

Ebbe und Flut – ein alter Hut?

Wie war das nochmal mit den Gezeiten? Da ist der Mond, der das Wasser in regelmäßigen Abständen anzieht und dafür sorgt, dass der Meeresspiegel im gleichen Rhythmus steigt und wieder fällt. Und dann war da doch noch was mit Vollmond und Neumond und dem wechselnden Einfluss auf die Steighöhe des Wassers.

Seit Newton wissen wir um die Bedeutung der Gravitationskraft und können sie für konkrete Fälle berechnen. Dabei entstand das Bild, dass der Mond mit seiner Anziehungskraft einen Flutberg auftürmt, unter dem sich die Erde in ihrer täglichen Rotation hinwegdreht. Auch wenn diese Erklärung nicht ganz falsch ist, so ist sie doch in erheblichem Maße unvollständig. Wenn der Flutberg durch den darüberstehenden Mond erzeugt wird, müsste das Wasser nur alle ca. 24 Stunden steigen und nicht alle etwa 12 Stunden, wie das wohl schon jeder beobachtet hat.

Eine weiter gehende Erklärung muss her. Wir wissen, dass die Gravitationskraft vom Abstand abhängt. Der Punkt der Erde, der dem Mond am nächsten ist, wird also am stärksten angezogen. Auf der gegenüber liegender Seite der Erde gibt es einen Punkt, der demgegenüber am schwächsten angezogen wird. Vom Mittelpunkt der Erde aus betrachtet, entfernen sich dadurch beide Punkte in entgegengesetzte Richtungen. Man kann sich das so veranschaulichen, dass auf der dem Mond zugewandten Seite das Wasser von der Erde weggezogen wird und auf der abgewandten Seite die Erde vom Wasser weggezogen wird. Damit ergeben sich zwei gegenüber liegende Flutberge, die den beobachteten Ebbe-Flut-Rhythmus erklären (**Bild 1**). Der zeitliche Abstand zweier Maxima bzw. Minima entspricht einem Mondtag, d.h. 24 Stunden und 50 Minuten. Der Unterschied zum Sonnentag kommt dadurch zustande, dass sich der Mond auf seiner Bahn um die Erde weiterbewegt während die Erde ihre Rotation ausführt.

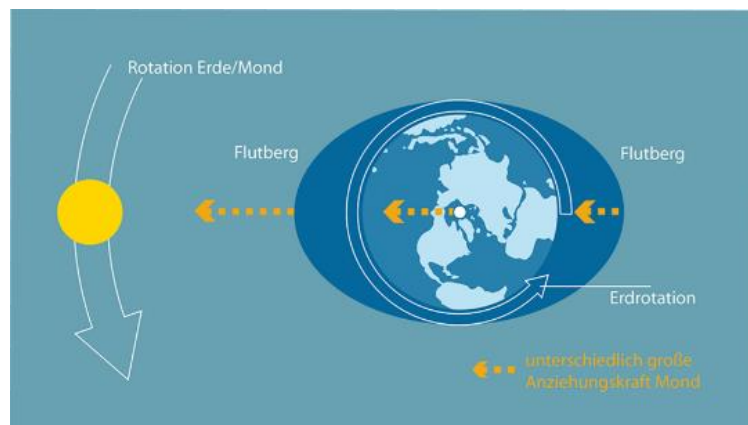


Bild 1 Entstehung der beiden Flutberge

<https://multimar-wattforum.de/watt-global/gezeiten-erklart.html>

Soweit – so gut. Diese Erklärung findet man heute in vielen populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen aber auch Fachleute bedienen sich ihrer. Beschäftigt man sich näher mit dieser zweiten Erklärung, so muss man feststellen, dass auch sie nicht der Weisheit letzter Schluss sein kann und Fragen offen lässt bzw. zu Widersprüchen führt. Die Gezeitenkraft sollte **in jedem Fall** unterhalb des Mondes wirksam sein, allerdings wird dieser Effekt nur in sehr großen Gewässern beobachtet und nicht in Seen oder im Badepool. Dass es nicht die Gravitationskraft des Mondes sein kann, die das Wasser anhebt, wird deutlich bei der Berechnung der Anziehungskraft des Mondes auf Objekte, die sich direkt unter ihm an der Erdoberfläche befinden. Dieser Wert ist außerordentlich klein, nur etwa $1/10.000.000$ der Erdanziehungskraft, also auf jeden Fall viel zu wenig um für den beobachteten Effekt verantwortlich zu sein.

Damit kommen wir zu einem dritten Erklärungsversuch. Dazu betrachten wir zunächst nicht die Punkte der Erdoberfläche, die dem Mond am nächsten bzw. am fernsten sind, sondern diejenigen die sich rechtwinklig zur Verbindungslinie Erdmittelpunkt – Mond befinden, also beispielsweise Nord- und Südpol bei Stellung des Mondes über dem Äquator. An den Polen kann man die Kraftwirkung in zwei Komponenten aufspalten: in eine größere in Richtung Mond parallel zur Verbindungslinie Erdmittelpunkt – Mond und in eine kleinere in Richtung Erdmittelpunkt (die Gezeitenkraft). Letztere sorgt dafür, dass alles ein wenig stärker auf die Erdoberfläche gedrückt wird, als wie es ohne Mond der

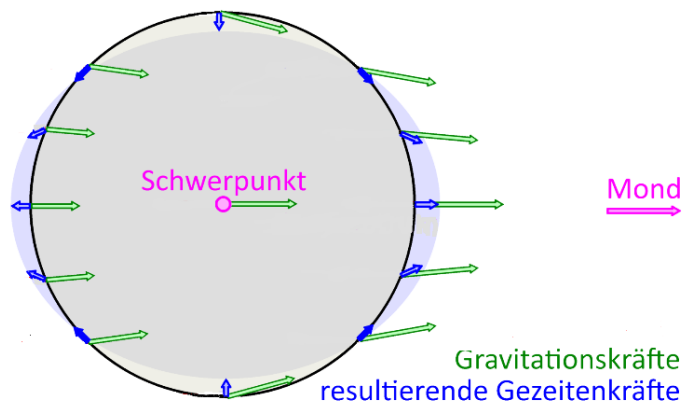
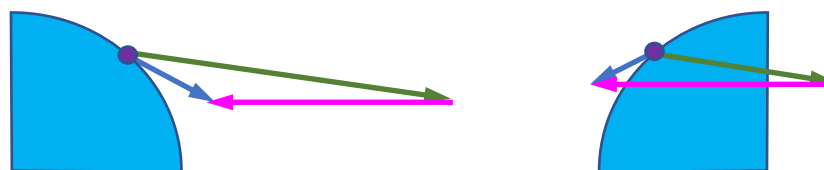


Bild 2 Gezeitenbeschleunigung (blau) durch den Mond für Orte an der Erdoberfläche als Differenz der örtlichen Gravitationsbeschleunigung (grün) und der Beschleunigung des Massenmittelpunktes
<https://de.wikipedia.org/wiki/Gezeiten>

Fall wäre. Als nächstes bewegen wir uns von einem der Pole in Richtung Äquator. Dabei zeigt die jeweilige Gezeitenkraft nach und nach immer mehr vom Boden weg in Richtung Mond, bis sie am Äquator direkt zum Mond zeigt. Nur dort wird etwas zum Mond hingezogen, während an allen anderen Punkten die Dinge ein wenig zur Seite (in Richtung Äquator) geschoben werden (**Bild 2**). Für die vom Mond abgewandte Seite der Erde gilt das vorgenannte sinngemäß, wenn wir uns an die obige zweite Erklärung erinnern. Auf der abgewandten Seite ist der Einfluss dabei etwas geringer als auf der dem Mond zugewandten. **Bild 3** zeigt zu der folgenden Vektorgleichung Prinzipskizzen für beide Fälle:

$$\vec{G}_r = \vec{G}_\ddot{o} - \vec{G}_m$$

\vec{G}_r = resultierende Gezeitenkraft
 $\vec{G}_\ddot{o}$ = örtliche Kraftwirkung durch lunare Gravitation
 \vec{G}_m = Kraftwirkung auf den Massenschwerpunkt der Erde durch den Mond



dem Mond zugewandte Seite

vom Mond abgewandte Seite

Bild 3 Entstehung der resultierenden Gezeitenkräfte

Mit der vorgenannten Erklärung wird auch verständlich, warum Ebbe und Flut nur in großen Gewässern wahrgenommen werden. Nur dort können sich die winzigen Gezeitenkräfte, die auf die einzelnen Wassertropfen wirken, zu Kräften aufsummieren, die ausreichen, einen wahrnehmbaren Flutberg unter dem mond nächsten bzw. mondfernten Punkt aufzubauen. Die Ozeane werden also nicht durch den Mond angehoben (1. Erklärung) und auch nicht auseinandergezogen (2. Erklärung), sondern in Richtung mond nächsten bzw. mondfernten Punkt gedrückt (s.a. <https://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2015/12/25/sternengeschichten-folge-161-die-gezeiten/>).

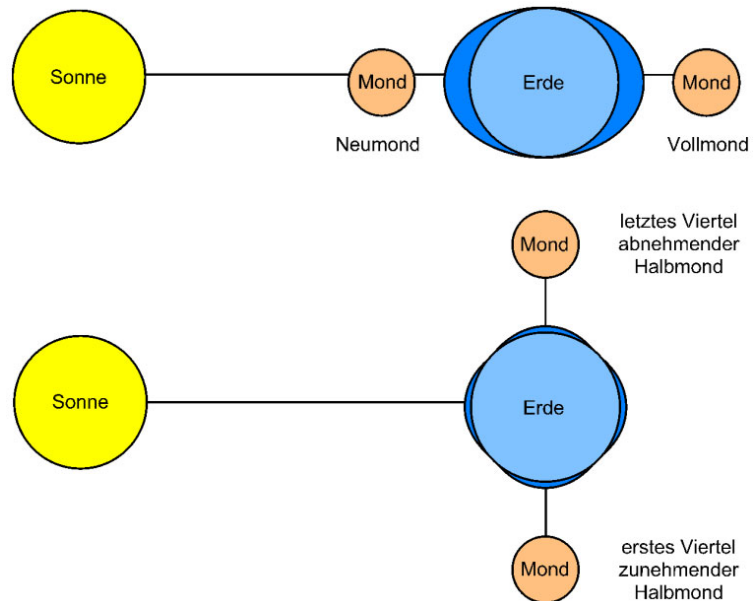
In verschiedenen Quellen findet man weiterhin Hinweise auf einen Einfluss der durch die Erdrotation hervorgerufenen Zentrifugalkraft auf die Gezeiten. Diese ist zwar für die Abplattung der Erde an den Polen und die Aufwulstung am Äquator verantwortlich, spielt aber für das Zustandekommen der Gezeiten keine Rolle (<https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/meere/gezeiten/>).

Bisher haben wir nur den Einfluss des Mondes auf die Gezeiten betrachtet. Daneben gibt es aber auch noch den Schwerkräfteinfluss der Sonne. Obwohl die Sonne einen fast 180-mal größeren gravitativen Einfluss auf die Erde ausübt als der Mond, beträgt die von ihr verursachte Gezeitenbeschleunigung nur 46 % der vom Mond hervorgerufenen. Die Ursache liegt in der wesentlich größeren Entfernung der Sonne (gegenüber dem Mond etwa Faktor 400). Der Gezeiteneinfluss hängt nicht vom Absolutwert

der verursachenden Schwerkraft ab, sondern von der Schwerkraftdifferenz an verschiedenen Punkten der Erde, die umso kleiner wird, je weiter das verursachende Objekt entfernt ist.

Bild 4 Entstehung von Spring- und Nippflut

<https://www.astronomie.de/das-sonnensystem/der-erdtrabant/basiswissen/rhythmen-des-mondes/>



Die Anziehungskräfte von Mond und Sonne ergeben auf der Erde je nach Stellung der drei Himmelskörper zueinander eine unterschiedliche Wirkung. Stehen alle drei in einer Linie (Vollmond oder Neumond), addieren sich die Einflüsse und es kommt zur Springtide oder Springflut. Bilden Sonne, Erde und Mond einen rechten Winkel (abnehmender oder zunehmender Halbmond), haben wir

eine Nipptide mit 4 schwachen Flutbergen im Tagesverlauf (**Bild 4**). Wegen der Trägheit des Wassers und durch die örtlichen Gegebenheiten treten Zeitverzögerungen zwischen den Positionen von Sonne und Mond und den ausgelösten Gezeitenwirkungen auf.

Der Flut„berg“ auf dem offenen Ozean ist relativ gering (zwischen 30 und 80 cm). Der um die Erde wandernde Flutberg ist im Wesentlichen nur eine wellenförmige Ausbreitung einer Wasseraufwölbung entgegengesetzt zur Drehrichtung der Erde, ohne dass es zu stärkeren horizontalen Strömungen kommt. Solche Strömungen treten nur in Küstennähe auf, wo das Wasser relativ flach ist und sich nicht weiter ausbreiten kann, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen begrenzt wird. Während der Tidenhub (Wasserstands-Differenz zwischen Flut und Ebbe) an der Ostsee nur etwa 10 bis 30 cm beträgt, liegt dieser Wert an der deutschen Nordseeküste schon bei ca. 2 bis 3 Metern und erreicht sein Maximum mit bis zu etwa 21 Metern in der Bay of Fundy im Osten Kanadas.

Neben den jeweiligen geografischen Bedingungen beeinflusst auch die Richtung und Stärke der örtlichen Luftbewegung die Steighöhe des Wassers an der Küste. Sturmfluten mit verheerender Wirkung legen davon Zeugnis ab.

Wie wir gesehen haben ist das Thema „Gezeiten“ wesentlich komplexer als es auf den ersten Blick erscheint. Zusätzlich zu den behandelten Faktoren gibt es noch weitere, wenn auch geringere Einflüsse auf den Verlauf von Ebbe und Flut. Wer noch tiefer in die Materie eindringen möchte, wird in den im Text aufgeführten Quellen fündig.