

Gerhard Zweckbronner

Aufbruch ins Industriezeitalter



Zukunftswerkstätten
der Neuzeit

 **TECHNOSEUM**

SACHBUCH

 Springer

Aufbruch ins Industriezeitalter – Zukunftswerkstätten der Neuzeit

Gerhard Zweckbronner

Aufbruch ins Industriezeitalter – Zukunftswerkstätten der Neuzeit

Herausgegeben vom TECHNOSEUM
Landesmuseum für Technik und Arbeit in
Mannheim

 TECHNOSEUM

 Springer

Gerhard Zweckbronner
TECHNOSEUM Landesmuseum für Technik
und Arbeit in Mannheim
Mannheim, Deutschland

herausgegeben vom
TECHNOSEUM
Landesmuseum für Technik und Arbeit in
Mannheim

ISBN 978-3-662-60541-7 ISBN 978-3-662-60542-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60542-4>

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, ein Teil von Springer Nature 2022

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Einbandabbildung: TECHNOSEUM, Foto: Klaus Luginsland (Abb. 2.5)
Abbildungen: TECHNOSEUM, außer Abb. 3.1, 6.1, 6.4, 7.1, 7.2, 8.1, 8.2.

Planung/Lektorat: Stefanie Wolf

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Geleitwort

Für Technik zu begeistern, scheint gegenwärtig kaum mehr notwendig zu sein, ist sie uns doch in den hochindustrialisierten Gesellschaften zur Selbstverständlichkeit geworden – so sehr, dass wir uns ein Leben ohne sie kaum mehr vorstellen können. Auch technische Innovationen, etwa auf dem Gebiet digitaler Medien, individueller Elektromobilität oder intelligenter Technologien, finden heutzutage rasch Eingang in unseren Alltag und treffen zumeist auf breite Akzeptanz.

Indessen scheint es angesichts der engen Verflechtung von Technikeinsatz, persönlichem Lebensstil, gesellschaftlichem Miteinander und globaler Auswirkungen auf Klima, Rohstoff- und Energieressourcen nötiger denn je, neben den spannenden und faszinierenden Seiten der Technik auch Interesse zu wecken für größere Entstehungs- und Wirkungszusammenhänge, historisch wie aktuell. Denn während wir in einer von Technik geprägten Welt leben, wird sie in ihrer Komplexität immer schwerer durchschaubar und lässt uns zunehmend auch Unsicherheiten, Abhängigkeiten und Gefährdungen spüren – bei allen Annehmlichkeiten, die sie bietet.

Das Mannheimer TECHNOSEUM möchte hier Orientierungshilfe geben. Es verbindet seinen chronologischen Rundgang durch mehr als zweihundert Jahre Technik- und Sozialgeschichte mit Experimenten in den sogenannten historischen Zukunftswerkstätten. Hier können Besucherinnen und Besucher durch eigenständige Versuche in anschaulicher und lebendiger Weise Kenntnisse zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen der gezeigten technischen Entwicklungen gewinnen. Neben der Frage „Wie funktioniert das?“ geht es immer auch um das „Woher und Wozu?“, um den geschichtlichen Kontext und die Auswirkungen bis in unsere heutige Zeit. Vor diesem

Hintergrund ist das TECHNOSEUM auch prädestiniert, Forum für die Diskussion von Gegenwartproblemen und Zukunftsfragen zu sein.

Mit der vor einigen Jahren gestarteten Initiative „Jugend für Technik“ unterstützt das TECHNOSEUM als außerschulischer Lernort zudem die Förderung der MINT-Fächer Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik. Hier nehmen die interaktiven Mitmach-Stationen in den Zukunftswerkstätten und der museumspädagogische Laborbetrieb eine zentrale Stellung ein. Sie sollen Kindern und Jugendlichen anwendungsbezogenes Wissen vermitteln und sie darüber hinaus befähigen, Visionen und Ideen für die Welt von morgen zu entwickeln. Gerade junge Menschen sehen inzwischen vielfach die bisherige Entwicklung kritisch, prangern auch die von ihr verursachte Klima-Erwärmung an und wollen verantwortungsbewusst über künftige Wege mitentscheiden und sie mitgestalten, denn es geht um ihre Zukunft.

Auf der Basis dieser historischen sowie zukunftsorientierten Arbeiten im TECHNOSEUM entstand das nun vorliegende Buch. Es schildert anhand ausgewählter Mitmach-Stationen einige der wichtigsten Themenpfade durch die Geschichte der Industrialisierung bis in die Gegenwart. Die bebilderte Darstellung wurde so konzipiert, dass sie auch ohne Kenntnis der Ausstellung verständlich ist. Aber man kann sich von der Lektüre auch gern anregen lassen, das TECHNOSEUM zu besuchen, um die Fülle der Themen noch besser kennenzulernen, die hier aufbereitet sind.

Es ist dem Verlag Springer vor diesem Hintergrund vielmals dafür zu danken, dass er die Anregung zu dieser Publikation bereits vor einigen Jahren gab und dann auch das Entstehen dieses Buches sorgfältig realisierte. Ein ganz besonderer Dank gilt Gerhard Zweckbronner, der sich als Autor der Mühe unterzog, die Fülle des Materials zu strukturieren und daraus dieses gut lesbare und informative Buch zu schaffen. Er knüpft damit an seine erfolgreiche Arbeit im TECHNOSEUM an, in welchem er in den zurückliegenden Jahren diese von ihm beschriebenen Zukunftswerkstätten federführend eingerichtet hatte. Schließlich geht ein Dank an das Team des TECHNOSEUM, das mit seinen verschiedenen Arbeitsgruppen auf unterschiedlichen Ebenen nicht nur die interessanten Experimentierstationen entwickelt und eingerichtet hat, sondern auch die erforderlichen Bausteine in Form von Grafiken und Fotografien für diese Publikation erstellte.

Allen Leserinnen und Lesern und Freundinnen und Freunden des TECHNOSEUM wünsche ich eine gewinnbringende Lektüre!

Hartwig Lüdtke
Direktor des TECHNOSEUM

Dank

Mein erster Dank gilt Stefanie Wolf und Frank Wigger vom Verlag Springer Spektrum. Sie trugen vor etlichen Jahren die Idee zu diesem Buch an mich heran. Nicht denkbar wäre dieses Projekt freilich gewesen ohne die zuvor bereits geleisteten Arbeiten in der Dauerausstellung des TECHNOSEUM. Hier durfte ich in höchst inspirierender Teamarbeit mit Volker Benad-Wagenhoff, Walter Branner und Alexander Sigelen die sogenannten historischen Zukunftswerkstätten der Elementas konzipieren und einrichten, gemeinsam mit vielen weiteren Kolleginnen und Kollegen aus Museumspädagogik, Werkstatt, Grafik, Gestaltung und Medienproduktion sowie externen Herstellern von Mitmach-Stationen – ein kollegiales Zusammenwirken, das mir in freudiger Erinnerung bleibt.

Die Struktur dieser Experimentierfelder bestimmte auch den Aufbau des nun vorliegenden Buches. Der Projektmanagerin beim Verlag, Martina Mechler, ist zu verdanken, dass die recht heterogenen Materialien aus geschichtlicher Darstellung, Zitaten, biografischen Angaben, historischen Abbildungen sowie Fotos und Beschreibungen der Mitmach-Stationen eine didaktisch ansprechende Form gefunden haben. Dem Direktor des TECHNOSEUM, Hartwig Lüdtkke, sei gedankt für die spontane Bereitschaft, das Buch in die Herausgeberschaft des Museums zu übernehmen und aus dem Bildarchiv den Großteil der Abbildungen zur Verfügung zu stellen.

Ganz besonders danken möchte ich meiner Frau. Sie begleitete dieses Buchprojekt von Anfang an mit regem Interesse. Ihr verdanke ich wertvolle Hinweise, vor allem zur Darstellung der gegenwärtigen Verhältnisse und

VIII Dank

Entwicklungen. Ihre Korrekturvorschläge und Anregungen griff ich gerne auf, zumal sie dazu beitrugen, die Texte lesefreundlicher zu gestalten und komplexe Inhalte leichter verständlich zu machen.

Gerhard Zweckbronner

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Mechanisierung des Weltbildes – Griff nach der Herrschaft über die Natur	7
	Mathematik als universelles Ordnungsprinzip	7
	Galilei und die Idee vom freien Fall	8
	Newton und die Begründung der klassischen Mechanik	12
	Warum der Mond nicht auf die Erde fällt	14
	Das Rätsel der Gravitation	17
	Die wahre Kreisbewegung im absoluten Raum	18
	Vom Idealfall zur realen Maschine	21
	Francis Bacon und die Macht des Wissens	22
	Descartes und die Vision von der Herrschaft über die Natur	25
	Die Welt als Uhrwerk	28
3	Getreue Abbildung der Wirklichkeit? – Eine Frage der Perspektive	33
	Der Blick durchs Fenster und die Illusion der Räumlichkeit	33
	Mechanische Methoden für den praktischen Gebrauch	35
4	Jupitermonde und Fliegenbeine – Blick in neue Welten durch Fernrohr und Mikroskop	41
	Mit dem Fernrohr zu den Sternen	41
	Revolutionäre Entdeckungen am Himmel	45
	Fortschritte in der Beobachtungstechnik	48

X Inhaltsverzeichnis

Die endliche Geschwindigkeit des Lichts und die Weiten des Weltalls	51
Der tiefe Blick in die Vergangenheit	54
Das Mikroskop und die Welt des Allerkleinsten	57
Grenzen der Sinneswahrnehmung	60
5 Mechanisierung von Kopfarbeit – Rechnen mit Maschinen	65
Elementare Rechenhilfen	65
Die erste Rechenmaschine von Wilhelm Schickard	66
Addieren und Subtrahieren mit der Pascaline	69
Die „lebendige Rechenbank“ von Gottfried Wilhelm Leibniz	70
Der geglückte Zehner-Übertrag von Philipp Matthäus Hahn	72
Die Leibniz'sche Idee zu einer Dual-Rechenmaschine	75
Wenn alles der Zahl unterworfen ist	78
6 Statik und Dynamik – Mechanische Gesetze für die technische Praxis	81
Tragkräfte des Balkens	81
Gewölbestatik in Theorie und Praxis	87
Das schwingende Pendel	92
Vom Zeitfluss zum Pendeltakt	96
Die Uhr als globales Koordinierungsinstrument	97
Die Suche nach dem wahren Kraftmaß der Bewegung	102
Die unfehlbare mechanische Ordnung in der Leibniz'schen Welt	105
7 Die lebendige Kraft des Wassers – Vom Effekt zum Wirkungsgrad	109
Anfänge der Maschinenwissenschaft	109
Das Prinzip der lebendigen Kräfte im Maschinenbau	112
Wirkung des Wassers in Rad und Turbine	114
8 Kräfte der Luft und des Feuers – Neue Antriebsmaschinen für die Industrialisierung	121
Vakuum, ja oder nein?	121
Schießpulver und Wasserdampf	127
Mit der Dampfmaschine ins Kohle-Zeitalter	131
Mobile Dampfkraft und die Industrialisierung von Raum und Zeit	136
Der physikalische Zusammenhang zwischen Wärme und Bewegung	142
Verbrennungsmotoren und Kältemaschinen	145

Umbrüche in der Arbeitswelt und Erziehung zur Industrie	147
Technischer Fortschritt um den Preis neuer Abhängigkeiten und Gefährdungen	150
9 Elektrizität – Die „junge Riesin“	155
Natürliche und künstliche Blitze	155
Fließender Strom und Magnetismus	158
Telegrafieren von Kontinent zu Kontinent	161
Elektromotoren und Generatoren	164
Strom überall und jederzeit	166
Das Zeitalter der Elektrizität	169
10 Aufstieg in die Lüfte – Erfüllung des Traums vom Fliegen	175
Schweben im Luftmeer	175
Der Vogelflug als natürliches Vorbild	178
Die Vision vom motorisierten Flugverkehr	182
11 Die Welt im Kopf – Von optischen Täuschungen und virtuellen Realitäten	185
Bewegte Bilder	185
Wahrnehmungsgeschwindigkeit und Weltbild	187
Optische Täuschungen	189
Virtuelle Realitäten	192
12 Alles geregelt? – Mit Kybernetik ins Zeitalter der Information	195
Vom Fliehkraftregler zur Kybernetik	195
Wahrnehmen und Bewegen	198
Der Mensch als Regler im technischen System	203
„Intelligente“ Maschinen	206
Warnungen und Visionen auf dem Weg ins Informationszeitalter	209
13 Energiequellen im Überfluss? – Eigentlich ja, aber ...	213
Stetig wachsender Energieverbrauch pro Kopf	213
Die Sonne als „ewige“ Energiequelle	216
Die Vision von einer 2000-Watt-Gesellschaft	219
14 Resümee und Ausblick	221
Das Eisen in der Wunde	221
Schatten des Fortschritts	224

XII Inhaltsverzeichnis

Digitalisierung in einer Leibniz'schen Welt	227
Raumschiff Erde als Lebensraum	230
Unser Erbe an künftige Generationen	235
Personenverzeichnis	239
Hersteller-Nachweise zu den abgebildeten Mitmach-Stationen	245
Literatur	247
Stichwortverzeichnis	263



1

Einführung

Lässt man die rund 4,6 Milliarden Jahre Erdgeschichte im Zeitraffertempo innerhalb eines Jahres ablaufen, dann betritt der Mensch am 31. Dezember die Erde, in der letzten Stunde vor Mitternacht. Bald danach brennen hier die ersten von ihm entfachten Feuer. Das Industriezeitalter mit seinem gewaltigen Energie- und Rohstoffhunger bricht erst eine Sekunde vor Mitternacht an. Und doch hat der Mensch innerhalb dieser kurzen Zeitspanne durch Eingriffe in biologische, geologische und atmosphärische Prozesse die Erde so stark geprägt, dass Geowissenschaftler jetzt von einem neuen Erdzeitalter sprechen: vom Anthropozän, also der Menschenzeit.¹

In den letzten drei Jahrhunderten sind die Effekte des menschlichen Handelns auf die globale Umwelt eskaliert. Aufgrund der anthropogenen CO₂-Emissionen dürfte das Klima auf dem Planeten in den kommenden Jahrtausenden signifikant von der natürlichen Entwicklung abweichen. Insofern scheint es mir angemessen, die gegenwärtige, vom Menschen geprägte geologische Epoche als „Anthropozän“ zu bezeichnen.² (Paul J. Crutzen, 2011)

Mit der Mechanisierung des Weltbildes hatte sich im 17. Jahrhundert, am Beginn der Neuzeit, ein Naturverständnis entfaltet, das zunehmend auf Nutzung und Beherrschung der Natur ausgerichtet war. Die Himmelsmechanik lehrte, das Universum aus der Perspektive einer rotierenden und

¹Möllers, Schwägerl, Trischler: Anthropozän; Wikipedia: Anthropozän.

²Crutzen: Anthropozän, S. 171.

um die Sonne laufenden Erde zu betrachten, eines Planeten unter vielen. Auch der Mensch war damit aus dem Zentrum des Universums gerückt, es drehte sich nicht mehr alles um ihn. Die neuzeitliche Wissenschaft jedoch befähigte ihn, nach der Macht über die Natur zu greifen und sich wiederum, wenn auch auf andere Weise, in den Mittelpunkt des Weltgeschehens zu schieben.

Entstanden war diese Art des Umgangs mit der Natur also vor nur wenigen Generationen oder, um in dem oben skizzierten Zeitrasterbild zu bleiben, gut zwei Sekunden vor Jahresende – und zwar im geografisch begrenzten abendländischen Kulturkreis. Was hier aus Gelehrtenstuben, Laboratorien und Werkstätten hervorging, erlangte innerhalb kürzester Zeit als Technisierung unserer Lebenswelt über Europa hinaus globale und weit in die Zukunft reichende Dominanz.

Freilich haben Menschen schon immer mit den Stoffen und Kräften der Natur Artefakte geschaffen. Handwerkliche Erzeugnisse sowie Behausungen zum Schutz vor Regen und Kälte beispielsweise sind keine Naturprodukte, sondern Ergebnisse zweckgerichteten Handelns. Doch in der Neuzeit kam ein programmatischer Herrschaftsanspruch gegenüber der Natur hinzu. Und die rasch voranschreitende Naturwissenschaft lieferte das nötige Verfügungswissen³ für die systematische Schaffung einer technisierten, zweiten Natur⁴ – für eine Weltbevölkerung, die in den letzten dreihundert Jahren auf mehr als das Zehnfache angewachsen ist.

Es setzte eine Dynamik der gesellschaftlich organisierten Erkenntnis-suche ein, heutzutage noch angefacht durch die international betriebene Forschung und Entwicklung in Firmen und Universitäten – ein Prozess, der nach unserem jetzigen Wissenschaftsverständnis nie abgeschlossen sein wird, denn mit jedem gelösten Problem tun sich wieder neue Fragen und Forschungsfelder auf.⁵ Die Zahl der wissenschaftlich tätigen Personen steigt von Jahr zu Jahr, die Menge an Information und Wissen wächst explosionsartig.⁶ Das hat auch zu einer beschleunigten Umgestaltung unserer Lebenswelt beigetragen.

Wäre ein Mensch der römischen Antike am Vorabend der industriellen Revolution in England wieder auf die Welt gekommen, dann „hätte er sich in einer Gesellschaft wiedergefunden, die er ohne Schwierigkeit verstanden hätte“, wie der englische Entwicklungsbiologe Conrad Hal

³ Mittelstraß: Leonardo-Welt, S. 40.

⁴ Lenk: Sozialphilosophie, S. 249–296.

⁵ Mittelstraß: Leonardo-Welt, S. 83–88.

⁶ Wikipedia: Informationsexplosion.

Waddington schrieb.⁷ Doch landete jener Zeitreisende heute in einem der hochindustrialisierten Länder, dann stünde er ratlos vor einer für ihn vollkommen fremden Welt. Er bestaunte technische Wunderdinge, die für uns Alltag geworden sind. Die Einführung vieler solcher Dinge haben wir noch selbst erlebt, denn innerhalb einer Generation vollzieht sich gegenwärtig ein Wandel der Lebensweise, der sich vormals über Jahrhunderte erstreckte. Damit ist auch unsere Lern- und Anpassungsfähigkeit permanent gefordert.

Der industrielle Mensch ist einem Prozess unterworfen, der ihn ständig zwingt, auf dem Laufenden zu bleiben. In der landwirtschaftlichen Gesellschaft ist der alte Mensch der Wissende: in der industriellen dagegen ist er ein Gestriger.⁸ (Carlo M. Cipolla, 1976)

Wir können uns in den modernen Industriegesellschaften ein Leben ohne technisches Umfeld kaum mehr vorstellen. Der ursprünglichen, ersten Natur entfremdet, den tages- und jahreszeitlichen Rhythmen weitgehend entwöhnt und auf die zweite Natur rund um die Uhr angewiesen, sind wir letztlich von beiden, der Biosphäre wie der Technosphäre, existentiell abhängig.

Nun ist kein Zweifel an der zunehmenden Daseins-Abhängigkeit der Menschen von ihrem neuen, so konstruierten Milieu möglich, d. h. das physische Überleben setzt das störungsfreie Funktionieren der Energiebetriebe, der Wasserversorgung, der Verkehrs- und Nachrichtenmittel, der chemischen Industrie usw. voraus. War die Abhängigkeit des Menschen früherer Zeiten von der Natur drastisch, so steigt sie jetzt noch in dem selbstgeschaffenen Kulturmilieu, denn mit seinen natürlich-organischen Hilfsmitteln und dem, was er mit seinen Händen zuwege brächte, könnte sich ein Einzelner zwar eine Weile in der rohen Natur, aber keine drei Tage in einem nichtfunktionierenden technisch-industriellen System halten.⁹ (Arnold Gehlen, 1965)

Die Grenzen zwischen Mensch, Technik und Umwelt sind ins Fließen geraten. Erste und zweite Natur sind nicht mehr voneinander zu trennen. Der Mensch lebt, wie alle Organismen, in enger Wechselwirkung mit einer Umwelt, die sich unter seinen Eingriffen immer rascher wandelt und

⁷Waddington: *Ethical Animal*, S. 13.

⁸Cipolla: *Industrielle Revolution*, S. 9.

⁹Gehlen, *Anthropologische Ansicht*, S. 112.

die ihn wiederum prägt. Als Homo faber und Homo creator schöpferisch gestaltend, ist er Treibender und Getriebener zugleich. Seine doppelte Abhängigkeit von Biosphäre und von Technosphäre setzt ihn immer mehr unter Zugzwang, eine ihm zuträgliche Umwelt sicherzustellen.

Sobald man sich einmal auf den Weg zur Industrialisierung begeben hat, ist keine Umkehr und kein Halt mehr möglich. Maschinen diktieren das Tempo unserer Entwicklung. Und paradoxerweise beginnt dieser Prozess, der in der Vergangenheit die schlimmsten Probleme löste, andere Probleme aufzuwerfen, auf die wir weder eingestellt noch vorbereitet sind.¹⁰ (Carlo M. Cipolla, 1976)

Strenggenommen diktieren Maschinen natürlich weder Tempo noch Gang der Entwicklung. Höchstens lassen wir zu, dass sie solch eine Macht entfalten, oder wir benutzen sie, um Sachzwänge zu konstruieren und Interessen durchzusetzen. Aber im Grunde sind Maschinen Teil unserer selbstgeschaffenen Technosphäre und somit gleichfalls Menschenwerk – ebenso wie die Bewirtschaftung unseres Planeten, die immer noch primär auf Ausbeutung und permanentes Wachstum angelegt ist statt auf Nachhaltigkeit. Und Menschenwerk ließe sich dank besseren Wissens und gemeinschaftlichen Wollens auch wieder verändern und an neue Erfordernisse anpassen.

Wer sich in unserer anthropogenen Lebenswelt besser orientieren und mögliche Zukünfte vorausdenken möchte, könnte auch einen Blick in die Zukunftswerkstätten der Vergangenheit werfen: jener Zeiten des Aufbruchs, in denen die mentalen und wissenschaftlich-technischen Grundlagen unserer Gegenwart geschaffen wurden. Und höchst aufschlussreich ist es, zu sehen, welche Fortschrittserwartungen, Zukunftsvisionen, aber auch Befürchtungen die Entwicklung bis heute begleitet haben.

Im Naturwissenschafts- und Technikverständnis der Neuzeit wuchs dem Experiment eine zentrale Rolle zu als Prüfstein für die Gültigkeit wissenschaftlicher Aussagen. Deshalb sind in diesem Buch auch anschauliche Experimente und Demonstrationen Begleiter auf dem Weg vom 17. Jahrhundert bis in unsere Gegenwart. Die Darstellung stützt sich auf Mitmach-Stationen, die das Mannheimer TECHNOSEUM in den historischen Zukunftswerkstätten seiner Elementas seit 2004 eingerichtet hat. Der Streifzug durch die Neuzeit soll ein Grundverständnis für naturwissenschaftlich-

¹⁰Cipolla: Industrielle Revolution, S. 9.

technische Zusammenhänge und Funktionsweisen vermitteln und in groben Zügen historische Entwicklungen nachzeichnen.

Welche Aufgaben uns daraus nun erwachsen sind und wie Zukunftsperspektiven aussehen könnten, ist Gegenstand abschließender Betrachtungen. Jetzt liegt es an uns, wie es weitergeht.¹¹ Wir müssen entscheiden, wie wir künftig leben wollen, welche Werte uns wichtig sind und wie wir eine Balance finden in dem unauflösbaren Dilemma: Existenzsicherung und Lebensqualität dank Technik auf der einen Seite und Gefährdung von Leben durch eben diese Technik auf der anderen.¹² Vor allem aber müssen wir zukunftsfähige Formen globalen Wirtschaftens finden, müssen kommende Generationen in die Entscheidungen von heute mit einbeziehen. Nur so können wir der erweiterten Verantwortung gerecht werden, Kräfte, Stoffe und Wirkprinzipien der Natur mit der gebotenen Nachhaltigkeit in einer Weise zu nutzen, dass auch unsere Nachfahren noch eine lebenswerte Umwelt vorfinden.

¹¹ Landesmuseum für Technik und Arbeit: Mythos Jahrhundertwende, S. 184–318.

¹² Poser: Technodizee.



2

Mechanisierung des Weltbildes – Griff nach der Herrschaft über die Natur

Mathematik als universelles Ordnungsprinzip

Heute erscheint es uns als selbstverständlich, dass die Naturgesetze universell gültig sind: im kosmischen Geschehen wie auf der Erde, die wir als Teil des Kosmos begreifen. Aber diese Erkenntnis ist erst gut 400 Jahre alt. Sie ist Kern der neuzeitlichen Naturwissenschaft. Der freie Fall eines Steines auf der Erde und die Bewegungen der Himmelskörper zum Beispiel folgen denselben Naturgesetzen. Das war die grundlegend neue Erkenntnis, wie sie Galileo Galilei und Isaac Newton im 17. Jahrhundert formulierten.¹ Zur gleichen Zeit verlor die Erde trotz heftigen Widerstands der Kirche ihre zentrale Stellung im Kosmos und damit im Schöpfungswerk Gottes. Astronomische Messungen und Beobachtungen hatten genügend Indizien dafür geliefert, dass die Erde wie die anderen Planeten um die Sonne kreist, die nun ins Zentrum rückte.

Wenn auch die Naturwissenschaft sich immer mehr von der Theologie löste, blieb der Schöpfergott im Denken der Forscher noch präsent. Mathematik galt nach wie vor als Ordnungsprinzip einer Welt, die Gott dem biblischen Buch der Weisheit zufolge nach Maß, Zahl und Gewicht erschaffen hatte. Messend, zählend und wiegend wollte man deshalb die Welt „zu Gottes Ehren und zum Wohle des Nächsten“ erkennen und gestalten.²

¹ Hermann: Weltreich, S. 7–25, 39–67; Hermann: Lexikon Geschichte der Physik, S. 114–118 (Galilei), 252–259 (Newton, Newtonsche Axiome).

² Stöcklein: Leitbilder.

Jener höchste Baumeister hat keineswegs dieses Weltgebäude aufs Geratewohl geschaffen, sondern es mit Maßen, Zahlen und Verhältnissen sehr weise angereichert und die durch wunderbare Harmonie eingeteilte Zeit hinzugefügt.³ (Johann Valentin Andreae, 1619)

Mathematik war somit der Schlüssel zum Weltverständnis. Oder, wie Galilei es ausdrückte: Das Buch des Universums sei verfasst „in der Sprache der Mathematik, und deren Zeichen sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Wort davon zu verstehen“.⁴ Das sollte nun auch für die irdische Welt des Wandels, des Entstehens und Vergehens gelten, nicht nur für die ewig kreisenden idealen Bewegungen der Gestirne, wie es der platonischen Tradition entsprach.⁵

Galilei und die Idee vom freien Fall

Nichts in der Natur sei älter als die Bewegung, meinte Galilei, als er sich anschickte, darüber eine „ganz neue Wissenschaft“⁶ zu begründen: die Wissenschaft von der gleichförmigen und der beschleunigten Bewegung, also auch des freien Falls. Wie er dabei vorging und zu welchen Ergebnissen er kam, erlangte epochale Bedeutung.

Es waren mathematische Überlegungen und Gedankenexperimente, die Galilei zu seinen Fallgesetzen führten – und nicht, wie immer wieder erzählt wird, Versuche am schiefen Turm von Pisa. Genau genommen handelt es sich um die Gesetze des freien Falls im Vakuum. Real beobachten ließ sich solch ein Fall damals allerdings nicht, da man noch keinen luftleeren Raum erzeugen konnte. Warum befasste sich Galilei dann mit dem freien Fall im Vakuum? Weil es ihm hier um die Idee der Fallbewegung im mathematischen Bauplan der Welt ging – eine Idee, die hinter allen realen Fallbewegungen steht. Dabei war die Vorstellung eines Vakuums schon kühn genug. In der Frage, ob es einen Raum geben könnte ohne etwas darin, eine absolute Leere, schieden sich noch lange die Geister.

Auch wenn der Fall im Vakuum nicht zu beobachten war, konnte sich Galilei ihm doch durch folgende Überlegung nähern: Was geschieht, wenn

³ Andreae: Christianopolis, S. 90.

⁴ Zitiert nach Hall: Naturwissenschaftliche Methode, S. 103.

⁵ Hermann: Weltreich, S. 10.

⁶ Galilei: Unterredungen, S. 140.

man unterschiedlich schwere Körper wie Gold, Blei und Holz in unterschiedlich schweren Medien wie Quecksilber, Wasser und Luft fallen lässt? In Quecksilber fällt nur Gold; Blei und Holz schwimmen. In Wasser fallen Gold und Blei, letzteres allerdings langsamer; Holz schwimmt. In Luft fallen Gold, Blei und Holz, und zwar fast gleich schnell. Je leichter also das Medium ist, in dem die Bewegung stattfindet, desto geringer sind die Geschwindigkeits-Unterschiede.

Galilei schilderte dies 1638 in seinen „Unterredungen und mathematischen Demonstrationen“, einem fiktiven Gespräch zwischen Vertretern unterschiedlicher Denkrichtungen. Und er ließ den Vertreter seines Standpunktes den Schluss ziehen: „Angesichts dessen glaube ich, dass, wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden.“ Der Kontrahent in diesem Disput hielt das für eine gewagte Behauptung: „Ich meinerseits werde nie glauben, dass in ein und demselben Vakuum, wenn es in demselben eine Bewegung gibt, eine Wollenflocke ebenso schnell wie Blei fallen werde.“⁷

Was Galilei als Grenzfall seiner Überlegungen beschrieb, können wir längst experimentell nachweisen. Und wir würden damit wohl auch den eben zitierten Zweifler überzeugen. Lässt man in einem transparenten, mit Luft gefüllten Rohr zum Beispiel eine Daunenfeder und eine Holzkugel fallen, dann zeigt sich das, was wir aus dem Alltag gewohnt sind: Die Feder fällt deutlich langsamer als die Kugel, denn deren Form bietet einen wesentlich kleineren Luftwiderstand. Saugen wir aber mit einer Vakuumpumpe das Rohr luftleer und lassen Feder und Kugel wieder fallen, dann sind beide gleich schnell. Ihre unterschiedlichen Formen spielen jetzt keine Rolle mehr, da es im Vakuum keinen Luftwiderstand gibt. Allein Schwerkraft und Trägheitskraft sind nun wirksam. Auf die schwerere Kugel wirkt zwar eine größere beschleunigende Gravitation, aber eine entsprechend größere Trägheit wirkt dieser Beschleunigung entgegen. Bei der Feder ist es genau umgekehrt: Die beschleunigende Schwerkraft ist geringer, dafür aber auch die zu überwindende Trägheit. Deshalb fallen im leergepumpten Rohr beide gleich schnell – entsprechend den Gesetzen des freien Falls im Vakuum.

Auch ohne Vakuumpumpe lässt sich leicht zeigen, dass Körper allein wegen des Luftwiderstandes unterschiedlich schnell fallen. Man braucht dazu nur einen Stein und einen Bogen Papier. Natürlich fällt der Stein viel schneller als das hernieder schwebende Blatt Papier. Ist das Papier aber fest zusammengeknüllt, dann fallen beide gleich schnell zu Boden.

⁷Galilei: Unterredungen, S. 65.

In einem weiteren, scharfsinnigen Gedankenexperiment stützte sich Galilei nicht auf die Extrapolation, also die gedankliche Fortführung realer Fallbewegungen unterschiedlich schwerer Körper in Medien verschiedener Dichte bis hin zum idealen Fall im Vakuum. Vielmehr wollte er überprüfen, ob die aristotelische Auffassung logisch stimmig ist, dass ein Körper umso schneller falle, je schwerer er sei. Was geschieht, so fragte er, wenn man zwei unterschiedlich große Körper desselben Materials fallen lässt – einmal jeden für sich und einmal beide miteinander verbunden?

Nehmen wir mit Aristoteles an, der große und damit schwerere Körper fielen schneller als der kleine leichtere. Wie schnell fielen sie dann, wenn sie miteinander verbunden wären? Würde sich eine mittlere Geschwindigkeit einstellen, weil der leichtere Körper nun den schwereren bremst und der schwerere Körper den leichteren mitziehen muss? Oder würden sie im Verbund schneller fallen als zuvor der schwerere Körper, weil sie zusammen ja noch schwerer sind als dieser? Jede Überlegung für sich wäre logisch, aber die Schlussfolgerungen widersprechen einander. Also muss die Annahme falsch sein, dass unterschiedlich schwere Körper unterschiedlich schnell fallen. Daher folgt auch aus diesem Gedankenexperiment: Alle Körper fallen gleich schnell.⁸

Doch Galilei begnügte sich nicht mit dieser Erkenntnis. Er wollte auch herausfinden, in welchem Maße die Geschwindigkeit eines Körpers beim freien Fall zunimmt. Überzeugt von der „Ordnung der Natur in allen ihren Verrichtungen, bei deren Ausübung sie die allerersten einfachsten und leichtesten Hilfsmittel zu verwenden pflegt“, suchte er nach der einfachsten Gesetzmäßigkeit für die Zunahme der Fallgeschwindigkeit. Und er fand das Gesetz der stetigen Beschleunigung, „da in irgend welchen gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszunahmen sich addieren“.⁹

Erst nach diesen Überlegungen führte Galilei sein berühmtes Fallrinnen-Experiment durch (Abb. 2.1). Denn auf die mathematische Herleitung der Fallgesetze hatte nach seinen Worten die Erhärtung durch Experimente zu folgen; diese bildeten „das Fundament des ganzen späteren Aufbaues“.¹⁰ Er ließ eine Messingkugel auf einer schiefen Ebene nach unten rollen und maß die Zeiten, in denen sie unterschiedliche Strecken zurücklegte. Doch warum wählte er die schiefe Ebene, statt die Kugel einfach fallen

⁸Galilei: Unterredungen, S. 57–59.

⁹Galilei: Unterredungen, S. 147.

¹⁰Galilei: Unterredungen, S. 162.

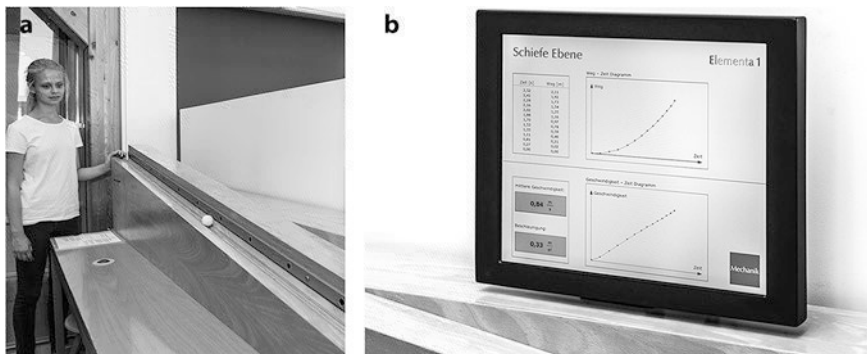


Abb. 2.1 Mitmach-Station: Fallrinnen-Versuch. Dieser Versuch lässt sich mit modernen Mitteln nachbauen. Startet man die Kugel per Knopfdruck (a), dann wird damit auch die Zeitmessung ausgelöst. Immer wenn die Kugel an einem der Messpunkte längs der Rinne vorbeirollt, wird die Zeit genommen und in der Tabelle auf dem Monitor angezeigt. Ist die Kugel unten angekommen, werden die Tabellenwerte in zwei Diagramme übertragen (b): das Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm unten und das Weg-Zeit-Diagramm oben.

Beide Diagramme zeigen deutlich: Wie beim freien Fall wächst die Geschwindigkeit linear mit der Zeit, der Weg quadratisch mit der Zeit. Der Beschleunigungs-Wert bleibt konstant. Seine Größe hängt von der Neigung der Fallrinne ab. Auf die Kugel wirkt nur eine kleinere Komponente der Schwerkraft, der sogenannte Hangabtrieb. Je geringer die Neigung einer Rinne, desto geringer der Hangabtrieb und damit auch die Beschleunigung. Sie beträgt bei der hier gewählten Neigung der Fallrinne etwa $0,33 \text{ m/s}^2$. Beim freien Fall wäre sie rund 30-mal so groß: $9,81 \text{ m/s}^2$. (© TECHNOSEUM, Foto: Klaus Luginsland)

zu lassen? Weil die Kugel im freien Fall zu schnell gewesen wäre, als dass Galilei die kurzen Zeitintervalle mit den damaligen Methoden hätte genau genug erfassen können, und weil das Herabrollen der Kugel im Grunde als eine verlangsamte Fallbewegung gedeutet werden kann, bei der dieselben Zusammenhänge zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg und Zeit bestehen wie beim freien Fall.

Voraussetzung für diesen Kunstgriff war allerdings die Einsicht, dass die Verwendung der schiefen Ebene als mechanisches Hilfsmittel legitim ist, um etwas über einen natürlichen Vorgang, nämlich die freie Fallbewegung, zu erfahren. Galilei stellte sich damit gegen die aristotelische Tradition, der zufolge mechanisch erzwungene und natürliche Bewegungen etwas völlig Verschiedenes waren: konnte man doch mit der Mechanik die Natur scheinbar überlisten, also gegen sie handeln, indem man zum Beispiel mit kleinen Kräften große Lasten hob. Nun, die schiefe Ebene könnte man schon als eine List deuten, zu der Galilei hier gegriffen hatte, aber jetzt diente sie dazu, der Natur Gesetze zu entlocken, die sie sonst nicht preisgegeben hätte.

Die Zeit bestimmte er mit einer Art Wasserauslauf-Uhr: Das Gewicht von ausfließendem Wasser aus einem Gefäß war das Zeitmaß. Und er fand stets, „dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten: und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene“.¹¹ Im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigte das Experiment also Galileis Überlegungen.

Zur Ausmessung der Zeit stellten wir einen Eimer voll Wasser auf, in dessen Boden ein enger Kanal angebracht war, durch den ein feiner Wasserstrahl sich ergoss, der mit einem kleinen Becher aufgefangen wurde, während einer jeden beobachteten Fallzeit: das dieser Art aufgesammelte Wasser wurde auf einer sehr genauen Waage gewogen; aus den Differenzen der Wägungen erhielten wir die Verhältnisse der Gewichte und die Verhältnisse der Zeiten, und zwar mit solcher Genauigkeit, dass die zahlreichen Beobachtungen niemals merklich (di un notabile momento) voneinander abwichen.¹² (Galileo Galilei, 1638)

Die Beschleunigung wäre null, wenn die Rollbahn überhaupt keine Neigung mehr hätte. Dann würde die Kugel, einmal angestoßen und Reibungsfreiheit vorausgesetzt, ohne Beschleunigung und ohne Verzögerung unaußhörlich horizontal weiter rollen, genauer: auf einem Kreisbogen um den Erdmittelpunkt, denn jede Horizontale auf der Erdoberfläche ist ein solcher Kreisbogen. Galilei, der dies erkannt hatte, war somit dem Newton'schen Trägheitsgesetz bereits ziemlich nahe gekommen.

Newton und die Begründung der klassischen Mechanik

Newton veröffentlichte 1687 sein Hauptwerk über „Mathematische Prinzipien der Naturlehre“. Mit diesem wahrhaft epochalen Werk begründete Newton das Zeitalter der klassischen Mechanik. Nach ihm, so urteilte zweihundert Jahre später der Physiker Ernst Mach, sei kein wesentlich neues Prinzip mehr ausgesprochen worden: „Was nach ihm in der Mechanik geleistet worden ist, bezog sich durchaus auf die deduktive, formelle und mathematische Entwicklung der Mechanik auf Grund der Newton'schen Prinzipien.“¹³ Und diese waren für Mach immer noch

¹¹ Galilei: Unterredungen, S. 163.

¹² Galilei: Unterredungen, S. 163.

¹³ Mach: Mechanik, S. 175.



Abb. 2.2 Mitmach-Station: Luftkissen-Tisch. Mit modernen Mitteln, durch eine Art Luftkissentechnik, kann man dem Newton'schen Ideal der gleichförmig geradlinigen Bewegung nahe kommen. Wenn durch die regelmäßig angeordneten kleinen Löcher einer Tischfläche von unten Luft geblasen wird, gleitet eine leichte Scheibe fast reibungslos darüber. Einmal angestoßen, bewegt sie sich zunächst ohne erkennbare Verzögerung auf gerader Linie. Stößt sie gegen den Rand, dann prallt sie zurück und nimmt ihre nahezu gleichförmig geradlinige Bewegung wieder auf. Erst nach einiger Zeit kommt sie langsam zum Stillstand, da trotz Reibungsverminderung kleine Bremskräfte wirken. (© TECHNOSEUM, Foto: Klaus Luginsland)

„genügend, um ohne Hinzuziehung eines neuen Prinzips jeden praktisch vorkommenden mechanischen Fall, ob derselbe nun der Statik oder der Dynamik angehört, zu durchschauen“.¹⁴

Sein Trägheitsgesetz war das erste von drei Gesetzen, die Newton an den Anfang seiner Grundsätze der Bewegung stellte: „Jeder Körper verharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.“ Und wenn Kräfte auf ihn einwirken, dann kommt das zweite Newton'sche Grundgesetz zur Geltung, das wir heute als „Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“ kennen. Das dritte Gesetz besagt: „Die Wirkung ist stets der Gegenwirkung gleich, oder die Wirkungen zweier Körper auf einander sind stets gleich und von entgegengesetzter Richtung.“ Dieses Gegenwirkungsprinzip wird meist auf die kurze Formel gebracht: Actio gleich Reactio.¹⁵

¹⁴Mach: Mechanik, S. 239.

¹⁵Newton: Principien, S. 32.

Wie Galilei bei seinen Fallgesetzen ging auch Newton zunächst von einer idealisierten Bewegung aus, die sich in Wirklichkeit auf der Erde nirgends beobachten lässt: der gleichförmig geradlinigen Bewegung ohne jegliche Krafteinwirkung (Abb. 2.2). Dies widerspricht aber nur deshalb jeder Alltagserfahrung, weil immer irgendwelche Kräfte am Werk sind, die beschleunigen, bremsen oder von der geradlinigen Bewegung ablenken. Und die Wirkung genau solcher Kräfte auf einen Körper beschreibt sein zweites Gesetz. Es gilt für beliebige Kräfte. Mit ihm konnte Newton mathematisch exakt die reale Bewegung von Körpern unter der Einwirkung äußerer Kräfte beschreiben.

Warum der Mond nicht auf die Erde fällt

Newtons Hauptaugenmerk galt der Wirkung einer besonderen Kraft: der Schwerkraft. Nach der bekannten Erzählung seiner Nichte beobachtete Newton als Dreiundzwanzigjähriger, wie Äpfel von einem Baum fielen, und sinnierte darüber, welche Kraft sie wie alle Körper zwingt, sich in Richtung Erdmittelpunkt zu bewegen.¹⁶ Eine alltägliche Beobachtung, unzählige Male schon in der Menschheitsgeschichte gemacht, brachte Newton auf die Idee einer universell wirkenden Schwerkraft. Sie wirkt ebenso auf den Mond, wenn auch in geringerem Maße, zieht ihn ständig vom geradlinigen Weg ab und zwingt ihn auf seine Bahn um die Erde. Dass er nicht wie ein Apfel herunterfällt, liegt an der Flieh- oder Zentrifugalkraft, die als Reaktion auf die Anziehungskraft der Erde nach außen wirkt. Newton schrieb gleichartigen Wirkungen dieselben Ursachen zu und stellte daher fest: Alle Körper sind gegeneinander schwer, Anziehungskräfte wirken somit auch zwischen Erde, Mond, Planeten und Sonne. Dass der Mond auf die Erde ebenfalls anziehend wirkt, zeigte sich ihm besonders deutlich an Ebbe und Flut.

Sind endlich alle Körper in der Umgebung der Erde gegen diese schwer, und zwar im Verhältnis der Menge der Materie in jedem; ist der Mond gegen die Erde nach Verhältnis seiner Masse, und umgekehrt unser Meer gegen den Mond schwer; hat man ferner durch Versuche und astronomische Beobachtungen erkannt, dass alle Planeten wechselseitig gegeneinander und die Kometen gegen die Sonne schwer sind; so muss man [...] behaupten, dass alle Körper gegeneinander schwer seien.¹⁷ (Isaac Newton, 1687)

¹⁶Hermann: Weltreich, S. 44.

¹⁷Newton: Principien, S. 381.

Sein Gravitationsgesetz gibt an, wie groß diese Kräfte sind, wenn man die Massen der Körper und ihren Abstand voneinander kennt. Mit diesem Gesetz und dem Trägheitsgesetz lassen sich sowohl die Bewegungen eines geworfenen Steines auf der Erde berechnen wie auch die Umlaufbahnen des Mondes um die Erde und der Planeten um die Sonne – und, könnte man inzwischen hinzufügen, die Bahnen der Satelliten und Raumsonden, die mittlerweile um die Erde kreisen oder in den Weiten des Sonnensystems unterwegs sind.

Die Versuche mit der Schwerkraft führten gemeinsam mit den Beobachtungen Keplers den englischen Philosophen [Newton] zur Entdeckung der Kraft, die die Planeten in ihren Bahnen hält. Er lehrte gleichzeitig mit der Erkenntnis der Ursachen ihrer Bewegung deren Berechnung mit einer Genauigkeit, die man erst nach jahrhundertelanger Arbeit hätte erwarten können.¹⁸ (Jean Lerond d'Alembert, 1751)

Newton bestätigte damit auch die Kepler'schen Gesetze der elliptischen Planetenbahnen um die Sonne, die dieser Anfang des 17. Jahrhunderts bereits formuliert hatte (Abb. 2.3). Johannes Kepler war auf die Bahnform der Ellipse durch Auswertung von Beobachtungs-Daten gekommen. Mit sorgfältig gebauten Instrumenten und präzisen Messmethoden hatte der dänische Astronom Tycho Brahe hierfür die Datenbasis geschaffen. So konnte Kepler in der Sprache der Mathematik die geometrischen Gesetze der Planetenbewegung um die Sonne formulieren – also die Bewegungsgesetze im revolutionär neuen heliozentrischen Weltsystem – bevor Newton sie aus seinen Gravitations- und Bewegungsgesetzen herleitete.¹⁹

Dass irdische Mechanik und Himmelsmechanik nahtlos ineinander übergehen, zeigte Newton mit einer bestechenden Überlegung, wobei er allerdings vom Luftwiderstand in der Erdatmosphäre absah: Ein geworfener Stein wird vom geradlinigen Weg abgelenkt und fällt schließlich auf die Erde. Vergrößert man seine Geschwindigkeit, dann wird er einen immer weiteren Bogen beschreiben, bis er sich um die ganze Erde herum bewegt und zum Ausgangspunkt zurückkehrt, und zwar mit unverminderter Geschwindigkeit, weshalb weitere Erdumrundungen folgen könnten.²⁰

¹⁸Alembert: Enzyklopädie, S. 151.

¹⁹Hermann: Weltreich, S. 26–38; Hermann: Lexikon Geschichte der Physik, S. 170–176 (Kepler, Keplersche Gesetze).

²⁰Newton: Principien, S. 514–515.



Abb. 2.3 Mitmach-Station: Potential-Trichter. Einen Eindruck, wie solche Planetenbahnen zustande kommen, kann ein sogenannter Potential-Trichter mit rollenden Kugeln vermitteln. Seine Neigung nimmt nach innen stetig zu, so dass die Hangabtriebskraft, die auf die Kugeln wirkt und sie zum Zentrum treibt, mit sinkendem Abstand immer größer wird. Somit stellt der Potential-Trichter eine mechanische Analogie des Gravitationsfeldes dar: Je kleiner der Abstand vom Gravitationszentrum,, desto stärker die Anziehungskraft.

Kugeln, die längs des Trichterrandes tangential angeschoben wurden, laufen auf schwach elliptischen Bahnen wie Planeten. Schräg gestartete Kugeln bewegen sich auf stark elliptischen Bahnen. Sie rollen beschleunigt nach innen, werden in Zentrumsnähe schwungvoll umgelenkt und laufen, wieder langsamer werdend, nach außen, bis sie erneut nach innen schwenken und sich das ganze Spiel von Annäherung und Entfernung wiederholt. Mit ihren großen Unterschieden von Nähe und Ferne zum Zentrum bewegen sie sich eher wie Kometen. Allen Bahnen, ob schwach oder stark elliptisch, ist eines gemeinsam: Bei großem Abstand vom Zentrum sind die Geschwindigkeiten klein und mit Annäherung ans Zentrum nehmen sie zu, gemäß den Kepler'schen Gesetzen und Newtons Berechnungen. (© TECHNOSEUM, Foto: Klaus Luginsland)

Denke man sich nun Körper, die aus immer größeren Höhen von 1000 oder mehr Meilen horizontal fortgeworfen werden, so werden sie je nach Geschwindigkeit und Schwerkraftwirkung kreisförmige oder elliptische Bahnen beschreiben und könnten sich nach Art der Planeten fortbewegen und die Himmel durchwandern.²¹ Was Newton hier als Gedankenexperiment ausführte, ist mit dem Start ins Satelliten-Zeitalter 1957 Realität geworden. Bei Geschwindigkeiten um die 27.000 Kilometer pro Stunde

²¹Newton: Principien, S. 515.