

Das Rätsel Dunkle Materie

Wolfgang
Kapferer

Auf der
Suche
nach dem
Unsichtbaren

EBOOK INSIDE

 Springer

Das Rätsel Dunkle Materie

Wolfgang Kapferer

Das Rätsel Dunkle Materie

Auf der Suche nach dem Unsichtbaren

 Springer

Wolfgang Kapferer
Telfs
Österreich

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-54939-1 ISBN 978-3-662-54940-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54940-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Lisa Edelhäuser
Einbandabbildung: © Wolfgang Kapferer

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Das Konzept „Dunkle Materie“ hat nunmehr eine zweieinhalb Jahrhunderte andauernde, spannende Geschichte hinter sich. Von anfänglich postulierten dunklen Sternen, um die eigenartigen Bewegungen von einigen Gestirnen am Firmament zu verstehen, bis hin zu hypothetischen Planeten im äußeren Bereich unseres Sonnensystems, immer wieder konnte man Materie ihrer Dunkelheit entreißen und mit fortschreitender Beobachtungstechnik ihre wahre Natur erkennen.

Doch zu Beginn des 20. Jahrhunderts stellte man fest, dass eine große Kluft zwischen den mittels verschiedener Methoden abgeleiteten Massen großräumiger Strukturen im Kosmos existiert. Je größer die Strukturen, desto größer der Unterschied zwischen direkt beobachteter und aus der Dynamik der Objekte abgeleiteter Masse. Das erfolgreiche Konzept – Dunkle Materie – war und ist ein Ansatz diesen Widerspruch aufzulösen. Dabei wird ein allumfassender, rein gravitativ wechselwirkender Stoff im Universum gefordert, der ansonsten – zumindest bisher – vollkommen unsichtbar ist. Dieses Konzept einer verborgenen, sich uns nur indirekt zeigenden, Materie war und ist sehr erfolgreich, wie man zum Beispiel an der Theorie der Entstehung und Entwicklung großräumiger Strukturen im Kosmos sehr gut nachvollziehen kann.

Allerdings erscheint dem Laien dieses Konzept oft sprunghaft und willkürlich. Das Ziel dieses Buches ist es zum einen, die großen historischen Erfolge des Konzeptes Dunkler Materie in der Astronomie vorzustellen. Es werden die bedeutendsten Schlüsselbeobachtungen dieses Forschungsbereichs und deren Interpretation präsentiert. Diese zahlreichen Beobachtungen mündeten in ein Weltbild, in dem unser Universum hauptsächlich von einer uns noch unbekanntem Materieform dominiert wird. Zum anderen werden aber auch potentielle Kandidaten für Dunkle Materie aufgezeigt, und der Leser im Rahmen dieser hochaktuellen Forschung mit den großen Experimenten zu deren Suche und den bisher aussichtsreichsten Ergebnissen vertraut gemacht.

Die Suche nach der Natur der Dunklen Materie gleicht einer Gralssuche, versetzt in die moderne Zeit der Naturwissenschaften. Diesem Gleichnis ist das Buchcover

gewidmet. Es zeigt die „künstlerische“ Visualisierung einer simulierten Galaxienrotationskurve, die einem Kelch ähnelt, wenn man sie gespiegelt darstellt und entsprechend rotiert. Sie werden im Laufe des Buches erfahren, dass Rotationskurven von Galaxien zu den zentralen Schlüsselbeobachtungen für das Phänomen Dunkle Materie zählen und wie aufwendig die Suche nach einer befriedigenden Antwort auf die Frage nach der Natur dieser Materie betrieben wird. Ich hoffe Sie finden diese Suche ebenso spannend wie ich.

Telfs, Juni 2017

Wolfgang Kapferer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Von der Kunst, einen Stern zu wiegen	5
2.1	Massenbestimmung im kosmischen Vorgarten – das Sonnensystem .	5
2.2	Massenbestimmungen in der Galaxis	12
2.3	Dein Typ verrät dein Gewicht	17
	Literatur	27
3	Die ersten Anzeichen eines großen Problems	29
3.1	Frühe Anzeichen in der Milchstraße	30
3.2	Frühe Anzeichen in Galaxienhaufen	35
	Literatur	47
4	Ein Problem manifestiert sich	49
4.1	Rotationskurven von Spiralgalaxien	50
4.2	Ein Ausflug in die Röntgenastronomie	54
4.3	Der Gravitationslinseneffekt	62
	Literatur	66
5	Wie Dunkle Materie unser Modell der Strukturentstehung im Universum dominiert	67
5.1	Ein kleiner Unterschied mit maximalen Folgen – die kosmische Hintergrundstrahlung	68
5.2	Kartographieren mit Licht	76
5.3	Die verschiedenen „Body-Mass-Indizes“ des Universums	82
5.4	Ein Universum im Rechner	86
5.5	Geht es auch ohne Dunkle Materie?	98
	Literatur	102
6	Der Beginn einer großen Suche	105
6.1	Ein physikalischer Steckbrief der Dunklen Materie	105
6.2	Die Suche nach den MACHOs	107

6.3	Verwaiste Sterne in den Tiefen des Alls	111
6.4	Die Suche im Standardmodell der Teilchenphysik	113
6.5	Dunkle Materie über das Standardmodell hinaus	125
	Literatur	130
7	Was verbirgt sich unter der Hadeskappe	131
7.1	Die indirekte Suche nach Dunkler Materie	131
7.2	Die direkte Suche nach Dunkler Materie	139
	Literatur	150
8	Schlussbemerkungen	151
	Literatur	153
	Stichwortverzeichnis	155

Kapitel 1

Einleitung

Wenn Sie sich in *der* Informationsquelle unserer Zeit, dem Internet, auf die Suche nach Antworten auf die Frage „Was ist Dunkle Materie?“ begeben, dann werden Sie quantitativ bestens bedient. Die einfache Frage „**What is dark matter?**“ (die englische Sprache liefert hier wie so oft deutlich mehr Antworten) in eine weitverbreitete Internet-Suchmaschine eingegeben bombardiert Sie blitzschnell mit ungefähr 20 Millionen Treffern. Ich gebe zu, nicht alle gefundenen Seiten gelesen zu haben, aber schon nach kurzer Durchsicht der Ergebnisliste lässt sich erahnen, dass es sich bei Dunkler Materie wohl um etwas

- Unsichtbares,
- Mysteriöses,
- Dominierendes,
- zu Glaubendes,
- ...

handelt. Allesamt sind dies Attribute, die sich mit den Methoden der Naturwissenschaft nur schwer vereinen lassen. Schnell erschließt sich, dass fast alle großen Strukturen im Universum, wie Galaxien, Galaxiengruppen und Galaxienhaufen, vorwiegend aus Dunkler Materie bestehen. Und man erfährt in etlichen Abhandlungen, dass man noch keine Dunkle Materie direkt auf der Erde oder durch Raumsonden innerhalb unseres Sonnensystems gefunden hat. Man liest, dass es sich um eine Form von Materie handeln muss, die der uns vertrauten Materie kaum ähnelt. Sie ist so schwach wechselwirkend, dass sie alles Stoffliche in unserer Welt durchdringt, fast ohne ein Anzeichen von Wechselwirkung mit den uns wohlbekannten Elementen. Das Adverb *fast* im letzten Nebensatz ist dabei von besonderer Bedeutung. Denn, um Dunkle Materie in Experimenten direkt zu detektieren, braucht man irgendeine Art von Wechselwirkung mit den Apparaturen der Teilchenphysiker, Apparaturen aus der uns vertrauten Art von Materie. Zumindest ist dies die Hoffnung, die die Wissenschaftler aktuell in vielen Experimenten hegen.

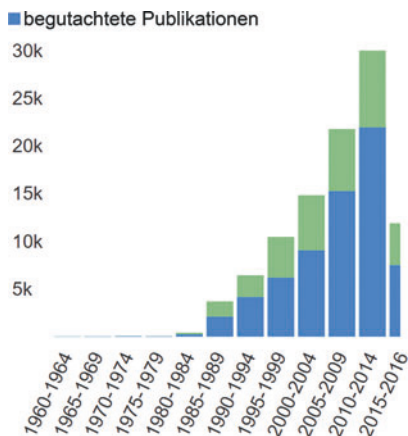
Die bis dato erfolgreichste Theorie der Strukturbildung im Universum besagt, dass die gesamte Materie unseres Universums aus etwa 85 % dieses geheimnisumwitterten Stoffes – Dunkle Materie – besteht. Und es soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass es einen noch weitaus bedeutsameren Spieler auf dem Parkett der Kosmologie gibt: die Dunkle Energie, die das Universum auf großen Skalen sogar noch stärker dominieren soll. Da dieses Buch aber das Phänomen Dunkle Materie behandelt, wird die Dunkle Energie nur kurz gestreift werden.

Eine etwas intensivere Recherche im Internet lässt den Interessierten sehr bald erkennen, dass der Terminus Dunkle Materie schon in den 1930er- und 1940er-Jahren Einzug in die Literatur der Astrophysik gehalten hat. Macht man sich die Mühe, mittels einer Suchmaschine für astrophysikalische Literatur (*NASA's Astrophysics Data System Bibliographic Services*) die Anzahl aller Publikationen, in denen der Begriff *Dunkle Materie – Dark Matter* – im Text vorkommt, zu suchen, so bekommt man als Resultat eine Suchliste mit der „astronomischen“ Anzahl von insgesamt fast 100.000 Publikationen. Davon sind ungefähr 67.000 begutachtete Fachpublikationen ([Abb. 1.1](#)). Doch noch interessanter als die schiere Anzahl an Publikationen ist der explosionsartige Anstieg an Veröffentlichungen über Dunkle Materie mit Beginn der 1980er-Jahre. Zur Veranschaulichung: In den Jahren zwischen 1930 und 1979 gab es *insgesamt nur 428* Publikationen, in denen der Begriff Dunkle Materie vorkommt.

Leider hat man trotz enormer Anstrengungen das Ziel – den eindeutigen und direkten Nachweis von Dunkler Materie – noch nicht erreicht. In keiner einzigen astrophysikalischen Ausstellung lässt sich auch nur ein einziger Klumpen dieser mysteriösen Materie finden. Und es scheint, als hätte sich seit dem Aufkommen des Terminus Dunkle Materie in der astrophysikalischen Literatur die Anzahl an Ideen und Lösungsansätze für dieses Problem seither ebenso rasant gesteigert, wie die vermutete Menge an Dunkler Materie im Universum.

Vielleicht verhält es sich mit der Dunklen Materie wie einst mit dem *Äther* im ausgehenden 17. Jahrhundert. Er wurde in den damaligen Modellen als Medium

Abb. 1.1 Anzahl Fachpublikationen, die den Begriff *Dunkle Materie (Dark Matter)* beinhalten. Im Zeitraum 1960 bis Mitte 2016, dargestellt in Einheiten von 1000. Quelle: *NASA's Astrophysics Data System Bibliographic Services*



für die Ausbreitung des Lichts und der Gravitation postuliert und hernach über zwei Jahrhunderte lang vergeblich von den Physikern gesucht. Nichts Geringeres als die erfolgreichen Theorien von Einstein, Maxwell und Schrödinger markieren das Ende dieser langen Odyssee, die die Vorgänge in unserer Welt gänzlich ohne *Äther* beschreiben.

Ziel dieses Buches ist es, dem Leser das Phänomen der Dunklen Materie verständlich näherzubringen. Dabei werden die grundlegenden Modelle der Astrophysik eingeführt, die zu der Schlussfolgerung führen, dass Dunkle Materie die dominierende Materie im Universum ist. Das Buch versucht dabei im Groben die folgenden Fragen zu beantworten:

- Welche wesentlichen Entwicklungen im Bereich Massenbestimmung astrophysikalischer Objekte gingen der Ära der Dunklen Materie voran? Und vor allem, wie funktioniert Massenbestimmung in der Astronomie?
- Welche Beobachtungen im Zusammenspiel welcher Modelle führen zur Idee der Dunklen Materie?
- Welche Lösungsansätze ohne Dunkle Materie gab es und warum wurden sie verworfen?
- Mit welchen Methoden wird aktuell nach Dunkler Materie gesucht?
- Gibt es Alternativen zum Konzept der Dunklen Materie?

Ein besonderer Fokus liegt in diesem Buch auf den Methoden der Astrophysik. Bei meiner Recherche fand ich es immer wieder erstaunlich zu sehen, wie in so manch populärwissenschaftlichem Buch mit nur wenigen Zeilen die Struktur- bildung im Universum, Spekulationen über Paralleluniversen oder die komplexen physikalischen Modelle der ersten Sekunden nach dem Urknall abgehandelt werden. Ohne eine fundierte physikalische Vorbildung ist dabei die Gefahr sehr groß, ein mystisch-verklärtes Bild der modernen Physik/Astrophysik zu bekommen. Dies gilt es zu verhindern, denn, was einst Marie von Ebner-Eschenbach (österreichische Schriftstellerin 1830–1916) schrieb, hat nach wie vor Bedeutung:

Wer nichts weiß, muss alles glauben.

Kapitel 2

Von der Kunst, einen Stern zu wiegen

Der Begriff *Dunkle Materie* deutet bereits an, worum es geht: Materie, die weder für das bloße Auge noch für die empfindlichen Instrumente der Astronomen sichtbar ist. Materie, die im wahrsten Sinne des Wortes „dunkel“ ist.

Vor allem wenn man sich vergegenwärtigt, dass den Himmelforschern bis vor nicht allzu langer Zeit nur der für das menschliche Auge sichtbare Bereich des Lichts zugänglich war, erscheint nicht verwunderlich, dass Objekte des Universums noch im Dunkeln lagen. Doch auch seit uns immer größere Bereiche des Lichtspektrums als Informationsquelle zur Verfügung stehen, hat sich die Situation nicht verbessert, sondern nur verschlimmert.

Die Frage, die sich an dieser Stelle naturgemäß aufdrängt, ist: Was veranlasst Astrophysiker dazu, mehr Materie zu postulieren, als beobachtbar ist? Um diese Frage beantworten zu können, ist zunächst ein Exkurs in die Geschichte der Naturwissenschaften nötig, der den Begriff *Masse*, wie er im Rahmen der Modelle der Astrophysik und der Physik eingesetzt wird, erläutert, um das Konzept der Dunklen Materie besser zu verstehen.

2.1 Massenbestimmung im kosmischen Vorgarten – das Sonnensystem

Das Konzept der Masse als Maß für die gravitative Anziehung von Körpern hielt geschichtlich zuerst in der Astrophysik Einzug: bei der Erforschung und mathematischen Modellierung der Umlaufbahnen unserer Planeten. Dies ist ein Beispiel dafür, wie das astrophysikalische Experiment, die Beobachtung, zusammen mit der theoretischen Modellierung zu Modellen führt, die uns zu Vorhersagen über den zukünftigen Zustand von astronomischen Systemen befähigt. Im konkreten Fall also über die Bahnen der Monde und Planeten unseres Sonnensystems.

Diese spannende Geschichte begann in der Hochblüte der Renaissance. Kunst und Kultur erlebten eine Revolution und setzten neue Gedanken in die Welt, die

für Jahrhunderte in ihrer Wirkung nachklingen sollten. In dieser Zeit wurde unser Wissensstand über die Abläufe im Kosmos neu ausgerichtet. Das Zusammenspiel von detaillierten Beobachtungen und deren Auswertungen anhand theoretisch-mathematischer Modelle ermöglichte es, die Planetenbahnen zu berechnen, ihre Positionen am Firmament vorherzusagen und sie somit aus der Welt der Mythen in die wissenschaftlich rationale Welt der Aufklärung zu überführen. Und wie fast immer in der Wissenschaftsgeschichte war es kein einfacher, direkter Weg zu den ersten brauchbaren Modellen der Planetenbewegungen, es war vielmehr ein verschlungener Pfad von Versuch und Irrtum, so kompliziert wie die Planetenbahnen am nächtlichen Himmel selbst.

In unserer Geschichte stehen drei große Naturforscher und deren Werk im Mittelpunkt unseres Interesses: *Tycho Brahe*, *Johannes Kepler* und *Sir Isaac Newton*. Natürlich ist dies eine verkürzte Betrachtungsweise und jeder Wissenschaftshistoriker müsste diese Darstellung als unzureichend abtun, doch für die Einführung des Konzeptes der Masse erscheint sie mir an dieser Stelle ausreichend.

Nähern wir uns zunächst der Person Tycho Brahe. Er war einer der bedeutendsten Astronomen seiner Epoche. Er studierte Philosophie, Rhetorik, Rechts-, Geistes- und Naturwissenschaft ab der Mitte des 16. Jahrhunderts an den Universitäten in Stockholm, Leipzig, Wittenberg, Basel und Rostock – ein wahrhaftiger Universalgelehrter seiner Zeit. Dass er seine Standpunkte vehement vertreten konnte, zeigte sich schon bei einem Duell im Alter von 20 Jahren, bei dem er einen Teil seiner Nase verlor. Glaubt man so mancher Quelle, so ging es um ein mathematisches Problem, das er wahrhaft leidenschaftlich mit seinen Studienkollegen im wörtlichen Sinne ausfocht. Er brachte es aber nicht wegen seiner speziellen Duellfähigkeiten in die Annalen der Wissenschaftsgeschichte, vielmehr war er aufgrund seiner exakten Himmelsbeobachtungen einer der größten Astronomen seiner Zeit. Diese Beobachtungen führte er noch gänzlich ohne das astronomische Teleskop eines Galileo Galilei durch, sondern nur mit – aus heutiger Sicht – primitiven technischen Mitteln, wie zum Beispiel dem Mauerquadranten (siehe [Abb. 2.1](#)). Dabei handelt es sich um ein einfaches, aber sehr effektives Instrument zur Vermessung der Positionen der Gestirne am Firmament. Der Mauerquadrant liefert genaue Beobachtungswinkel auf einer Nord-Süd-Achse. Dadurch kann die jeweils höchste Position eines Objekts auf seiner Bahn am Firmament sowie der Zeitpunkt dieses Ereignisses vermessen werden. Dies sind zwei wichtige Größen, um die Bahn eines Gestirns am Himmel zu beschreiben. Wenn man so möchte, handelte es sich um einen großen Winkelmesser für Himmelsobjekte.

Exakte Messungen der Verläufe der Wandersterne, wie man Planeten damals nannte, waren zu jener Zeit Mangelware und erst Tycho Brahe sammelte Positionsdaten mit Hilfe etlicher Mitarbeiter in einer Qualität und Menge wie nie zuvor. Was Brahe aber wollte, war, mit seinen hervorragenden Daten das damals aufkeimende heliozentrische Weltbild zu widerlegen. Er lehnte die Vorstellung ab, dass die Sonne im Mittelpunkt des Universums wäre und die Erde nicht nur um das Zentralgestirn, sondern auch um die eigene Achse rotiere. Er meinte, dass dies auch nicht mit seinen alltäglichen Beobachtungen in Einklang zu bringen sei. Deswegen entwickelte er sein ganz eigenes Weltbild, das *Tychonische Planetenmodell*. Es beschrieb die

Abb. 2.1 Tychos
Mauerquadrant



Bahnen von Planeten und Sonne derart, dass die Erde weiter im Mittelpunkt des Geschehens blieb und sich Sonne und Planeten um diese drehten. Um nun alle seine Beobachtungen mit diesem Modell vereinbaren zu können, ließ er die damals bekannten Planeten (Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn) allesamt um die Sonne kreisen, siehe [Abb. 2.2](#). Das Modell war sehr komplex und mathematisch kaum beherrschbar. Es war eine Unzahl an Parametern nötig, was fast immer darauf schließen lässt, dass das Modell die Realität nicht gut beschreibt.

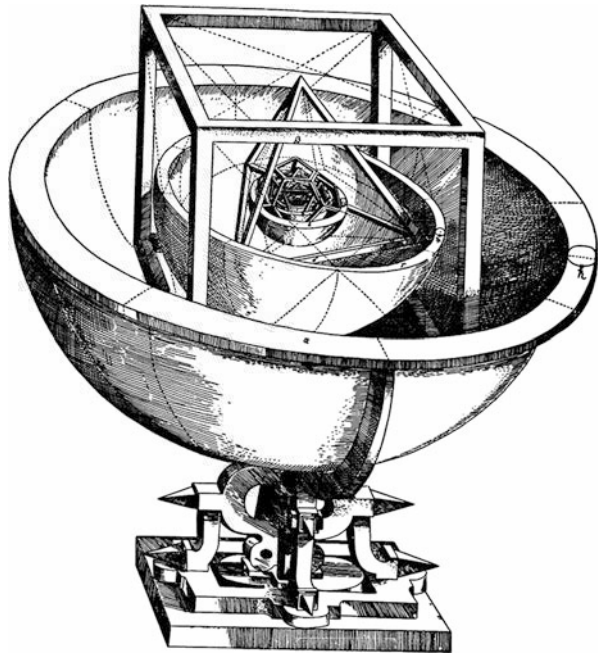
Und damit kommen wir schon zum zweiten Protagonisten unserer Geschichte. Brahe fehlte also ein stabiles, elegantes, theoretisches *Gebäude*, basierend auf der Mathematik jener Tage, um seinem Modell zum Durchbruch zu verhelfen. Daher stellte er einen gewissen Johannes Kepler als Assistenten ein. Kepler war wegen seiner mathematischen Fähigkeiten bekannt und geachtet. Doch die Zusammenarbeit war im Sinne Brahens nicht fruchtbar. Kepler war kein guter Beobachter und, was noch schlimmer war, vom Weltbild seines Geldgebers nicht überzeugt. Und Brahe hatte Angst, dass Kepler auf den Grundlagen seiner großartigen Beobachtungen zu Ruhm gelangen könnte und er nicht die entsprechende Anerkennung erhalten würde.

Kepler auf der anderen Seite, ein Zahlenmystiker, sah vornehmlich mathematische Beziehungen als die der Natur zugrunde liegende Ordnung an. So dachte er anfänglich, dass die Planetenbahnen fünf perfekt ineinandergeschachtelten Sphären innerhalb regulärer Polyeder folgten (siehe [Abb. 2.3](#)). Verschiedene geometrische Formen sollten die Bahnen der Planeten exakt beschreiben.

Abb. 2.2 Das Tychonische Planetenmodell. Quelle: *Andreas Cellarius: Harmonia macrocosmica seu atlas universalis et novus, totius universi creati cosmographiam generalem, et novam exhibens. 1661*



Abb. 2.3 Keplers anfängliches Modell des Sonnensystems. *Mysterium Cosmographicum (1596)*



Geometrische Formen standen für ihn, genauso wie für ganz viele Wissenschaftler jener Zeit, für eine göttliche Harmonie, die sich auch in den Bahnen der Gestirne widerspiegeln musste. Man kann sich heute kaum vorstellen, welche inneren Konflikte Kepler gehabt haben musste, als er in all den wundervollen Daten Tycho

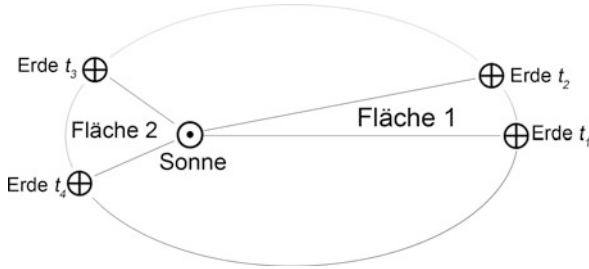


Abb. 2.4 Elliptische Bahn der Erde um die Sonne (stark überzeichnet dargestellt, in Wahrheit beinahe kreisförmig) mit unserem Zentralgestirn in einem der beiden Ellipsenbrennpunkte. Die Zeit, welche die Erde zwischen den Punkten t_1 und t_2 bzw. t_3 und t_4 benötigt, ist gleich lang. Nach Keplers zweitem Gesetz – die gedachte Verbindungslinie zwischen Sonne und Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen – sind damit Fläche 1 und Fläche 2 gleich groß

Brahes etwas anderes als diese reine Harmonie fand. Nämlich jene Beziehungen, die wir heute als die drei Kepler'schen Gesetze kennen.

Es war Kepler, der in den Daten von Brahe drei grundlegende Zusammenhänge erkannte (siehe [Abb. 2.4](#)).

- Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
- Die gedachte direkte Verbindungslinie Sonne zu Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
- Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich zueinander wie die Kuben der großen Bahnhalbachsen.

Aber Kepler war mit diesen bahnbrechenden Erkenntnissen noch nicht zufrieden. Er versuchte eine ursächliche Wirkung für seine Beobachtungen zu finden. Der Naturforscher Kepler nahm an, dass die Sonne eine Art magnetische Wirkung auf die Planeten habe. Er selbst bezeichnete diese Wirkung als *Anima motrix*, als *Seele des Bewegers*, und modellierte für diese Fernwirkung auch bereits eine Abhängigkeit ganz in der Art der Abnahme der Intensität des Lichts mit dem Abstand vom leuchtenden Stern, siehe [Abb. 2.5](#). Die Form der Abnahme dieser neuen Kraft mit dem Abstand war von Kepler als ursächliche Wirkung der Planetenbahnen postuliert worden, was sich als ein sehr erfolgreiches Konzept erwies.

Des Weiteren ging in seinem Modell diese Kraft von allen Körpern aus: der Sonne, den Planeten, den Monden, jedem noch so kleinen „Klumpchen“ Materie. Eine derartige „magnetische“ Kraftwirkung der Körper, die *Anima motrix*, mit ihrer quadratischen Abnahme, hat noch eine weitere interessante Eigenschaft: Sie wird niemals gänzlich erlöschen. Auch in den tiefsten Tiefen des Alls hat die Sonne nach diesem Modell ihre Kraftwirkung, natürlich nur noch äußert gering. Aber niemals wird diese Kraft gänzlich verschwinden.

Keplers Gesetze waren in seiner *Astronomia nova* 1609 noch nicht elegant mathematisch modelliert, sondern eher als lose Axiome formuliert – ein Umstand, der sich Ende des 17. Jahrhunderts ändern sollte.

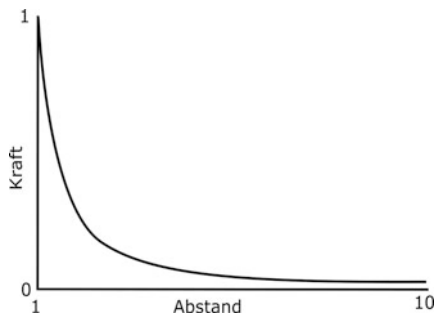


Abb. 2.5 Anima-motrix-Abstandsverhalten $1/r^2$. Angenommen, die anziehende Kraft habe im Abstand 1 den Wert 1. Mit zunehmendem Abstand fällt sie entlang der eingezeichneten Kurve quadratisch ab. In der 10-fachen Entfernung beträgt die Kraft nur noch ein Hundertstel des ursprünglichen Wertes, allerdings verschwindet diese Kraft nie gänzlich

Mit Sir Isaac Newton, dem dritten Akteur unserer Geschichte, und seinem Hauptwerk, der *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1686), erscheint erstmals eine auf mathematischer Beschreibung basierende Theorie der Dynamik der Körper auf dem Parkett der Naturwissenschaft. Seine Theorie führte die Beobachtungen der Fallexperimente Galileo Galileis und Keplers Gesetzmäßigkeiten unserer nächstgelegenen Himmelskörper formal zusammen und stellte damit eine allgemeingültige Theorie der Gravitation (der Massenanziehung) dar. Newtons Theorie war über einige Jahrhunderte unangefochten und ist dies in vielen Bereichen auch heute noch. Mit ihr kann eine Vielzahl unserer Beobachtungen einfach und elegant beschrieben werden.

Erneut sind es drei Zusammenhänge, drei Gesetzmäßigkeiten, welche die Bewegungen der Körper beschreiben und exakte Vorhersagen ihrer Bahnen zulassen:

- **Newtons erstes Gesetz oder Trägheitsprinzip:** Ein Körper behält seine Geschwindigkeit und Richtung so lange bei, wie er nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern.
- **Newtons zweites Gesetz oder Aktionsprinzip:** Die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der verursachenden Kraft proportional und geschieht in der Richtung derjenigen geraden Linie, nach der jene Kraft wirkt.
- **Newtons drittes Gesetz oder Wechselwirkungsprinzip:** Kräfte treten paarweise auf. Übt ein Körper auf einen anderen Körper eine Kraft aus (actio), so wirkt umgekehrt eine gleich große, aber entgegengerichtete Kraft (reactio) – actio est reactio.

Die erste wichtige Erkenntnis in Newtons Modell: Die Beschleunigung von Körpern wird durch eine Kraft hervorgerufen. In diesem abstrakten Konzept ist stets eine Kraft Ursache dafür, dass sich Richtung und Geschwindigkeit der Bahn eines Körpers ändern.

Je stärker die Kraft, desto stärker die Beschleunigung, desto stärker die Änderung der Bahn. Newtons zweites Gesetz spricht nun von einer Bewegungsänderung