



BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Die Gezeiten – Entstehung und Phänomene





BUNDESAMT FÜR
SEESCHIFFFAHRT
UND
HYDROGRAPHIE

Die Gezeiten – Entstehung und Phänomene

Bundesamt für Seeschifffahrt
und Hydrographie

Stand: März 2022

Die Gezeiten sind die sich regelmäßig wiederholenden Wasserbewegungen der Meere. Sie werden durch die Anziehungskräfte von Mond und Sonne angetrieben. Wie die Meeresgezeiten an einem bestimmten Ort in Erscheinung treten, wird aber auch wesentlich von der Form und Tiefe der Meere beeinflusst. Im vorliegenden Text beschreiben wir die Entstehung der Gezeiten und einige der wichtigsten damit verbundenen Phänomene.

Weitere Informationen zu den Gezeiten an der deutschen Nordseeküste, zu Begriffen aus der Gezeitenkunde und zu Bezugshöhen finden Sie auf der Internetseite des Gezeitendienstes unter www.bsh.de/gezeiteninfo.

© Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Hamburg und Rostock 2022
www.bsh.de

Kontakt: Dr. Andreas Boesch (andreas.boesch@bsh.de)

Wenn Sie Informationen oder Material aus diesem Dokument verwenden, dann zitieren Sie es bitte folgendermaßen:
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (2022). *Die Gezeiten – Entstehung und Phänomene*. Abrufbar unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Gezeiten/gezeiten_node.html [Stand: 02.04.2022]

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Die Entstehung der Gezeiten für Ungeduldige	5
<i>Das Wichtigste wird ohne mathematische Formeln zusammengefasst.</i>	
Kapitel 2: Die Entstehung der Gezeiten für Interessierte	9
<i>Die verschiedenen Aspekte der Gezeiten werden ausführlich erklärt.</i>	
2.1 Das allgemeine Gravitationsgesetz	10
2.2 Die Gravitationsbeschleunigung	11
2.3 Der (ständige) freie Fall	13
2.4 Der (mittlere) zeitliche Abstand zwischen zwei Hochwassern	14
2.5 Auswirkung der Anziehungskraft des Mondes auf die Meere (dynamische Gezeitentheorie)	16
2.6 Halbmonatliche Ungleichheit: Spring- und Nippzeit	18
2.7 Tägliche Ungleichheit: Hohes und niedriges Hochwasser im Wechsel	20

Kapitel 1: Die Entstehung der Gezeiten für Ungeduldige

Die wichtigste Rolle bei der Entstehung der Gezeiten spielen die Anziehungskräfte (Gravitationskräfte) zwischen der Erde und dem Mond. Dabei ist entscheidend, dass sich die Stärke der Anziehungskraft zwischen zwei Körpern verringert, je größer der Abstand zwischen ihnen ist (Abbildung 1).

Für das System aus Erde und Mond folgt daraus: Auf der Seite der Erde, die dem Mond zugewandt ist, ist die Anziehungskraft in Richtung Mond etwas größer, als auf der Seite, die dem Mond abgewandt ist (Abbildung 2). Dadurch verformt sich die Erde und wird zu einem Ellipsoid (ähnlich der Form eines Footballs). Dies trifft sowohl auf die feste Oberfläche der Erde, als auch auf die Meere zu. Die Wirkung der Anziehungskräfte ist jedoch am deutlichsten bei den Meeren zu beobachten, da Flüssigkeiten sich freier ausbreiten können als feste Körper.

Die Gezeitenkraft ist die Differenz aus den örtlich unterschiedlichen Anziehungskräften. In Bezug auf den Erdmittelpunkt entstehen somit auf der mondzugewandten und der mondabgewandten Seite Gebiete, die weitläufig als „Hochwasserberg“ bezeichnet werden (präziser: zwei Maxima im Betrag des Gezeitenpotentials).

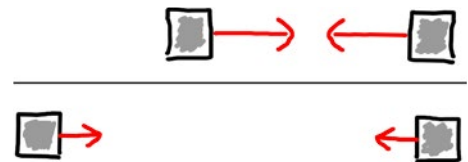


Abbildung 1: Die Stärke und Richtung der Anziehungskräfte zwischen den beiden grauen Körpern wird durch die roten Pfeile symbolisiert. Die Anziehungskraft nimmt ab, wenn sich der Abstand zwischen den beiden Körpern vergrößert (vom oberen zum unteren Bild).

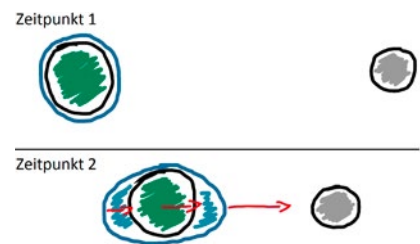


Abbildung 2: Zu einem (hypothetischen) Zeitpunkt 1 betrachten wir Mond (grau) und Erde (grün). Zu einem späteren Zeitpunkt 2 hat sich der Abstand zwischen Mond und Erde aufgrund der Anziehungskräfte verringert. Es kommt dabei zu einer Verformung der Erde (und auch des Mondes). Die Seiten von Erde und Mond, die dem jeweils anderen Körper zugewandt sind, werden schneller in dessen Richtung beschleunigt als die gegenüberliegenden Seiten. Bezogen auf den Erdmittelpunkt entfernt sich sowohl die mondzugewandte Seite, da sie schneller zum Mond beschleunigt wird, als auch die mondabgewandte Seite, da sie langsamer beschleunigt wird.

Aufgrund der gegenseitigen Anziehungskraft müssten Erde und Mond schon längst ineinander gefallen sein. Dies ist offensichtlich nicht der Fall und liegt daran, dass Erde und Mond zusätzlich eine gegensätzliche seitliche Bewegung ausführen. Diese Bewegung sorgt dafür, dass ihr Abstand (im Mittel) gleich bleibt und dass sich Erde und Mond auf Kreisbahnen (genauer: Ellipsen) um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen (Abbildung 3). Man sagt dazu auch, dass sich Erde und Mond im ständigen freien Fall umeinander befinden.

Weil sich die Erde pro Tag einmal um ihre eigene Achse dreht, durchläuft jeder Ort auf der Erde die beiden „Hochwasserberge“ einmal pro Tag. Tatsächlich dauert es von einem Hochwasser bis zum übernächsten im Mittel 24 Stunden und 50 Minuten (mittlerer Mondtag). Der Mondtag ist um 50 Minuten länger, da sich der Mond auf seiner Bahn um die Erde in den 24 Stunden schon etwas weiterbewegt hat. Die Erde muss sich entsprechend länger drehen um zur Ausgangsstellung zurückzukehren (Abbildung 4).

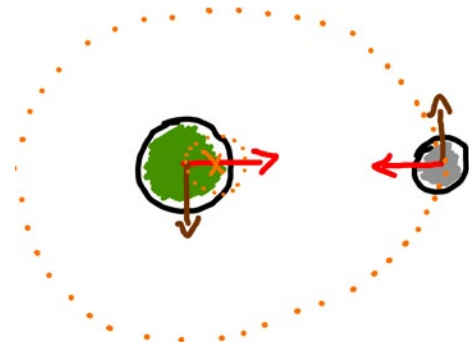


Abbildung 3: Neben der Bewegung aufeinander zu (rote Pfeile) haben Mond (grau) und Erde (grün) auch eine seitliche Bewegungskomponente (braune Pfeile). Diese seitliche Bewegung ist gerade so groß, dass sie die Annäherung durch die Anziehungskräfte ausgleicht. Damit kommen sich Mond und Erde unterm Strich nicht näher, sondern beschreiben Kreisbahnen (orange Punkte) um einen gemeinsamen Schwerpunkt (orange Kreuz).

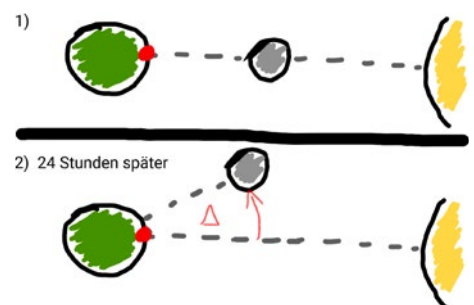


Abbildung 4: Der rot markierte Ort auf der Erde zeigt zum Zeitpunkt 1 in Richtung Mond (und Sonne). 24 Stunden später hat sich die Erde einmal im ihre Achse gedreht und der Ort hat wieder die gleiche Position zur Sonne. Der Mond ist in dieser Zeit um den Winkel Δ weitergezogen.

Der Verlauf der Gezeit, der an einem bestimmten Ort tatsächlich auftritt, hängt zusätzlich zu den hier beschriebenen astronomischen Ursachen auch wesentlich von der Gestalt und der Tiefe des Meeres ab. Die Wassermassen folgen nämlich nicht einfach dem Lauf des Mondes, sondern sie werden vielmehr durch seine Anziehungskraft zum Hin- und Herschwingen innerhalb der Ozeane angeregt (Abbildung 5). Die Gezeiten in kleineren Randmeeren, wie der Nordsee, werden fast ausschließlich durch das Mitschwingen mit den angrenzenden Ozeanen verursacht. Die gezeitenerzeugenden Gestirne beeinflussen also nur zu einem geringen Anteil direkt die Gezeiten in der Nordsee.

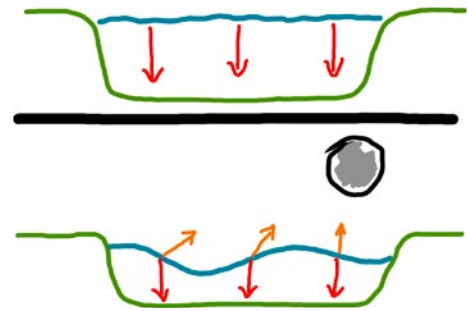


Abbildung 5: Oben: Ohne Anziehungskraft des Mondes richtet sich die Wasseroberfläche (blau) senkrecht zur Anziehungskraft (rot) der Erde aus. Unten: Der Mond stört die Erdanziehungskraft an jedem Ort etwas anders (orange), wodurch die Wassermassen zu Bewegungen angeregt werden. Je nach Form des Meeres können sich dadurch unterschiedliche Schwingungen einstellen.

Kapitel 2: Die Entstehung der Gezeiten für Interessierte

Für die Erklärung der Gezeiten wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nur der Mond als gezeitenerzeugender Körper betrachtet. Die Beschreibungen lassen sich aber direkt auf die Sonne übertragen, die einen etwa halb so großen Beitrag liefert. Der Einfluss der Planeten ist vernachlässigbar klein.

Diese **Themen** werden in den folgenden Abschnitten behandelt:

Die Entstehung der Gezeiten ist eine Folge der Anziehungskraft, die mit dem **allgemeinen Gravitationsgesetz** beschrieben wird, und der dadurch verursachten **Gravitationsbeschleunigung**. Die Bewegungen von Erde und Mond um den gemeinsamen Schwerpunkt (**ständiger freier Fall**) sind entscheidend dafür, dass die beiden Himmelskörper nicht ineinander fallen. Durch die Drehung der Erde um ihre eigene Achse ist jeder Ort einmal pro Tag auf der mondzugewandten Seite und einmal auf der mondabgewandten Seite der Erde. Dies bestimmt den **(mittleren) Abstand zwischen zwei Hochwassern**. Die Höhen und Zeiten von Hoch- und Niedrigwassern variieren mit vielen Periodizitäten. Zwei bekannte sind die **Spring- und Nippzeit** und der ständige Wechsel von höherem und niedrigerem Hochwasser (**tägliche Ungleichheit**).

In diesem Kapitel wird an den jeweiligen Abschnitten auch auf die Abbildungen aus Kapitel 1 verwiesen.

2.1 Das allgemeine Gravitationsgesetz

Der englische Naturforscher **Isaac Newton** formulierte vor ungefähr 300 Jahren das grundlegende Gesetz, welches beschreibt, wie sich Körper (Planeten, Menschen, Äpfel, ...) aufgrund ihrer Masse gegenseitig anziehen. Dieses Gesetz umfasst folgende drei Aussagen (vgl. Abbildungen 1 und 6):

- Jeder Körper zieht jeden anderen Körper an. Man sagt, zwischen den Körpern herrscht eine Anziehungskraft (Gravitationskraft).
- Die Stärke der Gravitationskraft, die zwei Körper aufeinander ausüben, ist proportional zu dem Produkt ihrer Massen. Wenn man die Masse eines Körpers verdoppelt, dann verdoppelt sich auch die Gravitationskraft zwischen den beiden Körpern.
- Die Stärke der Gravitationskraft, die zwei Körper aufeinander ausüben, fällt mit dem Quadrat des Abstands zwischen ihren beiden Zentren ab. Wenn man den Abstand zwischen zwei Körpern verdoppelt (Faktor 2), dann verringert sich die Gravitationskraft um den Faktor $2^2=4$.

Diese Aussagen lassen sich in einer mathematischen Formel zusammenfassen (hier: für zwei Körper):

$$F_g = G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$$

Dabei ist F_g die Gravitationskraft, M_1 und M_2 die Massen der beiden betrachteten Körper, r der Abstand zwischen den Zentren der Körper und G die Gravitationskonstante, die experimentell bestimmt wurde. Die Gravitationskraft ist für beide Körper gleich groß (auch wenn sie unterschiedliche Massen haben), wirkt aber jeweils in die entgegengesetzte Richtung (Abbildung 6).

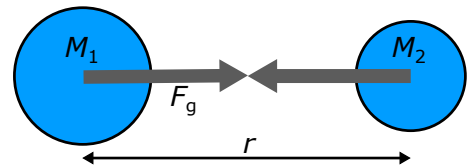


Abbildung 6: Das allgemeine Gravitationsgesetz beschreibt die Anziehungskraft F_g zwischen zwei Körpern mit Massen M_1 und M_2 .

2.2 Die Gravitationsbeschleunigung

Die Gravitationskraft sorgt dafür, dass sich Körper gegenseitig anziehen, das heißt zueinander hin beschleunigt werden. Die Gravitationsbeschleunigung, die ein Körper erfährt, hängt nicht von seiner eigenen Masse ab, sondern nur von der Masse des anderen Körpers. Wie bei der Gravitationskraft, fällt die Stärke der Beschleunigung mit dem Quadrat des Abstands ab. Mathematisch ausgedrückt:

$$a_1 = \frac{F_g}{M_1} = G \cdot \frac{M_2}{r^2}$$

Dabei ist a_1 die Beschleunigung des ersten Körpers der Masse M_1 in Richtung des zweiten Körpers der Masse M_2 (restliche Symbole wie in Abschnitt 2.1).

In Abbildung 7 betrachten wir bei einem Gedankenexperiment eine grüne und zwei blaue Kugel. Die grüne Kugel repräsentiert den festen Erdkörper. Die beiden blauen Kugeln stehen für die Wassermasse der Meere auf der dem Mond zugewandten beziehungsweise der dem Mond abgewandten Seite. Zum Zeitpunkt t_0 (Anfangszustand) berühren sich die drei Kugeln. Jede Kugel erfährt eine andere Gravitationsbeschleunigung, die mit dem Abstand zum Mond abnimmt. Dies wird durch die schwarzen Pfeile verdeutlicht.

Zu einem späteren Zeitpunkt t_1 sind alle Kugeln näher am Mond, aber die Abstände zueinander haben sich auch verändert. Die untere blaue Kugel ist stärker beschleunigt worden als die grüne und die grüne ist stärker beschleunigt worden als die obere blaue.

Überträgt man dieses Experiment auf die Wassermassen der Erde, dann ergibt sich jeweils ein „Hochwasserberg“ auf der mondzugewandten und auf der mondabgewandten Seite der Erde (siehe auch Abbildung 2).

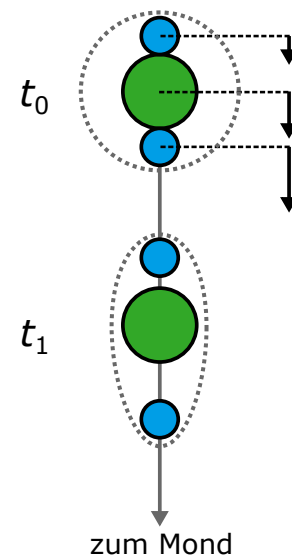


Abbildung 7: Die drei Kugeln werden aufgrund der unterschiedlichen Abstände unterschiedlich schnell in Richtung des Mondes beschleunigt.

Bei der Beschleunigung gibt es noch folgendes zu beachten: Die Gravitationsbeschleunigung in Richtung Mond lässt sich an jedem Ort in zwei Anteile aufteilen. Ein Anteil wirkt senkrecht zur Erdoberfläche (radial, blauer Pfeil in Abbildung 8), der andere Anteil wirkt parallel zur Erdoberfläche (horizontal, roter Pfeil in Abbildung 8). Die Summe dieser beiden Komponenten ergibt die Gesamtbeschleunigung (grauer Pfeil). An der mondzugewandten Seite ist die Beschleunigung in Richtung des Mondes circa 0.000001 m/s^2 (hier gibt es nur die radiale Komponente der Beschleunigung). In die entgegengesetzte Richtung wirkt gleichzeitig die Schwerebeschleunigung der Erde mit circa 10 m/s^2 , die das Wasser in Richtung Erde zieht. Die Anziehungskraft der Erde ist also 10 Millionen Mal größer als die des Mondes und der Mond kann deshalb das Wasser nicht einfach von der Erde „hochziehen“. Die effektive Beschleunigung in Richtung Mond ist dort am größten, wo sie senkrecht zum Radius der Erde stattfindet (nur horizontale Komponente) und somit nicht gegen die Schwerebeschleunigung der Erde arbeiten muss.

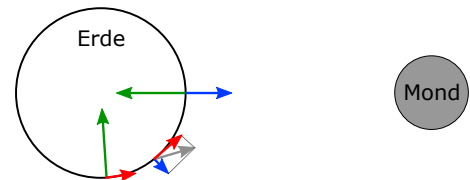


Abbildung 8: Die Beschleunigung in Richtung Mond an einem beliebigen Punkt auf der Erdoberfläche (grauer Pfeil) setzt sich aus einer horizontalen Komponente (roter Pfeil) und einer radialen Komponente (blauer Pfeil) zusammen. Am mond nächsten Punkt gibt es nur eine radiale Komponente, die direkt gegen die sehr viel stärkere Schwerebeschleunigung der Erde (grüner Pfeil) wirkt. Alle Größen sind nicht maßstabsgerecht.

2.3 Der (ständige) freie Fall

Der ständige freie Fall beschreibt warum Erde und Mond nicht ineinander fallen, obwohl sie sich durch die Gravitationskraft gegenseitig anziehen. Das folgende kurze Beispiel, soll dies verdeutlichen (vgl. Abbildung 9):

Stellen Sie sich vor, Sie stehen auf einem sehr, sehr hohen Turm. Sie sind so hoch, dass Sie sich außerhalb der Atmosphäre befinden und der Luftwiderstand im Folgenden vernachlässigt werden kann. Nun lassen Sie einen Ball fallen, der sich dann im freien Fall befindet bis er am Fuße des Turmes auf der Erde aufschlägt (Szenario Nr. 1 mit gestrichelter Linie).

Nun wiederholen Sie das Experiment mit einer kleinen Veränderung. Sie lassen den Ball nicht einfach fallen, sondern schießen ihn waagrecht vom Turm. Der Ball fällt jetzt nicht einfach senkrecht nach unten, sondern bewegt sich auch ein Stück vom Turm weg. Je härter Sie schießen, desto weiter weg vom Turm landet der Ball (Szenario Nr. 2 mit durchgezogener Linie).

Nehmen Sie in einem weiteren Versuch an, dass Sie die Abschussgeschwindigkeit dramatisch erhöhen können, vielleicht unter Verwendung einer Rakete, die den Ball waagrecht von der Turmplattform wegschießt. Der Ball verschwindet dann in den Tiefen des Weltalls (Szenario Nr. 3 mit Strich-Punkt-Linie).

Im letzten Durchgang passen Sie die Abschussgeschwindigkeit genau so weit an, dass das Szenario Nr. 4 aus Abbildung 9 eintritt. Wenn der Ball im Fallen ein Stück an Höhe verloren hat, dann ist er aufgrund der seitlichen Bewegung schon so weit vom Turm weggekommen, dass die Erdoberfläche unter ihm auch schon etwas tiefer liegt. Das liegt daran, dass die Erde eine Kugel ist. Der Ball hat also effektiv gar nicht an Höhe verloren, da der Abstand zum Erdboden gleich geblieben ist.

Mit der richtigen horizontalen Geschwindigkeit kann eine Situation erreicht werden, in der sich ein Körper im ständigen freien Fall um die Erde befindet. Er befindet sich dann in einem Orbit um die Erde. Nach diesem Prinzip bewegen sich unter anderem Satelliten und auch der Mond um die Erde. Genauer ausgedrückt bewegen sich sowohl Mond als auch Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt.

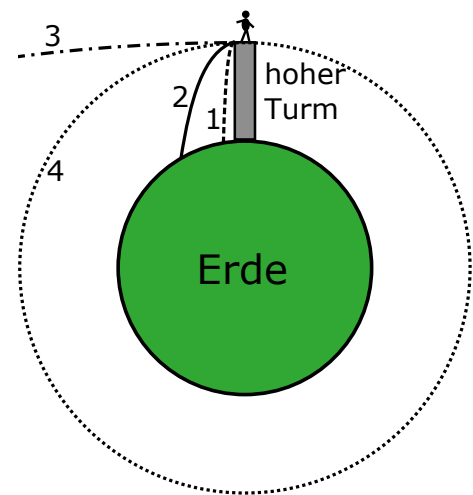


Abbildung 9: Je größer die horizontale Geschwindigkeit beim Abschuss, desto weiter weg vom Turm landet der Ball. Siehe Text für Erklärung der vier eingezeichneten Szenarien.

2.4 Der (mittlere) zeitliche Abstand zwischen zwei Hochwassern

Durch die Drehung der Erde um ihre eigene Achse ist jeder Ort auf der Erde einmal pro Tag auf der mondzugewandten Seite und einmal auf der mondabgewandten Seite. Eine volle Umdrehung der Erde dauert von der Sonne aus gesehen 24 Stunden (Sonnentag). Während dieser Zeit bewegt sich auch der Mond weiter (nach einem Monat hat er die Erde einmal umrundet). Damit ein Ort auf der Erde wieder die gleiche Position zum Mond erreicht, muss sich die Erde jedes Mal noch etwas weiterdrehen (vgl. Abbildung 4). Aber für wie lange genau?

Allgemein gilt: **Strecke = Zeit · Geschwindigkeit**

Mit der bekannten Zeit von 24 Stunden für eine Umdrehung relativ zur Sonne, kann man die (Winkel-)Geschwindigkeit (ω) der Erddrehung berechnen:

$$\omega = \frac{360^\circ}{24\text{h}} = 15^\circ/\text{h}$$

Im Laufe eines Tages dreht sich der Mond weiter um die Erde. Für den Mondtag (m) muss deshalb eine um den Winkel Δ längere (Winkel-)Strecke zurückgelegt werden, wenn man die Geschwindigkeit (ω) der Erdrotation beibehält:

$$m = \frac{360^\circ + \Delta}{15^\circ/\text{h}}$$

Die zusätzlich zurückgelegte Strecke Δ lässt sich aus den Positionen (mittlere ekliptikale Längen) von Sonne (s) und Mond (h) jeweils zum Anfang (Index A) und am Ende (Index E) eines Mondtages berechnen:


$$\Delta = (s_E - s_A) - (h_E - h_A) = m \cdot \dot{s} - m \cdot \dot{h} = m(\dot{s} - \dot{h})$$

Im zweiten Schritt wurde wieder die allgemeine Gleichung **Strecke = Zeit · Geschwindigkeit** benutzt, die beschreibt, wie weit sich Sonne und Mond innerhalb eines Mondtages (m) in der Ekliptik weiterbewegen. Dabei geben \dot{s} und \dot{h} die (Winkel-)Geschwindigkeiten von Mond beziehungsweise Sonne an. Der Ausdruck $(\dot{s} - \dot{h})$ beschreibt, wie schnell sich der (Winkel-)Abstand zwischen Sonne und Mond verändert (Elongation). Es ist die Geschwindigkeit des synodischen Monats mit der Periode $\tau_{\text{syn}} = 360^\circ / (\dot{s} - \dot{h}) = 708,7341 \text{ h} = 29,5306 \text{ d}$

$$\text{Somit erhält man: } m = \frac{360^\circ + m(\dot{s} - \dot{h})}{15^\circ/\text{h}}$$

$$\text{Nach } m \text{ auflösen ergibt: } m = \frac{360^\circ}{15^\circ/\text{h} - (\dot{s} - \dot{h})} = \frac{360^\circ}{15^\circ/\text{h} - \frac{360^\circ}{\tau_{\text{syn}}}} = 24,8412 \text{ h}$$

Der Mondtag ist also $0,8412 \text{ h} = 50,472 \text{ min}$ länger als der Sonnentag.



Von einem Hochwasser bis zum übernächsten Hochwasser vergehen also etwa **24 Stunden und 50 Minuten** (bei halbtätigen Gezeiten). Die mittlere Tidendauer zwischen zwei Hochwasser liegt somit bei **12 Stunden und 25 Minuten**. Die Dauer der einzelnen Tiden variiert um diesen Wert und hängt unter anderem davon ab, ob gerade Spring- oder Nippzeit herrscht (siehe Abschnitt 2.6).

2.5 Auswirkung der Anziehungskraft des Mondes auf die Meere (dynamische Gezeiten- theorie)

Die Wassermassen der Meere sind bestrebt, sich mit ihrer Oberfläche stets senkrecht zur augenblicklichen Richtung der Schwerkraft einzustellen (vgl. Abbildung 5). **Die Anziehungskraft des Mondes wirkt wie eine Störung auf die Schwerkraft der Erde.** Diese Störung variiert mit der Zeit und dem Ort, da sich die Position des Mondes ständig ändert und jeder Punkt auf der Erde laufend eine andere Richtung und Entfernung zum Mond einnimmt. Infolge dieser Schwerkraftstörungen geraten die Wassermassen der Ozeane in Schwingung. Dabei beschreiben die einzelnen Wasserteilchen langgestreckte, fast völlig waagerechte Bahnen um ihre mittleren Lagen. Diese waagerechten Bewegungen werden **Gezeitenströme** genannt. Die Hebungen und Senkungen der Wasseroberfläche, die durch das Anhäufen und Abziehen der Wassermassen entstehen, heißen Gezeiten.

Aufgrund der großen Wellenlängen von einigen tausend Kilometern können die Gezeitenwellen nur in den Ozeanen auftreten. Die Gezeiten kleinerer Randmeere, wie zum Beispiel die der Nordsee, werden fast ausschließlich durch das Mitschwingen mit angrenzenden Ozeanen verursacht. Man sagt, dass die Wassermassen in den Meeren **ein System von erzwungenen Schwingungen** darstellen. Nur zu einem geringen Anteil werden die Gezeiten in den Randmeeren durch den unmittelbaren Einfluss der gezeitenerzeugenden Gestirne erzeugt. Die Gezeiten an einem bestimmten Ort brauchen daher keineswegs dem Verlauf der örtlichen Schwerkraftstörung zu ähneln.

Die Art, in der sich die Gezeiten-schwingungen in den Meeren ausbilden, hängt wesentlich von der Gestalt und der Tiefe der Ozeane und Randmeere ab.

Bei den Schwingungen können sogenannte Resonanzphänomene auftreten. Abbildung 10 zeigt ein stark vereinfachtes Modell eines Wasserbeckens, mit einer geschlossenen Seite und einer offenen Seite (wie die Hälfte einer Badewanne). Über die offene Seite kann Energie zugeführt werden, die die Wassermassen zum Schwingen anregt (ähnlich, als ob Sie mit der Hand regelmäßig Wellen in der Badewanne produzieren). Wenn die Frequenz der Anregung zur Größe des Wasserbeckens (hier die

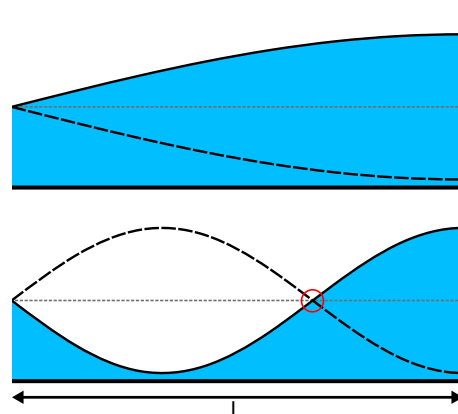


Abbildung 10: Stehende Wellen in einem Wasserbecken mit einer offenen und einer geschlossenen Seite. Zwei mögliche stehende Wellen mit Wellenlängen $L/4$ (oben) und $3 \cdot L/4$ (unten). Es können sich Knotenpunkte (roter Kreis) bilden, an denen die Wellen immer in der Ruhelage (graue Linie) bleiben.

Länge L) passt, dann bilden sich sogenannte **stehende Wellen**. Diese können eine unterschiedliche Anzahl an Knotenpunkten haben, an denen keine Auslenkung der Wasseroberfläche stattfindet (in Abbildung 10 mit einem roten Kreis markiert). Insbesondere an den Rändern können die Wellen hohe Amplituden annehmen, was unter anderem den hohen Tidenhub in manchen Küstenregionen erklärt.

In der Realität sind die Formen der Meeresbecken natürlich viel komplexer. Aber auch in der Nordsee gibt es Orte, an denen es fast keinen Tidenhub gibt (amphidromische Punkte), während an anderen Orten der Tidenhub mehrere Meter beträgt. Es können auch Fälle auftreten, in denen bestimmte Frequenzen verstärkt oder unterdrückt werden. Dies führt zu verschiedenen Gezeitenformen:

- **halbtägige Gezeiten:** im Laufe eines Tages (Mondtages) treten zwei Hochwasser und zwei Niedrigwasser ein. Diese Gezeitenform herrscht in der gesamten Nordsee und ist dominierend im Atlantik.
- **eintägige Gezeiten:** im Laufe eines Tages (Mondtages) treten ein Hochwasser und ein Niedrigwasser ein. Diese Gezeitenform tritt zum Beispiel regional begrenzt im Golf von Mexiko, an der Westküste Australiens und im Südchinesischen Meer auf.
- **gemischte Gezeiten:** die beiden im Laufe eines Tages eintretenden Hoch- und Niedrigwasser sind in ihren Höhen stark voneinander unterschiedlich, oder es wechseln sich halbtägige und eintägige Gezeiten ab. Gemischte Gezeiten treten meistens in Übergangsbereichen von reinen halbtägigen und reinen ganztägigen Gezeiten auf.

2.6 Halbmonatliche Ungleichheit: Spring- und Nippzeit

In den folgenden zwei Abschnitten betrachten wir zwei regelmäßige Gezeitenvariationen, sogenannte Ungleichheiten. Als Ungleichheit bezeichnet man eine astronomisch bedingte Abweichung eines einzelnen, das heißt zu einer einzelnen Tide gehörigen, Gezeitenwertes von dem entsprechenden Mittelwert.

Für die halbmonatliche Ungleichheit müssen wir neben dem Mond auch die Sonne als gezeitenerzeugenden Körper mit einbeziehen. Sie ist nämlich von der Mondphase (Vollmond, Halbmond, Neumond, ...) abhängig, das heißt von der Lage von Erde, Mond und Sonne zueinander. Sie hat eine Periode von einem halben synodischen Monat. Der synodische Monat ist der Zeitraum zwischen zwei gleichen Mondphasen und hat eine Dauer von 29,53 Tagen.

Die halbmonatliche Ungleichheit kommt zustande, da sich die Anziehungskräfte zwischen Mond und Erde beziehungsweise zwischen Sonne und Erde gegenseitig verstärken oder abschwächen können. Die Gezeiten werden im Wesentlichen vom Mond bestimmt. Die Sonne verstärkt oder verringert die Wirkung des Mondes.

Im Allgemeinen spricht man von der **Springzeit**, wenn Sonne, Erde und Mond auf einer Geraden liegen. Dann ist Neumond oder Vollmond und die gezeitenerzeugenden Kräfte von Mond und Sonne wirken entlang der gleichen Achse und verstärken sich dadurch (Abbildung 11).

Die resultierende Gezeit hat einen **größeren Tidenhub** als diejenige, die durch den Mond allein erzeugt wird (Abbildung 12). Der höchste Hochwasserstand (Springhochwasser) findet an der deutschen Nordseeküste circa 1 bis 2 Tage nach Neumond beziehungsweise Vollmond statt.

Diese **Springverspätung** kommt dadurch zustande, dass die Gezeiten in der Nordsee fast ausschließlich durch das Mitschwingen mit dem angrenzenden Atlantik verursacht werden. An der deutschen Nordseeküste gelten die vier Tage ab Neubeziehungsweise Vollmond als **Springzeit**.

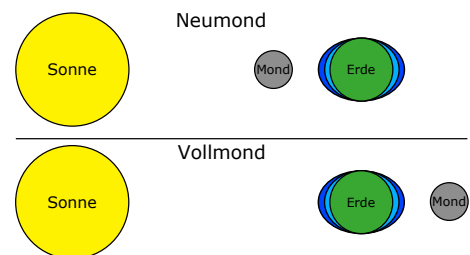


Abbildung 11: Zur Springzeit liegen Sonne, Mond und Erde auf einer Geraden. Dies entspricht den Zeiten von Neumond und Vollmond. Dunkelblaue Bereiche: Vom Mond verursachte „Hochwasserberge“. Hellblaue Bereiche: Von der Sonne verursachte „Hochwasserberge“. Nicht maßstabsgetreu.

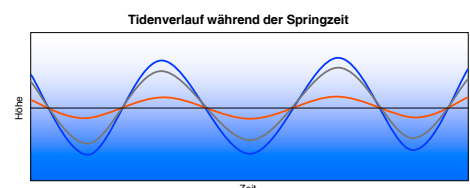


Abbildung 12: Die Tide des Mondes (grau) und die Tide der Sonne (rot) sind während der Springzeit in Phase, sodass die Gesamttide (blau) erhöht ist.

Etwa sieben Tage nach Voll- beziehungsweise Neumond hat der Mond ein Viertel seiner Bahn um die Erde zurückgelegt. Erde, Mond und Sonne bilden einen rechten Winkel. Dieser Zeitpunkt wird im Allgemeinen **Nippzeit** genannt. Die gezeitenerzeugenden Kräfte von Mond und Sonne wirken jetzt senkrecht zueinander und kompensieren sich teilweise (Abbildung 13). Die resultierende Gezeit hat einen **kleineren Tidenhub** als diejenige, die durch den Mond allein erzeugt wird (Abbildung 14). Analog zur Springzeit gelten an der deutschen Nordseeküste die 4 Tage ab Halbmond als **Nippzeit**.

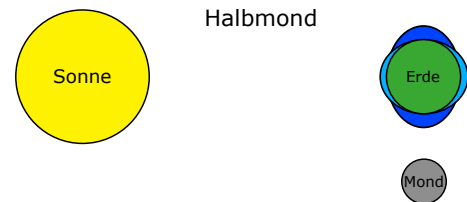


Abbildung 13: Zur Nippzeit bilden Sonne, Mond und Erde einen rechten Winkel. Dies entspricht den Zeiten des Halbmondes. Dunkelblaue Bereiche: Vom Mond verursachte „Hochwasserberge“. Hellblaue Bereiche: Von der Sonne verursachte „Hochwasserberge“. Nicht maßstabsgetreu.

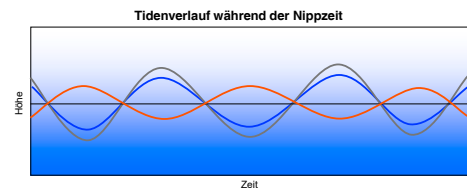


Abbildung 14: Die Tide des Mondes (grau) und die Tide der Sonne (rot) sind maximal außer Phase. Deshalb ist die Gesamtide (blau) niedriger als die Mondtide.

2.7 Tägliche Ungleichheit: Hohes und niedriges Hoch- wasser im Wechsel

Ein Blick in die Gezeitentafeln zeigt folgendes: (fast) jeden Tag gibt es ein höheres und ein niedrigeres Hochwasser. Hohes und niedriges Hochwasser wechseln sich gegenseitig ab.

Dies hängt damit zusammen, dass der **Äquator der Erde und die Bahn des Mondes nicht in der Ekliptik** liegen (Abbildung 15). Die Ekliptik ist die Ebene, in der die Erde ihre Bahn um die Sonne zieht. Der Erdäquator ist um $23,5^\circ$ gegenüber der Ekliptik geneigt. Die Bahnebene des Mondes ist um 5° gegenüber der Ekliptik geneigt. Diese Bahnebene ist aber nicht ortsfest, das heißt der Punkt, wo Mondbahnebene und Ekliptik sich schneiden, verschiebt sich langsam. In Abbildung 15 ist eine mögliche Lage der Mondbahn (graue Linie) eingetragen, bei der man die tägliche Ungleichheit besonders deutlich erkennen kann.

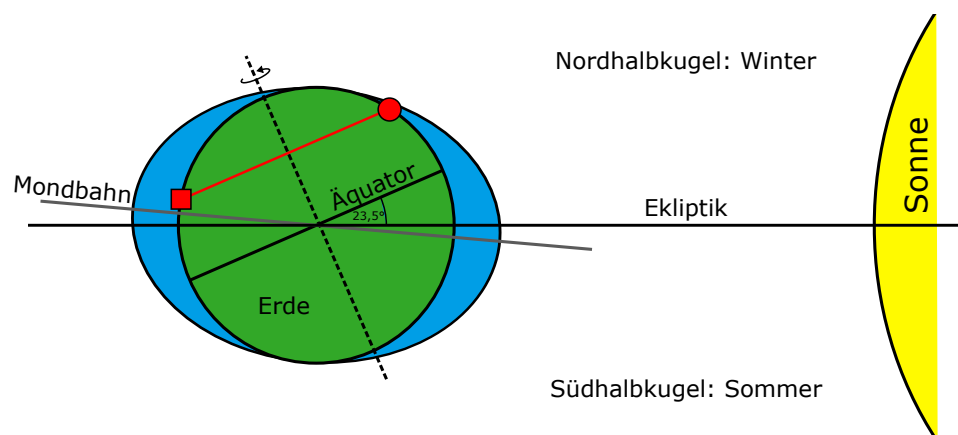
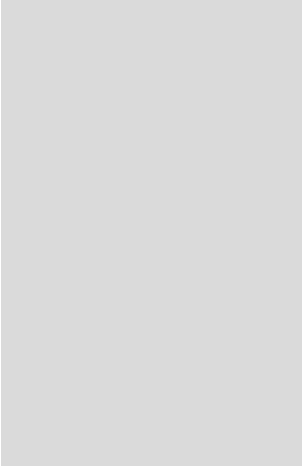


Abbildung 15: Da die Rotationsachse der Erde (gestrichelt Linie) und die Mondbahn (graue Linie) nicht senkrecht zueinander stehen, sind die Hochwasser abwechselnd höher und niedriger (vgl. die Höhe des blauen Hochwasserberges am roten Viereck und am roten Kreis). Nicht maßstabsgetreu.

Wir betrachten einen Ort auf der nördlichen Erdhalbkugel, der sich auf der geographischen Breite der roten Linie befindet. Zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet sich der Ort am roten Viereck. Einen halben Tag später liegt der Ort aufgrund der Erddrehung beim roten Kreis. Die blauen Bereiche deuten die „Hochwasserberge“ an, die aufgrund der gezeitenerzeugenden Kraft des Mondes verursacht werden. Man erkennt, dass das Hochwasser beim roten Viereck höher ist, als das Hochwasser einen halben Tag später am roten Kreis.

Abbildung 15 zeigt die Situation, in der die Nordhalbkugel von der Sonne weggekippt ist. Es ist also auf der Nordhalbkugel Winter und auf der Südhalbkugel Sommer. Das niedrige Hochwasser (beim roten Kreis) tritt also tagsüber auf, während das höhere Hochwasser (beim roten Viereck) nachts auftritt. Da die Gezeiten in der Nordsee maßgeblich durch die Gezeiten im Atlantik bestimmt



werden und das Gezeitensignal vom Atlantik einige Zeit braucht bis es in der Nordsee ankommt, treten in der Nordsee die niedrigen Hochwasser ungefähr in der zweiten Tageshälfte auf und die höheren Hochwasser ungefähr in der ersten Tageshälfte. Im Sommer, beziehungsweise auf der Südhalbkugel, verhält es sich mit den Tageszeiten von höherem und niedrigerem Hochwasser genau umgekehrt.

Zusätzlich zur halbmonatlichen und täglichen Ungleichheit gibt es viele weitere Variationen in den Gezeiten. Die durch Mond und Sonne verursachte Gezeitenbeschleunigung verändert sich an einem Ort ständig mit einer Vielzahl von Perioden. Man spricht daher von einer Überlagerung von vielen Partialtiden, die zu einer resultierenden Tide zusammengefasst werden (ähnlich Abbildungen 12 und 14).