

**Java-Applets
zur Einführung
in den Themenkreis
Gezeiten
für den Physikunterricht**

Version 1.01 (April 2001)

von
Klaus Rotter
klaus@rotters.de

basierend auf einer Zulassungsarbeit am
Physikalisches Institut der Friedrich–Alexander–Universität
Erlangen–Nürnberg

Oktober 2000

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. Gezeitenformen auf der Erde	4
1.2. Gezeiten auf Planeten unseres Sonnensystems	6
2. Entstehung der Gezeiten	8
2.1. Die Kinematik des Erde-Mond-Systems	8
2.2. Der Einfluß der Sonne auf die Gezeiten	14
2.3. Andere Gezeitenursachen	16
3. Berechnung der Gezeiten	19
3.1. Nichtharmonische Methode	19
3.2. Harmonische Methode	20
4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung	26
4.1. Die verwendete Programmiersprache Java	26
4.2. Das Programm zur Vorausberechnung der Gezeiten	26
4.3. Der grundlegende Algorithmus	27
4.4. Simulation einer Gezeitenberechnungsmaschine	31
5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine	33
5.1. Geschichtlicher Überblick	33
5.2. Überlegungen zum Modellentwurf	36
5.3. Aufbau des Modells	40
5.4. Das Funktionsprinzip und Ansteuerung von Schrittmotoren	40
5.5. Steuerung des Modells	46
A. Anhang	51
A.1. Verwendete Begriffe	51
A.2. Verwendete Adressen	53
A.3. Abbildungsverzeichnis	54
A.4. Literaturverzeichnis	56

1. Einleitung

Die *Gezeiten des Meeres* gehören zu den Phänomenen, die gerade Menschen aus abseits der Küsten gelegenen Gebieten besonders faszinieren. Der erste Kontakt an der Nordsee ist zu meist dann ein besonderes Erlebnis, wenn man als Süddeutscher das erste Mal einen *Deich* erklimmt um einen Blick auf das Meer zu werfen, und wegen Ebbe kein Wasser zu sehen ist.

Beschäftigt man sich näher mit diesem Phänomen, zeigt es sich, dass die Gezeiten weltweit ganz verschieden sein können. Es gibt Meere, wie Ostsee und Mittelmeer, da tritt eine Gezeitenerscheinung gar nicht auf, während anderswo, wie z.B in Kanada bis zu 15 m Tidenhub beobachtet werden kann. Auf dem freien Ozean ist die maximale Wasserstandsänderung oft unterhalb eines Meters.

Auch existieren nicht überall auf der Welt zwei Hochwasser pro Tag es gibt auch Küstengebiete mit nur einem Hochwasser innerhalb 24 Stunden.

Schülerinnen und Schülern, die sich mit diesem Gebiet auseinandersetzen, wollen auch oft eine detaillierten Erklärung des Phänomens Gezeiten wissen. Ebenso wird oft die Frage gestellt, wie es denn möglich ist, Hoch- und Niedrigwasser an den Küsten überhaupt vorausberechnen zu können.

Bei einem Besuch im *Deutschen Museum* in München wurde das Thema Gezeiten erneut angestoßen. In der Abteilung *Schifffahrt* steht der zweite deutsche Gezeitenrechner von 1939, eine Analogrechenmaschine. Zu dem Bestreben, die Möglichkeit der Gezeitenvorhersage zu verstehen und selbst zukünftige Gezeiten berechnen zu können kam der Wunsch, diese komplexe Maschine zu erklären und ein Modell zu bauen, das die wesentlichen Funktionen zeigt.

Im Rahmen dieser Zulassungsarbeit wurden im Wesentlichen folgende Ziele verfolgt:

- Erklärung der Entstehung der Gezeiten auf einem für Schüler zugänglichen Niveau.
- Erstellung von Applets (das sind Programme, die innerhalb eines Webbrowsers ablaufen können) in der Programmiersprache Java, um Gezeiten vorausberechnen zu können. Die Programmiersprache Java wurde bewusst gewählt, da zum einen nur so Programme direkt im Internet-Browser ablaufen und zum anderen ist es die wohl z. Zt. am weitesten verbreitete systemunabhängige Sprache.
- Bau eines Modells einer analogen Gezeitenberechnungsmaschine, mit dessen Hilfe die wesentlichen Eigenschaften einer solchen Maschine dargestellt werden können.

Die Darstellungen der schülergerechten Theorie von Ebbe und Flut gehen auf den Artikel von Prof. Schneider [Sch89] und der Zulassungsarbeit von J. Kretschmann [Kre94] zurück. Das BASIC Programm von J. Kretschmann (basierend auf [SHO85]) bildete auch die Basis für das Java Programm, das aber komplett neu erstellt wurde.

1.1. Gezeitenformen auf der Erde

Auf der Erde lassen sich für die meisten Küstenorte die Gezeiten in vier verschiedene Gruppen einteilen.¹ Da ist zunächst die *halbtägige Gezeitenform mit jeweils gleichen Wasserständen* wie sie z. B. für die Nordsee zutrifft. Dies bedeutet, dass innerhalb eines Tages zwei Hochwasser auftreten, deren Tidenhub in etwa gleich ist. An anderen Küsten, wie z.B. San Francisco in den USA spricht man dagegen von einer *halbtägigen Gezeitenform mit unterschiedlichen Wasserständen*, da zwar zwei Hochwasser pro Tag auftreten, sich aber die Wasserstände teilweise erheblich unterscheiden.

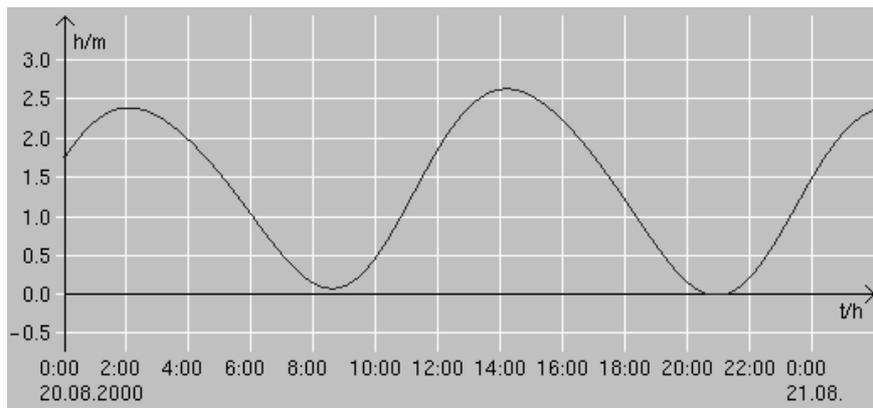


Abbildung 1: Tidenkurve für Helgoland am 20.8.00 (halbtägige Gezeitenform mit gleichen Wasserständen). Erstellt mit dem Java-Applet *Gezeitenberechnung*

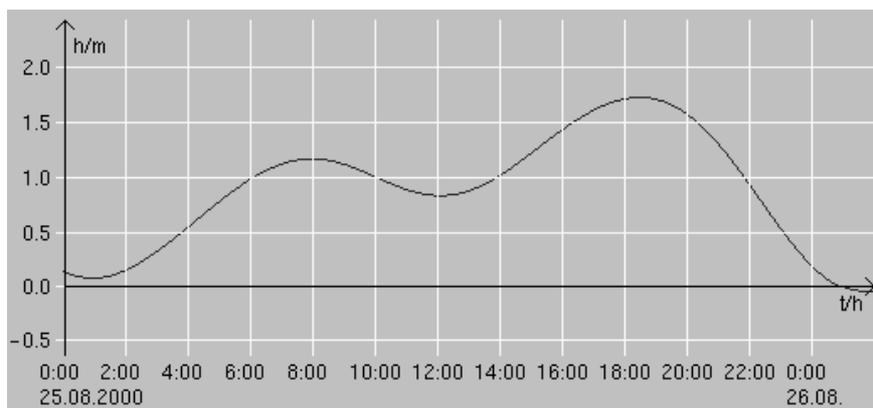


Abbildung 2: Tidenkurve für San Francisco am 25.8.00 (halbtägige Gezeitenform mit verschiedenen Wasserständen). Erstellt mit dem Java-Applet *Gezeitenberechnung*

¹vgl. [Kre94] S.8 und [SHO84] S.9

1. Einleitung

Neben den halbtägigen Gezeitenformen gibt es auch Küsten mit *eintägiger Gezeitenform*, an denen das Hochwasser erst alle 25 Stunden wiederkehrt, wie z.B. in Tanjung Priok auf Java, Indonesien. Auch existiert an manchen Orten, wie z.B. in Albany, Australien eine *gemischte Gezeitenform* bei der sich eintägige und halbtägige Gezeitenformen abwechseln. In der Abbildung der Tidenkurve für *Albany* ist auch sehr schön der Wechsel von täglicher auf die halbtägliche Gezeit zu sehen.

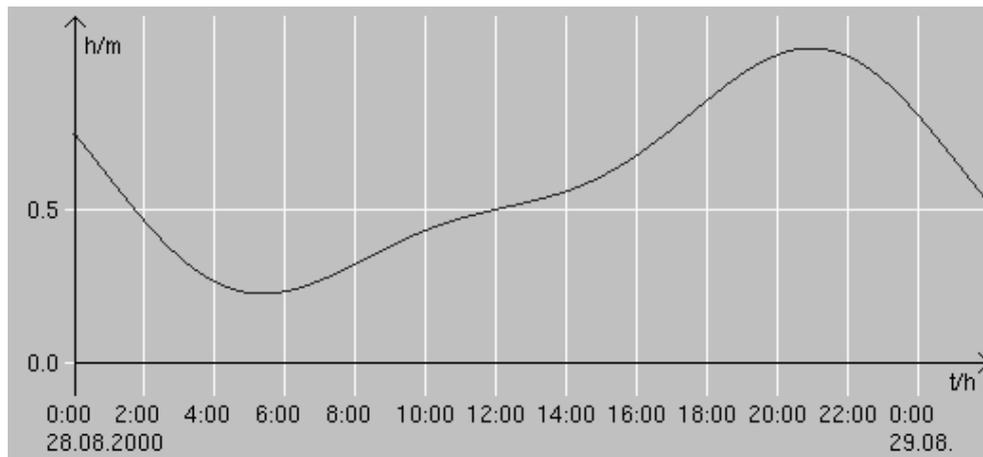


Abbildung 3: Tidenkurve für Tanjung Priok am 28.8.00 (eintägige Gezeitenform). Erstellt mit dem Java-Applet *Gezeitenberechnung*

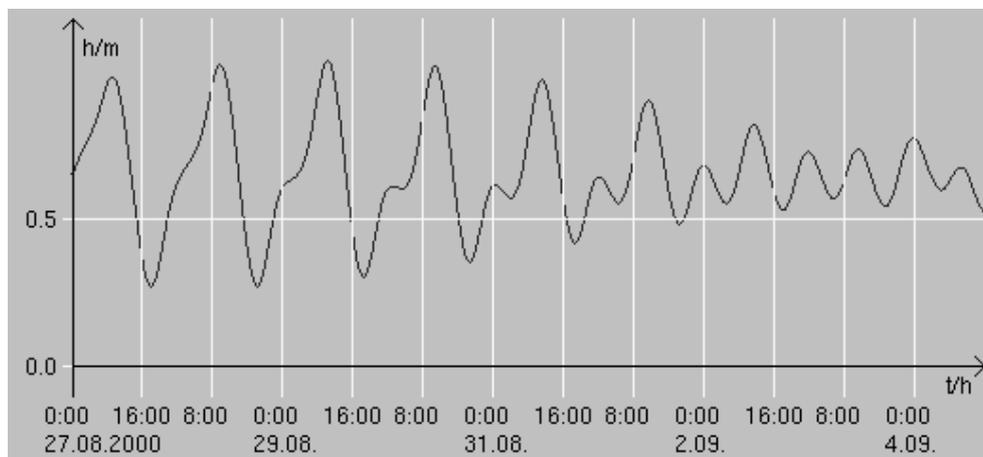


Abbildung 4: Tidenkurven für Albany vom 27.8.–4.9.00 (gemischte Gezeitenform). Erstellt mit dem Java-Applet *Gezeitenberechnung*

1.2. Gezeiten auf Planeten unseres Sonnensystems

Gezeiten sind prinzipiell kein rein irdisches Phänomen. Auch auf Planeten können teilweise gewaltige Gezeitenerscheinungen auftreten. Voraussetzung ist noch nicht einmal das Vorhandensein einer großen Masse eines Stoffes im flüssigen Zustand. So existieren auf der Erde nicht nur die Gezeiten der Meere, sondern auch Gezeiten in der Erde, da der Erdmantel auch den Gravitationskräften unterliegt wie die Meere. Der maximale Tidenhub dieser Erdmantelgezeiten beträgt lediglich 20 cm,² was allerdings schon für das eine oder andere Erdbeben ausreichen kann. Folglich sind im allgemeinen alle Planeten den Gezeitenkräften unterworfen, wenn auch zumeist die Auswirkungen eher unwesentlich sind.

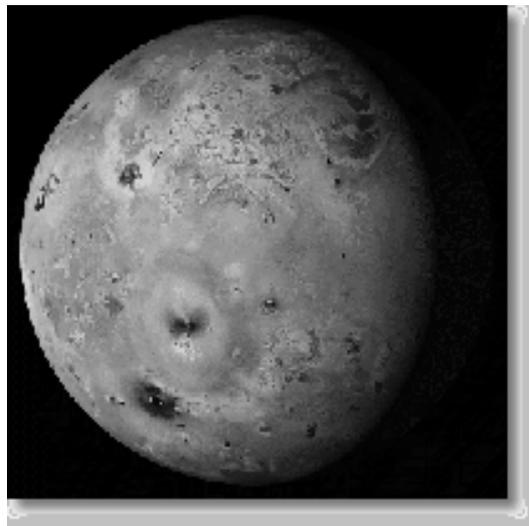


Abbildung 5: Jupiter Mond Io. (Entnommen [Spa00])

Genauer wurde das Gezeitenphänomen bei den Jupitermonden *Io* und *Europa* erforscht, auch wenn zuerst die Auswirkungen der Gezeitenkräfte bemerkt wurden und das Gezeitenphänomen eher die Lösung für unverständliche Probleme darstellte. Man stellte zunächst eine heftige Vulkantätigkeit auf Io fest und war auf der Suche nach dessen Ursache. Es stellte sich heraus, dass durch die wechselseitigen Gravitationskräfte von Jupiter und den anderen benachbarten Monden bis zu 75 m große „Erdgezeiten“ ausgelöst wurden.³ Dadurch heizt sich der Io-Kern so stark auf, dass Teile schmelzen und durch Vulkane auf die Oberfläche durchbrechen können. Der Druck ist teilweise so groß, dass die Eruptionen bis zu 300 km in den Weltraum hinauskatapultiert werden.

In der Abbildung 6 sind die zwei „Springtidenfälle“ von Io zu sehen. Diese treten auf, wenn Io, Ganymed und Jupiter annähernd auf einer Geraden liegen und sich die gezeitenerzeugenden

²vgl. [Spa00] S.1

³vgl. [Spa00] S.2

1. Einleitung



Abbildung 6: Überlagerungen von Gravitationskräften des Jupiters und der Nachbarmonde führt zu einer starken Verformung des Jupitermondes Io. (Entnommen [Spa00])

Kräfte durch Überlagerung maximieren. In diesen Fällen ist die Verformung des Mondes Io am stärksten.

Ein anderes Phänomen entdeckte man 1979 beim Fotografieren des Jupiter Mondes Europa durch die Sonde *Voyager*. Die übermittelten Fotos zeigten eine Oberfläche, die von vielen Rillen durchzogen war, die sich teilweise über hunderte von Kilometern erstreckten. Diese Rillen sind aus vielen kleinen Kreissegmenten zusammengesetzt. Die Forscher wussten zwar, dass der Mond Europa von einer ca 160 km dicken Eisschicht bedeckt ist, aber sie hatten keine Erklärung für das Entstehen solcher zyklodischen Rillen.

Im Jahre 1999 haben dann Wissenschaftler an der *Universität von Arizona, USA* ermittelt, dass diese Rillen aufgrund von Gezeiten eines grossen, unter dem Eis liegenden Ozeans entstanden sein konnten.⁴ Laut ihrer Berechnung beträgt der Tidenhub auf dem Mond Europa ca. 30 m. Wenn nun der Druck, der durch die Gezeitenkräfte unter dem Eis entsteht, zu groß wird, bricht das Eis. Jedes dieser Kreissegmente entsteht während eines Umlaufes des Mondes um den Jupiter in 3.5 Erdtagen. Reichen die gezeitenerzeugenden Kräfte nicht mehr aus, um das Eis zu brechen, kommt der Prozess zum Stillstand, um nach ein paar Stunden, wenn der Druck wieder zunimmt, erneut eine Kurve in eine andere Richtung zu starten.

Sollte sich die Theorie bestätigen, wäre das eine Sensation, denn dann würde auf dem Mond Europa Wasser in flüssiger Form existieren, eine Grundvoraussetzung für die Entstehung von Leben. Die NASA plant deshalb auch für die Zukunft, eine Sonde zu Europa zu schicken, die mit einem Landemodul ausgestattet ist, das sich durch das Eis bohren soll, um nach Leben zu suchen.

⁴vgl. [Hop99]

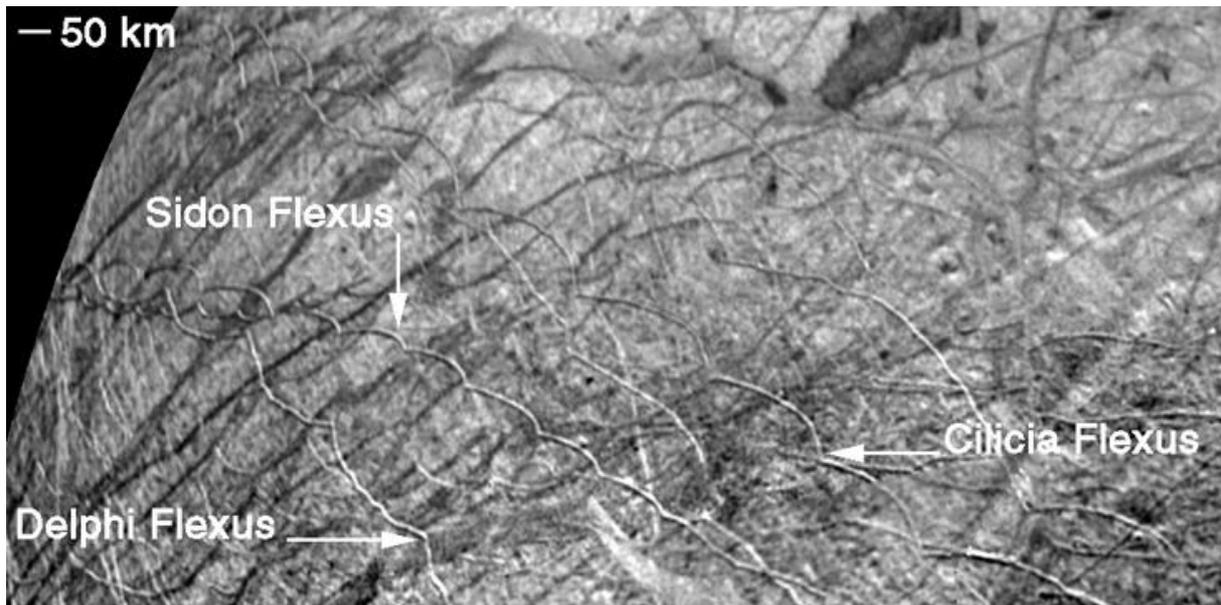


Abbildung 7: Risse im Eis auf Jupitermond Europa, vermutlich bedingt durch Gezeitenaktivität eines großen Ozean unterhalb der Eisschicht. (Entnommen [Hop99])

2. Entstehung der Gezeiten

Ziel dieses Kapitels ist es, die manchmal wenig anschaulichen astronomischen Zusammenhänge bei der Entstehung von Ebbe und Flut auf einem Niveau zu erklären, das Schüler nachvollziehen können. Um dies zu erleichtern kann man die Problematik mithilfe von Animationen in Form von Java-Applets erläutern.

2.1. Die Kinematik des Erde-Mond-Systems

Die Bewegung des Erde-Mond-Systems besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten: Dies sind

- die Rotation Erde–Mond um einen gemeinsamen Schwerpunkt
- die Rotation der Erde um die Erdachse
- die Rotation des Mondes um die Mondachse
- Bewegung des Erde-Mond Systems um die Sonne⁵

⁵vgl. [Sch89] S. 65

2. Entstehung der Gezeiten

Um den grundlegenden Mechanismus dieses Systems besser verstehen zu können, treffen wir folgende Vereinfachungen:⁶

- Beschränkung auf das Erde–Mond–System. Als Zentrum wird der Schwerpunkt der Erde–Mond–Bewegung gewählt. Dies bedeutet, dass die Rotation des Systems Erde–Mond um die Sonne ausgeschaltet ist
- Erdbahn und Mondbahn befinden sich in der gleichen Ebene
- Die Erdachse steht senkrecht auf der Erdbahnebene
- Die Erde ist eine ideale Kugel die gleichmäßig von einer dünnen Wasserschicht bedeckt ist
- Die Erdrotation wird zunächst nicht beachtet

Im einfachsten Fall, wenn das Gravitationsfeld des Mondes homogen wäre, würde genau ein Flutberg auf der mondzugewandten Seite der Erde entstehen. Die Inhomogenität des Gravitationsfeldes des Mondes bedingt aber, dass zwei Flutberge entstehen, einer auf der mondzugewandten und einer auf der mondabgewandten Seite der Erde.

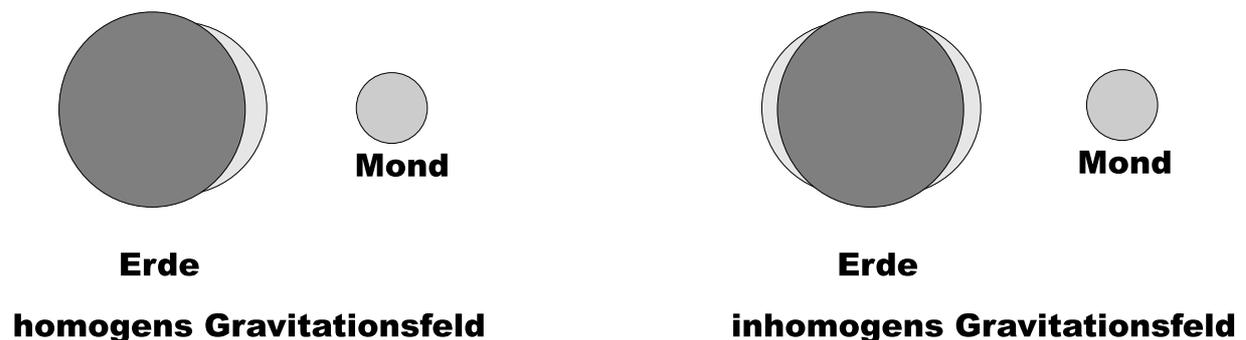


Abbildung 8: Flutberge bei homogenen und inhomogenen Gravitationsfeld des Mondes

Um die Entstehung von zwei Flutbergen besser verstehen zu können, benutzt man ein Bild, welches die Wirkung eines inhomogenen Gravitationsfeldes auf Körper verdeutlicht.

Drei Astronauten halten sich an einer Stange fest, die senkrecht auf die Mondoberfläche gerichtet ist.⁷ Würde das Gravitationsfeld homogen sein und die Astronauten lassen los, würden alle gleich stark von der Erde angezogen werden, d.h. sie erfahren alle die gleiche Beschleunigung. Der Abstand zueinander und zur Stange bliebe gleich.

⁶vgl. [Sch89] S.65 und [Kre94] S.21

⁷vgl. [Kre94] S. 27

2. Entstehung der Gezeiten

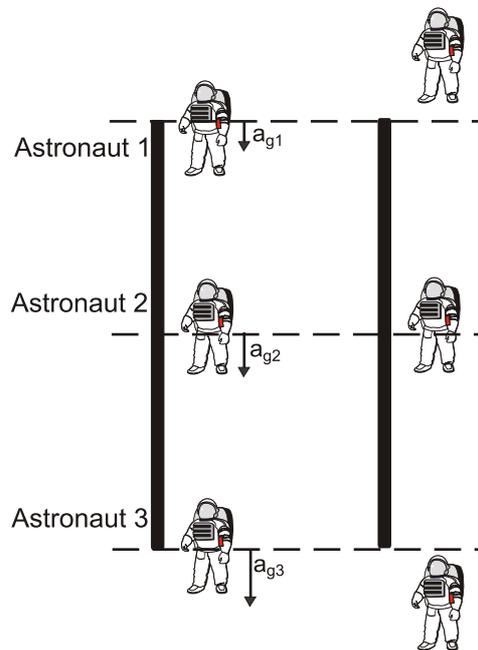


Abbildung 9: Astronauten im Weltall halten sich an einer Stange fest, die senkrecht auf die Mondoberfläche gerichtet ist. Wenn sie loslassen werden sie, wegen der Inhomogenität des Mondgravitationsfelds, unterschiedlich stark beschleunigt

Ist das Feld aber, wie in Wirklichkeit, inhomogen, gilt für die Beschleunigungen $a_{g1} < a_{g2} < a_{g3}$. Astronaut eins erfährt also eine geringere Beschleunigung als Astronaut zwei, während Astronaut drei am stärksten angezogen wird. Auf die Stange wirkt die gleiche Kraft wie auf Astronaut zwei, da er sich auf gleicher Höhe wie der Schwerpunkt der Stange befindet. Astronaut eins bleibt also *hinten* der Stange zurück, während Astronaut drei sich von der Stange wegbewegt. Lediglich Astronaut zwei verändert seine Position relativ zur Stange nicht.

Überträgt man diese Beobachtung auf die Wasserteilchen der Erde, so gilt, dass die Wasserteilchen auf der mondzugewandten Seite *stärker* angezogen werden und sich deshalb ein Flutberg ausbilden kann, während die Wasserteilchen auf der mondabgewandten Seite sozusagen *zurückbleiben*, die Anziehungskraft ist weniger stark und dadurch entsteht der zweite Flutberg.

Dieser einfache stationäre Fall, dass der Mond über einen festen Punkt der Erde stehen würde, wäre allerdings nur von kurzer Dauer. Das Gravitationsfeld des Mondes bewirkt ja auch eine Beschleunigung der gesamten Erde in Richtung des Mondes; die Erde würde sich auf den Mond zubewegen und schließlich mit ihm zusammenprallen.

Dies passiert nicht, weil sich der Mond mit konstanter Geschwindigkeit v_M um die Erde dreht. Die Rotation von Erde und Mond um einen gemeinsamen Schwerpunkt sorgt nun durch die Massenträgheit für einen Gleichgewichtszustand.

2. Entstehung der Gezeiten

Dadurch wirkt jetzt auf die Wasserteilchen eine neue Beschleunigungskomponente a_z , die von der Zentripetalbeschleunigung der Rotationsbewegung herrührt.

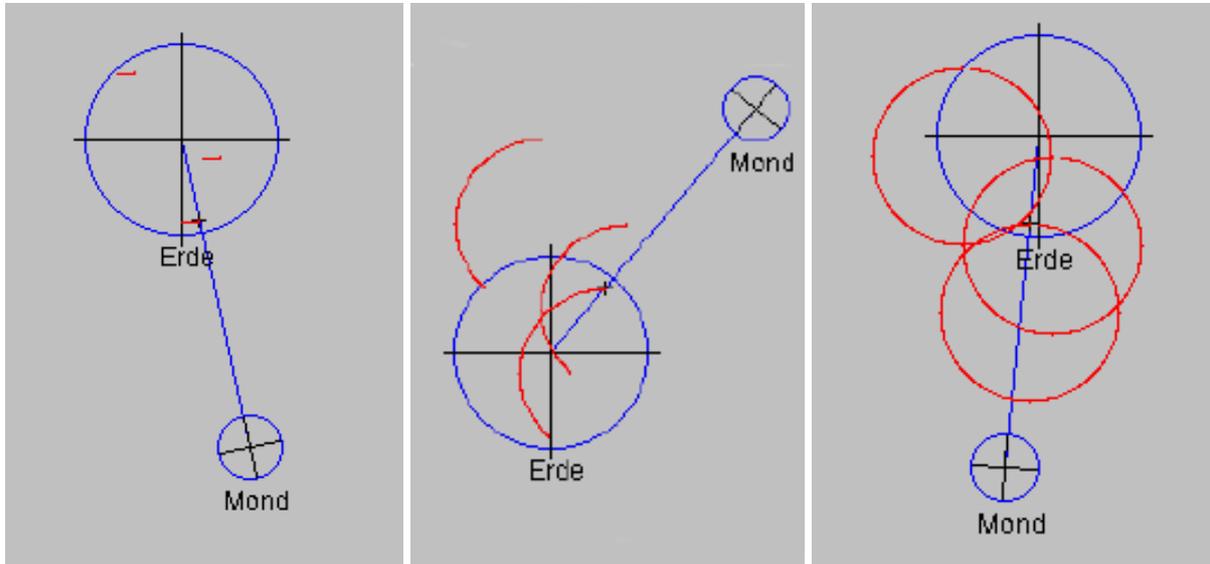


Abbildung 10: Kreisförmige Bewegung fixer Punkte auf der Erde bedingt durch die Rotation der Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt Erde–Mond. Erdrotation ist ausgeschaltet. Erstellt mit dem Java-Applet *Erde-Mond*

Berücksichtigt man erstmal nicht die Erdrotation und zeichnet Kurven von Punkten auf, ist man zunächst verblüfft: Es ergibt sich, dass sich alle Punkte auf der Erde (egal ob nun auf oder in der Erde) bei der Rotation von Erde–Mond um ihren gemeinsamen Schwerpunkt auf Kreisbahnen mit gleichen Radien (entspricht $0.75 \cdot R_e$) bewegen.⁸

Dieser Sachverhalt ist zunächst wenig eingängig. Um ihn zu veranschaulichen, kann man das in [Sch89] beschriebene Folienmodell⁹ zurückgreifen oder das Applet *Bewegung-Erde-Mond*¹⁰ benutzen.

Aus unmittelbarer Konsequenz aus diesem Modell ergibt sich, dass die Punkte P alle die gleiche Zentripetalbeschleunigung z_a erfahren, da ja sowohl Frequenz als auch Radius gleich sind.¹¹ Als weitere Kraft ist nur die vom Gravitationsfeld des Mondes ausgeübte Kraft und damit Beschleunigung relevant (das Gravitationsfeld der Erde spielt, da es sich auf alle Punkte auf der Erdoberfläche gleich auswirkt, keine Rolle).

⁸vgl. [Sch89] S.65ff

⁹siehe [Sch89] S.68

¹⁰zu finden auf der Homepage des Autors: <http://rotter.home.pages.de/gezeiten>

¹¹vgl. [Sch89] S. 69 und [Kre94] S.22

2. Entstehung der Gezeiten

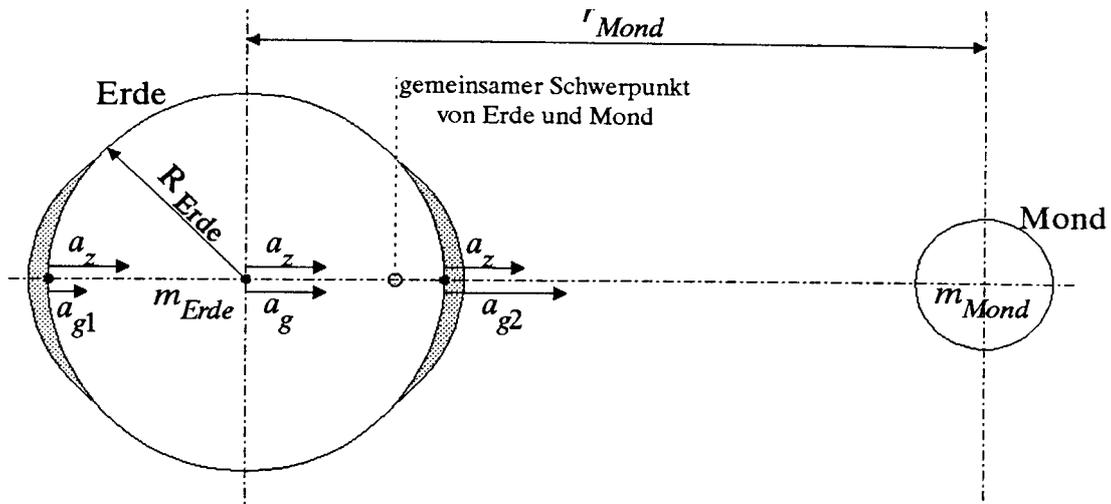


Abbildung 11: Auf der mondabgewandten und der mondzugewandten Seite der Erde entstehen Flutberge. (Entnommen [Kre94] S. 26)

Davon abweichend ist das Gravitationsfeld des Mondes wegen des großen Erddurchmessers inhomogen, das bedeutet, dass die Punkte auf der mondzugewandten Seite stärker angezogen werden (eine größere Beschleunigung a erfahren) als die auf der Mond abgewandten Seite. Für den Erdmittelpunkt gilt, dass die Zentripetalbeschleunigung a_z gleich der Beschleunigung des Mondgravitationsfeldes a_M ist, also

$$a_z = a_M = \frac{Gm_M}{r_M^2} = 3,327 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s^2}$$

mit Graviationskonstante	G	$=$	$6,672 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$
Masse der Erde	m_E	$=$	$5,977 \cdot 10^{24} kg$
Masse des Mondes	m_M	$=$	$1,23 \cdot 10^{-2} m_E = 7,35 \cdot 10^{22} kg$
Erdradius	R_e	$=$	$6,368 \cdot 10^6 m$
Mittlerer Abstand der Mittelpunkte Erde und Mond	r_M	$=$	$60,3R = 384 \cdot 10^6 m$
Masse der Sonne	m_S	$=$	$1,98 \cdot 10^{30} kg$
Mittlerer Abstand der Mittelpunkte Erde und Sonne	r_S	$=$	$149,6 \cdot 10^9 m$

Für die Beträge der Beschleunigungen gilt für den mondfernen Punkt P_1 : $a_{g1} = \frac{Gm_M}{(r_M+R_e)^2} = 3,219 \cdot 10^{-5}$ und für den mondnahen Punkt P_2 : $a_{g2} = \frac{Gm_M}{(r_M-R_e)^2} = 3,440 \cdot 10^{-5}$. Als Differenz Δa_1 ergibt sich:

2. Entstehung der Gezeiten

$$\Delta a_1 = a_z - a_{g1} = \frac{Gm_M}{r_M^2} - \frac{Gm_M}{(r_M + R_e)^2} = Gm_M \left(\frac{1}{r_M^2} - \frac{1}{(r_M + R_e)^2} \right) \approx 1,076 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}$$

ebenso gilt für Δa_2 :

$$\Delta a_2 = a_{g2} - a_z = \frac{Gm_M}{(r_M - R_e)^2} - \frac{Gm_M}{r_M^2} = Gm_M \left(\frac{1}{(r_M - R_e)^2} - \frac{1}{r_M^2} \right) \approx 1,131 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}$$

Berechnet man nicht sofort, sondern versuch erst die Differenz in der Klammer umzuformen, ergibt sich folgendes¹²:

$$\begin{aligned} \Delta a_1 = a_{g1} - a_z &= \frac{Gm_M}{(r_M - R_e)^2} - \frac{Gm_M}{r_M^2} = Gm_M \left(\frac{1}{(r_M - R_e)^2} - \frac{1}{r_M^2} \right) = Gm_M \frac{r_M^2 - (r_M - R_e)^2}{r_M^2 (r_M - R_e)^2} = \\ &= Gm_M \frac{r_M^2 - (r_M^2 - 2r_M R_e + R_e^2)}{r_M^2 (r_M^2 - 2r_M R_e + R_e^2)} = Gm_M \frac{2r_M R_e - R_e^2}{r_M^4 - 2r_M^3 R_e + r_M^2 R_e^2} = 2Gm_M \frac{R_e}{r_M^3} \left(\frac{1 - \frac{R_e}{2r_M}}{1 - \frac{2R_e}{r_M} + \frac{R_e^2}{r_M^2}} \right) \end{aligned}$$

Berücksichtigt man, dass $r_M \gg R_e$, gilt $\frac{R_e}{r_M} \rightarrow 0$ und somit geht der Ausdruck in der rechten Klammer gegen 1. Damit gilt näherungsweise:

$$\Delta a_1 \approx 2Gm_M \frac{R_e}{r_M^3}$$

Analog kann man diese Näherung auch auf Δa_2 anwenden.

$$\Delta a_1 \approx \Delta a_2 \approx 2Gm_M \frac{R_e}{r_M^3} = 1,103 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}$$

Daraus folgt, Δa_1 und Δa_2 sind annähernd betragsgleich. Dies bedeutet, dass auf der mondab- und der mondzugewandten Seite die Fallbeschleunigung g jeweils um den gleichen Betrag reduziert wird, wodurch zwei in etwa gleich große Flutberge entstehen können. Bisher wurde ja die Erdrotation nicht berücksichtigt, d.h. auf Grund der bisher gemachten Überlegungen würde man von zwei Hochwasser in einem siderischen Monat (entspricht der Zeit eines ganzen Umlaufs des Mondes um die Erde, 27 Tage, 7 Stunden, 43 Minuten und 11,5 Sekunden) ausgehen. Berücksichtigt man aber die Erdrotation, folgt daraus, dass nun zweimal *täglich* ein Hochwasser erwartet wird. Allerdings sind es nicht genau zwei Hochwasser pro Tag, da sich ja der Mond innerhalb eines Tages auch ein Stückchen auf seiner Bahn fortbewegt.

¹²vgl. [Kre94] S. 25

2. Entstehung der Gezeiten

Um die Zeitdifferenz genau berechnen zu können, müssen zunächst Winkelgeschwindigkeiten von Erdrotation und Mondumlauf um die Erde berechnet werden:

$$\omega_E = \frac{360^\circ}{1 \text{ Tag}} = \frac{360^\circ}{23 \text{ h } 56 \text{ min } 4 \text{ s}} = 15,04108 \frac{^\circ}{\text{h}}$$

$$\omega_M = \frac{360^\circ}{1 \text{ siderischer Monat}} = \frac{360^\circ}{27 \text{ d } 7 \text{ h } 43 \text{ min } 11,5 \text{ s}} = 0,54901 \frac{^\circ}{\text{h}}$$

Da der Mond nach etwas mehr als einem Tag wieder über dem gleichen Punkt der Erde steht, er sich dabei um den Winkel ϕ_E weiterbewegt hat und die Erde sich im gleichen Zeitraum um $360^\circ + \phi_E$ gedreht hat, unterscheidet sich die Phasenlage der Erdrotation und der Mond-um-die-Erde-Drehung um genau 360° .

Es gilt also:

$$\phi_E = \phi_M + 360^\circ$$

$$\omega_E t = \omega_M t + 360^\circ$$

$$(\omega_E - \omega_M)t = 360^\circ$$

$$t = \frac{360^\circ}{\omega_E - \omega_M} = \frac{360^\circ}{14,49207 \frac{^\circ}{\text{h}}} = 24 \text{ h } 50 \text{ min } 28,2 \text{ s}$$

Dies bedeutet, dass sich der Eintritt des Hochwassers ca. 50min jeden Tag verschiebt und das im Mittel zwischen Hoch- und dem darauffolgende Niedrigwasser der Zeitunterschied $t/4$ also 6h 12min 37s beträgt.¹³

2.2. Der Einfluß der Sonne auf die Gezeiten

Bis jetzt wurde lediglich das System Erde–Mond betrachtet. Auch die Sonne hat einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Entstehung der Gezeiten.

Zunächst wird das System Erde–Sonne isoliert betrachtet. Man kann nun die gleichen Überlegungen anwenden wie auf das System Erde–Mond.¹⁴ Berechnet man mit Hilfe der Näherungsformel die Beschleunigungsdifferenzen für die Sonne, ergibt sich:

$$a_{\text{Sonne}} = 5,025 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Prinzipiell würden also auch bei der Sonne zwei Flutberge entstehen, die, berücksichtigt man die Erdrotation, zweimal pro Tag die Erde umrunden. Hochwasser wäre jeweils, wenn die Sonne im Zenit stehen würde, also um 12:00 Uhr und um 0:00 Uhr; Niedrigwasser wäre dann

¹³vgl. [Kre94] S.29

¹⁴vgl. [Kre94] S. 30

2. Entstehung der Gezeiten

um 6:00 Uhr und um 18:00 Uhr. Zu berücksichtigen wären nur eventuelle Ungenauigkeiten, bedingt durch die Zeitzonen.

Interessant ist auch das Verhältnis der Gezeitenbeschleunigungen von Mond und Sonne:

$$\frac{a_{\text{GezeitMond}}}{a_{\text{GezeitSonne}}} = 2,2$$

Die gezeitenerzeugenden Kräfte des Mondes sind also ca. 2 mal größer als die der Sonne. Je nach der Stellung von Erde, Mond und Sonne in unserem Sonnensystem können sich diese Kräfte nun verstärken oder vermindern. Stehen Sonne, Erde und Mond annähernd auf einer Geraden, gibt es zwei Fälle: Zum einen kann der Mond zwischen Erde und Sonne stehen (dies wird als *Neumond* bezeichnet) oder die Erde steht zum anderen zwischen Sonne und Mond (dies wird dann als *Vollmond* bezeichnet).

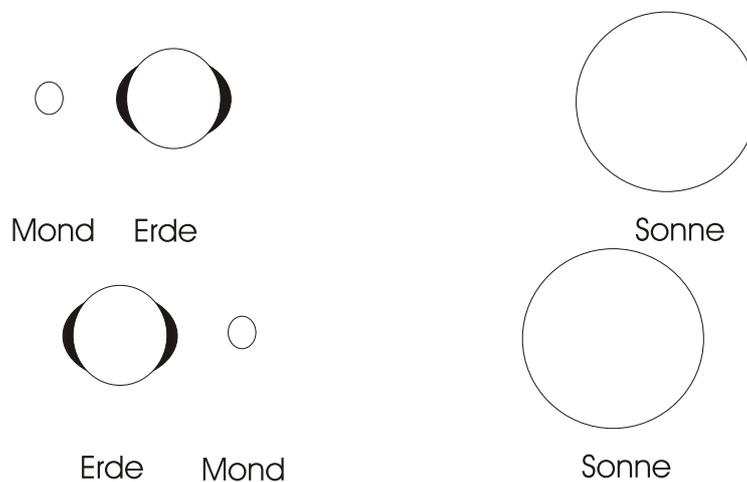


Abbildung 12: Kräfteüberlagerung zur Springzeit. Erde, Mond und Sonne stehen annähernd auf einer Geraden. Die gezeitenerzeugenden Kräfte addieren sich. Oben: Vollmond, unten: Neumond.

In beiden Fällen addieren sich die gezeitenerzeugenden Kräfte von Sonne und Mond und man spricht von einer *Springflut*.¹⁵ Das Hochwasser ist höher als im Mittel. Diese Fälle treten zweimal während eines *siederischen Monats* ein, da der Mond innerhalb dieser Zeit die Erde einmal umrundet.

Stehen dagegen Erde, Sonne und Mond annähernd im rechten Winkel zueinander, heben sich die gezeitenerzeugenden Kräfte von Mond und Sonne teilweise auf.¹⁶ Da die gezeitenerzeugende Kraft des Mondes ca. 2,2 mal größer ist als die der Sonne, bleibt sie die dominierende,

¹⁵vgl. [Kre94] S. 32

¹⁶vgl. [Kre94] S. 33

wird jedoch vermindert. In diesem Fall spricht man von *Nippflut*. Das Hochwasser ist niedriger als im Mittel.

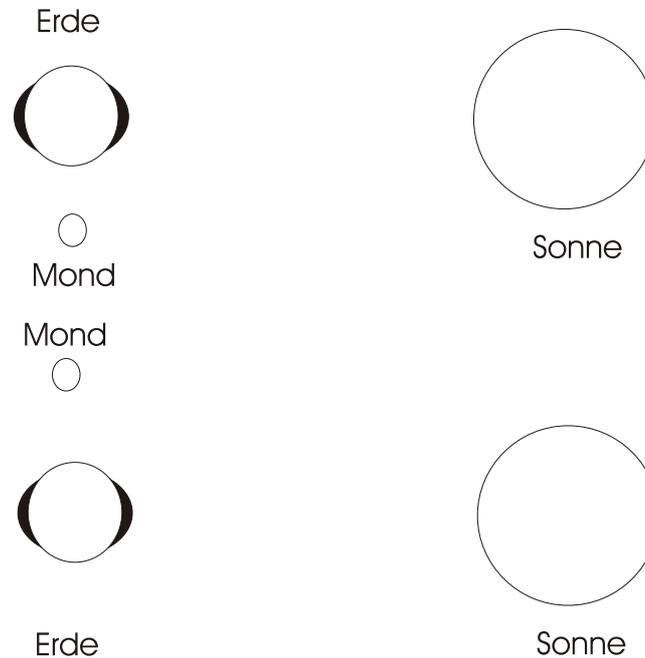


Abbildung 13: Kräfteüberlagerung zur Nippzeit. Erde, Mond und Sonne stehen annähernd im rechten Winkel zueinander. Die gezeitenerzeugenden Kräfte reduzieren sich. Oben: Erstes Viertel, unten: letztes Viertel.

2.3. Andere Gezeitenursachen

Weitere Einflüsse auf die Höhe der Gezeiten sind die bisher vernachlässigte *Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene*, die *Neigung der Mondbahnebene gegen die Erdbahnebene* und die *Auswirkung der Kontinente und Meeresbecken*.

Die *Neigung der Erdachse gegen die Erdbahnebene* bewirkt ein periodisches Wechseln der Lage der Flutberge bezüglich des Äquators während eines Umlaufes des Mondes in 27,3 Tagen (siderischer Monat) um die Erde.¹⁷ Dies bedeutet, dass bis auf die Fälle $t = 0,25 \cdot T_{sid}$ ¹⁸ und $t = 0,75 \cdot T_{sid}$ die Flutberge asymmetrisch zur Rotationsachse der Erde liegen was aber auch bewirkt, dass zu den Polkappen hin einer der zwei Flutberge immer weniger stark wahrgenommen werden kann, bis schließlich ab der geographischen Breite von $66,5^\circ$ nur noch ein Flutberg längs eines Breitenkreises auftritt.

¹⁷vgl. [Sch89] S. 76 und [Kre94] S. 34

¹⁸ T_{sid} ist ein siderischer Monat

2. Entstehung der Gezeiten

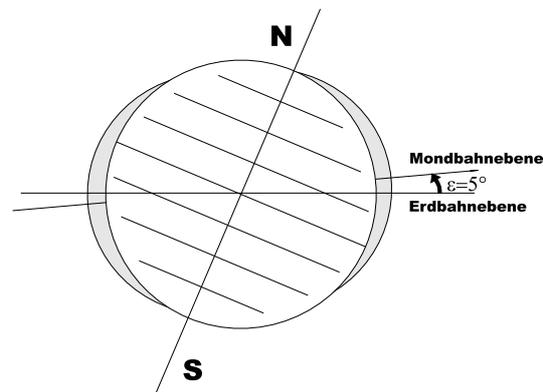


Abbildung 14: Assymetrische Lage der Flutberge zum Äquator, bedingt durch die Neigung von Erdachse zur Erdbahnebene und Mondbahnebene zur Erdbahnebene

Die *Neigung der Mondbahnebene gegen die Erdbahnebene* mit dem Neigungswinkel von $\varepsilon = 5,15^\circ$ verstärkt diesen Effekt noch, da der Mond während seines Umlaufes abwechselnd oberhalb und unterhalb der Erdbahnebene steht. Die Knotenlinie der Mondbahn (Schnittgerade der Mondbahnebene mit der Erdbahn) ist nicht raumfest, sondern umläuft in 18,6 Jahren einmal die Erde, wodurch diese Asymmetrie periodisch geändert wird.

Der Einfluß anderer Himmelskörper auf die Gezeiten der Erde ist sehr gering. So haben Beispielrechnungen in [Kre94]¹⁹ ergeben, dass der massereichste Planet im Sonnensystem (Jupiter) beim geringsten Abstand zur Erde lediglich eine Gezeitenbeschleunigung von $a_{\text{Gezeit Jupiter}} = 6,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erzeugt, dies ist ca. 17000-mal geringer als die Gezeitenbeschleunigung, die durch den Mond erzeugt wird.

Bisher wurde auch der Einfluß der *Kontinente und Meeresbecken* auf die Gezeiten vernachlässigt, jedoch haben diese eine nicht unerhebliche Wirkung auf die Höhe der Flutwelle. Auf dem freien Atlantik beträgt der Tidenhub ca. 30-50 cm. Dringt die Gezeitenwelle in seichte Randmeere mit breiten Zugängen zum Atlantik ein, können daraus, wie z.B. bei der Nordsee, schon 3-4 m werden. In Buchten können dann die Wassermassen bis zu 15 m Tidenhub verursachen, wie z.B. in der Fundy-Bay in Kanada. An anderen Gewässern mit einem kleinen Zugang zu den großen Weltmeeren, wie z.B. die Ostsee und das Mittelmeer, treten dagegen Gezeitenerscheinungen so gut wie nicht auf.

Daraus ergibt sich auch, dass die Wassermenge der Nordsee selbst nicht ausreichen würde, um für nennenswerte Gezeitenerscheinungen zu sorgen. Erst wenn eine (relativ flache) Flutwelle, von vielleicht etlichen hundert Kilometern Breite durch einen Zugang zu einem Randmeer verengt wird, können relativ große Tidenhübe entstehen.

Ein weiteres Problem stellt die Einwirkung der periodisch gezeitenerzeugenden Kräfte auf die Wassermassen von Meeresbecken da. Sollte der Resonanzfall auftreten, d.h. dass die Frequenz

¹⁹siehe [Kre94] S. 36

2. Entstehung der Gezeiten

der gezeitenerzeugenden Kräfte der Resonanzfrequenz der Wassermassen im Meeresbecken entspricht, können so sehr hohe Tidenhübe entstehen. In [Sch89]²⁰ ist eine schöne Methode dargestellt, wie man diesen Sachverhalt Schüler näherbringen kann.

Auf den Einfluß von Wind und Luftdruckschwankungen auf den Wasserstand wurde bisher nicht eingegangen. Bleiben die Abweichungen verhältnismäßig klein, spricht man von einer *Beeinflussung der Gezeiten und Gezeitenströme durch den Wind und die Luftdruckänderungen*. Es ist nahezu unmöglich, diese Einwirkungen in langfristigen Gezeitentafeln zu berücksichtigen, da sie sich oft verändern und Berechnungen lediglich ein- bis zwei Tage im voraus möglich sind.

Allerdings können die Abweichungen in der Höhe bedingt durch Wind und Luftdruck an der Nordseeküste teilweise erheblich sein.

„Als eine allgemeine Regel gilt hier, daß auflandige Winde, also Winde aus südwestlicher bis nördlicher Richtung, eine Erhöhung der Wasserstände hervorrufen, Winde aus den entgegengesetzten Richtungen dagegen eine Erniedrigung. Die stärksten Erhöhungen (Sturmfluten) treten ein, wenn beim Durchzug eines Sturmtiefs durch die nördliche Nordsee der Wind von Südwest über West drehend schließlich auf nordwestliche Richtung umspringt. Die windbedingten Erhöhungen der Hochwasser bei Sturmfluten haben von 1825 an bis zu 4 m betragen. Die stärksten Erniedrigungen der Hochwasser kommen bei anhaltenden starken Südostwinden vor und betragen etwa bis zu 3 m.“²¹

Die Auswirkungen von Sturmfluten auf die Erhöhung des Wasserstandes nimmt von der deutschen Nordseeküste hin zu den westlichen Küsten ab. Während an der deutschen Nordseeküste Erhöhungen um 3 m als *schwere Sturmflut* gelten, gelten an der niederländisch-belgischen Küste bereits welche ab 2 m und bei Dover schon welche um 1,5 m als solche. Auch können bei diesen Küstengebieten Sturmfluten bei nördlichen Winden auftreten, z.B. beim Durchzug eines Sturmtiefs durch die nördliche Nordsee.

Die stärksten Erniedrigungen in der südlichen Nordsee werden beobachtet, wenn ein kräftiges Tief nordwestlich von Irland liegt und über der Nordsee starke südliche Winde herrschen. In der südlichen und westlichen Nordsee können Wasserstandsänderungen auch durch meteorologische Einflüsse hervorgerufen werden, deren Ursprung außerhalb der Nordsee liegt. Der Grund hierfür ist ein rascher Druckanstieg, der einem starken atlantischen Tiefdruckgebiet, das nördlich der Nordsee vorbeizieht, folgt. Unter bestimmten Bedingungen erzeugt so ein Drucksystem eine sogenannte *Fernwelle*, deren Geschwindigkeit in etwa der der Gezeitenwelle entspricht. Sie durchläuft die Nordsee entgegen dem Uhrzeigersinn dem Küstenverlauf folgend und überlagert sich mit der in gleicher Richtung laufenden Gezeitenwelle. Ihre Maximalhöhe erreicht die Welle im Mündungsgebiet der Schelde an der englischen Ostküste, während der Wasserstand zum Norden und Süden hin wieder abnimmt. Beim Eintritt der Welle bei Aberdeen in die Nordsee wurden etwa Erhöhungen von etwa 1 m beobachtet.

²⁰vgl. [Sch89] S.77

²¹siehe [BSH00]

3. Berechnung der Gezeiten

Die Vorausberechnung des Wasserstandes und damit der Gezeiten ist für die Seeschifffahrt von enormer Bedeutung. Es haben sich damit in den letzten Jahrhunderten eine Reihe von namhaften Naturwissenschaftlern (u.a. auch *Newton*, *Bernoulli*, *Laplace*, *Kelvin*) beschäftigt. Daraus entwickelten sich zwei prinzipielle Methoden, um die Gezeiten vorauszusagen.

3.1. Nichtharmonische Methode

Die nonharmonische Methode²² beruht auf dem Zusammenhang zwischen dem Zeitunterschied zweier Hochwasser und dem Durchgang des Mondes durch einen Meridian, der sich in allen Gebieten mit einer halbtägigen Gezeitenform, wie z.B. der Nordsee oder weiten Teilen des Atlantischen Ozeans finden lässt. Es zeigt sich, dass die Zeitdifferenz zweier aufeinanderfolgender Hochwasser (24h 50,4min) genau der Zeitdifferenz zweier Meridiandurchgänge entspricht.

Misst man die Zeitunterschiede zwischen dem Meridiandurchgang und dem darauffolgenden Hochwasser eines Ortes, so erkennt man, dass sie im Mittel immer gleich sind. So kann man verhältnismäßig genau davon ausgehen, dass Hoch- bzw. Niedrigwasser immer nach der berechneten Zeit eintritt.

Beobachtet man die Zeitunterschiede und den Springtidenhub länger und vergleicht sie mit den Mittelwerten, so ergeben sich in regelmässigen Zeitabständen Abweichungen, die *Ungleichheiten*. Aus längeren Aufzeichnungen lassen sich die Parameter der Ungleichheiten relativ genau bestimmen und so zukünftige Gezeitenberechnungen korrigieren. Da auch Meridiandurchgänge des Mondes relativ genau berechnet werden können, lassen sich auf diese Art und Weise sehr genaue Vorhersagen über die Hoch- und Niedrigwasserstände sowie deren Zeiten machen. Dieses Verfahren ist noch heute für die Vorausberechnung der Gezeiten an der Nordsee in Gebrauch.

Die **halbmonatliche Ungleichheit** tritt am deutlichsten bei den Höhen der Gezeiten in Erscheinung. Ihre Periode beträgt einen halben synodischen Monat und sie wird durch die Überlagerung der gezeitenerzeugenden Kräfte von Mond und Sonne bedingt. Sie hat ihr Maxima bei Voll- bzw. Neumond (Springzeit) und ihr Minima bei Nippzeit. Es ist aber nicht so, dass Maxima bzw. Minima genau zur Springzeit bzw. zur Nippzeit eintreten. Aufgrund der Beschaffenheit des Meeresbodens gibt es örtlich mehr oder weniger starke Verzögerungen. Diese Spring- bzw. Nipptidenverzögerungen betragen für Norwegen und an der französische Westküste 1,5 Tage, an der englischen, irischen und nordfranzösischen Küste 2 Tage und an der deutschen Nordseeküste 3 Tage.

Die **monatliche oder parallaktische Ungleichheit** gibt die Schwankung der Gezeiten mit der jeweiligen Entfernung des in einer elliptischen Bahn umlaufenden Mondes von der Erde

²²vgl. [Sag55] S.22ff

3. Berechnung der Gezeiten

wieder. Ihre Periode beträgt in etwa 27,5 Tage (anomalistischer Monat). Durch die elliptische Mondbahn erreichen die Gezeiten beim erdnächsten Punkt (*Perigäum*) ein Maximum und beim erdfernsten Punkt (*Apogäum*) ein Minimum, jeweils wieder mit Verzögerungen, bedingt durch Reibung. Im allgemeinen (bis auf die Ostküste Nordamerikas) sind die Auswirkungen der parallaktischen Ungleichheit geringer als die der halbmonatlichen Ungleichheit.

Analog zu dieser existiert auch eine Ungleichheit für die Sonne, wenn auch deren Periodendauer ein anomalistisches Jahr (365,5 Tage) beträgt.

Die **Deklinations-Ungleichheit** des Mondes ist bedingt durch die Abweichung der Mondbahn von der Äquatorebene. Ihre Periode ist die Zeitdifferenz zwischen zwei Durchgängen durch den Himmelsäquator in derselben Richtung (tropischer Monat). Wegen der langsamen rückwärtigen Drehung der Mondbahn-Ebene ist der tropische Monat etwa einen $\frac{1}{4}$ Tag kürzer als der anomalistische Monat. Steht der Mond in der Äquatorebene, erreicht diese Ungleichheit ein Maximum und bei größter nördlicher bzw. südlicher Deklination ein Minimum. Zumeist sind die Auswirkungen der Deklinations-Ungleichheit geringer als die der beiden zuerst erwähnten Ungleichheiten.

Auch hier existiert ein Analogon in Bezug auf die Sonne mit der Periode eines tropischen Jahres (halbes Sonnenjahr). Sie erreicht ihr Maximum, wenn auch die Sonne in der Äquatorebene steht (am 21. März und 23. September) und ihr Minimum an den Tagen der größten Deklinationen (Sonnenwende, am 21./22. Juni und am 22. Dezember).

Die **tägliche Ungleichheit** wird durch die Stellung von Mond und Sonne zur rotierenden Erde hervorgerufen und bewirkt eine wechselnde Erhöhung und Erniedrigung aufeinanderfolgender Hoch- und Niedrigwasser. Die Periode beträgt einen tropischen Monat. Wiederum eine analoge Wirkung hat die Deklination der Sonne auf die Gezeiten mit der Periode eines ganzen tropischen Jahres, wenn auch hier der Einfluß des Mondes dominiert.

Beide Ungleichheiten erreichen ihr Minimum, wenn das entsprechende Gestirn im Äquator steht und ihr Maximum bei der jeweils größten Deklination des Himmelskörpers.

Die tägliche Ungleichheit ist im Indischen und Pazifischen Ozean, sowie im Persischen und im Golf von Mexico so groß, dass es dort eintägige und gemische Gezeitenformen geben kann.²³ In diesen Gebieten versagt auch häufig die Voraussage mit der *nichtharmonischen Methode*, weil die tägliche Ungleichheit zu komplex ist, um sie mit nur einem Parameter zu beschreiben. Hier verwendet man dann gerne die *harmonische Methode*.

3.2. Harmonische Methode

Der *harmonischen Methode*²⁴ liegt die Annahme zugrunde, dass die gezeitenerzeugenden Kräfte im Wesentlichen eine Überlagerung von harmonischen Bewegungen darstellen, wie z.B. die Eigenrotation der Erde, die Rotation des Mondes um die Erde und die Rotation des

²³vgl. [Kre94] S.41

²⁴vgl. [Lag00] S.2ff, [Sag55] S.26ff und [Kre94] S. 42ff

3. Berechnung der Gezeiten

Erde–Mond–Systems um die Sonne. Es ist also nur nötig, die Parameter für diese harmonischen Bewegungen zu bestimmen und sie zu überlagern, um prinzipiell eine beliebig genaue Voraussage des Wasserstandes treffen zu können.

Jeder dieser harmonischen Bewegungen wird als *Partialtide* oder *Teilgezeit* bezeichnet. Die Frequenzen dieser Tiden leiten sich von den astronomischen Grundfrequenzen ab bzw. sind Linearkombination davon.

Für viele Küstengebiete reicht es aus, nur die 10-20 wichtigsten Partialtiden zu überlagern um damit eine Genauigkeit der Voraussage von unter 1% Abweichung zu erhalten. Es existieren aber auch Orte, wie z.B. Anchorage in Alaska, wo über 100 Teilgezeiten berücksichtigt werden müssen um eine Genauigkeit in der besagten Größenordnung zu erhalten.²⁵

Da die Frequenz dieser Teilgezeiten bekannt ist, stellt sich die Frage, wie für einzelne Häfen bzw. Küstenabschnitte die Amplituden und Phasen der Partialtiden berechnet werden.²⁶ Dazu ist es notwendig, die Gezeitenstände über einen langen Zeitraum (mehrere Jahre, je länger desto genauer) aufzuzeichnen und dann auf die Daten eine Fourier-Transformation durchzuführen. Eine solche Transformation ist nichts anderes als die Zerlegung einer x-beliebigen Kurvenform in eine Anzahl sinusförmiger Kurven, die dann überlagert eine gute Näherung der ursprünglichen Kurvenform ergeben. Die Fourier-Transformation erzeugt also die wichtigen Parameter Frequenz, Phase und Amplitude. Man sortiert nun die erhaltenen Sinuskurven nach der Amplitude und vergleicht die Frequenzen der Sinuskurven mit den stärksten Amplituden mit den Frequenzen der Partialtiden, um dann jeweils Phase und Amplitude zuweisen zu können.

Heutzutage erledigen Computer dieses Verfahren unter Benutzung einer FFT (eine sehr schnelle Fouriertransformation für diskrete Datensätze) in Sekunden bis wenigen Minuten. In [Kre94] wurde beispielhaft eine FFT auf Gezeitenstände angewandt. Die Theorie und Anwendung findet man in [Bro95], sowie Numerikbüchern wie [Scw93], [Häm91] und [Sab93]. Eine leicht verständliche Einführung findet man in [Sae86].

Mathematische betrachtet, kann man jede Partialtide durch einen Ausdruck der Form

$$h_i(t) = A_i \cos(\omega_i t - \phi_i)$$

beschrieben.²⁷ Den Wasserstand h zu einem beliebigen Zeitpunkt berechnet man durch Aufsummierung aller relevanter Teilgezeiten:

$$h(t) = \sum_{i=0}^n A_i \cos(\omega_i t - \phi_i)$$

Für $i = 0$ ist $\omega_i = 0$ und $\phi_i = 0$, so dass A_0 den mittleren Wasserstand für den betreffenden Ort darstellt, welcher je nach Unterlagen auf Seekartennull, Normalnull oder einer anderen Höhe bezogen ist, was Abweichungen in verschiedener Literatur erklärt.

²⁵vgl. [Kre94] S.43

²⁶vgl. [Kre94] S.48

²⁷vgl. [Kre94] S.44 und [Sho85] S. 11

3. Berechnung der Gezeiten

Name	Kürzel	Phasenlage am 1.1.1980	Winkelgeschwindigkeit	Umlaufdauer	Erklärung
mittlerer Montag	T1	0°	372,62°	1,04d	der (mittlere) Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen des Mondes durch denselben Meridian (1.035050 MSD)
tropischer Monat	s	78,16°	13,176396730 $\frac{°}{d}$	27,3 d	der (mittlere) Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen des Mondes durch den Frühlingspunkt (27.321582 MSD)
tropisches Jahr	h	279,82°	0,985647340 $\frac{°}{d}$	1a	der (mittlere) Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt (365.2422 MSD)
Rotation des erdnächsten Punktes der Mondbahn	p	349,50°	0,111404080 $\frac{°}{d}$	8,85 a	der (mittlere) Zeitraum für einen vollständigen Umlauf des erdnächsten Punktes der Mondbahn auf der Himmelskugel
Rotation des aufsteigenden Knotens der Mondbahn	N	208,10°	0,052953920 $\frac{°}{d}$	18,61 a	der (mittlere) Zeitraum für einen vollständigen Umlauf des aufsteigenden Knotens der Mondbahn (Schnittpunkt der aufsteigenden Mondbahn mit der Ekliptik) auf der Himmelskugel
Rotation des sonnennächsten Punktes der Erdbahn	p1	282,60°	0,000047069 $\frac{°}{d}$	20940a	der (mittlere) Zeitraum für einen vollständigen Umlauf des sonnennächsten Punktes der Erdbahn auf der Himmelskugel

Abbildung 15: Tabelle der astronomischen Grundgeschwindigkeiten und deren zugehörige Phasenlage am 1.1.1980 um 0.00 Uhr. MSD: *mittlerer Sonnen Tag*. (Entnommen [Lan00] S.2 und [SHO84] S.15)

3. Berechnung der Gezeiten

Kürzel	Zusammensetzung	Charakter	Beschreibung
S_{sa}	2h	halbjährliche Gezeit	halbjährliche solare Gezeit. In Kombination mit der ganzjährigen solaren Gezeit S_a , beschreibt diese den Einfluß der unterschiedlichen Deklination und des Abstands der Sonne zur bzw. von der Erde. Praktisch überwiegen in dieser Komponente meist die den Meeresspiegel beeinflussenden meteorologischen Variationen
M_m	s - p	monatliche Gezeit	monatliche lunare Gezeit. In dieser Komponente drücken sich die Veränderungen des Abstands Erde-Mond sowie der Umlaufgeschwindigkeit des Mondes bei seinem Umlauf um die Erde aus
M_f	2s	halbmonatliche Gezeit	vierzehntägige lunare Gezeit. Diese Komponente beschreibt den Einfluß der Abweichungen von einem sinusförmigen Verlauf der Deklination des Mondes bei seinem Umlauf um die Erde
O_1	T1 - s	tägliche Gezeit	tägliche lunare Gezeit. Zusammen mit der K1-Gezeit beschreibt diese Gezeit den Einfluß der Deklination des Mondes. Beide tragen maßgeblich zur täglichen Ungleichheit bei
Q_1	T1 - 2s + p	tägliche Gezeit	große tägliche lunare elliptische Gezeit. Berücksichtigt den Effekt der elliptischen Mondumlaufbahn und moduliert Amplitude und Frequenz der O1-Gezeit
P_1	T1 + s - 2h	tägliche Gezeit	solare tägliche Gezeit. Siehe K1-Gezeit
K_1	T1 + s	tägliche Gezeit	luni-solare tägliche Gezeit. Zusammen mit der O1-Gezeit beschreibt diese Gezeit den Einfluß der Deklination des Mondes. Beide tragen maßgeblich zur täglichen Ungleichheit bei. In Kombination mit P1 wird auch der Einfluß der Deklination der Sonne beschrieben
N_2	2T1 - s + p	halbtägige Gezeit	größere lunare elliptische halbtägige Gezeit. Siehe L2-Gezeit
M_2	2T1	halbtägige Gezeit	lunare halbtägige Hauptgezeit. Diese Komponente beschreibt den Effekt der Erdrotation in Bezug auf den Mond
L_2	2T1 + s - p	halbtägige Gezeit	kleinere lunare elliptische halbtägige Gezeit. Diese Komponente moduliert zusammen mit der N2-Gezeit Amplitude und Frequenz der M2-Gezeit. Damit wird der Effekt der elliptischen Mondbahn auf die Bahngeschwindigkeit des Mondes berücksichtigt
S_2	2T1 + 2s + 2h	halbtägige Gezeit	solare halbtägige Hauptgezeit. Diese Komponente beschreibt den Effekt der Erdrotation in Bezug auf die Sonne
K_2	2T1 + 2s	halbtägige Gezeit	luni-solare halbtägige Gezeit. Diese Komponente moduliert Amplitude und Phase der M2- und der S2-Gezeit. Sie beschreibt den Effekt der wechselnden Deklination von Mond und Sonne

Abbildung 16: Tabelle ausgewählter Partialtiden. (Entnommen [Lan00] S.4 und S. 10)

3. Berechnung der Gezeiten

Während heutzutage Computer die Vorausberechnung von Gezeiten übernehmen wurden bis 1975 speziell dafür konstruierte Maschinen eingesetzt.²⁸

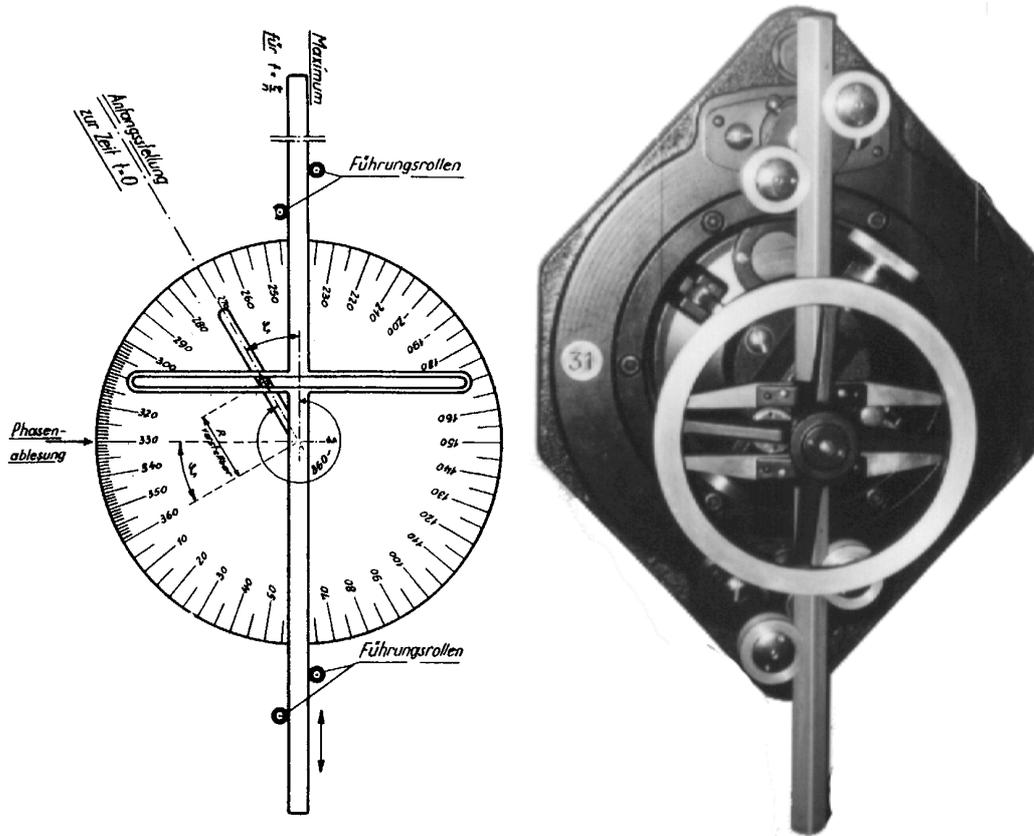


Abbildung 17: Generator zur Erzeugung harmonischer Schwingungen. Links Zeichnung (entnommen [Sag55] S. 33) und rechts Foto eines Generators der zweiten deutschen Gezeitenberechnungsmaschine

Jede dieser Maschinen war mit einer Anzahl Generatoren bestückt, die eine harmonische Bewegung erzeugten. In Abbildung 17 ist eine Zeichnung eines solchen Generators abgebildet. Beschreibung: Es dreht sich dabei ein Rad mit der Winkelgeschwindigkeit ω . Auf diesem Rad befindet sich eine Gewindestange, mit deren Hilfe ein Führungsstift verstellbar werden kann. Die Höhe (bzw. die Projektion) des Führungsstiftes entspricht zu jedem Zeitpunkt t dem Sinus des Winkels α , den die Strecke Raddrehpunkt-Führungsstift mit der Horizontalen einnimmt. Die Amplitude dieses Sinus entspricht dabei dem Abstand des Führungsstiftes von der Raddrehachse.²⁹ Damit können schon die Grundparameter einer Partialtide dargestellt werden:

²⁸vgl. [Kre94] S. 53

²⁹siehe [Kre94] S. 53

3. Berechnung der Gezeiten

$$h'(t) = A \cdot \sin(\omega t) = A \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Es ist also nur ein Versatz um 90° bei der Anfangsstellung der Phase zu berücksichtigen.

Der Führungsstift nimmt eine Führungsschiene mit, welche fest mit einer sich nur vertikal bewegbaren Führungsstange verbunden ist und überträgt so die kreisförmige Bewegung in eine eindimensionale vertikale Bewegung. Zentriert auf der Führungsstange befindet sich eine drehbar gelagerte Umlenkrolle. Durch sie verläuft ein Stahlseil.

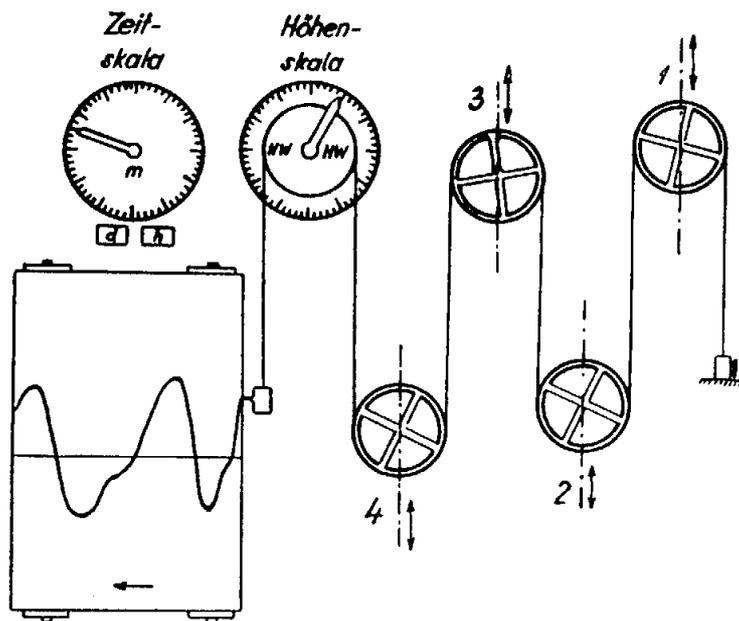


Abbildung 18: Mechanische Überlagerung harmonischer Schwingungen. (Entnommen [Sag55] S. 35)

In Abbildung 18 werden insgesamt vier Sinusgeneratoren (zu sehen sind lediglich die Umlenkrollen) mit einer Aufzeichnungseinheit dargestellt. Bewegt sich mindestens einer der Generatoren eins und drei nach oben, wird an dem Stahlseil gezogen und der Stift der Aufzeichnungseinheit bewegt sich nach oben. Gleiches passiert, wenn sich Generatoren zwei oder vier nach unten bewegen. Analog gilt, falls sich eins oder drei nach unten bzw. zwei oder vier nach oben bewegen, dass sich der Aufzeichnungstift nach unten bewegen kann. Auf diese Art und Weise können unterschiedliche Sinusschwingungen überlagert werden. Es ist lediglich eine äußerst präzise Mechanik vonnöten, damit die Generatoren die Frequenzen der einzelnen Partialtiden exakt einhalten.

4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung

Um Gezeiten numerisch vorausberechnen zu können, wurde ein Programm in der Programmiersprache *Java* geschrieben. Es basiert auf dem in [SHO84] vorgestellten Algorithmus, der schon für das in [Kre94] geschriebene Programm in GFA-Basic verwendet wurde.

4.1. Die verwendete Programmiersprache Java

„Java wurde von der Firma SUN Microsystems mit dem Ziel entwickelt, eine moderne, objektorientierte Sprache zu schaffen. Durch das Ziel der Plattformunabhängigkeit ist Java vor allem im Zusammenhang mit dem Entwickeln von Web-Applikationen im Internet eine der am häufigsten verwendeten Sprachen. Doch Java beschränkt sich nicht nur auf das Erstellen von Effekten für die Webseite, Java ist eine ausgewachsene Programmiersprache, mit der man alle anstehenden Probleme lösen kann. Die Syntax der Sprache ist an die von C++ angelehnt, Schlüsselwörter sind verändert bzw. in der Bedeutung erweitert worden, bestimmte Features von C++ wurden zugunsten der Übersichtlichkeit bzw. Sicherheit nicht in Java verwendet. Java Programme liegen im sogenannten Bytecode vor, der Maschinencode für einen fiktiven Prozessor, der von der VM, der virtuellen Maschine, ausgeführt wird. Durch die Verwendung des Bytecodes wird die Plattformunabhängigkeit von Java garantiert - dieser Vorteil wird aber durch die, im Vergleich zu anderen Sprachen wie C++, wesentlich langsamere Ausführungsgeschwindigkeit bezahlt.“³⁰

Gute Einführungen in das Programmieren mit Java bietet der Kurs von Kalle Dahlheimer [Dal99] und das Buch von Guido Krüger [Krü99]. Für erfahrene C bzw. C++ Programmierer mag auch [Fla97] genügen.

4.2. Das Programm zur Vorausberechnung der Gezeiten

Abbildung 19 zeigt den Startbildschirm des eigentlichen Programms bzw. Applets zur Gezeitenberechnung. Es ist weitgehend menügesteuert und selbsterklärend. Mit dem Applet ist es möglich, die Gezeiten zu einer bestimmten Uhrzeit berechnen zu lassen. Darüberhinaus können Tidenkurven von ein bis 32 Tag(en) aufgezeichnet werden, sowie eine Jahresgrafik, in der die Hoch- und Tiefstände eingezeichnet sind. Für jeden Ort lassen sich die Parameter der Partialtiden abrufen, sowie welche Gezeitenform zu erwarten ist. Desweiteren kann man noch einen Gezeitenkalender erzeugen.

Die Wahl des Ortes geht schnell über Pull-Down-Menüs. Im linken Menü wählt man zuerst das Land an, und im rechten werden dann die in der Datenbank vorhandenen Städte angezeigt.

³⁰siehe JAVA-FAQ unter <http://www.os-visions.de/texte/java/faq/>

4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung

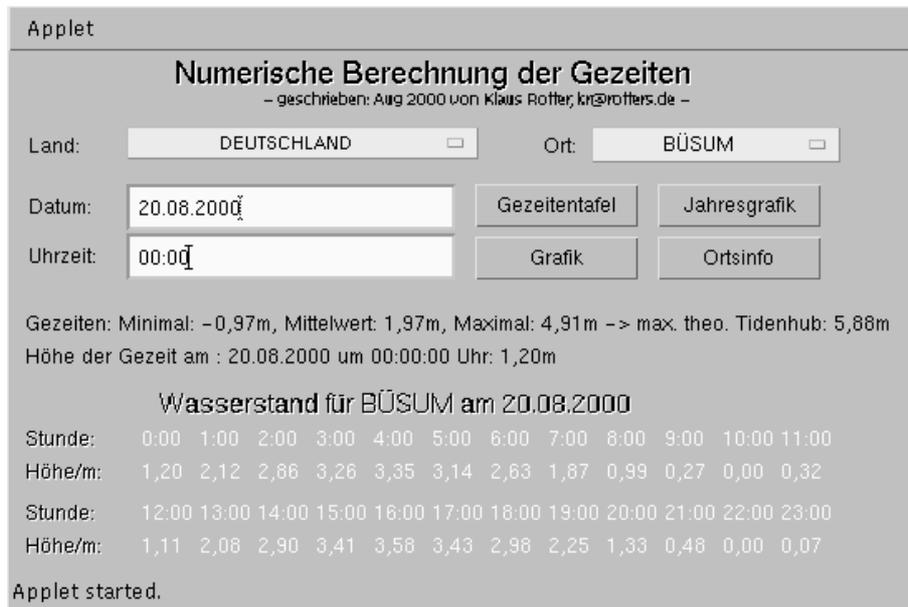


Abbildung 19: Applet zur Gezeitenberechnung. Es kann Datum und Uhrzeit eingegeben werden und der dazugehörige Wasserstand wird berechnet. Zusätzlich wird für den gewählten Tag der Wasserstand im stündlichen Abstand angezeigt. Es können tägliche bis jährliche Tidenkurven, Informationen zum gewählten Ort und ein Gezeitenkalender angezeigt werden.

4.3. Der grundlegende Algorithmus

Der Algorithmus zum Berechnen der Gezeiten wurde in [SHO84] dargestellt. Er stützt sich auf eine Datenbasis der harmonischen Konstanten von 10 Teilzeiten, 11 weitere Teilzeiten ($P_1, o_1, k_1, 2N_2, \mu_2, v_2, L_2, K_2, T_2, m_2, k_2$) werden näherungsweise aus den 10 vorgegebenen berechnet. Es stehen also insgesamt 21 Teilzeiten mit den Amplituden $A_{0..20}$ und Phasen $\phi_{0..20}$ als Datenbasis eines Ortes zur Verfügung.

Die Höhe des Wasserstandes wird dann mit folgender Formel berechnet:

$$h(t) = Z_0 + \sum_{i=0}^{20} A_i \cdot \cos(V_i - \phi_i)$$

- mit t: aktuelle Zeit
 t_0 : Referenzzeit (1.1.1980, 0:00 Uhr)
 Z_0 : Mittlerer Wasserstand
 A_i : Amplitude zur Teilzeit i
 ϕ_i : Phase zur Teilzeit i
 V_i : Astronomisches Argument der Teilzeit i.

4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung

Ortsname <i>Koordinaten</i>	Referezz- Wert (m)	Z_0 (cm)	Harmonische Konstanten									
			S_a	Q_1	O_1	K_1	N_2	M_2	S_2	MN_4	M_4	MS_4
Belfast			82	28	95	105	226	1196	290	5	24	18
54°36'N,003°55'W	2,17	201	229	5	38	187	285	315	352	62	47	74

Abbildung 20: Harmonische Konstanten für Belfast wie sie im [SHO84] verzeichnet sind. Links unterhalb des Ortsnamens sind die geographischen Koordinaten angegeben. In der Zeile unterhalb der Bezeichnungen der Teilzeiten ist die Amplitude A in mm angegeben, die Zeile darunter enthält die Phase ϕ in $^\circ$. Z_0 ist der mittlere Wasserstand in cm . (Entnommen [SHO84] S.94)

Das astronomische Argument V_i setzt sich wie folgt zusammen:

$$V_i = 360^\circ \cdot j \cdot (t - t_0) + \phi_{t0} + \omega(t - t_0)$$

- mit j : Tägliche Vielfachheit der Gezeit (0,1,2,4,8)
- ϕ_{t0} : Linearkombination der Phasen der astronomischen Grundgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt t_0
- ω Partialtidenfrequenz, zusammengesetzt als eine Linearkombination der astronomischen Grundgeschwindigkeiten.

Der folgende Auszug aus dem Programmlisting des Applets zur Gezeitenberechnung enthält die relevanten Methoden zur Initialisierung der Daten und der eigentlichen Berechnung der Wasserstandshöhe zu einem Zeitpunkt t .

```
class Berechnung
{
    private double ak[][] = {
        // Astronomische Grundgeschwindigkeiten
        // Phasenlage am 1.1.1980 um 0:00 Uhr, Phasengeschwindigkeit
        { 78.16, 13.17639673 }, // Siderischer Monat
        { 279.82, 0.98564734 }, // Sonnenjahr
        { 349.50, 0.11140408 }, // Mondbahnperigäum
        { 208.10, 0.05295392 }, // Knotenumlauf
        { 282.60, 0.000047069 }, // Erdbahnperihel
        { 90.00, 0.000000000 }
    };

    private double gp[][] = {
        // j : Tägliche Vielfachheit der Gezeit
        // n1..n6: Faktoren für die Linearkombination der astronom.
        // Grundgeschwindigkeiten
    };
}
```

4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung

```
// fakt : Korrekturfaktor der Amplitude
// index : Zu wählende Amplitude und Phase aus den 10
//       : harmonischen Grundkonstanten
// j,n1,n2,n3,n4,n5,n6, fakt, Index
{ 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1.0, 1 }, // Sa
{ 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1.0, 4 }, // K1
{ 1,-2, 1, 0, 0, 0,-1, 1.0, 3 }, // O1
{ 1,-3, 1, 1, 0, 0,-1, 1.0, 2 }, // Q1
{ 1, 0,-1, 0, 0, 0, 1,-1/3.0, 4 }, // P1
{ 1,-2, 1, 0,-1, 0,-1, 1/5.3, 3 }, // o1
{ 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1/7.4, 4 }, // k1
{ 2,-2, 2, 0, 0, 0, 0, 1.0, 6 }, // M2
{ 2,-3, 2, 1, 0, 0, 0, 1.0, 5 }, // N2
{ 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.0, 7 }, // S2
{ 2,-4, 2, 2, 0, 0, 0, 1/7.6, 5 }, // 2N2
{ 2,-4, 4, 0, 0, 0, 0, 1/6.3, 5 }, // mü2
{ 2,-3, 4,-1, 0, 0, 0, 1/5.3, 5 }, // v2
{ 2,-1, 2,-1, 0, 0, 0,-1/35., 6 }, // L2
{ 2, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 1/3.7, 7 }, // K2
{ 2, 0,-1, 0, 0, 0, 0, 1/17., 7 }, // T2
{ 2,-2, 2, 0,-1, 0, 0,-1/27., 6 }, // m2
{ 2, 0, 2, 0, 1, 0, 0, 1/12., 7 }, // k2
{ 4,-5, 4, 1, 0, 0, 0, 1.0, 8 }, // MN4
{ 4,-4, 4, 0, 0, 0, 0, 1.0, 9 }, // M4
{ 4,-2, 2, 0, 0, 0, 0, 1.0, 10 } // MS4
};

private double amp[] = new double[21];
private double pha[] = new double[21];
private double n0_sum[] = new double[21];
private double nfi_sum[] = new double[21];
public double minimal, maximal, hub, z0;

private int aktort = -1;

public GZParm gzp = new GZParm();

// init(p): p enthält Referenznummer des Ortes.
// Führt notwendige Initialisierungen durch

public boolean init(int p)
{
    int i, j;
    double maxsum;
```

4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung

```
    if (p > gzp.MAXORT) return false;

    aktort = p;

    for (i=0; i<21; i++) {
        n0_sum[i] = 0;
        nfi_sum[i] = 0;

// Berechnet die Phasen und Phasengeschwindigkeitssummen
// für jede Teilzeit

        for (j=0; j<6; j++) {
            n0_sum[i] += gp[i][j+1] * ak[j][0];
            nfi_sum[i] += gp[i][j+1] * ak[j][1];
        }

// Berechnung der Konstanten der 21 Teilzeiten

        amp[i] = gp[i][7] * gzp.amp[p][ (int) gp[i][8]-1 ];
        pha[i] =          gzp.pha[p][ (int) gp[i][8]-1 ];

    }
    pha[16] += 77; // Muss korrigiert werden

    maxsum = 0;
    for (i=0; i<21; i++) maxsum += amp[i];
    maxsum /= 10; // Maxsum in cm umwandeln

    z0 = gzp.z0[p];
    minimal = (z0-maxsum)/100; // Minimal in m
    maximal = (z0+maxsum)/100; // Maximal in m
    hub = maximal - minimal;

    return true;
}

// h = hoehe(zeit)
// Berechnet Gezeitenhöhe in Abhängigkeit der
// Amplituden, Phasen und Phasengeschwindigkeiten der 21 Teilzeiten
// Zeit: Dezimalzahl, Vorkommastellen sind ganze Tage seit dem 1.1.1980,
//      Nachkommastellen Bruchteil eines ganzen Tages
// h: Höhe in Meter
```

```
public double hoehe(double zeit)
{
    double h,t;
    int i;

    // Falls Ort nicht initialisiert, Not a Number zurückgeben
    if (aktort == -1) return Double.NaN;

    t = zeit-(double)(int) zeit; // Tagesbruchteil ausrechnen
    h = z0*10.0;                // z0 in mm umrechnen

    for (i=0; i<21; i++) {
        h += amp[i]*Math.cos(((360.0*gp[i][0]*t + n0_sum[i] +
                               nfi_sum[i]*zeit)-pha[i])*Math.PI/180.0);
    }
    return (h/1000); // Höhe in Meter umrechnen
}
}
```

4.4. Simulation einer Gezeitenberechnungsmaschine

Die Simulation einer Gezeitenberechnungsmaschine baut einen Sinusgenerator einer Partialtide langsam auf. Zu Beginn sieht man nur ein sich drehendes Rad. Mit dem Schieberegler **f** kann die Drehfrequenz eingestellt werden. Mit **Start** kann der Aufbau von vorne begonnen werden. **Stop** hält die Drehung an. Mit **Nächster Schritt** wird jeweils ein weiteres Bauteil zugeführt. Im zweiten Schritt ist dann der verschiebbare Stift zu sehen und ein neuer Schieberegler **amp** mit dem die Amplitude eingestellt werden kann. Wenn der erste Generator komplett aufgebaut ist, wird mit jedem weiteren Schritt ein zusätzlicher Generator angefügt, bis maximal vier. Dazu erscheinen auch jeweils die Frequenz- und Amplitudeneinstellregler. Das Programm ist auf der Homepage des Autors zu finden.

4. Java-Applets zur Gezeitenberechnung

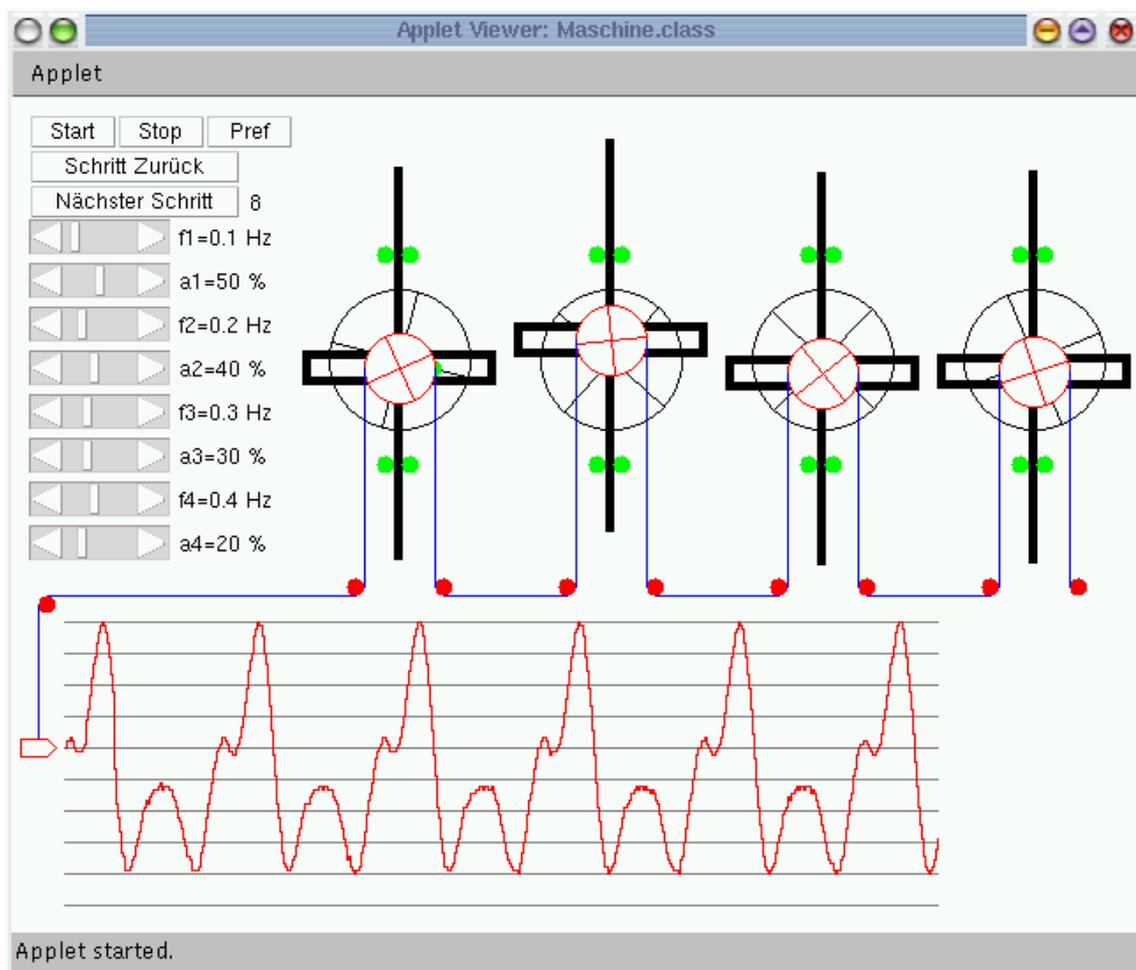


Abbildung 21: Simulation einer Gezeitenberechnungsmaschine. Links oben sind die Einstellregler der vier Sinusgeneratoren zu sehen, rechts daneben die Generatoren selbst. Darunter wird die überlagerte Kurve aufgezeichnet.

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

Die Idee für den Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine entstand im *Deutschen Museum* in München. Dort steht in der *Schiffsbauabteilung* der zweite deutsche Gezeitenrechner des *Deutschen Hydrographischen Instituts* aus Hamburg, der 1935–1939 erbaut wurde.



Abbildung 22: Zweite deutsche Gezeitenberechnungsmaschine von 1939. Befindet sich jetzt im Deutschen Museum in München

Diese imposante Maschine (mit einer Länge von 7,5 m, Höhe von 2 m und einer Masse von etwa 7 t) ist der größte Gezeitenrechner der Welt. An der Vorderseite der Maschine sind insgesamt Sinusgeneratoren für 62 Partialtiden angebracht, an der Rückseite nochmals 62 Generatoren die zu den an der Vorderseite um 90° (entspricht der 1. Ableitung der Sinusschwingung) Phasenverschoben laufen, um auch die Extremstellen und damit die Hoch- und Niedrigwasserzeiten genau bestimmen zu können. Leider werden bei dem Ausstellungsstück keine Angaben zur Funktionsweise gemacht, so dass sich die Berechnungsmethode einem Besucher nicht erschließt. Da aber auch der eigentliche Vorgang der Überlagerungen von Sinusschwingungen nicht einfach zu verstehen ist, kam bei Abteilungsleiter Hr. Broelmann der Wunsch nach einem Modell auf, das die prinzipielle Funktion der komplexen Maschine zeigt.

5.1. Geschichtlicher Überblick

Lord Kelvin (1824–1907) schuf mit seiner theoretischen Arbeit über die *harmonische Analyse* (1867), ausgehend von *Laplaceschen* Arbeiten, eine neue Richtung in Bezug auf die Gezeitenvorhersage. Bis 1883 wurde dann für die wichtigsten englischen Häfen zusammen mit

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

Darwin eine Anzahl harmonischer Konstanten berechnet. Es blieb alleine die Problematik der Berechnung, da die bis dahin verwendeten Rechenmaschinen für solche Arbeiten keine große Erleichterung darstellten.³¹

Die Idee zu seinem ersten Modell eines *Tide Predictors* kam ihm, als er von dem Vorschlag eines britischen Geistlichen zum Bau einer Maschine, um numerisch quadratische Gleichungen zu lösen, erfuhr. Er liess dann dieses Modell bauen, was zwar noch ohne Antrieb war und noch keine rein harmonischen Schwingungen überlagerte, aber der erste Schritt war getan.

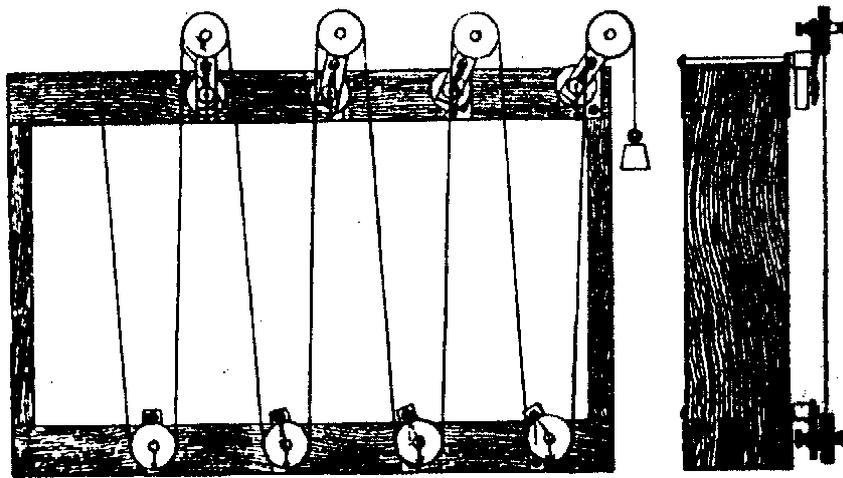


Abbildung 23: Erstes Modell einer Gezeitenrechenmaschine von Lord Kelvin. (Entnommen [Sag55] S.42)

Noch im selben Jahr wurde dann mit dem Bau der ersten „richtigen“ Gezeitenrechenmaschine begonnen, der *British Tide Predictor No. 1*, die bereits 10 Tiden (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , Q_1 , K_1 , L_2 , P_1 , M_4 , MS_4) aufsummieren konnte. Sie hatte aber noch den prinzipiellen Nachteil, dass sie keine rein harmonische Bewegung aufzeichnen konnte.³²

Im Jahr 1879 begann dann *Roberts* (1845-1933), der bereits am Bau der Ersten maßgeblich beteiligt war, mit dem Bau der zweiten englischen Gezeitenberechnungsmaschine³³, die, auf einen Vorschlag von *Kelvin* zurückgehend, diesmal reine harmonische Bewegungen überlagerte. Sie war auf 20 Tiden ausgelegt, wurde aber 1891 auf 24 erweitert, so dass sie folgende Tiden aufsummieren konnte:

³¹vgl. [Sag55] S. 41

³²vgl. [Sag55] S.42

³³vgl. [Sag55] S.45

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

Halbtagestiden:	$M_2, N_2, L_2, \nu_2, \mu_2, S_2, 2N_2, T_2$
Eintagestiden:	$O_1, Q_1, I_1, P_1, K_1, S_1$
Obertiden:	M_4, M_6
Verbundtiden:	$2SM_2, MK_3, 2MK_3, MS_4, MN_4$
Langperiodische Tiden:	Sa, Ssa

Damit war im wesentlichen die Entwicklung der Gezeitenberechnungsmaschinen abgeschlossen, denn alle Nachfolgenden enthielten im wesentlichen dieselbe Grundkonstruktion. Sie hatte jedoch einen Nachteil, und zwar musste, wollte man die Hoch- und Niedrigwasserzeiten minutengenau bestimmen, man die Berechnung für jeden Hafen zweimal durchführen. Im ersten Durchgang wurde die eigentliche Kurve aufgezeichnet, die eine relativ genaue Angabe über den Tidenhub ermöglichte. Da die Kurven relativ flach verliefen und so die Extrema nur schwach gekrümmt waren, konnte die genaue Uhrzeit der Minima bzw. Maxima nur schlecht abgelesen werden. Es war also ein zweiter Lauf notwendig, der die erste Ableitung der Kurve aufzeichnete. Im Vergleich dieser beiden Kurven war nun eine exakte Höhen- und Zeitangabe möglich. Jedoch musste dieser Vergleich von Hand durchgeführt werden und kostete ein Vielfaches der Zeit der eigentlichen Kurvenaufzeichnung durch die Maschine.

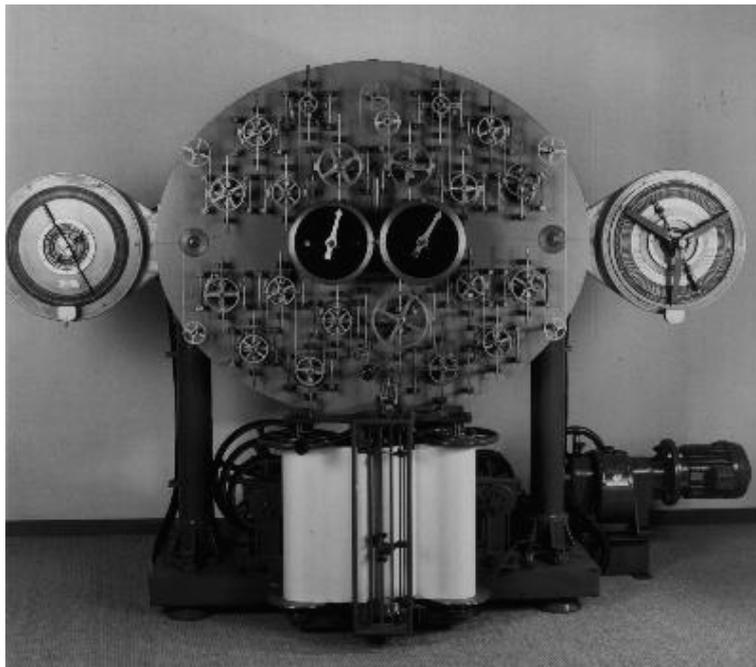


Abbildung 24: Die erste deutsche Gezeitenrechenmaschine mit 20 Partialtiden und Rückseitenkonstruktion. Befindet sich heute im Deutschen Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven. (Entnommen der Webseite des Museums)

Eine Weiterentwicklung sollte dies überflüssig machen. Wie schon bei der Beschreibung des Gezeitenrechners im Deutschen Museum erwähnt, wurden vom Amerikaner Prof. *Ferrel* (1817–

1891) Gezeitenberechnungsmaschinen mit Rückseitenkonstruktion³⁴ entwickelt. Ziel war es, Kurve und erste Ableitung in einem Arbeitsgang auf einen Aufzeichnungsbogen zu drucken. Dazu wurden an der Rückseite zu jeder Partialtide an der Vorderseite eine Zweite angebracht, deren Phasen gegen die an der Vorderseite um 90° gedreht waren. (Die Ableitung eines Sinus ist wiederum ein Sinus, der allerdings um 90° phasenverschoben ist).

Interessant ist in diesem Zusammenhang noch, dass Deutschland seine Gezeitenkarten für die Nordsee seit jeher mittels des *nonharmonischen Verfahrens* berechnet hat, es aber trotzdem zwei Gezeitenberechnungsmaschinen, die erste 1915 (die sich jetzt im deutschen Schifffahrtsmuseum in Bremerhaven befindet) und die zweite 1939 gebaut hat. Der Grund waren die anstehenden Kriege, denn die Deutsche Marine benötigte für die Gewässer, in denen sie operieren wollte, Gezeitenkarten.³⁵

5.2. Überlegungen zum Modellentwurf

Zunächst wurde ein einfaches Modell einer Gezeitenberechnungsmaschine mit einem Spielzeugkasten aufgebaut. Dazu eignet sich gut Fischer-Technik und Lego. Dadurch konnten die ersten Erfahrungen gesammelt werden.

Ziel war es, ein Modell zu bauen, das folgende Eigenschaften besitzt:

- Hinreichend stabil sein und ohne große Wartung auskommen
- Es sollen verschiedene Amplituden einstellbar sein
- Die Frequenzen der Sinusgeneratoren sollen einstellbar sein
- Das Phasenverhältnis soll einstellbar sein und soll sich während des Betriebes nicht verändern
- Um es im Museum verwenden zu können, soll es möglich sein, einen Kurvenschrieb reproduzieren zu können, so dass das Modell mit einer festen Einstellung von Phase und Frequenzen ohne Stift betrieben werden kann und stattdessen eine bereits aufgezeichnete Kurve *nachfährt*
- Es soll ohne größere Werkstattarbeiten gebaut werden können. Ziel war es, ein stabiles Modell mit den mir zur Verfügung stehenden Mitteln zu bauen. Dies bedingt, dass primär leicht zu verarbeitende Werkstoffe wie Kunststoff oder bereits vorgefertigte Teile verwendet werden sollen. Auch darf als Bearbeitung lediglich gebohrt und gesägt werden, Formteile fräsen zu müssen sollte vermieden werden

³⁴vgl. [Sag55] S.47

³⁵vgl. [Sag55] S.65

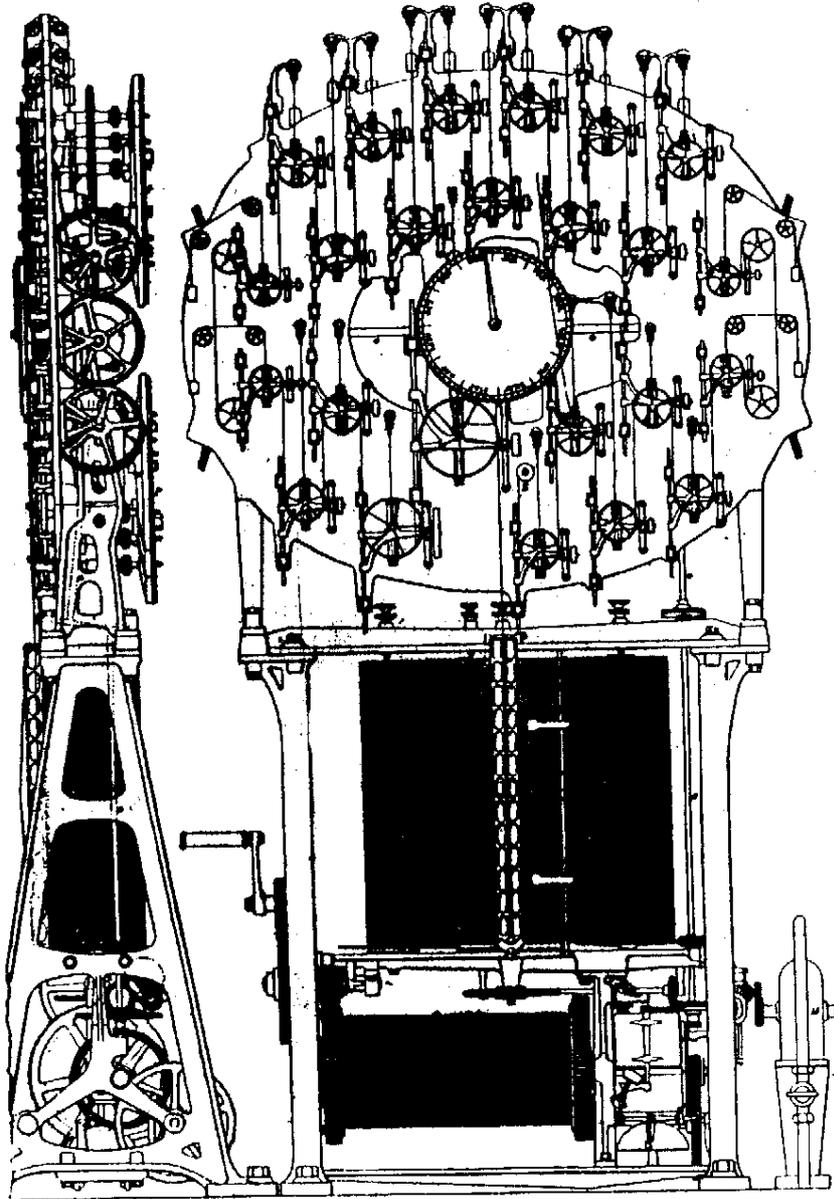


Abbildung 25: Die erste Gezeitenrechenmaschine, die reine harmonische Bewegungen überlagerte, nach *Roberts* unter Mitarbeit von *Kelvin* – British Tide Predictor No. 2. (Entnommen [Sag55] S.44)

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

Nr.	Baujahr	Umbau	Tidenzahl	Anzeige	Land	Standort
1	1872–1873	-	10	G	England	South Kensington Museum
2	1879	1891	20 (24)	G	Indien	Dehra Dun
3	1881	1901	15 (16)	G	Frankreich	Paris
4	1882	-	19*	Z	USA	Washington
5	1906–1908	1929	33 + 7	G (Z)	England	Liverpool
6	1894–1910	-	37	G, Z	USA	Washington
7	1909–1910	-	12	G	Brasilien	Rio de Janeiro
8	1914	1923	15	G	Japan	Tokio
9	1915–1916	1931	20*	G, Z, (D)	Deutschland	Deutsches Schifffahrtsmuseum Bremerhaven
10	1918	1920	16	G (Z)	Argentinien	Buenos Aires
11	1924	-	15	G	Japan	Tokio
12	1924	-	16	G	Japan	Tokio
13	1924	-	16	G	Portugal	Lissabon
14	1924–1925	-	26+3	G, Z	England	Liverpool
15	1927	-	23	Z	Brasilien	Rio de Janeiro
16	1935–1939	-	62*	G, Z, D	Deutschland	Deutsches Museum, München
17	1945	-	40	G, Z	UdSSR	Moskau
18	1947	-	30	G, Z	Norwegen	Oslo
19	1948	-	16	G, Z	Spanien	Madrid
20	1950	-	42	G, Z	England	Liverpool
21	1950	-	30	G, Z	Philippinen	Manila
22	1951	-	42	G, Z	Indien	Dehra Dun
23	1951	-	30	G, Z	Siam	Bangkok
24	1952	-	42*	G, Z	Argentinien	Buenos Aires
25	1952–1955	-	34*	Z, D	Deutschland	Rostock

Abbildung 26: Übersicht der bis 1955 weltweit gebauten Gezeitenberechnungsmaschinen. In Klammern der jeweilige Umbauungsgrund. G=Grafische Aufzeichnung, Z=Zählwerk, D=Druckwerk. Das „+“-Symbol bei der Tidenanzahl gibt die Anzahl der Reservetiden an. Maschinen mit Stern bei den Tiden haben eine Rückseitenkonstruktion, um Tidenkurve und 1. Ableitung simultan aufzuzeichnen. (Entnommen [Sag55] S. 78)

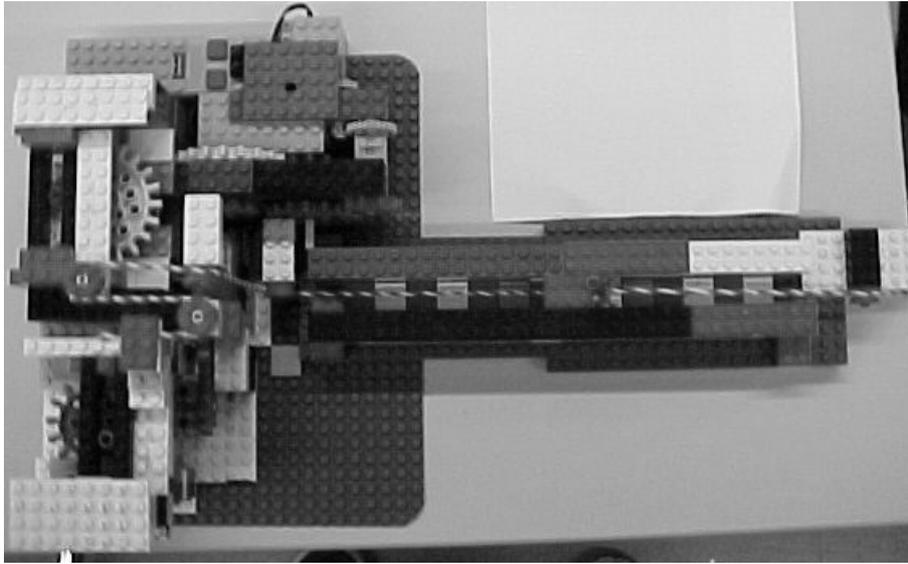


Abbildung 27: Legomodell von Jürgen Kretschmann mit zwei Partialtiden

Das Modell soll dann, wenn es nötig ist, als Grundlage für ein neues Modell für das *Deutsche Museum* dienen, welches dann zusammen mit der Werkstatt des *Physikalischen Institutes* gebaut werden soll.

Zum Ansteuern der Sinusgeneratoren gab es verschiedene Ansätze: Zum einen könnten sie mit Zahnrädern und Ketten von einem zentralen Motor aus gesteuert werden. Damit wäre das Problem der festen Phasenbeziehung gelöst, doch könnten unterschiedliche Frequenzverhältnisse nur durch größere Umbaumaßnahmen realisiert werden.

Als andere Lösung bot sich an, jedem Generator und der Aufzeichnungswalze einen eigenen Motor zu geben. Damit wäre die Möglichkeit, einfach verschiedene Frequenzverhältnisse zu realisieren gegeben, denn man müsste nur für jeden Motor eine regelbare Stromversorgung aufbauen und kann dann dessen Geschwindigkeit z.B. einfach mit einem Potentiometer regeln. Auch wäre der mechanische Aufbau weit weniger kompliziert. Nachteilig ist, dass man die Motoren sehr genau regeln müsste, um auch feste Phasenverhältnisse über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, z.B. wenn man den Fall zeigen möchte, dass beide Generatoren um 180° phasenverschoben bei gleichen Amplituden laufen und sich somit gegenseitig auslöschten.

Als dritte Möglichkeit wurde der Betrieb mit Schrittmotoren angedacht: Sie lassen sich sowohl einfach regeln als auch immer in einer festen Phasenbeziehung zueinander halten. Lediglich die Ansteuerung ist etwas komplizierter als bei normalen DC-Motoren. Man hat sich letzten Endes für diese Vorgehensweise entschieden.

5.3. Aufbau des Modells

Es wurde ein modularer Aufbau aus einfach zu beschaffenden Teilen gewählt, Abbildung 28 und 29 zeigen Skizzen des Modells. Prinzipiell sind die einzelnen Sinusgeneratoren unabhängig voneinander, so dass auch mehr als zwei zusammen mit einer Aufzeichnungseinheit auf einer Grundplatte montiert werden können. Ein Generator wird von zwei L-Trägern auf der Grundplatte fixiert. Der Schrittmotor zum Antrieb wird unterhalb der Grundplatte befestigt, so dass nur dessen Achse, die im rechten Winkel zur Grundplatte steht, herausragt. Mittels einer einfachen Propellernabe aus dem Modellbauhandel wird nun ein Flachprofil aus Kunststoff als Träger für den Führungsstift benutzt. Im Flachprofil sind Bohrungen mit unterschiedlichen Abstand zur Achse angebracht, um durch Versetzen des Stifts unterschiedliche Amplituden realisieren zu können.

Die zwei Querprofile bilden eine Führungsschiene, in denen sich der Führungsstift hin- und herbewegt. Sie werden durch ein Distanzröhrchen auseinandergehalten und mittels Stellringen an den Schubstangen fixiert. Zentriert auf den Querprofilen wird ein Deckel geschraubt, in dessen Mitte sich die Achse für das drehbar gelagerte Rad befindet, durch das die Schnur zum Überlagern der harmonischen Bewegung läuft.

Die Lager für die Schubstangen sind normale Gleitlager. Durch einen geeigneten Schmierstoff (z.B. Silikonöl) ist die Gesamtreibung jedoch so gering, dass das Drehmoment der verwendeten Schrittmotoren (aus dem Restpostenhandel) ausreicht. Hier kann man jedenfalls ansetzen, wenn man die Drehfrequenz erhöhen möchte: Es wäre möglich, zum Einen Motoren mit größeren Drehmoment, als auch eine konstantstromansteuerung zu verwenden. Zum anderen könnte man Linearkugellager verwenden, um die Reibung weiter zu minimieren.

5.4. Das Funktionsprinzip und Ansteuerung von Schrittmotoren

Schrittmotoren bestehen, ähnlich wie Synchron- und Asynchronmotoren aus einem feststehenden Stator und einem darin drehenden Rotor.³⁶ Durch unterschiedlich ausgerichtete Magnetfelder in Stator und Rotor entsteht ein Drehmoment, das den Rotor antreibt. Eine Bewegung des Rotors (ein Schritt) entsteht durch gezieltes ein- und ausschalten einzelner Wicklungen im Stator, denn der Rotor hat, im Gegensatz zu anderen Motoren, keine Spulen. Durch Änderung von Reihenfolge und Frequenz der Spulenansteuerung läßt sich auf einfachste Weise Drehsinn und Drehzahl des Motors regeln.

Beim ersten entwickelten Schrittmotor, dem *Reluktanz-Schrittmotor*, besteht der Rotor aus einem gezahnten Weicheisenkern. Er konnte deswegen zu einem günstigen Preis hergestellt werden und wurde deswegen häufig verwendet. Wegen des Weicheisenkerns, der selbst kein Magnetfeld ausbildet, hatte er jedoch nur ein geringes Drehmoment und auch kein Rastmoment.

³⁶siehe Thorsten Ostermanns Web-Seite: http://www-users.rwth-aachen.de/thorsten.ostermann/schritt/sm_ansteuer.htm

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

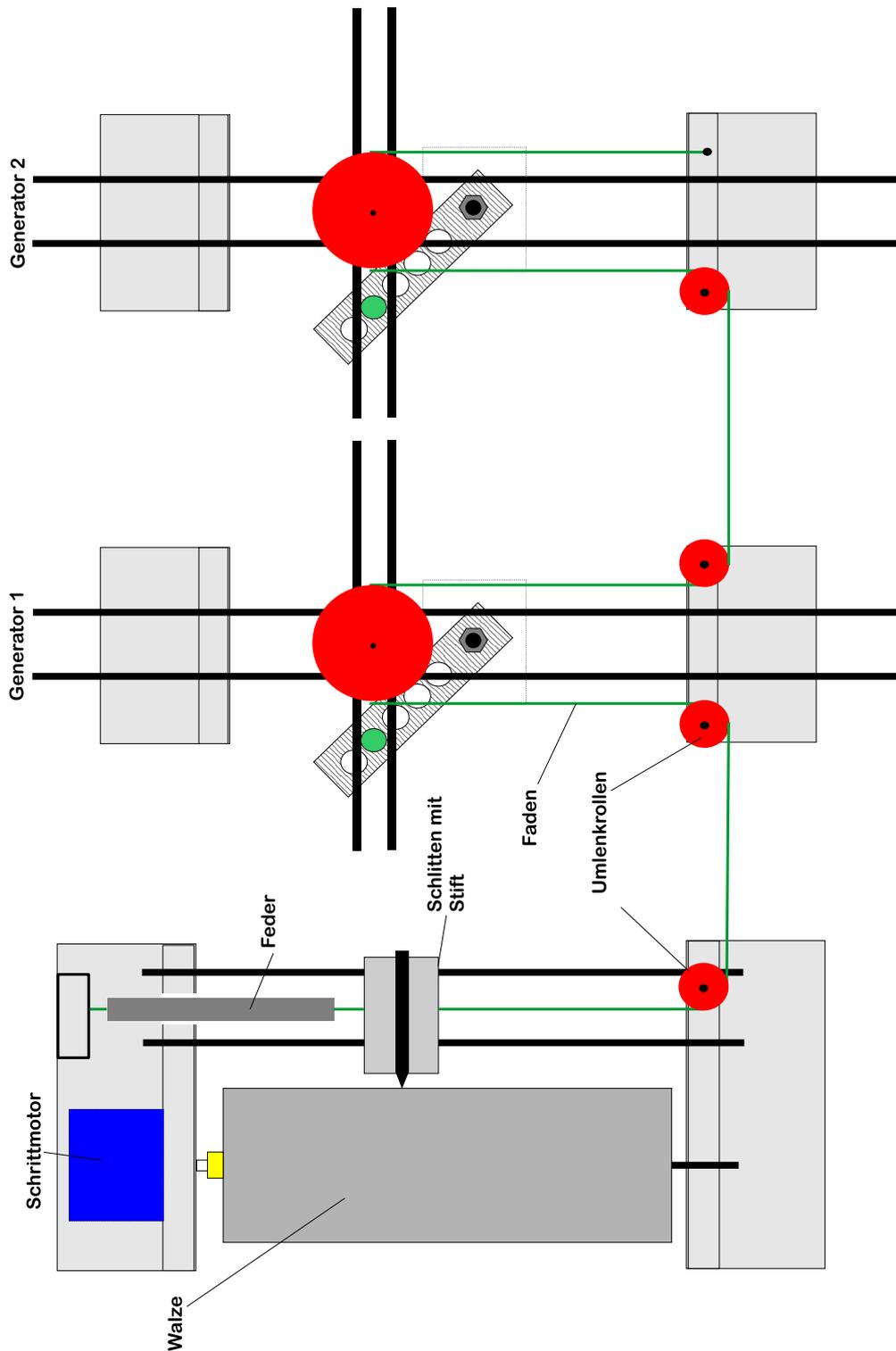


Abbildung 28: Skizze des Modells. Um 90° gedreht sieht man links die Aufzeichnungseinheit und rechts daneben zwei Sinusgeneratoren

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

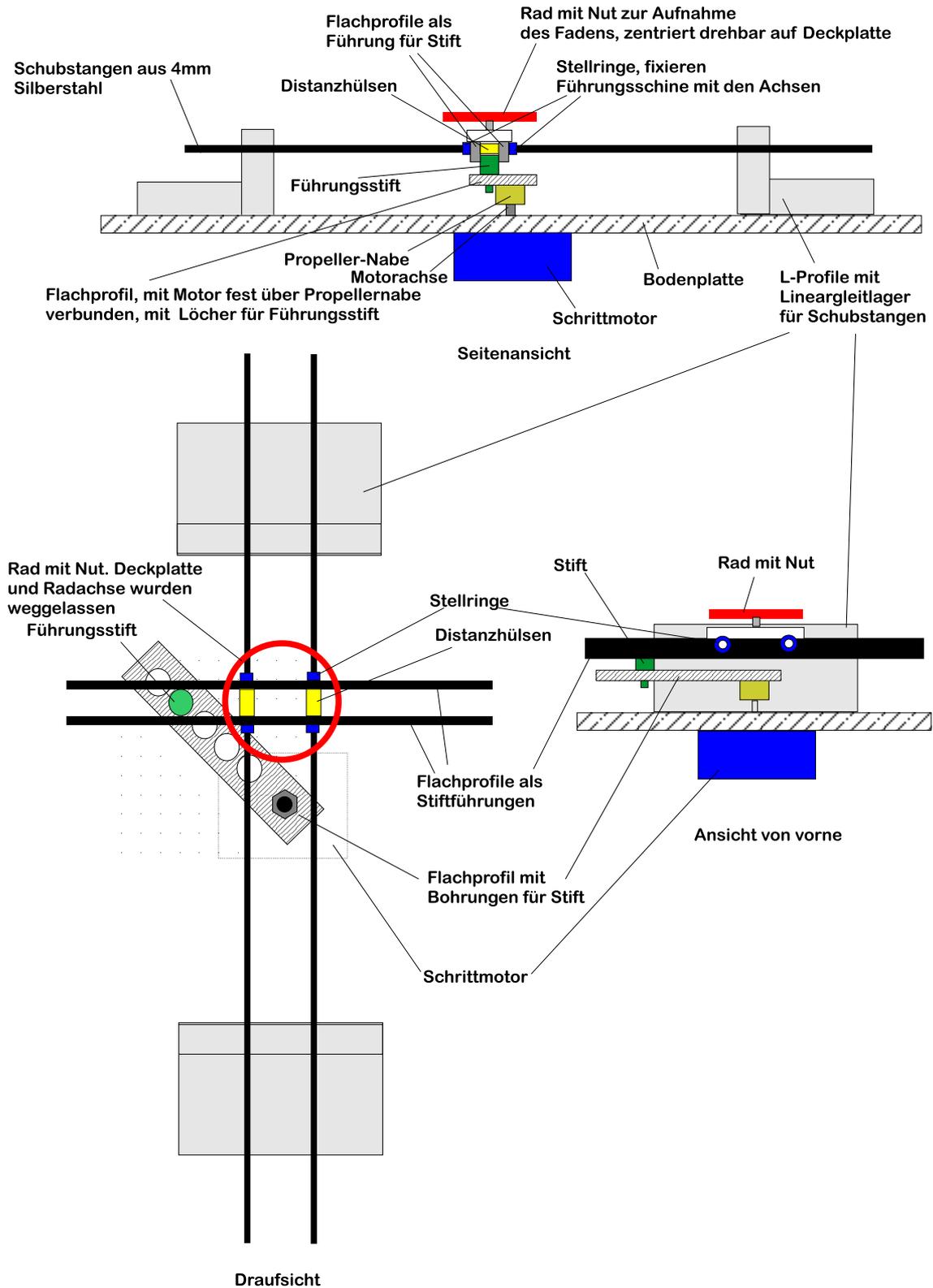


Abbildung 29: Skizzen zu den Sinusgeneratoren des Modells

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

Beim *Permanentmagnet-Schrittmotor* besteht der Rotor aus einem zylindrischen Permanentmagneten mit radialer Magnetisierung. Der Nachteil ist der große Schrittwinkel, da man nur eine begrenzte Zahl von magnetischen Polen nebeneinander anordnen konnte.

Im *Hybrid-Schrittmotor* besteht der Rotor aus einem axialen Permanentmagneten, an dessen Enden gezahnte Kappen befestigt sind. Beide sind um eine halbe Zahnbreite gegeneinander versetzt, so dass sich Nord- und Südpole abwechseln. Somit werden die Vorzüge von Reluktanz- und Permanentmagnet-Schrittmotoren miteinander vereint. Der Hybrid-Schrittmotor ist die verbreitetste Bauform und in den unterschiedlichsten Ausführungen erhältlich.

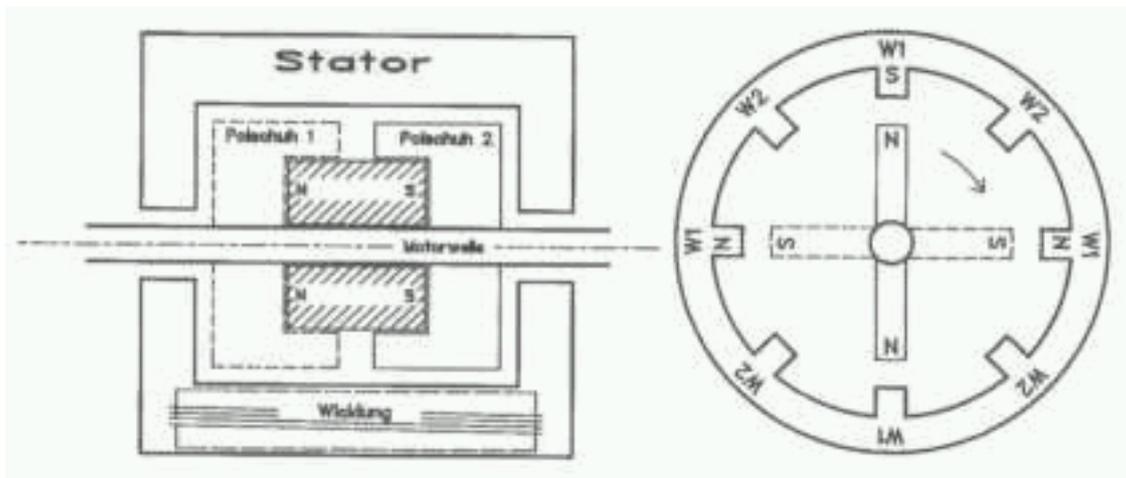


Abbildung 30: Schnitt durch einen Hybridmotor. (Entnommen T. Ostermanns Web-Seite)

Es gibt Schrittmotoren mit zwei, drei und fünf Spulen, wobei die Motoren mit zwei Spulen am gängigsten sind. Die Anzahl der Spulen und die Anzahl der Polpaare des Rotors hängt direkt mit der physikalischen Schrittauflösung des Motors zusammen. Da eine Erhöhung der Spulenzahl mehr Schaltungsaufwand nach sich zieht, wird meist die Erhöhung der Polzahl des Rotors bevorzugt.

Die Spulen lassen sich auf zwei verschiedene Arten ansteuern, unipolar und bipolarer. Beim unipolaren Schrittmotor haben Spulen einen Mittelabgriff, er hat also drei Anschlüsse pro Spule. Im Gegensatz dazu besitzt ein bipolarer Schrittmotor lediglich zwei Anschlüsse für jede Spule.

Auch bei der Ansteuerung unterscheiden sich die beiden Schrittmotorarten. Während beim Bipolarbetrieb die Spulen umgepolt werden müssen, womit vier Schalter benötigt werden (siehe Abbildung 31), wird beim Unipolarbetrieb am Mittelabgriff der Spule die Versorgungsspannung fest angelegt und abwechselnd immer ein Spulenende nach Masse geschaltet, womit lediglich zwei Schalter benötigt werden. Der reduzierte Schaltungsaufwand war auch der Grund, warum Unipolarmotoren lange sehr beliebt waren, bis mit dem Aufkommen preiswerter integrierter Schaltungen sich die bipolare Ansteuertechnik mehr und mehr durchsetzte.

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

Entsprechende ICs sind z.B. L293 und L298 von ST. Sie enthalten jeweils zwei Spulentreiber mit je vier Leistungsschalter.

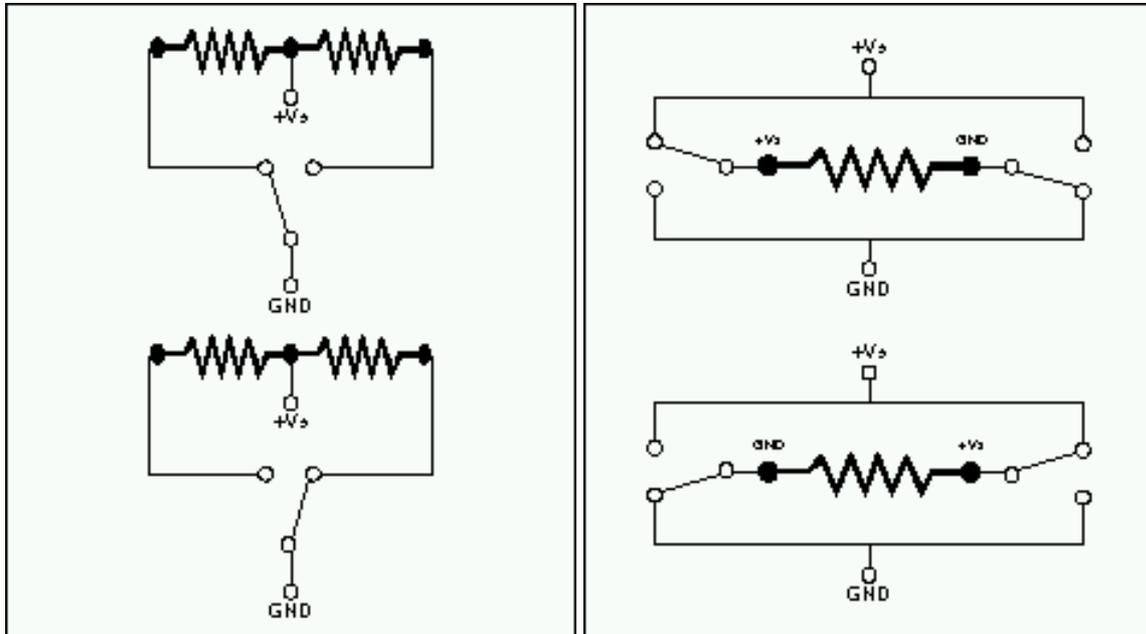


Abbildung 31: Vergleich einer unipolaren Schrittmotoransteuerung (links) mit einer bipolaren Ansteuerung (rechts). (Entnommen T. Ostermanns Web-Seite)

Bei der Beschaltung der Spulen ergeben sich, neben den grundsätzlichen Unterschieden zwischen Unipolar- und Bipolarbetrieb, drei weitere Betriebsarten (siehe Abb. 32): Vollschritt-, Wavedrive- und Halbschrittbetrieb:

1. Normal-(oder Vollschritt-)Betrieb: Es werden immer beide Spulen gleichzeitig bestromt. Es ergeben sich vier unterschiedliche Schrittpositionen pro Umlauf.
2. Wavedrive-Betrieb: Hier fließt immer nur durch eine Spule Strom. Die Leistungsaufnahme und damit auch das Drehmoment sind im Vergleich zum Vollschritt-Betrieb geringer. Die resultierenden vier Schrittpositionen liegen zwischen denen des Vollschritt-Betriebes.
3. Der Halbschritt-Betrieb ist eine Kombination aus dem Vollschritt und Wavedrive-Betrieb. Es werden abwechselnd eine oder zwei Spulen angesteuert, womit sich 8 Schrittpositionen ergeben. Daher kommt die Bezeichnung Halbschritt, da der physikalische Schritt-winkel des Motors halbiert wird.

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

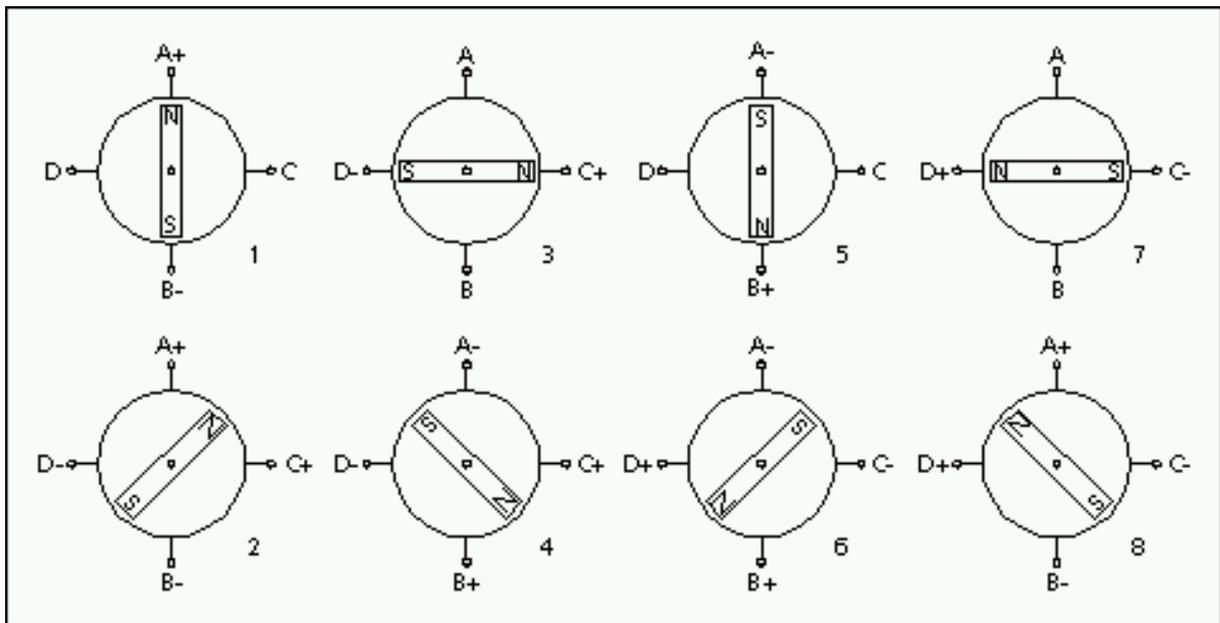


Abbildung 32: Übersicht der verschiedenen Betriebsarten eines Schrittmotors: Obere Reihe: Wavedrive, untere Reihe Vollschritt, Pos. 1–8: Halbschritt. (Entnommen T. Ostermanns Web-Seite)

Im Halbschritt-Betrieb besteht die Gefahr eines unruhigen Laufes bei niedrigen Drehzahlen. Der Grund hierfür ist, dass sich bei Bestromung beider Spulen der resultierende Kraftvektor aus der Addition der aufeinander senkrecht stehenden Einzelvektoren ergibt und damit um den Faktor $\sqrt{2}$ größer ist als bei Ansteuerung von nur einer Spule. Dies kann man kompensieren, indem man bei Einzelspulensteuerung den Strom um eben diesen Faktor $\sqrt{2}$ erhöht. Diese Vorgehensweise ist unkritisch, da der maximale Strom immer für den Fall angegeben ist, dass beide Spulen bestromt werden.

Neben der Auswahl der Schrittart bei einer Ansteuerung eines Schrittmotors muss auch dafür Sorge getragen werden, dass der maximal zulässige Strom nicht überschritten wird.

Am einfachsten zu realisieren ist die *Konstantspannungs-Ansteuerung*. Die Spannung am Motor muß so gewählt werden, dass bei Motorstillstand gerade der erlaubte Maximalstrom fließt. Da jedoch der Stromfluß dem Gesetz $I = \frac{dL}{dt}$ folgt, bedeutet dies, dass die maximale Drehfrequenz des Motors eingeschränkt ist, da es nach dem Anlegen einer Spannung an die Spule eine gewisse Zeit dauert, bis der Strom sein Maximum erreicht hat. Mit steigender Frequenz nimmt jedoch die dafür zur Verfügung stehende Zeit immer mehr ab.

Wesentlich effektiver, wenn auch komplexer in der Ansteuerung, ist die *Konstantstrom-Methode* (auch Copping-Drive). Der Spulenstrom wird getaktet angelegt (üblich sind ca. 16 KHz) und die Stärke des Stroms wird ständig überwacht. Wenn der Strom den maximal zulässigen Wert

überschreitet, wird die Spule für diesen Taktzyklus abgeschaltet. Ein IC mit entsprechender Schaltung ist z.B. der L297 von ST.

5.5. Steuerung des Modells

Die Schrittmotoren im Modell werden von einem AVR Mikrocontroller der Firma *Atmel* des Typs 90S8515 und drei Motortreiber ICs vom Typ L298 der Firma *SGS-Thomson* (ST) angesteuert. Der Atmel AVR 90S8515 ist ein RISC Mikroprozessor mit integrierten 8 KByte Programm ROM und vier 8-Bit Ein-/Ausgabeschnittstellen.

Der Baustein L298 ist ein Motortreiber IC mit einer maximalen Spannung von 46V und einem maximalen Gesamtstrom von 4 Ampere. Es enthält zwei Ansteuerschaltkreise für Motorspulen (sogenannte *H-Brücken*), damit benötigt man einen Baustein für einen Schrittmotor.

Die drei Schrittmotore (je einer für die beiden Sinusgeneratoren und einer für die Aufzeichnungswalze) werden mittels Konstantspannung im Halbschrittansteuerung betrieben. Dies ist ein guter Kompromiss, da das entstehende Drehmoment, minimale und maximale Frequenz zum Betrieb des Modells ausreichend sind.

Das Bedienteil ist auf einer separaten Platine, die mit einem 14-poliges Flachbandkabel mit der eigentlichen Steuerungsplatine verbunden ist. Auf der Steuerungsplatine befindet sich auch ein 10-poliger Stecker, um das ISP-Kabel aufzunehmen. Damit kann eine Neuprogrammierung des AT90S8515 direkt auf der Platine stattfinden. Benötigt wird dazu die Atmel AVR ISP Software, die zusammen mit einem ROM-Image der Betriebssoftware auf der Homepage des Autors zu finden ist, sowie ein ISP Kabel.

Erstellt wurde das Steuerprogramm in der Programmiersprache *C*, mithilfe des *GNU-C-Compilers* (*gcc*), der für eine große Anzahl verschiedener Prozessoren verfügbar ist.

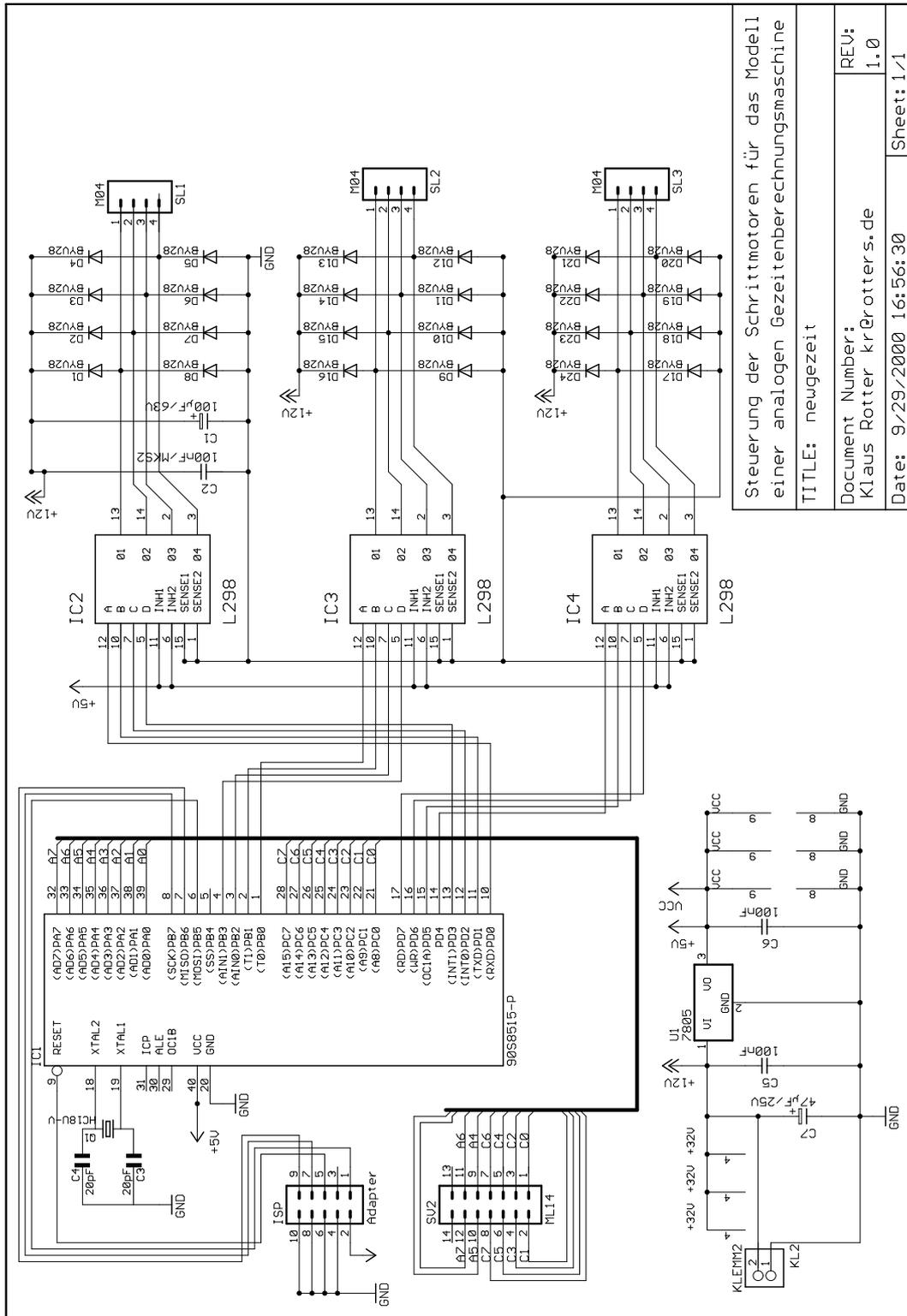
Die Stromlaufpläne sowie die Platinenlayouts wurden mit der Freeware Version des EDA³⁷ Programms *Eagle* der Fa. Cadsoft erstellt. Die Schaltpläne und Layouts befinden sich auf der Homepage des Autors.³⁸

Als Bedienung sind drei sechspolige Stufenschalter und vier Taster vorgesehen. Mit dem ersten Stufenschalter lässt sich die Grundfrequenz der Aufzeichnungswalze einstellen. Die anderen beiden Drehschalter dienen dazu, Vielfache (1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4) der Grundfrequenz für jeweils einen Generator einzustellen. Ein Taster dient zum starten bzw. stoppen des Modells, mit den anderen drei können im gestoppten Zustand die einzelnen Schrittmotoren „von Hand“ gedreht werden, um z.B. Anfangsphasen einzustellen.

³⁷Electronic Design Application

³⁸URL: <http://rotter.home.pages.de/gezeiten>

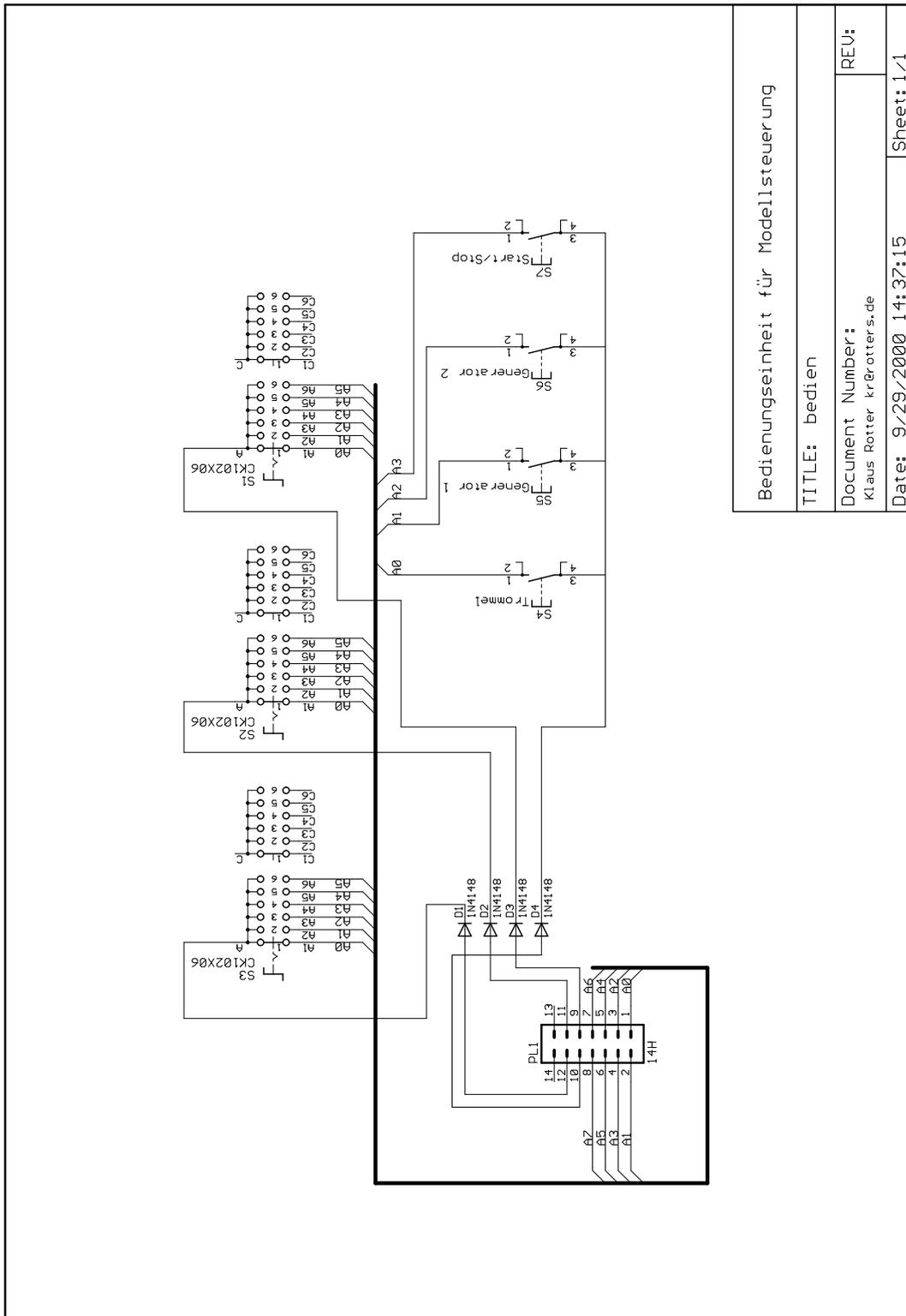
5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine



Steuerung der Schrittmotoren für das Modell einer analogen Gezeitenberechnungsmaschine
 TITLE: neu gezeit
 Document Number:
 Klaus Rottler kr@rotter.s.de
 Date: 9/29/2000 16:56:30
 Sheet: 1/1

Abbildung 33: Stromlaufplan Steuerung

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine



Bedieneinheit für Modellsteuerung

TITLE: bedien

Document Number:
Klaus Rotter: krrotters.de

REV:

Date: 9/29/2000 14:37:15

Sheet: 1/1

Abbildung 34: Stromlaufplan der Bedieneinheit

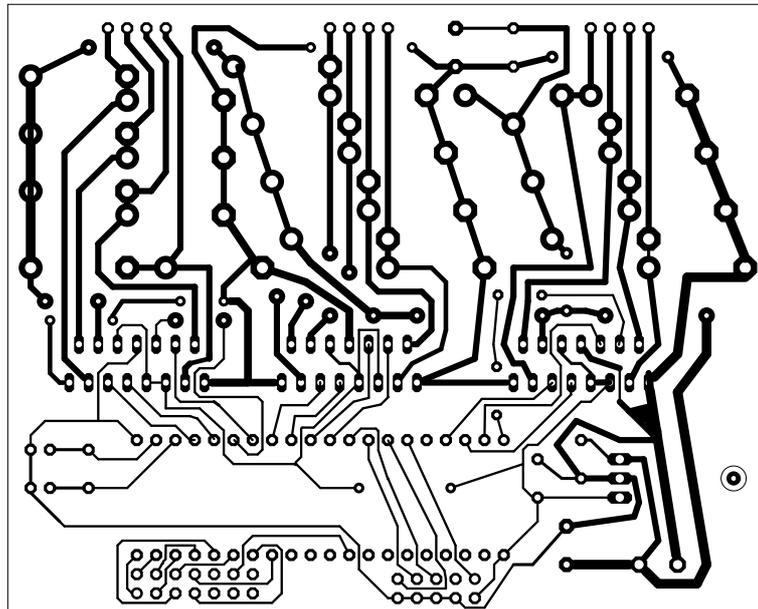


Abbildung 35: Layout der Steuerplatine

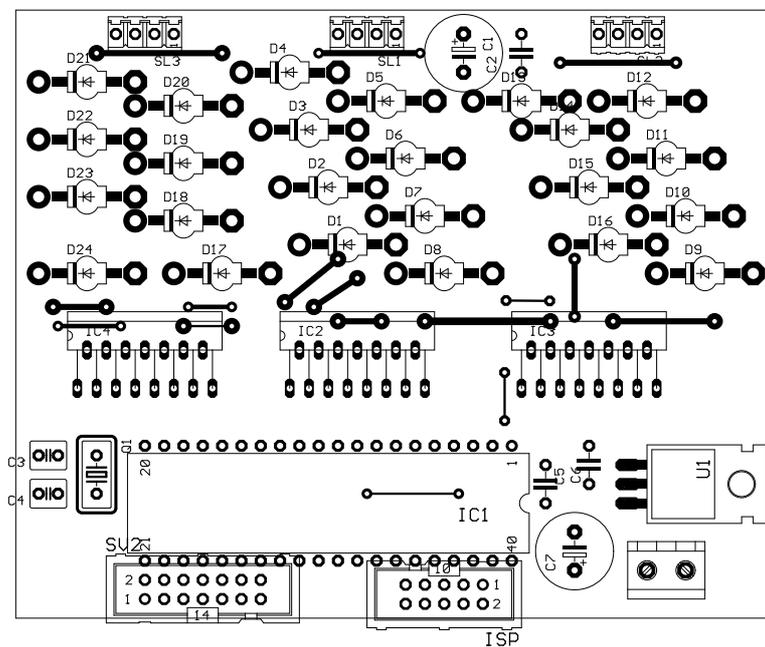


Abbildung 36: Bestückungsplan der Steuerplatine

5. Bau eines Modells einer Gezeitenberechnungsmaschine

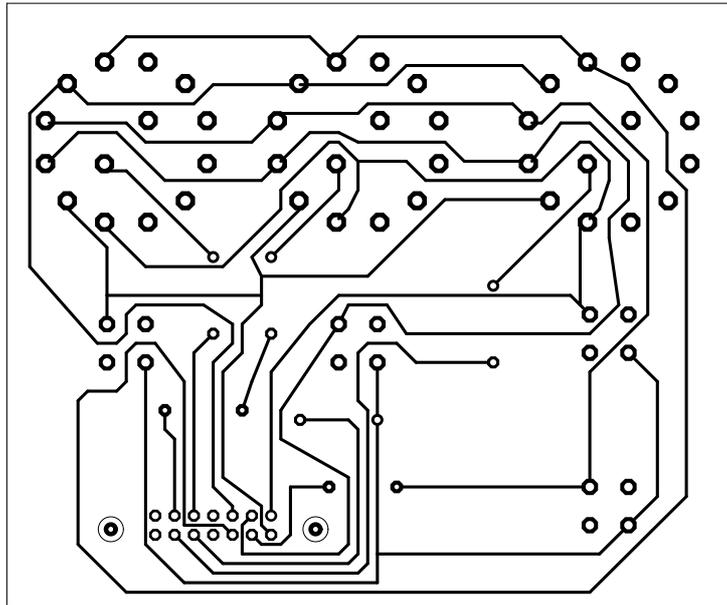


Abbildung 37: Layout der Bedienplatine

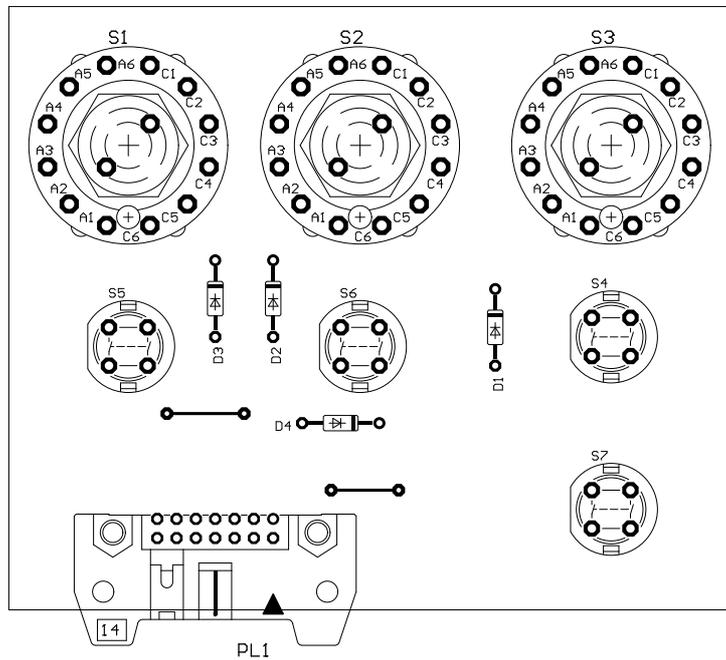


Abbildung 38: Bestückungsplan der Bedienplatine

A. Anhang

A.1. Verwendete Begriffe

Es werden hier die wichtigsten hydrographischen Begriffe erklärt, wie sie u.a. vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie verwendet werden.

Gezeiten niederdt. Tiden, das periodische Steigen und Fallen des Wasserspiegels von Meeren und großen Seen

Wasserstand senkrechter Abstand der Wasseroberfläche von einer festen Nullmarke. Oberhalb der Nullmarke wird der Wasserstand positiv, unterhalb negativ gerechnet

Höhe Wasserstand, auf das örtliche Seekartennull bezogen. Die Höhenangaben in Gezeitenkalendern beziehen sich, wenn nichts anderes angegeben ist, auf das örtliche Seekartennull. Addiert man den vorausberechneten Wert für eine bestimmte Zeit zu der in einer Seekarte angegebenen Tiefe, so erhält man die aktuelle Wassertiefe

(See)Kartennull Nullfläche, auf welche die Tiefenangaben einer Seekarte bezogen sind. Das Seekartennull entspricht nicht dem Normalnull der Landvermessung und wird im allgemeinen von Küstenort zu Küstenort unterschiedlich definiert

Normalnull Mittlerer Wasserstand. Die Differenz zum Seekartennull ist von Ort zu Ort verschieden. *Normal-Null* wurde 1879 amtlich festgelegt; es ist die Bezugsebene für alle Höhenmessungen in Deutschland, die dem damaligen Meeres-Mittelwasserspiegel am Amsterdamer Pegel entspricht

Pegelnul 5m unter Normalnull

Hochwasser Eintritt des höchsten Wasserstandes einer Tide

Niedrigwasser Eintritt des niedrigsten Wasserstandes einer Tide

Flut Das Steigen des Wassers von einem Niedrigwasser bis zum folgenden Hochwasser

Ebbe Das Fallen des Wassers von einem Hochwasser bis zum folgenden Niedrigwasser

Ebbe und Flut sind also Bezeichnungen für „das Wasser geht“ bzw. „das Wasser kommt“. Der Ausdruck „wir haben Flut“ bedeutet also, dass der Wasserstand *ansteigt*, nicht dass der Wasserhöchststand bereits erreicht ist, denn dies wird als „Hochwasser“ bezeichnet. Gleiches gilt für „Ebbe“ und „Niedrigwasser“

Steigdauer Zeitraum von Niedrigwasser bis zum folgenden Hochwasser

Falldauer Zeitraum von Hochwasser bis zum folgenden Niedrigwasser

Tide Gezeit, die sich aus einer Flut und der nachfolgenden Ebbe zusammensetzt

Tidenkurve Grafische Darstellung einer bestimmten Tide als Funktion des Wasserstandes in Abhängigkeit der Zeit

Tidenhub Höhenunterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasser

Springzeit Zeitraum, während Sonne, Mond und Erde annähernd auf einer Geraden liegen und sich die gezeitenerzeugenden Kräfte verstärken. Der Tidenhub ist größer als im arithmetischen Mittel

Nippzeit Zeitraum, während Sonne, Mond und Erde annähernd im rechten Winkel zueinander stehen und sich die gezeitenerzeugenden Kräfte *nicht* verstärken. Der Tidenhub ist geringer als im arithmetischen Mittel

Springtidenhub Tidenhub während der Springzeit

Nipptidenhub Tidenhub während der Nippzeit

Evektion periodische Unregelmäßigkeit der Mondbewegung

Erklärung der wichtigsten Begriffe zur elektronischen Steuerung des Modells:

Mikroprozessor Zentrales Steuerungselement eines Computersystemes. Er holt die Befehle aus dem Speicher, dekodiert sie und führt sie aus. Moderne μC (so die Abkürzung, auch uC) haben zumeist als Datenspeicher RAM und als Programmspeicher Flash-ROM integriert

Mikrocontroller Zumeist ein Ein-Chip-Computersystem, bei dem neben dem Mikroprozessor auch Arbeitsspeicher, Ein-/Ausgabeeinheiten, Zeitgeber usw. integriert sind

RAM Random-Access-Memory. Lese- und Schreibspeicher, welcher zumeist die Daten eines Mikrocontrollers enthält. Vergisst diese beim Ausschalten des Computers

ROM Read-Only-Memory. Festprogrammierter Speicher, der zumeist das eigentliche Programm enthält und dieses beim Ausschalten nicht verliert

Flash-ROM Ein Festspeicher, der zwar die Daten bzw. das Programm beim Ausschalten nicht verliert, aber durch den Anwender neu programmiert werden kann

ISP In-System-Programmable. Speicher, der nicht in einem externen Programmiergerät programmiert werden muss, sondern innerhalb der Anwenderschaltung programmiert werden kann. Viele der modernen Mikrocontroller können über eine einfache serielle Schnittstelle in der Schaltung programmiert werden

RISC Reduced Instructionset. Moderne uC verwenden einfache, kurze Befehle, die sehr schnell ausgeführt werden können

A.2. Verwendete Adressen

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
Bernhard-Nocht-Straße 78
20359 Hamburg
Telefon: 040 3190-0
Fax: 040 3190-5000
Mail: posteingang@bsh.de

Außenstelle Rostock
Dierkower Damm 45
18146 Rostock
Telefon: (0381) 4563-5
Fax: (0381) 4563-948
E-Mail: posteingang.rostock@bsh.de
<http://www.bsh.de>

Bundesanstalt für Wasserbau
Außenstelle Küste
Wedeler Landstrasse 157
D-22559 HAMBURG
Tel. : 040 81908 358
Fax. : 040 81908 373

Thorsten Ostermann
Umfangreiche Homepage zum Thema *Schrittmotoren*
E-Mail: Thorsten@ostermann-net.de
<http://www.ostermann-net.de/electronic/index.html>

David Flatner
Programm xtides, umfangreiche Homepage zum Thema Gezeitenvorausberechnung
E-Mail: dave@universe.digex.net
<http://www.universe.digex.net/dave/files/>

Volker Oth
Win32 Version des GNU-C-Compilers für die AVR Prozessoren von Atmel
<http://members.xoom.com/volkeroth/index.htm>

Fa. CadSoft
Freeware version des EDA Programms *Eagle* zum herunterladen
<http://www.cadsoft.de>

Die aktuellen JAVA Programme, die *Eagle* Dateien zum Erstellen der Platine und ein ROM-Image der Betriebssysteme für den Atmel AT90S8515 können entweder vom Lehrstuhl-Web-Server oder direkt von der Homepage des Autors: <http://rotter.home.pages.de/gezeiten> heruntergeladen werden.

A.3. Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1.	Tidenkurve für Helgoland	4
2.	Tidenkurve für San Francisco	4
3.	Tidenkurve für Tanjung Priork	5
4.	Tidenkurven für Albany	5
5.	Jupiter Mond Io	6
6.	Überlagerungen von Gravitationskräften des Jupiters	7
7.	Risse im Eis auf Jupitermond Europa	8
8.	Flutberge bei homogenen und inhomogenen Gravitationsfeld des Mondes	9
9.	Astronauten im Weltall	10
10.	Bewegung von Punkten auf der Erde	11
11.	System Erde–Mond	12
12.	Kräfteüberlagerung zur Springzeit	15
13.	Kräfteüberlagerung zur Nippzeit	16
14.	Assymetrische Lage der Flutberge zum Äquator	17
15.	Astronomischen Grundgeschwindigkeiten	22
16.	Tabelle ausgewählter Partialtiden	23
17.	Generator zur Erzeugung harmonischer Schwingungen	24
18.	Mechanische überlagerung harmonischer Schwingungen	25
19.	Applet zur Gezeitenberechnung	27
20.	Harmonische Konstanten für Belfast	28
21.	Simulation einer Gezeitenberechnungsmaschine	32
22.	Zweite deutsche Gezeitenberechnungsmaschine	33
23.	Erstes Modell einer Gezeitenrechenmaschine von Lord Kelvin	34
24.	Erste deutsche Gezeitenrechenmaschine	35
25.	Erste Gezeitenrechenmaschine nach Roberts	37
26.	Übersicht der bis 1955 weltweit gebauten Gezeitenberechnungsmaschinen	38
27.	Legomodell von Jürgen Kretschmann mit zwei Partialtiden	39
28.	Modellskizze	41
29.	Skizzen zu den Sinusgeneratoren des Modells	42

Abbildungsverzeichnis

30.	Schnitt durch einen Hybridmotor	43
31.	Unipolare Ansteuerung – Bipolare Ansteuerung	44
32.	Übersicht der verschiedenen Betriebsarten eines Schrittmotors	45
33.	Stromlaufplan Steuerung	47
34.	Stromlaufplan der Bedieneinheit	48
35.	Layout der Steuerungsplatine	49
36.	Bestückungsplan der Steuerplatine	49
37.	Layout der Bedienplatine	50
38.	Bestückungsplan der Bedienplatine	50

A.4. Literaturverzeichnis

- Bro95** Bronstein, Ilja N.; Semendjajew, Konstantin A.; Musiol, Gerhard; Mühlig, Heiner: *Taschenbuch der Mathematik*, Harri Deutsch, Frankfurt am Main 1995
- BSH00** Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: *Der Einfluß des Windes und der Luftdruckschwankungen auf die Gezeiten*, Hamburg 2000
Online verfügbar unter <http://www.bsh.de/Meereskunde/Gezeiten/812.htm>
- Dal99** Dalheimer, Matthias Kalle: *Jetzt mach ich's selber – Programmierkurs für Einsteiger, Teil 1 – 6* in c't, 11/99–16/99, Heise, Hannover 1999
- Def53** Defant, Albert: *Ebbe und Flut des Meeres, der Atmosphäre und der Erd feste*, Springer, Berlin 1953
- Fla97** Flanagan, David: *Java in a Nutshell, 2nd Edition*, O'Reilly & Associates, Sebastopol 1997
- Häm91** Hämmerlin, Günther; Hoffmann, Karl-Heinz: *Numerische Mathematik*, Springer, Berlin–Heidelberg 1991
- Her92** Herrmann, Joachim: *Welcher Stern ist das ? Sehen–Bestimmen–Wiedererkennen*, Franckh–Kosmos, Stuttgart 1992
- Hop99** Hoppa, Gregory V. et al.: *Europas's Cracks Created by Ocean Tides*, Tucson 1999.
Online verfügbar unter <http://pirlwww.lpl.arizona.edu/hoppa/science.html>
- Ken98** Kentie, Peter: *Web Graphics*, Addison–Wesley, Bonn 1998
- Kre94** Kretschmann, Jürgen: *Gezeiten des Meeres*, Zulassungsarbeit an der Universität Erlangen–Nürnberg, Erlangen 1994
- Krü99** Krüger, Guido: *Go to Java 2*, Addison–Wesley, Bonn 1999.
Auch online verfügbar unter <http://www.gkrueger.com/>
- Kuc96** Kuchling, Horst: *Taschenbuch der Physik*, Fachbuchverlag Leipzig 1996
- Lan00** Lang, Günther: *Gezeitenanalyse des Wasserstands*, Hamburg 2000
Online verfügbar unter http://www.hamburg.baw.de/kenn/frqw/frqw_de.htm
- Sab93** Schaback, Robert; Werner, Helmut: *Numerische Mathematik*, Springer, Berlin 1993
- Sag55** Sager, Günther: *Gezeiten Voraussagen und Gezeitenrechenmaschinen*, Warnemünde 1955
- Sch89** Schneider, Werner B.; Näpfel, Helmut: *Die Gezeiten und ihre Behandlung im Physik- und Astronomieunterricht*. In: Schneider, Werner B. (Hrsg.): *Wege in der Physikdidaktik*, Palm & Enke, Erlangen 1989

- Sae86** Schaefer, Norbert; Bertuch, Manfred: *Butterfly-Algorithmus – Theorie und Praxis der Fourier-Transformation* in der Zeitschrift c't 8/1986, Heise, Hannover 1986
- Scw93** Schwarz, Hans Rudolf: *Numerische Mathematik*, Teubner, Stuttgart 1993
- Sie99** Siever, Ellen, Spainhour, Stephen, Patwardhan, Nathan: *PERL in a Nutshell*, O'Reilly & Associates, Sebastopol 1999
- SHO84** Service Hydrographique et Océanographique de la Marine: *Table des marées des grands ports du Monde*, Paris 1984
- Spa00** The Space Place: *High Tide on Io*, URL: http://spaceplace.jpl.nasa.gov/gll_io_fact.htm
- USA41** United States Government Printing Office: *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*, Special Publication No. 98, Revised (1940) Edition, Washington 1941
- USA82** National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce: *Computer Applications to Tides in the National Ocean Survey. Supplement to Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides (Special Publication No. 98)*, Washington 1982.

Verwendete Datenblätter:

- ATMEL, Inc: *AT90S8515, AT90S4414, 8-bit AVR Microcontroller with 4K/8K bytes In-System Programmable Flash*, Rev. 0841E-04/99, 1999
- SGS-Thomson: *L297 – Stepper Motor Controllers*, 1996
- SGS-Thomson: *L298 – Dual Full-Bridge Driver*, 1995
- SGS-Thomson, *Application Note AN470 – The L297 Stepper Motor Controllers*, 1992
- SGS-Thomson; Sax. H: *Application Note AN235 – Stepper Motor Driving*, 1988
- SGS-Thomson; Hopkins, Thomas L.: *Application Note AN460 – Stepper Motor Driver Considerations, Common Problems & Solutions*, 1992