Jahreszeit bestimmt die geographische Breite, wie hoch die Sonne am Himmel steht. In Freiburg (48° N, 8° W) steht sie am 21. März und am 23. September maximal 42° über dem Horizont, in Mainz sind es 40° und in Oldenburg nur 37° (vgl. Tabelle). Vervollständige die Tabelle um die fehlenden Werte.

Ort	Freiburg (48°N, 8°W)	Mainz (50°N, 8°W)	Oldenburg (53°N, 8°W)
Sonnenhöchststand am 21.3. und 23.9. (Frühlingsanfang & Herbstanfang)	42°	40°	37°
Sonnenhöchststand am 21.6. (Sommeranfang)			
Sonnenhöchststand am 21.12. Winteranfang			

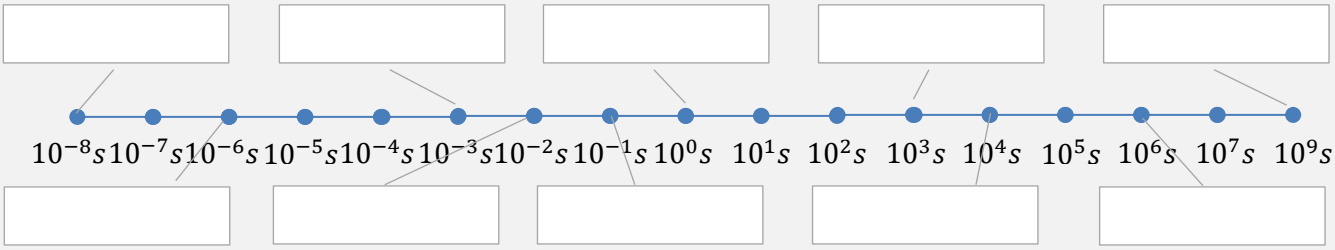
✍ (Tipp: unter https://www.sonnenverlauf.de kannst du dir den Sonnenstand an jedem beliebigen Ort der Erde zu jeder Zeit sehr anschaulich anzeigen lassen.)

Die Messung der Höhe h des Sonnenhöchststandes liefert gemeinsam mit dem genauen Datum und der daraus folgenden Sonnendeklination δ die geographische Breite φ. Diese kann man mit der Formel $\varphi = 90° - h - \delta$ berechnen. Bestimme die geographische Breite deines Wohnortes mit einem Sextanten. Eine Tabelle der Sonnendeklination findest du im Internet.

(3) Alles eine Frage der Zeit

Die Navigation ist seit jeher eng mit der exakten Messung der Zeit verbunden. So konnte beispielsweise das Längenproblem erst durch die Erfindung einer sehr genauen und gegenüber den Bewegungen an Bord eines Schiffes unempfindlichen Uhr gelöst werden. Auch bei der Satellitennavigation spielt die (noch viel exaktere!) Messung der **Zeit** eine entscheidende Rolle.

„Was ist also die Zeit? Wenn mich niemand darüber fragt, so weiß ich es; wenn ich es aber jemandem auf seine Frage erklären möchte, so weiß ich es nicht." (Augustinus)
Finde geeignete Beispiele für Vorgänge mit Zeitdauern wie auf dem Zeitstrahl.



Es ist schon eigenartig: Keine physikalische Größe können wir genauer messen als die Zeit und doch weiß eigentlich niemand so genau, was „Zeit" eigentlich ist. Der englische theoretische Physiker John A. Wheeler brachte es wie folgt auf den Punkt:
„Time is what prevents everything from happening at once." (J.A. Wheeler)

🕮 Für Brainies:

Seit der Entdeckung der Relativitätstheorie durch Albert Einstein wurde das Konzept der Zeit sogar nochmals komplexer. Seine erstaunliche Feststellung: „Die Zeit an sich" gibt es gar nicht! Mit sehr genauen Uhren messen zwei Beobachter, die sich relativ zu einander bewegen, unterschiedliche Zeiten. Etwas flapsig formuliert wird dieser Umstand mit den Worten „bewegte Uhren gehen langsamer" beschrieben. Wenn ein ruhender Beobachter im Ruhesystem S für einen Vorgang die Zeitspanne Δt misst, so vergeht im bezüglich S mit der Geschwindigkeit v bewegten System S' die etwas kürzere Zeitspanne $\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$.

3. Ortung mit (Funk-) Signalen

Navigation anhand der Gestirne hat einen ganz entscheidenden Nachteil: Bei Bewölkung versagt das Verfahren. Aus praktischer Sicht ist sie zudem anspruchsvoll und bedarf einiger Übung und Erfahrung. Daher kamen rasch mit der Entwicklung der Funk- und insbesondere der Radartechnik auch erste Funknavigationssysteme auf. Diese basieren auf dem Senden und Empfangen von elektromagnetischen Signalen. Zur Veranschaulichung dient folgendes Experiment.

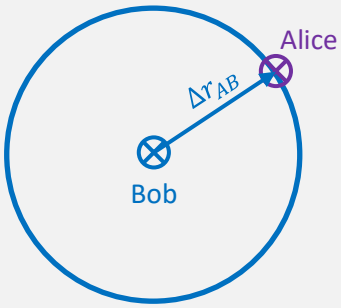
Zwei Smartphones mit der kostenlosen App phyphox werden als akustische Stoppuhr verwendet (unter der Rubrik „Zeitmessung“). Zur Messung werden sie im noch unbekannten Abstand Δr_{AB} voneinander abgelegt. An beiden Smartphones steht jeweils ein/e Schüler/in (im Folgenden Alice und Bob). Nun klatsch Alice so laut in die Hände, dass bei beiden (!) Smartphones die Stoppuhr startet. Kurz darauf verfährt Bob genauso. Das akustische Signal (Klatschen) von Alice benötigt die Zeit $\Delta t = \frac{\Delta s}{c}$, um zu Bobs Uhr zu gelangen und diese zu starten. Dabei ist $c = 340\,\frac{m}{s}$ die Schallgeschwindigkeit.

Ebenso lange benötigt Bobs Signal, um zu Alice‘ Uhr zu kommen und sie zu stoppen, sodass diese insgesamt eine um $2 \cdot \Delta t$ längere Zeit misst als die von Bob. Der Unterschied $\Delta t_{Alice} - \Delta t_{Bob}$ ist demnach genau die doppelte Laufzeit, welche das akustische Signal benötigt, um von Alice zu Bob zu gelangen (oder umgekehrt). Der Abstand zwischen beiden Smartphones ist $\Delta r_{AB} = c \cdot \Delta t = c \cdot \frac{1}{2}(\Delta t_{Alice} - \Delta t_{Bob})$.

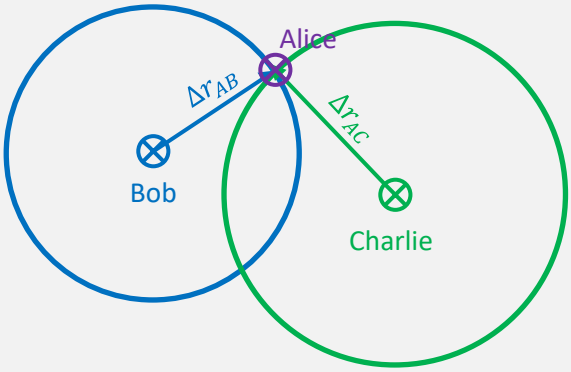
Ganz allgemein kann man Entfernungen durch eine Laufzeitmessung bestimmen, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals bekannt ist.

Δt_{Alice}	Δt_{Bob}	$\Delta t = \frac{1}{2}(\Delta t_{Alice} - \Delta t_{Bob})$	$\Delta r_{AB} = c \cdot \Delta t$	Δr_{AB} (Maßband)

Kontrolliere das Ergebnis mit einem Maßband.

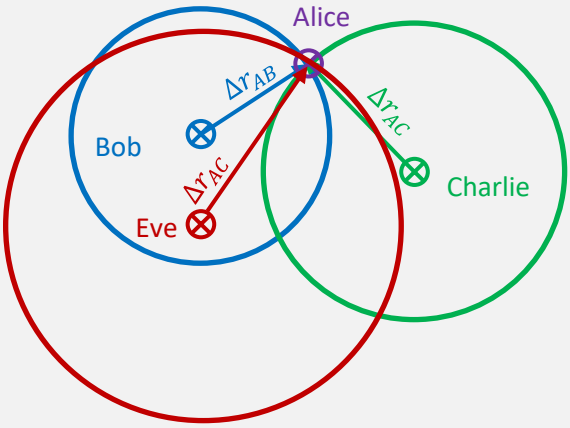


Die Funkortung durch Laufzeitmessung basiert auf demselben Prinzip wie das Experiment: Um die eigene Position zu bestimmen, misst man die Laufzeit von Signalen, welche von Orten kommen, deren Position bekannt ist. Ist beispielsweise Bobs Position bekannt, die von Alice aber nicht, so kann sie durch obige Messung ihren Abstand von Bob bestimmen. Geometrisch betrachtet weiß Alice nun, dass sie sich auf einem Kreis um Bob mit Radius Δr_{AB} befindet.



Das Problem ist nun, dass Alice nicht weiß, wo genau sie auf ihrem Positionskreis ist. Um diese Mehrdeutigkeit aufzulösen, muss sie noch eine Messung zu einem weiteren bekannten Ort, im Folgenden Charlie genannt, vornehmen. Nun sieht die Sache schon besser aus: Der Positionskreis um Charlie schneidet den um Bob in zwei Punkten – einer davon ist die Position von Alice. Nur welcher von beiden? Bei der realen Funkortung kann der falsche Schnittpunkt meist aus Gründen der Logik verworfen werden, da er zu weit von der anzunehmenden Position entfernt ist. Wenn dies jedoch nicht möglich ist, so muss noch eine dritte Messung erfolgen (Eve), welche ein eindeutiges Ergebnis liefert.

Das Prinzip der Funkortung kann mit Hilfe von Smartphones einfach nachempfunden werden. Dazu wird ein Team aus vier Schüler/innen (Alice, Bob, Charlie und Eve) gebildet. Bob, Charlie und Eve spielen die Funkstationen, Alice den Empfänger. Zur Vereinfachung und um nicht kompliziert mit Maßstäben herumrechnen zu müssen, stellen sich Bob, Charlie und Eve wie in der Abbildung unten dargestellt auf, Alice kann ihre Position frei wählen. Nacheinander gehen nun Bob, Charlie und Eve auf möglichst geradem Weg zu Alice und kontrollieren mit Hilfe des Smartphones über GPS (beispielsweise mit der phyphox App) ihre Geschwindigkeit. Ideal ist es, wenn diese möglichst konstant bei 4 km/h (also ca. 1 m/s) liegt. Alice Stoppt die Laufzeit mit ihrem Smartphone.



Funkstation	„Bob“	„Charlie“	„Eve“
Signallaufzeit (in Sekunden)			
Distanz (in Metern)			

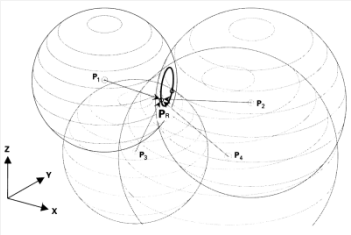
Zur Auswertung der Messung werden nun einfach mit dem Zirkel die jeweiligen Positionskreise eingezeichnet, welche sich, je nach Genauigkeit der Messung, exakt an Alice‘ Position schneiden.

🕮 Für Brainies:

Die Funkortung durch Laufzeitmessung nutzt als Grundlage die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Diese liegt im Vakuum bei $c = 299\,792\ km\ /\ s$. Allerdings ist sie abhängig vom Ausbreitungsmedium. In bodennaher Luft beträgt sie beispielsweise „nur“ $c = 299\,710\ km\ /\ s$. Dieser geringe Unterschied von nicht einmal einem halben Promille führt zu Abweichungen, welche jedoch bei Präzisionsmessungen berücksichtigt werden.

4. Satellitenortung

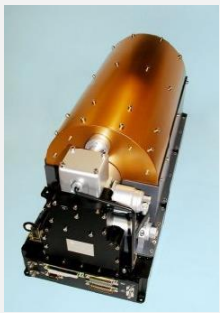
Satellitenortung funktioniert im Prinzip wie die zuvor beschriebene Funkortung: Die Satelliten senden Signale aus, deren Laufzeit vom Empfänger gemessen wird. Multipliziert mit der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich der Abstand Satellit-Empfänger. Gegenüber der bereits beschriebenen, vereinfachten Situation gibt es jedoch zwei grundsätzliche Unterschiede:



Satellitenortung findet im dreidimensionalen Raum (x-, y- und z-Koordinate) statt und nicht in der Ebene.

Erkläre anschaulich, geometrisch, warum im dreidimensionalen Raum nicht drei, sondern vier Messungen (Bob, Charlie, Eve und Dave) benötigt werden.

Die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger kann nicht durch irgendeine äußere Instanz gemessen oder wie mit einer Stoppuhr gestoppt werden!
Die Funksignale breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit also etwa 300.000 km/s aus. Berechne die Signallaufzeit für Galileo-Satelliten, deren Abstände zum Empfänger zwischen 23.000 km und 27.000 km liegen. Ermittle zudem den Messfehler in der Entfernung, wenn man die Signallaufzeit um nur eine Mikrosekunde (10^{-6}s) falsch misst.



Die Kommunikation zwischen Satellit und Empfänger ist einseitig: Der Satellit sendet ein Signal, der Empfänger empfängt und verarbeitet es. Daher ist es nicht möglich, die Signallaufzeit irgendwie „von außen“ zu stoppen. Die Messung erfolgt indirekt über den Inhalt der Navigationsnachricht. Dieser besteht im Wesentlichen aus der genauen Position des Satelliten und der exakten Sendezeit des Signals. Die Position der Satelliten wird durch die Bodenstationen genauestens überwacht, gleiches gilt für deren Uhren. Um die erforderlichen Genauigkeiten zu erzielen, werden Atomuhren verwendet, welche eine Abweichung von nur 10^{-14} s pro Sekunde oder weniger aufweisen.

Berechne, wie viele Jahre eine so genaue Atomuhr theoretisch (!) betrieben werden könnte, bis sie um eine Sekunde falsch ginge.

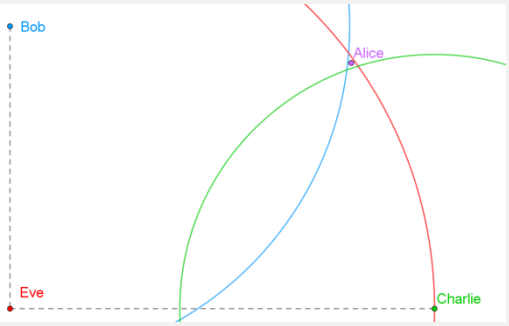
🕮 Für Brainies:

Cäsiumatomuhren gehen so genau, dass über sie seit 1967 die Sekunde folgendermaßen definiert ist: 1 Sekunde ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids 133Cs entsprechenden Strahlung.

Um zu verstehen, wie der Galileoempfänger seine Position mit Hilfe der Daten von den Satelliten bestimmen kann, wird die Messung der vorangegangenen Seite leicht (aber doch entscheidend!) abgeändert: Alice darf nun die Laufzeiten der einzelnen Signale nicht mehr direkt stoppen, da dies einem echten Galileoempfänger ja auch nicht möglich wäre. Bob, Charlie und Eve übertragen stattdessen eine Navigationsnachricht, ähnlich wie bei der echten Satellitenortung auch. Sie beinhaltet den Namen des jeweiligen „Satelliten“. Dieser entspricht der Satellitenposition, da ja vorher festgelegt wurde, wer sich an welchem Punkt befindet. Hinzu kommt die „Sendezeit“. Bob, Charlie und Eve notieren sich dazu auf einem Kärtchen auf die Sekunde genau, wann sie gestartet sind. Alice hat die Aufgabe, ihrerseits mit ihrer eigenen Uhr (!) zu überprüfen, wann die drei „Satellitensignale“ bei ihr eintreffen. Durch den Vergleich von Sende- und Empfangszeit erhält Alice dann die Signallaufzeit. Damit dieses Verfahren funktioniert, müssen alle Uhren möglichst exakt gleich – man sagt auch „synchron“ – gehen.

Satellit	Bob	Charlie	Eve
Sendezeit	09:09:00	09:10:00	09:11:00
Empfangszeit	09:09:12	09:10:09	09:11:15
Laufzeit	12 s	9 s	15 s
Entfernung	12 m	9 m	15 m

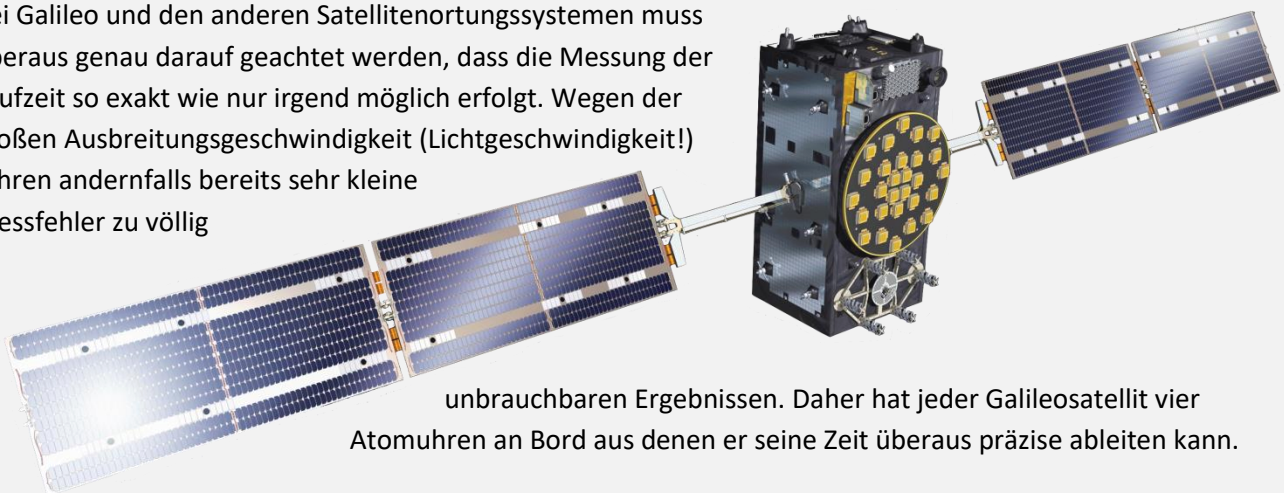
Messergebnisse (Beispiel!)



Auswertung

Satellit (Name)			
Sendezeit			
Empfangszeit			
Laufzeit in s			
Entfernung in m			

Bei Galileo und den anderen Satellitenortungssystemen muss überaus genau darauf geachtet werden, dass die Messung der Laufzeit so exakt wie nur irgend möglich erfolgt. Wegen der großen Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit!) führen andernfalls bereits sehr kleine Messfehler zu völlig



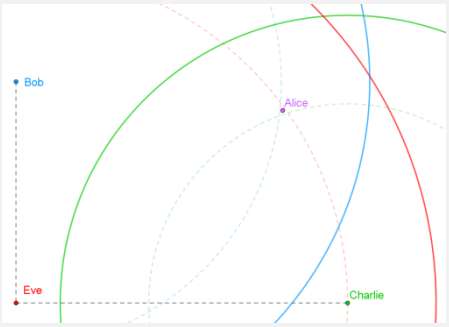
unbrauchbaren Ergebnissen. Daher hat jeder Galileosatellit vier Atomuhren an Bord aus denen er seine Zeit überaus präzise ableiten kann.

Normale Galileo- oder GPS-Empfänger haben einfache Quarzuhren verbaut. Diese gehen etwa $\pm 10\,\mathrm{s}$ pro Monat falsch. Berechne, um wie viele Mikrosekunden pro Sekunde eine solche Quarzuhr typischerweise falsch geht. Welchem Fehler in der Distanz entspricht das bei der Ortung durch Laufzeitmessung?

Eine Ortung allein auf Basis von Quarzuhren ist demnach nicht möglich – sie sind einfach zu unpräzise. Wie kann dann aber ein Galileoempfänger, in dem ja keine Atomuhr verbaut ist, die Position unter guten Bedingungen auf wenige Meter genau bestimmen? Um dies zu verstehen, führen wir die vorangegangene Messung noch einmal durch, achten aber diesmal darauf, dass zwar die Uhren der „Satelliten“ Bob, Charlie und Eve möglichst exakt gleich gehen, aber nicht die von Alice. Ihre Empfängeruhr sollte etwa 5 Sekunden vor- oder nachgehen.

Satellit	Bob	Charlie	Eve
Sendezeit	09:09:00	09:10:00	09:11:00
Empfangszeit	09:09:16	09:11:13	09:10:19
Laufzeit	16 s	13 s	19 s
Entfernung	16 m	13 m	19 m

Messergebnisse (Beispiel!)



Auswertung

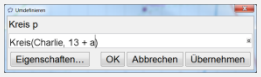
Satellit (Name)			
Sendezeit			
Empfangszeit			
Pseudolaufzeit in s			
Pseudoentfernung in m			

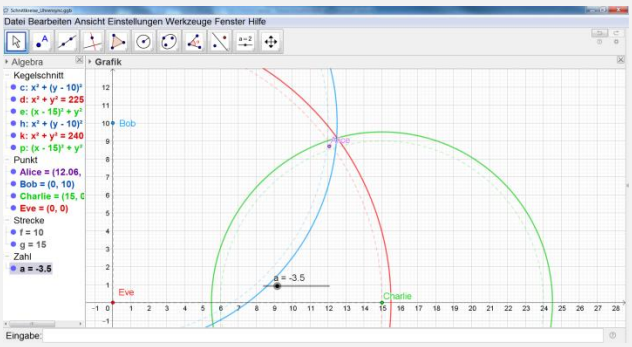
Das Beispiel zeigt, dass die Positionskreise von Bob, Charlie und Eve nun zu groß sind und sich nicht mehr in einem einzigen Punkt (der Position von Alice) schneiden. Zur Lösung des Problems nutzen wir zwei Dinge aus:

1) Die Positionskreise müssten sich bei einer genauen Messung in einem einzigen Punkt schneiden.
2) Der Fehler entsteht ausschließlich durch die Empfängeruhr, da die Satelliten Atomuhren haben.

Da die Messung mit der falsch gehenden, nicht synchronen Empfängeruhr zu fehlerhaften Signallaufzeiten führt, nennt man diese auch Pseudo-Laufzeiten und die Entfernungen Pseudoentfernungen (Pseudoranges). Ausgehend von diesen wird eine erste Ortung durchgeführt. Um die exakte Position zu finden muss man nun einfach nur nach und nach die Empfängeruhr in die eine oder andere Richtung Nachstellen und zwar so lange, bis sich alle drei Kreise in genau einem Punkt schneiden. Das ist dann die gesuchte Empfängerposition.

Für unsere Messung eignet sich dynamische Geometrie Software wie GeoGebra. Mit dem Programm können die Konstruktionen einfach am Computer vorgenommen werden. Im ersten Schritt legt man die Positionen der Satelliten Bob, Charlie und Eve maßstabsgetreu als Punkte fest. Als nächstes zieht man mit der Funktion „Kreis mit Mittelpunkt und Radius“ die Positionskreise mit den Pseudoentfernungen als Radius. Um den Uhrenfehler zu korrigieren wird ein Schieberegler „a“ definiert. Dieser sollte ein geeignetes Intervall etwa von -10 bis +10 haben. Bei den drei Positionskreisen wird nun beim Radius einfach „a“ addiert.

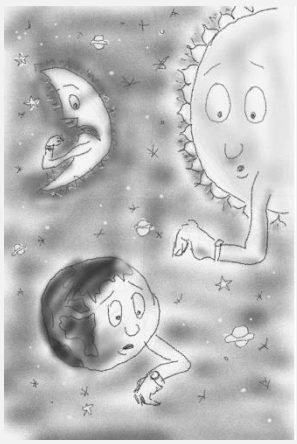




Bewegt man den Schieberegler, so ändern sich die Radien aller drei Kreise gleichermaßen um den Wert von a. Bei positiven Werten werden sie größer, bei negativen kleiner. Für einen bestimmten Wert von a schneiden sich die Kreise in einem Punkt: Das ist die Position von Alice. Der Wert von a gibt an, um wie viele Meter die Pseudoentfernungen zu groß waren. Da wir bei der Messung auf eine Geschwindigkeit der Signale von 1 m/s geachtet haben, ist der Wert von a demnach auch zugleich der Uhrenfehler in Sekunden.
Im Ergebnis liefert uns die Messung nun also nicht nur Alice‘ Position relativ zu den Satelliten, sondern auch den Fehler ihrer Empfängeruhr. Durch die exakte Ortung wird ihre Uhr mit den hochgenauen Satellitenuhren synchronisiert – es spielt also keine Rolle, dass die Empfängeruhr etwas ungenau ist!

Bei echten Galileoempfängern werden natürlich keine Kreise gezeichnet und deren Radien verändert. Man verwendet stattdessen relativ anspruchsvolle mathematische Verfahren der so genannten linearen Algebra und der Fehlerausgleichsrechnung zur Korrektur. Diese basieren aber auf der gleichen geometrischen Grundüberlegung. Obwohl also die echte Satellitennavigation im Detail ganz schön anspruchsvoll und komplex ist, basiert sie doch auf verblüffend einfachen Prinzipien der Physik und der Mathematik.

🕮 **Für Brainies:** Das Messprinzip der Satellitenortung basiert unter anderem auf der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Sie sorgt dafür, dass sich die Signale im Vakuum des Weltraums gleichbleibend schnell ausbreiten. Eine andere für die Physik überaus bedeutende Folge daraus ist Einsteins spezielle Relativitätstheorie (SRT). Eine sehr verblüffende Kernaussage der SRT ist, dass man in relativ zueinander bewegten Systemen unterschiedliche Zeiten misst (vgl. S. 10). Die Effekte sind jedoch im Normalfall nicht zu beobachten, da sie erst bei hohen Geschwindigkeiten ins Gewicht fallen. Galileosatelliten bewegen sich mit 3,6 km/s sehr schnell durchs All. Nach den Gesetzen der SRT sollten ihre Uhren daher etwas langsamer gehen als irdische.
Tatsächlich tritt jedoch noch ein weiterer Effekt auf, der in der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben wird. Demnach hat auch die Masse der Erde einen Einfluss auf die Zeit. Etwas lax formuliert könnte man sagen: „schwere Uhren gehen langsamer“. Das bedeutet, dass die Satellitenuhren auf Grund ihres großen Abstands von der Erde etwas schneller laufen als irdische („schwere“) Vergleichsuhren. Welcher der beiden Effekte überwiegt, hängt von der Bahnhöhe der Satelliten ab. Bei Galileo führen die relativistischen Effekte dazu, dass die Satellitenuhren pro Sekunde um 0,474 ns vorgingen, wenn sie nicht entsprechend korrigiert würden.



Abbildungsverzeichnis

Alle Satellitenbilder der Erde wurden auf Basis von frei verfügbaren Daten der Satellitenmissionen Landsat (NASA) und Sentinel-2 (ESA) mit Hilfe von GIS selbst erstellt. Graphische Darstellungen von Messwerten und andere Abbildungen sind, wenn nicht im Folgenden aufgelistet, eigene Werke.

Seite 5: TanDEM-X und TerraSAR-X im Formationsflug; TanDEM-X Höhenmodell: Mount Hanang, Tansania; Die Satellitenorbits von TerraSAR-X und TanDEM-X bilden eine Doppelhelix. Quelle: DLR
Seite 6: Herzdruckmassage auf der ISS. Quelle: Instagram/ESA/NASA
Seite 8: Sir Isaac Newton. Quelle: DLR_next
Seite 9: Satellitenpaar GRACE im Formationsflug. Quelle: NASA
Seite 10: Flugphasen eines Parabelflugs. Quelle: DLR
Seite 12: Der SmallGEO-Satellit auf seiner geostationären Umlaufbahn. Quelle: DLR
Seite 13: Bewegung entlang einer Kreisbahn. Quelle: Dr. Stefan Richtberg
Seite 14: Die drei Kepler-Gesetze grafisch dargestellt. Quelle: Wikipedia
Seite 15: Orbits der Satelliten Terra-SAR-X und TanDEM-X. Quelle: DLR
Seite 16: Unser Sonnensystem. Quelle: DLR_next; Bunte Stürme auf Jupiter. Quelle: NASA
Seite 17: Tschurjumow-Gerassimenko; Quelle: ESA
Seite 18: Solar Dynamic Observatory. Quelle: NASA
Seite 20: Sturm auf dem Saturn. Quelle: NASA
Seite 21: Künstlerische Darstellung: Fernerkundungssatellit im All. Quelle: ESA. Kartierung von überfluteten Flächen. Quelle: DLR
Seite 22: Prisma. Quelle: Wikipedia
Seite 27: Ozonloch. Quelle: DLR
Seite 28: Eine Scheune im nahen Infrarot aufgenommen. Quelle: Wikipedia
Seite 35: Künstlerische Darstellung: Galileo Satellit im Orbit. Quelle: ESA. GNSS-gesteuerte Maschinen beim Precision Farming Quelle: DLR. Start von vier Galileosatelliten am 25.7.2018 mit einer Ariane 5 ES Rakete. Quelle: ESA
Seite 36: Blick vom Mond auf die Erde. Quelle: NASA
Seite 37: Abflachung der Erde. Quelle: Joachim Herz Stiftung, www.leifiphysik.de
Seite 38: Kartenausschnitt Zugspitze. Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung. Polarlichter aus Sicht der ISS; Quelle: NASA
Seite 39: Luftdruck. Quelle: Uni Rostock. Experimentaufbau Schweredruck. Quelle: Joachim Herz Stiftung, www.leifiphysik.de
Seite 40: Schiffsroute von Bremen nach Großbritannien. Daten von http://www.openstreetmap.org; Entstehung der Tageszeit. Quelle: Wikipedia, Duff06 (CC0)
Seite 41: Chronometer H4; Quelle: Wikipedia
Seite 42: Sonnenstandmessung mit Hilfe eines Sextanten. Quelle: space-awareness. Jahreszeiten in Abhängigkeit vom Sonnenstand. Quelle: Wikipedia, Astromedia
Seite 43: Taschenuhr. Quelle: Wikipedia
Seite 44: Akustische Stoppuhr in der phyphox App (https://phyphox.org/de/home-de/)
Seite 46: Künstlerische Darstellung zweier Galileo Satelliten im Orbit. Eine Maser-Uhr für Galileo. Quelle: ESA. Schnitt von vier Kugelschalen. Quelle: DLR
Seite 48: Künstlerische Darstellung eines Galileo Satelliten. Quelle: ESA
Seite 49: Ausschnitt aus GeoGebra: https://www.geogebra.org. Sonne-Erde-Mond. Quelle: Juliane Reisewitz, DLR