

Martin C. Gutzwiller

Der Mond in der Wissenschaftsgeschichte¹

Sie fragen sich vielleicht, warum ich mich für den Mond interessiere. Die erste Antwort ist einfach: es ist eine Liebhaberei, wenn nicht gar eine Spielerei. Die kleinen Kinder passen ja gerne auf den Mond auf. Meine Tochter hat ihrem Bub beigebracht, mir den Mond zu zeigen, und das spornt mich an, meinen großväterlichen Pflichten nachzukommen. Darum lese ich die neuesten Nachrichten über den Mond in *The Waldo Tribune – The Children's Paper For Grandparents, Parents and Kids*. Mein Enkel hat auch ein Buch mit dem Titel *The Magical Land of Noom*, ein Land auf der hinteren Seite des Mondes, in dem sich nur Kinder und deren Großeltern aufhalten können, um dort mit List und Kraft einen bösen Zauberer zu bekämpfen.

Die meisten Erwachsenen laufen am Mond vorbei wie an einer Straßenlaterne. Die Anwesenheit oder Abwesenheit des Mondes kümmert sie wenig; sie können es bis zu einem gewissen Maß auch ohne den Mond hier auf der Erde aushalten. Das empört mich natürlich, denn unser Leben hier auf der Erde wäre ohne den Mond nicht nur viel beschränkter, sondern sogar fast undenkbar.

Wenn wir Neumond haben, können wir uns trotzdem abends treffen und mitten in der Nacht getrost nach Hause gehen oder fahren. Das wäre vor 200 Jahren nicht so einfach gewesen. Die Bibel nennt den Mond in der Schöpfungsgeschichte schon gleich im ersten Kapitel der Genesis „das kleine Licht für die Nacht“. In der Woche vor dem christlichen Osterfest ist immer Vollmond. So wurde es im vierten Jahrhundert auf dem Konzil in Nicaea festgelegt. Das Abendmahl von Christus war ja nichts anderes als eine Seder. Aber warum eine Nacht mit Vollmond? Weder meine jüdischen Bekannten noch verschiedene Lexika in der Bibliothek messen dem Vollmond irgendwelche praktische Bedeutung bei. Ich glaube, daß ohne den Vollmond den Juden die plötzliche Flucht aus Ägypten nicht gelungen wäre.

Der Mond bestimmt Ebbe und Flut. Viele wichtige Häfen und Handelszentren schützen sich und ihre großen Schiffe vor Stürmen, indem sie etwas landeinwärts, aber nicht allzuweit von einer Flußmündung liegen, z.B. London, LeHavre, Bremen, und viele andere. Damit die Schiffe nicht im Sand steckenbleiben, müssen sie auf den Mond warten, um über eine Schwelle im Flußbett hinüberzukommen.

¹ Vortrag gehalten am Wissenschaftskolleg zu Berlin am 15. April 1999.

Besonders wichtig ist natürlich die Wirkung des Mondes auf den menschlichen Körper. Offenbar waren wir vor langer Zeit Amphibien und auf die Gezeiten angewiesen. Seitdem ist der monatliche Rhythmus in den weiblichen Körper eingebaut, und ich wundere mich, ob die medizinische Wissenschaft genau weiß, wo sich die Uhr befindet, welche die Tage abzählt.

Der Mond spielt in der Kunst eine große Rolle; er kommt unzählige Male in der Literatur, der Musik, und in den Bildenden Künsten vor. Ich möchte mir auch noch einen Abstecher in die Sprachen erlauben. Im Deutschen ist Mond männlich und Sonne weiblich, während es in den romanischen Sprachen und im Griechischen gerade umgekehrt ist. Eine schöne Theorie dafür wäre, daß der Mond im Süden eher das milde und beruhigende Element darstellt, während die Sonne bedrohend und zerstörend wirkt. Im Norden hingegen stellt der Mond Kälte und Dunkelheit dar, während die Sonne Fruchtbarkeit und Wärme spendet.

Aber ich lernte dann von den Islamwissenschaftlern die bittere Wahrheit: Der Mond ist männlich im Arabischen, und der Grund dazu scheint zu sein, daß der Mond wichtig ist. Ich bedaure vor allem die Begründung dieses Sachverhaltes; dabei muß ich gestehen, daß es mir immer Freude macht, wenn ich die Mondsichel auf der Flagge eines islamischen Staates erblicke. Das Englische gefällt mir am besten in dieser Hinsicht, denn der Mond war noch im 17. Jahrhundert weiblich, also auch in Newtons Sprache. Die Sonne kann man getrost männlich machen, und für die Erde bleibt immer noch das neutrale „it“.

Nun komme ich endlich zu meiner eigentlichen Entschuldigung für mein Interesse am Mond, nämlich die Wissenschaftsgeschichte. Die Physiker haben in den letzten Jahrzehnten langsam angefangen, die Geschichte ihrer Wissenschaft ernst zu nehmen. Im März 1999 war ich sogar mit etwa 10 000 Kollegen in Atlanta dabei, als die Amerikanische Physikalische Gesellschaft ihr 100. Jubiläum feierte. Da gab es unter den 8 700 Vorträgen (jajwohl 8 700 Vorträge in 5 Tagen!) auch einige über die letzten 100 Jahre, und natürlich auch etliche über die Zukunft, also sozusagen Geschichte mit negativem Vorzeichen.

Allerdings, wenn ich meinen Kollegen erzähle, daß ich mich mit der Geschichte der Mondtheorie beschäftige, dann muß ich oft Kopfschütteln oder betroffenes Schweigen bemerken. Das hat mich letztes Jahr dazu veranlaßt, einer langen Arbeit über die Geschichte des Dreikörperproblems Mond-Erde-Sonne die vier ersten Zeilen des Sonetts Nr. 59 von Shakespeare voranzustellen.

If there be nothing new, but that which is
Hath been before, how are our brains beguil'd,
Which, labouring for invention, bear amiss
The second burden of a former child!

Wie bei Dante und Petrarca weiß man sehr wenig über die Person, an die sich diese Gedichte wenden; es ist nicht einmal klar, ob es ein Mann oder eine Frau ist. Darum bitte ich Sie, dieses Sonett zu lesen, als ob es direkt an den Mond gerichtet sei.²

Wenn nichts hier neu ist, alles war vorher;
Wie dann betrogen unsre Köpfe sind,
Sich mit Erfindung quälend tief und schwer!
Ein Kreißen wär's mit schon geborenem Kind.

Abgesehen von meiner Begeisterung für den Mond, möchte ich die Geschichte eines wichtigen Problems darstellen, an dem die Menschheit während drei Jahrtausenden gearbeitet hat, ohne zu einer schlüssigen Lösung zu kommen. Einerseits ist die Bewegung des Mondes wahrscheinlich das älteste Problem, für das die Menschheit versucht hat, eine verständliche und mathematisch vollständige Beschreibung zu finden. Andererseits muß ich gestehen, daß wir an diesem Versuch immer noch herumbasteln. Wir können zwar die Bewegungen für alle praktischen Zwecke vorausberechnen. Aber die mathematische Theorie ist äußerst unbefriedigend.

Natürlich stimmen die Wettervoraussagen über längere Zeit überhaupt nicht, und unsere Kenntnisse über die Pflanzen und Tiere sind weit von irgendeiner mathematischen Theorie entfernt. Aber folgendes Mißverständnis beschäftigt mich: Seit Kepler gibt es eine befriedigende mathematische Theorie für die Bewegung der Planeten um die Sonne. Viele Physiker stützen ihre Erwartungen an die Leistungen der Naturwissenschaften überhaupt auf diesen Erfolg von Kepler zu Beginn des 17. Jahrhunderts. Die Schwierigkeiten mit der Erklärung der Mondbewegung sollten uns alle eigentlich viel vorsichtiger und auch skeptischer machen.

Der nun folgende Teil meines Aufsatzes wird in die folgenden Abschnitte eingeteilt, die bereits eine kleine Vorahnung von meinem eigentlichen Thema geben: Beobachtung ohne Theorie, Theorie als geometrische Anschauung, Theorie als mathematische Analyse. Diese Art der wissenschaftlichen Entwicklung findet sich in vielen Problemen der Phy-

² Frau von Arnim und Frau Bottomley haben mir geholfen, eine deutsche Übersetzung zu finden.

sik wieder. Aber im Falle der Mondbewegung dehnt sich die Geschichte auf 3 Jahrtausende aus.

Beobachtung ohne Theorie

Ich nehme an, daß die meisten Menschen noch in dieser ersten Epoche leben, was die Bewegung des Mondes anbelangt. Darum möchte ich auf ein paar Dinge aufmerksam machen, die einfach zu beobachten sind, aber dennoch die Erklärung der Mondbewegung nicht leichtmachen. Von meiner Wohnung in Manhattan z.B. kann ich den Mond sehr bequem von einem Sessel im Wohnzimmer aus betrachten. Vorne fließt der Hudson vorbei, mit einer respektablen Breite von 1 bis 2 Kilometern. Gegenüber liegt der Staat New Jersey, die beiden Ufer sind relativ steil, und ich kann den ganzen westlichen Horizont überblicken.

Ich weiß genau, wo die Sonne zu den verschiedenen Jahreszeiten untergeht. Während der Tagundnachtgleiche ist es genau im Westen. Im Frühjahr ist die Sonne auf dem Weg zur Sommersonnenwende, dann geht es wieder hinunter bis zum 21. Dezember. Der Winkel vom Aequinox bis zu den Sonnenwenden ist etwa 31 Grad auf der geographischen Breite von New York; in Berlin ist er größer, nämlich 41 Grad.

Der Mond tut im Verlaufe eines Monats genau dasselbe wie die Sonne in einem Jahr. Der Monduntergang fängt nach dem Neumond am Abend an, aber er verschiebt sich während des Monats gegen Morgen. Zur Zeit des Vollmonds geht unser Trabant am westlichen Horizont unter, genau in dem Augenblick, da die Sonne am östlichen Horizont aufgeht, und zwar ungefähr gegenüber. Der Vollmond tut immer genau das Gegenteil von der Sonne: Der Wintervollmond steht hoch am Himmel, und der Sommervollmond geht kaum über den Horizont hinaus.

Aber jetzt kommt das Unerwartete. Im Jahr 1999 ist der Bogen der Monduntergänge am Horizont bedeutend kleiner als der Bogen der Sonnenuntergänge, nämlich nur etwa plus-minus 34 anstatt 41 Grad in Berlin. Vor zwei Jahren war er noch kleiner, nämlich nur 31 Grad. Doch dieser Bogen der Monduntergänge nimmt wieder zu, und wird im Jahr 2006 ein Maximum von plus-minus 53 Grad erreichen. Dann nimmt der Bogen wieder ab. Der ganze Zyklus dauert etwa 18 Jahre.

Mit der Beobachtung dieser Tatsachen sind wir bereits auf die Stufe der Babylonier, ungefähr ein Jahrtausend vor unserer Zeitrechnung, vorgeedrungen. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts wurden in Mesopotamien, dem heutigen Irak, von Kaufleuten, Abenteurern und manchmal sogar von Archäologen Tausende von Dokumenten in den Ruinen der alten Städte ausgegraben. Es handelt sich um Tonscherben, in denen ein Text in Keilschrift eingegraben wurde.

Man fand z.B. viele Berichte über die Ereignisse am Himmel während einer Zeit von etwa sechs Monaten; sie schließen vor allem vier wichtige Beobachtungen ein, nämlich die Zeitunterschiede zwischen Sonnenuntergang und Mondaufgang, bzw. zwischen Sonnenaufgang und Monduntergang zur Zeit des Vollmondes. Diese vier Zeitintervalle sind kürzer als eine Stunde und können mit einer einfachen Wasseruhr gemessen werden. Dies sind die ersten geplanten wissenschaftlichen Messungen der Menschheit!

Mit Hilfe dieser Zahlen kann einerseits der genaue Moment der Opposition von Sonne und Mond festgestellt werden, und außerdem findet man einen neunjährigen Zyklus für die Geschwindigkeit der Mondbewegung relativ zur Sonne. Die Babylonier haben für diese Daten einfache mathematische Modelle gefunden, und zwar sind diese Modelle rein arithmetisch, d.h. ohne geometrische Anschauung von der Art, wie sie sich die Griechen ausgedacht haben. Diese abstrakten Modelle liefern einfache Zahlenreihen für die Bewegungen des Mondes. Solche rein arithmetischen Formeln sind auch heute die erste Stufe der quantitativen Wissenschaften, vergleichbar etwa mit rein statistischen Ergebnissen. Computer werden heute gebraucht, um diese Tonscherben richtig zusammensetzen.

Die wenigen Angaben, die ich hier angedeutet habe, haben den Babyloniern erlaubt, eine fundamentale Erkenntnis zu gewinnen. Die Bewegung des Mondes verlangt die Kenntnis von *drei* verschiedenen Perioden, nämlich die Periode von $29\frac{1}{2}$ Tagen für den Neumond, die 9jährige für die Geschwindigkeit, und die 18jährige für den Bogen der Ereignisse am Horizont. Im Gegensatz dazu genügt *eine* Periode für die Bewegungen der Planeten, 225 Tage für die Venus, 1 Jahr für die Erde, 2 Jahre für den Mars, und 12 für den Jupiter, usw.

Seit langem dient das Sonnenjahr von $365\frac{1}{4}$ Tagen als langes Zeitmaß für das menschliche Leben, und die $29\frac{1}{2}$ Tage des Neumondes als ein kurzes Zeitmaß. Es ist nicht leicht, diese beiden Maße miteinander in Übereinstimmung zu bringen. Aber es gibt eine relativ einfache Beziehung: 19 Sonnenjahre = 235 Neumonde, mit einem Fehler von weniger als 2 Stunden. Dieser 19jährige Zyklus wurde im Jahre 432 vor Christus von dem Astronomen Meton in den Kalender von Athen eingebaut; aber man weiß nicht, ob die Griechen diesen metonischen Zyklus selbst entdeckt haben, oder ob sie ihn von den Babyloniern auf dem Weg über die Perser gelernt haben.

Dieser Zyklus ist die Basis für den jüdischen Kalender, der auf einer bestimmten Reihenfolge von 12 kurzen Jahren von 12 Monaten und 7 langen Jahren von 13 Monaten beruht. Der christliche Kalender ist ein reiner Sonnenkalender, denn die Monate sind politische Erzeugnisse der römi-

schen Kaiserzeit, und haben nichts mit den Neumonden zu tun. Dagegen ist der islamische Kalender ein reiner Mondkalender: Jedes Jahr besteht aus genau 12 Neumonden. Die mohammedanische Jahreszählung geht deshalb schneller vorwärts als die jüdische und christliche.

Der metonische Zyklus hat noch lange Zeit in der christlichen Tradition weitergelebt. Ein Beispiel dafür sind die Monatsbilder aus dem Gebetbuch des Herzogs von Berry; sie sind ein Werk der Gebrüder Limburg von Nijmegen aus dem Jahr 1416. Man kann viele interessante Einzelheiten aus der Astronomie in diesen Miniaturen finden. Ich möchte hier nur auf die Reihe von 19 Buchstaben mit Mondsicheln im Bild des Monats März hinweisen, die dem metonischen Zyklus entsprechen. Man kann mit ihrer Hilfe genau das Datum der Neumonde für viele Jahre im voraus bestimmen, und natürlich auch den jüdischen und mohammedanischen Kalender, falls man mit deren Regeln vertraut ist.

Die abstrakten arithmetischen Formeln der Babylonier genügten nicht, die zwei Arten von Finsternissen genau vorherzusagen, die Sonnen- und die Mondfinsternisse; sie erlaubten nur, vor diesen beängstigenden Ereignissen zu warnen.

Theorie als geometrische Anschauung

Unsere heutige Vorstellung vom Weltall verdanken wir den griechischen Philosophen, Mathematikern und Astronomen. Die Entwicklung dieser Anschauung kann leider nicht genau zurückverfolgt werden, weil viele Werke von griechischen Autoren verlorengegangen sind. Obwohl es viele Fragmente gibt, vor allem Zitate bei späteren Autoren, ist ein Punkt ganz unklar. Wer oder was hat den Griechen geholfen, eine wesentliche Hürde für das Verständnis zu überwinden?

Wenn nämlich die Sonne scheint, sieht man bekanntlich die Sterne nicht mehr, weil die Atmosphäre das Sonnenlicht in alle Richtungen streut. Trotzdem sind natürlich die Sterne immer noch im Hintergrund vorhanden, und die Sonne verschiebt sich jeden Tag ungefähr um ein Grad durch die Sternbilder des Tierkreises. Man muß also sozusagen den hellblauen Tageshimmel im Gedanken wegwischen, um sich die Sonne direkt vor dem nächtlichen Sternenhimmel vorzustellen. Diese Leistung der Einbildungskraft wäre wohl kaum ohne die Anwesenheit des Mondes möglich gewesen. Er ist die einzige Erscheinung am Himmel, welche sowohl nachts als auch tags sichtbar ist. Der Mond gab den Griechen sozusagen den Schlüssel zum Weltall.

Die griechische Vorstellung vom Weltall ist gar nicht so verschieden von der heutigen, nur die Maßstäbe sind anders. Der Abstand des Mondes war den Griechen gut bekannt, ziemlich genau 60 Erdradien. Archimedes

von Syrakus im dritten Jahrhundert vor Christus hat versucht, das Volumen des Universums zu berechnen. Bei der Gelegenheit hat er die Ansicht des Aristarchus von Samos zurückgewiesen, daß nämlich die Sonne, und nicht die Erde, im Zentrum des Weltalls sei.

Aristarchus war offenbar ein hervorragender Astronom, denn er hatte versucht, die Distanz der Sonne von der Erde zu messen, und sein Traktat darüber ist erhalten geblieben. Die Methode ist aber ganz unpraktisch, und das Resultat ist falsch. Danach soll die Sonne etwa 20 mal weiter weg sein als der Mond, während sie in Wirklichkeit 400 mal weiter entfernt ist. Aber das Ergebnis von Aristarchus hat sich bis in das 17. Jahrhundert gehalten. Kopernikus, Galileo und Kepler wußten es nicht besser. Daß der Durchmesser der Sonne etwa 100 mal größer als die Erde ist, war ihnen unfaßlich. Für sie war die Sonne nur 5 mal größer. Sogar der Wert, mit dem Newton arbeitete, war manchmal bis zu 20% falsch. Die Schwerkraft mit der inversen Abhängigkeit vom Quadrat der Entfernung bestimmt keine absolute Skala.

Die technischen Errungenschaften der griechischen Astronomie kamen sehr spät. Die Römer waren bereits daran, ihre Herrschaft über den nahen Orient auszudehnen, denn die Griechen hatten einander fast ohne Unterlaß drei Jahrhunderte lang bekämpft. Der große Meister ist Hipparchus von Rhodos im 2. Jahrhundert. Die Bewegungen der Sonne, des Mondes und der Planeten wurden in geometrischen Modellen dargestellt, die auf der Idee des Epizykels aufbauten. Ein kleiner Kreis läuft auf einem größeren, aber nicht mit derselben Geschwindigkeit. Diese Zerlegung in Kreisbewegungen entspricht genau der harmonischen Analyse in der Musik oder allgemein der Fourier-Analyse in der Mathematik.

Das Bild von den Bewegungen der Planeten sieht dann so aus wie die Illustration aus einem französischen Lehrbuch des 18. Jahrhunderts. Man weiß nicht, ob die Griechen je solche Bilder gezeichnet haben; aber man sieht sehr schön, wie der kleine Kreis auf dem großen läuft. Dieses Bild stellt genau dar, was wir von der Erde aus beobachten. Alle die raffinierten Instrumente in den großen modernen Teleskopen und in den Forschungs-satelliten der Erde müssen sich mit dieser Geometrie herumschlagen. Die sogenannte kopernikanische Revolution hatte einen rein philosophisch-ästhetischen Charakter. Die physikalische Notwendigkeit für die Bewegung der Erde um die Sonne wurde erst im 18. Jahrhundert durch eine winzige Korrektur in der Beobachtung der Sterne gezeigt, und die Drehung der Erde um ihre eigene Achse wurde sogar erst im 19. Jahrhundert durch den Pendelversuch von Foucault im Pantheon von Paris nachgewiesen.

Das griechische Bild für die Mondbewegung sieht allerdings noch komplizierter aus. Der Mond bewegt sich nicht in der gleichen Ebene wie die Erde um die Sonne, und diese Ebene der Mondbahn dreht sich außer-

dem noch nach rückwärts, eben in dem Zyklus von 18 Jahren. In dieser Ebene haben wir dann noch einen Epizykel. Kepler ersetzt ihn durch eine Ellipse, wobei die Erde in einem der beiden Brennpunkte liegt. Der erdnächste Punkt der Bahn, das Perigäum, bewegt sich in einem 9jährigen Zyklus nach vorwärts. Die Parameter für dieses Modell waren schon den Babyloniern bekannt. Alles das hat Kepler gerade noch hingenommen.

Was Kepler nicht mehr hinnehmen konnte, ist folgende einfache Beobachtung der Griechen. Man sieht ohne weiteres, daß die Vollmonde und die Neumonde einander nicht in genau gleichmäßigen Zeitintervallen folgen, sondern daß sie manchmal bis 10 Stunden zu früh oder 10 Stunden zu spät eintreffen. Die Griechen waren Wissenschaftler und haben deshalb manchmal „dumme Fragen“ gestellt, d.h. Fragen, die von vornherein sinnlos oder zwecklos scheinen. Sie wollten nämlich wissen, ob die Halbmonde auch manchmal zu spät oder zu früh eintreffen, d.h. der Moment, da die Sonne und der Mond genau einen rechten Winkel bilden.

Wir wissen das alles aus dem großen Lehrbuch der Astronomie, das Ptolemäus von Alexandrien im zweiten Jahrhundert unserer Zeitrechnung geschrieben hat, der berühmte Almagest. Ein spezielles Instrument wurde für diese Messung gebaut, und das Resultat war schockierend. Der Mond kommt manchmal 15 Stunden zu früh oder zu spät im Halbmond an. Wie ein Kind, das nicht von der Schule nach Hause gehen möchte oder umgekehrt, trödelt oder beeilt sich der Mond auf dem Weg zwischen Neumond und Vollmond und umgekehrt. Die Sonne scheint den Mond auf seiner Runde um die Erde manchmal zu bremsen oder zu beschleunigen. Das geometrische Modell für diese Beobachtung hat eine viel zu lange Geschichte, deren Helden aber gut bekannt sind, nämlich der Perser Nasir ed-Din al-Tusi des 13. Jahrhunderts, dann im 14. Jahrhundert der Jude Levi Ben Gerson in Avignon und schließlich der Araber Ibn al-Shatir in Damascus. Die Bewegungen von Sonne und Mond sind aneinandergeschnitten. 200 Jahre später hat Kopernikus diese Theorie einfach übernommen.

Theorie als mathematische Analyse

In meiner Geschichte sollte jetzt eigentlich der Moment kommen, wo die große astronomische Erneuerung des 16. Jahrhunderts greift. Aber die Verschiebung des Zentrums der Welt in die Nähe der Sonne hat keinen Einfluß auf die Bewegung des Mondes um die Erde. Am Ende des 16. Jahrhunderts mißt und beobachtet Tycho Brahe während 20 Jahren systematisch alles, was es am Himmel zu sehen gibt, mit besseren Instrumenten als je, aber immer noch ohne Teleskope. Er entdeckt dabei vier weitere Korrekturen zu dem klassischen Modell für die Mondbewegung. Damit

geht die Anzahl der empirischen Parameter weit über ein Dutzend hinaus, im Gegensatz zu den Planeten, wo jeder genau 6 zugeteilt bekommt.

Jetzt kommen endlich die Physiker zum Zug. Am Anfang des 17. Jahrhunderts erwirbt Galileo das große Verdienst, zum ersten Mal ein Teleskop auf die Sterne zu richten, während der etwas jüngere Kepler sich damit begnügt, die Daten von Tycho Brahe auszuwerten, weil er schlechte Augen hat. Damit wird zum ersten Mal die Bewegung der Planeten um die Sonne richtig verstanden, aber unser Mond bleibt ein Stiefkind; ihm nützen alle die neuen Entdeckungen und Theorien nichts.

Am Ende des 17. Jahrhunderts erscheint Newton, der tragische Held, in der Geschichte des Mondes. Viele große Wissenschaftler sind ungewöhnliche Menschen, aber Newton scheint jenseits aller Normen zu stehen. Da die meisten Leute nicht viel über sein Leben wissen, und er einer der größten Gestalten im Pantheon der Naturwissenschaften ist, möchte ich über ihn ein paar Einzelheiten erzählen. Ob er dann besser verstanden werden kann, ist allerdings sehr zu bezweifeln.

Newton verlor seinen Vater schon vor seiner Geburt, und seine Mutter heiratete dann auf Anraten ihrer Familie einen älteren, reichen Junggesellen. Der schenkte ihr aber dann gleich drei Kinder, so daß der junge Isaac alleine in einem kleinen Dorf im Haus seiner Großeltern aufwuchs. Er ging in die lokalen Schulen, lernte Latein und elementare Mathematik. Schließlich bekam er ein Stipendium nach Cambridge, wo er allerdings die Zimmer und Nachthäfen seiner reicheren Kommilitonen putzen mußte. Aber einer der Professoren, ein Geistlicher und guter Mathematiker, Isaac Barrow, sorgte dafür, daß Newton ein Fellow im Trinity College wurde, ohne daß er geistliche Weihen nehmen mußte.

Er war unterdessen zum besten Mathematiker, Astronom und Physiker in Europa herangewachsen, aber niemand wußte von seiner Existenz, außer seinem Gönner in Cambridge, denn Newton weigerte sich entschieden, irgend etwas zu publizieren. Zum Glück hatte sein Gönner politischen Ehrgeiz und gab seine Professur auf; er sorgte dafür, daß der 28jährige Newton sie bekam. Newton war unterdessen durch seine neuartigen Experimente in der Optik und vor allem durch den Bau des ersten Spiegelteleskopes bekannt geworden. Er haßte und verachtete den Verkehr mit seinen Kollegen und mit der Öffentlichkeit; er zog sich mit 30 Jahren vollständig auf sein Zimmer im Trinity College zurück, und hörte auf, sich mit physikalischen Problemen zu beschäftigen. Anstatt dessen betrieb er während mehr als 10 Jahren Theologie und Alchemie, er war in der Tat der letzte Alchemist!

Er wurde dann im Alter von 41 Jahren aus seinem Dornröschenschlaf geweckt, durch ein Trio von ganz ausgezeichneten englischen Wissenschaftlern. Es waren Christopher Wren, der die Stadt London nach dem

großen Feuer von 1665 und besonders die St. Pauls Kathedrale wiederaufgebaut hatte, der Physiker Robert Hooke und der Astronom Edmond Halley. Diese drei hatten nämlich das Gesetz der Schwerkraft entdeckt, welche die Planeten an die Sonne bindet, proportional zur Masse und umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung.

Halley wurde nun zu Newton geschickt, um ihn zu fragen, ob er umgekehrt die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung aus diesem Gesetz der Schwerkraft ableiten kann. Newton behauptete, daß er das früher schon einmal getan habe, aber er konnte die entsprechenden Papiere nicht finden. Halley machte ihn darauf aufmerksam, daß falls sich Newton nicht gleich auf die Socken machte, er und seine Kollegen dieses Problem lösen würden. Diese Unterredung fand im August 1684 statt; nach weniger als 3 Jahren, Anfang Juli 1687, kam das große 500seitige Buch im Quartformat heraus, lateinisch geschrieben, mit dem Titel *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Die Mathematischen Prinzipien der Naturphilosophie); fast alles darin war neu, auch für Newton. Die ganze Physik und Astronomie baut sich auf diesem Buch auf.

Aber damit war Newton leider mit der Wissenschaft schon fast wieder fertig. Unter seinen Papieren hat man solche gefunden, die sich mit ein paar Problemen der Optik, der Mathematik und möglichen Verbesserungen der *Principia* abgaben, ohne zu wesentlich neuen Resultaten zu kommen. Die zweite Auflage der *Principia* von 1713, und die dritte von 1726 wurden von Kollegen besorgt, und Newton änderte nur ein paar der astronomischen Daten. Im Alter von 51 Jahren hatte er einen schweren Nervenzusammenbruch und gab dann seine Professur in Cambridge auf.

Er wurde zum „Master of the Mint“ ernannt, und kontrollierte während 30 Jahren die Geldzirkulation von Großbritannien mit großer Energie und viel Erfolg. Er wurde reich, führte ein großes Haus, das ihm seine schöne Nichte verwaltete. Diese war 10 Jahre lang die Geliebte des Britischen Schatzkanzlers, und nach dessen politischen Sturz heiratete sie dann einen sehr vornehmen, jungen Mann. Immerhin leitete Newton die Royal Society bis zu seinem Tod mit eiserner Hand, und er hatte einen großen Prioritätsstreit mit Leibniz über die Urheberschaft der Differential- und Integralrechnung. Sein Benehmen in diesem Streit war nicht immer anständig.

Wir wissen wenig über Newtons privates Leben, er hat kaum in der Öffentlichkeit über sich selbst geredet oder geschrieben und hatte wahrscheinlich gute Gründe für diese Vorsicht. Er betrieb Alchemie mit der üblichen Geheimnistuerei; er war ein Ketzer in seiner Religion, denn als Arianer glaubte er nicht an die göttliche Natur von Christus; schließlich bin ich sicher, nach den wenigen Angaben, die es gibt, daß Newton homosexuell war. All dies mußte er geheimhalten, wenn er seine Stellung im Trinity College nicht gefährden wollte.

Was mich in Newtons Werk besonders interessiert, sind seine Bemühungen, die Bewegung des Mondes zu verstehen. Was die Bewegung der Planeten anbelangt, hatte er sozusagen die komplette Lösung gefunden, und auch soweit wie möglich verallgemeinert. Er hatte aber auch die Idee der allgemeinen Gravitation vorgeschlagen, nach der jeder Körper jeden anderen anzieht, und wollte nun unbedingt schauen, was die Folgen sind. Der einzige Fall, wo drei Körper aufeinanderwirken, war der Mond, der an die Erde *und* an die Sonne gekoppelt ist.

Es ist verwunderlich, wieviele Physiker großartige Verallgemeinerungen vorschlugen und dann aber keine Zeit haben, nur auch ein Beispiel dafür durchzurechnen oder durchzudenken. Newton war vorbildlich in dieser Hinsicht, und die Mondbewegung nimmt in den *Principia* mehr Platz ein als die Diskussion der Planetenbewegung. Am Schluß war Newton dann doch unzufrieden wie ein Anhang zeigt, den Newton für das Lehrbuch der Astronomie seines Freundes David Gregory in Oxford schrieb.

Newton hat auch den Ursprung der Gezeiten quantitativ erfaßt und die Abplattung der Erde abgeschätzt, obwohl ihm dazu genaue Daten fehlten, vor allem die mittlere Dichte der Erde. Er hat noch auf einen anderen wichtigen Effekt des Mondes hingewiesen. Die Erde dreht sich relativ rasch um ihre eigene Achse, aber diese Achse steht schief zur Bahn der Erde um die Sonne und auch zur Bahn des Mondes um die Erde, übrigens aus Gründen, die wir nicht verstehen. Die Schwerkraft des Mondes und der Sonne versucht, diese Achse wieder aufzurichten wie bei einem Kreisel, und das führt zur sogenannten Präzession. Diese Präzession mit einer Periode von 26.000 Jahren war schon den Griechen bekannt und hat eine große Wirkung auf unser Klima.

Die Hitze im Sommer kommt vor allem davon, daß die Tage länger sind und die Sonne höher am Himmel steht, eben wegen der schiefen Stellung der Erdachse; im Winter dagegen sind die Tage kurz, die Sonne steht tief, und das Sonnenlicht trifft die Erde unter einem flachen Winkel. Außerdem ist aber die Erde im Sommer weiter von der Sonne entfernt als im Winter. Das kann man schon daran erkennen, daß der Sommer vom 21. März bis zum 23. September eine Woche länger ist als der Winter vom 23. September bis zum 21. März.

Zur Zeit kompensiert in der nördlichen Hemisphäre unser Abstand von der Sonne teilweise die Wirkung der Sonneneinstrahlung, während die beiden Wirkungen einander in der südlichen Halbkugel verstärken. Dieser Zustand hat bis jetzt etwa 5 000 Jahre gedauert und wird noch weitere 5 000 Jahre bestehen. Die nördliche Hemisphäre erfährt seit 5 000 Jahren ein gemäßigtes Klima und erlebte deshalb eine kulturelle Blüte. Der Mond ist zu 70% dafür verantwortlich.

Die Argumente in den *Principia* sind für uns heute nicht leicht zu verstehen. Sie sind von einer verblüffenden Einfachheit und mit den primitivsten technischen Mitteln durchgeführt: Sie beruhen nur auf elementarer Geometrie ohne den Gebrauch von Differential- und Integralrechnung. Newtons Unzufriedenheit mit der Mondtheorie bezieht sich vor allem auf die beiden Extraperioden des Mondes: die 9jährige für die Vorwärtsbewegung des Perigäums und die 18jährige für die Rückwärtsbewegung des Knotens. Es gelang Newton für beide Perioden eine einfache Formel abzuleiten. Für die Bewegung des Knotens kam ungefähr die richtige Periode raus, aber die Bewegung des Perigäums ist 50% zu klein. Er hat keinen Fehler gemacht!

Newton starb 1728 im Alter von 85 Jahren! Der erste Mensch, der sich an die *Principia* heranwagte war Leonard Euler aus Basel. Er war seit 1727 Mitglied der russischen Akademie in St. Petersburg und veröffentlichte 1736 ein zweibändiges Werk, in dem die ganze Mechanik mit Hilfe der Integral- und Differentialrechnung erklärt wird, so wie wir es heute tun. Zwei Jahre später schrieb Voltaire ein sehr populäres und kompetentes kleines Buch, *Die Elemente der Philosophie von Newton*, und seine Freundin, die Marquise Gabrielle-Emilie du Chatelet, übersetzte die *Principia* auf Französisch. Dann gab es 1747 ein kleines Drama über die Mondtheorie in der Französischen Akademie der Wissenschaften.

Im Sommer hatten die drei besten mathematischen Physiker der Zeit gleichzeitig, aber unabhängig voneinander, beim Sekretär der Akademie eine Arbeit über die Bewegung des Mondes eingereicht. Das waren die Herren Alexis Clairaut, Jean Le Rond d'Alembert und Leonard Euler; sie waren sich einig, daß Newtons Ergebnis für die Bewegung des Perigäums richtig ist, und daß daher etwas mit der Schwerkraft nicht stimmt. Clairaut schlug dann vor, die Formel für die Abhängigkeit der Schwerkraft von der Distanz so abzuändern, daß sie für den Abstand des Mondes stärker wird als für die Abstände der Planeten. Aber da sträubte sich ein Vertreter der Biologen in der Akademie gegen diesen billigen Ausweg der Physiker. Das war Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon, ein ausgezeichnete Mann.

Nach mehreren öffentlichen Diskussionen prüfte Clairaut seine Rechnungen noch einmal sorgfältig nach und fand in der Tat eine Methode, die ihm dem beobachteten Resultat bedeutend näherbrachte. Dann verbesserte d'Alembert das Ergebnis von Clairaut, indem er dafür eine algebraische Formel fand, nämlich eine Entwicklung, wo Newtons Resultat durch das unterste Glied dargestellt wird. Das war wahrscheinlich das letzte Mal, daß ein Vertreter der Biologie es gewagt hat, den theoretischen Physikern eine Lektion über den Sinn der Wissenschaft zu erteilen.

Ein paar Betrachtungen zum Schluß

Das 18. Jahrhundert war an der Bewegung des Mondes aus einem praktischen Grund interessiert. Es gab noch keine guten Uhren, auf die man sich während einer viele Monate dauernden Reise verlassen konnte. Um die geographische Länge auf hoher See zu kennen, mußte die Bewegung des Mondes gemessen werden. Das britische Unterhaus hatte einen Preis von 20 000 Pfund für eine praktische Lösung dieses Problems ausgesetzt. Dieser Preis wurde den Tafeln von Tobias Mayer aus Göttingen zugesprochen, aber als das Unterhaus endlich beschloß, das Geld auszuzahlen, hatte bereits ein englischer Uhrmacher des Namens Harrison ein Chronometer konstruiert, das in der Tat die genaue Zeit über Monate angab. Er erhielt deshalb den Löwenanteil von 17 000 Pfund, während der Witwe von Tobias Mayer 3 000 Pfund zugesprochen wurden, und Leonard Euler bekam einen Trostpreis von 300 Pfund für seine Hilfe bei den Rechnungen.

Diese kleine Anekdote zeigt den Übergang von der Beobachtung einer konkreten Himmelserscheinung, nämlich der Bewegung des Mondes, zum Gebrauch einer abstrakten Größe, nämlich der Zeit. Für uns ist das heute ganz natürlich; wir alle tragen eine Uhr mit uns, nach der wir unser Leben organisieren. Die Existenz eines absoluten Maßes für die Zeit wurde zuerst von Newton ganz klar am Anfang seiner *Principia* postuliert. Newton ist zutiefst ein britischer Empirist und zeichnet sich durch große Einbildungskraft aus. Er redet von der absoluten Zeit als einem großen Fluß, der sich gleichmäßig in alle Teile des Raumes ergießt.

Laplace am Ende des 18. Jahrhunderts ist dagegen ein Cartesianer. Er vollendet das Werk von Newton, indem er alle Bewegungen im Sonnensystem numerisch genau auf das Gesetz der allgemeinen Gravitation zurückführt. Aber er ist auch ein geheimer Positivist; bei seinen Rechnungen erscheint immer noch nicht die Zeit als freier Parameter, welcher gleichmäßig fortschreitet, sondern nur der beobachtete Winkel in der Ekliptik. Praktisch ein Vorteil und mathematisch nicht angreifbar, solange dieser Winkel immer zunimmt. Noch am Ende des 18. Jahrhunderts erscheint also die Zeit als eine abgeleitete Größe.

Damit bin ich bei dem Thema angelangt, mit dem ich mich hier am Wissenschaftskolleg beschäftigte, nämlich die Rolle der Zeit in der modernen Physik. Zum Abschluß möchte ich noch ein paar Bemerkungen darüber machen. Ich war überrascht zu sehen, daß die Vorstellung Newtons vom Raum und der Zeit als eines absoluten Gefäßes, in dem sich die Erscheinungen der Welt abspielen, immer noch der Physik zugrundeliegt.

Die Struktur dieses Gefäßes wurde natürlich von Albert Einstein wesentlich verändert. Erstens in der speziellen Relativitätstheorie dadurch, daß der Lichtgeschwindigkeit eine absolute Rolle gegeben wird,

und zweitens in der allgemeinen Relativitätstheorie dadurch, daß die Schwerkraft direkt durch die lokale Krümmung dieses Gefäßes erklärt wird. Aber auch die Quantentheorie wird in dieses Gefäß eingebettet, und es ist bekanntlich trotz aller Versuche nicht gelungen, die Struktur dieses Gefäßes selber zu quantisieren, was auch immer damit gemeint ist. Alles, was darüber heutzutage von Physikern und Philosophen gesagt wird, ist reine Spekulation!

Es gibt gute Gründe dafür, daß Newtons Auffassung von der Zeit noch lange die moderne Physik beherrschen wird, auch die Hochenergieeteilchen und die Kernphysik. Es gibt keinerlei experimentelle Hinweise auf eine wie immer geartete, wesentliche Änderung der notwendigen Grundlagen. Die Längenskala und die Zeitskala, die sich aus der Gravitationskonstante, der Lichtgeschwindigkeit und dem Wirkungsquantum von Planck ergibt, die sogenannte Planck-Länge oder Planck-Zeit, ist extrem klein. Es wird noch lange dauern bis wir Phänomene von diesem Maßstab mit Instrumenten erfassen werden.

Es bleiben uns noch andere Geheimnisse: Der Ursprung des Mondes ist unbekannt. Die allgemein akzeptierte Theorie über den Ursprung des Sonnensystems behauptet mit Kant und Laplace, daß sich eine große Wolke von Material unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammengezogen hat. Um das vorhandene Drehmoment zu erhalten, mußten außer der Sonne im Zentrum noch kleinere Planeten gebildet werden, die dann wiederum von ihren eigenen Satelliten umgeben sind.

Diese einfache Idee scheint wenigstens qualitativ zu stimmen, vorausgesetzt daß die Planeten viel kleiner als die Sonne, und die Satelliten viel kleiner als deren Mutterplaneten sind. Aber gerade dieser letzte Punkt trifft nicht für unseren Mond zu; er ist bei weitem der größte Satellit im Sonnensystem im Vergleich zu seinem Mutterplaneten. Außerdem wissen wir jetzt etwas von seiner chemischen Zusammensetzung, und die ist nicht mit der Erde vergleichbar. Die Erde muß also den Mond eingefangen haben, und das ist ein äußerst kritischer Prozeß. Wir wissen also nicht, von woher und auf welche Weise uns der Mond zugelaufen kam.

Zum Schluß noch ein Gedicht aus den Galgenliedern von Christian Morgenstern!

*Zwei Trichter wandeln durch die Nacht.
Durch ihres Rumpfs verengten Schacht
Fließt weißes Mondlicht
still und heiter
Auf ihren
Waldweg
u. s.
w.*