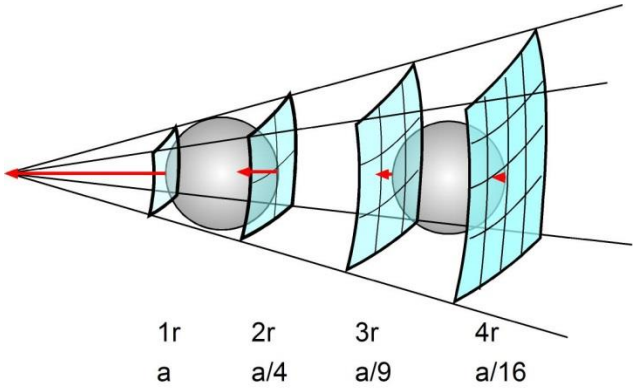
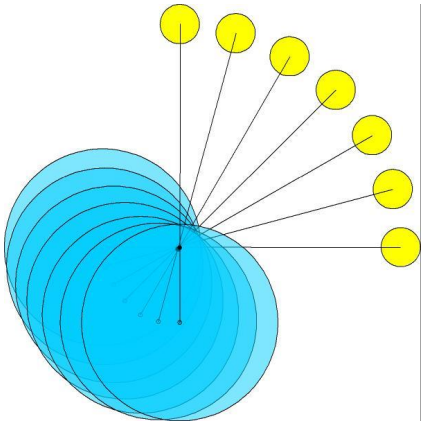
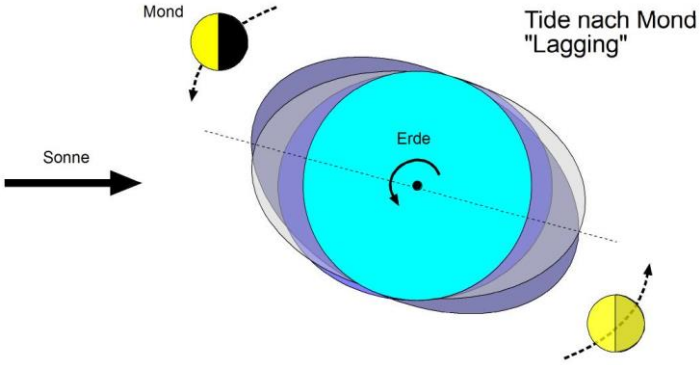
Landeshauptstadt Hannover

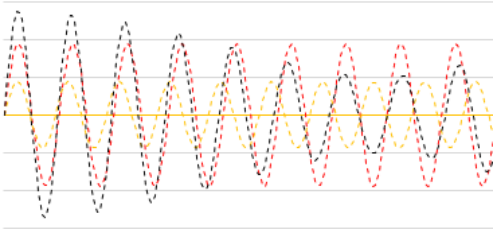
Hannover

Schulbiologiezentrum









19.98

Gezeiten

Kräfte, die Ebbe und Flut verursachen

Januar 2017

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover

Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: Gezeiten
Kräfte, die Ebbe und Flut verursachen

Titelbild: Ingo Mennerich

Arbeitshilfe 19.98

Verfasser: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt

Gezeiten a einigen Traumstränden der Welt 1

"Warum kann der Mond ein Meer hochheben, mich aber nicht?" 2

Um diese, an den Gezeiten beteiligte (physikalische) Kräfte geht es 3

- Schwerkraft auf der Erde 3
- Anziehungskraft des Mondes 4
- Anziehungskraft der Sonne 5
- Anziehungskräfte auf der Mond und Sonne zu- bzw. abgewandten Seite der Erde 7
- Vereinfachte Formel zur Berechnung der Gezeitenkräfte 10
- Fliehkräfte 11
- Das „Erde-Mond-Fliehkraft“-Karussell 14

Wie groß sind Flieh- und Anziehungskräfte und wie groß ist ihre Nettowirkung? 16

Entstehung von zwei Flutbergen 17

Die periodische Überlagerung der Gezeitenkräfte von Sonne und Mond 18

Spring- und Nipptide 19

Vorgehen und Nachgehen der Gezeiten 20

Wo am Himmel liegt das "Kraftzentrum" zwischen Mond und Sonne? 23

Mal näher, mal ferner: Auswirkungen der elliptischen Mondbahn 24

Mal höher, mal tiefer: Auswirkungen der Bahnneigung des Mondes 26

Mal näher, mal ferner: Auswirkungen der elliptischen Bahn der Erde 27

Tägliche Ungleichheit der Höhe der Gezeiten 28

Tidenkurven an der Nordsee zu verschiedenen Jahreszeiten: 32

Harmonische Überlagerung von Kräften: Partialtiden 37

"Gezeitensimulation" mit unserem EXCEL-Programm 46

Anhang 53

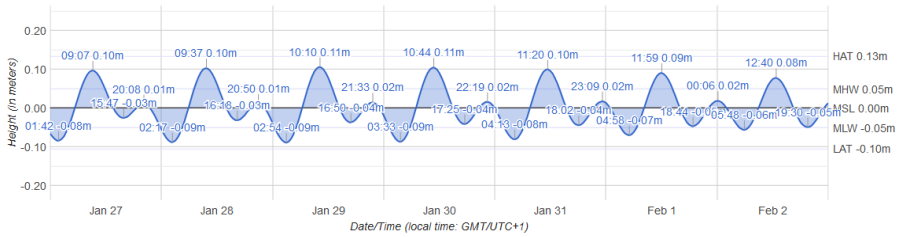
Globale Amplituden und Phasen M2, S2, K1, O2, P1, N2

Mondphasen, Perigäen und Apogäen 2017 - 2026

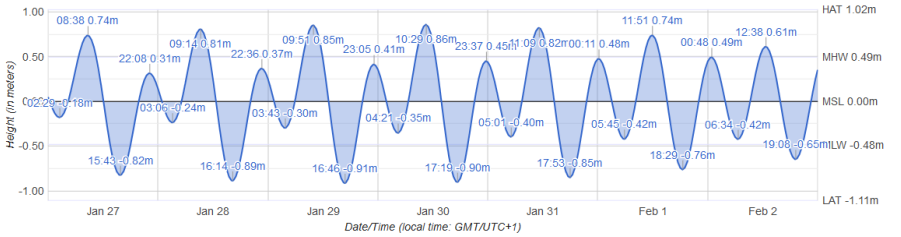
Gezeiten an einigen Traumstränden der Welt…

Cala Ratjada

(Mallorca)

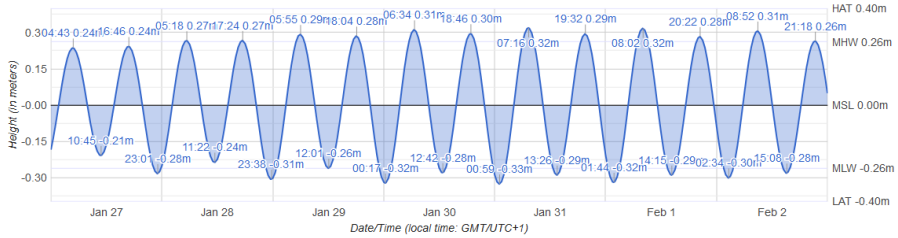


Dubai



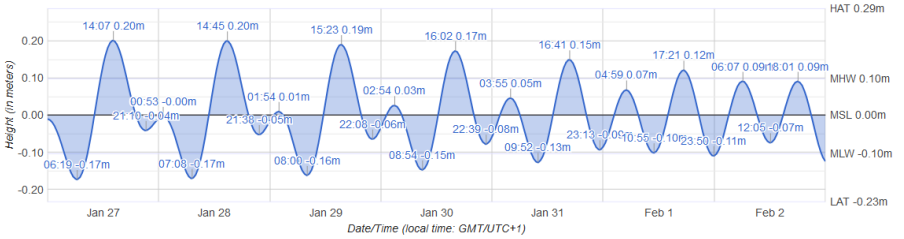
Hurghada

(Ägypten, Rotes Meer)



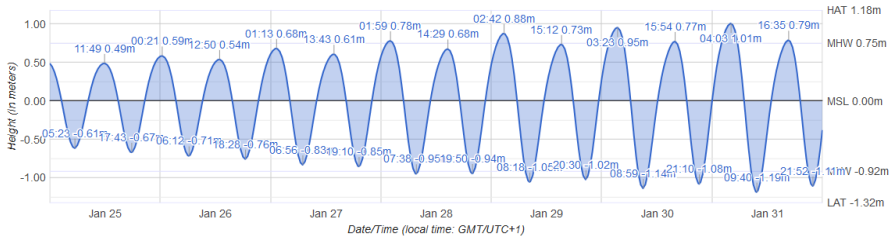
Punta Cana

(Dominikanische Republik)



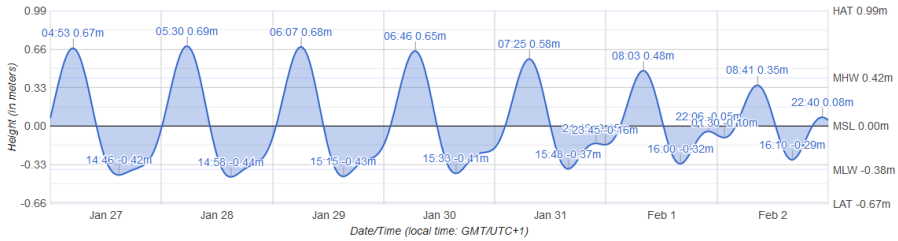
Westerland

(Sylt)



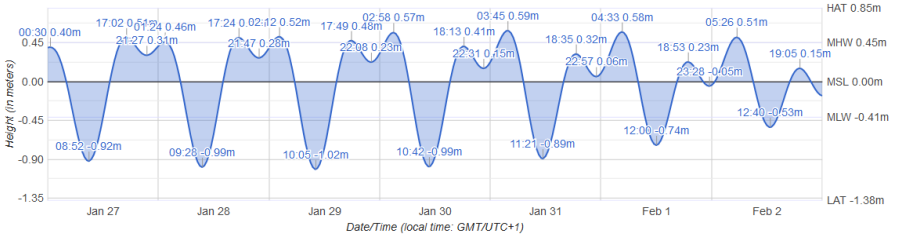
Koh Samui

(Thailand)



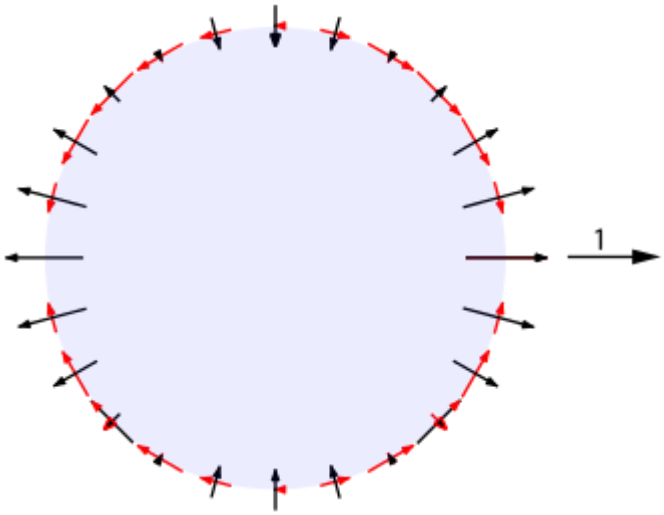
Hainan

(China)



Quelle: www.worldtides.info

"Warum kann der Mond ein Meer hochheben, mich aber nicht?"



Zerlegung der Gezeitenbeschleunigung auf der Erdoberfläche durch den Mond in Komponenten.
1: Richtung zum Mond und Rotationssymmetrieachse

Eine alte Freundin vertraut auf die Kraft des Mondes. Sie richtet viele ihrer Aktivitäten auf seine Rhythmen aus. Der Mond lässt das Meer atmen, sagt sie. Mit seiner Kraft, sagt sie, hebt er das Meer zweimal täglich an so dass Flut und Ebbe entstehen. Das hört sich gewaltig und überzeugend an.

Jahre am Strand haben mich gelehrt, dass immer dann, wenn der Mond im Süden steht, Flut ist. Und dass der Mond täglich fast eine Stunde später seinen höchsten Punkt am Himmel erreicht. Aber als Reisender weiß ich, dass das an anderen Orten zu anderen Zeiten sein kann. Aber das ändert nichts an der Tatsache, dass der Mond die Ursache der Gezeiten ist.

Wikipedia: "Gezeiten"

Aber warum sollte nur der Mond diese Kraft haben, nicht aber die, wie man weiß, doch viel größere Sonne? Dann hätten wir immer mittags Flut.

Ich weiß, dass der Mond nur einmal täglich im Süden steht, die Flut aber zweimal kommt. Gibt es also noch eine andere Kraft als den Mond? Ist es die Sonne? Aber die scheint doch nur am Tage!

Ich habe auch erfahren, wie schwer Wasser ist. Wenn die Kraft des Mondes so viel Wasser um einen oder mehrere Meter anheben kann, warum tut er das nicht aus mit meinem Bier oder dem Inhalt meiner Badewanne? Warum zeigt meine Waage auch in einer Vollmondnacht und bei Flut mein übliches, stets zu hohes Gewicht an? Wo ich doch überwiegend doch aus Wasser bestehe?

Es gibt ja Leute, die meinen, bei Flut wird klart der Himmel auf (weil der Mond die Wolken anhebt?), oder war das bei Ebbe (weil der Mond die Wolken zur Seite zieht?). Wolken sind ja leicht, oder?

Jemand hat mir erzählt, dass ein Senkblei, vom Mond beeinflusst, nicht immer lot- oder senkrecht nach unten zeigt. Meine alte Freundin stimmt mir sofort zu. Aber das hört sich irgendwie nach Esoterik an. Ein versuchsweise an einem Faden aufgehängtes Gewicht rührt sich auch beim „Supermond“ keinen Millimeter. Nicht nach oben und nicht zur Seite. Aber der „Supermond“ war ja auch kein Riesenmond wie es in einigen Zeitungen stand.

Omas Spruch, dass der Opa immer bei Vollmond zum Hanteltraining geht weil er sich dann weniger anstrengen muss macht jetzt doch nachdenklich…

Ebbe und Flut scheinen doch komplizierter zu sein als früher als Kind gedacht. Wer das Komplizierte meiden möchte wird sich vielleicht mit einfachen und möglicherweise falschen Erklärungen zufrieden geben. Wer sich den neugierigen Forschergeist bewahrt hat wird versuchen, das Unerklärliche, Unerwartete, Widersprüchliche aufzulösen und erst damit aufhören, wenn alles übereinstimmt und sich zu einem logischen Bild zusammenfügt. Und merken, dass das Forschen viel Spaß machen kann. Auch wenn es um Dinge geht die längst von viel klügeren Köpfen erforscht worden sind.

Gezeiten haben, wie nicht nur Newton, Laplace und Darwin erkannten, mit Physik, Mathematik, Astronomie und viel realer Beobachtung zu tun. In dieser Unterrichtshilfe geht es nicht um die „Kräfte“ und „Energien“ die Heilsteinen und magischen Orten innewohnen sollen. Versprochen.

Hier geht es um physikalische Kräfte, Kräfte die Arbeit verrichten und damit Objekte im realen Raum verschieben können. Es geht um die Größenordnungen dieser Kräfte, die man messen und berechnen kann. Oder mit wenig Mathematik mit Bleistift und Geodreieck in Kräfteparallelogrammen darstellt. Es geht um Massen die durch die „Schwerkraft“ (Gravitation) miteinander verbunden sind. Die Massen der Erde, des Mondes und der Sonne lassen sich nicht auf die Waage legen aber lassen sich mit den von Newton formulierten Gesetzen aus ihrer beobachtbaren Bewegung ableiten.

Um diese, an den Gezeiten beteiligte (physikalische) Kräfte geht es

a_E Fallbeschleunigung auf der Erde (Schwerkraft, Erdanziehung)

a_M Gravitationsbeschleunigung durch den Mond (Anziehungskraft des Mondes)

a_S Gravitationsbeschleunigung durch die Sonne (Anziehungskraft der Sonne)

Anziehungskräfte auf der Mond und Sonne zu- bzw. abgewandten Seite der Erde

a_Z Zentripetalbeschleunigung („Fliehkraft“)

1. Schwerkraft auf der Erde

Jeder Punkt auf und innerhalb der Erde erfährt eine zum Erdmittelpunkt gerichtete Beschleunigung, die Fallbeschleunigung. Ihr ist es zu verdanken, dass sich die Ozeane nicht von der Erde ablösen, die Wellen nicht in den Himmel wachsen und wir mit beiden Füßen auf der Erde bleiben.

Sie ist die stärkste Kraft die auf die mit den Gezeiten auf und ab bewegte Wasseroberfläche wirkt.

Man kann die Beschleunigung mit der etwas auf die Erde herunterfällt mit einer einfachen Formel berechnen:

$$a_E = \frac{Gm_E}{r^2}$$

G = Gravitationskonstante

$$G = 6{,}674 * 10^{-11}$$

M_E= Masse der Erde

$$m = 5{,}974 * 10^{24} \text{kg}$$

r = Radius der Erde

$$r = 6371 \text{ km}$$

$$a_E = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 5{,}974 * 10^{24}\mathrm{kg}}{6371000\mathrm{m}^2} = 9{,}81\mathrm{m/s}^2$$

Ein aus nicht allzu großer Höhe auf die Erde fallender Gegenstand nimmt pro Sekunde um 9,8 m pro Sekunde an Geschwindigkeit zu.

Um 1 kg Wasser (also etwa 1 Liter) anzuheben brauche ich eine Kraft

$$F = a * m$$

$$F = \frac{9{,}81\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} * 1\mathrm{kg} = 9{,}81\ \mathrm{N}$$

Kinderfragen:

Mama, unser Lehrer hat gesagt, dass bei Flut der Mond das Wasser anzieht.

Aber Wasser ist doch schwer!

Wenn der Mond bei Flut das Wasser hochheben kann, warum bleibe ich dann mit beiden Füßen auf der Erde?

2. Anziehungskraft des Mondes

Kinderfragen:

Mama, warum fällt der Mond nicht vom Himmel?

Und warum fliegt er nicht weg?

Und warum fällt er nicht herunter?

Auf dem Karussell muss ich mich doch immer gut festhalten.

Wie hält die Erde ihn fest? Ist er irgendwo angebunden?

Die Erde und der um sie kreisende Mond sind durch die Gravitationskräfte zwischen ihnen aneinander gebunden. Hier geht es nur um die Anziehungskraft die der Mond auf Objekte auf der Erdoberfläche hat.

Gravitationsbeschleunigung in Richtung auf den Mond:

$$a_M = \frac{Gm_M}{r^2}$$

G = Gravitationskonstante

$$G = 6{,}674 * 10^{-11}$$

m_M = Masse des Mondes

$$7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg}$$

r = Entfernung zwischen den Mittelpunkten des Mondes und der Erde

384400 km (Mittlere Entfernung)

$$a_M = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg}}{384400000\mathrm{m}^2}$$

$$a_M = 0{,}0000332\mathrm{m/s}^2$$

Die auf 1 kg Wasser (etwa 1 Liter) wirkende Kraft beträgt damit nur

$$F = a_M * m$$

$$F = \frac{0{,}0000332\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} * 1\mathrm{kg} = 0{,}000332\ \mathrm{N}$$

Und ist damit fast 300000mal schwächer als die Anziehungskraft der Erde.

3. Anziehungskraft der Sonne

Gravitationsbeschleunigung in Richtung auf die Sonne

Die Sonne ist mit einer Masse von $1{,}989*10^{30}$kg mehr als 330000mal so "schwer" wie die Erde

(m_E= $5{,}974*10^{24}$kg).

Ihre Masse ist mehr als 27 Millionen mal so groß wie die des Mondes (m_M = $7{,}349*10^{22}$kg)

Die Sonne ist von der Erde allerdings mit 149600000 km fast 390mal so weit entfernt wie der Mond (384000km).

Gravitationsbeschleunigung in Richtung auf die Sonne

$$a_S = \frac{Gm_S}{r^2}$$

G = Gravitationskonstante

$$G = 6{,}674 * 10^{-11}$$

m_S = Masse der Sonne

$$1{,}989 * 10^{30}\text{kg}$$

r = Entfernung zwischen den Mittelpunkten der Sonne und der Erde

149600000 km (Mittlere Entfernung)

$$a_S = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\text{kg}}{149600000000\text{m}^2}$$

$$a_S = 0{,}005931408 m/\text{s}^2$$

Die Gravitationsbeschleunigungen der Sonne und des Mondes verhalten sich wie

$$\frac{0{,}005931408}{0{,}0000332} \approx \frac{178{,}7}{1}$$

Ihre auf 1 kg Wasser (etwa 1 Liter) wirkende Kraft beträgt

$$F = a_M * m$$

$$F = \frac{0{,}005931408m}{\text{s}^2} * 1\text{kg} = 0{,}005931408 \text{ N}$$

Damit ist die Anziehungskraft Sonne zwar etwa 179mal so „stark“ wie die des Mondes, aber immer noch um den Faktor 1654 schwächer als die Schwerkraft der Erde.

Aus diesen Ergebnissen folgen Fragen:

- Wer "hebt" das Wasser an wenn die Schwerkraft der Erde doch viel stärker ist als die Anziehungskräfte des Mondes und der Sonne
- Warum folgen die Gezeiten in erster Linie dem Mond und nicht der Sonne, obwohl die Anziehungskraft des Mondes doch viel geringer ist als die des Mondes?
- Welche Rolle spielt die Sonne tatsächlich bei der Höhe und dem Zeitpunkt von Ebbe und Flut?

Kinderfrage:

Werden wir leichter, wenn die Sonne oder der Mond am Himmel stehen?

Könnte man das auf einer Waage sehen?

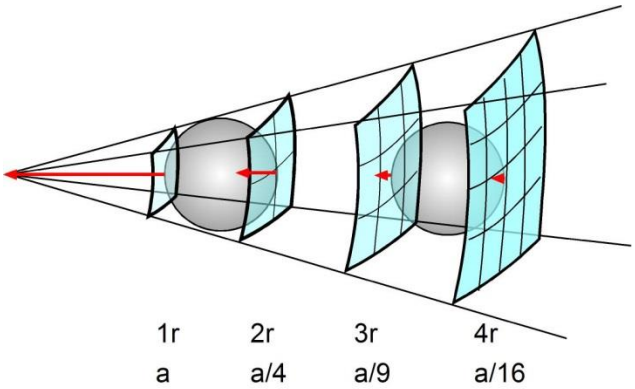
Anziehungskräfte auf der dem Mond und der Sonne zu- bzw. abgewandten Seite der Erde

- Eine Leuchte wirft Licht mit einer bestimmten Helligkeit auf eine Wand.
  Verdoppelt man die Entfernung der Leuchte fällt nur noch ein Viertel der Helligkeit darauf.

- Ein Magnet wirkt mit einer bestimmten Kraft auf ein eisenhaltiges Objekt.
  Verdoppelt man den Abstand zwischen Magnet und Objekt ist die Kraft zwischen ihnen nur noch ein Viertel.

Dies sind Beispiele für das "Quadrat-Abstandsgesetz" nachdem die Helligkeit bzw. die Kraft mit dem Quadrat des Abstands (r^2) abnimmt. Dies wird in der bereits bekannten Formel ausgedrückt wobei r^2 im Nenner steht:

$$a = \frac{Gm}{r^2}$$



Wirkt eine Kraft im Abstand von r = 1 auf eine Fläche sei die von ihr bewirkte Beschleunigung a.

In doppelter Distanz (r =2) verringert sie sich auf ein Viertel, bei Verdreifachung des Abstands auf ein Neuntel usw.

Die Kraft wirkt bei r = 1 auf eine Fläche mit einer bestimmten Größe. Bei Verdoppelung des Abstands auf die vierfache, bei Verdreifachung auf deine neunmal so große Fläche.

Da unser Planet einen Durchmesser von 12742 km hat können die Anziehungskräfte des Mondes und der Sonne nicht überall gleich sein:

- Wie groß sind die Kräfte die auf der Seite der Erde wirken ihnen zugewandt ist?
- Wie groß sind sie auf der mond- bzw. sonnenabgewandten Seite?
- Wie groß sind die Unterschied?
- Was folgt daraus für das Verhältnis der Gezeitenkräfte von Mond und Sonne?

Mond:

Der Distanzunterschied zwischen dem mondzugewandten bzw. mondabgewandten Punkt beträgt das Doppelte des Erdradius R_E (6371 km), also 12742 km.

Die Entfernungen betragen bezogen auf den mittleren Abstand zwischen den Mittelpunkten der Erde und des Mondes (384400km):

$a_{M(P_1)}$ (mondzugewandter Punkt)

$$384400km - 6371km = 378029km$$

$a_{M(P_2)}$ (mondabgewandter Punkt)

$$384400km + 6371km = 390771km$$

Daraus folgt:

$$a_{M(P_1)} = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\text{kg}}{378029000\text{m}^2} = 0{,}000034321\text{m/s}^2$$

$$a_M = 0{,}0000332\text{m/s}^2$$

Differenz:

$$a_{M(P_1)} - a_M \ : 0{,}000034321 - \ 0{,}0000332\text{m/s}^2 = 0{,}000001121\ \text{m/s}^2$$

$$= 1{,}1 * 10^{-6}\ \text{m/s}^2$$

$$a_{M(P_2)} = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\text{kg}}{390771000\text{m}^2} = 0{,}000032120$$

$$a_Z = a_M = 0{,}0000332\text{m/s}^2$$

Differenz:

$$a_M - a_{M(P_2)} \ : 0{,}0000332 - \ 0{,}000032120\text{m/s}^2 = 0{,}00000108\ \text{m/s}^2$$

$$= 1{,}1 * 10^{-6}\ \text{m/s}^2$$

Prozentual beträgt der Unterschied zwischen P_1 und P_2

$$\frac{0{,}000034321}{0{,}000032120} = 1{,}0685242 \approx 6{,}9\%$$

Sonne:

Wie lässt sich erklären, dass der in Bezug auf die Anziehungskraft doch offensichtlich „schwächere“ Mond und nicht die "stärkere" Sonne den Gezeitenrhythmus bestimmt?

- Dieser Widerspruch sollte Anlass sein sich endgültig von der naiven Vorstellung zu verabschieden, dass der Mond das Wasser „hochzieht“.

Der Distanzunterschied zwischen dem sonnenzugewandten bzw. sonnenabgewandten Punkt beträgt das Doppelte des Erdradius R_E (6371 km).

Bezogen auf den mittleren Abstand zwischen den Mittelpunkten der Erde und der Sonne (149600000km):

$$149600000km - 6371km = 149593629km$$

$$149600000km + 6371km = 149606371km$$

$$a_{S(P_1)} = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\text{kg}}{149593629000\text{m}^2} = 0{,}005931940\text{m/s}^2$$

$$a_{S(P_2)} = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\text{kg}}{149606371000\text{m}^2} = 0{,}005930903\text{m/s}^2$$

Prozentual beträgt der Unterschied zwischen P_1 und P_2

$$\frac{0{,}005931940}{0{,}005930903} = 1{,}000175 \approx 0{,}018\%$$

Setzt man Mond und Sonne miteinander ins Verhältnis

$$0{,}005931408\text{m/s}^2 * 0{,}017\% = 0{,}0001$$

$$0{,}0000332\text{m/s}^2 * 6{,}8\% = 0{,}000226$$

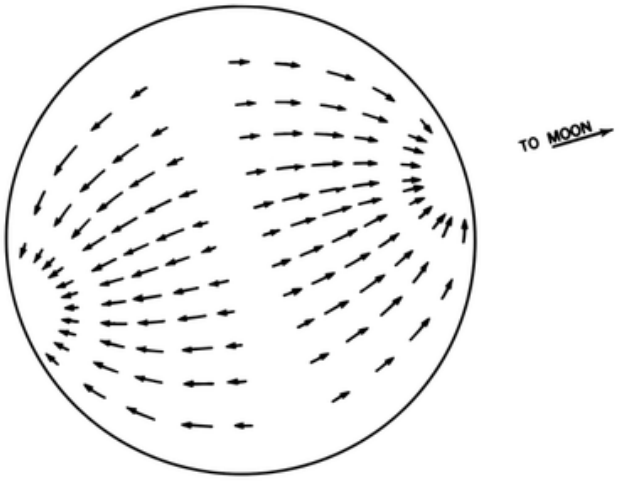
erhält man:

Die gezeitenwirksame Beschleunigung des Mondes ist etwa 2,3mal so groß wie die der Sonne.

Oder anders formuliert: Die gezeitenwirksame Kraft der Sonne beträgt etwa 43% der des Mondes.

- Die Anziehungskraft der Sonne ist zwar viel größer als die des Mondes, aufgrund ihrer großen Entfernung ist der Unterschied zwischen der zu- und abgewandten Seite der Erde viel geringer als im Falle des relativ nahen Mondes.
- Gezeitenwirksam ist nur der **Unterschied** zwischen der Sonne und Mond zu- bzw. abgewandten Seite.
- Die Kräfte sind im Verhältnis zur irdischen Schwerkraft sehr gering. Noch geringer sind die Netto-Kräfte die durch die Differenzen entstehen.
- Alle Kräfte wären viel zu gering um die Ozeane vertikal anzuheben!

Das die Erde bedeckende Wasser stellt aber die größte bewegliche Masse auf unserem Planeten dar. Sie kann auf ihrer Unterlage mit relativ geringem Reibungsverlust seitwärts gleiten.



Auf einer nur von Wasser bedeckte Erde ohne Kontinente und mit stets gleicher Meerestiefe würde die Wasserhülle gleichmäßig und konzentrisch zu den Punkten gezogen über dem Mond und Sonne im Zenit stehen. Man spricht vom sublunaren bzw. subsolaren Punkt.

Hier bildet sich eine Wulst mit erhöhtem Wasserstand, der "Flutberg".

Aus:
The American Practical Navigator (2002), Chapter 9,
US-Government (www.wikisource.en)

Auf der Zeichnung sind zwei Flutberge zu sehen, ein dem Mond und/oder zugewandter und ein abgewandter. Dieser zweite Flutberg ist Gegenstand der nächsten Betrachtung. Darin geht es um Fliehkräfte und um Massenträgheit.

Unsere Erde ist vielfach in Meeresbecken und Kontinente gegliedert. Das ändert das ideale Strömungsmuster in vielfacher Weise ab. Außerdem rotiert die Erde was zur Coriolis-Ablenkung der Strömung führt.

Vereinfachte Formel zur Berechnung der Gezeitenkräfte

Für alle Punkte außerhalb des Erdmittelpunkts ist die Gezeitenbeschleunigung durch den Mond größer oder kleiner als a_M.

Durch Umformung entsteht eine leicht zu handhabende Formel:

Für einen dem Mond zugewandten Punkt P_1 gilt

$$\Delta a = a_{P1} - a_M$$

$$\Delta a = \frac{Gm}{(r\text{-}R_E)^2} - \frac{Gm}{r^2}$$

$$\boldsymbol{\Delta a \approx + \frac{2Gm * R_E}{r^3}}$$

Für den dem Mond abgewandten Punkt P_2 gilt

$$\Delta a = a_{P2} - a_M$$

$$\Delta a = \frac{Gm}{(r+R_E)^2} - \frac{Gm}{r^2}$$

$$\boldsymbol{\Delta a \approx -\frac{2Gm * R_E}{r^3}}$$

Mit *G*(Gravitationskonstante), *m* (Mond- bzw. Sonnenmasse), R_E (Erdradius) und r (Entfernung Erde-Mond bzw. Erde-Sonne)

Mond:

$$\Delta a \approx \mp \frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\text{kg} * 6371 * 10^3\text{m}}{(384 * 10^6 m)^3}$$

$$\Delta a_{P1} = +0{,}000001104\text{m/s}^2$$

$$\Delta a_{P2} = -0{,}000001104\text{m/s}^2$$

Sonne

$$\Delta a \approx \mp \frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\text{kg} * 6371 * 10^3\text{m}}{(149{,}6 * 10^9 m)^3}$$

$$\Delta a_{P1} = +0{,}000000505\text{m/s}^2$$

$$\Delta a_{P2} = -0{,}000000505\text{m/s}^2$$

Das Kräfteverhältnis Sonne/Mond beträgt danach $\frac{0{,}000000505}{0{,}000001104} = \frac{45{,}7}{100}$

4. Fliehkräfte

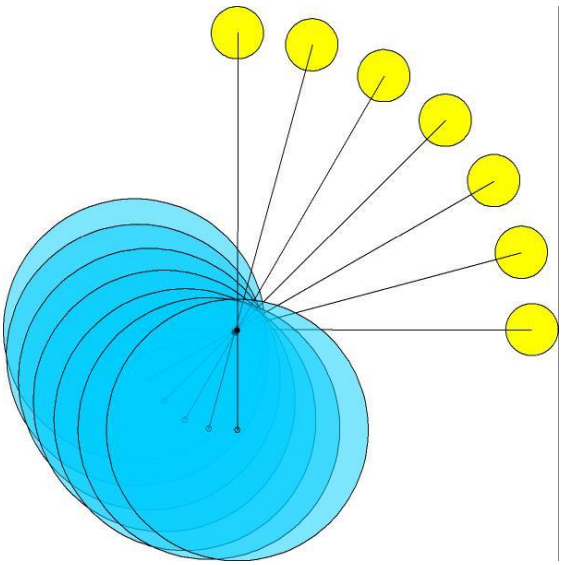
Um die Entstehung der Gezeiten und besonders das Entstehen von zwei Flutbergen zu verstehen muss man sich mit den Fliehkräften beschäftigen die in den Systemen Erde-Mond bzw. Erde-Sonne auftreten:

(Es gibt auch Erklärungsmodelle, die die Fliehkraft als nicht gezeitenwirksam bezeichnen!)

Mond und Erde bilden ein gemeinsames, im Laufe eines Mondumlaufs umeinander kreisendes System mit dem Schwerpunkt S. S liegt aufgrund der im Vergleich zum Mond großen Masse der Erde innerhalb der der Erde.

Die große schwere Erde hält den kleineren leichteren Mond mit unsichtbarer Kraft fest.

Richtiger wäre: Sie halten sich gegenseitig fest. Die Kraft ist die gleiche die dich auf die Erde zurückfallen lässt wenn du hochspringst.



Erde und Mond bilden ein gemeinsames, sich umeinander drehendes Schwerkraftsystem dessen Schwerpunkt unter der Erdoberfläche liegt

Stelle dir mal vor, du fasst Papa mit beiden Händen an und er dreht sich schnell im Kreis herum.

Schaue dann mal auf seine Füße.

Kann er sich auf einer Stelle drehen?

Nein, ein wenig wirbelst auch du ihn herum.

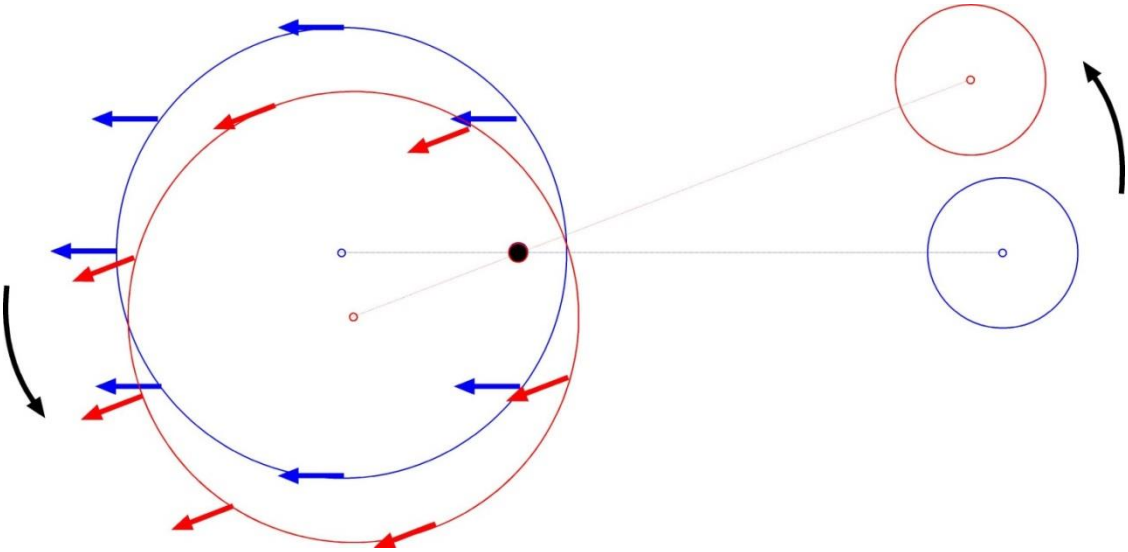
Ihr dreht euch um eine gemeinsame Achse.

Diese Achse liegt zwischen Papa und dir.

So ist es auch mit der Erde und dem Mond.

Nur dass sie sich nicht gegenseitig anfassen.

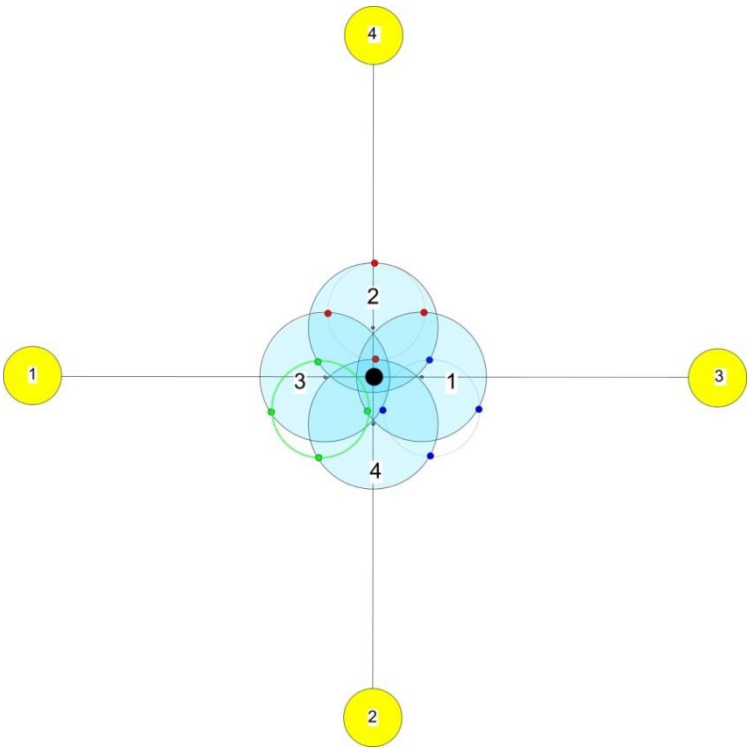
Die auf der Erde (oder dem Papa!) auftretenden Fliehkräfte sind überall gleich!



Ein aus zwei Scheiben (Erde - Mond) bestehendes Modell das im gemeinsamen Schwerpunkt gelagert ist und durch einen Motor in Rotation versetzt wird kann das sehr anschaulich zeigen. An mehreren Punkten der "Erde" werden mit kleinen Gewichten versehene Fäden aufgehängt. Dreht sich das System zeigen alle Fäden in die gleiche Richtung.

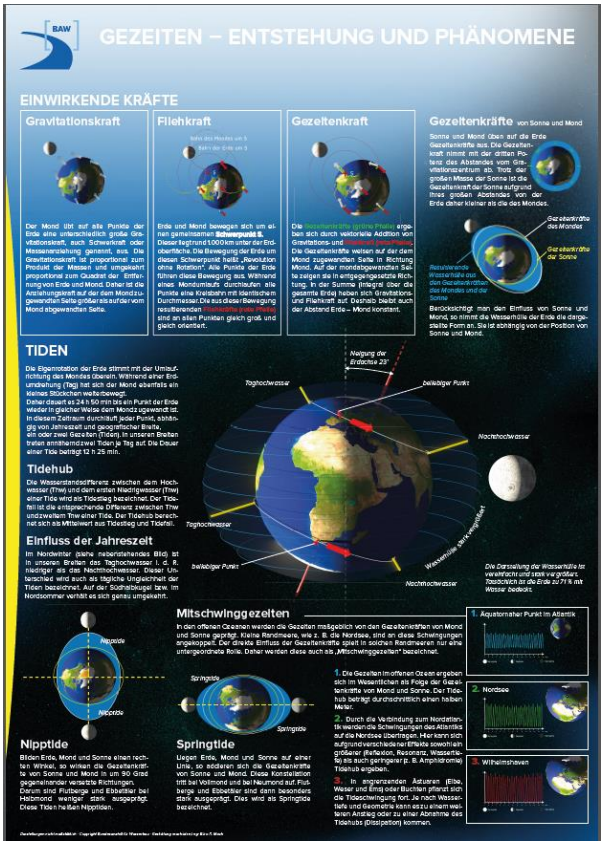
Ein solches Modell kann aus zwei Vorderrädern eines großen und eines kleinen Fahrrades bestehen die durch eine gemeinsame Achse miteinander verbunden sind.

Die Punkte beschreiben dabei Kreise mit gleichen Radien und daher gleichen Geschwindigkeiten.



Während das System Erde-Mond den gemeinsamen, hier schwarz markierten Schwerpunkt umläuft beschreiben alle Punkte auf der Erde (hier rot, grün, blau gezeichnet) Kreise mit gleichen Radien. Die vier gezeichneten Stadien sind mit 1, 2, 3 und 4 kennzeichnet. Achten Sie darauf, dass der Schwerpunkt jeweils dem Mond zugewandt ist.
Da die Geschwindigkeit und die Radien der Punkte gleich sind ist auch die auf sie wirkende Zentripetalkraft gleich. Die „Fliehkraft“ ist damit nicht, wie oft dargestellt, der Grund für die Gezeiten. Wohl aber ihr Über- bzw. Unterschuss in Bezug auf die Anziehungskraft des Mondes die auf der mondzugewandten Seite der Erde stärker und auf der mondabgewandten Seite schwächer ist.

Die Gezeiten mit ihren zwei Flutbergen entstehen durch den Nettobetrag aus beiden (!) Kräften, der Anziehungs- und der Fliehkraft.



Dieses folgenden Modell lehnen sich an das Poster "Gezeiten - Entstehung und Phänomene" der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hamburg) an.

Sie finden es unter

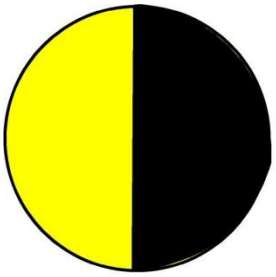
*www.**baw**.de/downloads/wasserbau/ mathematische_verfahren/**tides/tides**.pdf*

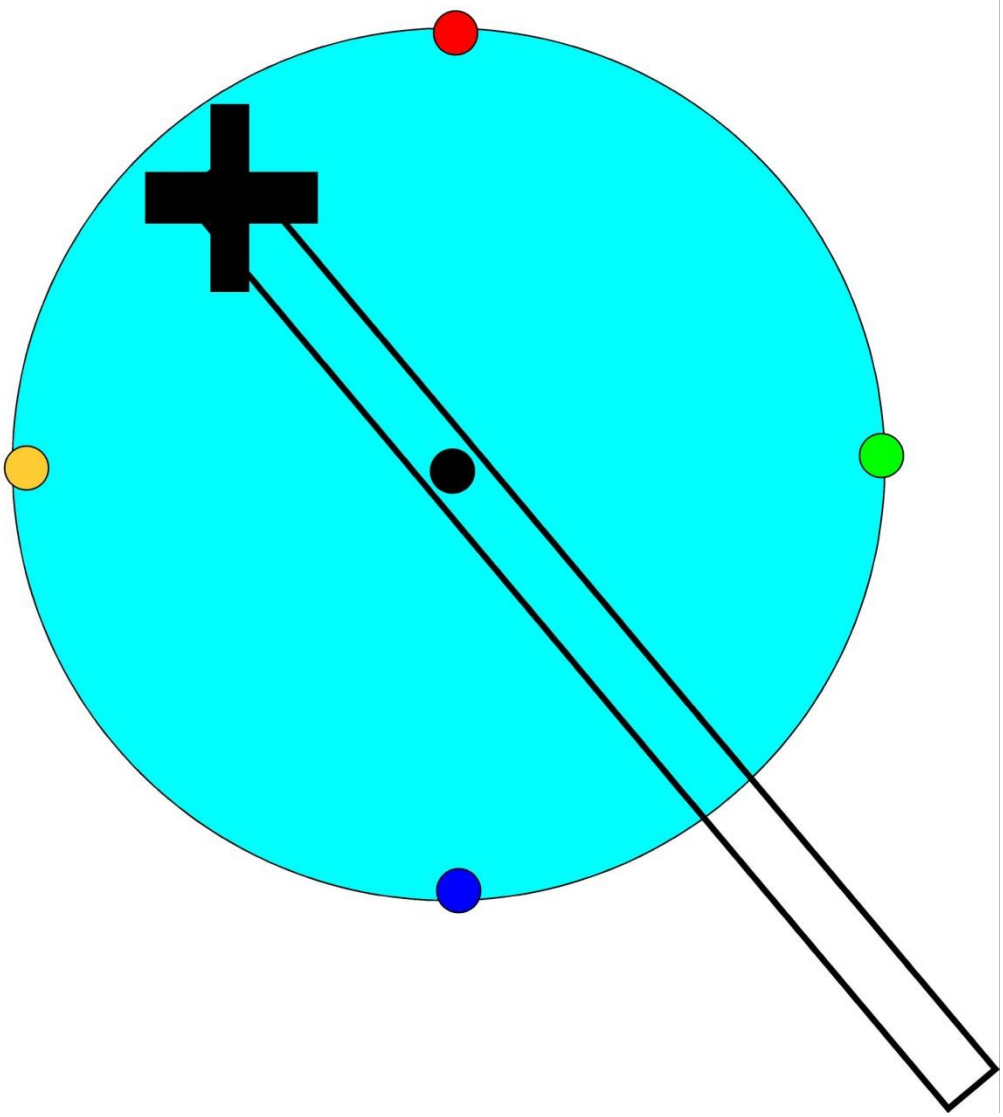
Die dazu gehörige, für Unterricht sehr geeignete Animation dazu liegt unter

https://www.youtube.com/watch?v=tc1lPAObWBc

Das "Erde - Mond -Fliehkraft - Karussell"

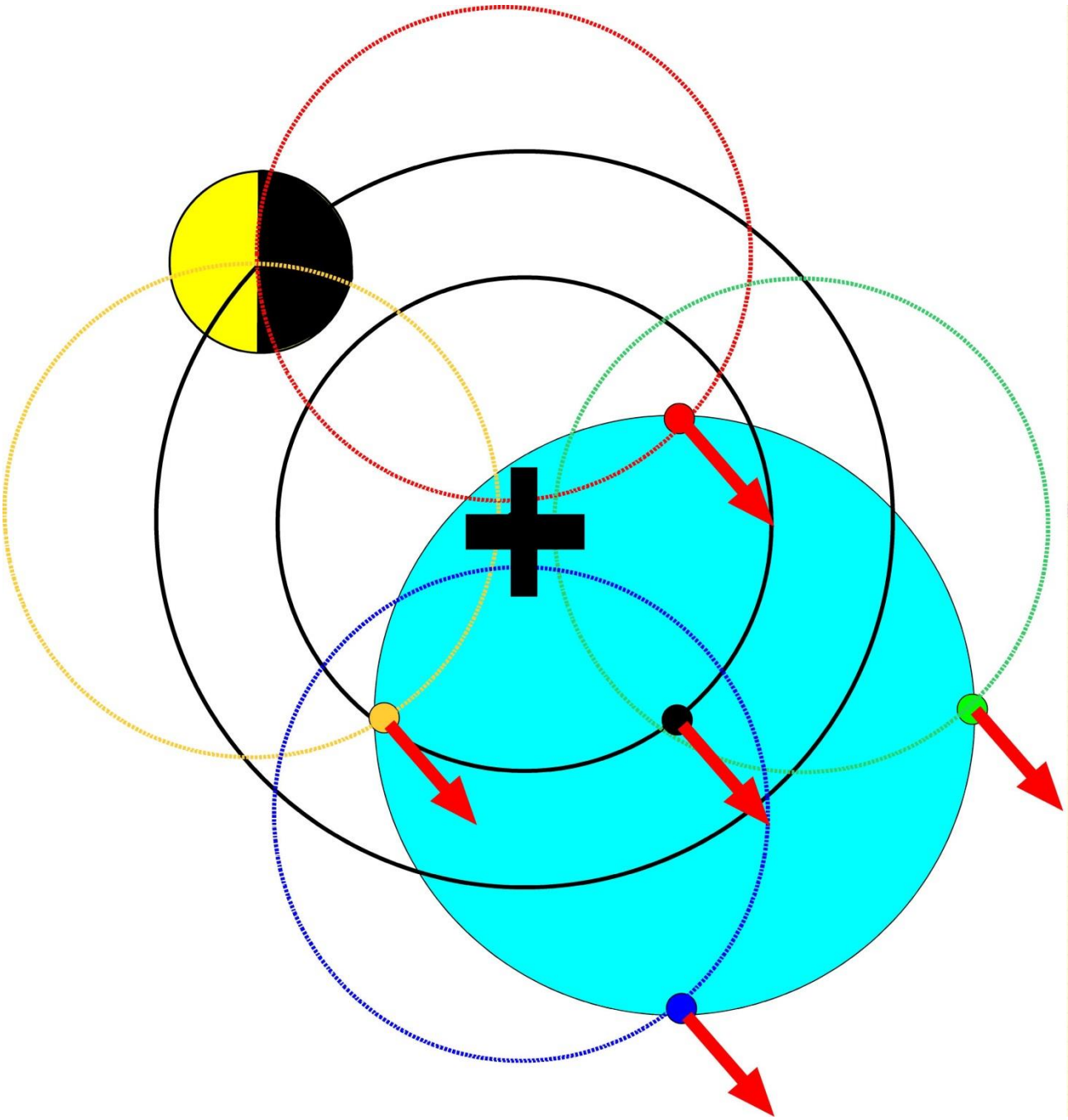
- Schneide das System Erde - Mond aus und befestige es mit einer Reißzwecke im gemeinsamen "Schwerpunkt" (Kreuz) drehbar auf einem Brett.
- Lasse das System um seine Achse kreisen und verfolge den Weg der vier farbigen Punkte.
- Du kannst auch eine Folie darauf legen und die Bewegungen mit farbigen Stiften nachzeichnen.
- Du kannst auch zusätzliche Punkte markieren und ihren Weg verfolgen.





Ergebnis:

- Die Erde (Erdmittelpunkt) und der Mond bewegen sich um den gemeinsamen Schwerpunkt.
- Die vier farbigen Punkte beschreiben Kreise mit gleichen Radien
- Das gilt auch für hinzugefügte Punkte
- Da sich alle Punkte auf Kreisen mit gleichen Radien bewegen sind sie gleich schnell.
- Die Folge ist, dass die Fliehkräfte überall gleich sind.



Wie groß sind Flieh- und Anziehungskräfte und wie groß ist ihre Nettowirkung?

Exkurs: Zentripetal- versus Zentrifugalbeschleunigung

Bei der geophysikalischen Beschreibung der Gezeiten wird meistens der Begriff „Fliehkraft“ oder "Zentrifugalkraft" benutzt.

Kraft (*F*) und Beschleunigung (*a*) können synonym benutzt werden so lange wir die Masse (m) auf die eine Kraft weinwirkt und die daher beschleunigt wird dimensionslos mit 1 bezeichnen:

$$F = a*m$$

Die „Fliehkraft“ scheint auf einen in einer Kreisbahn oder in einer Kurve bewegten Körper als eine nach außen wirkende Kraft zu wirken (vergl. Kettenkarussell). Tatsächlich folgt der nach außen getragene Körper nur der Trägheit seiner Masse die ihn auf geradlinigem Wege aus der Kreisbahn führt.

Die „Zentrifugalkraft“ ist nur eine Scheinkraft.

Die Kraft die den Körper auf seiner Kreisbahn hält ist nicht nach außen sondern nach innen gerichtet.

Sie wirkt der Trägheitsbewegung entgegen und heißt **Zentripetalkraft**.

Physikalisch korrekt müsste beim Thema Gezeiten von Zentripetalkraft statt Fliehkraft gesprochen werden.

Da die Zentripetalkraft bei Schülern erfahrungsgemäß zu erheblichen Verständnisschwierigkeiten führt haben wir uns für hier die „Fliehkraft“ entschieden.

Man sollte darauf hinweisen, dass die „Fliehkraft“ nur eine der Scheinkraft ist,

Die auf einen Punkte auf und innerhalb der Erde wirkende "Fliehkraft" = Zentripetalkraft a_z ist überall gleich. Im Erdmittelpunkt M_E ist sie gleich der Gravitationsbeschleunigung durch den Mond a_M.

$$a_Z = a_M = \frac{Gm}{r^2}$$

$$a_Z = a_M = 0{,}0000332\mathrm{m/s}^2$$

Für alle Punkte außerhalb des Erdmittelpunkts ist die Beschleunigung durch den Mond a_M größer oder kleiner als die Zentripetalbeschleunigung a_Z.

Die Fliehkräfte im System Erde-Mond sind an jedem Ort der Erde gleich (0,0000332m/s^2).

Damit dominiert auf der mondzugewandten Seite der Erde die Anziehungskraft über die Fliehkraft und auf der mondabgewandten Seite die Fliehkraft über die Anziehungskraft. Gezeitenwirksam ist nur das jeweilige Saldo!

Auf der dem Mond zugewandten Seite ist die Anziehungskraft größer als die "Fliehkraft"

$$0{,}000034321 - 0{,}0000332 = +0{,}0000011$$

Auf der dem Mond abgewandten Seite ist die Anziehungskraft kleiner als die "Fliehkraft"

$$0{,}000032120 - 0{,}0000332 = -0{,}0000011$$

$$\Delta g \approx \frac{2\mathrm{Gm}^{*}\mathrm{R_E}}{\mathrm{r}^3} = 1{,}1 * 10^{-7} g$$

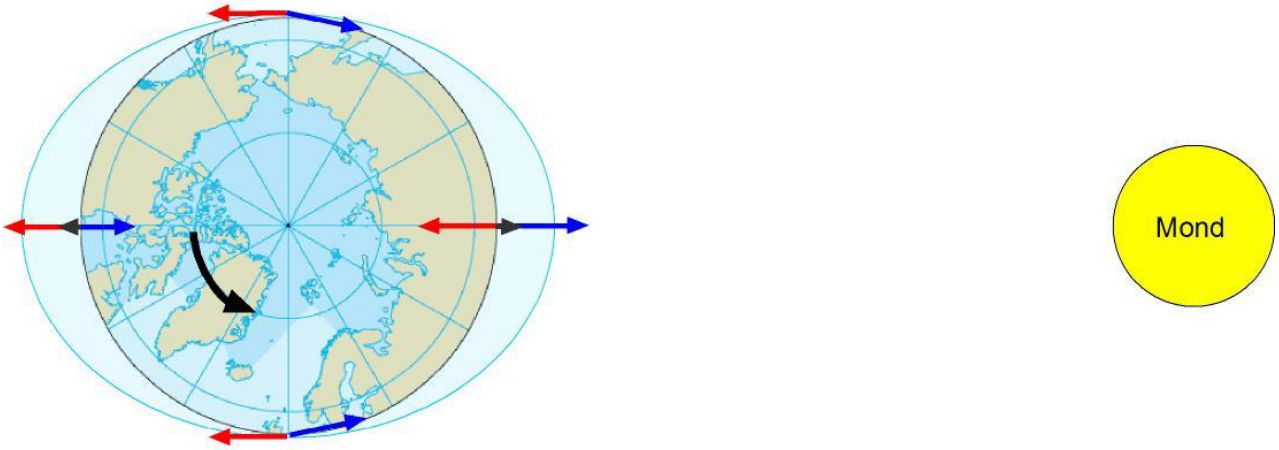
Entstehung von zwei Flutbergen

Jedes Wasserteilchen auf der Oberfläche der Erde erfährt zunächst eine zum Mittelpunkt der Erde gerichtete Beschleunigung.(Fallbeschleunigung).

Auf einer idealen kugelförmigen Erde mit gleichmäßiger Massenverteilung wäre die Fallbeschleunigung an jedem Punkt der Erde gleich.

Dies ist zwar aufgrund der rotationsbedingten Abplattung der Erde nicht der Fall, hier soll aber vereinfachend davon ausgegangen werden. Die Fallbeschleunigung, da auf der Erdoberfläche idealerweise an jedem Punkt gleich kann in der Folge ignoriert werden.

- Die Beschleunigung durch die „Fliehkraft“ ist in jedem Punkt der Erde gleich (rote Pfeile).
- Die Beschleunigung die ein Wasserteilchen durch den Mond erfährt (blaue Pfeile) ist auf der mondzugewandten Seite der Erde größer als auf der mondabgewandten.
- Auf der mondzugewandten Seite ist sie größer als die „Fliehkraft“.
- Auf der mondabgewandten Seite ist sie geringer als die „Fliehkraft“.
- Im 90°-Winkel „quer“ zum Mond heben sich die die beiden Kräfte auf.



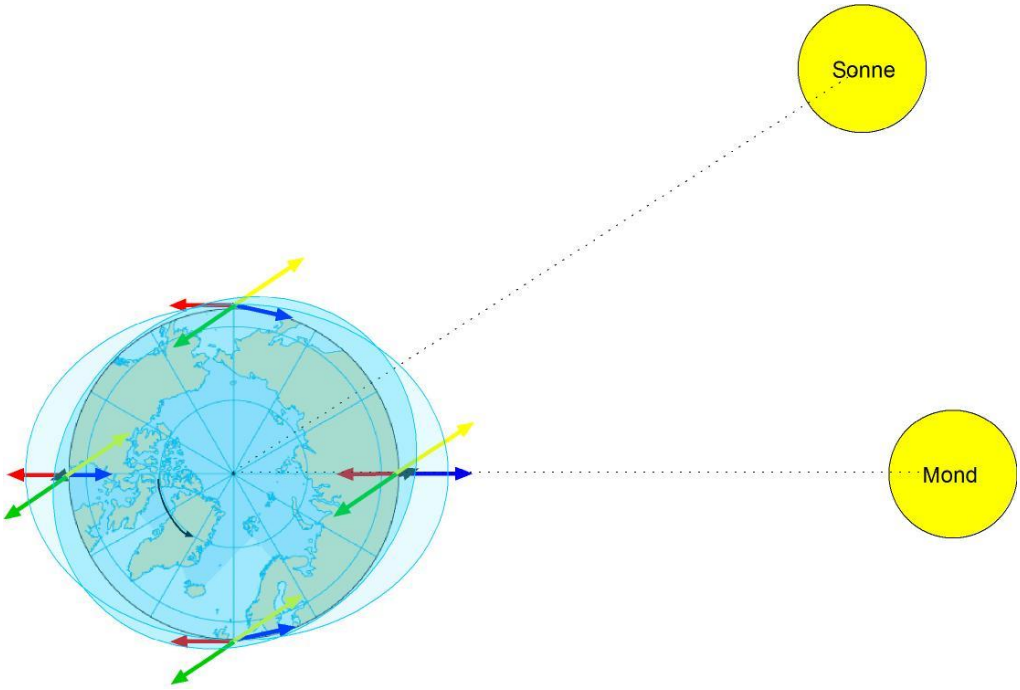
- Auf den mondzugewandten und mondabgewandten Seiten ergibt sich eine vom Erdmittelpunkt weg gerichtete Nettokraft (schwarze Pfeile).
- Im Ergebnis gibt es einen, dem Mond zugewandten und einem, dem Mond abgewandten Flutberg.

Die Erde rotiert in etwa 24 Stunden unter diesen beiden Flutbergen hindurch.

Die periodische Überlagerung der Gezeitenkräfte von Sonne und Mond

Die Gezeitenkräfte des Mondes und der Sonne überlagern sich.

Sowohl der Mond als auch die Sonne bilden eigene durch die Bewegung von Sonne, Mond und Erde um die Erde „wandernde“ Flutberge.



Unter dem Mond und ihm gegenüber bilden sich zwei Flutberge aus. Zwei weitere flachere werden durch die hier versetzt stehende Sonne erzeugt. Die durch Mond- und Sonne erzeugten Flutberge vereinigen sich. Ihr Scheitel liegt zwischen Mond und Sonne bzw. diesem Punkt gegenüber.

Die vom Ort abhängigen Anziehungskräfte des Mondes sind blau gezeichnet, die ihnen entgegenwirkenden und überall gleichen Fliehkräfte des Erde-Mond-Systems rot.

Die ebenfalls ortsabhängigen und im Vergleich zum Mond stärkeren Anziehungskräfte der Sonne sind durch gelbe Pfeile gekennzeichnet, die an allen Orten gleichen Fliehkräfte durch grüne. Beachten Sie, dass die Kraftdifferenzen im Falle der (fernen) Sonne viel geringer sind beim relativ nahen Mond.

Die gezeitenwirksamen Nettokräfte sind durch kurze schwarze Pfeile gekennzeichnet.

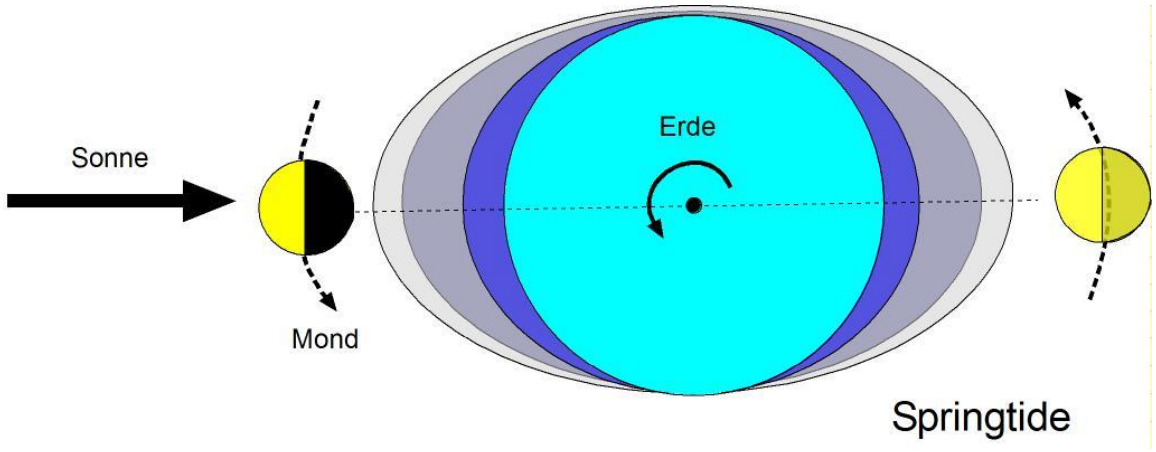
Der Mond bleibt aufgrund seiner Umlaufbahn um die Erde in Bezug auf den Meridiandurchgang ("Süden") täglich etwa 50 Minuten hinter der Sonne zurück. Vom Neumond an vergrößert er seinen Winkelabstand zur Sonne bis zum Vollmond, worauf er sich wieder verringert.

Das führt dazu, dass sich die Mond- und Sonnen-Flutberge gegeneinander verschieben und überlagern.

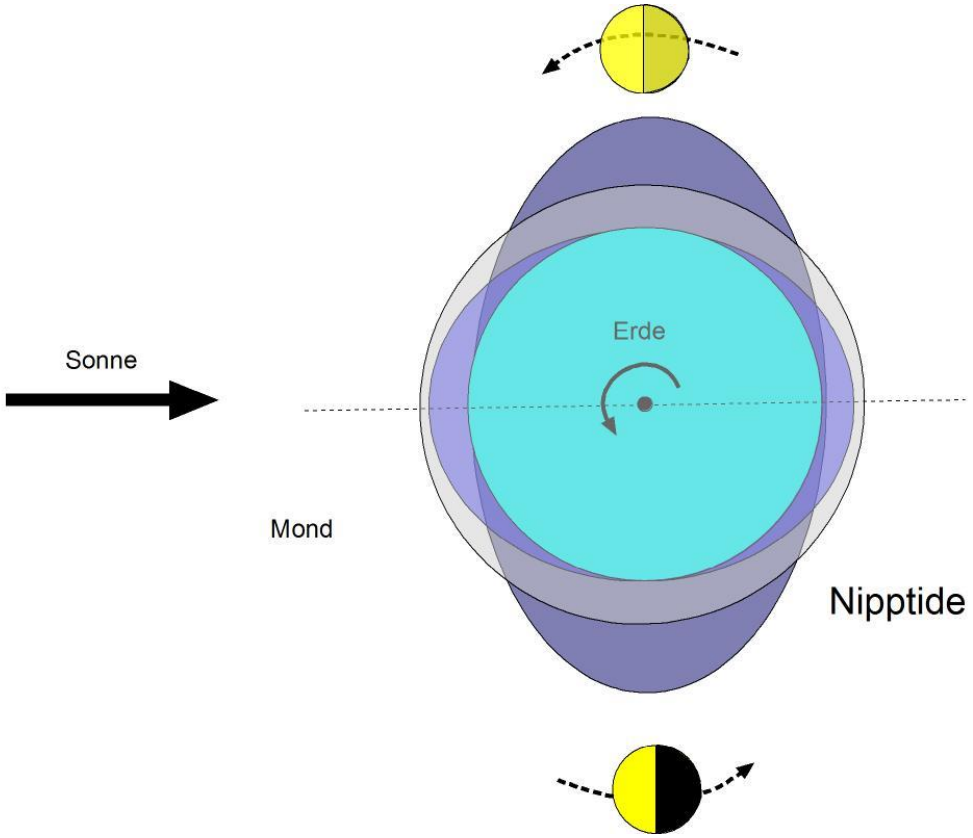
Spring- und Nipptide

Bei Neu- und Vollmond stehen Mond und Sonne mehr oder weniger Linie mit der Erde. Meistens zieht der Mond, dessen Bahn zur Umlaufbahn der Erde zur Sonne um 5° geneigt ist, höher oder tiefer an der Sonne vorbei , so dass Sonnen und Mondfinsternisse nur Ausnahmeerscheinungen sind. Nur dann fallen der sublunare und der subsolare Punkt wirklich zusammen.

Zu dieser Zeit, den so genannten "Syzygien" (lat.-griech. Für "Zusammenkunft") addieren sich die Flutscheitel zur "Springtide". Dann laufen das Hochwasser höher und das Niedrigwasser niedriger auf als im Mittel. Das Hochwasser trifft zu dieser Zeit im Prinzip zeitgleich mit dem Meridiandurchgang des Mondes und dann 12 Stunden 25 Minuten danach ein.



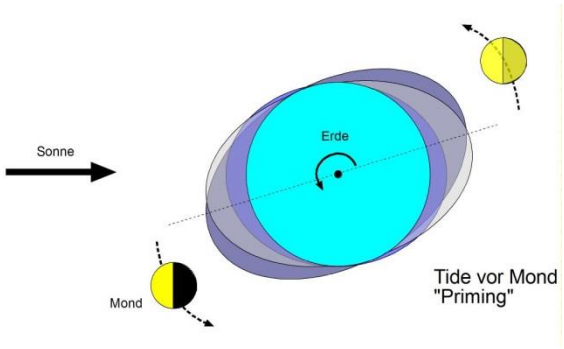
Im Ersten und Letzten Viertel (zunehmender bzw. abnehmender Halbmond) steht der Mond um 90° versetzt zur Sonne und die beiden Flutscheitel damit quer zueinander. Die Pegelunterschiede zwischen Hoch- und Niedrigwasser fallen in dieser Zeit deutlich geringer aus ("Nipptide") und das Hochwasser auf der mondzugewandten Seite der Erde fällt zeitlich mehr oder weniger mit seinem Meridiandurchgang zusammen.

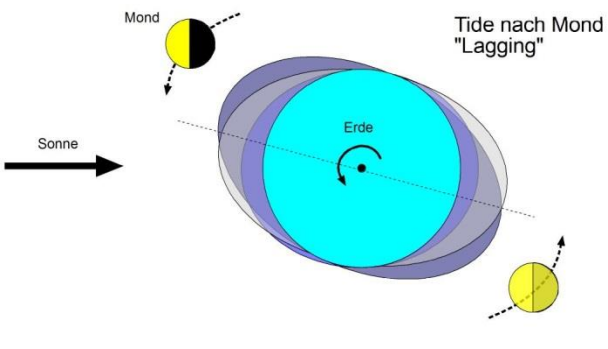


Vorgehen und Nachgehen der Gezeiten

Zwischen diesen Zeiten kommt es zu deutlichen Abweichungen des Hochwasserzeitpunkts vom Meridiandurchgang.

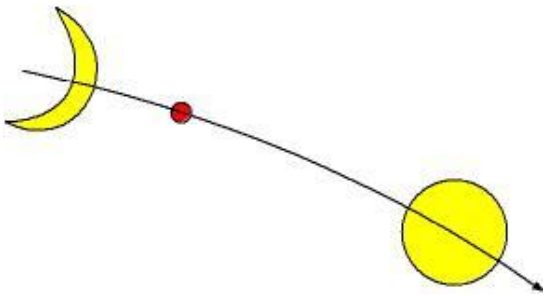
- Zwischen Neumond und Erstem Viertel bzw. zwischen Vollmond und Letzten Viertel liegt der Flutscheitel vor dem Mond. Das Hochwasser tritt vor seinem Meridiandurchgang ein. Das nennt man "Priming".
- Zwischen Erstem Viertel und Vollmond und bzw. zwischen Letzten Viertel und Neumond liegt der Flutscheitel hinter dem Mond. Das Hochwasser tritt nach seinem Meridiandurchgang ein. Das nennt man "Lagging".





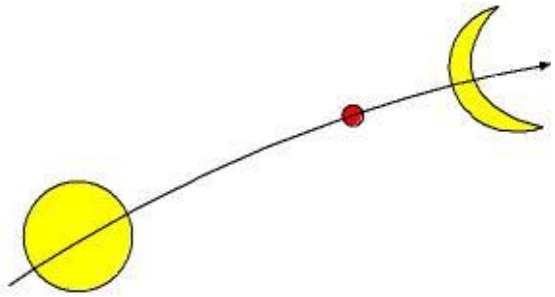
Stellen Sie sich vor, man könnte die von Mond und Sonne gemeinsam gebildeten "Kraftzentren" als Punkte am Himmel sehen. Liegen Mond und Sonne hintereinander ("Neumond") oder sich gegenüber (Vollmond") lägen sie in Mondrichtung und ihm gegenüber . Das ist auch bei Halbmond so.

Bei allen anderen Mondphasen läge das "Kraftzentrum" zwischen Mond und Sonne und während Sonne und Mond langsam von links nach rechts (von Osten nach Westen) über den Himmel zu wandern scheinen bewegen sich auch diese Punkt mit. Unter diesen Punkten liegen die beiden Flutberge.



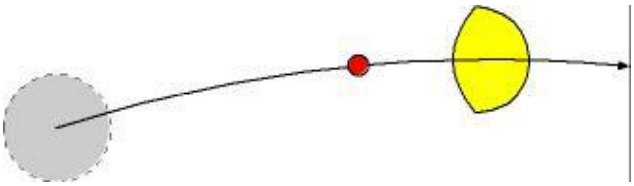
Der zunehmende Mond folgt der untergehenden Sonne. Das gedachte "Kraftzentrum" (rot) und damit der Hochwasserscheitel gehen dem Mond voran.

Das Hochwasser tritt vor dem Meridiandurchgang ein ("Priming").



Der abnehmende Mond geht der aufgehenden Sonne voraus. Das gedachte "Kraftzentrum" (rot) und damit der Hochwasserscheitel folgen dem Mond.

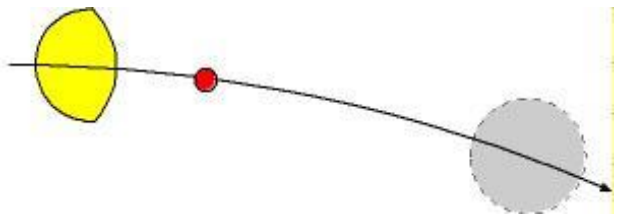
Das Hochwasser tritt nach dem Meridiandurchgang ein ("Lagging")



Der zunehmende Mond geht dem Punkt der der Sonne gegenüberliegt voran.

Das "Kraftzentrum" und der Hochwasserscheitel folgen dem Mond.

Das Hochwasser tritt nach dem Meridiandurchgang ein ("Lagging")

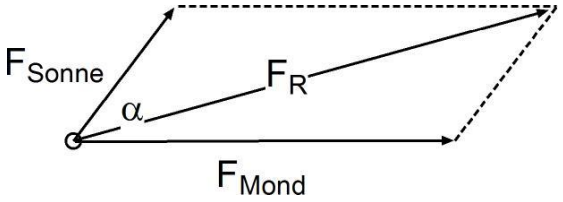


Der abnehmende Mond folgt dem der Sonne gegenüberliegenden Punkt.

Das "Kraftzentrum" und der Hochwasserscheitel gehen dem Mond voran ("Priming").

Die Richtung und Stärke der Flutscheitel bei allen anderen Mondphasen lässt durch ein Kräfteparallelogramm darstellen bei dem die Gezeitenkräfte der Sonne und des Mondes als Vektoren

betrachtet und addiert werden. Dies geschieht unter der Annahme, dass Mond und Sonne in einer Ebene stehen.

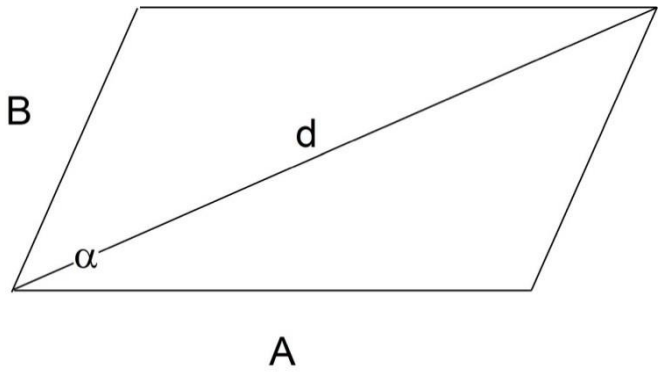


Addition der Gezeitenkräfte von Mond und Sonne

- Mond (F_1)
- Sonne (F_2)
- Resultierende Kraft (F_R)
- Winkel zwischen Mond und Sonne (α)

Da es zunächst nicht um absolute Beträge geht kann die Kraft des Mondes mit dem Einheitswert 1 angegeben werden. Die relative Kraft der Sonne ist dann 0,44.

Die Diagonale im Parallelogramm mit den Seiten A und B und dem Winkel AB ist



$$d = \sqrt{A^2 + B^2 + 2 * A * B * \cos\alpha}$$

Die aus Mond und Sonne resultierende Gezeitenkraft lässt sich dann folgendermaßen berechnen

$$F_R = \sqrt{{F_{Mond}}^2 + {F_{Sonne}}^2 + 2 * F_{Mond} * F_{Sonne} * \cos\alpha}$$

Liegen Mond und Sonne auf einer Ebene und in einer Linie addieren sich die Kräfte erwartungsgemäß zu

$$F_R = \sqrt{1^2 + 0{,}44^2 + 2 * 1 * 0{,}44 * \cos 0}$$

$$F_R = 1{,}44$$

Ist der Winkel zwischen Mond und Sonne α = 45° (cos 1) folgt:

$$F_R = \sqrt{1^2 + 0{,}44^2 + 2 * 1 * 0{,}44 * \cos 45}$$

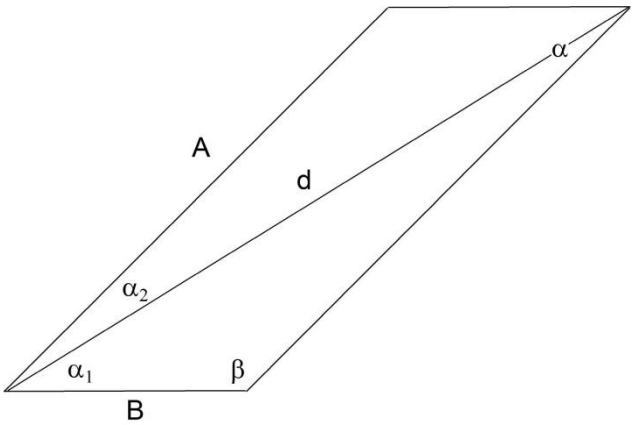
$$F_R = 1{,}34$$

Bei a = 90° (cos 0) ist F_R = 1,09

Wo am Himmel liegt das "Kraftzentrum" zwischen Mond und Sonne?

Der Winkel zwischen dem Kraftvektor Mond und der resultierenden Kraft lässt sich mit Hilfe des Sinussatzes bestimmen.

$$\frac{a}{sin\alpha} = \frac{b}{sin\beta} = \frac{c}{sin\gamma}$$



Die Seiten A und B, die Diagonale d und der Winkel α sind bekannt.

Gesucht werden die Winkel α_1 und α_2.

Ihre Summe ist gleich α.

Der zu α komplementäre Winkel β ist 180° - α groß.

$$\frac{d}{sin(180° - \alpha)} = \frac{A}{sina_1} = \frac{B}{sin(a - a_1)}$$

$$a_1 = \arcsin\left(A * \frac{sin(180° - \alpha)}{d}\right)$$

$$a_2 = \arcsin\left(B * \frac{sin(180° - \alpha)}{d}\right)$$

Beispiel:

Winkel zwischen Sonne, Mond und dem gemeinsamen "Kraftzentrum".

F_{Mond} = 1

F_{Mond} = 0,45

Winkel a zwischen Sonne und Mond = 45°

$$F_R = \sqrt{1^2 + 0{,}45^2 + 2 * 1 * 0{,}45 * \cos 45}$$

$$F_R = 1{,}356$$

$$a_1 = \arcsin\left(1 * \frac{sin(180° - \alpha)}{1{,}356}\right)$$

$$a_1 = 31{,}43°$$

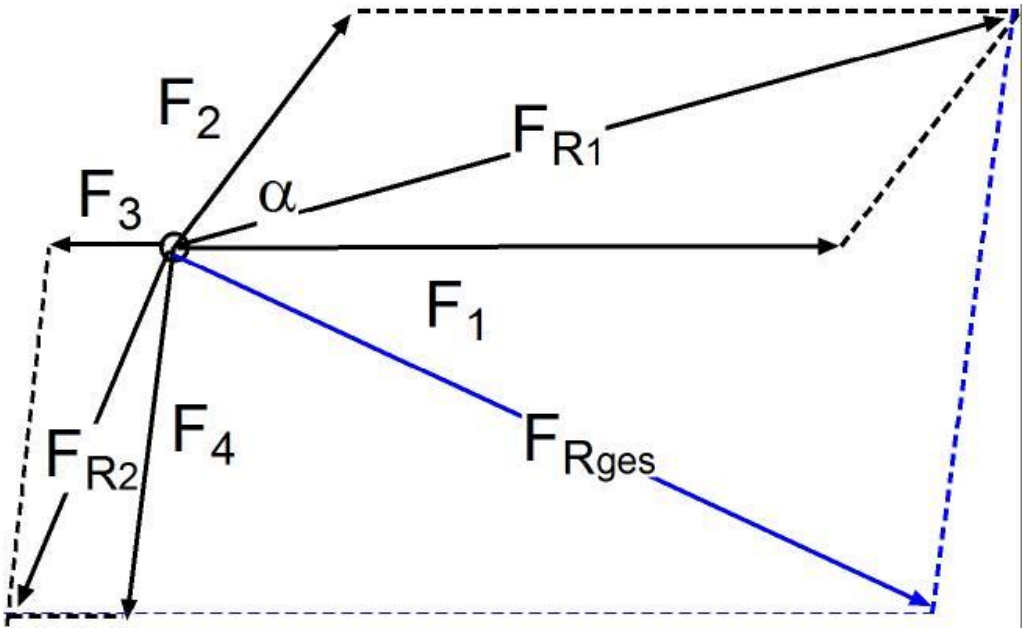
$$a_2 = \arcsin\left(0{,}45 * \frac{sin(180° - \alpha)}{1{,}36}\right)$$

$$a_2 = 13{,}57°$$

Die Tatsache, dass nicht nur die Anziehungskräfte sondern auch die Fliehkräfte in die Gezeiten eingehen macht die Gesamtbetrachtung deutlich komplizierter.

Sollen mehr als zwei Kräfte addiert werden muss man mehrschrittig vorgehen.

Zunächst wird die resultierende Kraft FR1 aus F1 und F2 bestimmt, dann die resultierende Kraft FR2 aus F3 und F4. Schließlich wird die Gesamtkraft aus FR1 und FR2 ermittelt.



Mal näher, mal ferner: Auswirkungen der elliptischen Mondbahn

Die Entfernung Erde – Mond schwankt zwischen 363300 km (Perigäum, Erdnähe) und 405500 km (Apogäum, Erdferne). Der Zeitraum zwischen zwei Perigäen beträgt 27,4 Tage (= 1 anomalistischer Monat). Die schwankende Distanz Erde-Mond wirkt sich nach dem Abstandsquadratgesetz natürlich auf die Anziehungskraft zwischen den beiden Himmelskörpern und auf die Differenz zwischen den Gezeitenkräften auf der mondzugewandten bzw. mondabgewandten Seite der Erde aus. Weiterhin variiert damit auch die Bahngeschwindigkeit des Mondes was zu einer „Verfrühung“ bzw. „Verspätung“ seines mittleren Meridiandurchgangs führt.

Die durch den Mond auf den Mittelpunkt der Erde ausgeübte Beschleunigung (a_Z) beträgt

In Erdnähe:

$$a_Z = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg}}{363300000\mathrm{m}^2}$$

$$a_Z = 0{,}00003716\mathrm{m/s}^2$$

In Erdferne:

$$a_Z = \frac{6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg}}{405500000\mathrm{m}^2}$$

$$a_Z = 0{,}00002983\mathrm{m/s}^2$$

In mittlerer Entfernung (384400 km)

$$a_M = 0{,}0000332\mathrm{m/s}^2$$

$$\frac{0{,}00003716}{0{,}0000332} = 1{,}119$$

$$\frac{0{,}00002983}{0{,}00003320} = 0{,}898$$

Damit ist die Anziehungskraft des Mondes im Perigäum um also etwa 11,2% stärker und im Apogäum um also etwa 9% schwächer als im Mittel.

Die vom Mond ausgeübte Gezeitenkraft im Perigäum bzw. Apogäum ist nach der Formel

$$\Delta a \approx -\frac{2\,Gm^*\mathrm{R_E}}{\mathrm{r}^3}$$

Erdnähe 363300 km (Perigäum)

$$\Delta a \approx$$

$$\mp\frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg} * 6371*10^3\mathrm{m}}{(363{,}3 * 10^6 m)^3}$$

$$\mp 0{,}000001303\ \mathrm{m/s}^2$$

Erdferne 405500 km (Apogäum)

$$\Delta a \approx$$

$$\mp\frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg} * 6371*10^3\mathrm{m}}{(405{,}5 * 10^6 m)^3}$$

$$\mp 0{,}0000009370\mathrm{m/s}^2$$

Die Gezeitenkraft bei mittlerem Bahnabstand ist

$$\Delta a \approx \mp \frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 7{,}349 * 10^{22}\mathrm{kg} * 6371{*}10^{3}\mathrm{m}}{(384 * 10^{6} m)^{3}}$$

$$= \mp 0{,}000001104 \mathrm{m/s^2}$$

Die Abweichung vom Mittel beträgt also bzw. +18,03% in Erdnähe und -15,13% in Erdferne

- Gezeiten während des Perigäums fallen starker, Gezeiten im Apogäum schwächer aus als im Mittel.

Mal höher, mal tiefer: Auswirkungen der Bahnneigung des Mondes

Die Umlaufbahn des Mondes ist gegen die Bahn der Erde um die Sonne um 5° geneigt.

Der maximale Deklinationsunterschied zwischen Sonne und Mond beträgt also 5 Grad ("Größte Nordbreite", "Größte Südbreite"). Der Neumond kann also maximal 5° "über" oder "unter" der Sonne stehen. Da sowohl die Sonne als auch der Mond eine scheinbare Größe von etwa einem halben Grad haben kommt es dann natürlich zu keiner Sonnenfinsternis. Das geschieht nur dann, wenn sich der Mond genau im Schnittpunkt beider Bahnebenen befindet.

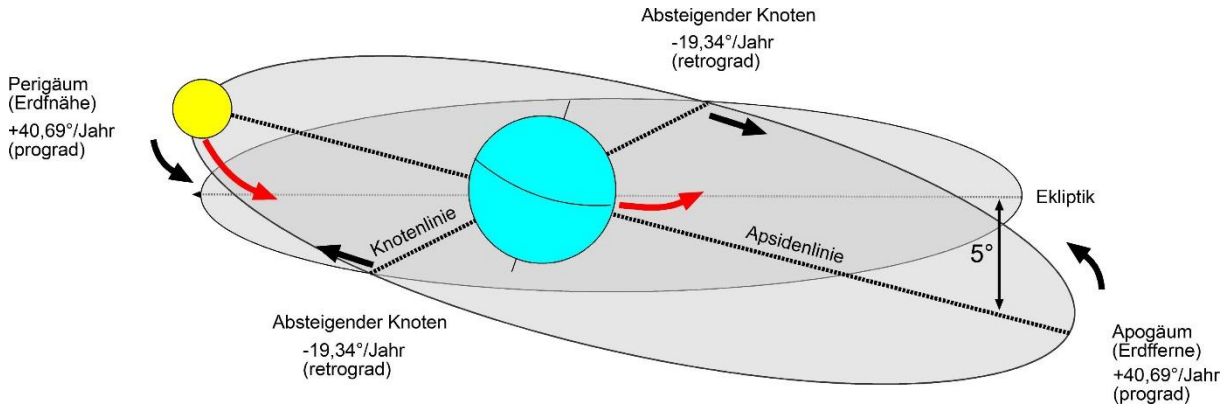
Die resultierende Gezeitenkraft ist dann

$$F_R = \sqrt{{F_{Mond}}^2 + {F_{Sonne}}^2 + 2 * F_{Mond} * F_{Sonne} * \cos\alpha}$$

Nehmen wir die gezeitenerzeugenden Kräfte des Mondes mit 1 und die der Sonne mit 0,45 dann

$$F_R = \sqrt{1^2 + 0{,}45^2 + 2 * 1 * 0{,}45 * \cos 5°} = 1{,}449$$

Das weicht kaum von der Situation ab wenn Mond und Sonne in einer Linie stehen. Dann ist der Deklinationsunterschied Null und die Kräfte addieren sich zu 1,45.



Die Erde ist gegen die Ekliptik, die Ebene der Umlaufbahn der Erde um die Sonne, um etwa 23,5° geneigt. Die Bahn des Mondes ist gegen die Ekliptik um etwa 5° geneigt.

Für die Gezeiten bedeutet das: Die Sonne steht im Dezember senkrecht über dem südlichen Wendekreis (23,5° S), im Juni über dem nördlichen Wendekreis (23,5°N). Der Mond kann das maximal noch um 5° über- bzw. unterschreiten (28,5°S / 18,5°S bzw. 28,5°N / 18,5°N), wodurch die die Flutberge entweder noch weiter polwärts gezogen werden und die Unterschiede zwischen den Tag- und Nachthochwassern noch größer ausfallen als im „Normalfall“ oder sich die Angriffspunkte der Gezeitenkräfte in Richtung zum Äquator verlagern und die Unterschiede geringer werden.
Das Zusammenspiel dieser Bewegungen ist kompliziert aber vorhersagbar.

Das Maximum des Winkelabstands zwischen Mond und Ekliptik ist nicht ortsfest sondern wandert.

Während eines Umlaufs um die Erde kreuzt der Mond zweimal die Ekliptik, einmal aufsteigend und einmal absteigend. Die Schnittpunkte heißen Knoten und die gedachte Verbindungslinie Knotenlinie. Liegen Erde, der die Ekliptik kreuzende Mond und die Sonne in einer Linie sind Sonnen- oder Mondfinsternisse möglich. Die Knotenlinie rotiert in 18,6 Jahren einmal um ihre Achse.

Diese durch die Gravitationswirkung der Sonne verursachte Bewegung hat Folgen für die Höhe und Periode der Gezeiten:

Stehen Mond und Sonne in hintereinander oder sich gegenüber addieren sich ihre Kräfte. Dies ist besonders dann der Fall wenn sich der Mond genau dann einen der beiden Knoten seiner Bahn durchläuft und wenn sein Abstand zur Erde am geringsten ist.

Mal näher, mal ferner: Auswirkungen der elliptischen Bahn der Erde

Die Sonne ist im Mittel 149,6 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Die Bahn der Erde ist leicht elliptisch, daher schwankt die Distanz zwischen 147,09 Millionen Kilometern im Perihel ("Sonnennähe") und 152,10 Millionen Kilometern im Aphel ("Sonnenferne").

Die von der Sonne ausgeübte Gezeitenkraft im Perihel bzw. Aphel ist nach der Formel

$$\Delta a \approx -\frac{2\,Gm^{*}\mathrm{R_E}}{\mathrm{r}^3}$$

Sonnennähe 147090000 km (Perihel)

$$\Delta a \approx$$

$$\mp\frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\mathrm{kg} * 6371{*}10^{3}\mathrm{m}}{(147{,}09 * 10^{9}m)^{3}}$$

$$\mp 0{,}000000532\ \mathrm{m/s^2}$$

Sonnenferne 152100000 km (Aphel)

$$\Delta a \approx$$

$$\mp\frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\mathrm{kg} * 6371{*}10^{3}\mathrm{m}}{(152{,}1 * 10^{9}m)^{3}}$$

$$\mp 0{,}000000481\mathrm{m/s^2}$$

Die Gezeitenkraft bei mittlerem Bahnabstand ist

$$\Delta a \approx \mp \frac{2 * 6{,}674 * 10^{-11} * 1{,}989 * 10^{30}\mathrm{kg} * 6371{*}10^{3}\mathrm{m}}{(149{,}6 * 10^{9} m)^{3}}$$

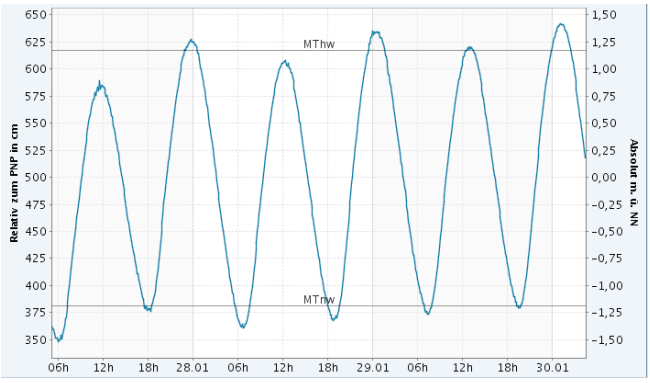
$$\mp 0{,}000000505\ \mathrm{m/s^2}$$

Die Abweichung vom Mittel beträgt also bzw. +5,35% in Erdnähe und -4,75% in Erdferne

- Gezeiten während des Perihels fallen starker, Gezeiten im Aphel schwächer aus als im Mittel.

Tägliche Ungleichheit der Höhe der Gezeiten

Beim Vergleich der Pegelstände fällt auf, dass sich die Höhe des Taghochwassers von der des Nachthochwassers unterscheidet. Weil dies natürlich auf das Wetter zurückzuführen sein könnte haben wir einen Zeitraum ausgesucht in der der Wind unter Hochdruckeinfluss nur schwach wehte. Helgoland, in der Mitte der Deutschen Bucht gelegen ist darüber hinaus kein Ort an dem es zu Staulagen kommen kann.



Beispiel Helgoland (Binnenhafen)

- Ende Januar 2017
- Mondphase Neumond (28.01.17)

- Taghochwasser läuft niedriger auf als Nachthochwasser

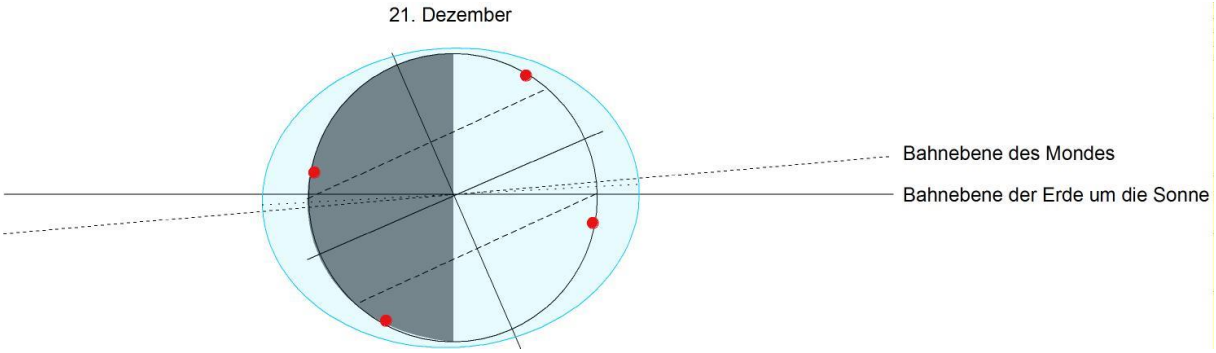
www.pegelonline.de

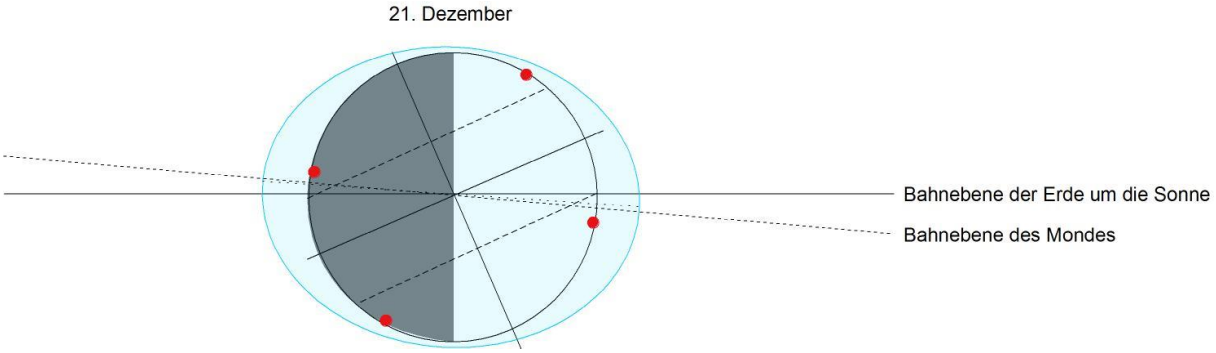
Im Sommer treffen wir auf umgekehrte Verhältnisse: Dann läuft das Taghochwasser höher auf als das Nachthochwasser. In der Nähe der Tag- und Nachtgleichen im Frühjahr und Herbst fallen die aufeinanderfolgenden Tiden nahezu gleich hoch aus.

Die Rotationsachse der Erde ist zur Bahnebene der Erde um die Sonne (Ekliptik) um 23,5° geneigt.

Im **Nordwinter** (=Südsommer) steht die Sonne senkrecht über dem südlichen Wendekreis.

Die Position des Mondes, dessen Bahn um 5° gegen die Ekliptik geneigt ist liegt zwischen +5° und - 5° davon.



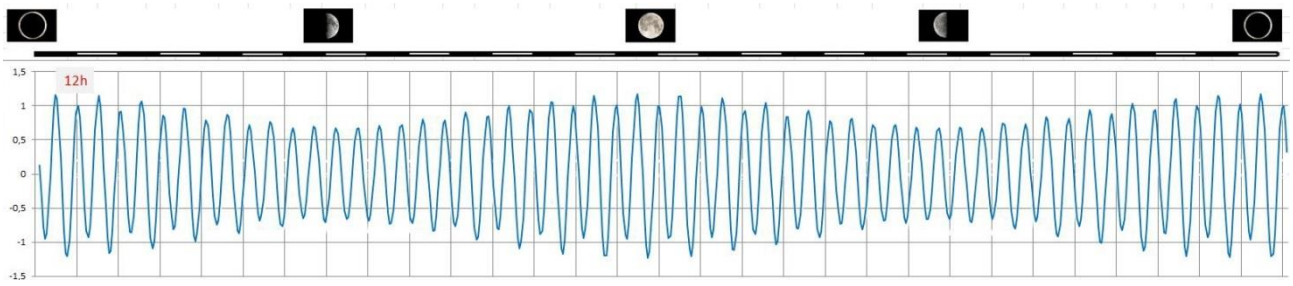


Dann fällt

- auf der Nordhalbkugel das Nachthochwasser höher aus als das Taghochwasser.
- auf der Südhalbkugel das Taghochwasser höher aus als das Nachthochwasser.

Je nachdem wie weit der Mond nördlich oder südlich der Ekliptik steht wird dieser Effekt verstärkt oder abgeschwächt.

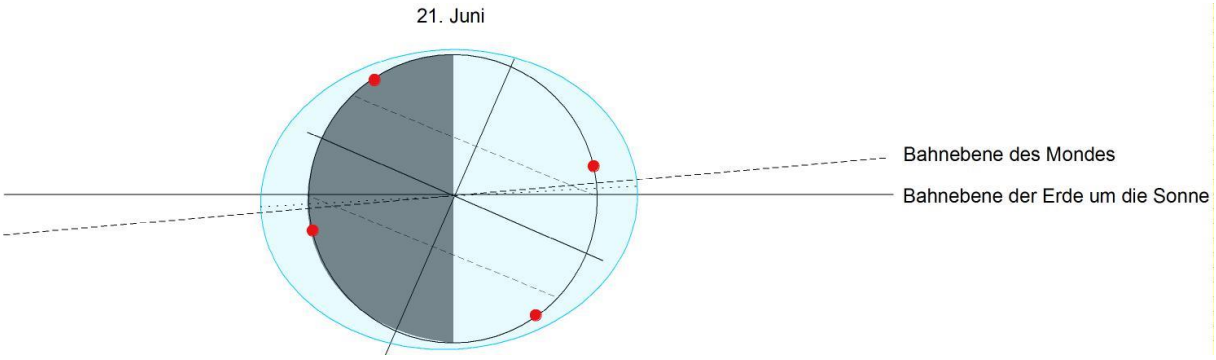
Tidenkurve im Winter (Nordsee)

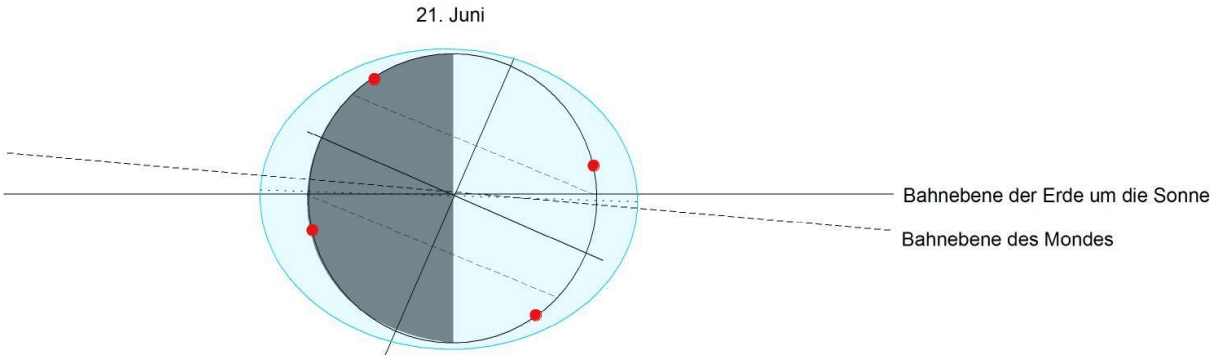


Darstellung mit unserem EXCEL-Programm

Im **Nordsommer** (=Südwinter) steht die Sonne senkrecht über dem nördlichen Wendekreis.

Die Position des Mondes, dessen Bahn um 5° gegen die Ekliptik geneigt ist liegt zwischen +5° und - 5° davon.



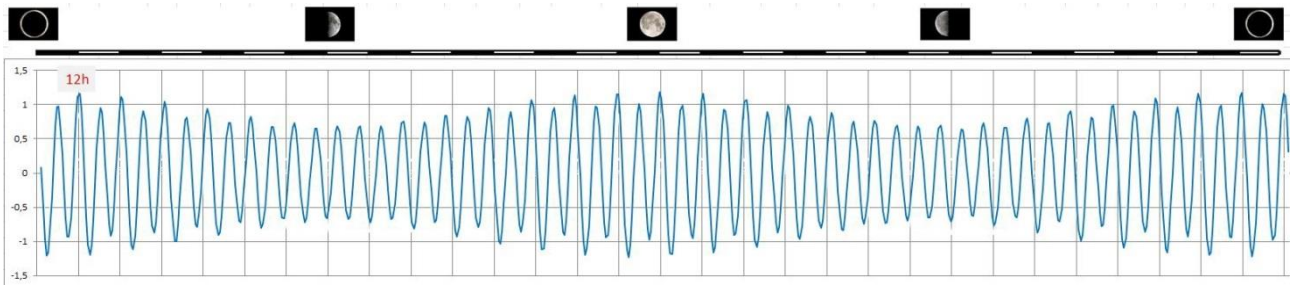


Dann fällt

- auf der Nordhalbkugel das Taghochwasser höher aus als das Nachthochwasser.
- auf der Südhalbkugel das Nachthochwasser höher aus als das Taghochwasser.

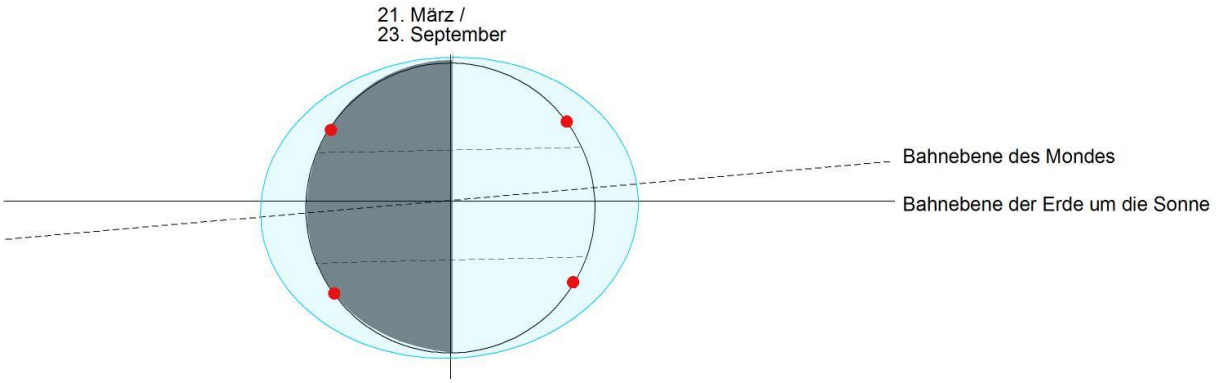
Je nachdem wie weit der Mond nördlich oder südlich der Ekliptik steht wird dieser Effekt verstärkt oder abgeschwächt.

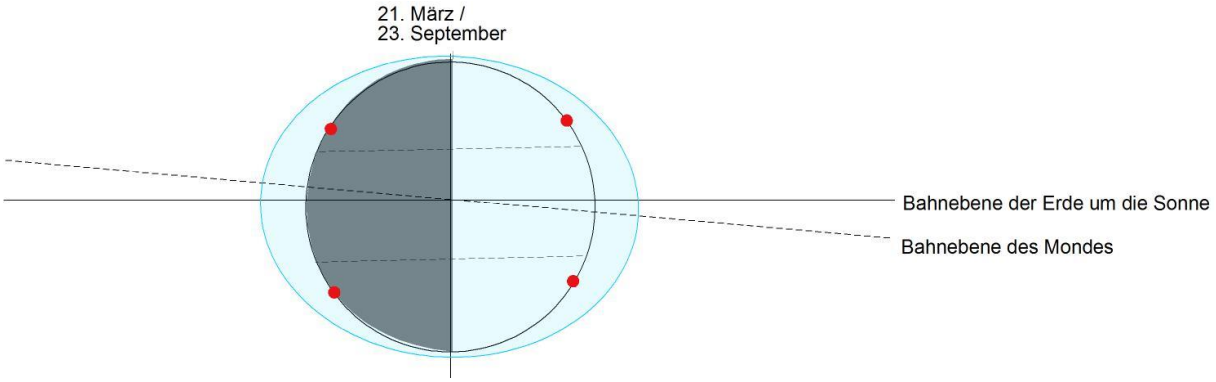
Tidenkurve im Sommer (Nordsee)



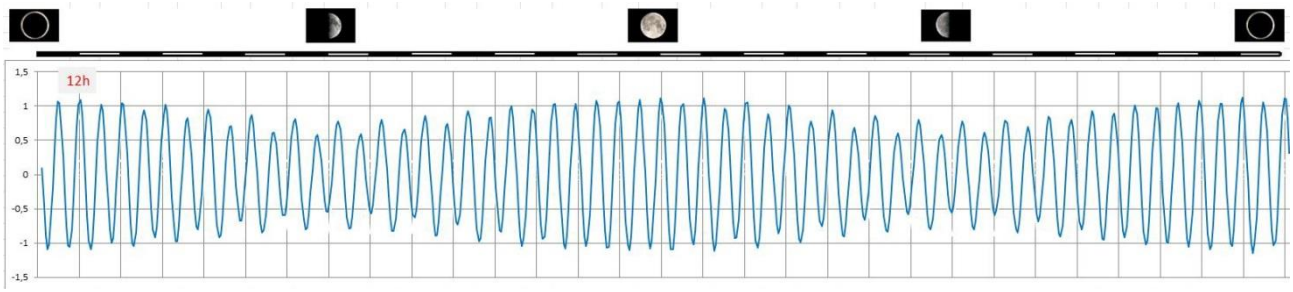
Darstellung mit unserem EXCEL-Programm

Zu den **Tag- und Nachtgleichen** wirken die Gezeitenkräfte von Mond und Sonne auf die Umgebung des Äquators. Tag- und Nachthochwasser laufen nahezu gleich hoch auf und addieren sich zu den „Äquinoktionalfluten“.



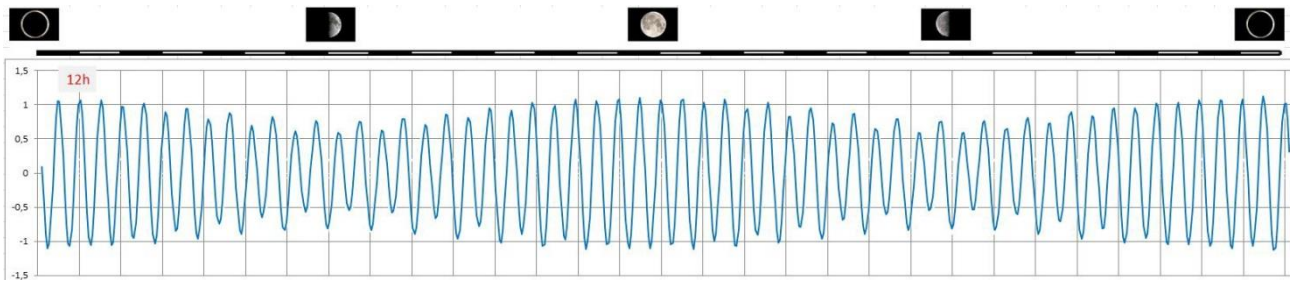


Tidenkurve im Frühjahr (Nordsee)



Darstellung mit unserem EXCEL-Programm

Tidenkurve im Herbst (Nordsee)



Darstellung mit unserem EXCEL-Programm

Tidenkurven an der Nordsee zu verschiedenen Jahreszeiten:

Im Internet kann man unter www.worldtides.net für jeden am und auf dem Meer liegenden Ort die Gezeiten für die auf einen bestimmten Termin in der Vergangenheit oder Zukunft folgenden sieben Tage abrufen.

Die folgende Übersicht für Westerland/Sylt ist eine Zusammenstellung aus dieser Webseite..

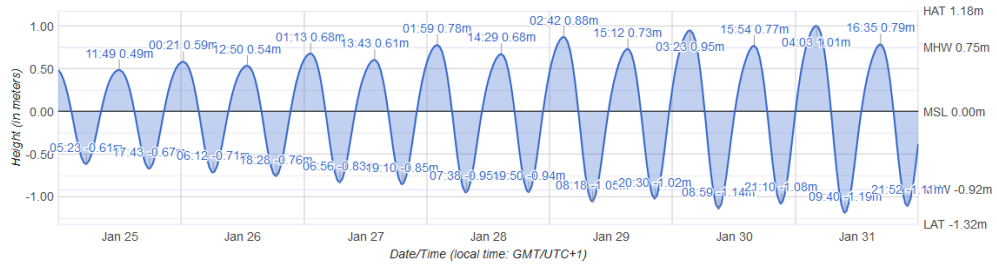
Beim Vergleich sollte deutlich werden

- dass die Höhe bzw. Tiefe der Gezeiten abhängig ist von der Mondphase
- dass die Spring- und Nipptiden etwa drei Tage nach der entsprechenden Mondphase auftreten
- dass die Zeiträume der maximalen täglichen Ungleichheiten in Bezug auf den Tidenhub von der Jahreszeit abhängen.

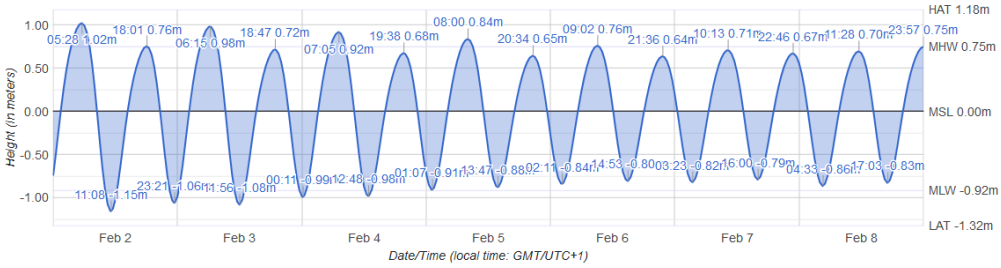
Die Gezeitenkurven können als Vorlage dafür dienen mit dem unten beschriebenen EXCEL-Programm Gezeiten zu simulieren.

Tidenkurven im **Nordwinter** (Sylt, Springverspätung 3 Tage)

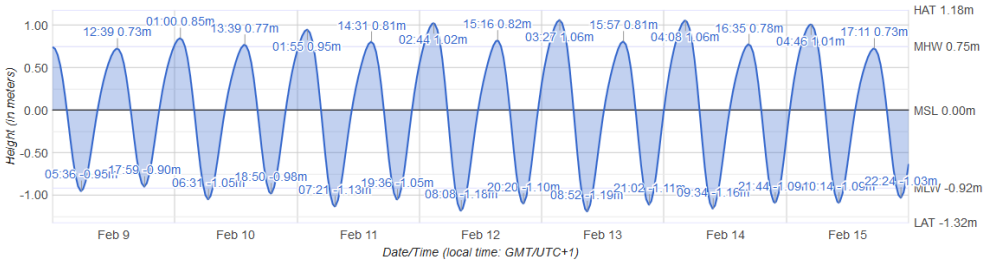
Neumond
28.01.2017



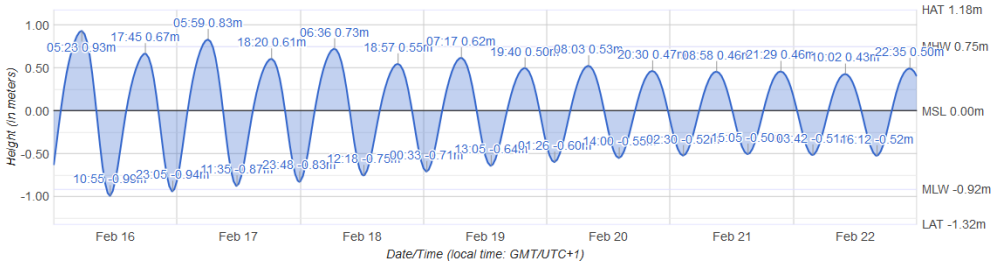
Erstes Viertel
04.02.2017



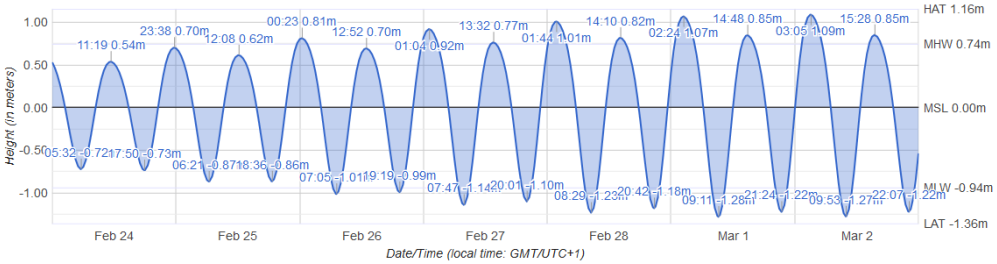
Vollmond
11.02.2017



Letztes Viertel
18.02.2017



Neumond
26.02.2017



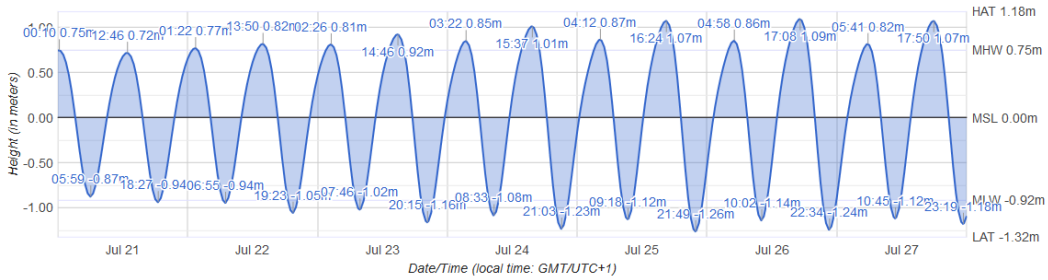
Grafiken: www.worldtide.info

Beachten Sie dass

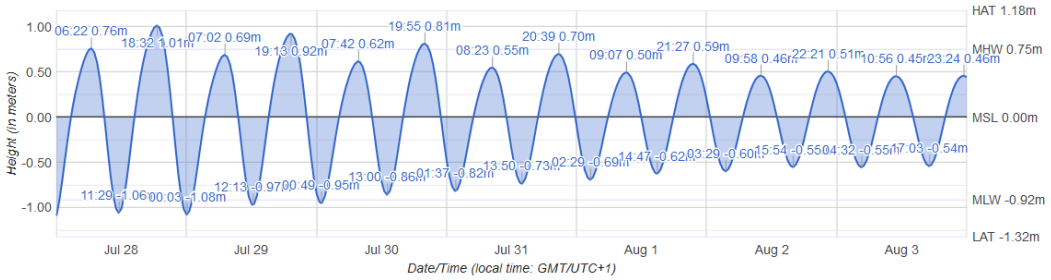
- die Spring- bzw. Nippfluten erst drei Tage nach Neu-/Vollmond bzw. Erstem und Letztem Viertel auftreten
- das Taghochwasser bei Neumond geringer aufläuft als das Nachthochwasser
- das Nachthochwasser bei Vollmond höher aufläuft als das Taghochwasser
- sich das Tag- und Nachthochwasser im Ersten und Letzten Viertel kaum unterscheiden
- der Tidenhub zur Zeit des Perigäums (Erdnähe) am 06.02. größer ist als im Apogäum (18.02.)

Tidenkurven im **Nordsommer** (Sylt, Springverspätung 3 Tage)

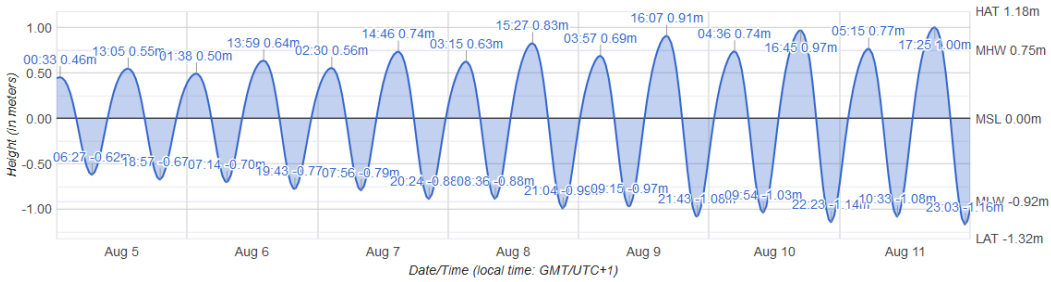
Neumond
23.07.2017



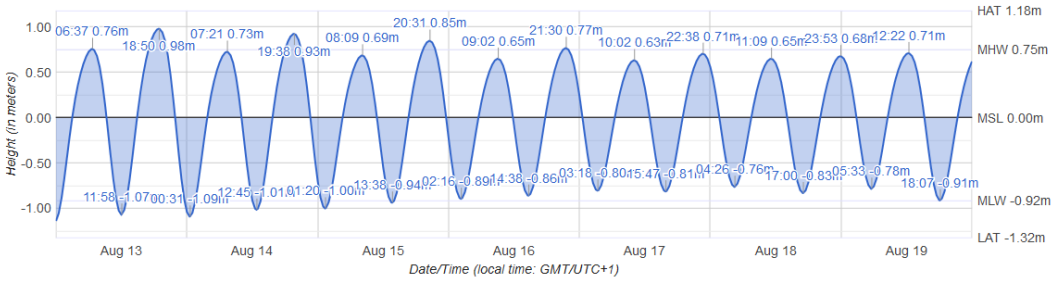
Erstes Viertel
30.07.2017



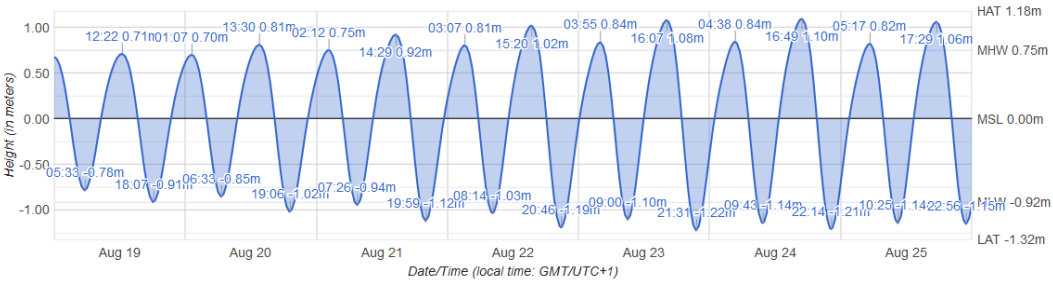
Vollmond
07.08.2017



Letztes Viertel
15.08.2017



Neumond
21.08.2017



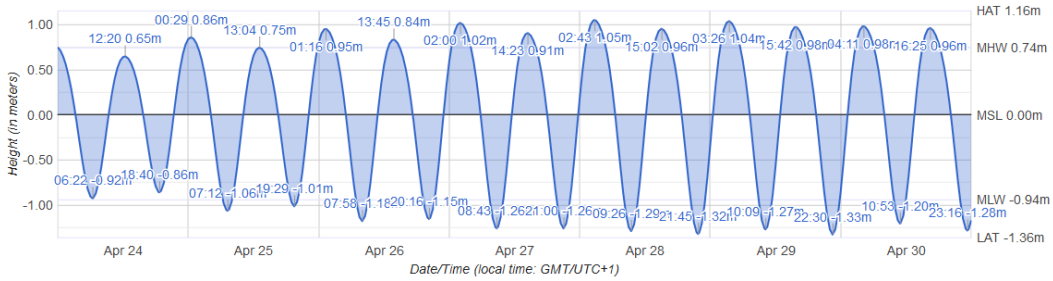
Grafiken: www.worldtide.info

Beachten Sie dass

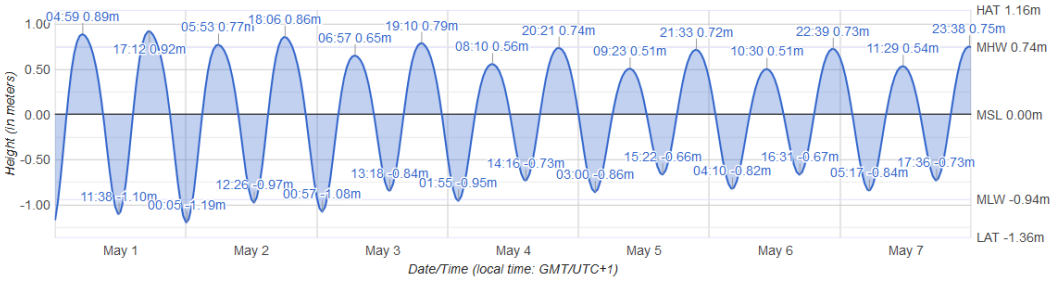
- die Spring- bzw. Nippfluten erst drei Tage nach Neu-/Vollmond bzw. Erstem und Letztem Viertel auftreten
- das Taghochwasser bei Neumond höher aufläuft als das Nachthochwasser
- das Nachthochwasser bei Vollmond niedriger aufläuft als das Taghochwasser
- sich das Tag- und Nachthochwasser im Ersten und Letzten Viertel kaum unterscheiden
- der Tidenhub zur Zeit des Apogäums (Erdferne) am 02.08. geringer ist als im Perigäum (18.08.)

Tidenkurven im **Frühjahr** (Sylt, Springverspätung 3 Tage)

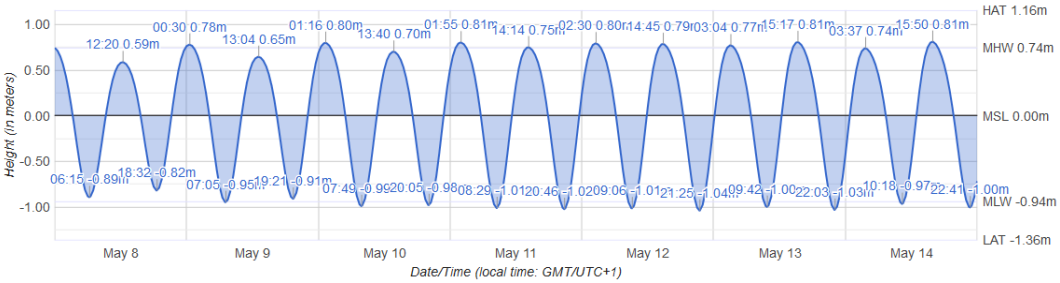
Neumond
26.04.2017



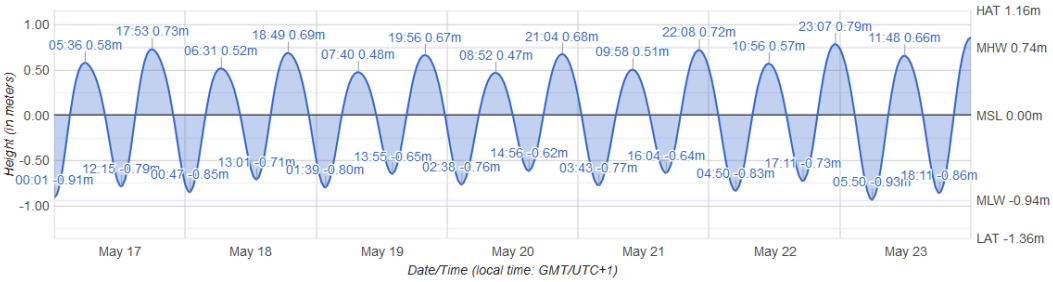
Erstes Viertel
03.05.2017



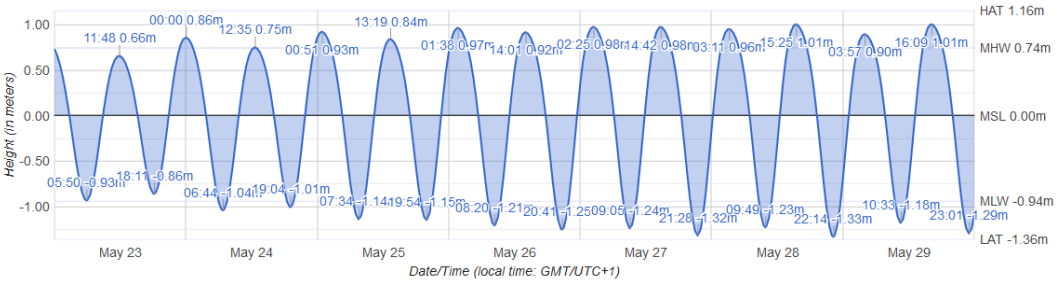
Vollmond
10.05.2017



Letztes Viertel
19.05.2017



Neumond
25.05.2017



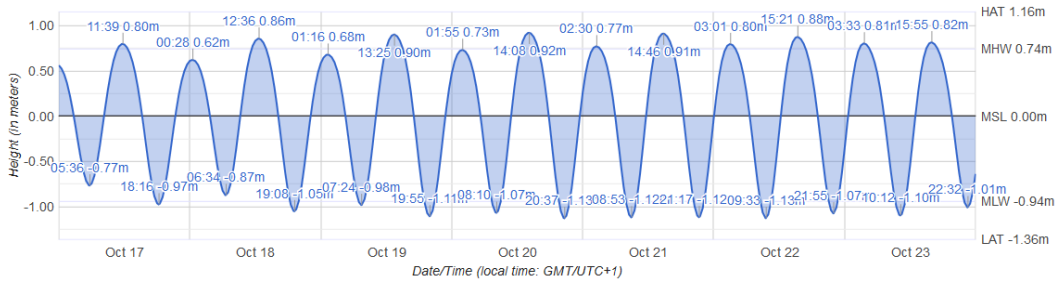
Grafiken: www.worldtide.info

Beachten Sie dass

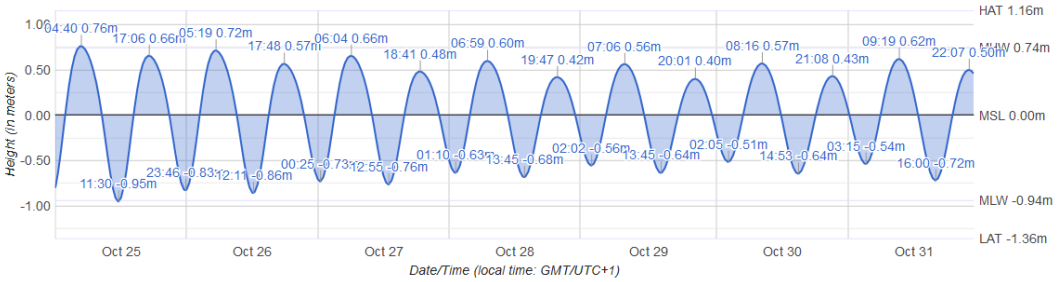
- die Spring- bzw. Nippfluten erst drei Tage nach Neu-/Vollmond bzw. Erstem und Letztem Viertel auftreten
- sich das Tag- und Nachthochwasser bei Neu- und Vollmond nur geringfügig unterscheiden
- im Ersten und Letzten Viertel das Abendhochwasser höher ausfällt als das Morgenhochwasser
- der Tidenhub zur Zeit des Perigäums (Erdnähe) am 26.05. höher ist als im Apogäum (12.05.)

Tidenkurven im **Herbst** (Sylt, Springverspätung 3 Tage)

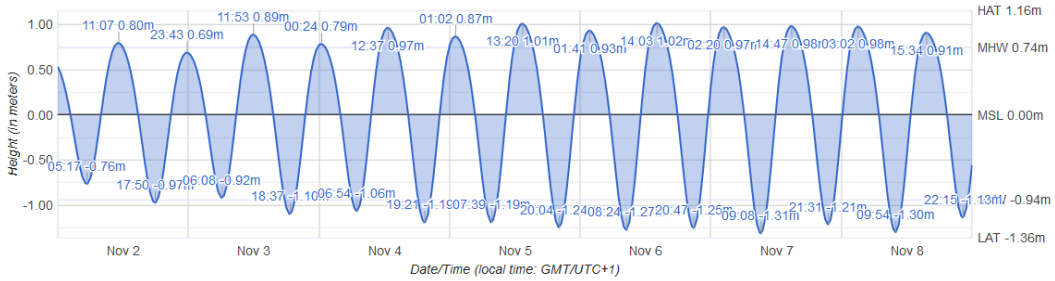
Neumond
19.10.2017



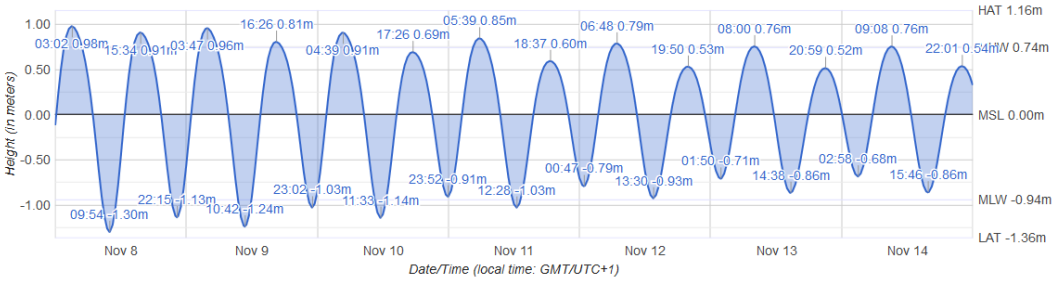
Erstes Viertel
27.10.2017



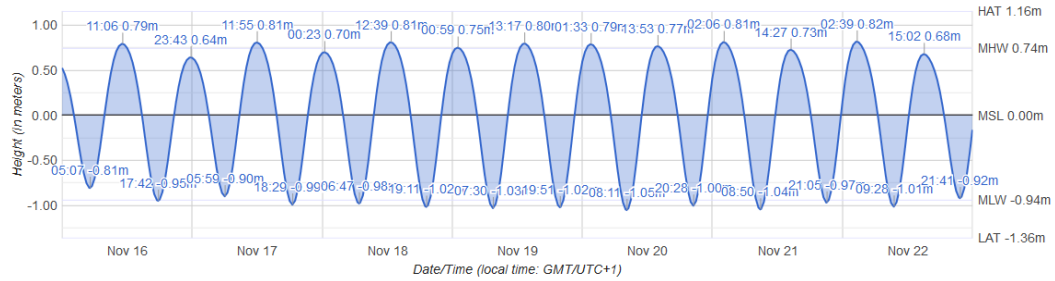
Vollmond
04.11.2017



Letztes Viertel
10.11.2017



Neumond
18.11.2017



Grafiken: www.worldtide.info

Beachten Sie dass

- die Spring- bzw. Nippfluten erst drei Tage nach Neu-/Vollmond bzw. Erstem und Letztem Viertel auftreten
- sich das Tag- und Nachthochwasser bei Neu- und Vollmond nur geringfügig unterscheiden
- im Ersten und Letzten Viertel das Morgenhochwasser höher ausfällt als das Abendhochwasser
- der Tidenhub zur Zeit des Apogäums (Erdferne) am 25.10. geringer ist als im Perigäum (06.11.)

Harmonische Überlagerung von Kräften: Partialtiden

Eine für einen bestimmten Ort langfristig erstellte Gezeitenkurve setzt sich zusammen aus vielen sich überlagernden Teilschwingungen deren Frequenz, Amplitude und Phasenlage nicht unmittelbar zu erkennen ist sondern durch ein kompliziertes mathematisches Verfahren (Fourier-Analyse) bestimmt werden muss.

Eine Partialtide ist eine Sinusfunktion, die über Frequenz (f), Amplitude (A) und Phase (φ) beschrieben werden kann.

Die Partialtiden sind das Ergebnis der regelmäßigen und daher vorhersagbaren Bewegung und relativen Positionen der die Gezeiten verursachenden Himmelskörper (Erde, Mond, Sonne). Ihre Massen und Entfernungen sind bekannt und damit auch die Kräfte die sie ausüben.

Die Frequenzen der einzelnen Partialtiden sind Linearkombinationen aus den fünf folgenden astronomischen Konstanten:
Alle Zeiten stehen in einem bestimmten Verhältnis zum mittleren Sonnentag ("Mean Solar Day", 24 h)

- **Mondtag (τ)**
  (Mond, Meridiandurchgang – Meridiandurchgang) = 24 h 49 min (24,84 h)
  1.035050 MSD
  360° in 24,84 h
  Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ = 360°/24,84h = 14,49°/h

- **Tropischer Monat (*s*)**
  (Mond, Frühlingspunkt – Frühlingspunkt) = 27,32158 Tage
  27,321582 MSD
  655,71792 h
  360° in 655,71792 h
  Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ = 360°/655,71792 = 0,549016565°/h

- **Tropisches Jahr (*h*)**
  (Erde: Frühlingspunkt – Frühlingspunkt) = 365,24219052 Tage
  365,2422 MSD
  8765,812572 h
  360° in 8765,812572 h
  Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ = 360°/8765,812572 h = 0,04106864°/h

- **Rotation des Perigäums (*p*)**
  (geringste Entfernung Erde – Mond) = 8,85 Jahre
  3232,´3934 MSD
  77576,976 h
  360° in 77576,976 h
  Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ = 360°/77576,976 h = 0,004640552°/h

- **Rotation des aufsteigenden Knotens der Mondbahn (*N*)**
  (Schnittpunkt Mondbahn - Ekliptik) = 18,61 Jahre
  163130,7936 h
  360° in 163130,7936 h
  Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ = 360°/163130,7936 h = 0,002206818°/h

Als Winkelgeschwindigkeit pro Stunde folgt daraus (Genaue Werte):

Mittlerer Mondtag	τ	14,492053523984348 °/h
Tropischer Monat	s	0,5490165247385749 °/h
Tropisches Jahr	h	0,04106863883746183 °/h
Rotation des Perigäums (geringste Entfernung Erde-Mond)	p	0,004640524162425066 °/h
Rotation des aufsteigenden Mondbahnknotens	N	0,002206804881110254 °/h

Die Partialtiden mit den größten Amplituden:

S2 (Halbtägige Haupt-Sonnentide):

Zwischen zwei Meridiandurchgängen der Sonne vergeht im Mittel 24 h 00 min 00s (24,00 h). Das Maximum ihres gezeitenwirksamen Signals tritt zweimal auf, einmal auf der dem Mond zugewandten und einmal der vom Mond abgewandten Seite der Erde und damit alle 12 h 00 min 00s.
Die Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ des Signals S2 beträgt daher 360°/12,00 = 30,00°/h
S2 ist nach M2 die Tide mit der zweitgrößten Amplitude.

M2 (Halbtägige Haupt-Mondtide):

Zwischen zwei Meridiandurchgängen des Mondes vergeht im Mittel 24 h 50 min 28s (24,84 h) mit einer Winkelgeschwindigkeit von τ = 360°/24,84h = 14,49°/h. Das Maximum seines gezeitenwirksamen Signals tritt zweimal auf, einmal auf der dem Mond zugewandten und einmal der vom Mond abgewandten Seite der Erde und damit alle 12 h 25 min 14s.
Die Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ des Signals M2 beträgt daher 2*τ = 360°/12,42 = 28,98°/h

K1 (Ganztägige Haupt-Deklinationstide):

Zwischen zwei Durchgängen des Mondes durch den Frühlingspunkt vergehen im Mittel 27,32158 Tage. (=655,71792 h). Das ist ein Tropischer Monat. Nach dieser Zeit hat der Mond auf seiner Bahn um die Erde einen Kreis von 360° vollzogen und steht wieder vor demselben Punkt des praktisch unendlich fernen Sternenhintergrundes. In Bezug auf den Frühlingspunkt bewegt sich der Mond um s = 360°/655,71792h = 0,549016565°/h.
Die K1-Tide besteht aus den Komponenten $\tau + s \approx$ 14,492°/h + 0,549°/h $\approx$ 15,041°/h.
Ein 360° Umlauf dauert danach 360° : 15,041°/h = 23,934h = 23 h 56 min 04 s
Das ist die Zeit die vergeht bis ein Stern wieder an der gleichen Stelle am Himmel steht oder anders ausgedrückt, die Zeitspanne zwischen zwei Meridiandurchgängen eines Sterns.

O1 (Ganztägige Haupt-Mondtide):

Die O1-Tide setzt sich zusammen aus den gleichen Winkelgeschwindigkeiten wie bei K1 die hier aber subtrahiert werden: $\tau - s \approx$ 14,492°/h - 0,549°/h $\approx$ 13,94°/h.

Ein 360° Umlauf des O2-Signals dauert 360° : 13,94°/h $\approx$ 25,819h $\approx$ 25 h 49 min 08 s

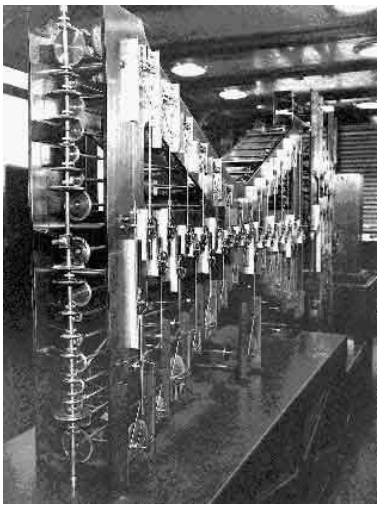
P1 (Ganztägige Haupt-Sonnentide) $s + \tau - 2*h$

Die P1-Tide ist das auf die Sonne bezogene Pendant zur Mondtide O1. Mit P1 fließt die Bewegung der Erde um die Sonne als Komponente ein. Analog zum Tropischen Monat ist ein Tropisches Jahr das Zeitintervall zwischen zwei Durchgängen der Erde durch den Frühlingspunkt. Dieses Intervall entspricht der modernen Definition eines (astronomischen) Jahres mit der Länge 365,24 Tage oder 8765,81 h.
Die Winkelgeschwindigkeit $\Delta\varphi$ von h ist 360°/8765,81h ≈ 0,0411°/h
P1 selbst hat eine Frequenz von $s + \tau - 2*h$ = 0,549°/h + 14,492°/h - 2*0,0411°/h ≈ 14,96°/h und eine Periode von 360° : 14,96°/h = 24 h 03 min 54 s.

N2 (Halbtägige Große Elliptische Tide zu M2):

Sie berücksichtigt die schwankende Entfernung des sich auf einer elliptische Bahn um die Erde bewegenden Mondes. Der Punkt der geringsten Distanz Erde - Mond, das Perigäum (Erdnähe) bewegt sich in 8,85 Jahren oder 77576,976 h um die Erde herum.
Die Winkelgeschwindigkeit p ist damit 360°/77576,976 h ≈ 0,0046°/h.
Die N2-Tide setzt sich aus den Komponenten $p - s + 2*\tau$ zusammen:
0,0046°/h - 0,549°/h + 2*14,49 = 28,44°/h
Die Periode beträgt damit 360° : 28,44°/h = 12 h 39 min 29 s

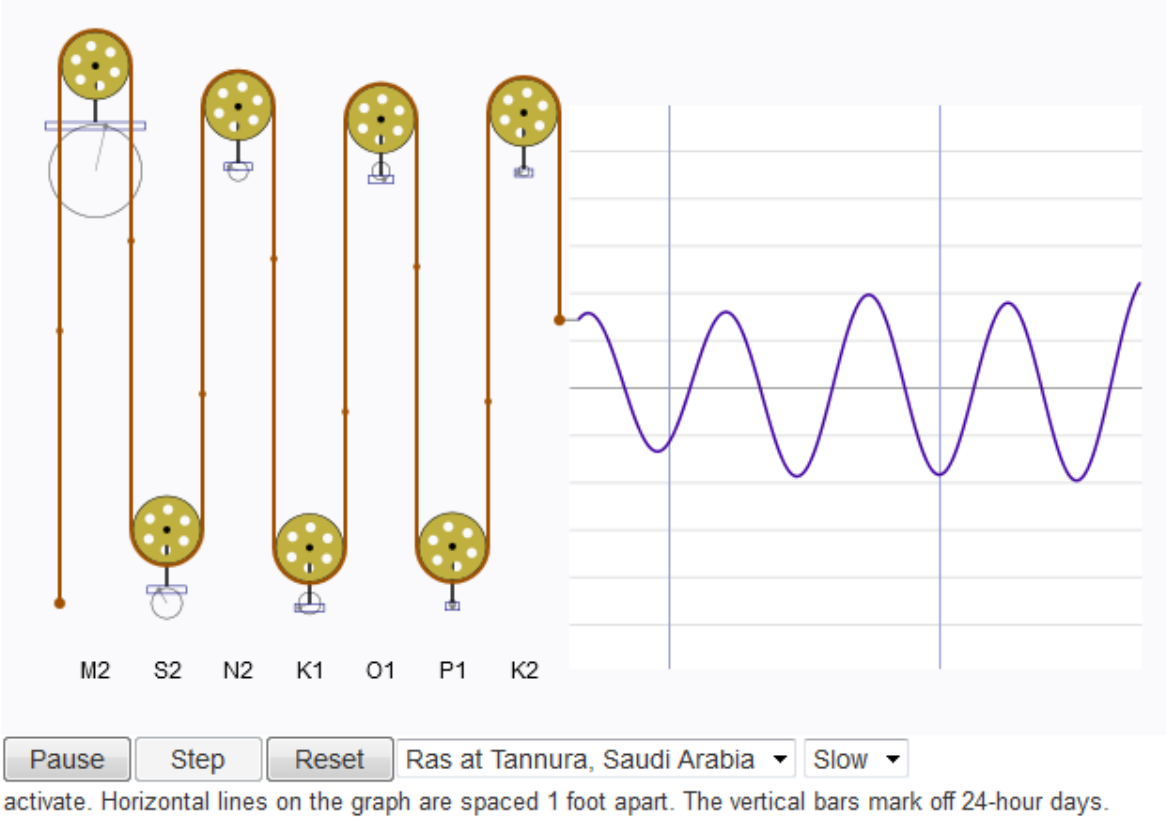
	Name	Komponenten (siehe oben)	Periode 360° / (°/h)	(°/h) 360° / Periode	Amplitude	% M2
M2	halbtägige Hauptmondtide	$2*\tau$	12h 25min 14s	28,9841042	0,4543	100,0
S2	halbtägige Hauptsonnentide	$-2*h + 2*s + 2*\tau$	12h 00min 00s	30,0000000	0,2114	46,5
N2	große elliptische Tide zu M2	$p - s + 2*\tau$	12h 39min 29s	28,4397295	0,0880	19,3
K2	halbtägige Hauptdeklinationstide	$2*s + 2*\tau$	11h 58min 01s	30,0821373	0,0577	12,7
L2	Kleine elliptische Tide zu M2	$p + s + 2*\tau$	12h 11min 30s	29,528	0,0136	3,0
T2	Elliptische Sonnentide	$-3*h + N + 2*s + 2*\tau$	12h 59min 00s	29,9589333	0,0124	2.7
O1	eintägige Hauptmondtide	$-s + \tau$	25h 49min 08s	13,9430356	0,1886	41,5
K1	eintägige Hauptdeklinationstide	$s + \tau$	23h 56min 02s	15,0410686	0,2655	58,4
P1	eintägige Hauptsonnentide	$-2*h + s + \tau$	24h 03min 54s	14,9589314	0,0878	19,3
Q1	große elliptische Tide zu O_1	$p - 2*s + \tau$	26h 52min 05s	13,3986609	0,0365	8,0



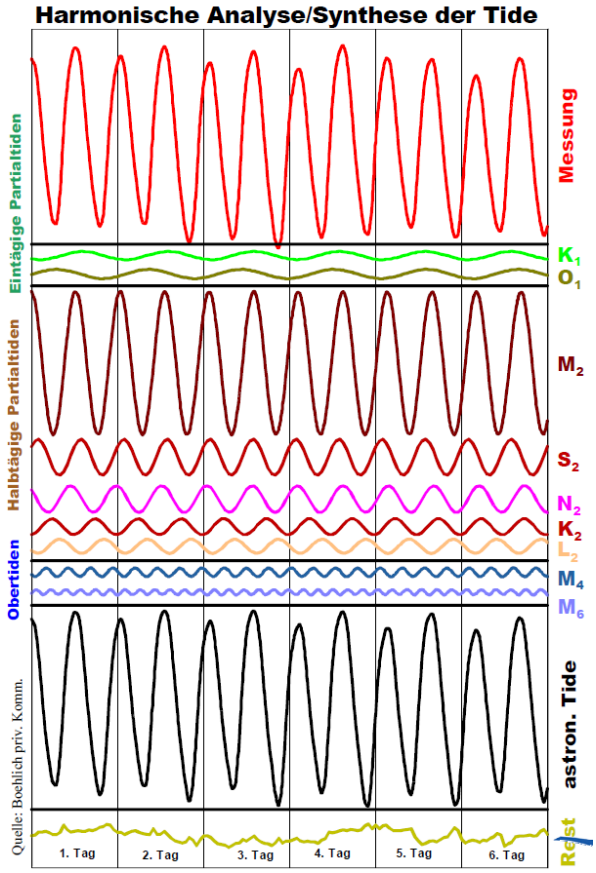
Maschine zur Vorhersage von Gezeiten der US-amerikanischen Wetterbehörde NOAA, in Gebrauch zwischen 1912 und 1966. Sie rechnete mit 37 Partialtiden. Der Erfinder dieser Maschine war kein geringerer als Lord Kelvin.

Fotos: www.ams.org

Auf der Webseite der "American Mathematical Society" (www.ams.org) findet man eine JAVA-Simulation der mechanischen Gezeitenmaschinen. Die Animation zeigt das System aus unterschiedlich großen und damit unterschiedlich schnell rotierenden Rädern die über Pleuel mit Riemenscheiben (pulleys) verbundenen sind. Jedes Rad bzw. jede Riemenscheibe folgt dem Rhythmus einer Partialtide. Die Riemenscheiben laufen vor- und rückwärts und sorgten dafür, dass sich ein an einem Faden hängende Gewicht nach oben und unten bewegt und eine Tidenkurve aufzeichnet.



Grafik: www.ams.org



Quelle: Bundesanstalt für Wasserbau, Vortrag Isert/Plüß, KFKI-Projekt Charakterisierung einer Tidekurve, Hamburg 2002
www.kfki.de/files/kfki-seminare/0/2002_TIDEKURVE_Isert_P.pdf

Die obere rote Kurve zeigt die gemessenen Pegelwerte für einen Zeitraum von 6 Tagen.

Die darunter folgenden Kurven sind die Teilschwingungen (Partialtiden) die durch Überlagerung die Astronomische Tide (schwarze Kurve unten) ergeben.

Beachten Sie, dass die Kurven unterschiedliche **Frequenzen** haben:

Es gibt langwellige (ganztägige) Partialtiden (K1, O1) mit nur **einer Periode pro Tag**.

Die kurzwelligen (halbtägigen) Partialtiden (M2, S2, N2 usw.) durchlaufen **zwei Perioden pro Tag**.

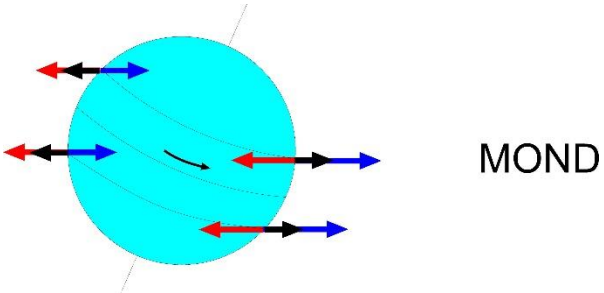
Jede Partialtide hat eine ortstypische **Amplitude**. Die Amplitude gibt den Anteil der Partialtide an der gesamten Tidekurve wieder. Je größer die Amplitude, desto größer der Anteil der Partialtide am Gesamtverlauf der örtlichen Gezeit.

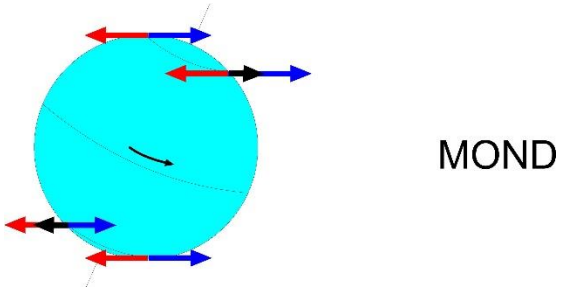
Die **Phasen** der Partialtiden sind gegeneinander verschoben. Das bedeutet, dass jede Partialtide ihr ebenfalls ortstypisches zeitliches Maximum hat.

Halbtägige und ganztägige Partialtiden

Es gibt Partialtiden mit halbtägiger (semidiurnaler) und solche mit ganztägiger (diurnaler) Periode.

Das Verhältnis der Amplituden halb- und ganztägiger Partialtiden ist ortsabhängig.





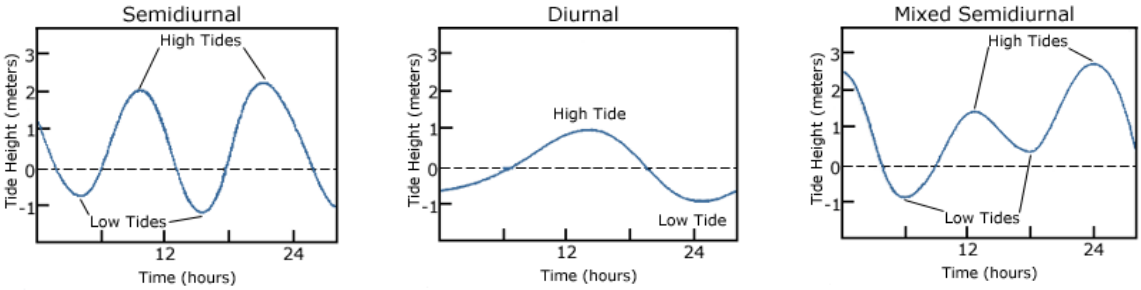
Halbtägige Gezeiten (semidiurnal)

Die Erde rotiert in 24 Stunden unter zwei Flutbergen hindurch.
Auf der mondzugewandten Seite ist die Anziehung durch den Mond etwas größer als die Fliehkraft.
Auf der mondabgewandten Seite ist die Fliehkraft um den gleichen Betrag größer als die Anziehung.
Die Unterschiede sind gleich groß die beiden Flutberge etwa gleich hoch.

Ganztägige Gezeiten (diurnal)

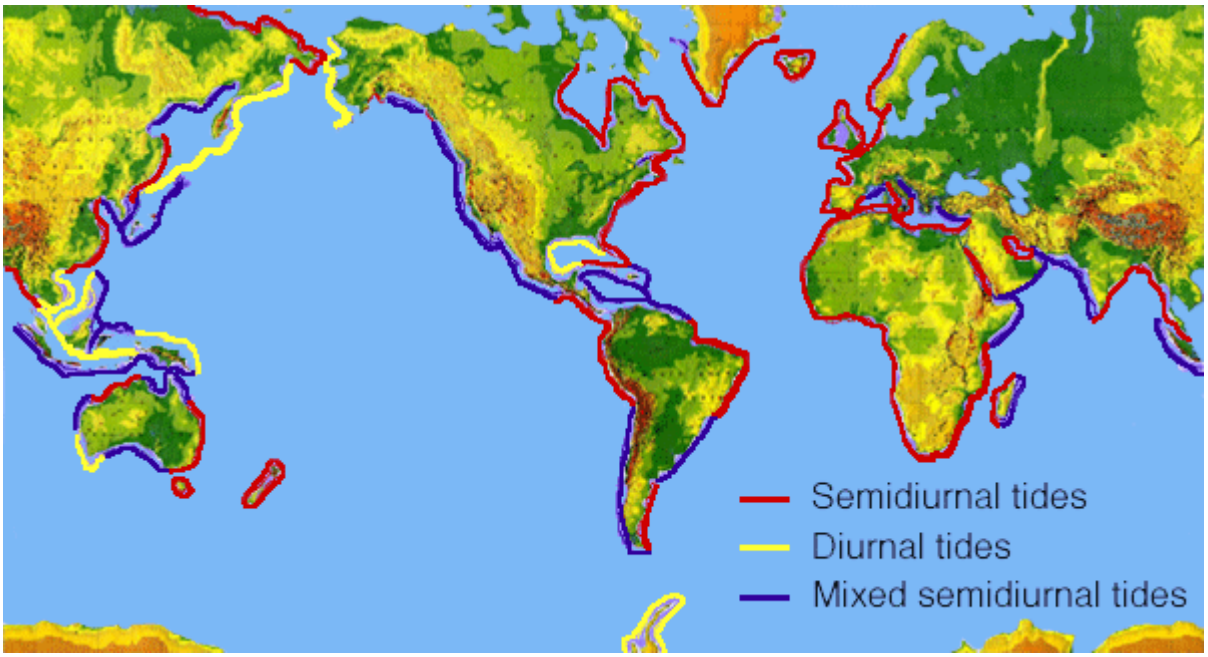
Die Erde rotiert in 24 Stunden unter einem Flutberg hindurch.
Auf der mondzugewandten Seite ist die Anziehung durch den Mond etwas größer als die Fliehkraft.
Auf der mondabgewandten Seite ist die Fliehkraft gleich groß wie Anziehungskraft. Beide heben sich auf.

Bei gemischten Gezeitenformen überlagern sich semidiurnale und diurnale Partialtiden. Ein typisches Kennzeichen dafür ist, dass das mondzugewandte Hoch- und Niedrigwasser höher bzw. tiefer ausfällt als das mondabgewandte.



Quelle: National Ocean Service, NOAA http://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/media/tide07d.gif

Globale Verteilung semidiurnaler, diurnaler und gemischter Tiden



Quelle: National Ocean Service, NOAA http://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/media/tide07d.gif

Auf einer, nur von einem Ozean bedeckten Erde sollten semidiurnale Gezeiten in tropischen und mittleren, diurnale in hohen Breiten vorherrschen. Tatsächlich ist unser Planet durch Kontinente und flache Teilmeere vielfältig gegliedert. Das führt zu vielfachen Abweichungen von den „Gleichgewichts-Gezeiten“ einer ausschließlich von Wasser bedeckten Ideal-Erde.
So bilden sich in Teilbecken der Ozeane Resonanzen aus die nur noch schwer mit den ursprünglichen astronomischen Rhythmen in Übereinstimmung zu bringen sind.

Jedem Küstenort der Erde lässt sich ein bestimmter Gezeitentyp zuweisen. Maßgeblich dabei ist das Verhältnis zwischen der Summe der wichtigsten diurnalen Partialtiden K1 und O1 und der Summe der semidiurnalen Partialtiden M2 und S2:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

F > 3	Ganztägige (diurnale) Gezeit	1 HW, 1 NW pro Tag
F < 3 – F > 0,25	Gemischte Gezeit	2 HW, 2 NW pro Tag (unterschiedliche Stärke)
F < 0,25	Halbtägige (semidiurnale) Gezeit	2 HW, 2 NW pro Tag (ähnliche Stärke)

Die Anteile der Partialtiden am gesamten Schwingungsverlauf müssen zuvor analysiert werden. Das ist nur mit Hilfe des komplizierten, diesen Rahmen sprengenden mathematischen Verfahrens der Fourier-Analyse und bestimmter Filtermethoden möglich.

Gemessene Amplituden der Partialtiden M2, S2, K1 und O1 in der Deutschen Bucht

	M2	S2	K1	O1
Helgoland	1,12	0,26	0,08	0,09
Borkum	1,10	0,26	0,09	0,09
Alte Weser	1,34	0,31	0,09	0,09
Bake A (Elbmündung)	1,39	0,32	0,09	0,09
Wyk (Föhr)	1,25	0,27	0,08	0,09
List-Hafen (Sylt)	0,81	0,18	0,07	0,08

Quelle: Gönert, G. et al., Charakterisierung der Tidekurve, Die Küste 68 (2004), Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg

http://vzb.baw.de/die-kueste/0/k068103.pdf

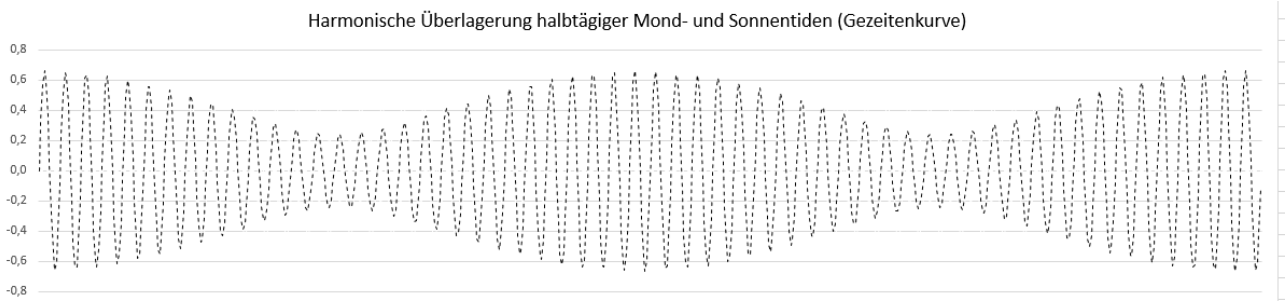
Das Form-Ratio für Helgoland ist

$$F = \frac{0{,}09 + 0{,}08}{1{,}12 + 0{,}26} = \frac{0{,}17}{1{,}38} = 0{,}123$$

List (Sylt)

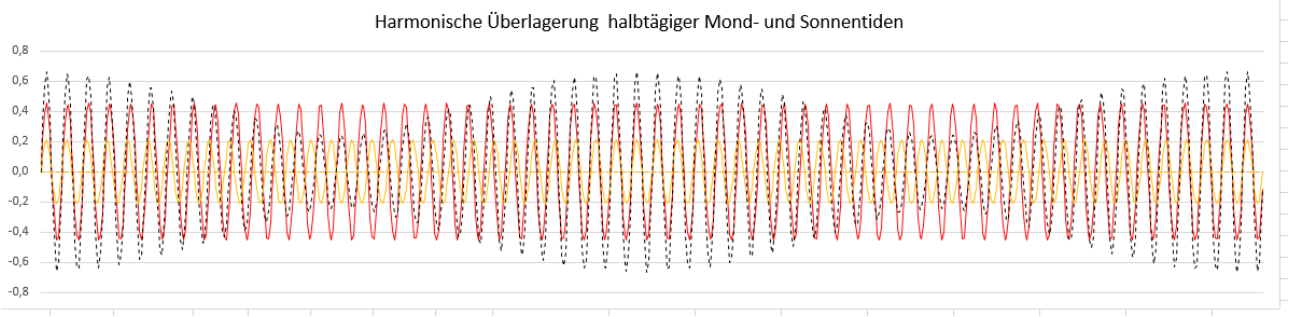
$$F = \frac{0{,}08 + 0{,}07}{0{,}81 + 0{,}18} = \frac{0{,}15}{0{,}99} = 0{,}152$$

Beide F-Werte weisen auf eine eindeutige semidiurnale Gezeitenform hin.



Auf den ersten Blick scheint diese Gezeitenkurve eine Sinuskurve mit einer regelmäßig auf- und abschwingender Amplitude zu sein.

Dahinter verbergen sich zwei Schwingungen die sich zu der oben gezeigten Gezeitenkurve überlagern.

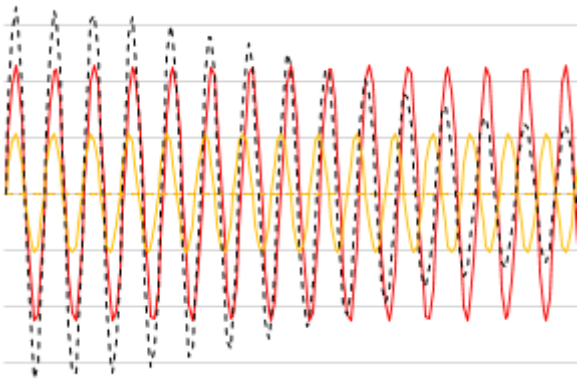


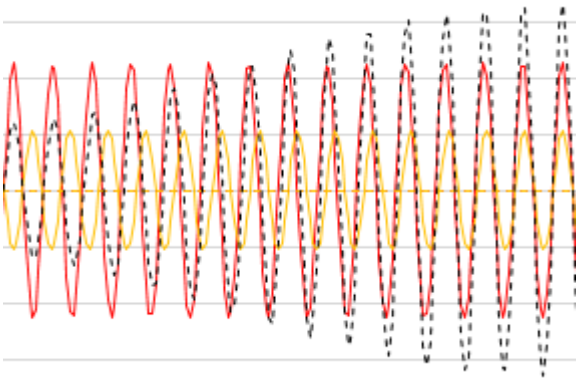
Hier ist es die Sonne (gelbe Kurve) und der sich täglich um 50 Minuten verspätende Mond (rote Kurve) deren Perioden und Amplituden zur „Gezeitenkurve“ summieren.

Liegen die Maxima und Minima der Sonnen- und Mondschwingungen übereinander addieren sich die Kräfte zur Springflut. Das ist bei Neu- und Vollmond der Fall. Sind ihre Phasen um 90° verschoben – bei zu- bzw. abnehmendem Halbmond – wirken die Gezeitenkräfte von Mond und Sonne in verschiedene Richtungen und es reicht es nur zur Nippflut.

Zählt man die einzelnen Wellenberge und –täler aus wird man erkennen, dass im gezeigten Fall täglich zweimal Flut und zweimal Ebbe auftritt. Das Hochwasser liegt zwischen 75 cm und 25 cm über und das Niedrigwasser zwischen 75 cm und 25 cm unter dem mittleren Meeresspiegel. Der Tidenhub läge damit zwischen 1,5 m bei Springtide und 0,5 m bei Nipptide.

Bei genauem Hinsehen lässt sich erkennen, dass die Hoch- bzw. Niedrigwasserzeitpunkte und die Meridiandurchgänge des Mondes nur bei Neu-, Vollmond und dem zu oder abnehmendem Halbmond übereinstimmen. Dazwischen geht das Hoch- und Niedrigwasser in Bezug auf den Mond vor oder nach („priming“ und „lagging“).





Priming:

Beginnend mit dem Neumond bei dem Sonne und Mond in Phase sind verschiebt sich der Meridiandurchgang des Mondes nach hinten.

Der Mond "folgt" der Sonne. Die Überlagerung beider

Lagging:

Beginnend mit dem Ersten Viertel zeigt die Überlagerung beider Gezeitenkräfte, dass die Flut nach dem Durchgang der Sonne und nach dem Durchgang des Mondes eintritt.

Gezeitenkräfte zeigt, dass die Flut nach dem Durchgang der Sonne und vor dem Durchgang des Mondes eintritt.

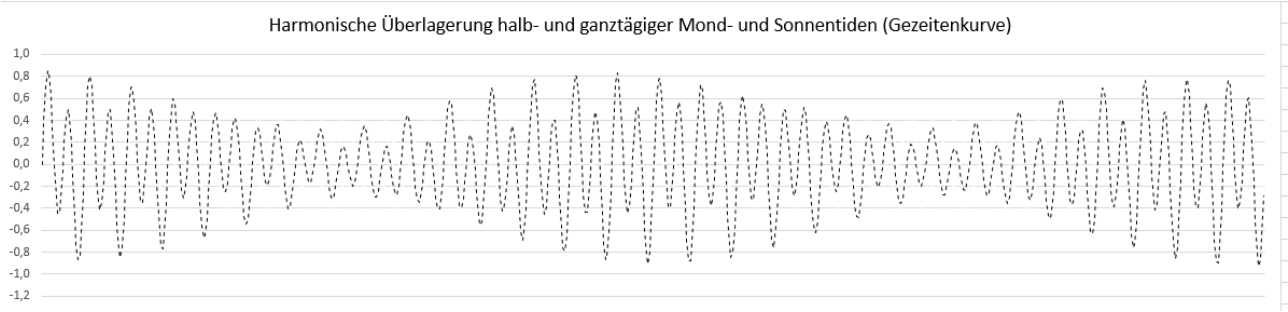
Der Mond geht nach der Flut durch den Meridian.

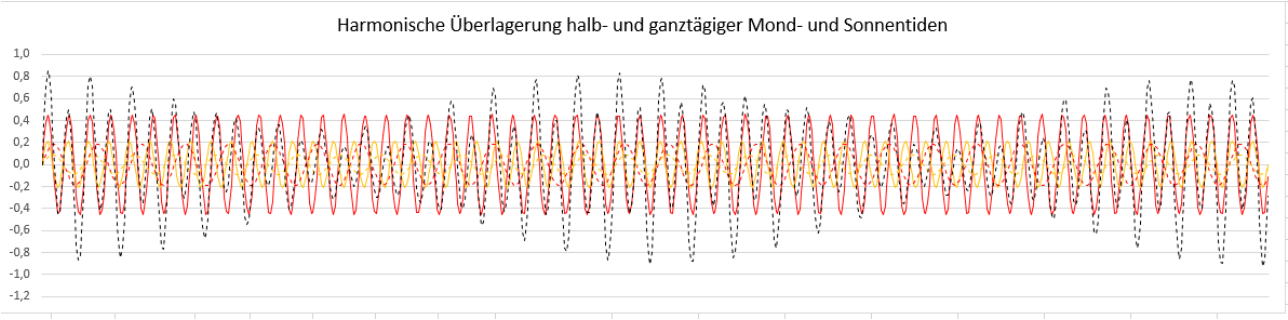
Der Mond geht vor der Flut durch den Meridian.

Mit Erreichen der Vollmondphase kommt es wieder zum "Priming", ab Letztem Viertel zum "Lagging".

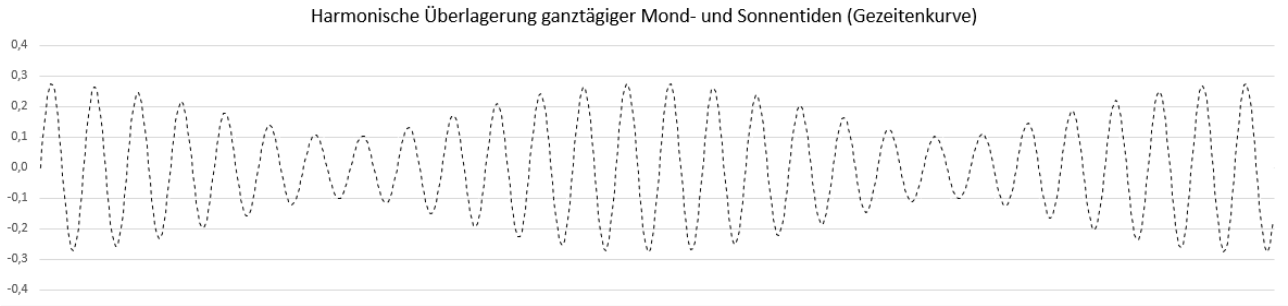
Diese Gezeitenform herrscht zum Beispiel in der Nordsee vor. Man nennt sie halbtägig oder "semidiurnal" weil ihre Höhen mehr oder weniger gleich ausfallen.

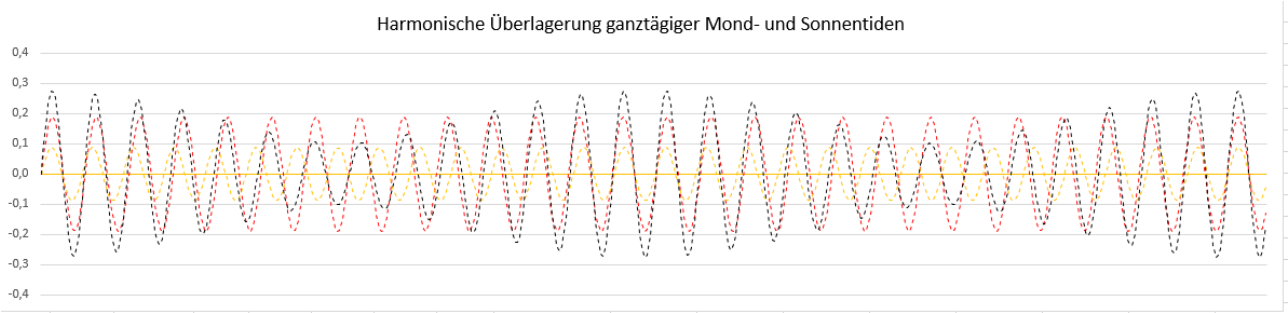
Erheblich komplizierter erscheinen Gezeitenkurven wenn sich mehrere starke Teilschwingungen überlagern wie halb- und ganztägige Mond- und Sonnentiden. Im gezeigten Beispiel fallen die Tag- und Nachthoch- und niedrigwasserstände unterschiedlich hoch aus.





Ganztägige Mond- und Sonnentiden





"Gezeitensimulation" mit unserem EXCEL-Programm

Um die wichtigsten Partialtiden und ihre Wirkung auf die Kurvenform der Gezeiten kennen zu lernen haben wir ein Excel-Programm geschrieben mit dem man "Ebbe und Flut" spielen kann.

Das Programm soll und kann keine Gezeitentabellen ersetzen. Es dient nur dem Zweck, sich mit den Gezeiten erzeugenden Kräften und den durch Mond und Sonne hervorgerufen astronomischen Rhythmen auf eine spielerische und experimentelle Weise auseinander zu setzen. Ziel ist zu untersuchen, wie sich die Zeiten und Höhen der Gezeiten verändern wenn man die Frequenzen und Amplituden verändert, zusätzliche Partialtiden hinzufügt und ihre Phasen verändert.

Das Programm ist für die Nordhalbkugel der Erde geschrieben. Die Grundeinstellung gibt die Wintersonnenwende zeitgleich mit dem Perigäum bei Neumond wieder.

Suchen Sie, z.B. in der Tabelle im Anhang, den nächsten Neumondtermin und das darauf folgende Perigäum heraus. Die Zeitachse des Diagramms umfasst 30 Tage und damit geringfügig mehr als die Periode zwischen Neumond und Neumond. Die Tage sind, beginnend jeweils um Mitternacht, von 0 bis 30 fortlaufend nummeriert.

Die Partialtiden sind Sinuskurven nach der Formel

$$A_{(t)} = A * \ sin\,(\omega * t)$$

Mit der Amplitude A in Metern, der Kreisfrequenz ω und der verstrichenen Zeit (hier Tage nach Neumond)

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

T ist die Zeit in Tagen (*d*). Daraus folgt

$$A_{(t)} = A * \ sin\left(\frac{2\pi}{d} * t\right)$$

Das Auf und Ab der Gezeiten folgt aus der Überlagerung von Partialtiden

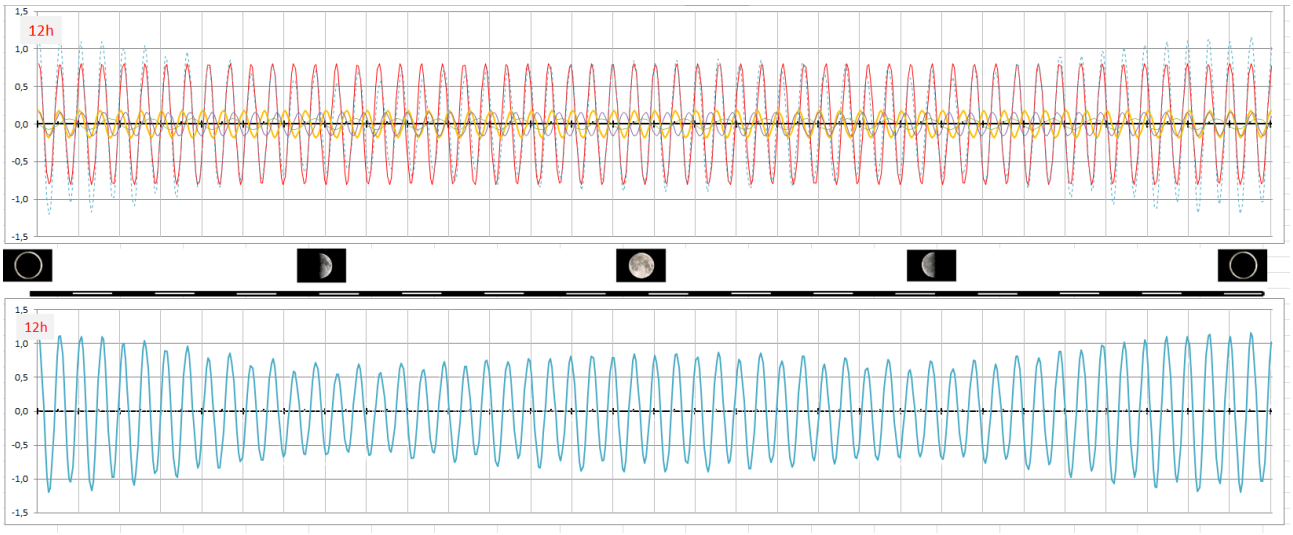
$$A_{(t)} = A_1 * \ sin\left(\frac{2\pi}{d_1} * t_1\right) + A_2 * \ sin\left(\frac{2\pi}{d_2} * t_2\right) + A_3 * \ sin\left(\frac{2\pi}{d_3} * t_3\right) + A_4 * \ sin\left(\frac{2\pi}{d_4} * t_4\right) + \cdots$$

t_1, t_2, t_3, t_4 usw. sind in der Grundeinstellung gleich (Wintersolstitium = Neumond = Perigäum). Da diese drei Ereignisse in den meisten Fällen nicht übereinstimmen sind sie um die entsprechende Anzahl von Tagen verschoben. Das gilt auch für die Springverspätung (Nordsee 3 Tage).

Alle Sinuskurven sind in der Grundeinstellung so verschoben dass sie im Nullpunkt der Zeitachse mit einem Maximum beginnen.

Aus den Karten im Anhang geht hervor, dass jede Partialtide ihre eigene ortstypische **Phasenlage** hat. Die Teilschwingungen bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten um die amphidromischen Punkte. Je nach den Amplituden der Partialtiden wird die resultierende Gezeitenwelle mehr oder weniger stark durch diese Phasenlagen modelliert. Im Falle der in der Nordsee dominierenden M2-Tide wirkt sich das als Hochwasserintervall aus. Die Phasenlagen der Partialtiden haben wir, weil zu komplex, in unserem Programm nicht berücksichtigt. Das führt natürlich zu, hier aber vertretbaren, Ungenauigkeiten.

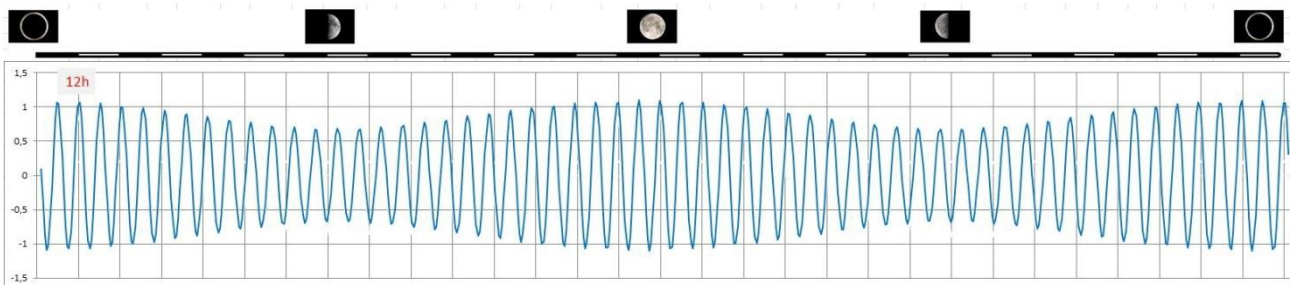
Wir haben im Internet nur wenig Vergleichbares gefunden. Sollten sie Fehler finden und/oder das Programm verbessern wollen fragen Sie bei uns nach einer ungeschützten Version des Programms.



In der oberen Zeile erscheinen die gewünschten Partialtiden als farbige übereinander gelegte Sinuskurven. Aus der Überlagerung der Teilschwingungen entsteht eine dünn gestrichelte Hüllkurve.
Die aus den Partialtiden resultierende Hüllkurve (= Gezeitenkurve) ist in der unteren Zeile allein wiedergegeben.
Ihre Perioden der Teilschwingungen richten sich nach den berechneten astronomischen Rhythmen (Tabellenwerte oben!). Die jeweiligen Amplituden sind von Ort zu Ort unterschiedlich groß.
Die Amplituden für den freien Ozean entnehmen Sie bitte oben stehender Tabelle.
Die beiden in der Nordsee wichtigsten Partialtiden, die halbtägige Haupt-Mondtide (M2) und die halbtägige Haupt-Sonnentide (S2) haben Perioden von 12,4189 bzw. 12,00 Stunden. Das heißt, dass das Gezeitensignal der Sonne (S2) alle 12 Stunden ihr Maximum erreicht, die des Mondes alle 12 h 25 min.
Die Amplituden von M2 und S2 betragen für den freien Ozean 0,4543 und 0,2114 oder als Relativwerte 100 bzw. 46,5. Das entspricht dem Verhältnis der Gezeitenkräfte von Mond und Sonne. Die Werte für Helgoland sind 1,12 und 0,26.

Halbtägige (semidiurnale) Mond- und Sonnentiden (M2 und S1)

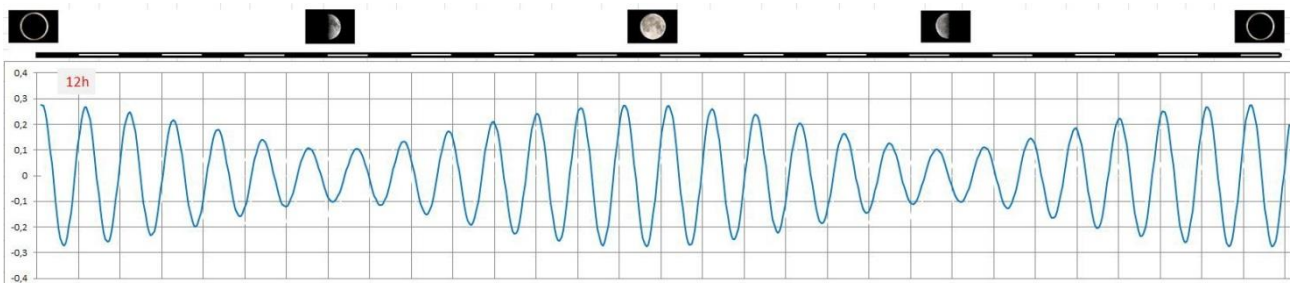
Wir empfehlen, zunächst nur die Effekte der halbtägigen Mond- und Sonnentiden **M2** und **S2** zu untersuchen und alle weiteren Partialtiden auszuschalten in dem sie ihre Amplitude auf null setzen.
Das Programm ist so eingestellt, dass es mit einem Neumond beginnt der zusammen mit der Sonne mittags durch den Meridian geht. Die senkrechten Linien im Diagramm bedeuten "12 Uhr".
Wenn sie sich auf der Zeitachse nach rechts bewegend dem zunehmenden Mond folgen werden sie feststellen, dass die Kurve M2 hinter der Kurve S2 zurückbleibt: Der Mond geht täglich um etwa 50 Minuten später durch den Meridian. Die Maxima und Minima der Gezeitenkurve sind gegenüber der den Kurven M2 und S2 verschoben (**Vor**- und **Nachgehen der Gezeit**, "Priming" und "Lagging").
Sehr deutlich ist der Effekt des Winkels von Mond und Sonne auf die Höhe der Gezeit. Bei Neu- und Vollmond kommt es zur "**Springflut**", bei zu- und abnehmendem Halbmond zur "**Nippflut**".



Die so genannte "**Springverspätung**" von in der Nordsee etwa drei Tagen lässt sich durch Verschiebung der Kurven simulieren. Dazu unten mehr.

Ganztägige (diurnale) Mond- und Sonnentiden (O1 und P1)

Sie können die halbtägigen Partialtiden M2 und S2 ersetzen durch ihre Pendants, die **ganztägige Mondtide O1** mit der Periode 25,8189 h und der Amplitude 0,1886 und die **ganztägige Sonnentide P1** mit der Periode 24,0650 und der Amplitude 0,0878.
Das Ergebnis ist eine diurnale Gezeitenform mit nur einer Flut und einer Ebbe täglich.

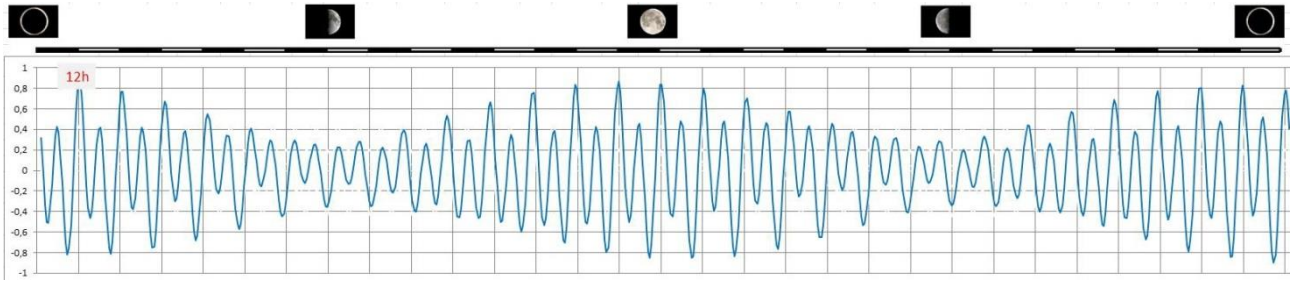


Gemischte Gezeitenformen

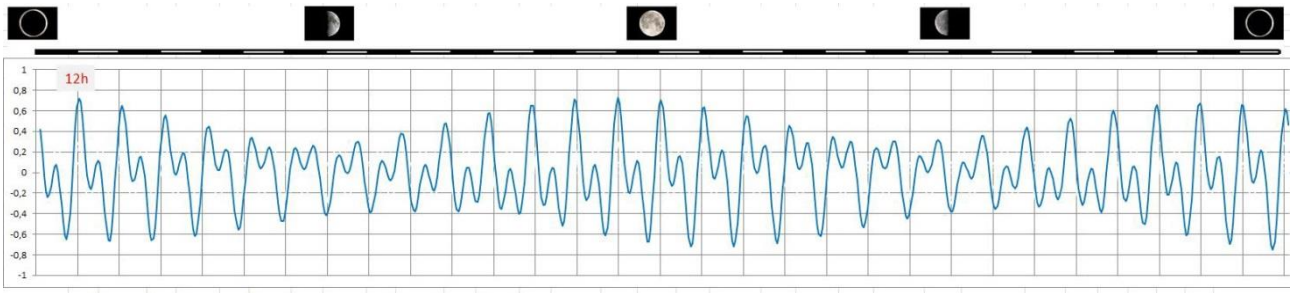
Sie können aber auch gemischte Gezeitenformen mit unterschiedlichen semidiurnalen und diurnalen Anteilen erzeugen in dem sie M2 und S2 unverändert lassen und die beiden bisher noch "ausgeschalteten" Partialtiden mit den Werten von O1 und P1 versehen.

Je nachdem wie sie das Verhältnis der Amplituden einstellen werden die gemischten Gezeiten eine semidiurnale bzw. diurnale Tendenz zeigen.

Im oben gezeigten Beispiel haben M2, S2, O1 und P1 die Amplituden 0,45, 0,21, 0,19 und 0,09



Wenn die Amplituden 0,3, 0,1, 0,3 und 0,1 lauten - was gleiche Anteile von halb- und ganztägigen Einflüssen und einem Formfaktor von 1 entspricht erhält man eine gemischte Tidenkurve:



Jahreszeitliche Unterschiede der Gezeiten

Um die Wirkung der sich im Laufe des Jahres verändernden Winkel von Sonne und Mond untersuchen zu können sollten Sie die **eintägige Haupt-Deklinationstide K1** ins Spiel bringen. Sie hat die Periode 23,9339 h und im Ozean die Amplitude 0,2655 bzw. 0,07 auf Helgoland.

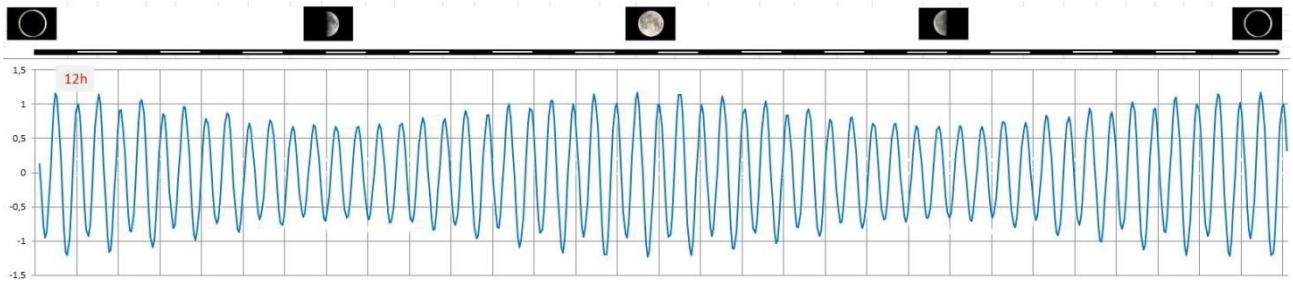
In der Grundeinstellung überlagert K1 die beiden Mond- und Sonnentiden M2 und S2 so, dass die Sonne (und der Neumond) in ihren Winterpositionen über dem südlichen Wendekreis stehen.

Wenn Sie die Gezeiten im anderen Jahreszeiten darstellen wollen müssen die Phasen von K1 und O1 entsprechend verschoben werden. Geben Sie einfach die Anzahl der seit der Wintersonnenwende am 21. Dezember vergangenen Tage ein.

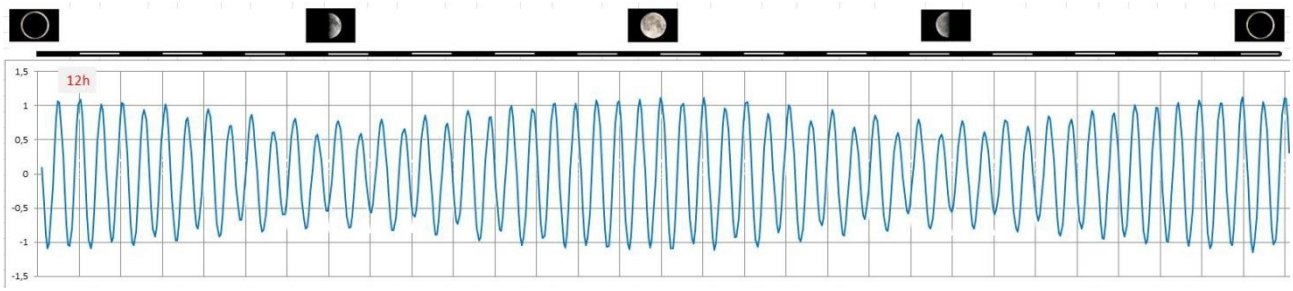
Halbtägige, gemischte und ganztägige Tiden

Der "Formfaktor", also das Verhältnis von K1 + O1 zu M2 + S2 ist maßgeblich dafür ob es sich um eine semidiurnale, diurnale oder gemischte Gezeit handelt.

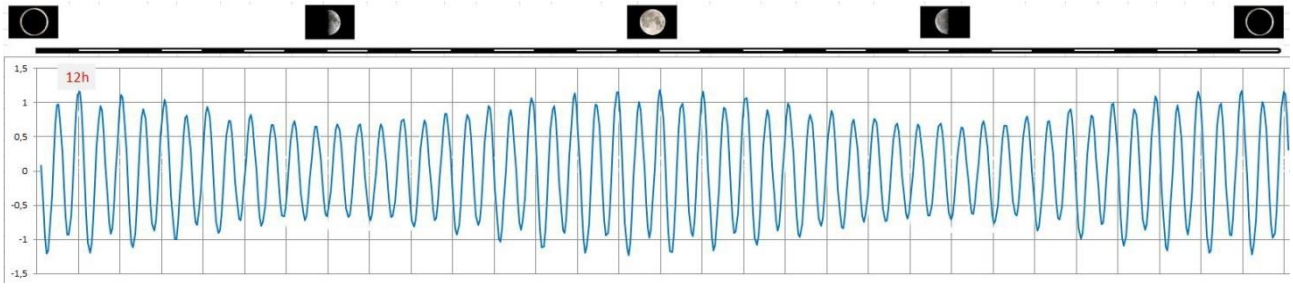
Tidenkurve im Winter (Nordsee):
Tägliche Ungleichheit bei Neu- und Vollmond, dann Nachthochwasser höher als Taghochwasser



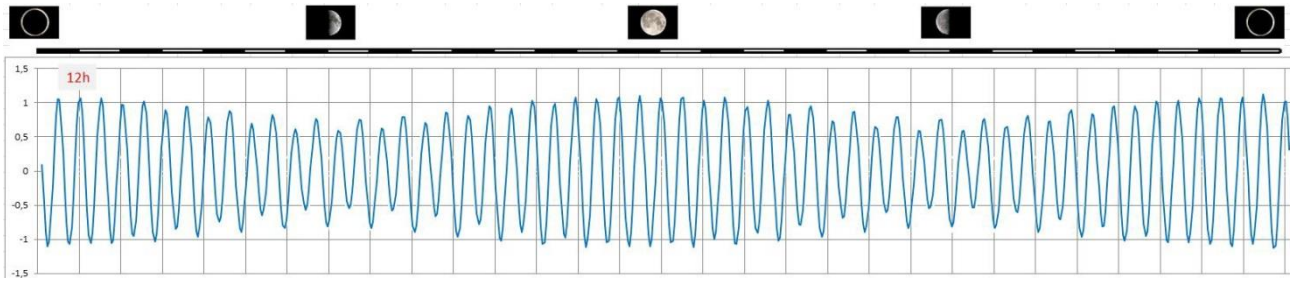
Tidenkurve im Frühjahr (Nordsee)
Tägliche Ungleichheit im Ersten und Letzten Viertel , dann Abendhochwasser höher als Morgenhochwasser



Tidenkurve im Sommer (Nordsee)
Tägliche Ungleichheit bei Neu- und Vollmond, dann Taghochwasser höher als Nachthochwasser



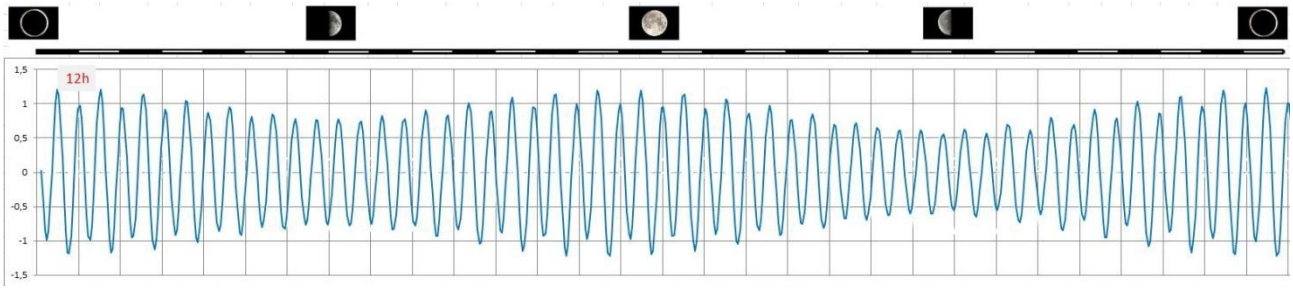
Tidenkurve im Herbst (Nordsee)
Tägliche Ungleichheit im Ersten und Letzten Viertel , dann Morgenhochwasser höher als Abendhochwasser



Schwankende Distanz zwischen Erde und Mond

Die elliptische Umlaufbahn des Mondes führt im Perigäum (Erdnähe) zu größerer und im Apogäum (Erdferne) zu geringerer Gezeitenkraft. Die entsprechenden Partialtiden sind N2 und L2. L2 hat eine sehr geringe Amplitude und wurde hier vernachlässigt.

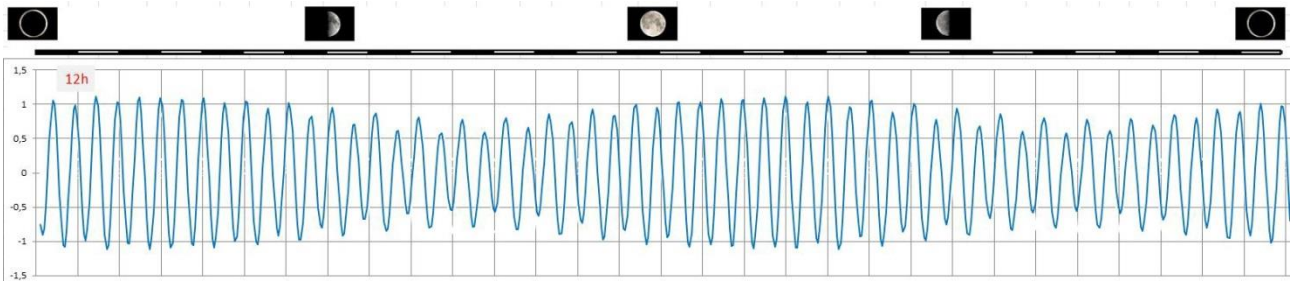
Folgt das Perigäum dem Neumond im Abstand von sieben Tagen geben sie einfach eine 7 ein. Das Ergebnis wird ein größerer Tidenhub im Ersten Viertel und ein geringerer im Letzten Viertel sein weil sich der Mond dann im Apogäum befindet.



Springverspätung

Um zum Beispiel die in der Nordsee übliche Springverspätung von drei Tagen zu simulieren muss die Phase zurückgestellt werden. Die Zeitachse überstreicht 30 Tage (720°). Ein Tag entspricht 24°. Stellen Sie die Phase für alle eingeschalteten Partialtiden also um -72° zurück.

Beispiel: M2 und S2 wird um -72° zurückgestellt. Für das Frühjahr gelten dann für K1 6 - 72 = -66 und für O1 -6 - 72 = -78°.



Grundeinstellung:

Die Phasen der Partialtiden sind in der Grundeinstellung so bemessen sein dass im Nullpunkt der Zeitachse mit einem Maximum beginnen.

Vergleich mit realen Gezeiten

Im Internet können Sie unter www.worldtides.info die Gezeiten für alle Orte der Welt und jedes Datum in der Vergangenheit und Zukunft aufrufen und mit ihren "experimentellen" Ergebnissen vergleichen. Berücksichtigen Sie dabei stets die in der nachfolgenden Tabellen aufgelisteten Termine des Neumondes und des Perigäums (Erdnähe des Mondes).

Eine Bitte:

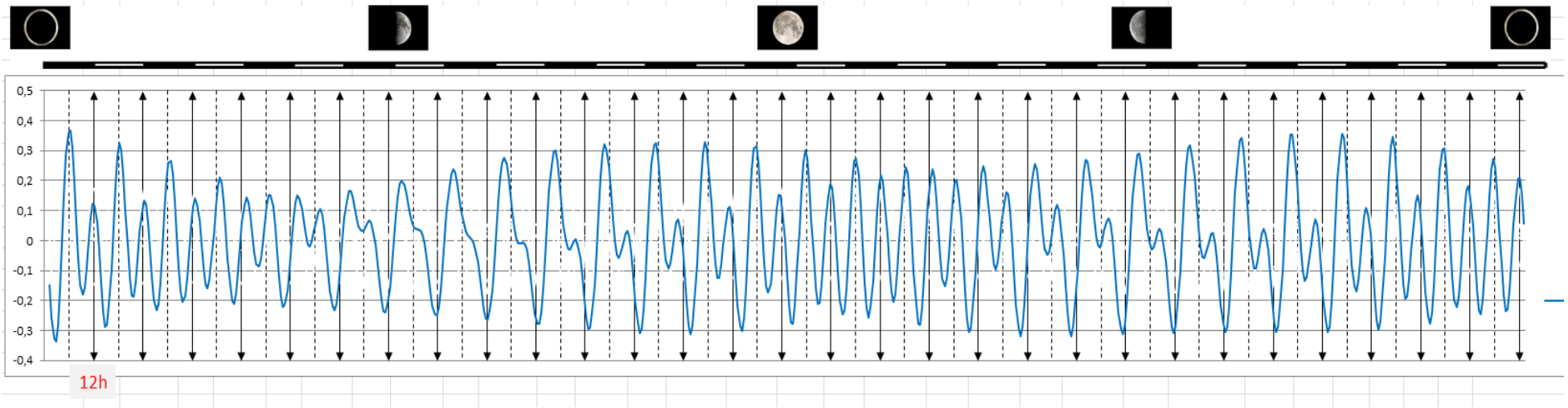
Fassen Sie das Programm nicht als "Gezeiten-Vorhersagemaschine" auf. Sinn und Zweck ist "nur", sich durch Einsetzen verschiedener Partialtiden und experimentelles (und spielerisches) Verändern von Frequenzen und Amplituden mit verschiedenen Gezeitenformen auseinanderzusetzen.

Gezeitenkurven sind viel komplizierter als hier dargestellt. Die hinter diesem Programm stehenden Rechenvorgänge beruhen auf vielen Kompromissen und Ungenauigkeiten.

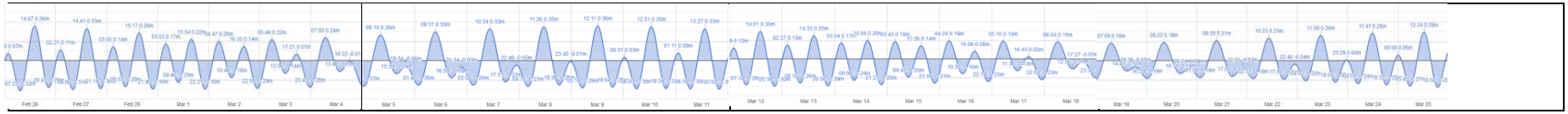
Vielleicht findet sich eines Tages jemand, der es verbessern kann.

Honolulu GEZEITEN 26.02.2017 - 26.03.2017

Vergleich EXCEL-Programm und Worldtides.info



Zusammengesetzte Gezeitenkurve: (Screenshots von Worldtides.info)



Neumond 26.02.17, Perigäum 03.03.17, Monat 2,5, Springverspätung 0

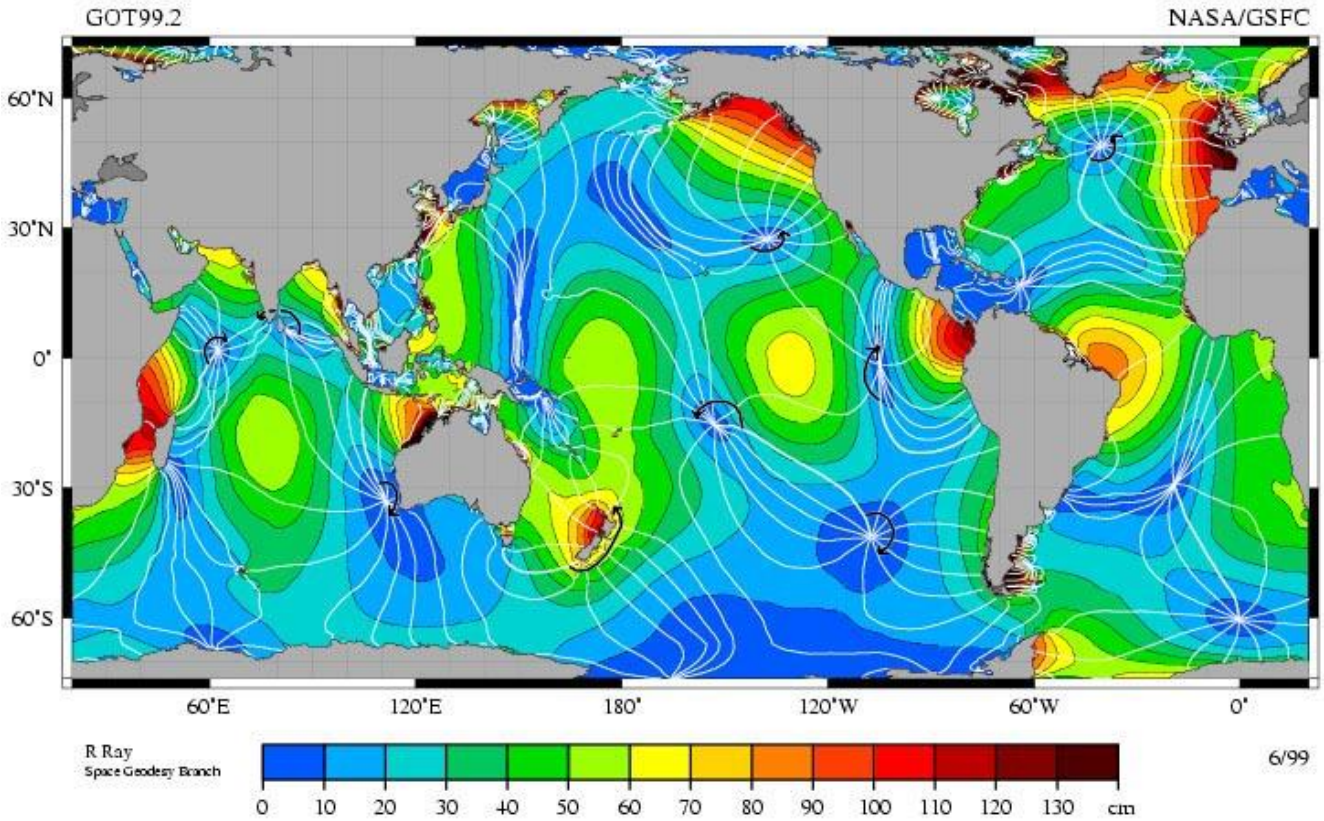
Partialtiden und Amplituden (https://tidesandcurrents.noaa.gov/harcon.html?unit=0&timezone=1&id=1612340&name=Honolulu&state=HI)

M2	0.178		N2	0.034
S2	0.057		P1	0.048
K1	0.158			
O1	0.087			

ANHANG

Globale Gezeitenwellen

M2 Amphidromische Punkte



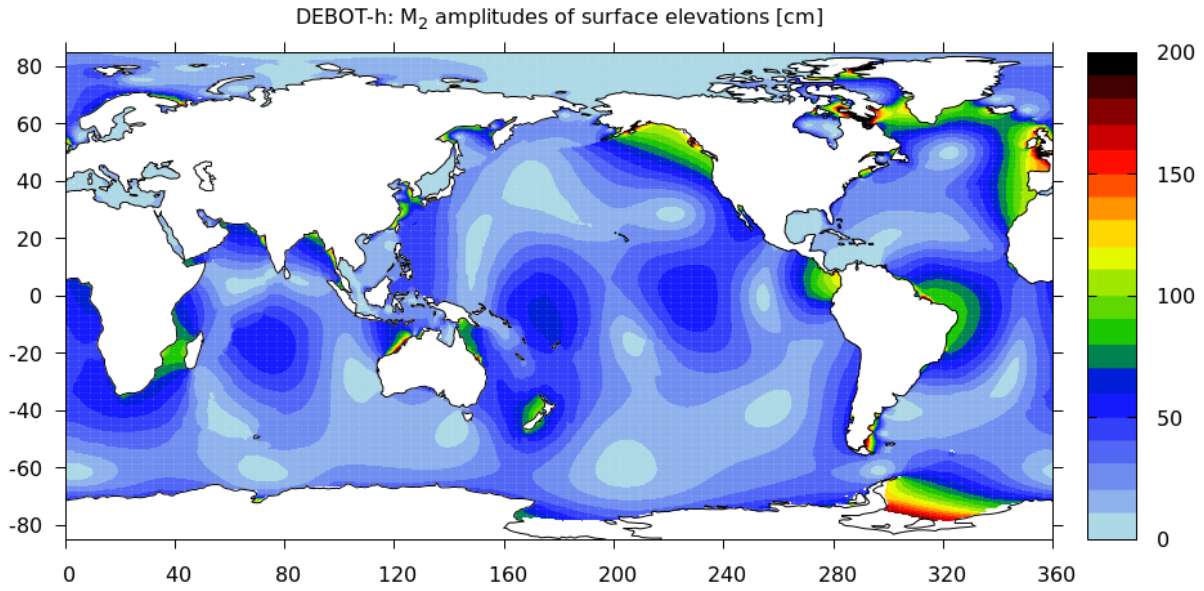
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/M2_tidal_constituent.jpg

- Wie viele Gezeitenwellen kannst du auf der Karte erkennen?
- Beachte die Drehrichtung der Wellen: Welche laufen im bzw. gegen den Uhrzeigersinn?
- Welchen Zusammenhang und welche Ursache gibt es hier möglicherweise?
- Wo ist der Tidenhub am größten, wo am geringsten?

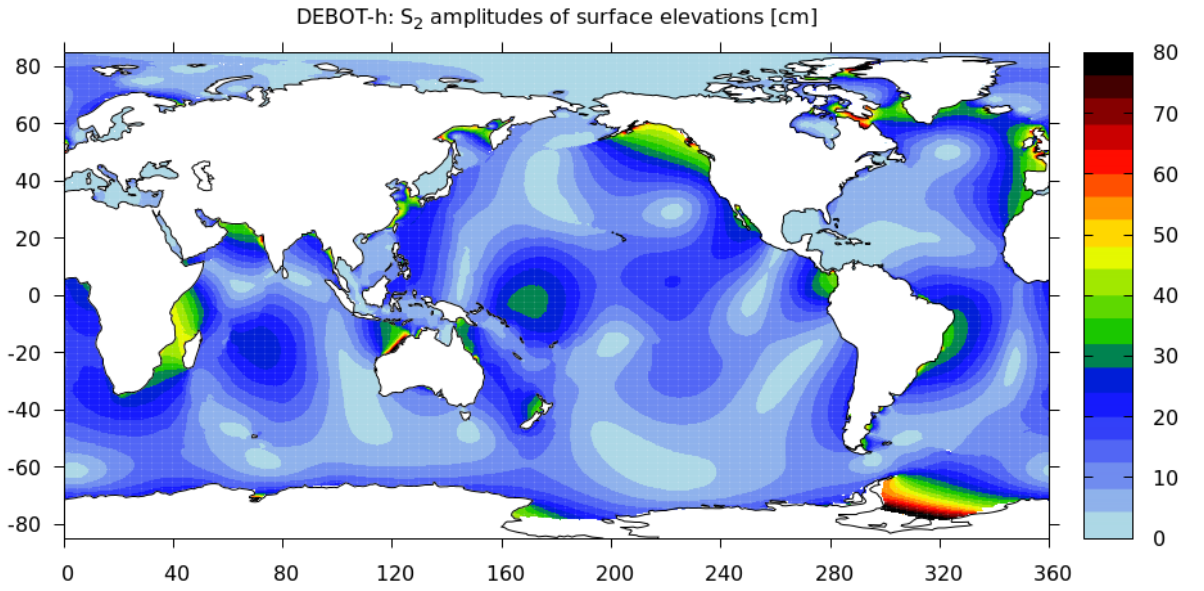
Partialtiden und Amplituden

Auf den folgenden Karten kannst du die Amplituden der wichtigsten Partialtiden ablesen.

M2

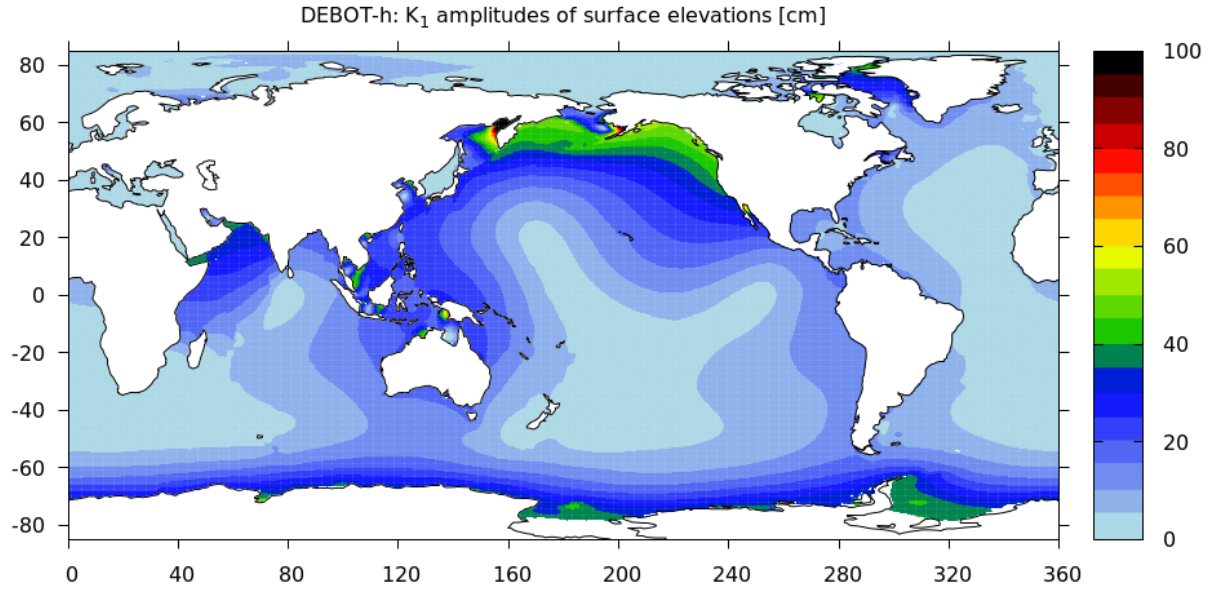


S2

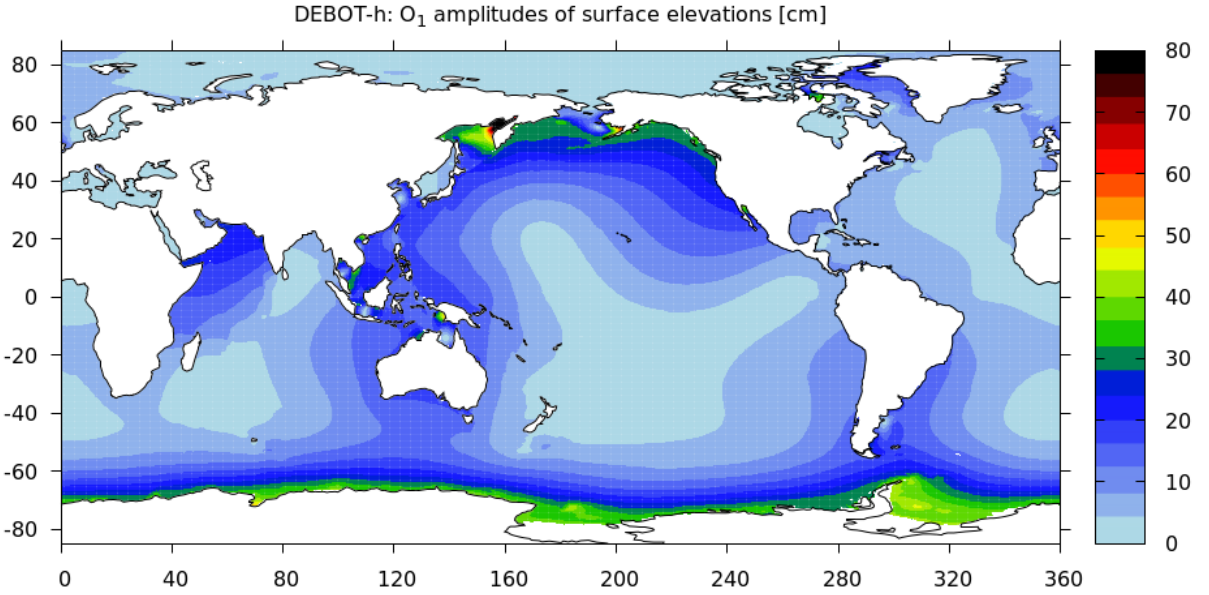


Quelle: http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

K1

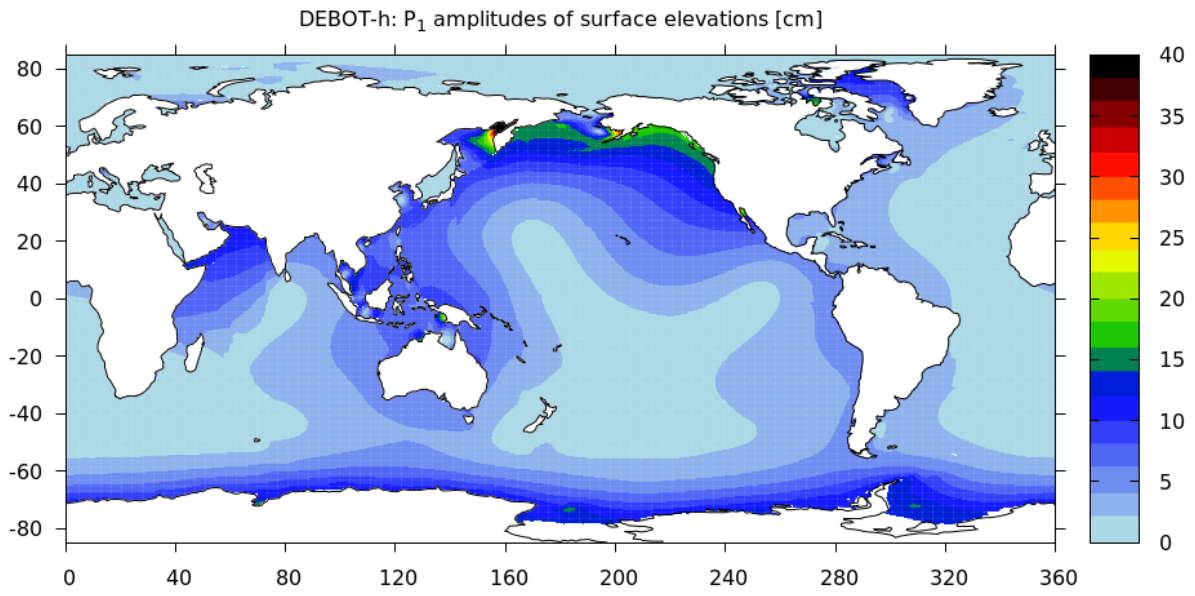


O1



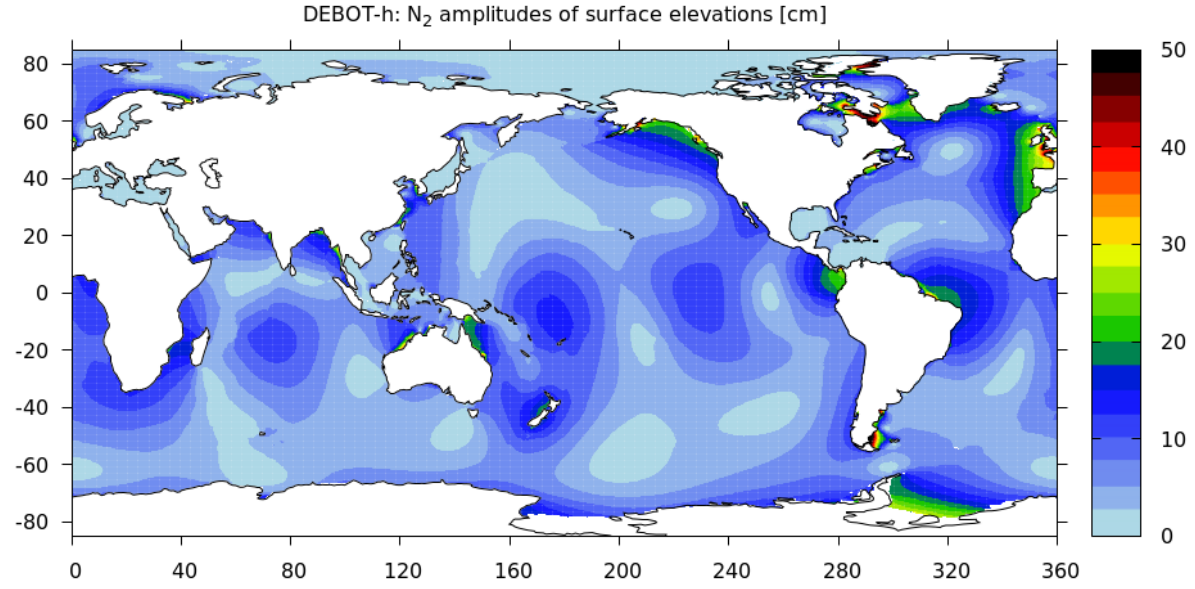
http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

P1



http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

N2



http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

Arbeitsanregungen:

- Bestimme die Anteile der Amplituden der Partialtiden und berechne den Formfaktor der Gezeit

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

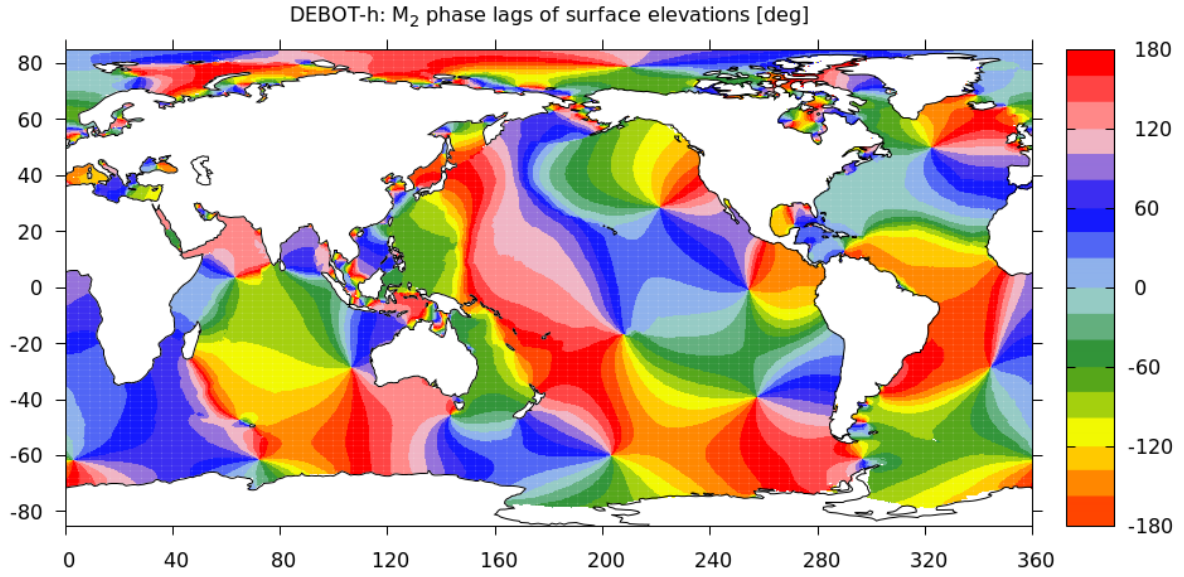
F > 3	Ganztägige (diurnale) Gezeit	1 HW, 1 NW pro Tag
F < 3 – F > 0,25	Gemischte Gezeit	2 HW, 2 NW pro Tag (unterschiedliche Stärke)
F < 0,25	Halbtägige (semidiurnale) Gezeit	2 HW, 2 NW pro Tag (ähnliche Stärke)

Partialtiden und Phasenlage

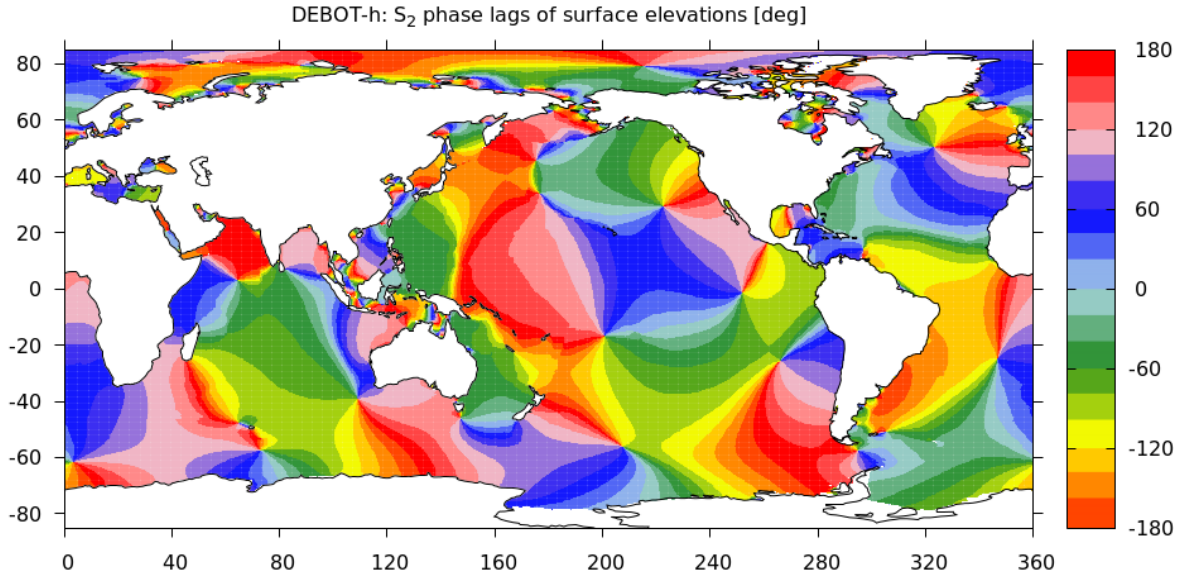
Auf den folgenden Karten können Sie die Phasenlage der wichtigsten Partialtiden ablesen.

Bei einer Phasenlage 0° tritt das Mondhochwasser zeitgleich mit dem Meridiandurchgang des Mondes ein, bei 180° 12 Stunden später bzw. bei – 180° 12 Stunden früher. Aus der Phasenlage kann die Drehrichtung der Tide ermittelt werden. Achten Sie darauf, dass sich die Phasenlagen der Partialtiden unterscheiden können. Der tatsächliche Zeitunterschied zwischen Meridiandurchgang und Hochwasserzeitpunkt ergibt sich aus den Anteilen der Partialtiden.

M2

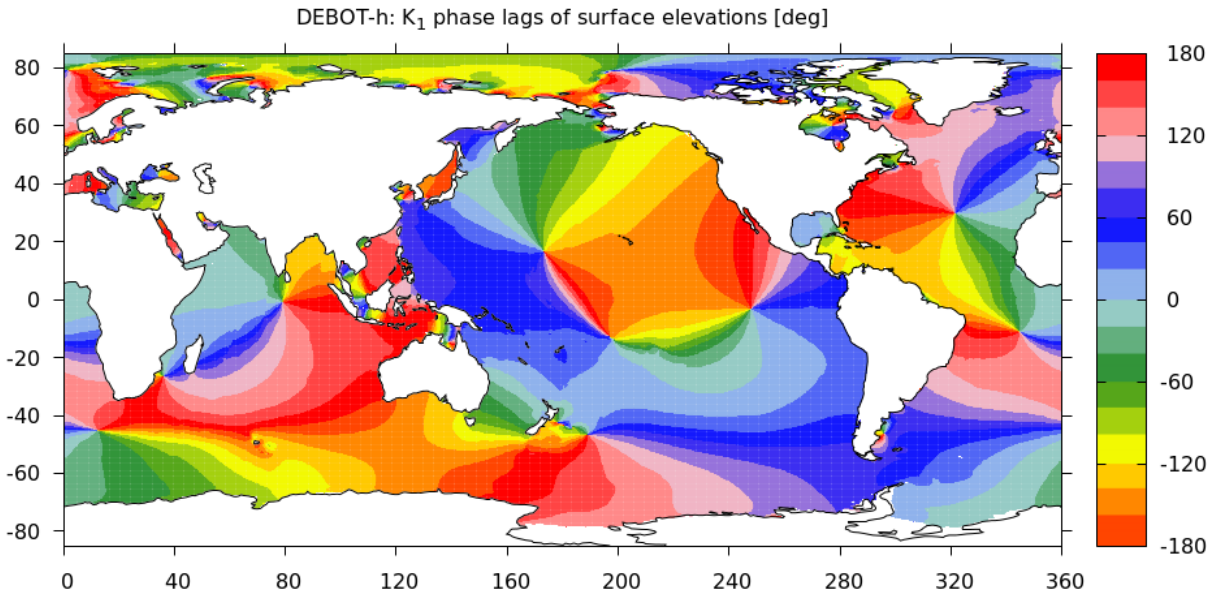


S2

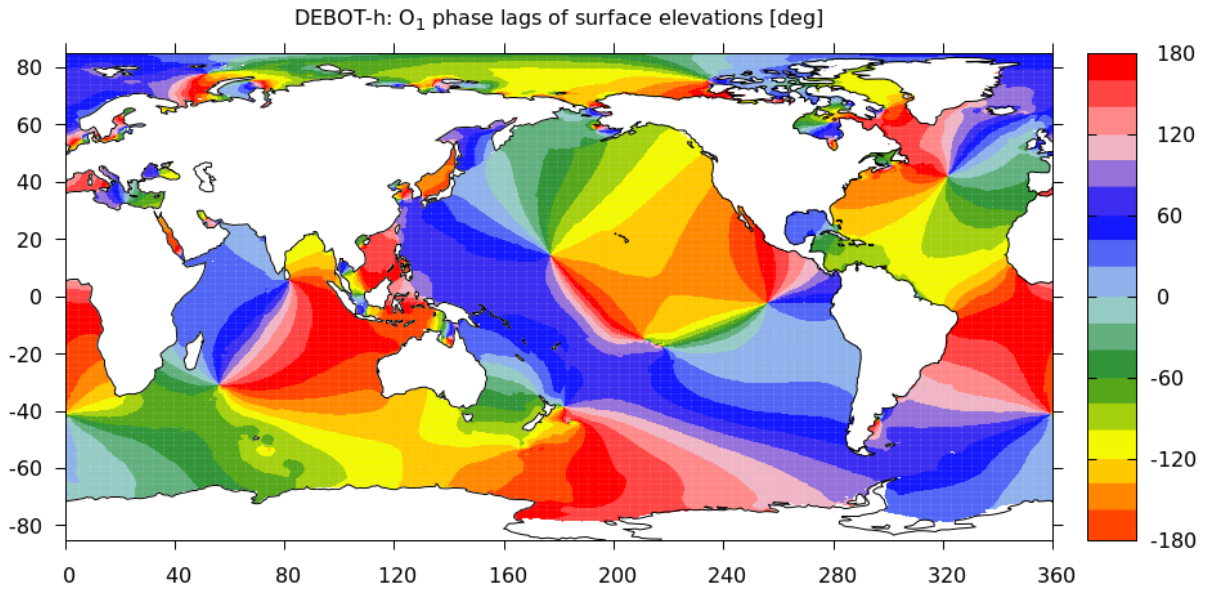


http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

K1

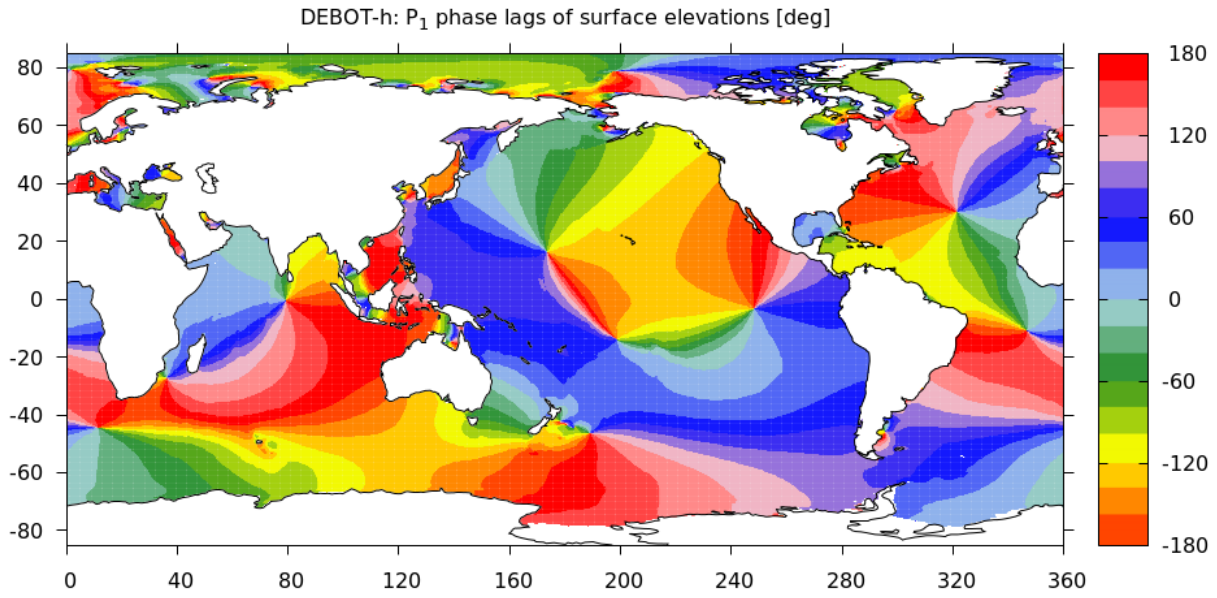


O1

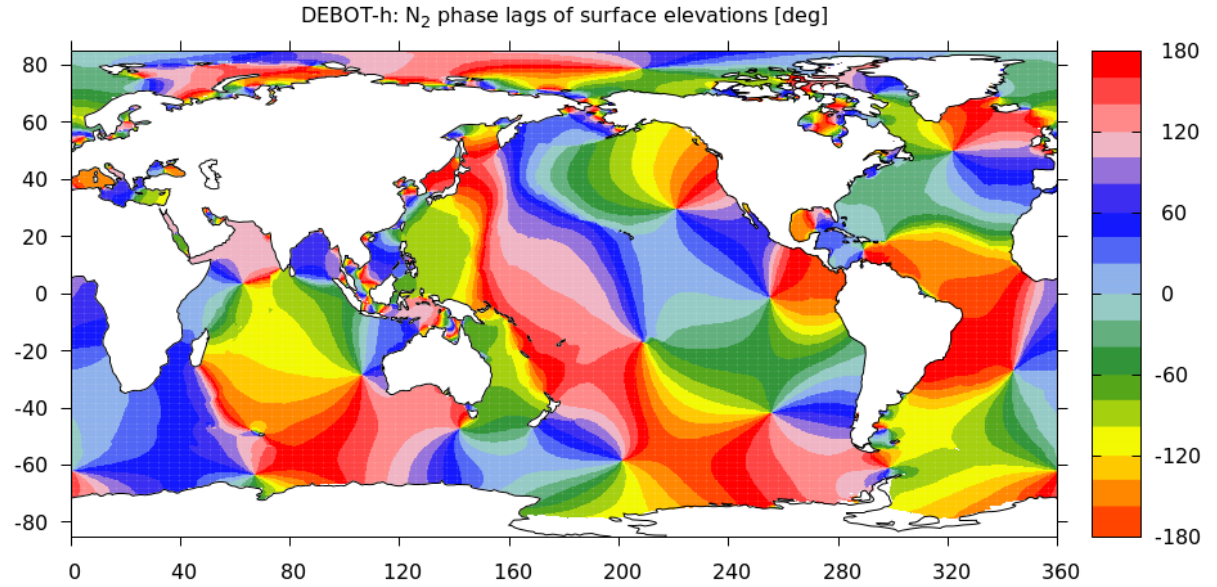


http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

P1



N2



http://geo.mff.cuni.cz/~einspigel/debot.html

Arbeitsanregungen:

- Untersuche die Phasenlagen der Gezeitenwellen und bestimme ihre jeweilige Drehrichtung.
- Vergleiche die Zentren und Phasenlagen der einzelnen Partialtiden.
- Bestimme den Zeitpunkt des Meridiandurchgangs des Mondes (z.B. bei Neumond) im Zentrum einer Gezeitenwelle und ermittle die dazu gehörige Hochwasserzeit für einen beliebigen Ort.

Beispiel Biskaya (Frankreich, M2-Tide): Zentrum der nordatlantischen Gezeitenwelle nördlich der Azoren, Phasenlage in der nördlichen Biskaya etwa 90°. Daraus folgt:
Hochwasser etwa 6 Stunden nach dem Meridiandurchgang des Mondes über den Azoren.
Zeitunterschied Azoren (26° W) – Biskaya (3°W): ca. + 1,5 h.
(Neumond 26.02., Meridiandurchgang Azoren ca. 12 h Ortszeit, HW in der Biskaya ca. 17 h)

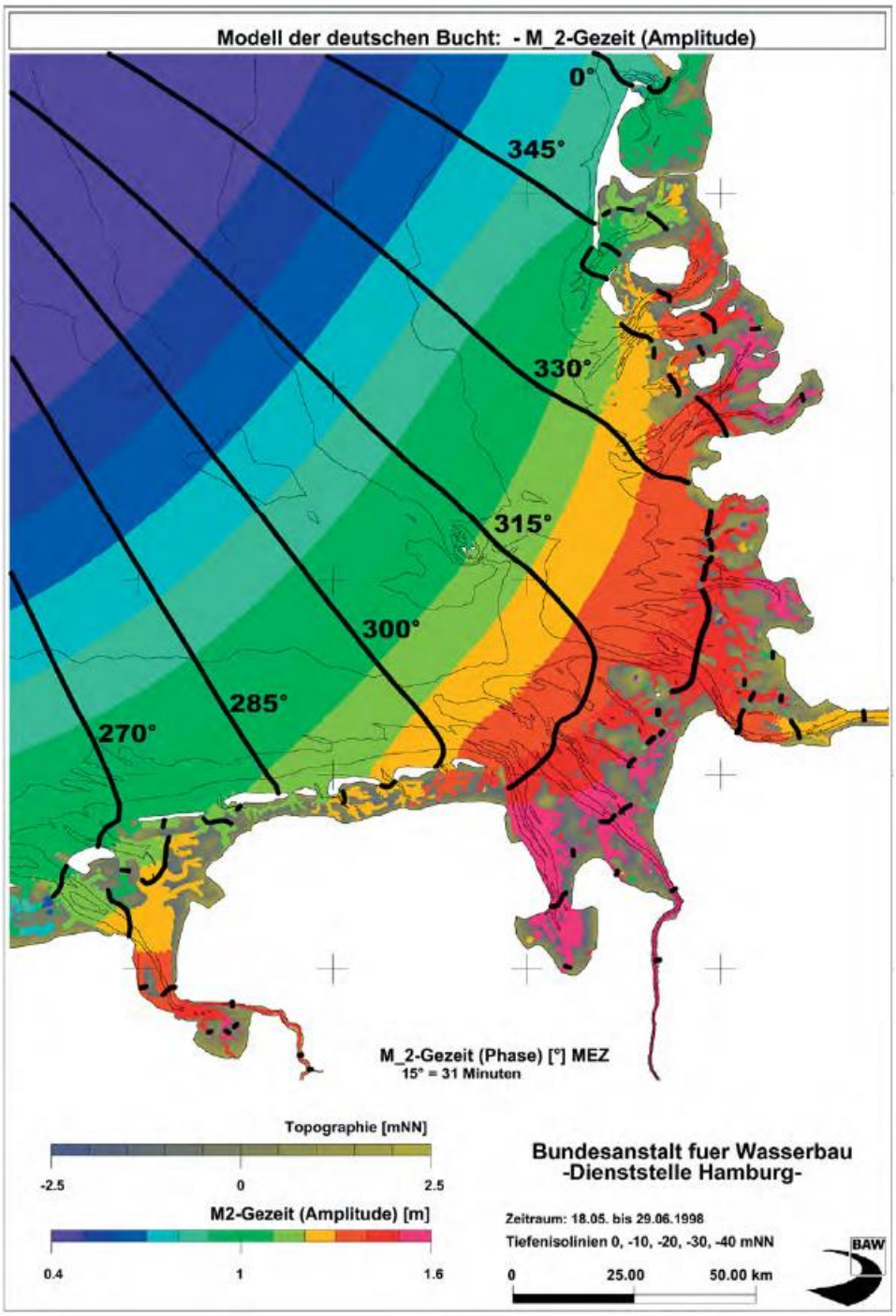
Partialtiden in der Nordsee: Amplituden und Phasenlagen

Karten aus:

Charakterisierung der Tidekurve
Von GABRIELE GONNERT, KATJA ISERT, HARALD GIESE u. ANDREAS PLUs

vzb.baw.de/die-kueste/0/k068103.pdf

M2



Beispiel:

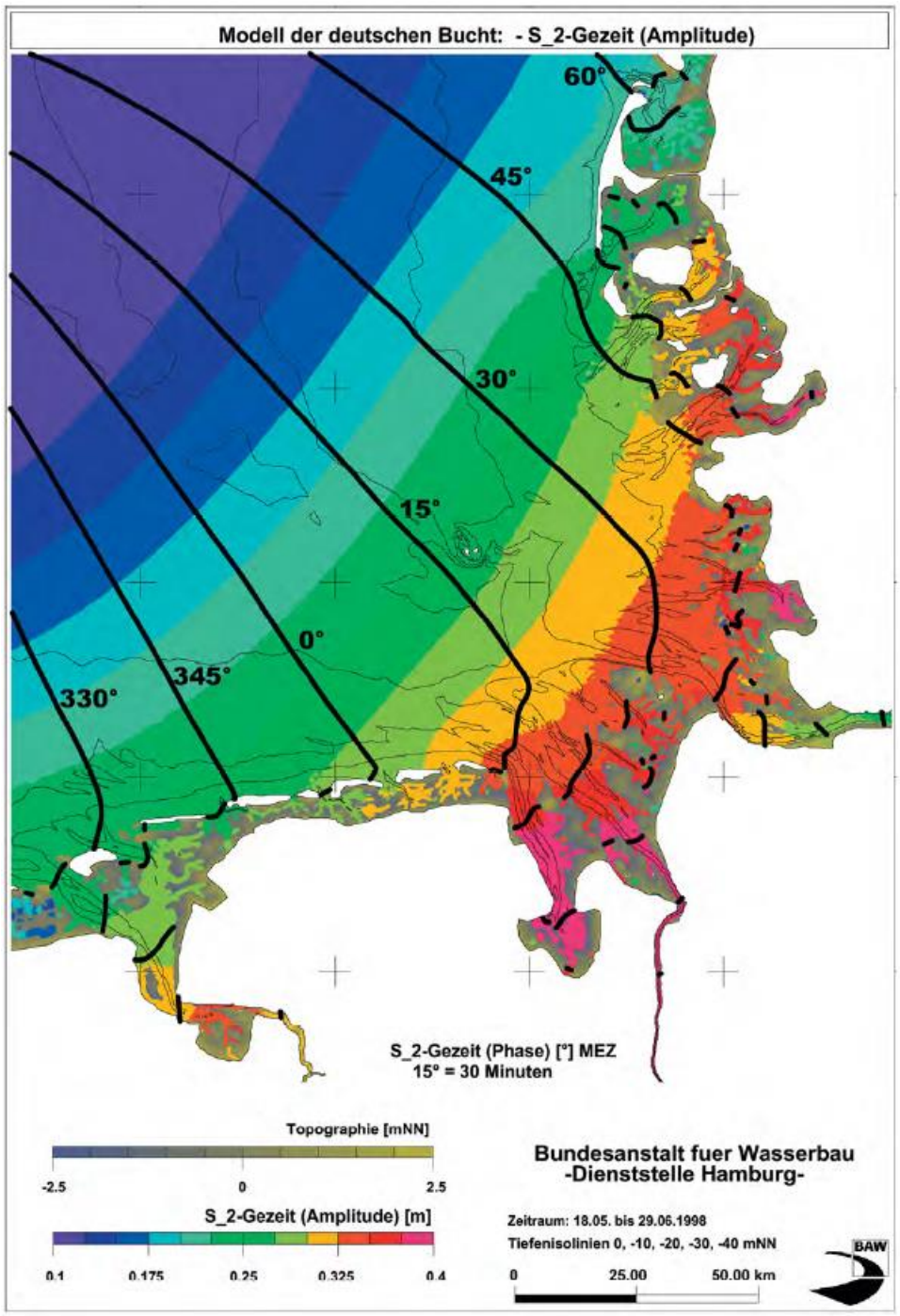
Westliches
Eiderstedt

Amplitude 1,4 m

Phase 330°

M2-Signal etwa
1 h vor
Meridiandurchgang

S2



Beispiel:

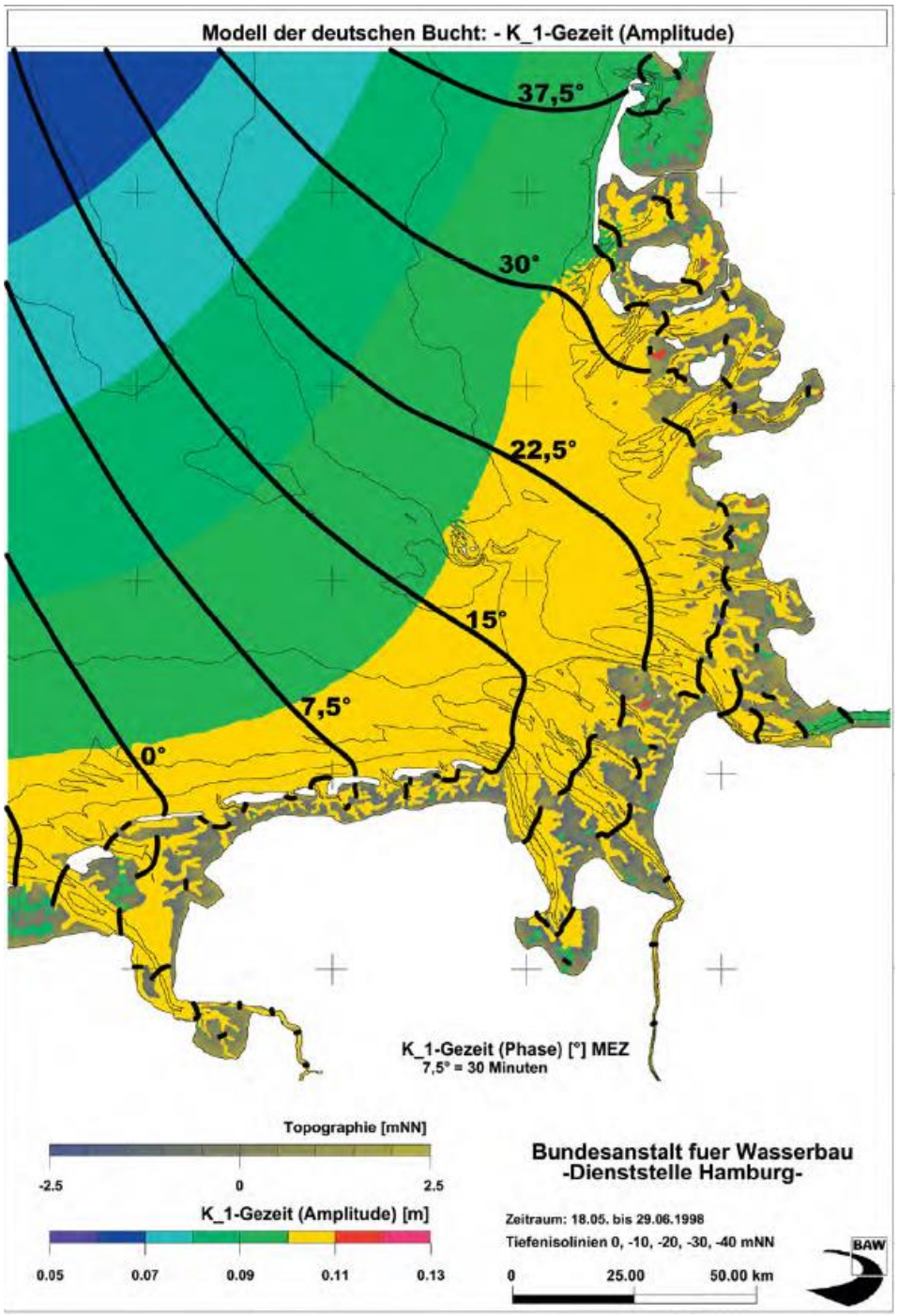
Westliches
Eiderstedt

Amplitude 0,3 m

Phase 45°

S2-Signal etwa
45 min nach
Meridiandurchgang

K1



Beispiel:

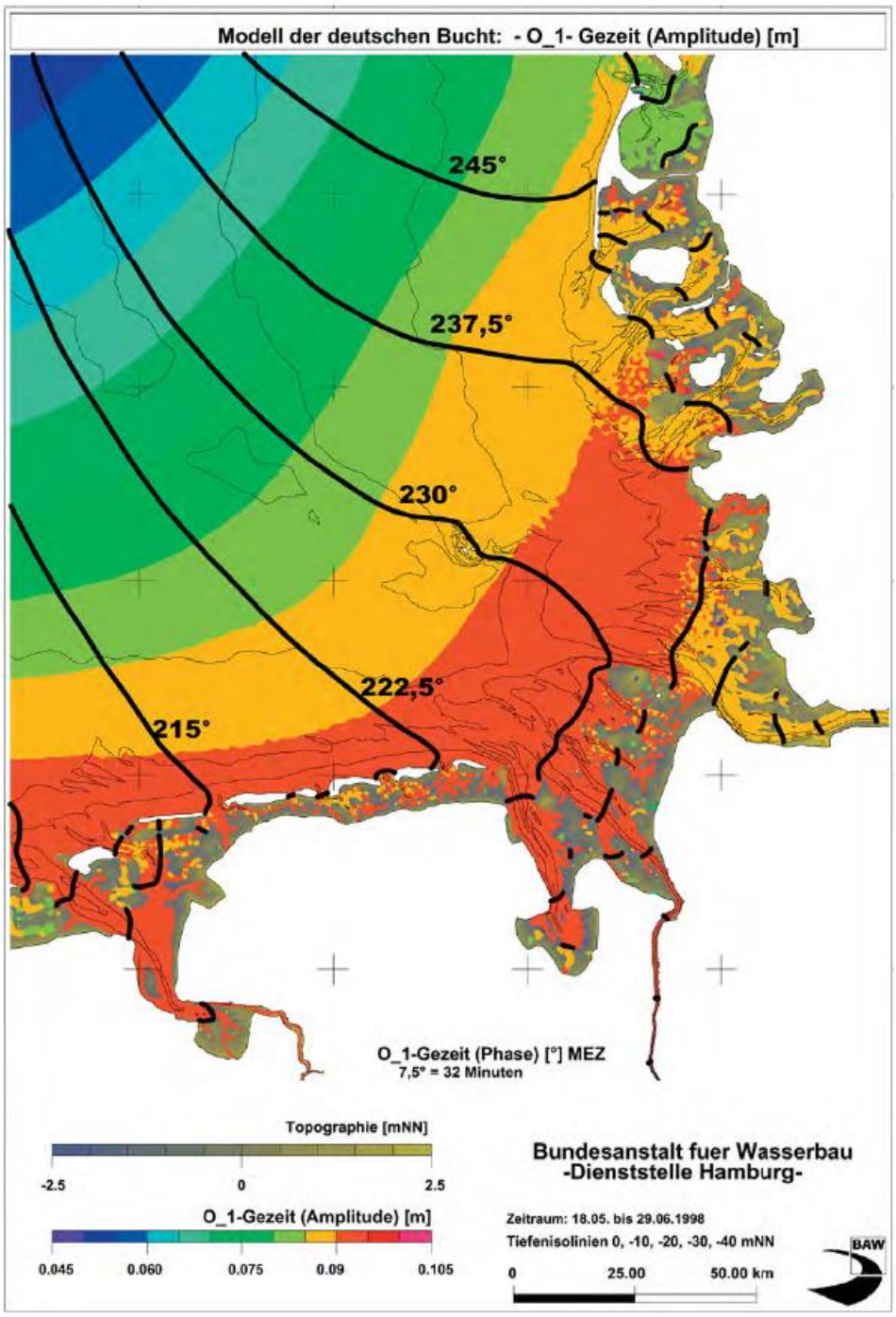
Westliches
Eiderstedt

Amplitude 0,1 m

Phase 30°

K1-Signal etwa
2 h nach
Meridiandurchgang

O1



Beispiel:

Westliches Eiderstedt

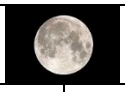
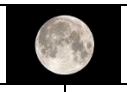
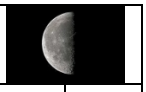
Amplitude 0,08 m

Phase 237,5°

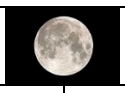
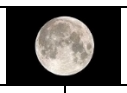
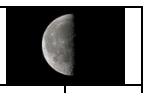
O1-Signal etwa 8,7 h vor Meridiandurchgang

Beachten Sie, dass sich die Phase und die Geschwindigkeiten der vier Partialtiden unterscheiden.
Der Scheitel der Partialtiden trifft also zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein.
In wie weit sich das auf die Hoch-und Niedrigwasserzeitpunkte auswirkt hängt von der Amplitude der Partialtiden ab.
In der Nordsee dominiert die M2-Tide, gefolgt von der S2-Tide. Die K1- bzw. O2-Tide spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Mondphasen 2017 - 2026

																	
Jahr	0/4		1/4		2/4		3/4		Jahr	0/4		1/4		2/4		3/4	
	d	h	d	h	d	h	d	h		d	h	d	h	d	h	d	h
2017			5.1	20:46	12.1	12:33	19.1	23:13	2022	2.1	19:33	9.1	19:11	18.1	0:48	25.1	14:40
2017	28.1	1:07	4.2	5:18	11.2	1:32	18.2	20:33	2022	1.2	6:45	8.2	14:50	16.2	17:56	23.2	23:32
2017	26.2	15:58	5.3	12:32	12.3	15:53	20.3	16:58	2022	2.3	18:34	10.3	11:45	18.3	8:17	25.3	6:37
2017	28.3	4:57	3.4	20:39	11.4	8:08	19.4	11:56	2022	1.4	8:24	9.4	8:47	16.4	20:54	23.4	13:56
2017	26.4	14:16	3.5	4:46	10.5	23:42	19.5	2:32	2022	30.4	22:28	9.5	2:21	16.5	6:14	22.5	20:43
2017	25.5	21:44	1.6	14:42	9.6	15:09	17.6	13:32	2022	30.5	13:30	7.6	16:48	14.6	13:51	21.6	5:10
2017	24.6	4:30	1.7	2:51	9.7	6:06	16.7	21:25	2022	29.6	4:52	7.7	4:14	13.7	20:37	20.7	16:18
2017	23.7	11:45	30.7	17:23	7.8	20:10	15.8	3:14	2022	28.7	19:54	5.8	13:06	12.8	3:35	19.8	6:36
2017	21.8	20:30	29.8	10:12	6.9	9:02	13.9	8:24	2022	27.8	10:17	3.9	20:07	10.9	11:58	17.9	23:51
2017	20.9	7:29	28.9	4:53	5.10	20:40	12.10	14:25	2022	25.9	23:54	3.10	2:14	9.10	22:54	17.10	19:14
2017	19.10	21:12	28.10	0:22	4.11	6:22	10.11	21:36	2022	25.10	12:48	1.11	7:37	8.11	12:02	16.11	14:26
2017	18.11	12:42	26.11	18:02	3.12	16:46	10.12	8:51	2022	23.11	23:57	30.11	15:36	8.12	5:08	16.12	9:56
2017	18.12	7:30	26.12	10:20					2022	23.12	11:16	30.12	2:20				
2018					2.1	3:24	8.1	23:25	2023					7.1	0:07	15.1	3:10
2018	17.1	3:17	24.1	23:20	31.1	14:26	7.2	16:53	2023	21.1	21:53	28.1	16:18	5.2	19:28	13.2	17:00
2018	15.2	22:05	23.2	9:09	2.3	1:51	9.3	12:19	2023	20.2	8:05	27.2	9:05	7.3	13:40	15.3	3:08
2018	17.3	14:11	24.3	16:35	31.3	14:36	8.4	9:17	2023	21.3	18:23	29.3	4:32	6.4	6:34	13.4	11:11
2018	16.4	3:57	22.4	23:45	30.4	2:58	8.5	4:08	2023	20.4	6:12	27.4	23:19	5.5	19:33	12.5	16:28
2018	15.5	13:47	22.5	5:49	29.5	16:19	6.6	20:31	2023	19.5	17:53	27.5	17:22	4.6	5:41	10.6	21:31
2018	13.6	21:43	20.6	12:50	28.6	6:53	6.7	9:50	2023	18.6	6:37	26.6	9:49	3.7	13:38	10.7	3:47
2018	13.7	4:47	19.7	21:52	27.7	22:20	4.8	20:17	2023	17.7	20:31	26.7	0:06	1.8	20:31	8.8	12:28
2018	11.8	11:57	18.8	9:48	26.8	13:56	3.9	4:37	2023	16.8	11:38	24.8	11:57	31.8	3:35	7.9	0:20
2018	9.9	20:01	17.9	1:14	25.9	4:52	2.10	11:45	2023	15.9	3:39	22.9	21:31	29.9	11:57	6.10	15:47
2018	9.10	5:46	16.10	20:01	24.10	18:45	31.10	17:40	2023	14.10	19:55	22.10	5:29	28.10	22:23	5.11	9:36
2018	7.11	17:01	15.11	15:54	23.11	6:39	30.11	1:18	2023	13.11	10:27	20.11	11:49	27.11	10:16	5.12	6:49
2018	7.12	8:20	15.12	12:49	22.12	18:48	29.12	10:34	2023	13.12	0:31	19.12	19:39	27.12	1:33		
2019	6.1	2:28	14.1	7:45	21.1	6:16	27.1	22:10	2024							4.1	4:30
2019	4.2	22:03	12.2	23:26	19.2	16:53	26.2	12:27	2024	11.1	12:57	18.1	4:52	25.1	18:53	3.2	0:17
2019	6.3	17:03	14.3	11:27	21.3	2:42	28.3	5:09	2024	9.2	23:59	16.2	16:00	24.2	13:30	3.3	16:23
2019	5.4	10:50	12.4	21:05	19.4	13:12	27.4	0:18	2024	10.3	10:00	17.3	5:10	25.3	8:00	2.4	5:14
2019	5.5	0:45	12.5	3:12	18.5	23:11	26.5	18:33	2024	8.4	20:20	15.4	21:13	24.4	1:48	1.5	13:27
2019	3.6	12:01	10.6	7:59	17.6	10:30	25.6	11:46	2024	8.5	5:21	15.5	13:47	23.5	15:53	30.5	19:12
2019	2.7	21:16	9.7	12:54	16.7	23:38	25.7	3:17	2024	6.6	14:37	14.6	7:18	22.6	3:07	28.6	23:53
2019	1.8	5:11	7.8	19:30	15.8	14:29	23.8	16:56	2024	6.7	0:57	14.7	0:48	21.7	12:17	28.7	4:51
2019	30.8	12:37	6.9	5:10	14.9	6:32	22.9	4:40	2024	4.8	13:13	12.8	17:18	19.8	20:25	26.8	11:25
2019	28.9	20:26	5.10	18:47	13.10	23:07	21.10	14:39	2024	3.9	3:55	11.9	8:05	18.9	4:34	24.9	20:49
2019	28.10	4:38	4.11	11:23	12.11	14:34	19.11	22:10	2024	2.10	20:49	10.10	20:55	17.10	13:26	24.10	10:02
2019	26.11	16:05	4.12	7:58	12.12	6:12	19.12	5:57	2024	1.11	13:47	9.11	6:55	15.11	22:28	23.11	2:27
2019	26.12	6:13							2024	1.12	7:21	8.12	16:26	15.12	10:01	22.12	23:18

Datenquelle: www.timeanddate.com

																	
Jahr	0/4		1/4		2/4		3/4		Jahr	0/4		1/4		2/4		3/4	
	d	h	d	h	d	h	d	h		d	h	d	h	d	h	d	h
2020			3.1	5:45	10.1	20:21	17.1	13:58	2024	30.12	23:26						
2020	24.1	22:41	2.2	2:41	9.2	8:33	15.2	23:17	2025			7.1	0:56	13.1	23:26	21.1	21:30
2020	23.2	16:31	2.3	20:57	9.3	18:47	16.3	10:34	2025	29.1	13:35	5.2	9:02	12.2	14:53	20.2	18:32
2020	24.3	10:28	1.4	12:21	8.4	4:35	15.4	0:56	2025	28.2	1:44	6.3	17:31	14.3	7:54	22.3	12:29
2020	23.4	4:25	30.4	22:38	7.5	12:45	14.5	16:02	2025	29.3	11:57	5.4	4:14	13.4	2:22	21.4	3:35
2020	22.5	19:38	30.5	5:29	5.6	21:12	13.6	8:23	2025	27.4	21:31	4.5	15:51	12.5	18:55	20.5	13:58
2020	21.6	8:41	28.6	10:15	5.7	6:44	13.7	1:28	2025	27.5	5:02	3.6	5:40	11.6	9:43	18.6	21:19
2020	20.7	19:32	27.7	14:32	3.8	17:58	11.8	18:44	2025	25.6	12:31	2.7	21:30	10.7	22:36	18.7	2:37
2020	19.8	4:41	25.8	19:57	2.9	7:22	10.9	11:25	2025	24.7	21:11	1.8	14:41	9.8	9:54	16.8	7:12
2020	17.9	13:00	24.9	3:54	1.10	23:05	10.10	2:39	2025	23.8	8:06	31.8	8:25	7.9	20:08	14.9	12:32
2020	16.10	21:31	23.10	15:22	31.10	15:49	8.11	14:46	2025	21.9	21:54	30.9	1:53	7.10	5:47	13.10	20:12
2020	15.11	6:07	22.11	5:44	30.11	10:29	8.12	1:36	2025	21.10	14:25	29.10	17:20	5.11	14:19	12.11	6:28
2020	14.12	17:16	22.12	0:41	30.12	4:28			2025	20.11	7:47	28.11	7:58	5.12	0:13	11.12	21:51
2021							6.1	10:37	2025	20.12	2:43	27.12	20:09				
2021	13.1	6:00	20.1	22:01	28.1	20:16	4.2	18:37	2026					3.1	11:02	10.1	16:48
2021	11.2	20:05	19.2	19:47	27.2	9:17	6.3	2:30	2026	18.1	20:51	26.1	5:47	1.2	23:09	9.2	13:42
2021	13.3	11:21	21.3	15:40	28.3	20:48	4.4	12:02	2026	17.2	13:01	24.2	13:27	3.3	12:37	11.3	10:38
2021	12.4	4:30	20.4	8:58	27.4	5:31	3.5	21:50	2026	19.3	2:23	25.3	20:17	2.4	4:11	10.4	6:51
2021	11.5	20:59	19.5	21:12	26.5	13:13	2.6	9:24	2026	17.4	13:51	24.4	4:31	1.5	19:23	9.5	23:10
2021	10.6	12:52	18.6	5:54	24.6	20:39	1.7	23:10	2026	16.5	22:01	23.5	13:10	31.5	10:45	8.6	12:00
2021	10.7	3:16	17.7	12:10	24.7	4:36	31.7	15:15	2026	15.6	4:54	21.6	23:55	30.6	1:56	7.7	21:28
2021	8.8	15:50	15.8	17:19	22.8	14:01	30.8	9:13	2026	14.7	11:43	21.7	13:05	29.7	16:35	6.8	4:21
2021	7.9	2:51	13.9	22:39	21.9	1:54	29.9	3:57	2026	12.8	19:36	20.8	4:46	28.8	6:18	4.9	9:51
2021	6.10	13:05	13.10	5:25	20.10	16:56	28.10	22:05	2026	11.9	5:26	18.9	22:43	26.9	18:48	3.10	15:24
2021	4.11	22:14	11.11	13:45	19.11	9:57	27.11	13:27	2026	10.10	17:49	18.10	18:12	26.10	5:11	1.11	21:28
2021	4.12	8:42	11.12	2:35	19.12	5:35	27.12	3:23	2026	9.11	8:02	17.11	12:47	24.11	15:53	1.12	7:08
									2026	9.12	1:51	17.12	6:42	24.12	2:28	30.12	19:59

Datenquelle: www.timeanddate.com

Perigäen und Apogäen des Mondes 2017 - 2026

Perigäum (Erdnähe)				Apogäum (Erdferne)				Perigäum (Erdnähe)				Apogäum (Erdferne)			
Jahr	Tag	h	Distanz	Jahr	Tag	h	Distanz	Jahr	Tag	h	Distanz	Jahr	Tag	h	Distanz
2017	10.1	07:01	363.238	2017	22.1	01:13	404.914	2022	1.1	23:55	358.033	2022	14.1	10:25	405.805
2017	6.2	15:02	368.816	2017	18.2	22:13	404.376	2022	30.1	08:11	362.252	2022	11.2	03:37	404.896
2017	3.3	08:33	369.062	2017	18.3	18:25	404.650	2022	26.2	23:25	367.789	2022	11.3	00:03	404.268
2017	30.3	14:32	363.854	2017	15.4	12:04	405.475	2022	24.3	00:37	369.760	2022	7.4	21:10	404.438
2017	27.4	18:14	359.327	2017	12.5	21:51	406.210	2022	19.4	17:13	365.143	2022	5.5	14:46	405.285
2017	26.5	03:20	357.208	2017	9.6	00:21	406.401	2022	17.5	17:27	360.298	2022	2.6	03:13	406.192
2017	23.6	12:50	357.937	2017	6.7	06:28	405.934	2022	15.6	01:23	357.432	2022	29.6	08:07	406.580
2017	21.7	19:11	361.236	2017	2.8	19:54	405.025	2022	13.7	11:05	357.264	2022	26.7	12:21	406.274
2017	18.8	15:19	366.121	2017	30.8	13:23	404.308	2022	10.8	19:08	359.828	2022	22.8	23:52	405.418
2017	13.9	18:06	369.860	2017	27.9	08:50	404.348	2022	7.9	20:18	364.492	2022	19.9	16:43	404.556
2017	9.10	07:54	366.855	2017	25.10	04:26	405.154	2022	4.10	18:33	369.325	2022	17.10	12:19	404.328
2017	6.11	01:10	361.438	2017	21.11	19:53	406.132	2022	29.10	16:35	368.290	2022	14.11	07:40	404.921
2017	4.12	09:45	357.492	2017	19.12	02:25	406.603	2022	26.11	02:31	362.826	2022	12.12	01:28	405.869
2018	1.1	22:48	356.565	2018	15.1	03:09	406.464	2022	24.12	09:26	358.270	2022	x	x	x
2018	30.1	10:56	358.993	2018	11.2	15:16	405.700	2023	21.1	21:56	356.569	2023	8.1	10:19	406.458
2018	27.2	15:39	363.932	2018	11.3	10:13	404.678	2023	19.2	10:05	358.267	2023	4.2	09:54	406.476
2018	26.3	19:16	369.106	2018	8.4	07:31	404.144	2023	19.3	16:12	362.696	2023	3.3	19:00	405.889
2018	20.4	16:41	368.714	2018	6.5	02:35	404.457	2023	16.4	04:23	367.968	2023	31.3	13:16	404.919
2018	17.5	23:04	363.776	2018	2.6	18:34	405.317	2023	11.5	07:04	369.343	2023	28.4	08:43	404.299
2018	15.6	01:52	359.503	2018	30.6	04:43	406.061	2023	7.6	01:05	364.861	2023	26.5	03:39	404.509
2018	13.7	10:24	357.431	2018	27.7	07:43	406.223	2023	5.7	00:24	360.149	2023	22.6	20:30	405.385
2018	10.8	20:06	358.078	2018	23.8	13:22	405.746	2023	2.8	07:52	357.311	2023	20.7	08:56	406.289
2018	8.9	03:19	361.351	2018	20.9	02:53	404.876	2023	30.8	17:54	357.181	2023	16.8	13:54	406.634
2018	6.10	00:26	366.392	2018	17.10	21:15	404.227	2023	28.9	02:59	359.911	2023	12.9	17:42	406.291
2018	31.10	21:23	370.204	2018	14.11	16:55	404.339	2023	26.10	05:02	364.872	2023	10.10	05:41	405.426
2018	26.11	13:12	366.620	2018	12.12	13:25	405.177	2023	21.11	22:01	369.818	2023	6.11	22:48	404.569
2018	24.12	10:48	361.061	2018	x	x	x	2023	16.12	19:52	367.901	2023	4.12	19:41	404.346
2019	21.1	20:59	357.342	2019	9.1	05:28	406.117	2024	13.1	11:34	362.267	2024	1.1	16:28	404.909
2019	19.2	10:02	356.761	2019	5.2	10:28	406.555	2024	10.2	19:52	358.088	2024	29.1	09:14	405.777
2019	19.3	20:47	359.377	2019	4.3	12:26	406.391	2024	10.3	08:04	356.895	2024	25.2	15:58	406.312
2019	17.4	00:04	364.205	2019	1.4	02:13	405.577	2024	7.4	19:50	358.850	2024	23.3	16:44	406.294
2019	13.5	23:52	369.009	2019	28.4	20:19	404.582	2024	6.5	00:03	363.163	2024	20.4	04:10	405.623
2019	8.6	01:15	368.504	2019	26.5	15:27	404.138	2024	2.6	09:16	368.102	2024	17.5	20:58	404.640
2019	5.7	07:00	363.726	2019	23.6	09:49	404.548	2024	27.6	13:30	369.286	2024	14.6	15:35	404.077
2019	2.8	09:11	359.398	2019	21.7	01:58	405.481	2024	24.7	07:40	364.917	2024	12.7	10:10	404.362
2019	30.8	17:53	357.176	2019	17.8	12:49	406.244	2024	21.8	07:02	360.196	2024	9.8	03:31	405.297
2019	28.9	04:24	357.802	2019	13.9	15:32	406.377	2024	18.9	15:23	357.286	2024	5.9	16:53	406.211
2019	26.10	12:38	361.311	2019	10.10	20:28	405.899	2024	17.10	02:50	357.175	2024	2.10	21:39	406.516
2019	23.11	08:40	366.716	2019	7.11	09:35	405.058	2024	14.11	12:14	360.109	2024	29.10	23:50	406.161
2019	18.12	21:25	370.265	2019	5.12	05:08	404.446	2024	12.12	14:20	365.361	2024	26.11	12:55	405.314
2020	3.1	21:20	365.958	2020	2.1	02:30	404.580	2024	x	x	x	2024	24.12	08:24	404.485
2020	10.2	21:27	360.461	2020	29.1	22:26	405.393	2025	8.1	01:01	370.171	2025	21.1	05:54	404.298
2020	10.3	07:30	357.122	2020	26.2	12:34	406.278	2025	2.2	03:47	367.457	2025	18.2	02:10	404.882
2020	7.4	20:08	356.906	2020	24.3	16:23	406.692	2025	1.3	22:21	361.964	2025	17.3	17:36	405.754

2020	6.5	05:03	359.654	2020	20.4	21:00	406.462	2025	30.3	07:25	358.128	2025	14.4	00:48	406.295
2020	3.6	05:38	364.366	2020	18.5	09:44	405.583	2025	27.4	18:17	357.118	2025	11.5	02:46	406.244
Perigäum (Erdnähe)				Apogäum (Erdferne)				Perigäum (Erdnähe)				Apogäum (Erdferne)			
2020	30.6	04:12	368.958	2020	15.6	02:56	404.595	2025	26.5	03:33	359.022	2025	7.6	12:43	405.554
2020	25.7	07:01	368.361	2020	12.7	21:26	404.199	2025	23.6	06:44	363.178	2025	5.7	04:28	404.627
2020	21.8	12:55	363.513	2020	9.8	15:49	404.659	2025	20.7	15:55	368.041	2025	1.8	22:36	404.161
2020	18.9	15:48	359.082	2020	6.9	08:28	405.607	2025	14.8	19:59	369.288	2025	29.8	17:33	404.548
2020	17.10	01:46	356.912	2020	3.10	19:22	406.321	2025	10.9	14:10	364.777	2025	26.9	11:45	405.548
2020	14.11	12:41	357.837	2020	30.10	19:45	406.394	2025	8.10	14:39	359.819	2025	24.10	01:30	406.444
2020	12.12	21:41	361.773	2020	27.11	01:28	405.894	2025	5.11	23:27	356.833	2025	20.11	03:48	406.691
2020	x	x	x	2020	24.12	17:31	405.012	2025	4.12	12:06	356.962	2025	17.12	07:09	406.322
2021	9.1	16:36	367.387	2021	21.1	14:11	404.360	2026	1.1	22:44	360.348	2026	13.1	21:46	405.438
2021	3.2	20:02	370.116	2021	18.2	11:21	404.467	2026	29.1	22:45	365.871	2026	10.2	17:51	404.576
2021	2.3	06:18	365.423	2021	18.3	06:02	405.253	2026	25.2	00:14	370.135	2026	10.3	14:43	404.385
2021	30.3	08:16	360.309	2021	14.4	19:45	406.119	2026	22.3	12:38	366.857	2026	7.4	10:31	404.970
2021	27.4	17:22	357.378	2021	11.5	23:53	406.512	2026	19.4	08:55	361.630	2026	5.5	00:30	405.839
2021	26.5	03:50	357.311	2021	8.6	04:27	406.228	2026	17.5	15:44	358.075	2026	1.6	06:32	406.366
2021	23.6	11:54	359.956	2021	5.7	16:46	405.341	2026	15.6	01:19	357.197	2026	28.6	09:10	406.265
2021	21.7	12:23	364.520	2021	2.8	09:35	404.410	2026	13.7	09:57	359.112	2026	25.7	18:45	405.548
2021	17.8	11:15	369.124	2021	30.8	04:22	404.100	2026	10.8	13:16	363.284	2026	22.8	10:20	404.642
2021	11.9	12:03	368.461	2021	26.9	23:43	404.640	2026	6.9	22:42	368.259	2026	19.9	05:00	404.221
2021	8.10	19:27	363.386	2021	24.10	17:28	405.615	2026	1.10	22:51	369.334	2026	17.10	00:55	404.643
2021	5.11	23:17	358.844	2021	21.11	03:12	406.279	2026	28.10	19:05	364.407	2026	13.11	18:50	405.619
2021	4.12	11:03	356.794	2021	18.12	03:14	406.320	2026	25.11	22:00	359.347	2026	11.12	07:45	406.419
								2026	24.12	09:31	356.650	2026	x	x	x

Datenquelle: www.timeanddate.com