

## 8. Beobachtungen und Experimente zu den Bewegungsgesetzen

Naturwissenschaft, wie wir sie heute verstehen, beruht auf der genauen Beobachtung, dem gezielten Experiment, der sorgfältigen Auswertung und der Entdeckung von Regelmäßigkeiten in den Messergebnissen, woraus in glücklichen Fällen ein mathematisch formuliertes Naturgesetz entsteht. Diese Methodik wurde im 16. und 17. Jahrhundert von dem Dänen Tycho Brahe, dem Deutschen Johannes Kepler, dem Italiener Galileo Galilei und dem Engländer Isaac Newton in wahrhaft europäischer Zusammenarbeit entwickelt. In dieser und der nächsten Vorlesung wollen wir diesen Weg nachzeichnen.

### 8.1 Beobachtungen der Planetenbahnen

Die Bewegung der Himmelskörper wurde schon im Altertum beobachtet. Dafür gab es religiöse Gründe, aber auch praktische, wie die Landwirtschaft und Seefahrt. Der bedeutendste Astronom der Antike, Claudius Ptolemäus (ca. 100 – 175 n. Chr.) wirkte in Alexandria. Sein Hauptwerk, der "Almagest", enthält einen Katalog von 1025 Sternen, deren Koordinaten auf  $1/6$  eines Grades ( $= 10'$ ) genau angegeben sind. Diese Genauigkeit war bis ins 16. Jahrhundert unübertroffen. Die im Almagest enthaltenen Daten bildeten die Grundlage sowohl für das geozentrische oder ptolemäische als auch



Abb. 8.1: Der Mauerquadrant von Tycho Brahe, der in der Mitte sitzt. Ein Assistent rechts am Rand beobachtet einen Stern durch die Öffnung in der oberen Hälfte der linken Mauer.

für das heliozentrische oder kopernikanische Weltsystem; es war jedoch nicht möglich, sich mit ihrer Hilfe für eines der beiden Systeme zu entscheiden.

Erst dem Dänen Tycho Brahe (1546 – 1601) gelang es, bessere Instrumente zu bauen, mit denen er die Positionen der Sterne auf  $1/30$  Grad ( $= 2'$ ) genau bestimmen konnte, also 5 mal genauer als Ptolemäus. Brahe besaß noch kein Fernrohr, er hatte sich aber sehr große und präzise Quadranten konstruieren lassen (siehe Abb. 8.1), die er auf der Insel Hven mit einer Reihe von Assistenten betrieb. Seine Arbeiten wurden vom dänischen König großzügig finanziert.

Diese neuen Daten waren der Schlüssel für den Fortschritt in der Wissenschaft, der allerdings nicht einfach zu erzielen war, da man die Sterne nicht von einer festen Stelle,

sondern von der Erde aus beobachtete. Heute wissen wir, dass die Erde sich bewegt: sie rotiert um sich selbst und läuft auf einer Bahn um die Sonne. Besonders der zweite Teil der Bewegung war zur Zeit von Brahe nicht gesichert. Wenn man also seine Beobachtungen auswerten wollte, um die Bewegungsgesetze der Gestirne zu erforschen, musste man die Bewegung der Erde aus den Daten "herausrechnen". Dazu stellte Brahe, der inzwischen nach Prag gewechselt war, um 1600 den jungen Astronomen Johannes Kepler (1572 – 1630) an. Die Aufgabe, die Kepler in wenigen Wochen lösen wollte, zog sich über insgesamt 18 Jahre hin - natürlich hat er nicht nur an diesem Problem gearbeitet. Das Ergebnis waren die drei "Keplerschen Gesetze", die die vielen Einzelmessungen mathematisch beschreiben.

Hier sollen nur die beiden ersten Keplerschen Gesetze besprochen werden:

1. Die Planeten bewegen sich auf Ellipsenbahnen, in deren einem (gemeinsamen) Brennpunkt sich die Sonne befindet.
2. Die Verbindungslinie zwischen Sonne und Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (siehe Abb. 8.3).

Eine Ellipse ist eine Art "zusammengedrückter" Kreis (siehe Abb. 8.2), wobei der Grad der Abweichung von der Kreisgestalt durch die sog. Exzentrizität beschrieben wird. Bei den Planetenbahnen sind diese Exzentrizitäten relativ klein, z.B. 9,3 % beim Mars und 1,7 % bei der Erde. Ohne die Genauigkeit der Braheschen Daten hätte Kepler, wie er

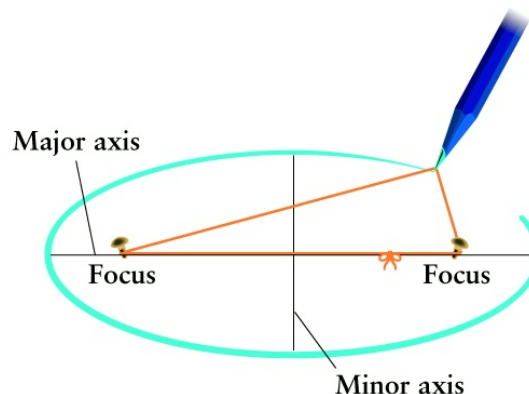


Abb. 8.2: "Gärtnerkonstruktion" einer Ellipse mit Hilfe eines Fadens konstanter Länge, der an zwei Punkten, den Brennpunkten, befestigt ist. Die Exzentrizität ist das Verhältnis des Brennpunktabstands vom Mittelpunkt zur Länge der großen Halbachse.

später zugab, selbst beim Mars die Abweichungen von der Kreisbahn nicht gefunden. Dass sich die Planeten auf Ellipsen- und nicht auf Kreisbahnen bewegen widersprach

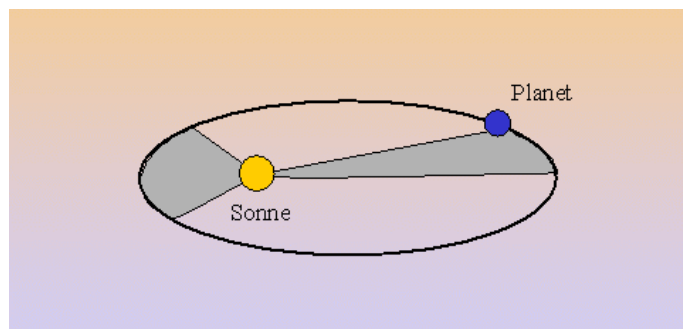


Abb. 8.3: Illustration zum 2. Keplerschen Gesetz

tiefgreifenden philosophischen Vorstellungen, wonach der Kreis die vollkommenste

Kurve ist. Da die Schöpfung vollkommen gedacht wurde, kam für alle Himmelskörper und damit auch für die Planeten nur die Kreisbewegung infrage. Dass die Beobachtung etwas anderes ergab, wirkte wie ein Schock. Dass Kepler sich über so grundlegende philosophische bzw. religiöse Vorurteile hinwegsetzte, macht seine Größe aus und war grundlegend für die moderne Naturwissenschaft.

Aus dem 2. Keplerschen Gesetz ergibt sich, dass die Planeten sich in Sonnenferne langsamer bewegen als in Sonnennähe. Heute kann man diesen Unterschied schon aus dem Kalender ablesen. Wenn man die Tage zwischen dem Frühlings- und Herbstanfang zählt, findet man 179 "Wintertage" und 186 "Sommertage". Daraus ergibt sich die scheinbar paradoxe Situation, dass die Erde sich in unserem Winter, d.h. auf der Nordhalbkugel, näher an der Sonne befindet als in unserem Sommer. Eine ganz grobe Abschätzung führt dann zu einer Exzentrizität der Erdbahn von etwa 2 % .

## 8.2 Experimente zum freien Fall

Wegen seines spektakulären Prozesses ist Galilei die vermutlich bekannteste Forscherpersönlichkeit aus der Frühzeit der modernen Wissenschaft. Wir wollen in dieser Vorlesung jedoch nicht auf seine Vorstellungen über den Aufbau des Sonnensystems und den daraus resultierenden Konflikt mit der Kirche eingehen, sondern wollen seine Untersuchungen zu den Fallgesetzen besprechen.

Genaue Beobachtungen an Objekten, die man nicht beeinflussen kann, wie z.B. die Planetenbewegungen, sind die eine Quelle der Naturerkenntnis – wir haben sie am Beispiel von Brahe und Kepler beschrieben. Experimente, die man gezielt aufbaut und verändert, um ein bestimmtes Naturphänomen zu isolieren und genau zu vermessen, sind die zweite Quelle der wissenschaftlichen Erkenntnis. Hierzu gehören Galileis Versuche zu den Fallgesetzen.

Der Fall von Körpern "nach unten" ist ein Alltagsphänomen und war natürlich auch schon vor Galilei beobachtet und untersucht worden. Man hört oft, dass Galilei ( 1564 – 1642) am schiefen Turm in Pisa seine Experimente gemacht habe. Darüber gibt es aber keine gesicherten Zeugnisse. Ohne anzugeben, wie er zu diesem Ergebnis kommt, schreibt er in seinem "Dialog", dass Kugeln gleicher Größe aber aus verschiedenem Material aus einer Höhe von ca. 50 m gleich schnell fallen. Galilei verallgemeinerte diese Erkenntnis dann in der Weise, dass er behauptete, dass alle Körper gleich schnell fallen. Diese Hypothese war sicherlich gewagt, denn wir wissen aus eigener Anschauung, dass ein Blatt Papier nie so schnell wie eine Stahlkugel fällt, jedenfalls nicht in Luft. Dass ein Stück Papier im Vakuum in der Tat so schnell wie eine Stahlkugel fällt, konnte Galilei nur ahnen, aber nicht verifizieren. Dabei argumentierte er folgendermaßen: Falls ein leichter Körper langsamer fällt als ein schwerer, so müsste er den schweren bremsen, wenn man die beiden zusammenkoppeln würde. Der Gesamtkörper wäre allerdings noch schwerer als der schwerere Einzelkörper und müsste eigentlich schneller fallen als jeder einzelne. Aus diesem Widerspruch schloss Galilei, dass alle Körper im Vakuum gleich schnell fallen.

### **Versuch: Fall verschiedener Körper**

Aus etwa 2 m Höhe werden jeweils 2 Körper gleichzeitig fallen gelassen. Die Ankunftszeitpunkte werden durch die Aufschläge registriert.

- Eine Eisen- und eine Styroporkugel von etwa 5 cm Durchmesser kommen gleichzeitig am Boden an.

- Wie zu erwarten kommt die Stahlkugel eher an als ein Blatt Papier.
- Knüllt man das Blatt Papier zu einer Kugel, so fällt diese unmerklich langsamer als die Stahlkugel.

Wenn man den freien Fall detaillierter studieren und z.B. die Frage beantworten will, wie lange es dauert, bis ein Körper eine bestimmte Höhe durchfallen hat, muss man kurze Zeiten genau messen können. Das war Galilei jedoch nicht möglich. Ihm standen nur sog. Wasseruhren zur Verfügung, die auf dem Prinzip der Sanduhren arbeiten. Hierbei wurde das aus einem Behälter in einer gewissen Zeitspanne austretende Wasser gewogen, die Zeitmessung wurde also auf einen Wägevorgang zurückgeführt. Sicher-

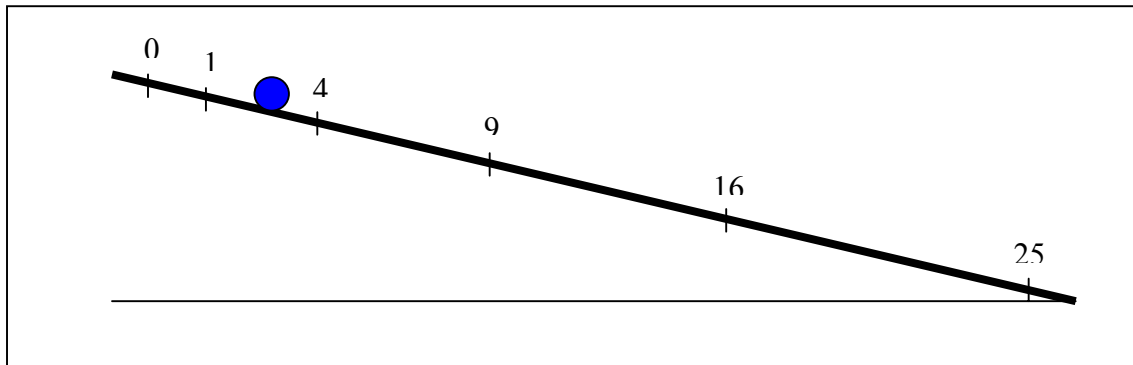


Abb. 8.4: Rollende Kugel auf einer schiefen Ebene. Die Kugel startet an der Stelle 0. Man findet, dass sie die Strecken zwischen zwei Marken in gleichen Zeiten zurücklegt.

lich konnte man damit bis auf Sekunden genau messen, aber nicht wesentlich genauer. Das reichte nicht aus für das genaue Studium des freien Falls, da ein aus der Ruhe heraus frei fallender Körper bereits innerhalb der 1. Sekunde eine Strecke von 5 m zurücklegt.

Galilei hat nun mit einem genialen Trick den freien Fall "verlangsamt", um ihn quantitativ untersuchen zu können. Das geschah an der "schiefen Ebene": Anstatt eine Kugel senkrecht fallen zu lassen, ließ er sie eine schiefe Ebene hinunter rollen. Je nach der Neigung der Ebene konnte er die Geschwindigkeit der Kugel größer oder kleiner machen. Auf diese Weise erhielt er sein berühmtes Fallgesetz:

Legt die Kugel in der Zeit  $t$  eine Strecke der Länge  $s$  zurück, so ergibt sich zwischen  $s$  und  $t$  ein quadratischer Zusammenhang:

$$s = k \cdot t^2,$$

worin  $k$  eine Konstante ist, die von der Neigung der Ebene abhängt. Entscheidend ist die quadratische Abhängigkeit von der Zeit.

#### **Versuch: Bewegung auf der schiefen Ebene**

Das Experiment wird an einer schiefen Ebene, wie sie in Abb. 8.4 skizziert ist, durchgeführt. An den dort in Dezimetern angegebenen Stellen werden kleine Reiter an der Ebene befestigt, so dass die Kugel beim Passieren der jeweiligen Stellen einen "Klack" erzeugt. Ein Metronom wird so eingestellt, dass seine Zeitzeichen gleichzeitig mit den "Klacks" zu hören sind.

#### **Versuch: Fallen alle Körper wirklich gleich schnell?**

In Abbildung 8.5 ist der Aufbau zum Experiment "Fliegenklatsche" schematisch dargestellt. Auf einer schiefen Ebene, die an einem Ende drehbar gelagert ist, ist in der Nähe

des anderen Endes ein Auffangbecher montiert. Legt man eine Kugel "an die richtige Stelle" daneben, so fällt sie nach Entfernen des Stützstabes in den Becher.

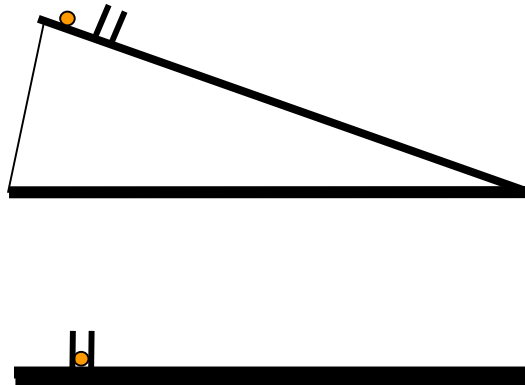


Abb. 8.5: Beginn und Ende des Experiments mit der "Fliegenklatsche"

Die Erklärung dieses scheinbar paradoxen Phänomens wurde den Hörern als Aufgabe gestellt.

### 8.3 Indirekter Nachweis von Gravitationswellen

Auf der Erde machen wir täglich die Erfahrung, dass jede Bewegung irgendwann zum Stillstand kommt. In den meisten Fällen sind hierfür Reibungsvorgänge verantwortlich. Die Bewegungen am Himmel scheinen von dieser Regel ausgenommen zu sein. Ist das wirklich wahr, oder gibt es vielleicht auch Reibungsvorgänge bei der Planetenbewegung?

Mit dieser Frage machen wir einen Sprung ins 20. Jahrhundert. Denn Reibung im gewöhnlichen Sinn gibt es für die Planetenbewegung nicht, da sich die Planeten im luftleeren Raum bewegen. Sie könnten allerdings durch Stöße mit Staub bzw. kleinen Brocken auf ihrer Bahn verlangsamt werden. Das soll uns hier nicht interessieren.

Ein anderes, viel grundlegenderes Phänomen, das aus der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) Einsteins folgt, könnte ebenfalls zur Verlangsamung der Planetenbewegungen führen: Die Abstrahlung von Gravitationswellen. Um dieses Phänomen zu erläutern, wollen wir uns kurz an die Erzeugung von Röntgenstrahlen durch Abbremsung bzw. Ablenkung von schnellen Elektronen erinnern: Elektronen sind elektrisch geladene Teilchen. Wenn sie in ein elektrisches Feld geraten, können sie in ihrer Richtung abgelenkt werden und dabei elektromagnetische Strahlung verschiedener Frequenz, u.a. auch Röntgenstrahlen aussenden.

Körper wie die Planeten oder unsere Sonne sind ungeladen, werden also in einem elektrischen Feld nicht abgelenkt und werden deshalb auch keine elektromagnetische Strahlung ausenden. Zwischen ihnen wirkt die Gravitationskraft. Sie führt dazu, dass ein Körper der Masse  $m_1$  in der Umgebung eines zweiten Körpers der Masse  $m_2$  von seiner geraden Bahn abgelenkt wird. Wird er dabei auch etwas abstrahlen, eine "Gravitationsstrahlung" in Analogie zur elektromagnetischen Strahlung? Einsteins ART sagt das voraus, aber keiner hat diese Strahlung bis jetzt direkt nachweisen können. Indirekt konnte die Gravitationsstrahlung allerdings schon beobachtet werden: In einem Doppelsternsystem, in dem zwei Sterne umeinander kreisen, sollte eine beträchtliche Energie in Form dieser Strahlung verloren gehen, wenn die beiden Sterne sehr schwer

sind und sich sehr nahe kommen. Dadurch sollte die Umlaufszeit langsam abnehmen, was man in der Tat beobachtet hat.

Körper wie die Planeten oder unsere Sonne sind ungeladen, werden also in einem elektrischen Feld nicht abgelenkt und werden deshalb auch keine elektromagnetische Strahlung ausenden. Zwischen ihnen wirkt die Gravitationskraft. Sie führt dazu, dass ein Körper der Masse  $m_1$  in der Umgebung eines zweiten Körpers der Masse  $m_2$  von seiner geraden Bahn abgelenkt wird. Wird er dabei auch etwas abstrahlen, eine "Gravitationsstrahlung" in Analogie zur elektromagnetischen Strahlung? Einsteins ART sagt das voraus, aber keiner hat diese Strahlung bis jetzt direkt nachweisen können. Indirekt konnte die Gravitationsstrahlung allerdings schon beobachtet werden: In einem Doppelsternsystem, in dem zwei Sterne umeinander kreisen, sollte eine beträchtliche Energie in Form dieser Strahlung verloren gehen, wenn die beiden Sterne sehr schwer sind und sich sehr nahe kommen. Dadurch sollte die Umlaufszeit langsam abnehmen, was man in der Tat beobachtet hat.

Im Weltall gibt es Sterne, Pulsare genannt, die – wie Leuchttürme – periodisch "Lichtblitze" in die Richtung eines irdischen Beobachters abstrahlen. Die Periode der Blitze liegt zwischen einigen Sekunden und einigen Millisekunden und ist für jeden Pulsar charakteristisch. Pulsare sind kompakte Sterne von etwa einer Sonnenmasse,

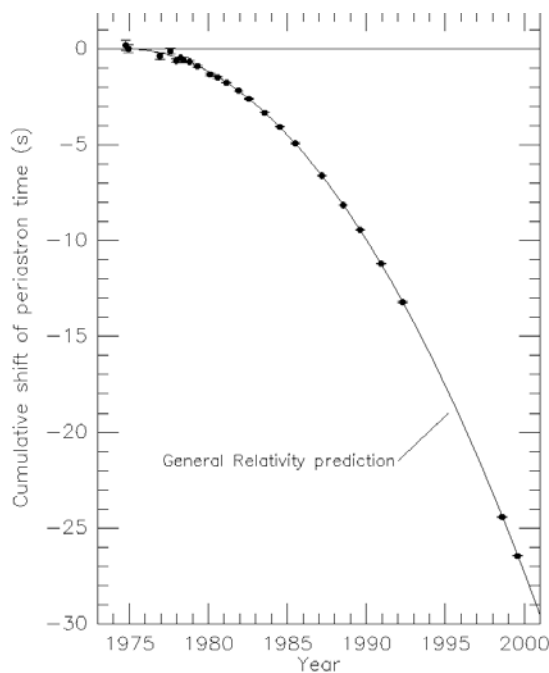


Abb. 8.6: Kumulierte Abnahme der Umlaufdauer im Doppelsternsystem PSR 1913+16 im Vergleich mit der Voraussage der ART (durchgezogene Linie)

aber einem Radius von nur etwa 10 km (der Sonnenradius beträgt 1 Mio. km!). Es handelt sich hierbei um sog. Neutronensterne. Aus der genauen Analyse der Zeitabstände der Lichtblitze eines bestimmten Pulsars unserer Galaxie mit der Bezeichnung PSR 1913+16 schlossen die beiden Astrophysiker Hulse und Taylor, dass sich dieser Pulsar im Abstand von ca. 1 Mio. km um einen anderen unsichtbaren Stern von ebenfalls etwa einer Sonnenmasse bewegt. Genau genommen bewegen sich beide Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt. Dieses Doppelsternsystem sollte nach Einstein soviel Energie in Form von Gravitationswellen abstrahlen, dass eine Abnahme der Umlaufszeit nachweisbar sein sollte. Die genaue Beobachtung der Lichtblitze des Pulsars ergab eine Verlangsamung der Umlaufszeit in Übereinstimmung mit Einsteins

Theorie (siehe Abb. 8.6). Hulse und Taylor erhielten hierfür im Jahre 1993 den Nobelpreis für Physik. Heute baut man an mehreren Stellen auf der Erde Detektoren, um die Gravitationsstrahlung aus dem Weltall direkt nachzuweisen.

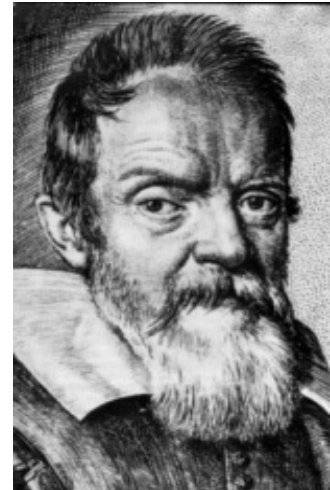
#### 8.4 Biographie: Galileo Galilei (1564 – 1642)

Galilei wurde als ältester Sohn einer Florentiner Patrizierfamilie in Pisa geboren. Der Vater hatte in Venedig Musik studiert und anschließend musikalische Theorien mit Hilfe von Experimenten zu Saitenschwingungen untersucht. Später arbeitete er als Musiklehrer und war als guter Lautenspieler bekannt. Der Familie sagte man nach, dass sie nicht besonders reich gewesen sei, aber ein hohes Maß an Kultur besessen hätte.

Seine schulische Laufbahn begann Galileo zunächst in Pisa und dann in Florenz bei Privatlehrern, um dann später seine Erziehung in einem Kloster fortzusetzen. Das klösterliche Leben gefiel dem jungen Galilei so gut, dass er Novize wurde und in den Orden eintreten wollte. Doch das gefiel dem Vater überhaupt nicht, denn der hatte bereits beschlossen, dass sein Sohn Mediziner werden sollte. Also schickte er ihn 1581 zurück nach Pisa, wo er sich an der dortigen Universität für ein medizinisches Studium einschrieb. Die Idee des Vaters scheint Galileo jedoch nie richtig begeistert zu haben, so dass er die medizinischen Studien nicht besonders ernsthaft betrieb und stattdessen Vorlesungen in seinen wirklichen Interessensgebieten, Mathematik und Naturphilosophie, besuchte. Nachdem einer seiner Lehrer Galileos Vater geraten hatte, seinem Sohn ein Studium seiner Wahl zu erlauben, willigte der schließlich ein und Galileo konnte sich endlich voll den Werken von Euklid und Archimedes widmen. Er blieb zwar bis 1585 weiterhin als Medizinstudent eingeschrieben, brach dann jedoch dieses Studium ohne ein Examen ab.

Nun begann Galilei Mathematik zu lehren, zunächst in Florenz und Siena. Im Jahre 1586 schrieb er sein erstes wissenschaftliches Buch (*La balancetta*), in dem er die Methode des Archimedes zur Bestimmung spezifischer Gewichte mit einer Waage erläuterte. Auf diese Weise verschaffte er sich einen gewissen Ruf bei den Fachgelehrten, so dass er im Jahre 1589 für drei Jahre auf den vakanten Lehrstuhl für Mathematik der Universität Pisa berufen wurde. In diesen Jahren beschäftigte sich Galilei mit dem heliozentrischen Weltsystem, das etwa 50 Jahre früher von Kopernikus vorgeschlagen worden war. Außerdem galt sein Interesse der Frage, wie man die Mathematik zur Untersuchung und Beschreibung von Naturerscheinungen einsetzen könnte. Im Gegensatz zu Kepler sollte ihm die Mathematik nicht dazu dienen, um Harmonien in der Schöpfung zu entdecken, sondern um konkrete Probleme quantitativ und schlüssig zu lösen.

Als 1592 seine Anstellung nicht verlängert wurde, hatte er erhebliche finanzielle Probleme, da er nach dem Tode seines Vaters (1591) als Ältester für die Familie sorgen musste. Doch schon bald erhielt er durch Fürsprache eine Anstellung in Padua, wo er die folgenden 18 Jahre verbrachte (1592 – 1610). In hohem Alter schrieb er an einen Freund, dass dies die besten Jahre seines Lebens gewesen seien. Padua war die Universität der unabhängigen und reichen Republik Venedig und an dieser alten und



berühmten Bildungsstätte fand Galilei trotz eines zunächst mageren Gehalts die idealen Bedingungen für seine Arbeit. Seine Hauptaufgabe war, Medizinstudenten in Euklidischer Geometrie und geozentrischer Astronomie zu unterrichten. Er selbst war zu dieser Zeit bereits ein Anhänger der kopernikanischen Lehre. Schon 1598 bekannte er sich in einem persönlichen Brief an Johannes Kepler als Kopernikaner und im Jahre 1604 argumentierte er nach dem Auftauchen einer Supernova in öffentlichen Vorträgen gegen die auf Aristoteles zurückgehende geozentrische Sichtweise der Astronomie.

In Padua begann auch die lang andauernde Beziehung zu der Venezianerin Maria Gamba, aus der 3 Kinder hervorgingen: die beiden Töchter Virginia und Livia und der Sohn Vincenzo. Dass Galileo nicht heiratete, mag wohl daran gelegen haben, dass er seine finanzielle Situation für eine Ehe als nicht gut genug befand.

In den Jahren 1602 – 1604 führte er seine Arbeiten zur Theorie der Bewegung weiter und kam durch Experimente an schiefen Ebenen auf die Gesetzmäßigkeiten bei fallenden Körpern, die er jedoch erst viele Jahre später veröffentlichte.

Das Jahr 1609 wurde schicksalhaft für Galileis Leben. Nachdem er von der Erfindung des Fernrohrs in Holland gehört hatte, baute er selbst eine Reihe von Instrumenten, deren optische Eigenschaften deutlich besser waren als die der holländischen Teleskope. Bald schon unterrichtete Galilei den Dogen und den Senat von Venedig über die militärische Bedeutung eines solchen Instruments. Die Spitzen der Republik waren sehr angetan, Galilei erhielt eine Anstellung auf Lebenszeit und ein wesentlich besseres Gehalt.

Bald schon richtete er sein Teleskop auf den Himmel und sah aufregende und merkwürdige Dinge, die er in dem kleinen Büchlein "Siderius Nuntius" oder "Avviso astronomico" – zu Deutsch "Astronomische Nachricht" - veröffentlichte: die Jupitermonde, die stellare Beschaffenheit der Milchstraße, die Phasen der Venus, die Sonnenflecken, die Mondgebirge und andere "Wunder des Himmels".

Obwohl sich Galilei in Padua wohlfühlte, zog es ihn nach Florenz zurück. Die genauen Gründe hierfür sind nicht bekannt, in Frage kommen neben Heimweh und familiären Gründen der Wunsch, seine Lehrverpflichtungen loszuwerden, und die Tatsache, dass die Behörden in Venedig sein Gehalt eingefroren hatten. Als ihm der Großherzog der Toscana eine Stellung mit ausgezeichneten Bedingungen anbot, nahm Galilei an, auch wenn ihm Freunde mit der Begründung abrieten, dass dort die Autorität der Jesuiten am meisten zähle. So ließ Galilei in Padua nicht nur seinen Lehrstuhl, sondern auch Marina Gamba mit ihrem Sohn zurück, seine beiden Töchter schickte er einige Zeit später ins Kloster. Dies ist eine der dunklen Seiten im Leben Galileis, doch er glaubte, dass seine Töchter nicht heiraten sollten, da sie unehelich geboren waren.

Galilei wurde zum Chefmathematiker – ohne Lehrverpflichtungen – an der Universität Pisa und zum Mathematiker und Philosophen des Großherzogs der Toskana berufen. Als er im Jahre 1611 nach Rom reiste, wurde er als berühmter Mann willkommen geheißen und in die vor wenigen Jahren gegründete "Accademia dei Lincei" aufgenommen. Dies betrachtete Galilei als besondere Ehre, so dass er sich fortan "Galileo Galilei Linceo" nannte.

Seine astronomischen Beobachtungen hatten Galilei von der Richtigkeit der kopernikanischen Lehre überzeugt, auch wenn sich aus ihnen keine eindeutigen Beweise ergaben. So versuchte er als überzeugter Katholik, der es mit der Religion Ernst nahm, auch die Kirche von der "neuen Wissenschaft" zu überzeugen. Zwar gelang es ihm, den kirchlichen Astronomen die Richtigkeit seiner Himmelsbeob-



achtungen zu zeigen, doch in Bezug auf die kopernikanische Lehre, die bislang noch nicht von der Kirche verurteilt war, blieb ein gewisses Unbehagen. Galilei beurteilte die in Rom erzielten Ergebnisse jedoch positiv und trat nach seiner Rückkehr in Florenz öffentlich für die Lehre des Kopernikus ein, was ihn zum Ziel heftiger Angriffe machte. Er versuchte sich zu rechtfertigen, indem er die Stellung von Religion und Wissenschaft gegeneinander abgrenzte. Für ihm beeinträchtigte die kopernikanische Lehre nicht die Wahrheit der Heiligen Schrift, sondern nur deren Auslegungen, die jedoch Menschenwerk und nicht göttlichen Ursprungs sind.

Dieser Standpunkt fand allerdings nicht die Billigung der Kirche, die Galilei 1616 nach Rom zitierte. Dort wurde er vom Heiligen Offizium belehrt, dass die kopernikanische Auffassung verurteilt worden sei und dass er mit schweren Strafen zu rechnen habe, wenn er sie als Faktum propagiere. Allerdings dürfe er sie als mathematische Hypothese lehren.

In Florenz widmete er sich dann verstärkt wissenschaftlichen Fragen und gab zunächst den Versuch auf, die Kirche irgendwie zu beeinflussen. Als im Jahre 1623 ein Freund Galileis zum neuen Papst gewählt wurde, machte sich Galilei an ein neues Werk, den "Dialogo di due massimi sistemi – Dialog über die beiden hauptsächlichen Welt-systeme", zu dessen Fertigstellung er 6 Jahre benötigte. Um die Druckerlaubnis der Kirche zu erhalten, musste Galilei einige Änderungen zugestehen. Außerdem wurden ein Vor- und ein Nachwort angefügt, in dem Galilei ausführt, dass er das kopernikanische System lediglich als Hypothese darstelle, von der er sehr wohl wisse, dass sie falsch sei. Der Zweck des Buches läge u.a. darin, die Kirche über alle kopernikanischen Argumente zu informieren, damit sie das kopernikanische System nicht aus Unwissenheit verwerfe.

Galilei hatte geglaubt, sich durch solche Lippenbekenntnisse vor den drohenden Gefahren schützen zu können, doch 1633 wurde er im Alter von 70 Jahren wiederum nach Rom zitiert. In einem mehrmonatigen Prozess wurde er schließlich dazu verurteilt, seiner Lehre abzuschwören und auf Knien zu erklären, dass er alle seine Irrtümer verfluche. Die Verurteilung war nicht nur für Galilei, sondern auch für die Kirche ein schwerer Schlag. Sie hatte unter Berufung auf die Autorität der Heiligen Schrift Auffassungen verurteilt, die sich als richtig beweisen ließen. Dass die Kirche dadurch in der Folgezeit an Autorität einbüßte, ist wohl unstrittig. Dennoch dauerte es mehr als 350 Jahre, bis Papst Johannes Paul II. Galilei im Jahre 1992 rehabilitierte. Heute vertritt die Kirche in der Frage der Beziehung zwischen Religion und Wissenschaft eine Auffassung, die der Galileis außerordentlich nahe kommt.

Obwohl Galilei über seine Verurteilung entsetzt war, versuchte er nicht, in ein protestantisches Land zu entkommen, sondern unterwarf sich dem Urteilsspruch und kehrte schließlich nach Florenz zurück, wo er in seinem Landhaus in Arcetri unter Hausarrest gestellt wurde. Er nahm seine wissenschaftlichen Untersuchungen wieder auf und begann mit der Niederschrift seines Meisterwerks: "Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorno a due Nuove Scienze attenenti a la Mecanica e i Movimenti locali – Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend". Das Werk ist teils in Italienisch und teils in Latein geschrieben und wurde nach der Fertigstellung 1636 aus Italien herausgeschmuggelt und in Amsterdam veröffentlicht. Im dritten und vierten Kapitel geht es um die geradlinige Bewegung mit konstanter Beschleunigung und die

Wurfbewegungen, einschließlich der Wirkungen des durch das Medium bedingten Widerstandes.

Im Zusammenhang mit diesem Buch sind zwei weitere Schicksalsschläge zu nennen, die Galilei heimsuchten. 1634 verstarb seine von ihm sehr geliebte Tochter Suor Maria Celeste, die Galilei selbst als eine Frau mit ungewöhnlichen geistige Gaben und einer seltenen Herzengüte beschrieb. Kurz nach der Fertigstellung der Discorsi erblindete Galilei infolge eines grünen Stars. Doch auch diese Schicksalsschläge konnten die Kirche nicht dazu bewegen, ihre starre Haltung aufzugeben und Galilei die Freiheit zu schenken. Man gestattete immerhin, dass ein außerordentlich begabter junger Mann, Vincenzo Viviani, als Galileis Schüler, Gefährte und Sekretär in Arcetri leben durfte. Viviani wurde Galileis Biograph und später auch sein Nachfolger als erster Mathematiker am Hofe des Großherzogs der Toskana. Bis zu seinem Tode im Januar 1642 liebte es Galilei, mit Viviani und einem zweiten sehr begabten jungen Mann – Evangelista Torricelli, dem Erfinder des Barometers, wissenschaftliche Gespräche zu führen.

Was hat nun Galilei zu einer Ausnahmeerscheinung unter den Wissenschaftlern seiner Zeit gemacht. Waren es seine physikalischen Arbeiten oder seine astronomischen Entdeckungen? Noch höher als diese beiden Leistungen ist wohl die Methode und der Geist der Auseinandersetzung mit der Natur zu bewerten. Die entscheidenden Merkmale seiner Beschäftigung mit der Natur waren die Unvoreingenommenheit seiner Beobachtungen, die Scharfsinnigkeit seiner Schlussfolgerungen und seine unersättliche Neugier hinsichtlich aller Naturerscheinungen. Es wird z.B. berichtet, dass Galilei nur sehr wenige Bücher besessen habe, weil er lieber die Natur anschaute als in Büchern zu lesen.