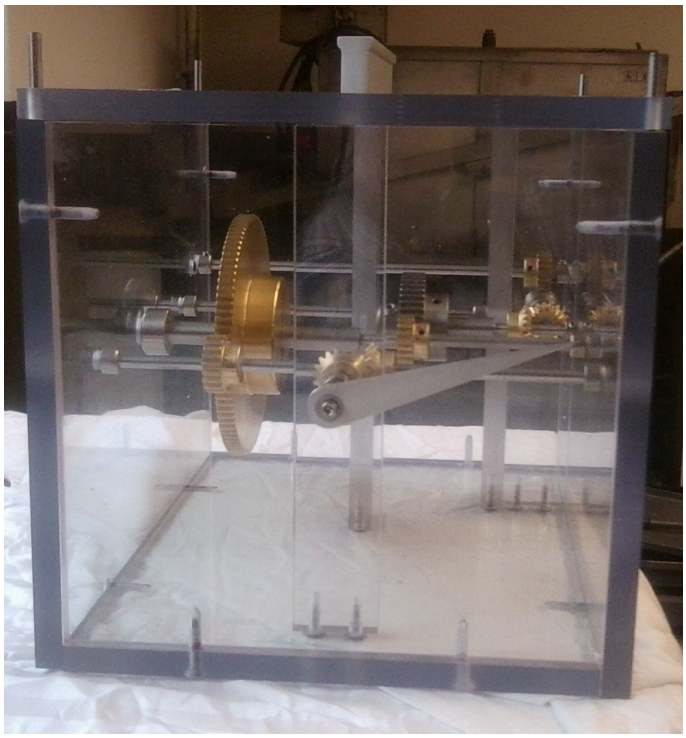
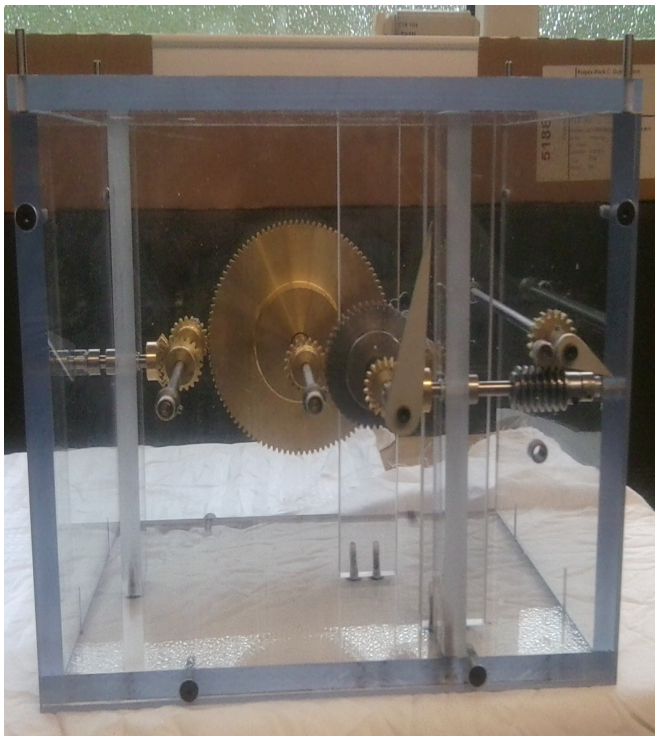
Carl-Fuhlrott-Gymnasium **Jahrgangsstufe 11 (Q1)**

Wuppertal Schuljahr 2011/2012

Projektarbeit im Projektkurs Astronomie zum Thema

Bau eines Mondphasenkalenders nach Vorbild des Mechanismus von Antikythera





Verfasser: Florian Kretschmann, Marvin Huang

Projektbetreuer: Bernd Noll, Bernd Sopp, Dr. Burkard Steinrücken, Michael Winkhaus, Bernd Koch

Abgabetermin: 18. Juni 2012

Inhaltverzeichnis

1. Einleitung 1
2. Die Eigenschaften des Mondes 2
3. Die Mondfotografie 5
    3.1 Die Aufnahmedaten 5
    3.2 Die Bildbearbeitung 7
4 Der Mechanismus von Antikythera 14
    4.1 Die Entdeckung und Bergung 14
    4.2 Erforschung des Räderwerks 15
5 Der Mondphasenkalender 18
    5.1 Das Räderwerk 18
        5.1.1 Der Meton-Zyklus 18
        5.1.2 Kallippischer Zyklus 19
        5.1.3 Meton- und Kallippischer Zyklus im Räderwerk 20
    5.2 Das Exzentermodell Hipparchs 21
    5.3 Exkurs: Olympiaden-Zyklus 23
    5.4 Andere Kalender im Räderwerk 24
    5.5 Die Herkunft des Mechanismus von Antikythera 25
6 Unser eigener Mondphasenkalender 26
    6.1 Entwurf 26
    6.2 Werkstatt 27
    6.3 Konstruktion 27
    6.4 Bau 29
    6.5 Genauigkeitmessung 32
    6.6 Ausblick 34
5 Danksagung 36
6 Abschlusserklärung 37

Anhang

CD

Einleitung

Im Rahmen der Projektarbeit des Projektkurses Astronomie beschäftigten wir uns im zweiten Halbjahr mit dem Thema "Bau eines Mondphasencomputers nach Vorbild des Mechanismus von Antikythera".

Im vorangegangen ersten Halbjahr fand die Ausbildung aller Projektkursteilnehmer statt, wo wir das Arbeiten an der Schulsternwarte erlernten. In Wochenendkursen erlernten wir die Astrofotografie und die Sternspektrokopeie, sodass wir zum zweiten Halbjahr eine breites Spektrum an astronomischen Themen vorgeschlagen bekamen. Wir beide entschieden uns für unser Thema, weil das Bauen von mechanischen Geräten uns viel Freude versprach. Die Anzeige von Mondphasen hatte auch praktischen Nutzen, denn bei den Astrofotografiekursen fokussierten wir desöfteren den Mond, der sehr einfach im Nachthimmel zu finden war. Jedoch schlugen wir als Astroneulinge fast vor jedem Beobachtungsabend nach, welche Mondphase gerade sichtbar war. Dieses Problem und der zufällig passende Themenvorschlag führten uns zum Mechanismus von Antikythera, einem antiken Artefakt, das neben Mondphasen und Mondmonate auch Finsternisse und zyklisch stattfindende Sportturniere anhand des Datums im Sonnenkalender berechnet. Begeistert von diesem antiken Computer, wollten wir zunächst den lunaren "Zweig" des Räderwerks nachbauen, wenn auch in stark vereinfachter Version. Eine weitere Zweiergruppe in unserem Projektkurs hat sich die Anzeige von Finsternissen und Tierkreisssmbolen abhängig vom Sonnendatum als Thema ausgesucht, weshalb wir bei eventuellen Erweiterungen unseres mit um die Finsternisanzeige ein Erfahrungsaustausch sehr hilfreich sein wird. Unsere Projektarbeit beginnt zunächst mir einer Beschreibung zur Aufnahme von Mondbildern mit der Standardausrüstung der Beobachtungsinseln, ehe der Antikythera-Mechanismus vorgestellt wird, worauf unser Entwurf später basiert.

2. Die Eigenschaften des Mondes

Bevor wir uns mit der Fotografie des Mondes befassen, ist es notwendig die Eigenschaften des Mondes nachzuvollziehen. Wie kann der Mond mal als Vollmond, mal als Neumond auftreten?

Die Antwort ist, einmal verstanden, recht simpel: Mondphasen sind das Produkt der unterschiedlichen Stellung zwischen Erde, Mond und der Sonne [1]. Der Mond ist kein Stern, und damit keine aktive Lichtquelle. Er reflektiert lediglich die Sonnenstrahlen und ist damit eine passive Lichtquelle. Steht die Erde, von oben betrachtet, im rechten Winkel zu den Strahlen der Sonne, die auf dem Mond auftreffen, entsteht für den Beobachter auf der Erde ein Halbmond.
Ist die Erde hinter dieser Verbindunglinie Sonne - Mond, dann sieht ein Erdbewohner Neumond**,** während der Vollmond nur dann auftritt, wenn die Erde auf dieser Verbindungslinie liegt.
Diese Konstellationen der Positionen beeinflusst auch die Aufgangszeit des Mondes. So geht bei Vollmond der Mond in der abendlichen Dämmerung auf, weil er aus der Perspektive der Erde auf der entgegengesetzten Richtung liegt. In der abnehmenden Phase, also in der Zeit zwischen Voll- und Neumond, ist er lediglich in der zweiten Nachthälfte zu sehen, wohingegen er in der zunehmenden Phase in der ersten Nachthälfte über dem Horizont liegt. Aus diesem Grund war die Aufnahme von Mondphasen in der abnehmenden Phase vom vornherein ausgeschlossen, eine Betreuung an der Sternwarte um und nach Mitternacht ist nicht möglich.

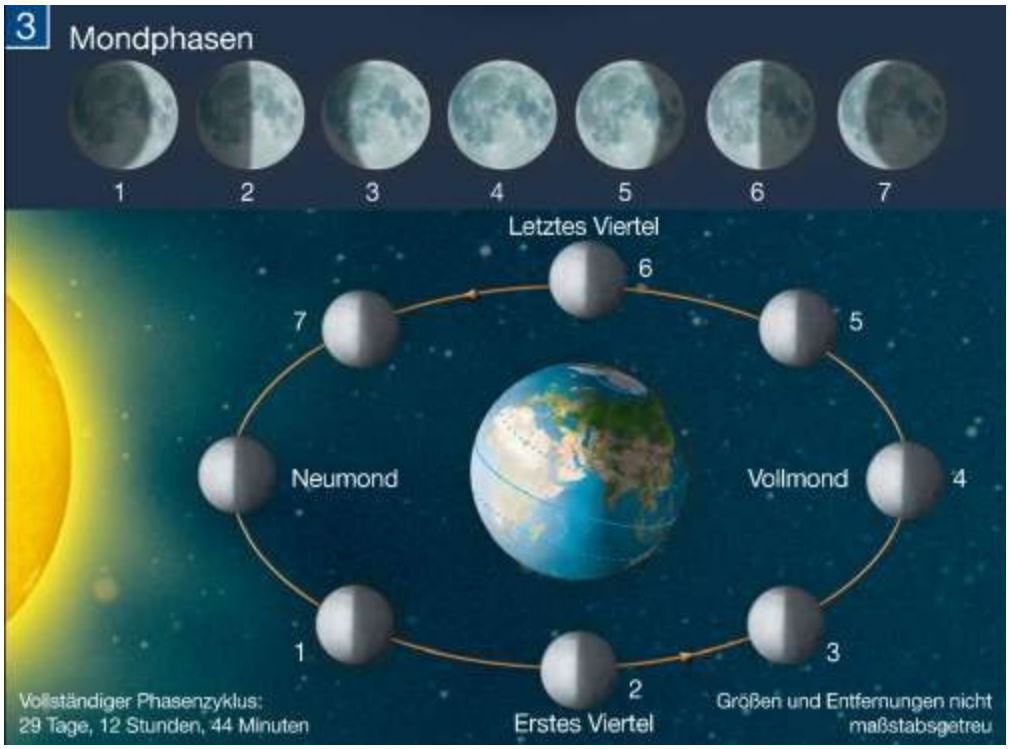


Abbildung 1: Mondphasen aus Sicht eines Beobachters auf der Erde

Bei der Fotografie von zunehmenden Mondphasen gab es wetterbedingte Einschränkungen. In Wuppertal, einer der regenreichsten Großstädten Deutschlands schränkte die häufige und starke

Bewölkung unsere Fotografietermine auf nur zwei von sechs geplanten Tagen ein. Sobald wir den Kontakt mit der Werkstatt herstellten, fielen beide Termine zeitlich übereinander, weshalb wir auf weitere Fotografien verzichteten, damit wir in der Bauphase zumindest die Funktion des Räderwerks fertigstellen konnten. Auch für eine schöne Verarbeitung der Werkstoffe konnten wir nicht zu viel Zeit investieren.

Zurück zum Mond: Die Dauer bis eine Mondphase sich wiederholt, also eines Mondzyklus', beträgt 29,5306 Tage. Dieser Wert wird als synodischer Monat bezeichnet, denn eine synodische Periode ist die Zeit für eine Wiedererreichung der Winkel Sonne-Erde-Himmelskörper. Entsprechend werden alle 29,5306 Tage der Winkel Sonne-Erde-Mond den selben Wert besitzen. Wenn man aber von einem siderischen Monat spricht, ist ein anderer Winkel gemeint, nämlich der zwischen der einem Fixstern (in unendlicher Ferne), der Erde und dem Mond. Eine Periode dauert hier 27,3217 Tage. Die Unterschied erklärt sich dadurch, dass zusätzlich zur Umkreisung des Mondes um die Erde , die Erde gleichzeitig um die Sonne kreist, sodass der Mond für eine synodische Periode zusätzliche zur siderischen Periode noch ein Stück weiter muss.

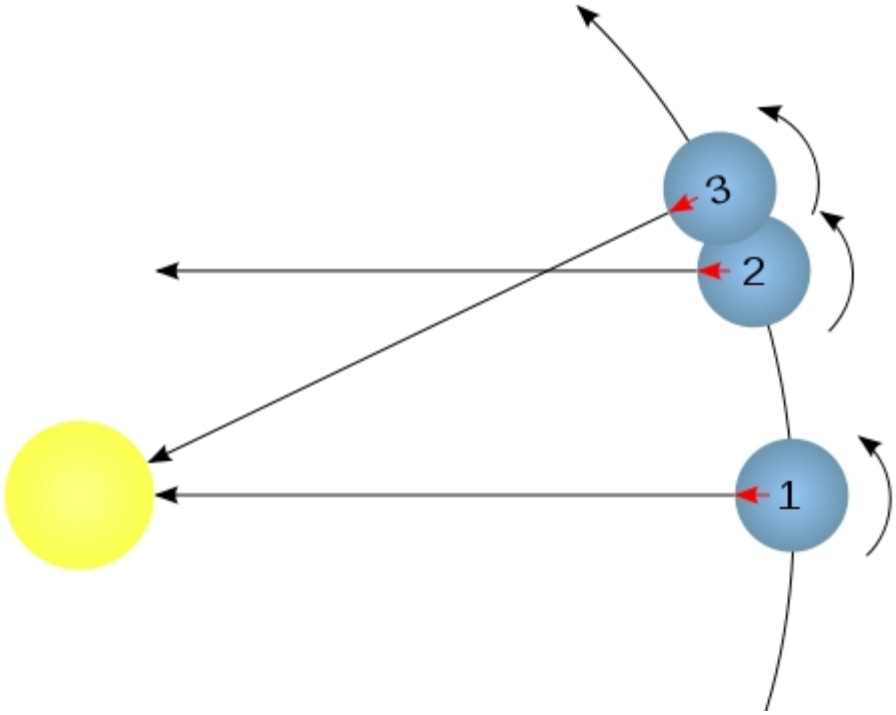


Abbildung 2: (1) Ausgangsposition ; (2) Position nach einer siderischen Periode , (3) Position nach einer synodischen Periode

Durch die gebundene Rotation des Mondes um die Erde sieht der irdische Beobachter immer nur eine Seite des Mondes. "Gebundene Rotation" bedeutet, dass der Mond sich in einem Umlauf um die Erde ebenfalls eine Umdrehung um seine eigene Achse schafft. Ungefähr 59% von der Mondoberfläche sind von der Erde einsehbar [2]. In seiner Ellipsenbahn um die Erde schwankt die

Entfernung zwischen ca. 363300 km (Perigäum) und ca. 405500 km (Apogäum) . Die große Halbachse misst rund 384400 km.

Interessant für den Mechanismus ist für uns vordergründig der synodische Monat, da er die Periodendauer bis zur selben Mondphase angibt. Die Schwierigkeit liegt in der Synchronisation mit einem Sonnenkalender, weil er nur ganze Tage zählt. Zwei Lösungsansätze werden im Kapitel 5.1. geschildet.

3. Die Mondfotografie

3.1 Die Aufnahmedaten

Der Erdmond hat einen Gesamtdurchmesser von 3476 Kilometern, welcher etwa einem Viertel des Erddurchmessers entspricht. Diese Maße sind bei der Mondfotografie zu beachten, da beispielsweise durch die Benutzung von Teleskopen mit einer zu hohen Brennweite, der Mond auf dem späteren Bild über die Maße hinausgeht.

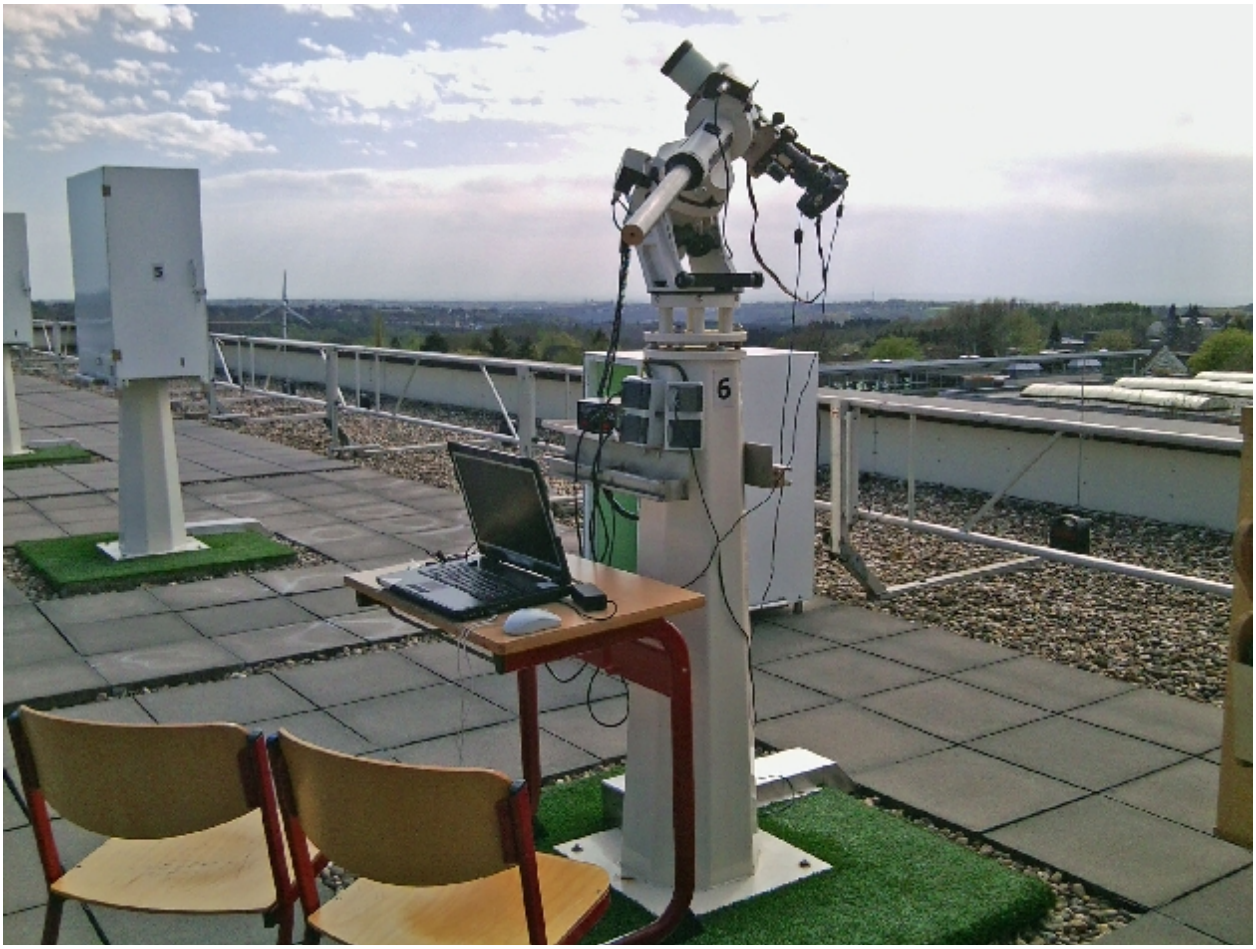


Abbildung 3: Aufbau zur Fotografie auf dem Dach der Schule

Daher haben wir das Pentax mit einer 500mm Brennweite gewählt, anstatt dem Celestron C11 Edge HD. Außerdem wurde für die Aufnahme die Kamera EOS-450D von Canon angeschlossen. Während der Aufnahmen wurden ISO-Werte von 100 bis 200 gewählt und die Belichtungszeiten lagen zwischen 1/400s bis 1/2000s.

Abbildung 4: Aufbau auf der Sternwarte

Die Fotos wurden am Samstag den 28. März 2012 um 16:10 Uhr aufgenommen, es herrschten leider keine optimalen Bedingungen, das heißt sehr warme Temperaturen bis zu 26° C im Schatten, welche ein sehr starkes Luftflimmern verursachten, wo letztendlich das Bild verschwommen wirkt. Alle Aufnahmen wurden auf dem Dach vom Carl-Fuhlrott-Gymnasium an dem Schülerlabor Astronomie gemacht. Zu Beginn hatten alle Fotografien einen starken Rotstich, wir sind davon ausgegangen, dass dies durch falschen Weißabgleich in der Kamera zusammenhängt, wie das bearbeitet werden kann folgt.

3.2 Bildbearbeitung

Nachdem mehrere Bilder auf dem Dach des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums gemacht worden sind, müssen diese noch nachbearbeitet werden, weil diese wie gesagt einen Rotstich haben. Die Bearbeitung wird nun an einem Beispiel demonstriert, eine Bearbeitung mit Photoshop CS3 Extended. Als erstes muss man das Bild in das Programmeinfügen.

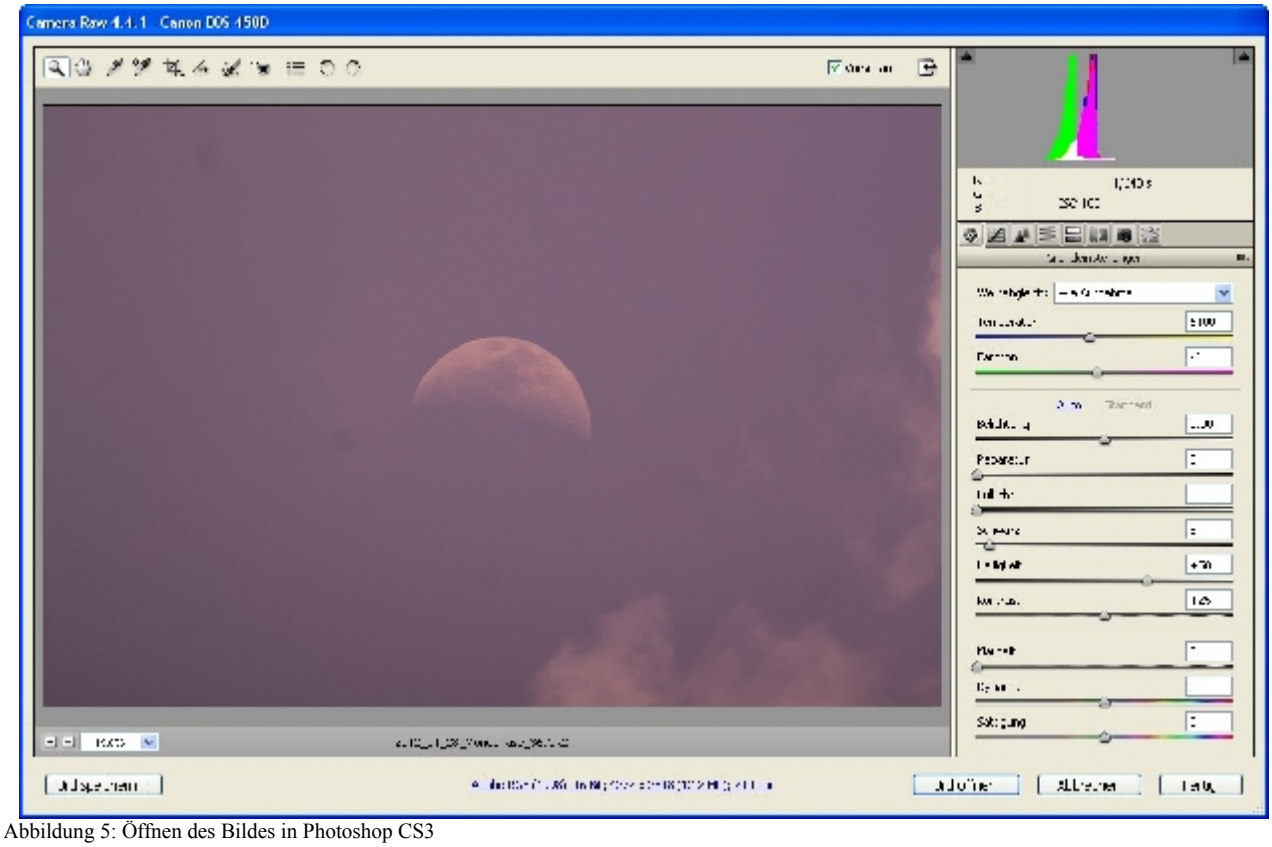


Abbildung 5: Öffnen des Bildes in Photoshop CS3

Anschließend öffnet sich das erste Fenster zur schnellen Vorbearbeitung. Jetzt muss der Weißabgleich nachgeholt werden, weil er in der Kamera nicht richtig funktioniert hatte. Dabei wird mit der Pipette so auf den Mond geklickt, sodass er neutral erscheint.

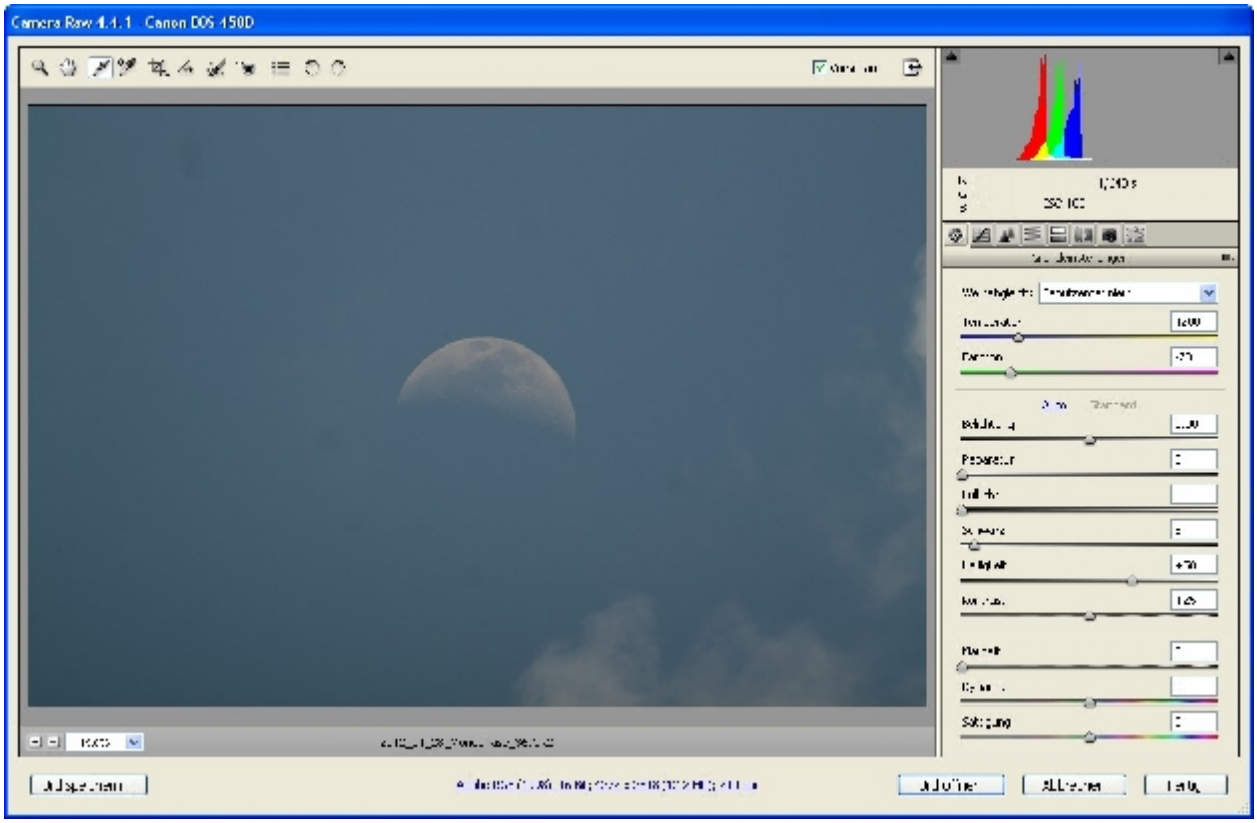


Abbildung 6: Weißabgleich wird nachgeholt

Darüber hinaus wird der Weißabgleich so eingestellt, dass der Mond in seiner scheinbaren natürlichen Farbe zu sehen ist. Nun folgt die Entfernung des Rauschens, welches durch das Luftflimmern entstanden ist. Dabei muss man beachten, dass das Bild durch die Einstellung nicht zu „verschwommen“ und nicht zu „verrauscht“ ist.

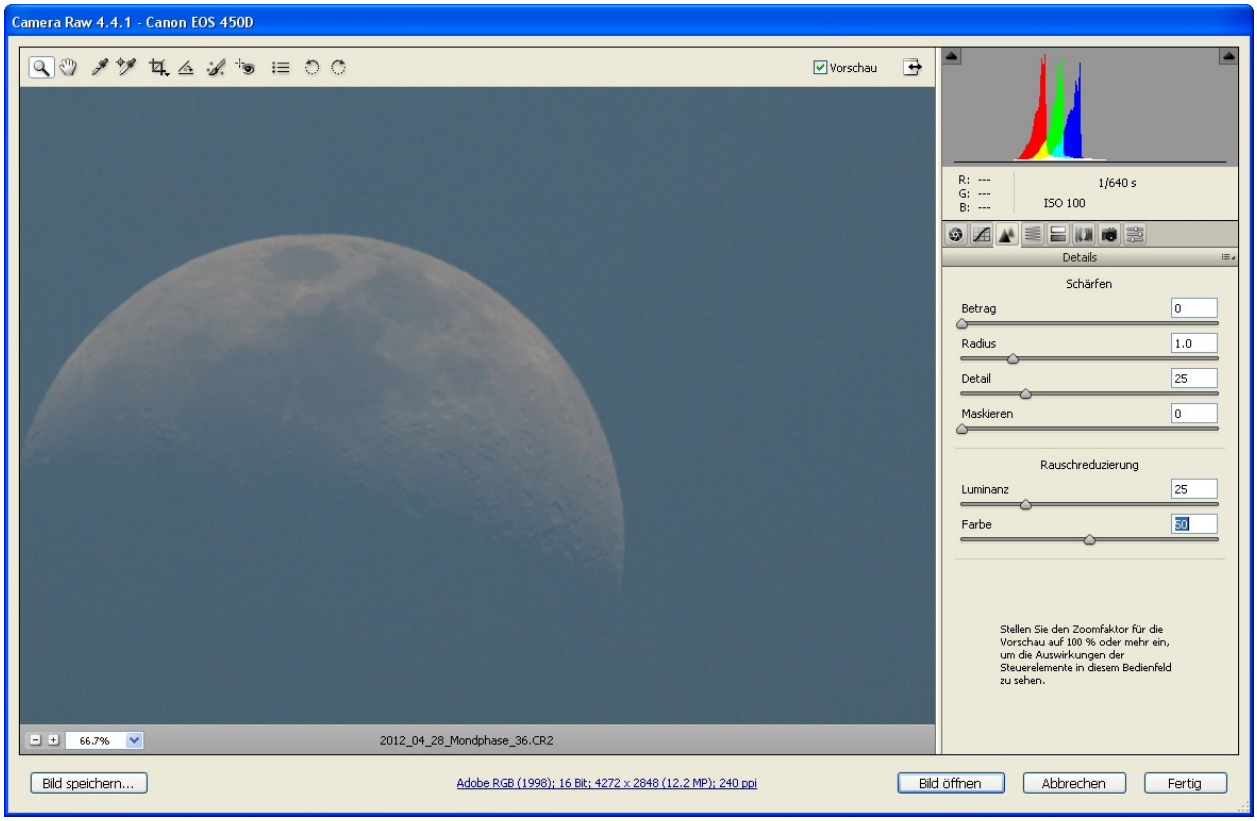


Abbildung 7: Rauschreduktion

Jetzt ist das meiste Rauschen entfernt, aber das Bild ist noch nicht fertig. Es muss noch gedreht

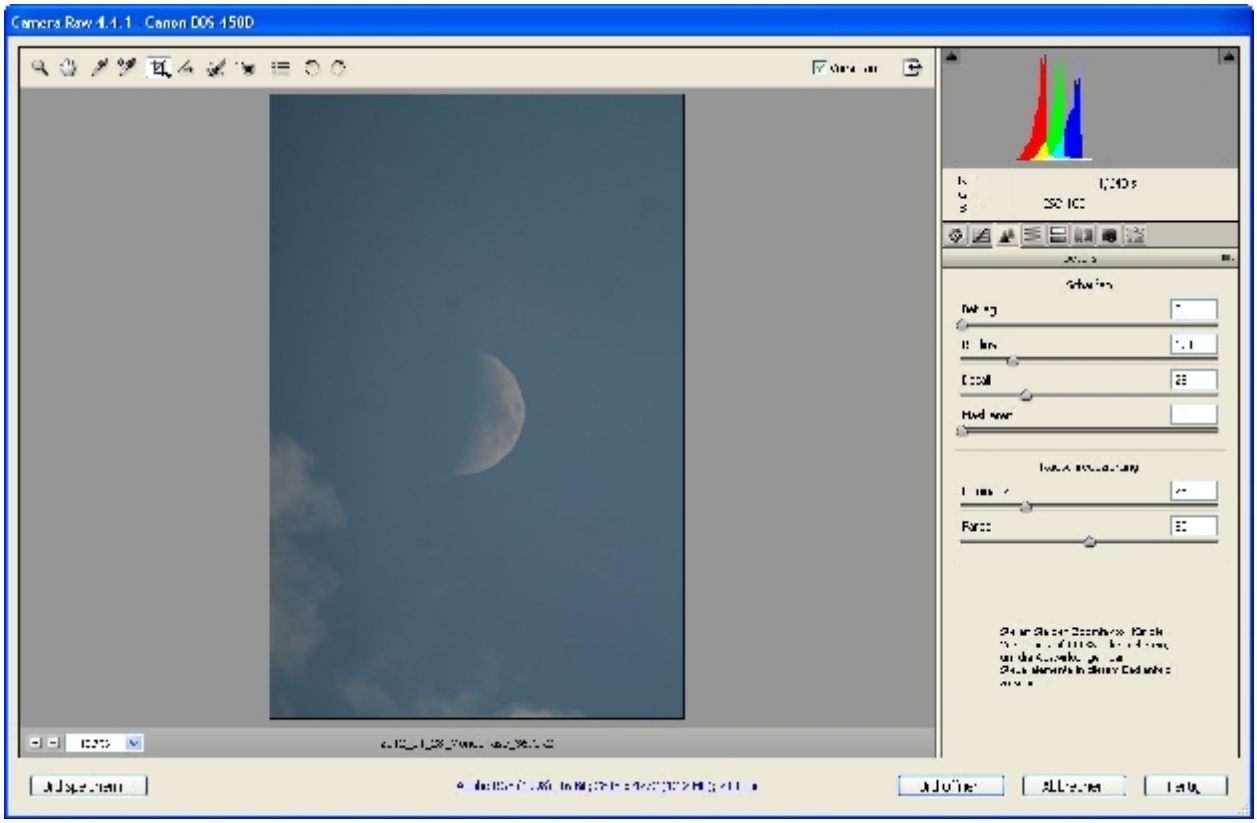


Abbildung 8: Drehung des Bildes um 90° im Uhrzeigersinn

und auf die richtige Größe zugeschnitten werden.

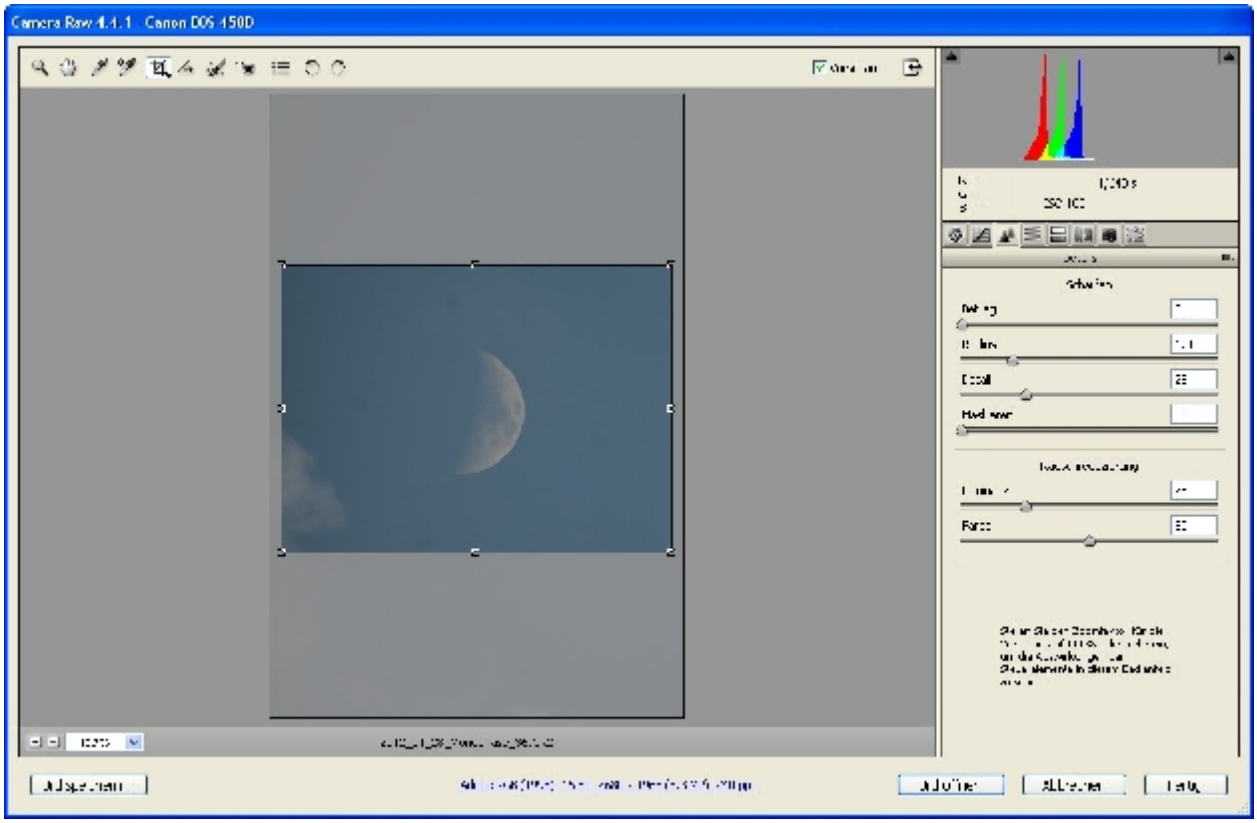


Abbildung 9: Beschneidung des Bildes auf die gewünschte Größe

Das Bild muss in 90° im Uhrzeigersinn gedreht werden, weil es sich um den zunehmenden Mond handelt, wo sich die beleuchtete Seite rechts befindet. Man kann alles nochmals überprüfen unter der Freeware „Virtual Moon Atlas“ [1]

[1] Downloadlink bei CHIP Online: http://www.chip.de/downloads/Virtual-Moon-Atlas_37171994.html

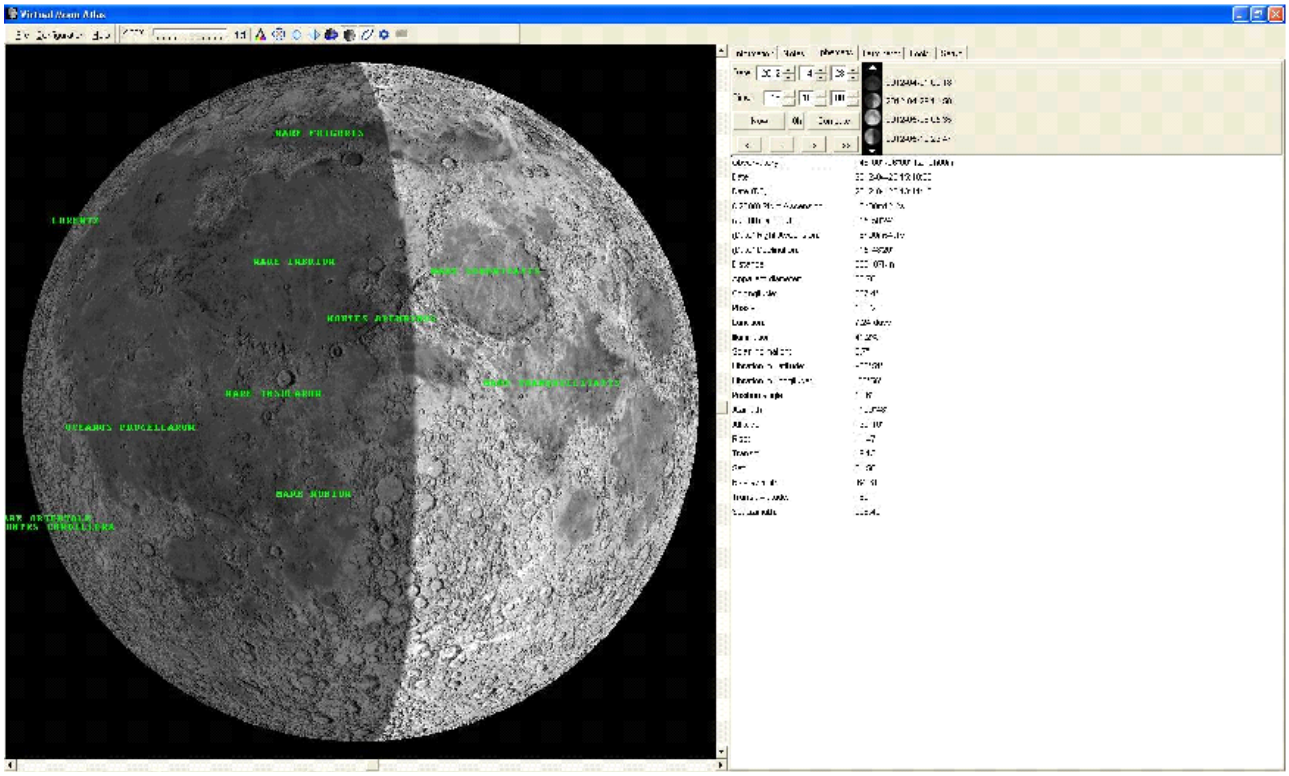


Abbildung 10: Virtual Moon Atlas für den 28. April 2012

Außerdem besitzt das Programm eine außergewöhnliche Eigenschaft, es zeigt das "Alter" des Mondes an. Es beginnt bei 0 mit einem Neumond und endet bei 29 mit der letzten Stufe vor dem Neumond.

Man kann aus Abb.10 entnehmen, dass der Mond 7,24 Tage "alt" ist, also ist er zunehmend.

Zurück zur Bildbearbeitung: nachdem das Bild gedreht und beschnitten wurde, wird nun die Farbbalance eingestellt. Sie dient dazu, dass der Himmel blau erscheint und nicht rot, beziehungsweise graues blau (Abb. 11).

Das Bild ist praktisch schon fertig, doch man kann noch die Schärfe einstellen. Auch hier entsteht ein Problem, wenn man zu stark schärfen will wird das Rauschen zu stark und wenn man zu wenig macht, wird das Bild verschwommen (Abb. 12).

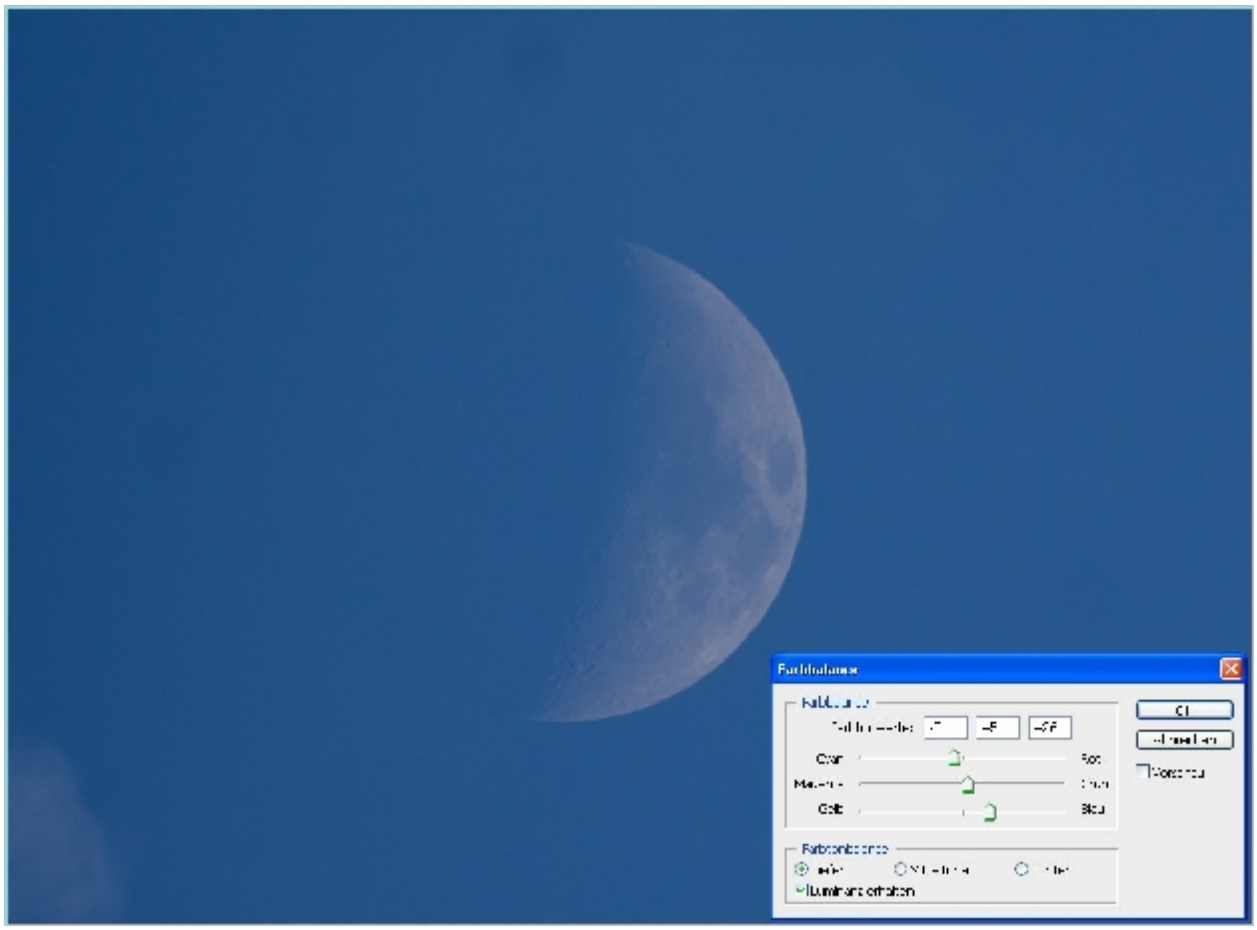


Abbildung 11: Nach der Farbbalance

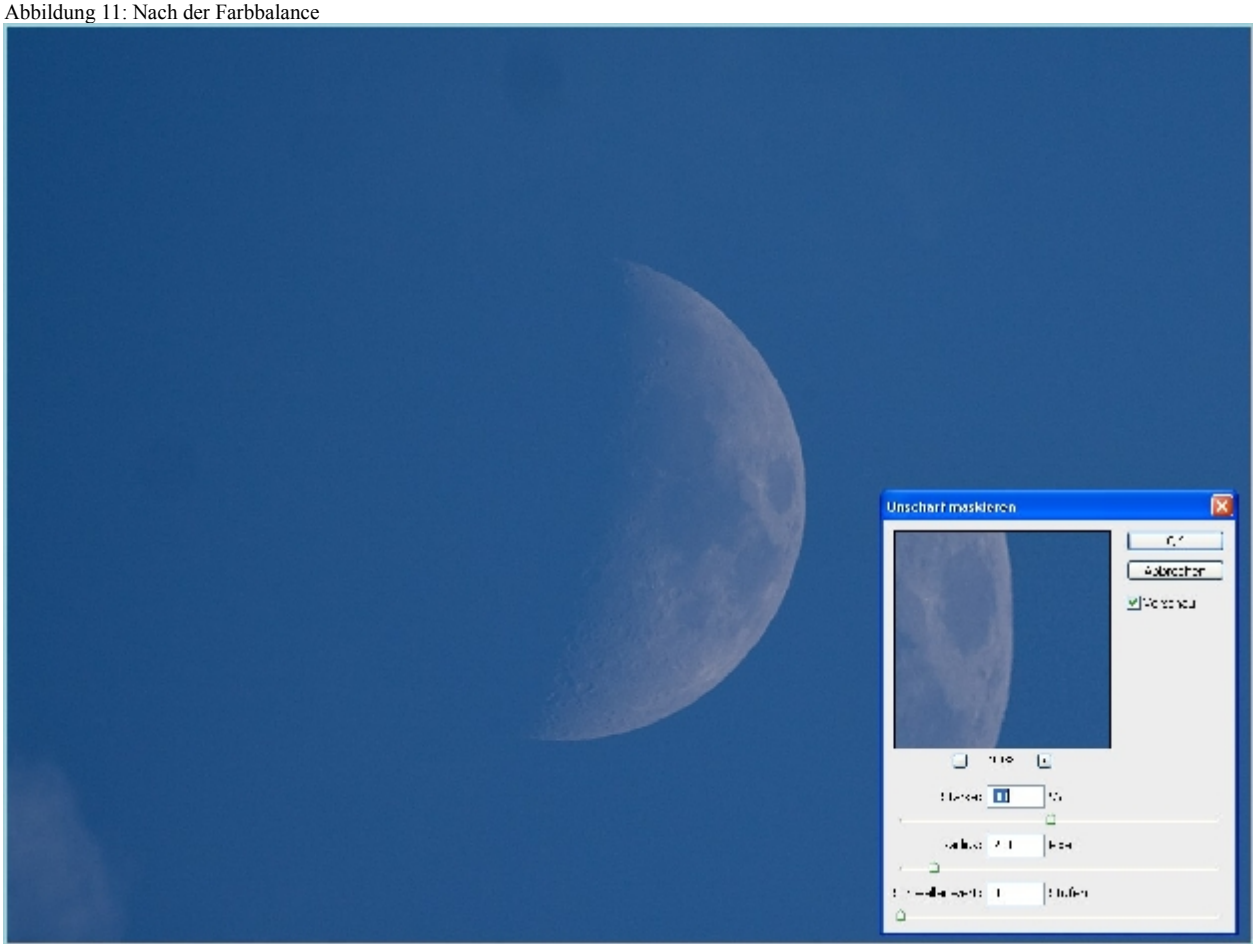


Abbildung 12: Schärfung des Bildes

Wenn man das perfekte Verhältnis gefunden hat, kann das Endergebnis folgendermaßen aussehen:

Abbildung 13: Fertiges Bild nach der Bearbeitung

Schließlich enthält das Bild der Mondphase keinen Rotstich und keine Unschärfe mehr, es ist nun ein fertiges Bild für Präsentationen, Vorträge etc.

4 Der Mechanismus von Antikythera

4.1 Die Entdeckung und Bergung

Im Oktober Jahr 1900 entdeckte ein Mitglied der Schwammtauchergruppe des Kapitäns Dimitrios Kondos, Elias Stadiatos, im Südwesten von der griechischen Insel Kreta vor der Küste von Antikythera, zufällig ein Schiffswrack eines antiken Handelsschiffs [3][4][5][6].

Die Bergung des antiken Schiffs, wurde mit einem Schiff der griechischen Marine ausgeführt, wobei die Schwammtaucher unter Leitung von Kapitän Kondos für den Taucheinsatz zuständig waren. Bis dahin wurde monatelange vergeblich versucht, das griechische Bildungsministerium von die Existenz des Wracks zu überzeugen, die nun diese Bergung veranlasste.

In zwei Expeditionen, die 1900 und 1901 ausgeführt worden, sind alle Fragmente geborgen worden wobei neben zahlreichen Bronzestatuen, Amphoren ein Klumpen aus korrodiertem Material mit einem Zahnrad gefunden worden ist. Allerdings lag dieser mehrere Monate in einer Kiste, langsam zerfallend durch den Kontakt mit Luft, bis der Museumsdirektor im Mai 1902 darauf aufmerksam gemacht wurde. Es stellte sich später als eines von 82 Fragmenten des Mechanismus von Antikythera heraus, welche wie alle anderen Funde dieses Wracks heute im archäologischem Nationalmuseum in Athen ausgestellt ist (Abb. 14 & Abb. 15) [2].

Nach einer durch die Weltkriege bedingten Forschungspause wurden neue Methoden zur Untersuchung der Wrackteile entwickelt. So analysierte Elizabeth Ralph mit der C14-Datierungsmethode die Reste des hölzernen Schiffsrumpfes, und schätzte das Baujahr des Schiffes in die Zeitspanne von 280 bis 180 v. Chr. Außerdem konnten ein paar Amphoren aufgrund ihrer Form und Machart als Herkunftsort zur Insel Rhodos zurückverfolgt werden, wo sie ca. ein Jahrhundert vor Christi Geburt entstanden sind.

Bei einer späteren Suche im Jahre 1976 von Jacques-Yves Cousteau und Frédéric Dumas wurden außerdem silberne Münzen aus Pergamon und Bronzemünzen aus Ephesos geborgen, die auf die Jahre 70 bis 60 v. Chr. datiert werden können, sodass das Schiffsunglück vor knapp 2000 Jahre geschah. Dies war eine Sensation, denn bisher nahm man an, dass Uhren erst im Mittelalter gut 1000 Jahre später entwickelt wurden. Dies erstaunte die Wissenschaftler damals hinsichtlich des technischen Fortschritts der Griechen, dessen Gründe wir mit der Erläuterung des Mechanismus in Kapitel 3 verdeutlichen werden.

---

[2] Link zur Ausstellungsbeschreibung: http://www.namuseum.gr/exhibitions/temporary/n_temporary-en.html#

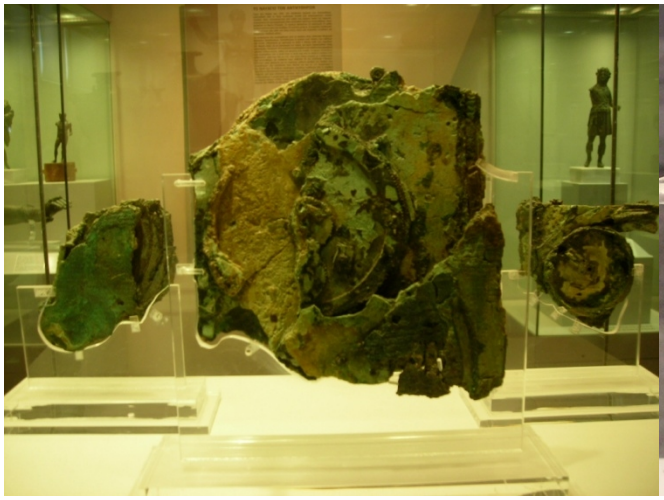


Abbildung 14: Rückseite der Fragmente A, B und C

Abbildung 15: Vorderseite des Fragment A

4.2 Erforschung des Räderwerks

Der im Jahr 1951 an der Princeton University tätige englische Wissenschaftshistoriker Derek John de Solla Price wurde auf den Mechanismus aufmerksam [3][5][6].
Im Juni 1959 veröffentlichte er im Magazin "Scientific American" seine wichtigste Publikation zu diesem Thema, mit dem Titel "An Ancient Greek Computer". Er vertrat die Meinung, dass die Zahnräder Teil einer Vorrichtung seien, die die Bewegung der Sterne und und der Planeten durch Zahnradübersetzungen berechnet, weshalb es seiner Ansicht nach der erste Analogcomputer[3] wäre. Bis zu diesem Zeitpunkt waren sich die Fachleute nach vielen Diskussionen lediglich einig, dass es ein astronomisches Instrument war, jedoch konnte man keine genaueren Angaben machen.

Nach mehreren Jahren Stillstand in seiner Forschung nutzte 1971 Price die neue Technologie der Röntgenanalyse zur Untersuchung der inneren Strukturen der bisher gefundenen Fragmente, um weitere Zahnräder sichtbar zu machen. Der zu dieser Zeit als Leiter der Radiographie im Kernforschungslaber arbeitende Kernphysiker Charalambos Karakalos röntge die Fragment. Im Sommer 1972 fertigete er hunderte von Röntgenaufnahmen des Mechanismus an, wobei seine Frau Emily Karakalos das Zählen der Zähne jedes neu entdeckten Zahnrades übernahm. Mit neuen Daten ausgerüstet, konnte Derek de Solla Price Arbeiten am Mechanismus fortsetzen, und nach Yale zurückkehren,

Abbildung 16: Derek J. de Solla Price mit seiner Rekonstruktion

[3] Link zum Artikel: http://www.mlahanas.de/Greeks/SCAMKythera.htm

wo er zu dem Zeitpunkt als erster Professor für Wissenschaftsgeschichte angestellt war. Im Juni 1974 veröffentlichte er ein 70-seitiges Buch mit dem Titel "Gear from the Greeks". Jedoch änderte er die Zählergebnisse von Emily Karakalos ab, da sie in seinem Zusammenhang nicht die richtige Übersetzung erwirkt hätten.

Ein fataler Fehler, dem Michael Wright, damals Kurator der Maschinensammlung im Londoner Science Museum, beim Lesen der Arbeit von Price auffiel. Er und Allan George Bromley, ein Astrophysiker von der University of Sydney, bauten in den Jahren ab 1985 ihre Rekonstruktion des Mechanismus von Antikythera, die Michael Wright am 6. März 2007 in Athen präsentierte[4].
Dabei baute Wright sich ein tragbares Röntgengerät, um die lineare Röntgentomographie an den Fragmenten anzuwenden, dadurch konnte er die Fragmente in mehrere 2D-Ebenen zerlegen.
Weil mehr Zahnräder zum Vorschein kamen, konnte er die Annahmen von Derek de Solla Price widerlegen.wodurch eine sinnvollere Interpretation der Zahnzahlen ermöglicht wurde.
Währenddessen tauchte im Jahr 1976 ein kleines, fünftes Fragment in den nicht katalogisierten Funden auf, die in den Hinterräumen gelagert wurden. Zunächst korrigierte Wright einige Details der Rekonstruktion von Price, in dem er die Synchronisation von Sonne und Mond um ein epizyklisches Getriebe erweitern konnte: mit einem sogenanntem Stift-und-Schlitz-Mechanismus.
Dieses ermöglicht es ein Zahnrad während einer Umdrehung in schnellere bzw. langsamere Geschwindigkeiten zu wechseln. Dies ist wichtig für eine genaue Darstellung der Mondphasen, da die Bahn des Mondes um die Erde, die Bahn der Erde um die Sonne sowie alle anderen Bahnkurven im All meist keine Kreisbahn darstellen, sondern eine Ellipse, wie es Kepler 1609 bereits feststellte. Aus dem zweiten Keplerschen Gesetz, auch Flächensatz genannt, folgt, dass die Bahngeschwindigkeit eines Objektes zunimmt, wenn es sich dem besetztem Brennpunkt annähert, und sich umgekehrt verlangsamt, je weiter es sich entfernt (vgl. Kapitel 3.3).
Dazu glaubte Wright an eine Darstellung der Planetenpositionen, die auch epizyklische Getriebe benötigen würde, wovon aber weitere Exemplare nicht gefunden worden sind. Dessen bewusst, baute er dennoch Planetenzeiger in sein Modell ein, um andere Menschen von dieser Möglichkeit zu überzeugen.

Außerdem vermutete er eine Anzeige von Finsternissen von Sonne und Mond, eine Vermutung, die Tony Freeth teilte. Tony Freeth ist promovierter Mathematiker an der Bristol University im Themengebiet der Mengenlehre, arbeitete allerdings für Filmstudios, weshalb er zunächst ein Film über den Mechanismus von Antikythera drehen wollte. Mittlerweile ist er Mitglied im "Antikythera

[4] Allan G. Bromley verstarb 2002 an den Folgen des Hodgkin-Lymphom

Mechanism Research Project" (AMRP), einem Gemeinschaftsprojekt der National and Kapodistrian University of Athen, der Aristotle University of Thessaloniki, der University of Wales, dem Archäologischem Nationalmuseum in Athen, dem Technologieunternehmen Hewlett-Packard Company, und der X-Tek Group, ein Unternehmen welches sich auf Röntgenröhren spezialisiert hat, und 2009 von der Nikon Corporation übernommen wurde. Desweiteren sind die Leverhulme Trust Stiftung und die Kulturstiftung der National Bank of Greece beteiligt.

Abbildung 17: Tony Freeth

Abbildung 18: Michael Wright und seine Rekonstruktion

Damit konnten im Rahmen des AMRPs alle sechs gefundenen Fragmente des Räderwerks einer 3D-Röntgen-Tomografie unterzogen werden, die durch den neu gebauten, achttonnigen "Bladerunner" von X-Tek durchgeführt wurde, der hierfür nach Athen transportiert werden musste (vgl. Anhang 1.1 und 1.2).

Außerdem konnte mit dem "PTM-Dome", einer Entwicklung von Hewlett-Packard, die Oberfläche der Fragmente, deren Anzahl im Oktober 2005 auf 82 beziffert wurde, sehr genau fotografiert werden. Infolgedessen wurden bis Mai 2006 über 2160 Zeichen entschlüsselt. Bis zum Einsatz dieses Gerätes wurden nur 1000 Zeichen entschlüsselt. Damit sind 95% der Inschriften, die noch erhalten sind, bekannt.

Die Ergebnisse wurden Ende 2006 in einer Konferenz in Athen veröffentlicht. Die neuesten Erkenntnisse sind im Internet unter der Homepage des "Antikythera Mechanism Research Project" einsehbar[5].

[5] http://www.antikythera-mechanism.gr/

5 Der Mondphasenkalender

5.1 Das Räderwerk

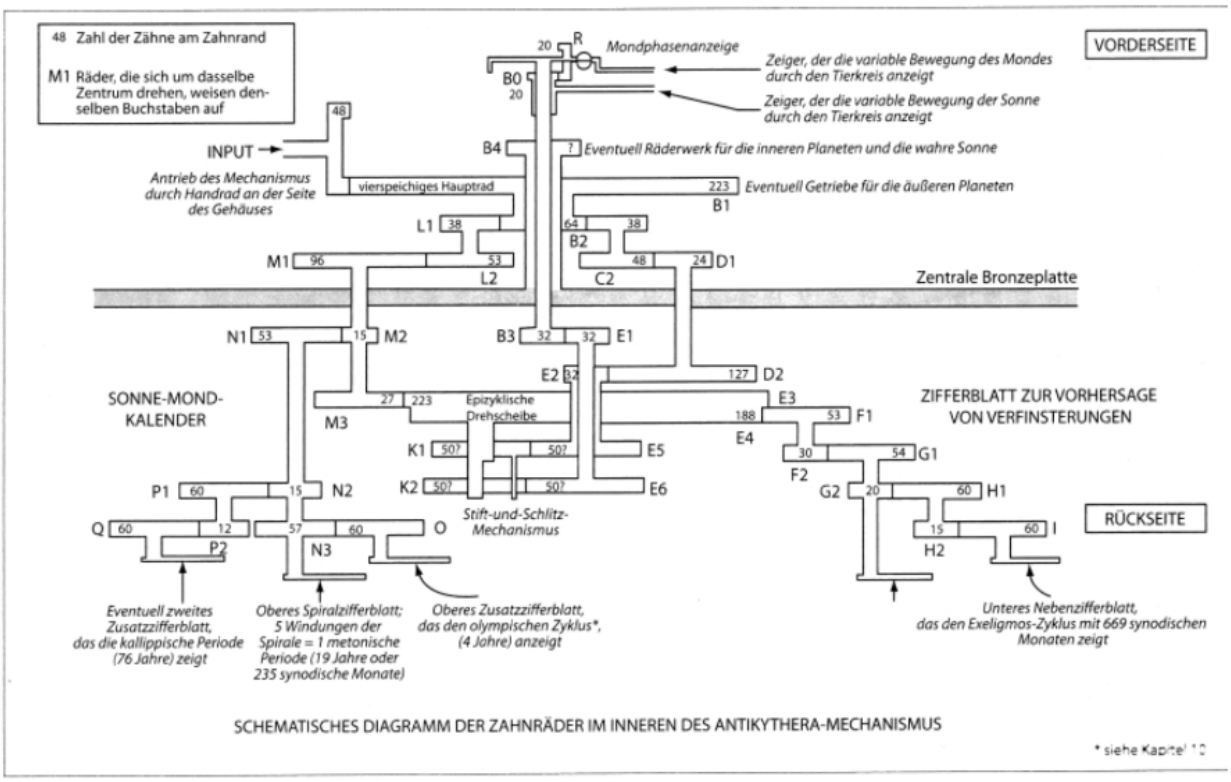


Abbildung 19: Querschnitt des Räderwerks, oben ist die Vorderseite, unten die Rückseite des Gehäuse

5.1.1 Der Meton-Zyklus

Eines der Leistungen, die das Räderwerk hervorbrachte, war das Berechnen der Mondphase aus dem Kalenderdatum [8]. Diese Funktion als Lunisolarkalender wird näherungsweise mit dem Meton-Zyklus erfüllt. Der Meton-Zyklus synchronisiert den Sonnenkalender mit dem Mondkalender in guter Näherung. Ein Zyklus umfasst dabei 19 Sonnenjahre , die mit 235 Mondmonaten gleichgestellt werden. Ein Jahr dauert nämlich 365,24220 Tage, ein synodischer Monat dauert 29,53059 Tage.

Folglich entsprechen 19 Jahre : $19 * 365{,}24220\, Tage = 6939.6018$Tage ,

235 Monate sind: $235 * 29{,}53059\, Tage = 6939{,}6886\, Tage$.

Es ist somit möglich, die beiden auf unterschiedliche Himmelskörper basierenden Kalender miteinander zu verbinden.

Die beiden auf unterschiedliche Himmelskörper basierenden Kalender miteinander zu verbinden, ist somit möglich. Die Umsetzung durch Zahnräder sieht wie folgt aus.Es muss insgesamt ein Übersetzungsverhältnis $\frac{235}{19}$ vorliegen, d.h., dass eine Umdrehung im Sonnenkalender $\frac{235}{19}$

Umdrehungen der Mondphasenanzeige darstellt. Als gerundete Dezimalzahl sind dies ca. 12,36842 Mondperioden.

5.1.2 Kallippischer Zyklus

Allerdings gibt es ein Problem in der metonischen Näherung [9]:

Alle 19 Jahre verursacht der Zyklus eine Abweichung von einem Vierteltag, weshalb Kallippos von Kyzikos folgende Verbesserung vorschlug, den Meton-Zyklus mit 4 multipliziert zu erweitern, um dann einen Tag abzuziehen. Dieser Zyklus wurde nach ihm benannt, und heißt Kallippischer Zyklus.

Zuerst betrachten wir die Abweichung in einem Meton-Zyklus:

die Dauer eines Monats ist: 6940 : 235 = <u>29,532</u> (Tage),

die Dauer eines Jahres ist: 6940 : 19 = <u>365,263</u> (Tage).

Im Vergleich dazu hat der Kallippische Zyklus eine bessere Näherung:

Umfang eines Zyklus : $6940*4-1=27759$ (Tage)

die Dauer eines Monats: $\frac{27759}{(235*4)}=\frac{27759}{940}=29{,}531$ (Tage)

die Dauer eines Jahres: $\frac{27759}{(19*4)}=\frac{27759}{76}=365{,}25$ (Tage)

Die tatsächlichen Werte im Vergleich gerundet auf die dritte Nachkommastelle:

Für die Dauer eines synodischen Monats: <u>29,5306</u> Tage

Für die Dauer eines synodischen Jahres: <u>365,242</u> Tage

Die Näherung des kallippischen Zyklus präzisiert also tatsächlich den bereits sehr genauen Meton-Zyklus.

5.1.3 Meton- und Kallippischer Zyklus im Räderwerk

Diese beiden Zyklen sind auch im Räderwerk wiederzufinden[3][10]. Das Mondkalenderblatt wurde in Form einer Spirale auf 5 Umrundungen ausgelegt, dessen Monate mit aus Glyphen aus korinthischen Monaten abgekürzt wurden. Also sind fünf Umdrehungen des Zeigers ein Meton-Zyklus bzw. 19 Sonnenjahre. Daraus ergibt sich ein Übersetzungsverhältnis von $\frac{5}{19}$.

In der Tat ist dieses Verhältnis im Räderwerk zu finden, allerdings verteilt auf mehrere Zahnräder, die mit folgenden Übersetzungen arbeiten: $\frac{64}{38}$, $\frac{53}{96}$ und $\frac{15}{53}$. Da sie miteinander verkettet sind, ist das Gesamtergebnis eine Multiplikation der einzelnen Übersetzung: $(\frac{64}{38})*(\frac{53}{96})*(\frac{15}{53})=(\frac{5}{19})$.[6]

Der Kallippische Zyklus muss eine Übersetzung von $\frac{1}{76}$ besitzen, damit der Anwender weiß,

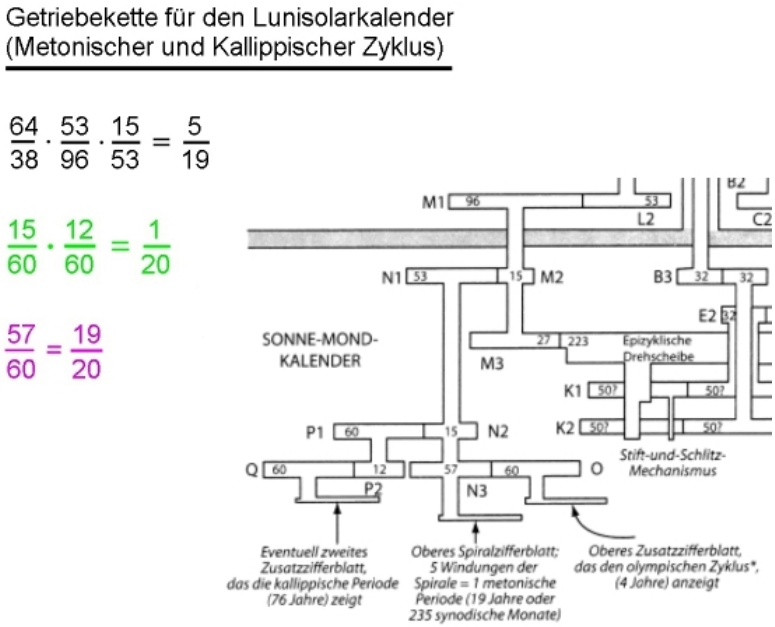


Abbildung 20: vergrößerte Ansicht des Lunisolarkalenders mit Übersetzungen (links oben).

wann er den Datumszeiger um einen Tag zurücksetzen muss: alle 76 Jahre, bzw. eine Umdrehung des kallippischen Zeigers. Also müsste aus dem Bruch $\frac{5}{19}$ mithilfe einer Multiplikation mit einem weiteren Faktor $\frac{1}{76}$ werden, die Umkehrung dieser Rechnung liefert den Faktor $\frac{1}{20}$. Erfolgte

[6] Die Aufteilung der Übersetzungen hat den Vorteil, dass die Zahnräder ebenfalls für die Anomalie des Mondes benutzt werden konnten, die wir allerdings an dieser Stelle nicht näher erläutern werden, da sie für das Grundverständnis des Lunisolarkalenders nicht von Bedeutung sind, und für den Bau unseres mechanischen Mondphasencomputers nicht eingeplant ist, da die Einbeziehung der Anomalie handwerklich eine hohe Herausforderung darstellt.

die Übersetzung jedoch in einem Schritt , dann hätte es zur Folge, dass der kallippischer Zeiger gegen den Uhrzeigersinn rotiert. Deswegen wird diese Übersetzung nochmal aufgeteilt in 2 Schritte: $(\frac{15}{60})*(\frac{12}{60})$. Die Wahl dieser Zahnräder hat vermutlich einen praktischen Grund. 12, 15 und 60 sind allesamt Teiler von 360, sodass bei der Fertigung der Zahnräder diese Zahnzahlen einfacher herzustellen sind als andere Werte, denn man muss lediglich den 360° -Vollkreis aufteilen.

5.2 Das Exzentermodell Hipparchs

Nicht einbezogen in unserem Mondphasencomputer, aber aus sicht der heutigen Wissenschaft fortschrittlich für die antiken Griechen, war das Exzentermodell Hipparchs [11][12].

Wie wir heute aus dem ersten Keplerschen Gesetz wissen, bewegen sich Himmelskörper in Ellipsenbahnen um einen Brennpunkt, in der Schwerpunkt zweier Himmelsobjekte liegt.

Aus dem zweiten Keplerschen Gesetz, der als Flächensatz bekannt ist, folgt, dass alle Himmelskörper, die eine Ellipsenbahn beschreiben, zu jeder Zeit eine Änderung der Bahngeschwindigkeit erfahren: beim Annähern an den Brennpunkt nimmt sie zu, beim Entfernen nimmt sie ab. Und wie jedes andere Himmelsobjekt gehorcht auch unser Erdmond diesem Flächensatz**.**

<u>1.Kepler-Gesetz:</u> Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

<u>2.Kepler-Gesetz:</u> Ein von der Sonne zum Planeten gezogener „Fahrstrahl“ überstreicht in gleichen Zeiten gleich große Flächen.

Johannes Kepler in Astronmia Nova, 1609

Dementsprechend wirkt sich dies auf die Mondphasen aus. Bereits die antiken Griechen fiel dies bei ihren Beobachtungen im Nachthimmel auf, wobei sie noch nichts von den späteren Keplerschen Gesetzen wissen konnten. Als Erklärung für diese zweifellos richtige Beobachtung entwickelte Hipparch das Exzentermodell, in dem zwar weiterhin eine kreisförmige Bahn für den Mond angenommen wird, aber die Position der Erde um eine Strecke e vom Kreismittelpunkt entfernt ist.

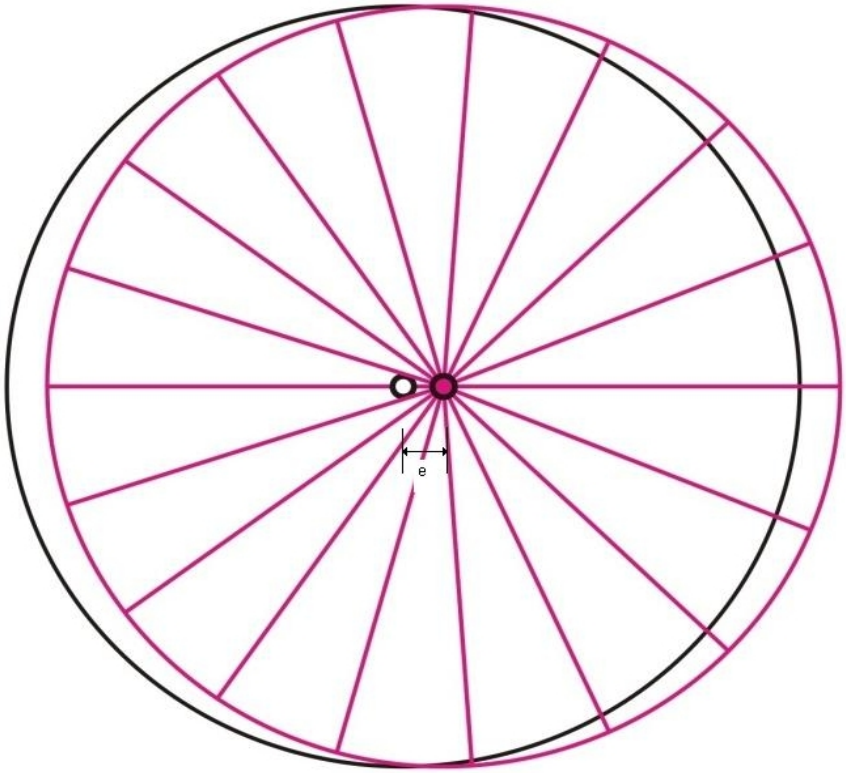


Abbildung 21: Exzentermodell Hipparchs

Freilich änderte sich die Winkelgeschwindigkeit des Mondes für den irdischen Beobachter, da die Entfernung zur Erde nicht mehr konstant bleibt. Auf Grundlage dieses Modells wird im Antikythera-Mechanismus mit einem Stift-und-Schlitz-Mechanismus die Exzentrik bei der Entstehung der Mondphasen berücksichtigt. Weil wir jedoch in unserem Computer immer von der gemitteltern Umlaufdauer rechnen, lassen wir an dieser Stelle eine detaillierte Beschreibung dieses fortschrittlichen Mechanismus aus.

Abbildung 22: Beispiel eines Stift-und-Schlitz-Mechanismus

5.3 Exkurs: Olympiaden-Zyklus

In diesem "Zweig" des Antikythera-Mechanismus ist noch ein Zeiger mit einem Gesamtübersetzung von $\frac{1}{4}$ (Abb. 20). Dieser Zeiger ist weniger astronomischer als kultureller Natur. Da er jedoch im Räderwerk mit dem Meton-Zyklus verknüpft ist, werden wir ihn, wenn auch nur kurz, erläutern. Wie heutzutage die Olympischen Spielen alle 4 Jahre stattfinden, so war es auch im antiken Griechenland der Fall. Demzufolge kann man im Olympiaden-Zeiger einen Countdown der Antike sehen. Dies könnte auch die Begründung sein, weshalb der Zeiger sich gegen den Uhrzeigersinn bewegt, denn die $\frac{5}{19}$ Übersetzung des Metons wurde nur noch mit einem einfachen $\frac{57}{60}$ ergänzt, sodass multipliziert und gekürzt $\frac{1}{4}$ das Ergebnis ist.

Es gab insgesamt sechs Panhellenische Spielstätten, die sowohl sportlich als auch religiös zu verstehen sind. Neben den Olympischen Spielen in Olympia gab es die Pythischen Spiele in Delphi, die Isthmischen Spiele in Korinth, die Nemeischen Spiele in Nemea, die Naaischen Spiele in Dodona, und eine sechste, noch nicht entzifferte, Austragungsspielstätte.

Da die Isthmischen Spiele und Nemeischen Spiele alle zwei Jahre stattfinden, und die restlichen alle vier Jahre, zeigte der Olympiadenkalender jedes Jahr zwei panhellenische Spiele an.

5.4 Andere Kalender im Räderwerk

Der Mechanismus von Antikythera umfasste noch weitere Funktionen. Selbstverständlich existiert ein Sonnenzeiger, damit auch ein Lunisolarkalender vollständig ist [3][5][6]. Dieser lag auf der Vorderseite des Gehäuses und gab gleichzeitig das Datum im ägyptischem 365-Tage-Kalender und das aktuelle Tierkreissymbol an. Der ägyptische Kalender bestand aus 12 Monaten à 30 Tage, mit fünf Zusatztagen, den sogenannten Epagomenen. Deswegen lagerte der Ring gegenüber dem Tierkreis drehbar. Schließlich ergeben 12 mal 30 Tage, plus fünf Schalttage insgesamt 365 Tage und sind , verglichen mit einem Sonnenjahr, einen Vierteltag zu kurz. Alle vier Jahre ergäbe sich somit eine Ungenauigkeit von einem Tag, die der Anwender des Mechanismus per Hand nachkorrigieren müsste.

Auf der Rückseite befand sich unter dem Mondkalender ein Eklipsenzeiger, der auf Grundlage des Saros-Zyklus alle Mond- und Sonnenfinsternisse auf die Stunde genau angab, wofür die Exeligmon-Erweiterung notwendig ist. Das Anzeigeblatt ist wie die des Mondkalenders in Spiralform, nur mit vier Umrundungen mit vermutlich 51 Eklipsenmonaten, wovon 18 mit Inschrift erhalten geblieben sind.

5.5 Die Herkunft des Mechanismus von Antikythera

Da die Herstellung eines solchen exakten Kalenders eine technologische und handwerkliche Meisterleistung für die damalige Zeit ist, stellt sich die Frage nach dem Erbauer [3][5]. Einen Hinweis liefert Marcus Tullius Cicero in seiner philosophischen Schrift "De re publica". Hier behauptet er, dass nach der römischen Eroberung Syrakus' der römische Konsul Marcus Claudius Marcellus in Besitz eines ähnlichen Mechanismus kam, der von Archimedes stammte. Archimedes war in Syrakus beheimatet, und wurde bekanntermaßen von einem römischen Soldaten aus Wut erschlagen, als er ihm "Noli turbare circulos meos"(lat.: Störe meine Kreise nicht) zurief.

Jedoch ereignete sich dies 212 v. Chr., während das Schiff um 70 v. Chr. sank, wie es die Münzen aus Pergamon und Ephesos verraten. Hinzu kommt, dass aus den wenigen Sätzen Ciceros nicht hervorgeht, ob Archimedes' Erfindung ein Planetarium oder ein Kalendarium war. Jedoch sprachen wiederum die Monatsnamen für Archimedes. Sie entsprach denen, die in Korinth üblich waren, zu dessen Kolonie auch Syrakus gehörte.

Zwar bleibt die Frage nach dem Erfinder unbeantwortet, jedoch ist es wahrscheinlich, dass es sich um kein Unikat handelt, dass alleine schon die hochkomplizierte Technologie für die damalige Zeit untermauert. Hinzu berichten arabische Schriften über ebenso komplizierte Zahnradkomplexe in anderen Geräten, zum anderen besaßen die antiken Griechen eine Tradition für komplizierte mechanische Technologien, die teilweise durch die arabischen Gelehrten fortgeführt wurde.

Da Bronze ein wertvolles Material war, schmolzen die antiken Menschen ungebräuchliche Bronzegegenstände, wie Bronzestatuen oder auch möglicherweise solch ein Räderwerk ein, und stellten daraus neue Gegenstände her, weshalb nur einzelne Fundstücke durch Schiffswracks oder anderen Ereignissen aus diesem Kreislauf herauskommen. Die liefert eine Begründung, warum der Mechanismus ein Einzelfund ist, obwohl es viele davon hätte geben können.

6 Unser eigener Mondphasenkalender

6.1 Entwurf

Bereits mit seinem Themenvorschlag sandte uns Herr Dr. Steinrücken seine Skizze (Anhang 2.2), die die Mondphasenanzeige mit dem Sonnenkalender verband. Er schlug den Meton-Zyklus vor, wie es im Mechanismus von Antikythera schon benutzt wurde. Wir stimmten dem Vorschlag zu, da die Näherung eine Abweichung unter ein Prozent darstellt, und wir der Meinung waren, dass die Abweichung durch die Fertigung selbst größer sein wird.

Abbildung 23: Unser Rohmaterial: Wellen, Zahnräder, Schrauben

Da jedoch ein Zahnrad mit 235 Zähnen sehr unhandlich und auf Nachfrage ebenso teuer war, verteilten wir die Übersetzung wie die antiken Griechen auf mehrere Zahnräder. Die Primfaktorzerlegung lieferte uns bei 235 die Faktoren 47 und 5, sodass wir schließlich folgende Zahnradpaare hatten: $\frac{47}{19}$ und $\frac{100}{20}$, insgesamt also wieder $\frac{235}{19}$. Weiterhin fügten wir eine separate Jahresanzeige hinzu, die mit einer Schnecke betrieben wird. Schnecken haben die Eigenschaft, bei einer Umdrehung das Schneckenrad um einen Zahn voran zu treiben. Deshalb besitzt unser Schneckenrad 19 Zähne, sodass eine Umdrehung des Schneckenrades 19 Jahre sind, bzw 19 Schneckendrehungen, welches wiederum 19 Umdrehung der Kalenderanzeige sind.

Wir wollten unseren Mondphasenkalender in Kastenform bauen, an dessen Vorder- und Seitenfront die Zeiger platziert werden. Deshalb sollen die Wellen über Kegelräder um 90° gedreht werden.

Der ursprüngliche Vorschlag von Herrn Steinrücken war, die Mondphasenanzeige mit einem Paar Kronräder, und einer sich drehenden, halb schwarz angemalten Kugel zu gestalten, ähnlich der Anzeige auf der Vorderseite des Mechanismus von Antikythera. Dafür bedarf es zusätzlicher Arbeit, für die wir aufgrund des engen Zeitplans keine Möglichkeit sahen. Allerdings ist es unser Ziel, diesen Vorschlag im kommendem Schuljahr mit anderen Verbesserungen miteinzubeziehen, sobald genügend Zeit bei uns und bei den Betreuern Herr Noll und/oder Herr Sopp vorhanden ist.

Alle Zahnräder sollten im Entwurf durch eine Handkurbel angetrieben werden, die über ein 20er-Zahnrad auf das zentrale 47er-Zahnrad greift.

6.2 Werkstatt

Nach dem wir unsere erste Entwurfsskizze hatten, suchten wie eine Werkstatt, in der wir unsere Bauteile zusammensetzen konnten . Die Zahnräder bestellten wir zuvor im Onlineshop von Mädler GmbH[7] , die Silberstahlwellen, die unsere Zahnradachsen geworden sind, besorgten wir uns in einer Filiale von Conrad Electronics SE in Düsseldorf. Glücklicherweise bot uns der Zangenhersteller Knipex, mit dem unsere Schule eine Lernpartnerschaft verbindet, freundlicherweise seine Mitarbeiterwerkstatt inklusive Betreuung an. Beim ersten Werkstatttermin gab uns Herr Noll, der Leiter dieser Werkstatt, einen Überblick über die Maschinen die wie nutzen dürfen. Dazu gehörten u.a. eine Säulenbohrmaschine, eine Drehbank, eine Fräsmaschine, Gewindebohrer und Schneideisen. Zusätzlich stellte uns Knipex Material zur Verfügung, die wir für einen fast wortwörtlich reibungslosen Mechanismus gebrauchen konnten, wozu Gleitführung, Stellringe und Gewindestifte gehören. Genauso schnitt uns die Sägerei von Knipex Makrolonscheiben[8], die wir für die Seitenflächen eingeplant haben, auf 5mm über das Maß, damit wir beim Fräsen nur wenig Material entfernen müssen.

Diese und weitere Materialien kamen erst in unserer Umsetzung des Entwurfes in eine erste Konstruktion ins Gespräch, die wir mit Herr Noll und Herr Siebel entworfen haben.

6.3 Konstruktion

Nachdem die fachlinchen Experten Herr Noll und Herr Stefan Siebel unsere erste Skizze (vgl. Anhang) begutachtet haben, gaben sie uns viele Ratschläge zur Umsetzung und Verbesserung. Erstens müssen die Zahnräder auf der Welle befestigt werden, was mit einem Klemmverschluss durch einen Gewindestift erfolgen soll. Der Vorteil gegenüber anderen Verfahren wie zum Beispiel Löten ist, dass man Ungenauigkeiten im nachhinein noch korrigieren kann, während einmal gelötet, dass Entfernen der Lötverbindung weitaus aufwändiger ist.

Für die Kegelräder und die kleineren Räder planten wir ein M3-Gewinde, für die beiden großen Räder ein M4-Gewinde, somit sollten die Zahnräder fest an die Wellen geschraubt werden. Um die Fläche für die Schraube zu vergrößern, überlegten wir uns, mit einer Feile an der Welle, an der Stelle wo die Schraube auftrifft, ein wenig Material abzutragen. Dadurch soll gewährleistet sein, dass die Schraube sich nicht doch löst, weil sie gegen eine runde Zylinderfläche drückt.

---

[7] Die Rechnung ist auf der beiliegenden CD mit dem Namen RechnungZahnrad.pdf gespeichert

[8] Unter dem Namen Makrolon® werden Kunststoffplatten aus Polycarbonat von der Bayer AG vermarktet.

Weiterhin besitzen die Zahnräder unterschiedliche Vorbohrungen, die kleineren Zahnräder und Kegelräder haben allesamt 5mm Bohrungsdurchmesser, die größeren Zahnräder (47 bzw. 100 Zähne) mit 10mm hingegen einen doppelten Durchmesser. Dementsprechend schlugen wir vor, für die 10-mm-Wellen an der Seite auf 5mm abzudrehen, schließlich, so dachten wir uns, stand uns eine Drehbank zur Verfügung.

Zweitens müssen die Achsen drehbar auf den Seitenplatten gelagert werden. womit direkt zwei Aspekte angesprochen werden. Zum ersten, woraus das Material der Seitenplatten bestehen soll, zum zweiten, wie die Wellen gelagert werden. Zum ersten Aspekt äußerten wir den Wunsch, wenn möglich durchsichtige Seitenflächen zu haben, damit später jeder Beobachter sofort das innere Räderwerk sieht. Zusätzlich wünschten wir eine Oberseite als abnehmbaren Deckel, um schnelle Handgriffe bei kleineren Problemen zu ermöglichen. Nach einer Beratung mit beiden Experten stimmten wir den Vorschlag von Herrn Siebel zu, alle Seiten aus 10mm dickem Makrolon herzustellen, die uns Knipex zeitnah liefern konnten. Der Deckel soll lediglich eine lose Scheibe mit montiertem Griff sein, der über Stifte der Seitenplatten durch Bohrlöcher auf der Deckplatte befestigt wird.

Da Kunststoff eine relativ hohe Haftreibung hat, bestellten wir kleine Gleitführungen, um unsere Getriebekette beweglicher zu gestalten. Gleichzeitig bestellten wir auch Stellringe, sodass die Wellen nicht innerhalb der Bohrlöcher verrutschen, logischerweise beide Artikel in den Varianten für 10mm und für 5mm Durchmesser.

Die Maß unseres quaderförmigen Gehäuse setzten wir auf 200mm x 200mm x 250mm fest, da es während des Zusammensetzen innen nicht unhandlich klein, aber auch nicht sperrig groß sein soll, sodass wir mit diesen Maßen beiden Kriterien gerecht sein wollten.

Über die Befestigung der Seitenplatten an der Bodenplatte ist die Entscheidung schnell gefallen, Schrauben erschienen uns am sichersten bei vergleichsweise geringem Aufwand, je vier Schrauben für eine Seitenkante sollen für optimale Stabilität sorgen. Bei einer Dicke von 10mm sind M6-Gewinde für eine feste Verschraubung geeignet.

6.4 Bau

Zwar sind die Fertigungsschritte unseres Mondphasencomputers theoretisch schon im Kapitel zuvor beschrieben worden, die Praxis wirft jedoch oft neue Probleme auf, denen wir uns stellen müssen. Erfreulich war, dass die einfacheren Fertigungsverfahren wie Bohren, Senken und Gewindeschneiden von uns schnell und ohne viel Aufwand erledigt werden konnten. Die Gewinde für die Gewindestifte der Zahnräder waren bereits nach dem ersten Termin fertig, die Gewindestifte sind am selben Tag von Herrn Noll aus dem Lager von Knipex hergebracht worden. Schwieriger sah es allerdings mit dem Fräsen der Seitenplatten auf Maß und mit dem Drehen aus. Der ehemalige Elektriker Herr Noll hat sich hierfür besonders engagiert, und uns Herr Sopp vorgestellt, welcher für die Wartung der Fräsmaschinen im Knipex zuständig ist.

Abbildung 24: Fräsmaschine und Bohrmaschine

Mit seiner Hilfe waren die Lagerböcke und die Bodenplatte nach lediglich drei Stunden Arbeit maßgenau angefertigt. Das Fräsen der restlichen Platten war technisch nicht möglich. Grund war der Maschinenschraubstock der Fräsmaschine, der nicht für mehr eine Länge von 250mm taugt, die maximale Spannweite der Backen beträgt 200mm. Weil wir keinen für solche Längen Maschinenschraubstock zur Hand hatten, fragten wir, wieder mit Herr Noll als Korrespondenten, in der Ausbildungswerkstatt nach, ob dort die Option besteht, unsere langen Kunststoffplatten zu bearbeiten. Die Antwort fiel positiv aus, und weniger als eine halbe Woche später lagen sie bereits fertig geschnitten neben unseren Werkzeugen in der Werkstatt.

Nachdem die Makrolonscheiben alle die gewünschten Längen und Breiten bekamen, folgten die Bohrungen für die Wellen. Die Säulenbohrmaschine war nicht in X-Y-Richtung justierbar, aus diesem Grund benutzen wir, bzw. Herr Sopp, die Fräsmaschine als Bohrmaschine. Der einzige

Abbildung 25: gebohrte Platten mit eingehämmerter Gleitführung

Abbildung 26: Lagerböcke mit eingehämmerte Gleitführung.

Unterschied besteht darin, dass wir anstatt einen Fräser einen Bohrer eingespannt haben. Jetzt war

es möglich, den Nullpunkt auf eine Ecke einer Platte zu legen, und von der ausgewählten Ecke aus die eingezeichneten Maßen mit der X- und Y- Handkurbel auf ein Zehntel Millimeter genau einzustellen. Wie beim Fräsen zuvor, unterstützte uns Herr Sopp wieder, sodass die Präzision aller Bohrungen sehr hoch einzustufen ist. Aufgrund der Gleitführung mussten wir den Bohrungsdurchmesser auf sieben bzw. 12mm vergrößern, je nach benötigte Größe.
Das Bohren nahm wieder einen über dreistündigen Werkstatttermin in Anspruch, trotz fachlicher Betreuung, denn zwischendurch fehlten passende Spannbacken für das Bohrfutter, es klemmte aus unbekannten Gründen der Maschinenschraubstock, und die Schraubstockführung am Maschinentisch musste wegen der begrenzten Bewegung in Y-Richtung wieder um 90° gedreht werden.
Das anschließende Einschlagen der Gleitführungen mit einem Hammer verlief einwandfrei, die Bohrungen hatten also die richtige Größe. Zum Schutz der Gleitführung dämpften wir den Hammerschlag mit einem Holzstück, aber dies wirkt sich auf das Endprodukt nicht aus .
Zwar hatten wir eine Drehbank zur Verfügung, jedoch erklärte uns Herr Sopp, war es aufgrund der Länge der Welle schwierig, ohne weitere Hilfsschienen o.ä. die Welle beim Drehen festzuhalten.
Deswegen mussten wir erneut im Knipex-Werk um Hilfe suchen, die wir in der Dreherei bekamen.
Eine halbe Woche später waren diese beiden Wellen fertig, und wir brachten für die drei Zeiger je ein M3-Innengewinde an der Ende der Welle an, sowie für die Kurbel, dessen Funktion mittlerweile ein drehbares Rad übernahm, ein M5-Außengewinde. Die Begründung für diese Entscheidung war, dass alle Kurbel, die wir im Internetangebot fanden,für Wellen größeren Durchmessers verwendet werden, wohingegen unser Rad speziell für kleiner Wellendurchmesser gedacht ist. Weil wir keine Spezialanfertigung für eine Kurbel aufgeben wollten, die mit Sonderkosten zu dem teurer wäre, stiegen wir kurzerhand auf ein kleines Rad um. Schließlich wird die Funktion in keiner Weise beeinträchtigt.

Die Kernlochbohrung für die Innengewinde führte Herr Sopp mit der Drehbank aus, denn die Nutzung einer Drehbank ist wie die Nutzung der Fräsmaschine ist alleine aus sicherheitstechnischen Gründen uns Amateuren nicht zuzumuten. Das Schneiden der Innengewinde und der Außengewinde mit Gewindeschneidern und Schneideisen taten wir dagegen selbst. Die passenden Werkzeuge hatten wir bereits vom Gewinde der Zahnräder geliehen bekommen.

Jetzt war es Zeit, dass wir das Gehäuse zusammensetzen, wofür wir wieder bohren, senken und Gewinde schneiden mussten. Pro Seite sind zwei Schrauben als Stabilisation ausreichend, wie Herr Sopp behauptete und auch Recht behielt. Das Bohren übernahmen wir, mit einem Akkuschrauber ausgerüstet, selbst. Nicht unerwartet geschah, was geschehen musste, wenn Amateure arbeiten. Die Bohrungen passten in drei von insgesamt zwölf Fällen nicht zueinander, folglich konnten die

Schrauben nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund mussten wir die Bohr- und Senklöcher vergrößern, worunter das Aussehen nun leidet. Dieser Schritt war jedoch unvermeidlich, um die Funktion der Schrauben sicherzustellen, denn die Stabilität besitzt bei uns höhere Priorität als eine makellose Verarbeitung.

Als Letztes führten wir die Bohrungen für die Lagerböcke aus. Der Vorteil hierbei ist, dass wir durch die Lagerböcke die Wellen leicht zueinander spannen können. Wir stellten nämlich fest, dass die Wellen zu große Abstände zueinander besaßen, weshalb die Zahnräder nicht mehr ineinander griffen. Durch die leichte Verschiebung der Lagerböcke und damit der Wellen konnte gerade noch genug Distanz wettgemacht werden, sodass wir die Seitenplatten A und B nicht komplett neu herstellen mussten. Mit viel Mühe gelang glücklicherweise die Beschraubung der Lagerböcke, worauf die Befestigung aller Zahnräder, Steckringe und der Schnecke folgte. Die passenden Imbusschlüssel für die Gewindestifte erleichterte diese Arbeit ungemein, wenn auch der Raum zwischen den Komponenten sehr eng bemessen war.

Zu diesem Zeitpunkt mussten wir feststellen, dass die Schnecke eine 6mm Vorbohrung besaß, während wir von einer 5mm Vorbohrung, wie in den Zahnrädern, ausgingen. Weil nun der Abgabetermin nahte, und wir eine passende Wellen nicht in kurzer Zeit herstellen konnte, beließen wir diesen Fehler zunächst. Der Unterschied zeigt sich an der exzentrischen Drehung der Schnecke, sodass der Jahreszeiger einen wackligen Charakter besaß. Solange jedoch die Jahreszahl gelesen werden kann, was der Fall ist, fanden wir diese Macke nicht gravierend für die Funktion.

Zum Schluss wurden die drei Zeiger an die Wellen angeschraubt, nachdem wir die provisorischen Ziffernblätter mit Tesafilm anklebten.

6.5 Genauigkeitsmessung

Abschließend führten wir eine Messung der Funktion durch, um die Fehlerabweichung abschätzen zu können. Hierfür nutzen wir den 1. Januar 2014 zum Justieren der Einstellung. Für den 1. Januar 2014 wird der Neumond angegeben [9]. Als wir nun die Mondphase für den 4. August 2012 angeben wollten, fiel uns die problematische Datumsablese auf. Da wir in den Monaten keine weiteren Trennstrich zur Orientierung eingefügt hatten, war der 4. August nicht vom 8. August zu unterscheiden. Eine Abweichung um drei Tagen wirkt sich wiederum stark auf die Mondphasenanzeige aus. Am 4. August 2012 geht der Mond als zunehmender Halbmond auf, am 8. August schon fast als Vollmond.[10]. Damit ist eine genaue Abschätzung ohne besserer Datumsanzeige nicht möglich. Demnach werden wir in naher Zukunft die Datumsanzeige austauschen müssen.

Abbildung 27: Jahresanzeige

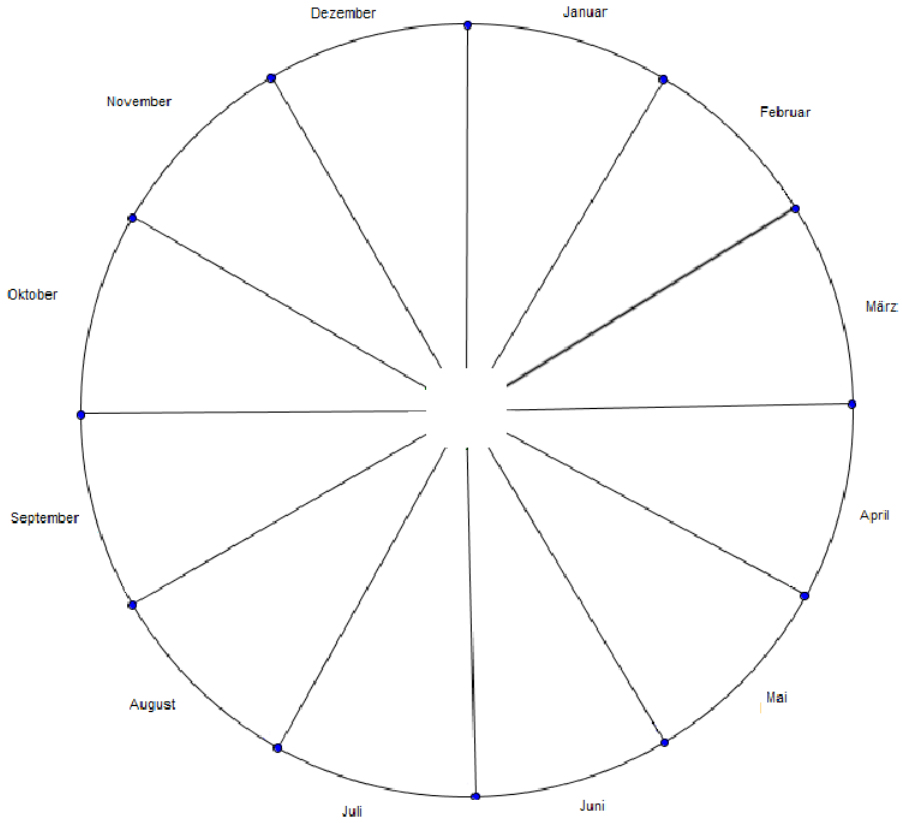


Abbildung 28: Datumsanzeige

[9] Mondphasentabelle mit Datum: http://de.wikipedia.org/wiki/Mondphasen_%28Tabelle%29 (16.06.12)

[10] Angaben beziehen sich auf die Simulation der Freeware "Stellatium" Version 0.10.6.1. Download-Link für die aktuelle Version: http://www.stellarium.org/de/ (16.06.12)

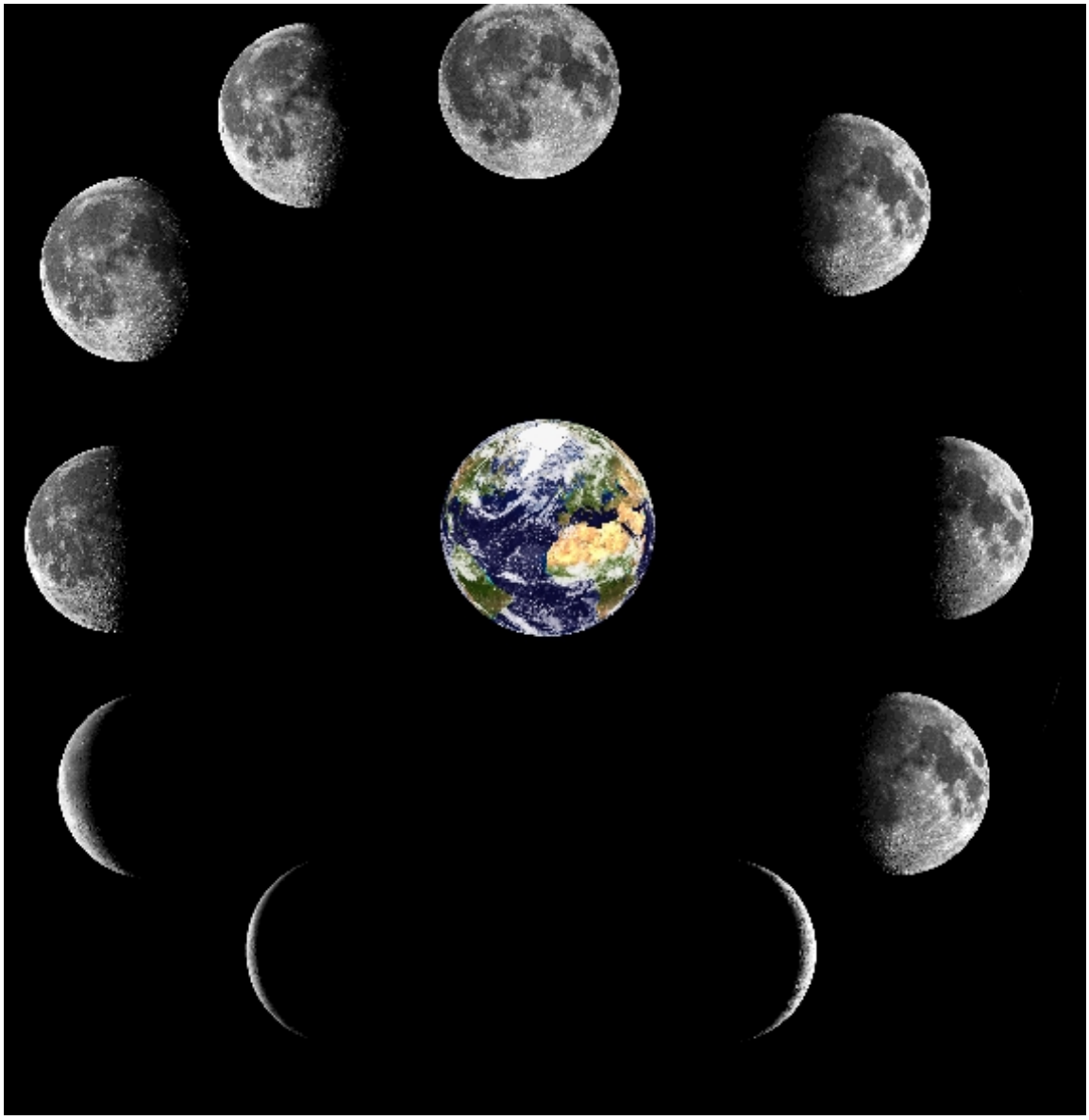


Abbildung 29: Mondphasenanzeige: eigene Bearbeitung von Fotos; Mondphasenfotos und Foto der Erde © Bernd Koch

6.6 Ausblick

Jetzt wo unser primäres Ziel, die Anzeige der Mondphase, größtenteils erreicht ist, möchten wir unseren Mondphasencomputer selbstverständlich noch weiter verbessern. Zunächst planen wir, die Datumsablese zu vereinfachen, die Probleme in Kapitel 6.5 müssen behoben werden, andernfalls werden nicht die richtigen Mondphasen für den gewünschten Tag ausgegeben. Bezüglich der der Datumsanzeige fehlt uns die Einbeziehung der Schaltjahre. Hier ließen sich unsere Ideen vom mechanischen Uhren inspirieren, wie das Einbauen von Hemmungen, womit alle vier Jahre die Datumsanzeige sich um einen Tag mitdreht. Vermutlich setzt das Bauen einer Hemmung eine enorme handwerkliche Geschicklichkeit voraus, weshalb wir offen für andere Optionen sind.

Wichtig ist zudem eine neue, passende Welle für das Schneckenrad, um die exzentrische Drehung zu entfernen, um die Ablesung der Jahreszahl zu erleichtern. Das Problem mit der Datumsablese g Schaltjahren möchten wir zu dem auch eleganter lösen. .

Die ursprüngliche Idee, für die Mondphasenanzeige eine rotierende Kugel zu nehmen (vgl. Abb. 30 & 31), werden wir weiterverfolgen. Sie wurde nur aus zeitlichen Gründen verschoben, weshalb wir nach Vollendung der oben genannten Punkten erst hiermit weitermachen werden. Die niedrige Prioritätensetzung unsererseits ist begründet mit dem Aspekt, dass die provisorische Anzeige mit den Fotos von Herrn Koch insgesamt doch recht genau ist, was auf die Datumanzeige momentan nicht zutrifft. Wie im Mechanismus von Antikythera soll eine Hälfte der Kugel schwarz sein, die andere Hälfte weiß. Die Rotation der Kugel führt zur Beobachtung, dass sie, analog zum Mond, verschiedene Phasen durchläuft.

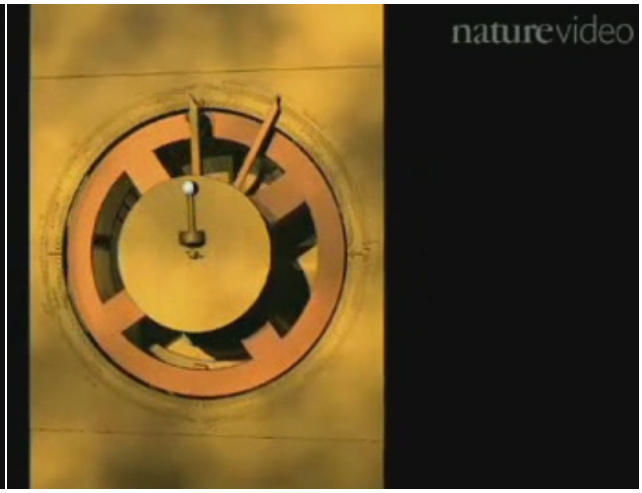


Abbildung 30 und 31: Mondphasendarstellung im Mechanismus von Antikythera.

Eine weitere Verfeinerung des Mechanismus wäre der Bau eines Stift-und-Schlitz-Mechanismus, dessen Grundlage das Exzentermodell ist, welches wir in Kapitel 5.2 beschrieben haben. Diese Idee

ist ebenso anspruchsvoll, da wir die Zahnräder selbst wieder millimetergenau bearbeiten müssten, denn solche Mechanismen werden selbstverständlich nirgendswo in Serienfertigung angeboten. Zudem haben wir uns noch nicht in puncto praktische Umsetzung beraten lassen, inwiefern die Realisierung möglich ist.

Falls wir all das umgesetzt haben, und zu dem Zeitpunkt noch motiviert sind weiterzubauen, überlegen wir, unseren Mondphasenkalender um ein Finsterniskalender erweitern. Das Thema Finsternis- und Tierkreiskalender ist Thema einer anderen Gruppe des Projektskurses, sodass wir deren Erfahrungen miteinbeziehen können. Dies wäre eine große Hilfe, weil demnach nicht einen kompletten Neuanfang starten müssten. Aber diese Idee ist noch ferne Zukunftsmusik, die erst mit der Vollendung einer präzisen Mondphasenanzeige anfängt zu spielen, was sicherlich nicht in kurzer Zeit erledigt wird.

7. Danksagung

Die Fertigstellung unseres Mondphasencomputers wäre ohne Hilfe niemals in solch kurzer Zeit bei gleicher Qualität möglich gewesen. Deswegen möchten wir an dieser Stelle folgenden Personen unseren Dank aussprechen.

Zunächst wollen wir Herrn Dr. Burkard Steinrücken für seine großartige Idee danken, einen Mondphasencomputer bautechnisch zu realisieren. Wir bedanken uns insbesondere für die großzügige Unterstützung bei der Planung und Umsetzung des Projekts.

Einen weiteren Dank geht an Deutsche Physikalische Gesellschaft mit Unterstützung der Wilhelm und Else Heraeus Stiftung, die uns finanziell u.a. bei der Anschaffung der Zahnräder geholfen hat.

Einen großen Dank gilt unseren lokalen Zangenhersteller KNIPEX, der uns mit ihrer Mitarbeiterwerkstatt überhaupt das praktische Arbeiten ermöglicht hat. Darüberhinaus halfen ihre Mitarbeiter aus verschiedenen Bereichen des Werkes sofort und ohne Gegenleistung weiter, wenn wir Material oder anderweitige Unterstützung benötigten . Davon möchten wir insbesondere Herrn Bernd Noll und Herrn Bernd Sopp hervorheben. Herr Noll, der Mitarbeiterwerkstattsleiter, betreute uns mit sehr großem Engagement, auf Kosten seiner eigenen Freizeit, um uns die bestmöglichen Optionen zu verwirklichen. Er gab uns Tipps und Anregungen, die größtenteils wegen ihrer Originalität oder ihrem Praxisbezug in unseren Mondphasencomputer implementiert wurden. Weiterhin überzeugte er Mitarbeiter aus dem ganzen Werk, uns Gegenstände von HSS-Bohrern aller Größe bis zu Makrolonscheiben zu leihen bzw. zu sponsoren. Dazu gehört Herr Sopp, er engagierte sich ebenso in seiner Freizeit für unser Projekt. Beispielsweise betreute an der Fräsmaschine, ohne deren Einsatz unsere Genauigkeit drastisch gelitten hätte. Zusätzlich vertrat er freiwillig Herrn Noll ab Anfang Juni, der bis Mitte Juni in Urlaub fuhr und opferte gegen Abgabefrist sogar seine anderen Termine, um die Fertigstellung des Mondphasencomputers sicherzustellen. Mit vielen Tipps und mindestens ebenso viel Engagement half er uns wo er nur konnte.

Zuletzt möchten wir unserem Projektkursleiter Herrn Michael Winkhaus danken, welcher uns als zentraler Knoten im Netzwerk alle diese Kontakte vermittelt hat.

8. Abschlusserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir diese Arbeit selbstständig angefertigt haben, keine anderen als die von uns angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt haben und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht haben.

Verwendete Informationen aus dem Internet sind der Arbeit in digitaler Version im Anhang beigefügt.

Wie sind damit einverstanden, dass die von uns verfasste Projektarbeit der schulinternen Öffentlichkeit in der Bibliothek der Schule zugänglich gemacht wird.

_____ _____

Wuppertal, den 17.Juni 2012

Anhang

1. Der Mechanismus von Antikythera

1.1 Inbetriebnahme des Bladerunners für Fragment A

1.2 Röntgenaufnahme des Bladerunner vom Fragment A

© Antikythera Mechanism Research Project

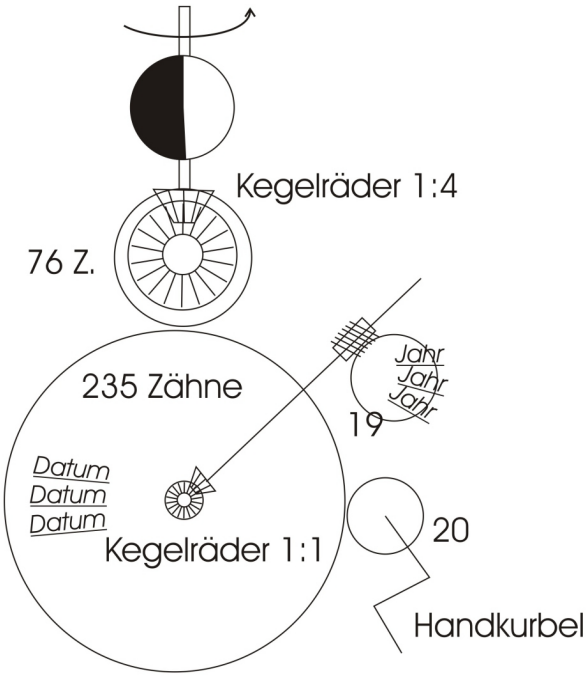
2 Bau eines Mondphasencomputers

2.1Vorschläge von Herrn Steinrücken

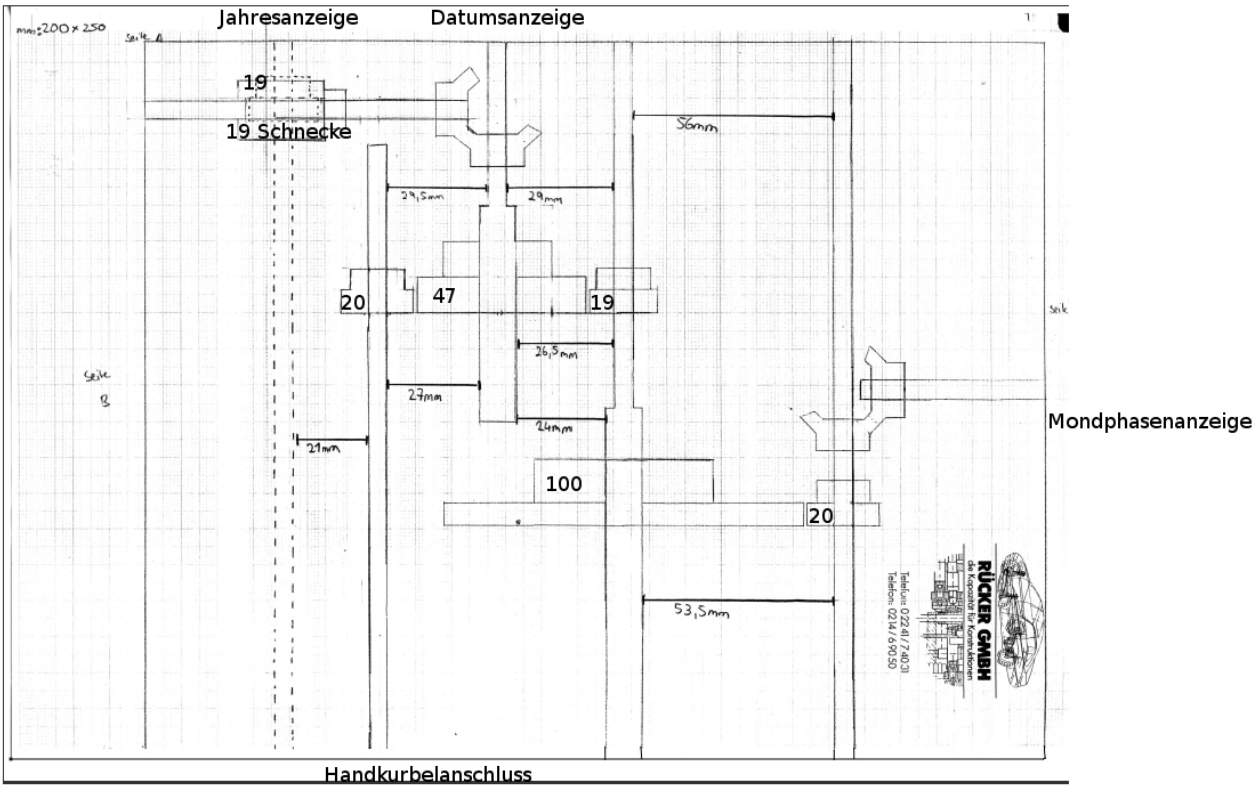
Mondphasen-Computer

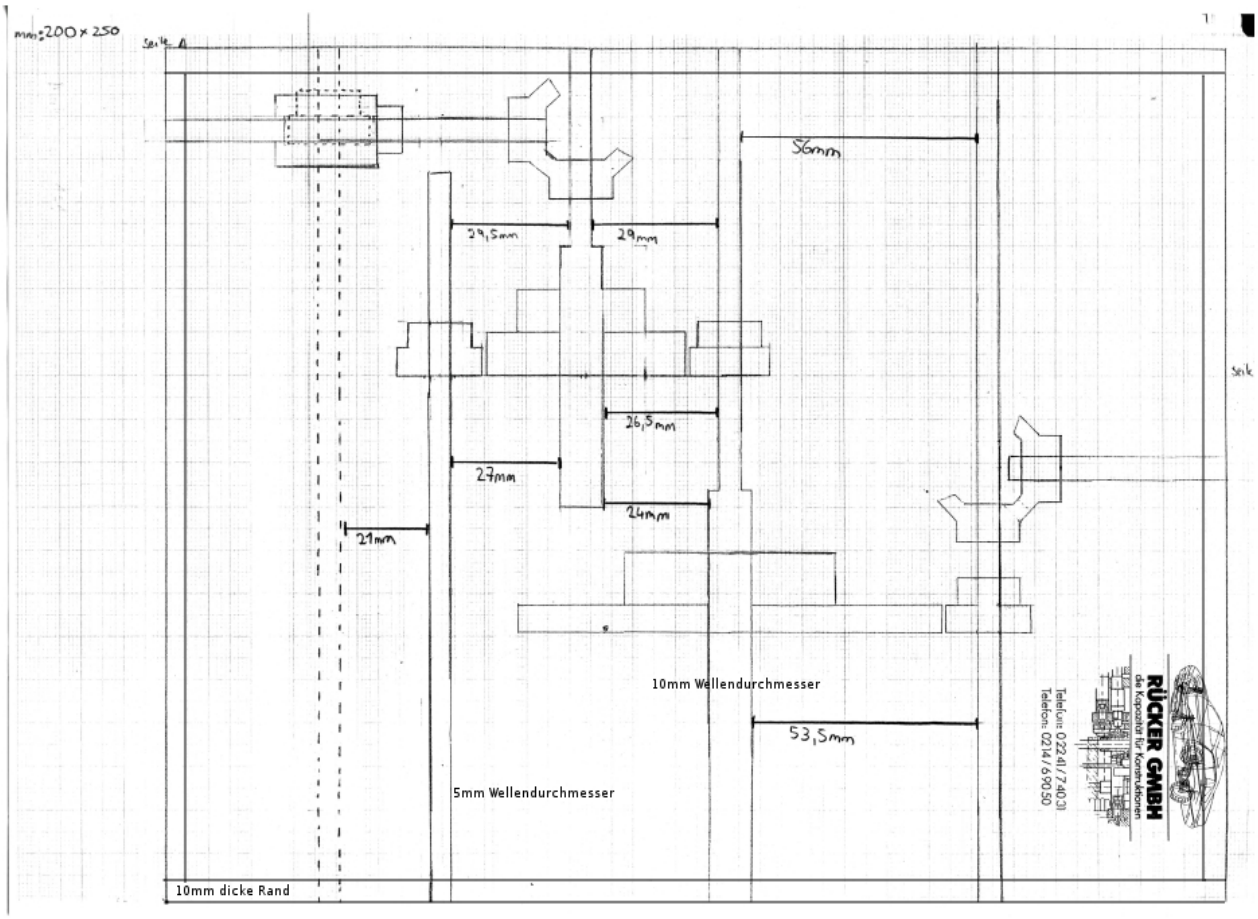
Mondphasen-Computer

Mechanik zur tagesgenauen Berechnung
der Mondphase auf Grundlage des
19-jährigen Meton-Zyklus; vandalenfest



2.2 Entwurf: Hauptansicht mit Zahnradzahl und Ausgänge der Zeiger

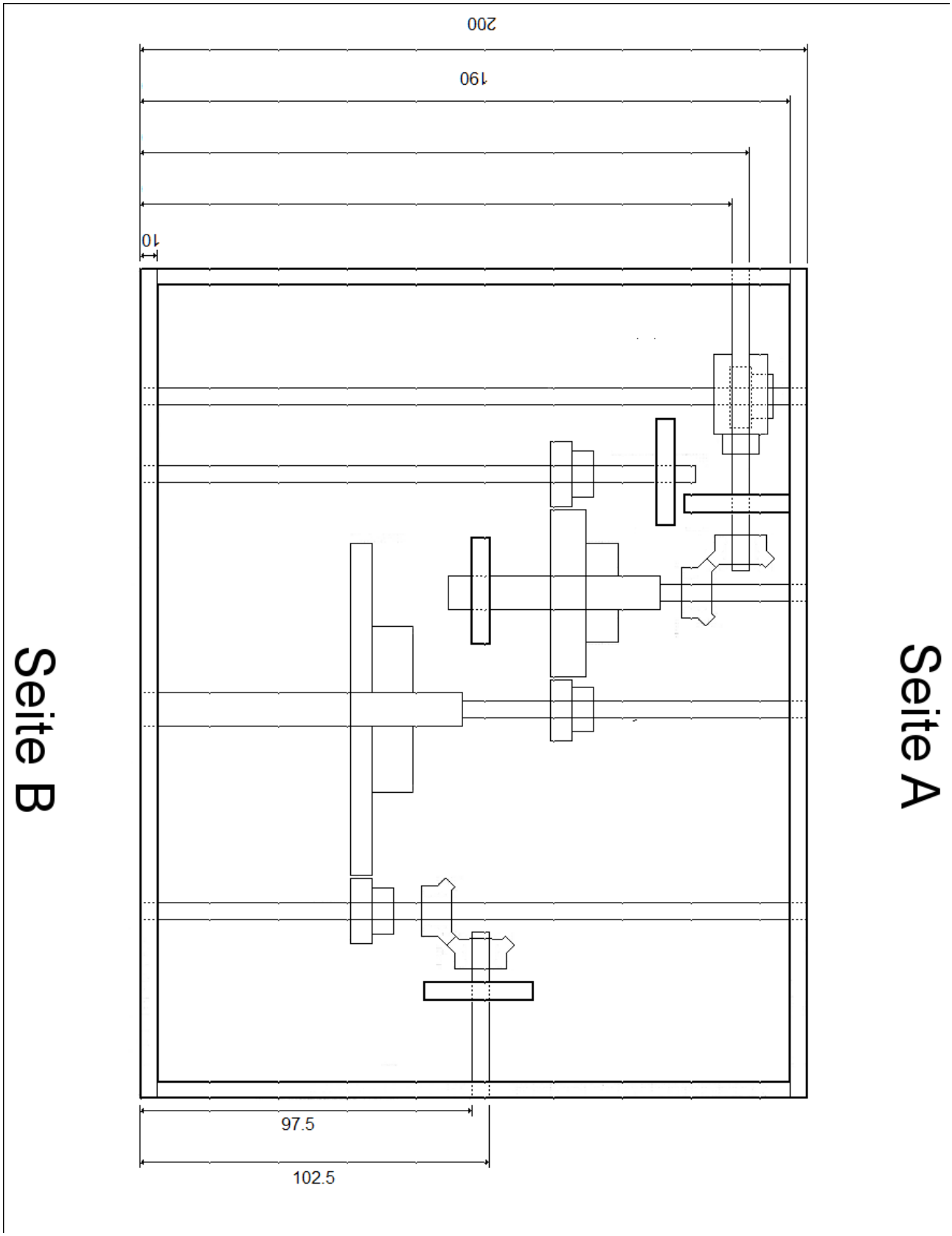




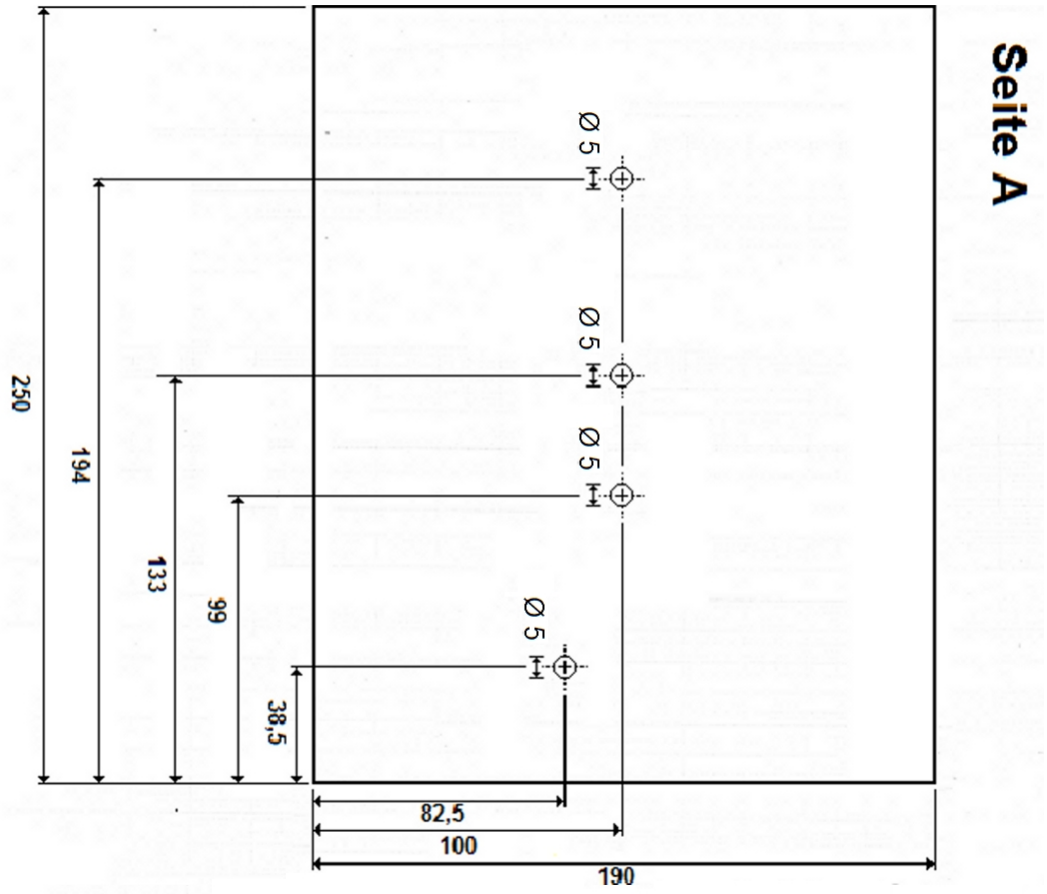
2.3 Konstruktion

Bemerkung: Alle Darstellungen sind weder maßstabsgetreu, noch genormte technische Zeichnungen.

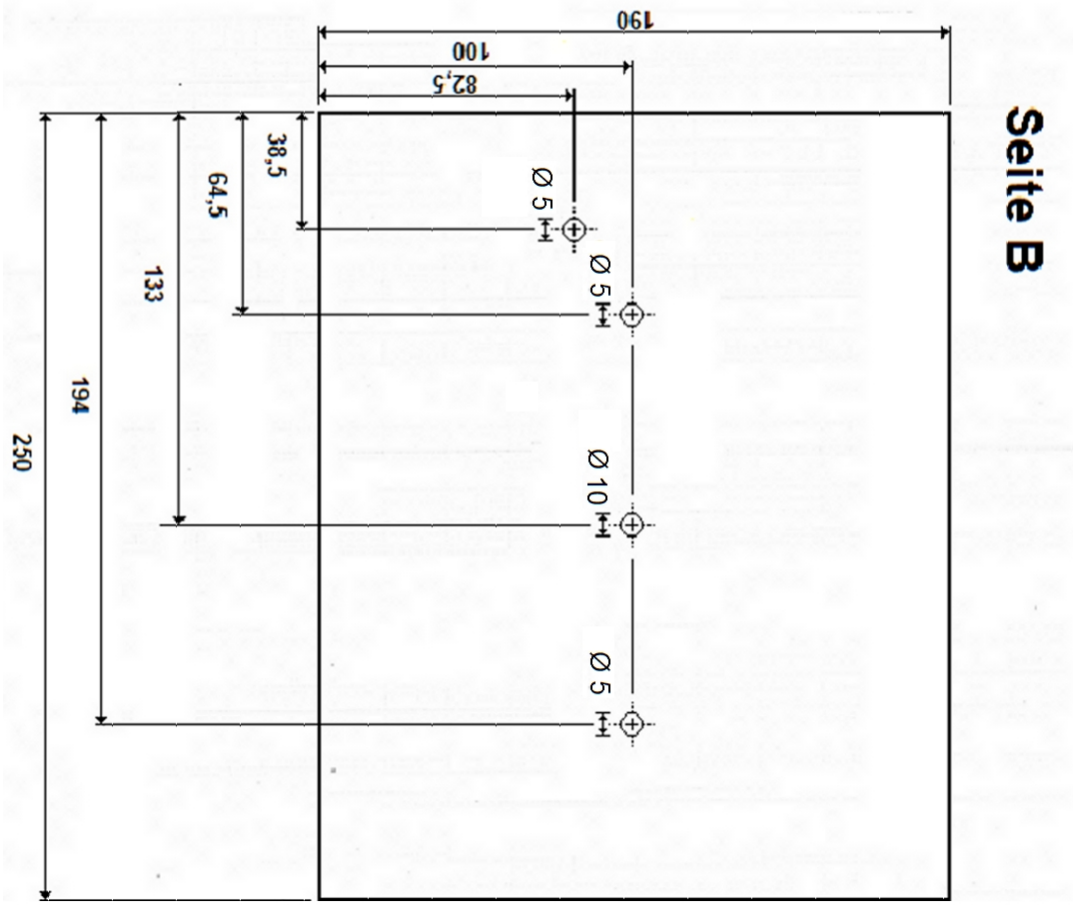
2.3.1 Hauptansicht



2.3.2 Draufsicht

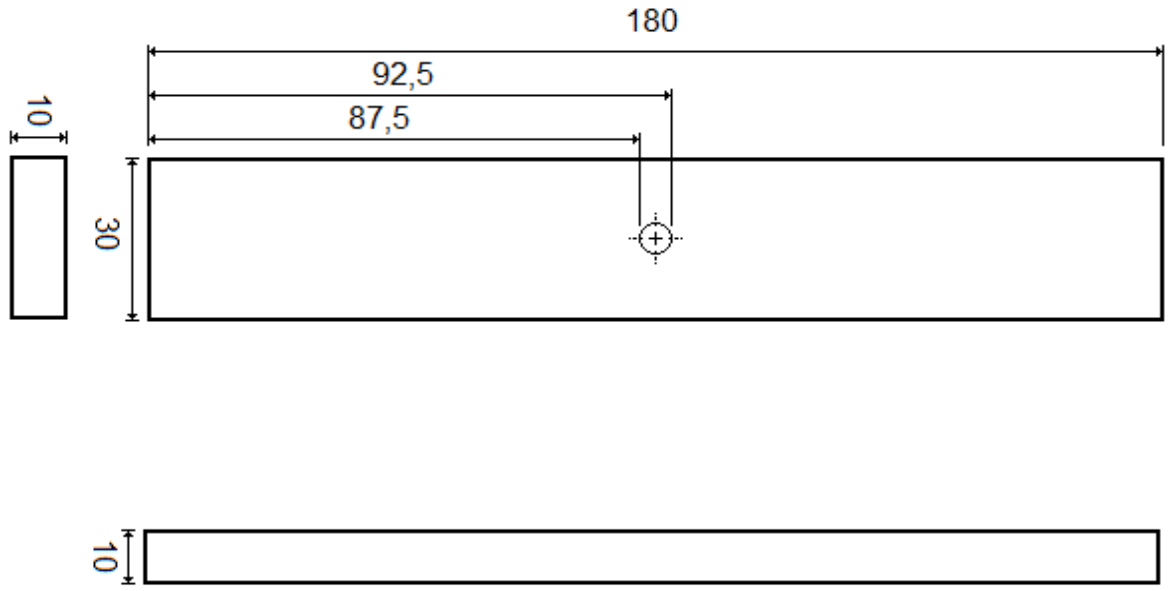


2.3.3 Untersicht

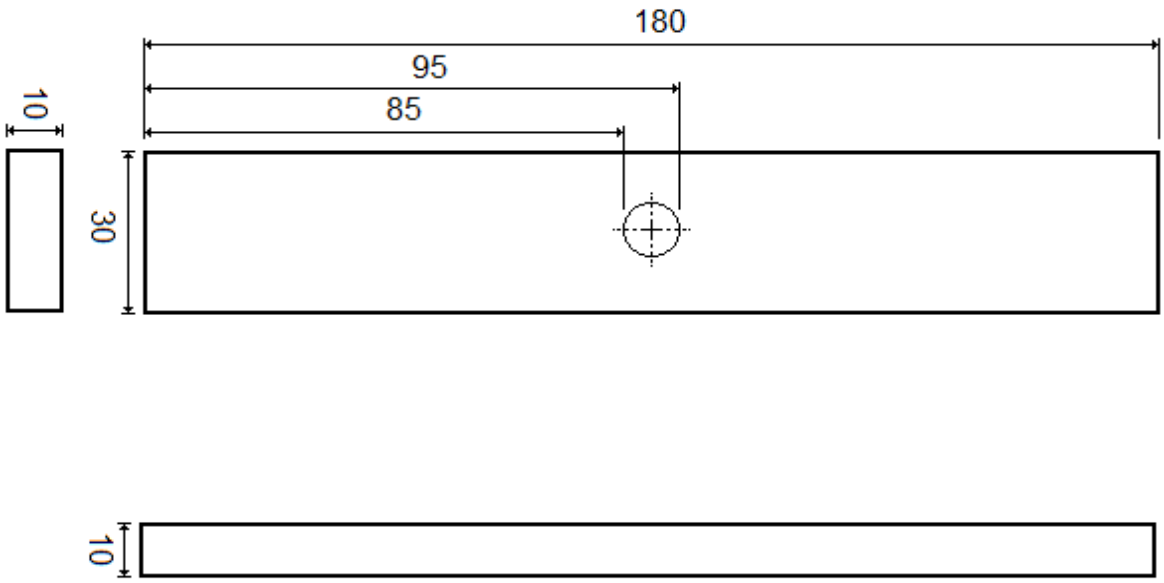


2.3.4 Lagerböcke für 5mm Welle (L1) und Lagerböcke für 10mm (L2)

L1

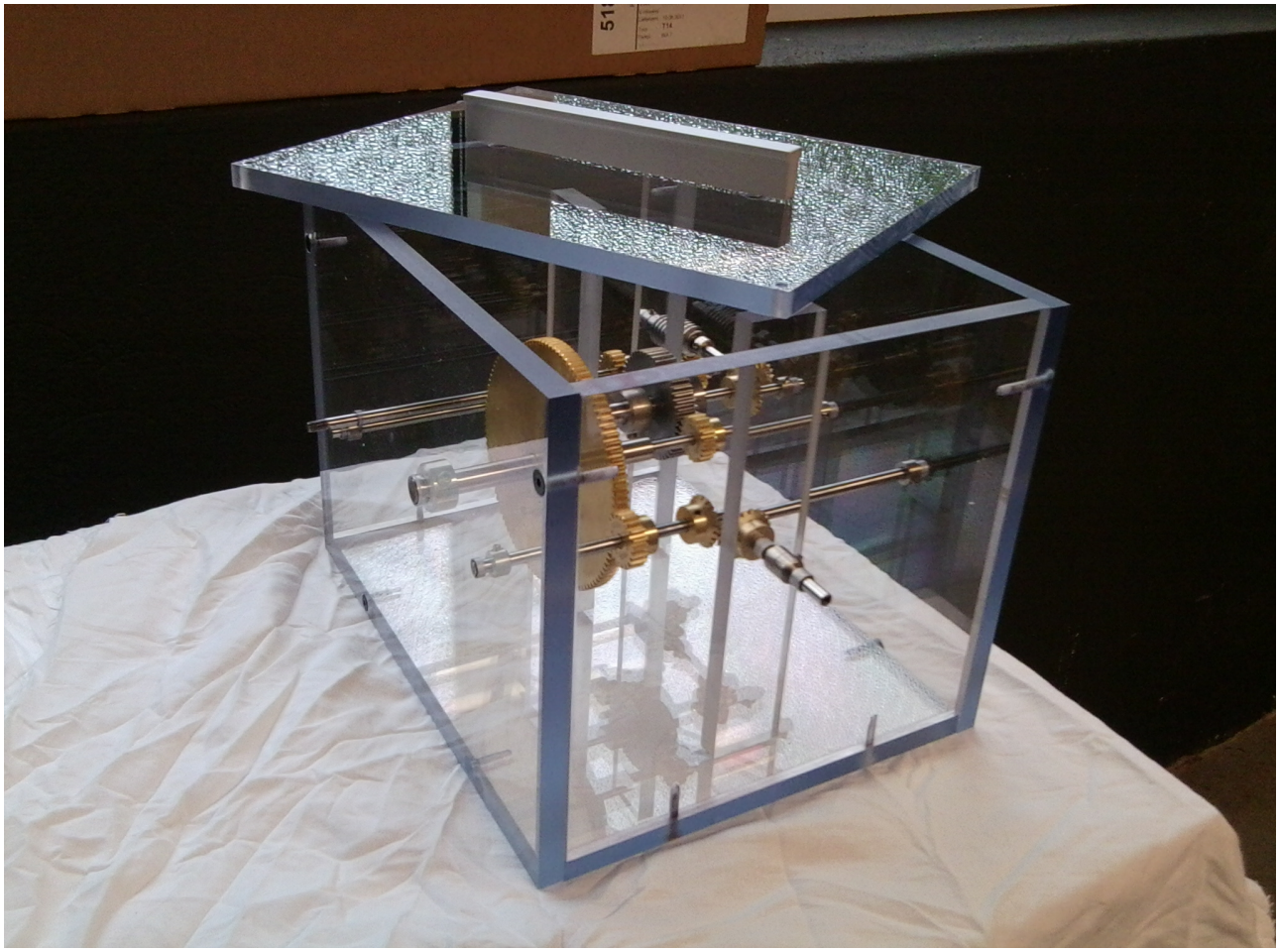


L2



2.4 Unser Mondphasencomputer

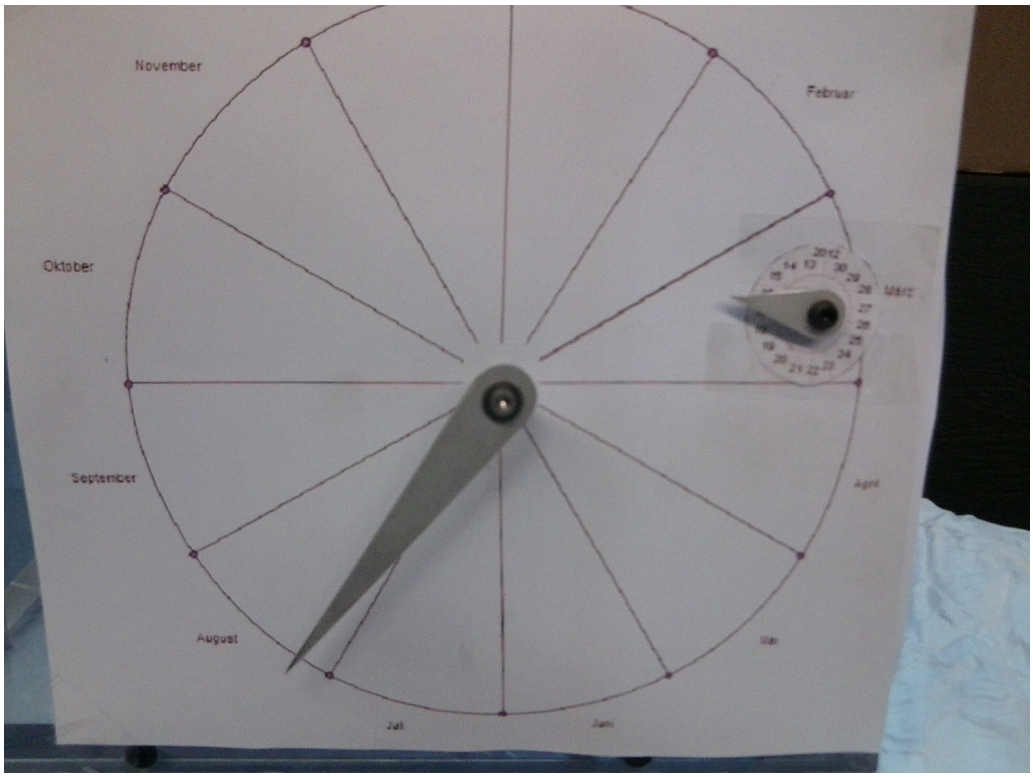
2.4.1 Das Räderwerk



2.4.2 Inbetriebnahme

(Video auf beiliegender CD im Bilderverzeichnis: "ComputerImEinsatz.mp4")

Datumsanzeige:



Mondphasenanzeige:

Arbeitstagebuch

Datum	Beschreibung
19.02.2012	Themenfindung: Bau eines Mondphasencomputers
19.02.2012 - 23.03.12	Recherchen über den Antikythera-Mechanismus
21.03.2012	Besuch des Vortrags von Herrn Dr. Burkard Steinrücken an der Volkssternwarte Recklinghausen über das Thema " Der Antikythera-Mechanismus - ein 2000 Jahre alter Computer"
23.03.2012	Treffen mit Herrn Dr. Burkard Steinrücken mit anschließendem Entwurf unseres Räderwerks
02.04.2012	Bestellung der benötigten Zahnräder bei Mädler Webshop
10.04.2012	Lieferung der Zahnräder
19.05.2012	Erster Werkstatttermin mit Herrn Bernd Noll
19.05.2012	Beginn der Schreibphase
23.05.2012	Zweiter Werkstatttermin mit Herrn Bernd Noll und Herrn Stefan Siebel
26.05.2012	Dritter Werkstatttermin mit Herrn Bernd Noll und Herrn Bernd Sopp
02.06.2012	Vierter Werkstatttermin mit Herrn Bernd Noll und Herrn Bernd Sopp
04.06.2012	Fünfter Werkstatttermin mit Herrn Bernd Sopp und Herrn Stefan Siebel
09.06.2012	Sechster Werkstatttermin mit Herrn Bernd Sopp
12.06.2012	Siebter Werkstatttermin mit Herrn Bernd Sopp
13.06.2012	Achter Werkstatttermin mit Herrn Bernd Sopp
17.06.2012	Ende der Schreibphase
18.06.2012	Abgabedatum

Literaturverzeichnis

[1] *http://de.wikipedia.org/wiki/Mond* (11.6.12)

[2] *Deiters, Stefan und Norbert Pailer: Astronomie :Eine Einführung in das Universum der Sterne Komet. 2008.*
[3] *Marchant, Jo : Die Entschlüsselung des Himmels: Der erste Computer – ein 2000 Jahre altes Rätsel wird gelöst. Rowohlt, Reinbek 2011.*
[4] *http://www.antikythera-mechanism.gr/* (25.5.12)
[5] *http://en.wikipedia.org/wiki/Antikythera_mechanism* (25.5.12)
[6] *http://de.wikipedia.org/wiki/Mechanismus_von_Antikythera* (25.5.12)
[7] *http://www.antikythera-mechanism.com/* (25.5.12)
[8] *http://de.wikipedia.org/wiki/Meton-Zyklus* (11.6.12)
[9] *http://de.wikipedia.org/wiki/Kallippischer_Zyklus*(11.6.12)
[10] *http://cs.uni-muenster.de/Studieren/Scripten/Lippe/geschichte/pdf/Kap2.pdf* (1.6.12)
[11] *http://www2.ups.edu/faculty/jcevans/Evans%20Carman%20Thorndike.pdf* (1.6.12)
[12] *http://www.sternwarte-recklinghausen.de/files/erdbahn.pdf* (11.6.12)

Bilderquellen:

Deckblatt: Selbstaufgenommene Fotos
Abb. 1 *http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8b/Sidereal_day_%28prograde%29.svg/500px-Sidereal_day_%28prograde%29.svg.png*
Abb. 2 *http://www.diercke.de/bilder/omeda/501/100700_260_3.jpg*
Abb. 3 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 4 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 5 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 6 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 7 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 8 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 9 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 10 Selbstaufgenommener Screenshot Virtual Moon Atlas
Abb. 11 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 12 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 13 Selbstaufgenommener Screenshot Photoshop CS3
Abb. 14 *http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Fragments_of_the_Antikythera_Mechanism.jpg* (25.5.12)
Abb. 15 *http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/NAMA_Machine_d%27Anticyth%C3%A8re_1.jpg* (25.5.12)
Abb. 16 *http://upload.wikimedia.org/wikipedia /commons/6/61/DerekdeSollaPrice.jpg* (25.5.12)
Abb. 17 *http://www.antikythera-mechanism.gr/system/files/pictures/picture-5.jpg* (25.5.12)
Abb. 18 *http://www.decodingtheheavens.com/blog/ image.axd?picture=2010%2f7%2fUntitled1.jpg* (4.6.12)
Abb. 19 *Jo Marchant: Die Entschlüsselung des Himmels: Der erste Computer – ein 2000 Jahre altes Rätsel wird gelöst. Rowohlt, Reinbek 2011.S.242*
Abb. 20 eigene Bearbeitung von: *Jo Marchant: Die Entschlüsselung des Himmels: Der erste Computer – ein 2000 Jahre altes Rätsel wird gelöst. Rowohlt, Reinbek 2011. S.242*
Abb. 21 Bearbeitung Dr. Burkard Steinrücken
Abb. 22 *http://www.mogi-vice.com/Antikythera/Antikythera-photo.html*
Abb. 23 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 24 Selbstaufgenommenes Foto

Abb. 25 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 26 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 27 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 28 Selbstaufgenommenes Foto
Abb. 29 Mondphasenanzeige: Mondfotos © Bernd Koch; Erde © Bernd Koch
Abb.30 & 31: Video des Nature Video Channels: *http://www.youtube.com/watch ?v=DiQSHiAYt98&feature=relmfu* (14.06.12)

Anhang 1.1 *Jo Marchant: Die Entschlüsselung des Himmels: Der erste Computer – ein 2000 Jahre altes Rätsel wird gelöst. Rowohlt, Reinbek 2011. S.144-145*
Anhang 1.2 *http://www.xtekxray.com/applications/ims/radiograph016_fragmenta_2560x3117c.jpg* (4.6.12)
Anhang 2.1 Bearbeitung von Dr.Burkard Steinrücken
Anhang 2.2 Selbstgezeichnete Skizze mit Bleistift auf Millimeterpapier
Anhang 2.3.1 Selbstgezeichnete Skizze mit *Windows Paint*
Anhang 2.3.2 Selbstgezeichnete Skizze mit *Windows Paint*
Anhang 2.3.3 Selbstgezeichnete Skizze mit *Windows Paint*
Anhang 2.3.4 Selbstgezeichnete Skizze mit *Windows Paint*
Anhang 2.4.1 Selbstaufgenommene Fotos
Anhang 2.4.2 Datumsanzeige: selbstaufgenommenes Foto
Mondphasenanzeige: selbstaufgenommenes Foto