

dtv

Das ist kein Physikbuch! Damit beruhigt uns der Autor gleich zu Beginn: „Es ist ein Buch über die Welt, die von der Physik ja nur erforscht wird.“ Thomas Schaller übersetzt die Sprache der Physik in unsere Alltagssprache. Dabei geht Schaller nicht nur auf die Formeln selbst ein, sondern erläutert auch ihre Entstehungsgeschichte. Auf diese Weise lernen wir Wissenschaftler wie Galilei, Kepler, Bernoulli, Heisenberg, Schrödinger oder Einstein kennen. Von den Positronen bis zu den Quarks, vom Urknall über das gekrümmte Raum-Zeit-Kontinuum bis hin zu den multiplen Universen: Schaller entführt uns in eine faszinierende Welt.

*Thomas Schaller*, geboren 1957, hat zahlreiche Beiträge, Reportagen und Radiofeatures zu wissenschaftlichen, technischen und mathematischen Themen veröffentlicht. Seit 1987 arbeitet er als Wissenschaftsredakteur beim ORF-Radio Ö1.

THOMAS SCHALLER

DIE BERÜHMTESTEN  
**FORMELN**  
**DER WELT**

... UND WIE MAN SIE VERSTEHT

Deutscher Taschenbuch Verlag

**Ausführliche Informationen über  
unsere Autoren und Bücher  
finden Sie auf unserer Website  
[www.dtv.de](http://www.dtv.de)**

Ungekürzte Ausgabe 2010  
2. Auflage 2010  
Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG,  
München  
© 2007 Ecowin Verlag GmbH, Salzburg  
Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen bleiben vorbehalten.  
Umschlagkonzept: Balk & Brumshagen  
Umschlaggestaltung: Claus Lehmann  
Gesamtherstellung: Druckerei C. H. Beck, Nördlingen  
Gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier  
Printed in Germany · ISBN 978-3-423-34571-2

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	7
Galilei – die Welt vermessen .....	11
Kepler – und die bewegten Planeten .....	21
Newton – stellt die Physik auf ein Fundament .....	34
Bernoulli – warum ein Flugzeug fliegt .....	41
Doppler – „Wrrraaaooom...“ .....	48
Maxwell – bewegte Elektronen, Magneten und das Licht ..	54
Michelson – Licht ist immer gleich schnell .....	64
Lorentz – falscher Ansatz mit richtigem Resultat .....	79
Boltzmann – Wärmeenergie und Entropie .....	88
Planck – der Mann, der an sich selbst nicht glaubte .....	100
Pauli – die Geschichte eines Platzanweisers .....	110
De Broglie – sein unbegreiflicher Dualismus .....	115
Heisenberg – alles ist nur wahrscheinlich .....	124

Schrödinger – Suche nach der Weltformel .....	142
Einstein-Podolsky-Rosen – wo sich Einstein irrte .....	147
Bell – die berühmtesten Ungleichungen der Welt .....	155
Einstein – die berühmteste Formel der Welt .....	163
Hubble – die Vermessung des Universums .....	177
Gamow-Penzias-Wilson – das Echo des Urknalls .....	183
Schwarzschild-Hawking – der seltsamste Himmelskörper .....	189
Danke .....	196

# Vorwort

## Das ist kein Physikbuch!

$E = mc^2$  – Wenn es eine Formel gibt, die die „berühmteste der Welt“ ist, dann ist es diese.  $E = mc^2$  ziert die Deckel Hunderter und Tausender Bücher.  $E = mc^2$  findet sich in Zeitschriften und Magazinen, wann immer von Atomen, von Energie oder vom Universum die Rede ist.  $E = mc^2$  schmückt als Graffiti Hausmauern, hat es in U-Bahnschächte geschafft und weltweit auf die Wände öffentlicher Toiletten-Anlagen.

$E = mc^2$  dürfte ähnlich bekannt sein wie die Firmenlogos global agierender Hamburger-Ketten oder die Porträts einer Marilyn Monroe. Einsteins Gleichung ist der Popstar unter den Formeln. Und sie hat ihren Schöpfer, Albert Einstein, zum Popstar der Wissenschaft gemacht.

Doch was bedeutet eigentlich dieses kurze  $E = mc^2$ ? – Nun, man weiß, das hat irgendwie mit Masse und Energie und mit der Geschwindigkeit des Lichts zu tun. Man hat davon gehört, die Sonne am Himmel funktioniert nach dieser Formel, weiters die irdischen Atomkraftwerke und leider auch die ganz unhimmliche Atombombe. Man weiß dann noch, dass die Gleichung zur Relativitätstheorie gehört. Darin spielt auch ein „Raum-Zeit-Kontinuum“ eine Rolle, das zu allem Überfluss noch „gekrümmt“ sein soll.

Doch was soll man sich unter all dem vorstellen? Wie kommt man überhaupt darauf? Und was ist nun mit dem Urknall? Oder mit den ominösen „Schwarzen Löchern“ – was haben die wieder damit zu tun?

Davon handelt dieses Buch.

Die Formeln und Gleichungen der Physik sind gar nicht so kompliziert, wie es scheint, behaupte ich. Formeln sind einfache Sätze. Aussagen, formuliert in einer speziellen Sprache – in jener der Mathematik. Der große italienische Naturforscher, der erste Physiker im heutigem Sinn, Galileo Galilei, hat dieses Prinzip entdeckt: „Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben“, verkündete er seinen staunenden Zeitgenossen.

Die konnten das nicht recht glauben, noch weniger wollten sie es glauben. Im Jahr 1633 brachte die Idee Galilei beinahe auf den Scheiterhaufen. Doch der Italiener, der Erfinder der *Nova Scientia*, der *Neuen Wissenschaft*, wie er sie im Bewusstsein ihrer Tragweite – und nicht ganz uneitel – nannte, der Erfinder der naturwissenschaftlichen Methode, behielt recht: Das Buch der Natur *ist* in der Sprache der Mathematik geschrieben.

So lassen sich die „Eigenheiten“ der Natur auch nur in dieser Sprache wirklich präzise formulieren – in Gleichungen und Formeln. Leider sind diese nicht ganz leicht verständlich. Aber Sprachen kann man übersetzen. – Und das versucht dieses Buch: Es übersetzt die Sprache der Mathematik in die „normale“ Sprache, die wir alle verstehen.

Das gelingt nicht immer zu 100 Prozent. Mitunter holpert die Übersetzung, das liegt in der Natur von Übersetzungen; auch solchen zwischen natürlichen Sprachen, etwa vom Englischen ins Deutsche: Es gibt das genau gleichbedeutende Wort nicht, die Konstruktion der Sätze ist anders, grammatikalische Eigenheiten unterscheiden sich. Fragen Sie einen professionellen Dolmetscher: Gute Übersetzungen sind eine komplexe Tüftelei.

Bei der Mathematik erst recht: Formeln sind kurz und prägnant, aber was sie aussagen, ist oft nicht so kurz und prägnant auszudrücken. Aber Sie werden sehen, im Prinzip geht's. Man kann die Behauptungen und Aussagen der Physik im Kern verstehen, ohne fünf Jahre Mathematik studieren zu müssen.

## Doch dies ist kein Physikbuch!

Es ist ein Buch über die Welt, die von der Physik ja nur erforscht wird. Die Welt ist auch ohne Wissenschaft da und ausgesprochen spannend. Und ich glaube sicher: Wer immer sich für Physik interessiert, interessiert sich in Wahrheit für die Welt: für den Kosmos, für das Ganze und seine Ordnung, wie die alten Griechen sagten. Das trifft auch auf die Physiker zu, zumindest auf jene, die ich getroffen habe: In Wahrheit wollten sie nicht wissen, wie dieses oder jenes Detail, in das sie sich verbeißen, sondern wie *alles* funktioniert.

Wahr ist: Die Details sind dabei niemals unwichtig, leider. Die Welt ist kompliziert – darin liegt das Problem der Wissenschaftler. Aber in diesem Buch kann man doch vieles weglassen und sich auf den Kern der Dinge konzentrieren. Das versuche ich.

Andererseits: Eben deshalb kann dies kein Physikbuch sein. Als solches wäre es ganz und gar und sogar sträflich unvollständig.

Den zweiten Grund habe ich schon erwähnt: Die Sprache der Mathematik und damit der Natur besteht aus Dingen wie Integralen, Differentialoperatoren, Vektoren, Rotoren, Matrizen, nicht kommutativen Gruppen, hyperbolischen Geometrien. Oder Strings und Branes, die Ihnen in neueren Büchern vielleicht untergekommen sind. Na ja, und so weiter. Ich kann Ihnen nicht erklären, was das alles ist, oft weiß ich es selbst nicht so genau. Und Sie *wollen* es wahrscheinlich nicht wissen. Das ist Ihr gutes Recht.

Das heißt, man muss Bilder finden, Analogien, Vergleiche. Doch Vergleiche treffen immer nur bedingt zu. Sie hinken. Und bei manchen gilt sogar der berühmte Satz: „Nicht alles, was hinkt, ist ein Vergleich.“ Den bekommt man öfter zu hören, wenn man mit Physikern spricht und versucht, ihr wissenschaftliches Kauderwelsch verständlich zu machen. Wo es besonders schlimm wird, weise ich darauf hin und versuche, die Grenzen des Vergleichs – der Übersetzung – aufzuzeigen.

Wenn Sie als Leser also hoffen, Sie könnten nach der Lektüre dieses Buches eine Prüfung bei einem Physikprofessor bestehen, muss ich Sie enttäuschen. Das wird nicht funktionieren. Aber Sie werden wissen, was die Wissenschaft über unsere Welt herausgefunden hat. Jedenfalls die wichtigen Dinge.

Da dies kein Physikbuch ist, wird auf die wissenschaftliche Formelsetzung (alles kursiv außer Indices, wenn sie keine variablen Größen sind, und nicht bei bekannten Funktionen) verzichtet.

Viel Spaß in der Welt der Formeln, der modernen Physik und ihrer Erkenntnisse wünscht Ihnen

Thomas Schaller

# Galilei – die Welt vermessen

„Die Philosophie steht in dem großen Buch geschrieben, dem Universum, das sich unserem Blick darbietet. Und dieses Buch ist in der Sprache der Mathematik verfasst. Seine Buchstaben sind Zahlen, sind Dreiecke, Kreise und geometrische Figuren. Ohne diese Sprache zu verstehen, werden wir das Universum nicht verstehen, und wir irren durch ein finsternes Labyrinth.“

Mit diesem Konzept, mit der Idee, den Geheimnissen der Natur mittels Mathematik zu Leibe zu rücken, erfindet Galileo Galilei die Physik. Er weiß das auch und nennt sie programmatisch *Nova Scientia* – die *Neue Wissenschaft*. Und er „erfindet“ sie in jenen Jahren um 1600 herum wirklich: Es gibt kein anderes Wort für diese Leistung.

Noch ist die Neuzeit nicht die neue Zeit, das Mittelalter weiterhin lebendig. Im Jahre 1600, Galilei ist 36 Jahre alt, verbrennt der Mathematiker und Philosoph Giordano Bruno in Rom auf dem Scheiterhaufen der Inquisition. Sein Verbrechen: Er hatte behauptet, die Erde stehe nicht im Mittelpunkt des Universums, sondern bewege sich um die Sonne. Brunos Tod sollte eine Warnung sein für alle, die allzu forsch neue Ideen verkündeten.

Galilei verstand die Warnung wohl. Aber trotz aller Vorsicht musste er mit seinen Vorstellungen in Konflikt mit der katholischen Kirche geraten: In zwei Verfahren in den Jahren 1616 und 1633 wurde er zunächst verwarnt, dann verurteilt und erst nach dem berühmten Widerruf all seiner Lehren zu lebenslanger Haft begnadigt. Dabei ging es bloß vordergründig um das heliozentrische Weltbild, darum, ob die Erde ein bewegter Planet sei oder

das unbewegliche Zentrum des Kosmos. Wenn es der Kirche auch nicht gefiel – mit der Erde als Wandelstern hätte sie sich vielleicht abfinden können. Tatsächlich ging es um Erkenntnis schlechthin, um Wissenschaft, darum, wer mit welchen Argumenten behaupten konnte, zu „wissen“.

Galileis *Nova Scientia* unterschied sich in der Tat von allem Alten, allem Gewohnten und kirchlich Genehmigten. Dieses, die Philosophie, bestand darin, über die Natur nachzudenken, zu spekulieren, zu meditieren und das Wesen der Dinge zu ergründen. Dabei spielte die Bibel eine gravierende Rolle: Sie hatte immer recht. Und da die Kirche über die einzig und allein gültige Auslegung der Bibel wachte, hatte sie zumindest auf Erden das letzte Wort, wenn es um Wissen ging.

Galilei betrat einen anderen Weg. Er wollte im „Buch der Natur“, nicht in der Bibel lesen und er wollte es selbst tun. Erst das war mit dem exklusiven Wissens- und Wahrheitsanspruch einer Kirche um 1600 im Kern unvereinbar und ist es, genau genommen, bis heute oft. Zugleich verlagerte Galilei die Hauptstoßrichtung seiner Forschung: Er fragte sich nicht unbedingt nach dem Urgrund, nach dem Wesen allen Seins – Fragen, die recht schwierig zu beantworten sind, wie wir wissen –, sondern versuchte herauszufinden, wie die Dinge *funktionieren*. Wie sie aufeinander einwirken und welchen Regeln sie folgen.

Galilei und seine Methode haben dabei ein gutes Argument für sich, das ebenfalls der 1564 geborene Pisaner formulierte. Es wurde sein berühmtester Satz:

Messen, was messbar ist, messbar machen, was noch nicht messbar ist.

Für die Physik spricht immer die Messung. Wenn sie etwas behauptet, kann man das nachmessen. Genau gesagt: Man kann es sehen, weil jedes Messen letztlich nur ein verbessertes, verlängertes, geschärftes Sehen ist. Wenn die Naturwissenschaft, die *Nova Scientia* behauptet, irgendetwas sei *so*, dann wird es beim Nach-

schauen auch so eintreten. Andernfalls ist die Behauptung falsch und wird sofort verworfen. Nach ein paar Mal Hinsehen bleiben zwangsläufig die richtigen Thesen übrig.

Um die Regeln zu erkennen, nach denen das Universum funktioniert, muss man es folgerichtig vermessen, und der ausgebildete Mathematiker Galilei war der erste Forscher, der der Natur, dem Universum mit dem Maßband zu Leibe rückte. So selbstverständlich das heute klingt, eine so gewaltige Neuerung stellte es um 1600 dar. Und Galilei erkannte: Wo in Messergebnissen Regelmäßigkeiten, Muster auftreten, lassen sie sich als mathematische Formeln und Gleichungen formulieren, in Diagrammen und geometrischen Figuren darstellen – als Physik.

Die Geschichte hat Galilei recht gegeben: Seine Methode funktioniert. Tausende und Millionen von Maschinen, Geräten, Apparaten, die seit damals mit ihrer Hilfe erfunden und konstruiert wurden, sind ein unschlagbarer Beweis: Sie funktionieren einfach wirklich.

*Messen, was messbar ist, messbar machen, was noch nicht messbar ist.* Unter dieser Devise fand sich der Italiener vor einem großen Problem wieder: Messgeräte gab es damals kaum, mit Ausnahme einfacher Maßstäbe und Waagen. Beispielsweise existierte keine Uhr, keine Möglichkeit, Zeitstrecken zuverlässig zu ermitteln. Es gab Sonnenuhren, die die Tageszeit anzeigten. Will man aber messen, wie lange ein Stein vom Schiefen Turm von Pisa zu Boden fällt, sind Sonnenuhren eher nutzlos.

Eine der Hauptaktivitäten Galileis war daher, zuverlässige Messgeräte zu bauen, und das tat er unermüdlich. Sein Forscherleben bestand nicht zuletzt in der permanenten Suche nach neuen Instrumenten und neuen Ideen, wie sich solche konstruieren ließen. Anders gesagt: nach Vorrichtungen, die einen genaueren Blick auf und in die Natur erlauben als den des bloßen Auges.

## Pendelgesetz

Als besonders sperrig erwies sich die Zeit. Galileis erstmalige Konstruktion einer funktionierenden Uhr ist mit einer der berühmtesten seiner Formeln verknüpft: dem Pendelgesetz. Seine Geschichte zeigt, wie eng sich Messgeräte und Erkenntnisse miteinander verzahnen. Galilei setzte eine Spirale in Gang: Neue Messgeräte führen zu neuem Wissen, neues Wissen führt zu neuen Messgeräten. Diese Aufwärtsspirale läuft bis heute und wird es noch eine Weile tun, bleibt zu hoffen.

Galilei vollführte zahlreiche Versuche, die Zeit, vor allem kurze Zeitstrecken, messbar zu machen. Er benutzte verbesserte Sanduhren, er versuchte es mit ausfließendem Wasser, aus dessen Menge er die Zeit des Ausfließens errechnete. Er probierte es mit seinem eigenen Pulsschlag. Er engagierte professionelle Trommler, ließ sie schlagen und zählte. Sehr genau ist das alles nicht.

Die Idee zum Pendel kam ihm, wie er berichtet, in einer Kirche angesichts eines großen von der Decke hängenden Kerzenleuchters, der ein wenig hin und her schwankte. Er pendelte. Galilei erkannte, dass man diese regelmäßige Bewegung wohl zur Zeitmessung nutzen könnte. Er begann das Pendeln näher zu untersuchen: Wie lange benötigt ein schwingendes Gewicht an einer Schnur vom einen Endpunkt seiner Bahn zum anderen? Wie ändert sich diese Zeitdauer? Wovon wird sie beeinflusst?

Der Clou war: Sie wird *nicht* davon beeinflusst, wie weit das Pendel ausschwingt. Die Stärke der Pendelbewegung ist für ihre Dauer irrelevant. Die Zeit bleibt immer gleich. Das ist in der Tat verblüffend, legt doch das Gewicht, das weiter ausschwingt, einen viel längeren Weg zurück. Dennoch: Die verstreichende Zeit vom einen höchsten Punkt zum anderen bleibt immer gleich. Tatsächlich ist die Schwingungsdauer nur von der Länge der Schnur abhängig, von nichts anderem:

Die Längen zweier Pendel verhalten sich zueinander wie die Quadrate der Schwingungszeiten,

lautet das Pendelgesetz in Worten. Als Formel:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$$

Man sieht, die Formel ist deutlich kürzer als der zugehörige Satz. So viel zu den Vorteilen von Formeln.

Also: Ein Pendel schwingt immer gleich schnell, und man kann die Schwingdauer sofort berechnen, wenn man nur die Länge der Schnur oder des Seils kennt. Es kann auch ein Pendelstab sein, für ihn gilt das Gleiche.

Damit kann man Zeitmessgeräte bauen, erkannte Galilei und wurde so zum Vater aller Uhren, jedenfalls bis ins späte 20. Jahrhundert. Erst vor wenigen Jahrzehnten wurden Pendel, oder in einer Armbanduhr die Unruh, die auch nur ein Pendel im Miniformat ist, durch elektrisch schwingende Quarze als normierender Mechanismus ersetzt. Oder in allerneuester Zeit durch radioaktive Elemente, deren Zerfall Atomuhren steuert. Aber das ist ein anderes Kapitel.

Galilei konstruierte noch andere neue Instrumente. Allen voran seine Fernrohre, mit denen er dem Himmel seine Geheimnisse zu entlocken, dort Dinge zu sehen versuchte, die „noch nie ein Menschaugen erblickt hat“, wie er selbst sagt. Man kann wahrscheinlich konstatieren, dass der Italiener ein wenig eitel war. Galilei sah, dass der Planet Jupiter, gleich wie die Erde, über Monde verfügt, die ihn umkreisen; über gleich vier Stück nämlich. Galileis Fernrohre waren wenig besser als heutige Operngucker, und dank moderneren Geräts wissen wir: Es sind tatsächlich mehrere Dutzend. Die Galileischen Monde sind bloß die vier größten.

Das Gegenstück zum Fernrohr stellt das Mikroskop dar, und Galilei erfand auch dieses. „Motten und Stechmücken sind wun-

derschön, Flöhe hingegen hässlich“, befand er. Diese Ansicht kann man teilen oder nicht. Sicher ist: Galileis Mikroskop versetzte die Menschheit erstmals in die Lage, über die Schönheit oder Hässlichkeit solcher Kleinkreaturen überhaupt zu befinden. Galilei war der erste Mensch, der Bakterien oder Pilzsporen sah und der Welt begeistert vorführte, dass in jedem Tropfen Wasser Millionen dieser Winzlinge leben – vom blanken Auge völlig unbemerkt.

Auch die ersten Thermometer, um Temperaturen zu bestimmen, stammen vom messwütigen Italiener, neue Winkelmessgeräte und andere mehr. Die akribische Suche nach immer neuen Geräten, die Messungen ermöglichen, begleitete ihn sein ganzes Leben.

## Fallgesetz

Doch zum zweiten Teil der segensreichen Galileischen Spirale: Neues Wissen bringt neue Messgeräte, neue Messgeräte bringen neues Wissen. Nachdem er 1583 das Pendelgesetz erkannt und Uhren gebaut hatte, konnte er beginnen, Zeiten zu messen. Besonders interessierten ihn Fallzeiten: die Zeit, die fallende Objekte aus irgendeiner Höhe bis zum Boden benötigen.

Einer schönen Legende nach fand Galilei das Fallgesetz, indem er den Schiefen Turm seiner Heimatstadt Pisa bestieg und allerlei Gegenstände hinunterwarf. Historisch verbürgt ist das nicht. Und es hätte auch nicht funktioniert.

In der realen Welt sind die Dinge oft komplex, sie sind durchmischt, verwoben und unübersichtlich. Das ist im menschlichen Leben leider so und auch in der Natur: Phänomene oder Kräfte wirken gleichzeitig, sie überlagern und verdecken einander. Beispiel: Wenn eine Vogelfeder zu Boden fällt, wirkt erstens die Erdschwerkraft, zweitens der Luftwiderstand auf sie. Das wusste man schon vor Galilei. Aber wie soll man messen, wie stark die

Schwerkraft ist, und wie stark der Luftwiderstand, wenn die beiden nicht auseinander zu dividieren sind?

Es wird sogar schnell noch komplizierter: Bei der Flugbahn eines geworfenen Steins oder einer Kugel aus einer Kanone kommt als drittes Element noch die Anfangsgeschwindigkeit hinzu – das Tempo der Wurfbewegung oder bei der Kanone die Abschussgeschwindigkeit.

Deshalb hätten Galileis angebliche Fallversuche auf dem Schiefen Turm von Pisa nicht funktioniert: Lässt man eine Holz- und eine gleich große Metallkugel vom Turm fallen, wird die Holzkugel später unten ankommen. Dafür sorgt allein der größere spezifische Luftwiderstand, das ist sicher. Aber zusätzlich vielleicht auch eine verringerte Schwerkraft infolge des geringeren Gewichts des Holzes? Das ist unklar, und ohne eine Vakuumröhre kann man das nicht ohne Weiteres feststellen.

Galilei musste diese Dinge also trennen, und er fand eine Möglichkeit: Er benutzte ein sanft geneigtes Brett, eine „schiefe Ebene“, auf der er Kugeln, statt sie fallen zu lassen, rollen ließ. Dabei erreichen sie von vornherein keine großen Geschwindigkeiten, und der Luftwiderstand wird unerheblich: Er nimmt erst bei hohem Tempo stark zu. Damit bleibt die reine Fallbewegung übrig.

Darin besteht übrigens die dritte Galileische Innovation, welche die *Nova Scientia* bis heute ausmacht: Der Forscher stellt Situationen künstlich her, in denen sich die Dinge „sauber“ messen lassen, in denen das zu messende Phänomen ohne störende Einflüsse zutage tritt. Man nennt das ein *Experiment*.

Ihre Experimente, von denen Physiker reden, sind also auch nichts wirklich Geheimnisvolles: Sie schaffen spezielle Konstellationen, in denen Dinge messbar werden. Im Detail ist das oft nicht so einfach, mitunter gehört einige Raffinesse dazu. Jedenfalls: Sein Arbeitsprinzip „Messbar machen, was noch nicht messbar ist“ machte Galilei auch zum ersten großen Experimentator der Geschichte.

Zurück zu seinen schiefen Ebenen. Es bedurfte noch einer Uhr, und die hatte der Italiener schon erfunden. Ergebnis, kurz gefasst: Holz- und Metallkugel rollen die geneigte Fläche gleich schnell hinab. Sie kommen gleichzeitig unten an. Einzig möglicher Schluss: Die reine Fallbewegung, ohne Störungen, erfolgt in beiden Fällen gleich schnell. Die Unterschiede beim Fallen vom Turm verdanken sich allein dem Luftwiderstand, der damit übrigens auch berechenbar wird. Das Gleiche gilt für eine Papierkugel und auch für eine Vogelfeder: Auch sie fallen, für sich genommen, ohne Luftwiderstand, genauso schnell zu Boden wie eine Eisenkugel.

Das widerspricht wieder einmal unser aller Intuition. Nebenher widersprach es der damaligen Lehrmeinung frontal – wie das meiste, das Galilei im Lauf der Jahrzehnte erforschte und veröffentlichte. Doch in diesem Fall hatte es erstmals Folgen: Als er seine Erkenntnisse 1592 in einem Manuskript vorlegte, hielt man sie für derartig abwegig, dass er seinen Broterwerb verlor: Er wurde als Mathematiklehrer von der Universität Pisa entlassen.

Galilei führte seine Experimente weiter, probierte verschiedenste Objekte unterschiedlicher Form, Größe und Gewichts. Es war immer das Gleiche: Kann man den Luftwiderstand irgendwie ausschalten – oder ihn, sobald bekannt, herausrechnen –, fallen die Gegenstände alle gleich schnell.

Aus heutiger Sicht ist der Rest rasch erzählt: Die Dinge fallen nicht nur gleich schnell, sie werden dabei auch gleichmäßig immer schneller: Objekte im Schwerfeld beschleunigen. Heute trivial, könnte man sagen, um 1600 jedoch völlig neu: Jahrtausendlang hatte die Menschheit geglaubt, abstürzende Objekte seien auf ihrer Bahn von oben bis unten immer gleich rasch unterwegs.

Daraus ergibt sich, dass die Geschwindigkeit von der bisherigen Fallzeit abhängt, und diese Beziehung ist linear, wie Mathematiker das nennen: doppelte Fallzeit – doppelte Geschwindigkeit beim Aufprall. Dreifache Fallzeit – dreifache Geschwindig-

keit. Und so weiter. Wenn der Absturz aber immer schneller und schneller wird, ergibt das für den zurückgelegten Weg, dass er offenbar überproportional anwächst: quadratisch, wie sich er rechnen lässt. Das bedeutet: doppelte Fallzeit – vierfacher Weg. Dreifache Fallzeit – neunfacher Weg.

Als Formel liest es sich wieder einmal einfach: Weg ist gleich (irgendein konstanter Faktor) mal Zeit zum Quadrat. Oder:

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

Das ist das Galileische Fallgesetz, und heute ist es uneingeschränkt anerkannt, im Gegensatz zu jener Ära, in der das Mittelalter gerade erst zu Ende war. Aus der Kombination dieses Fallgesetzes mit Johannes Keplers Formeln für die Planetenbewegung konstruierte Isaac Newton schließlich die allgemeinen Gravitationsgleichungen und seine Theorie der Schwerkraft – das erste abgeschlossene Theoriengebäude der Physik, in dem alles mit allem zusammenpasste. Daraus wird sich auch ergeben, warum der „konstante Faktor“ in Galileis Fallformel ausgerechnet  $\frac{g}{2}$  heißen muss. Aber das ist ein anderes Kapitel.

Nachsatz: Es dauerte in Wahrheit nicht lange, bis Galileis Erkenntnisse sich durchsetzten. Dafür waren sie zu praktisch: Seine Fernrohre funktionierten nicht nur bei der Himmelsbeobachtung, sondern auch auf hoher See, ebenso der Kompass, eine weitere seiner Erfindungen. Venezianische Kaufleute, die dadurch reich wurden, fragten nicht lange, ob das der Kirche ins biblische Konzept passte. Dank des Fallgesetzes, das Galilei den ersten Konflikt mit den Autoritäten eingebracht hatte, ließ sich plötzlich die Flugbahn einer Kanonenkugel präzise ausrechnen: Nach Galilei ist sie die Kombination einer geradlinigen Bewegung – aus dem Kanonenrohr heraus – mit einer Fallbewegung. Beide für sich berechnet und dann addiert, ergeben die Gesamtflugbahn – eine *Parabel*, wie der Wissenschaftler erkannte. Das wiederum sprach sich unter den Feldherren der Renaissance

sehr schnell herum. Und wenn es einer nicht glauben wollte, stand er bald ohne Armee da.

Manche Wissenschaftshistoriker meinen heute, dass Galilei sich gar nicht so schwer tat, im Jahre 1633 vor dem Inquisitionsgericht alle seine Lehren zu widerrufen: Er wusste, dass er recht hatte. Er hatte es gar nicht notwendig, zu streiten, und er wusste auch, das würde sich sehr rasch erweisen: Er hatte im Buch der Natur gelesen, und dieses Buch irrt nicht.

Galilei verstarb am 8. Januar 1642, immer noch unter Hausarrest stehend, in Arcetri bei Florenz.