

Erkenntnis und Experiment

Zur wissenschaftshistorischen Bedeutung und
erkenntnistheoretischen Funktion des
Fallrinnen-Experiments von Galileo Galilei

Jochen Sicars • j.sicars@t-online.de • www.sicars-didactica.de

Experiment und/oder Vernunft? – Induktiv oder/und deduktiv?

»Galilei kommt das große erkenntnistheoretische Verdienst zu, das Experiment und die Prüfung der aufgestellten Gesetzmäßigkeiten an Naturerscheinungen als letzte Instanz in die Naturwissenschaften eingeführt zu haben.« (Lüscher, 1967)¹

»Das von Galilei in die Naturforschung eingeführte induktive Verfahren ... gehört zu den wichtigsten physikalischen Arbeitsmethoden zur Auffindung von Naturgesetzen.« (Höfling, 1978)²

»Es ist oft behauptet worden, daß Galilei insofern Vater der modernen Naturwissenschaft sei, als er die empiristische, experimentelle Methode gegenüber der spekulativen, deduktiven Methode durchgesetzt habe. Ich denke jedoch, daß diese Auffassung genauerer Überlegung nicht standhält. Es gibt keine empirische Methode ohne spekulative Begriffs- und System-Konstruktion; und es gibt kein spekulatives Denken, dessen Begriffe bei genauerem Hinsehen nicht das empirische Material verraten, dem sie ihren Ursprung verdanken.« (Einstein, 1952)³

»Ich habe ein Experiment darüber angestellt, aber zuvor hatte die natürliche Vernunft mich ganz fest davon überzeugt, daß die Erscheinung (Fallbewegung, J.S.) so verlaufen müßte, wie sie tatsächlich verlaufen ist.« (Galilei, ca. 1610)⁴

»Als Galilei seine Kugeln die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen ... ließ, ... so ging allen Naturforschern ein Licht auf. Sie begriffen, daß die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurfe hervorbringt.« (Kant, 1787)⁵

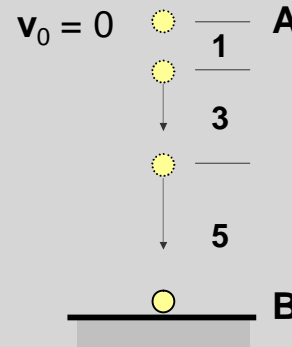
»Die Hauptschwäche des Aristoteles bestand darin, daß er zu empirisch war. ... Galilei tat einen großen Schritt, indem er wagte, die Welt so zu beschreiben, wie wir sie nicht erfahren.« (Weizsäcker, 1964)⁶

¹ Lüscher, Edgar: Experimentalphysik I, 1. Teil, Mannheim 1967, S. 78. ² Höfling, Oskar: Physik für die Sekundarstufe II, Bonn 1978 (Dümmler), S. 181 ³ Einstein, Vorwort in: Dialogo, a.O., S. XII. ⁴ Galilei, Galileo in einem Brief an Francesco Ingoli, zit. nach: Dijksterhuis, a.a.O., S.384. ⁵ Kant, a.a.O., S. 23. ⁶ Weizsäcker, a.a.O., S. 107.

• Gedankenexperimente: Senkrechter Fall zur Erde

Gemeinsam ist allen drei Bewegungen, dass sie die gleiche Form haben. Es sind nach Galilei gleichförmige Beschleunigungen, d.h. es geht um Bewegungen, denen »von Anfang an in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwächse ertheilt« werden.

(Galilei, Discorsi, S. 148)

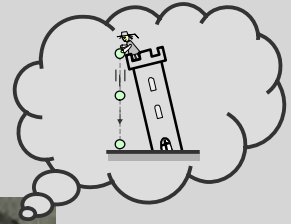


$$v = f (?)$$

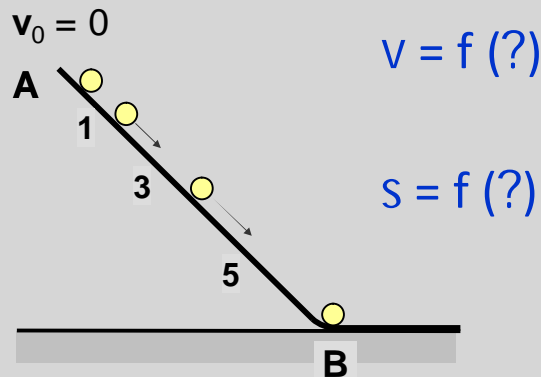
$$h = f (?)$$



Galilei ca. 1604



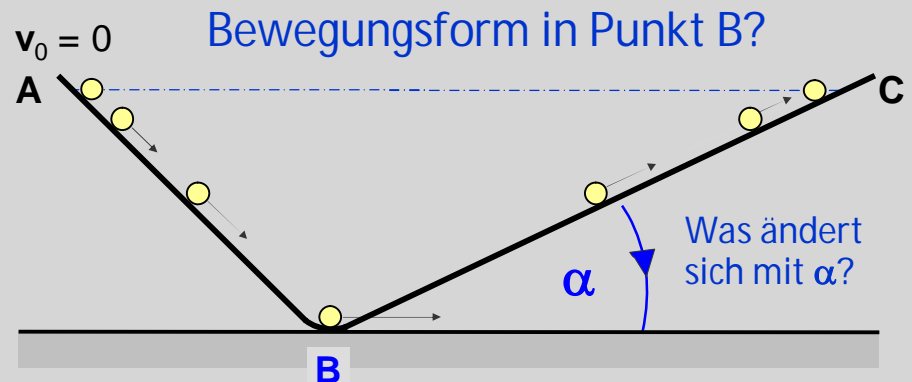
• Gedanken- und Realexperimente: Bewegung auf der geneigten Ebene



$$v = f (?)$$

$$s = f (?)$$

• Gedankenexperiment: Pendelbewegung auf einer reibungsfreien Kugelrinne



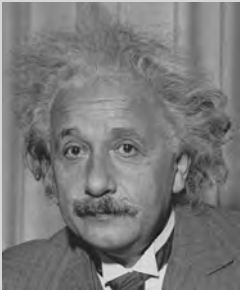
$$v_0 = 0$$

Bewegungsform in Punkt B?

α

Was ändert sich mit α ?

Galileis Begriff der Beschleunigung



Albert Einstein
1879-1955

Albert Einstein (Princeton, Juli 1952):

»Man kann sich heute nicht mehr vorstellen, was für eine große Phantasialeistung in der klaren Bildung des Begriffs der Beschleunigung und in der Erkenntnis der physikalischen Bedeutung dieses Begriffs lag.«¹

¹ Einstein, Albert: Galileo Galilei, Vorwort in: Dialogo, S. X.

»Gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung nenne ich diejenige, die von Anfang an in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwächse ertheilt.«
(Galilei, Discorsi, S. 148)

$$v \sim t \Rightarrow v = K \cdot t$$

$$K = ? \quad \text{Steigungsfaktor} \Rightarrow K = a$$

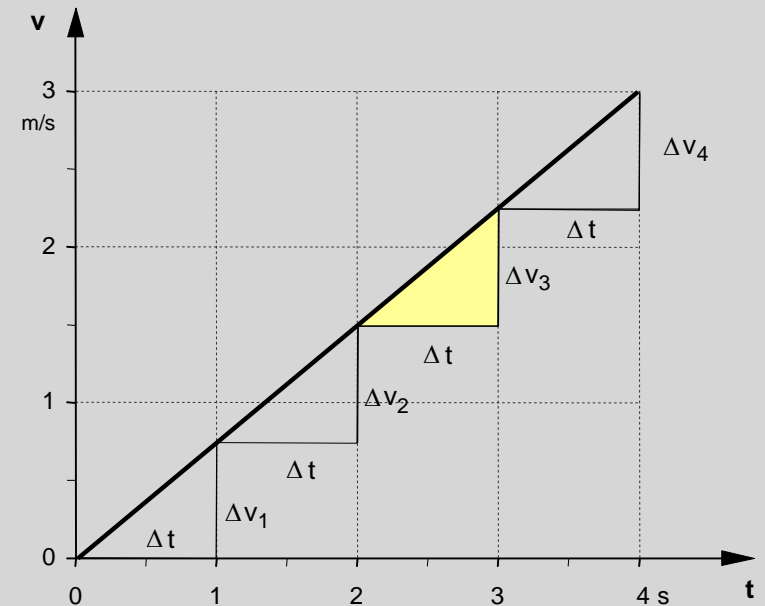
wobei $a = \text{const.}$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$v = a \cdot t$$

Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Beschleunigung

Darstellung im v-t-Diagramm



Galileis Herleitung des Fallgesetzes

- Wir setzen voraus das Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz (Folie 4):

$$v = a \cdot t$$

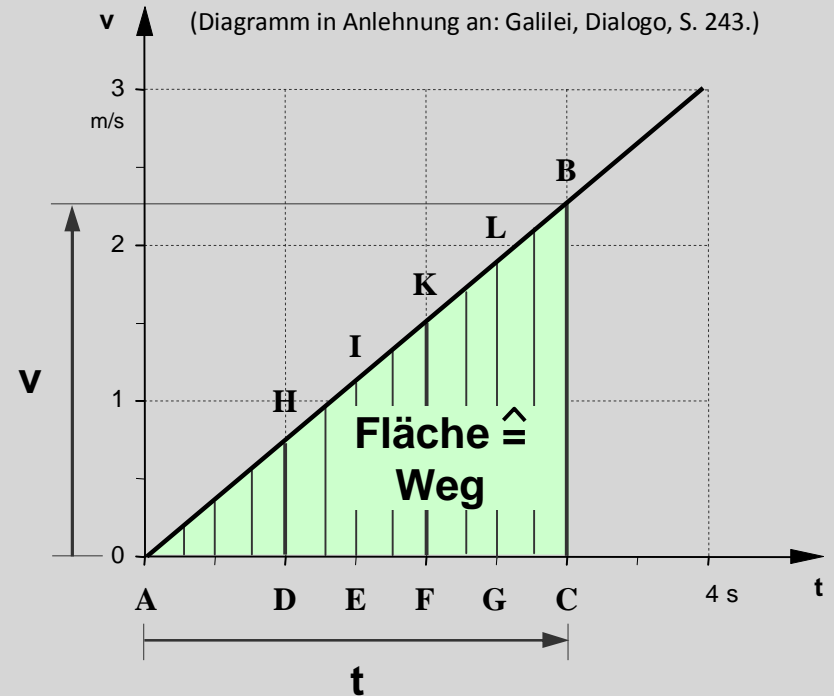
- und bestimmen die Fläche unter der v-t-Linie:

$$s = \frac{1}{2} \cdot v \cdot t \quad \text{mit} \quad v = a \cdot t$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t \cdot t \quad \Rightarrow \quad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Fallgesetz oder allgemeiner: Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Beschleunigung

Darstellung des Weges im v-t-Diagramm

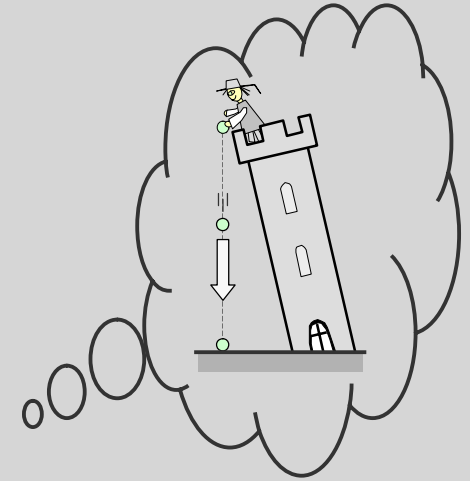


Galileis Argumente zur Darstellung von Wegen als Flächen unter der v-t-Linie

»Um also die unendliche Zahl der Geschwindigkeitsstufen zu versinnlichen, welche der Stufe DH vorangehen, muß man sich unendlich viele kleinere und immer kleinere Linien denken, welche man sich parallel zu DH von den unendlich vielen Punkten der Linie DA aus gezogen zu denken hat. Diese unendliche Zahl von Linien stellt uns aber schließlich die Fläche des Dreiecks AHD dar. So können wir uns vorstellen, jede von dem Körper zurückgelegte Strecke, ... habe unendlich viele Geschwindigkeitsstufen verbraucht und erforderlich gemacht, entsprechend der unendlich vielen Linien, welche man, vom Punkt A beginnend, parallel der Linie HD sich gezogen denkt.« Galilei, Dialogo, S. 244. Vgl. auch Dijksterhuis, a.a.O., S. 379 und S.381 f.

Ergebnis der Gedankenexperimente zum senkrechten Fall

- Die Geschwindigkeit fallender Körper ist unabhängig von ihrem Gewicht:
»Ohne viel Versuche können wir durch eine kurze, bindende Schlussfolgerung nachweisen, wie unmöglich es sei, dass ein größeres Gewicht sich schneller bewege, als ein kleineres. ... Ein Sandkorn ist so schnell wie ein Mühlstein.«¹
- Alle Körper fallen gleich schnell: »Angesichts dessen glaube ich, dass, wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden.«²
- Wenn »ein aus der Ruhelage ... herabfallender Stein nach und nach neue Zuwächse an Geschwindigkeit erlangt, warum soll ich nicht glauben, dass solche Zuwächse in allereinfachster ... Weise zu Stande kommen? ... hieraus folgt«: Die Fallbewegung ist eine »gleichförmig beschleunigte Bewegung« bei der dem fallenden Körper »von Anfang an in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwächse erteilt« werden.«³
- Fallgesetz: »Wenn ein Körper von der Ruhelage aus gleichförmig beschleunigt fällt, so verhalten sich die in gewissen Zeiten zurückgelegten Strecken wie die Quadrat der Zeiten.«⁴



$$v \sim t \Rightarrow v = g \cdot t$$

$$h \sim t^2 \Rightarrow h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Einstein: »Die Galileo zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden waren so unvollkommen, daß es nur gewagter Spekulation möglich war, die Lücken in den empirischen Daten zu überbrücken. So gab es z.B. keine Mittel, um Zeiten unter einer Sekunde zu messen.«⁵

¹ Galilei, Discorsi, a.a.O., S. 57 und S. 59.

² ebenda, S. 65.

³ ebenda, S. 147 f. sowie 148 und 155.

⁴ ebenda, S. 159.

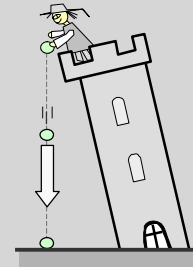
⁵ Einstein-Vorwort zum Dialog, a.a.O., S. XII

Galilei: jede physikalische Größe muss stets messbar sein!

Messtechnische Probleme zu Galileis Zeiten (um 1600)

a) Zeitmessungen

- Fallzeiten am schiefen Turm: bei $h = 56 \text{ m} \Rightarrow t = 3,38 \text{ s}$
 bei $\frac{1}{2} h = 28 \text{ m} \Rightarrow t = 2,39 \text{ s}$
 bei $\frac{1}{4} h = 14 \text{ m} \Rightarrow t = 1,69 \text{ s}$
- Fallzeiten im Hausbereich: bei $h = 10 \text{ m} \Rightarrow t = 1,43 \text{ s}$
 bei $h = 5 \text{ m} \Rightarrow t = 1,00 \text{ s}$



»Das aber ist das letzte Argument gegen Galileis Pisaner Experiment:

Diesen Versuch hat er nicht angestellt, ja er hat ihn sich nicht einmal vorgestellt ... Die Experimente am schiefen Turm zu Pisa sind ein Mythos.«

Koyré, a.a.O., S. 127 u. 132.

b) Geschwindigkeitsmessungen

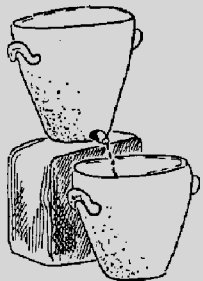
- Momentangeschwindigkeiten konnten überhaupt nicht gemessen werden.
- Durchschnittsgeschwindigkeiten konnten mit $v = s/t$ nur bestimmt werden aus relativ genau messbaren Wegen s und ungenauen Messungen der Zeit t .
- Geschwindigkeitswerte: bei $h = 56 \text{ m} \quad v = 33 \text{ m/s} = 119,3 \text{ km/h}$
 bei $h = 10 \text{ m} \quad v = 14 \text{ m/s} = 50,4 \text{ km/h}$

Galileis vernunftgemäße Überzeugungen in heutiger Darstellung:

$$h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{g}}$$

$$v = g \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{g}$$

$$\frac{v}{g} = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{g}} \Rightarrow v = \sqrt{2 \cdot s \cdot g}$$



Prinzip der Wasseruhr

»Ich habe ein Experiment darüber angestellt, aber zuvor hatte die natürliche Vernunft mich ganz fest davon überzeugt, daß die Erscheinung (Fallbewegung, J.S.) so verlaufen müßte, wie sie tatsächlich verlaufen ist.«

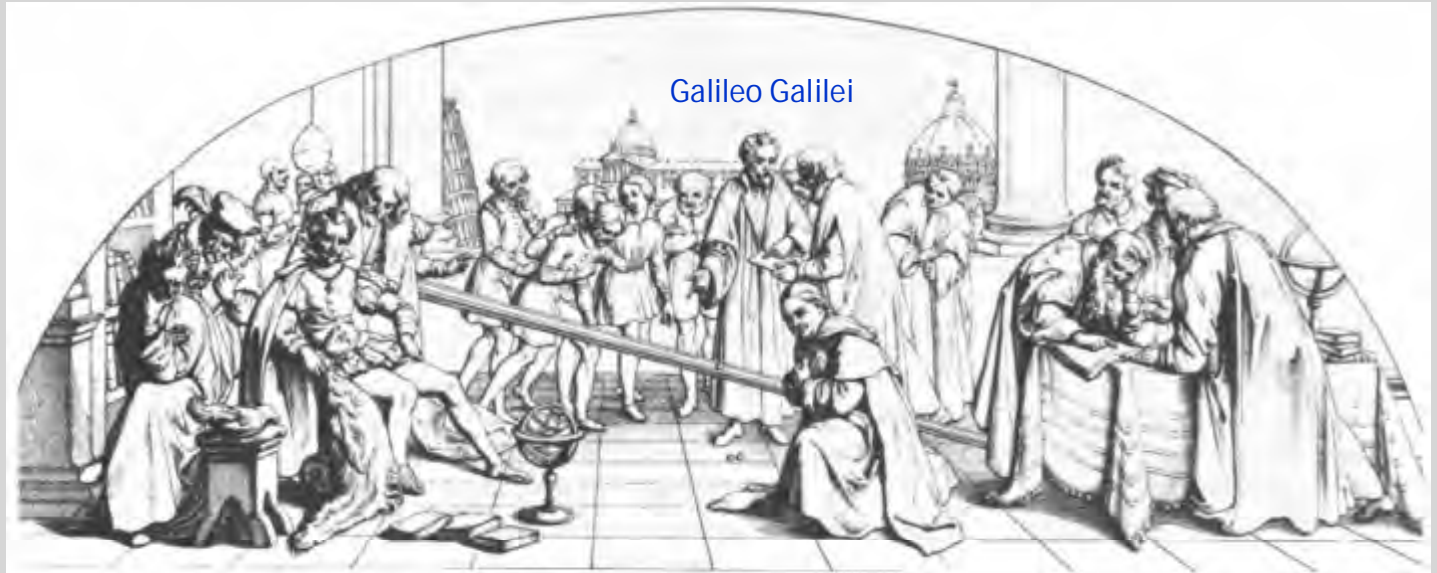
Galilei 1610 in einem Brief an Francesco Ingoli, zit. nach: Dijksterhuis, a.a.O., S.384.

Historische Darstellung des Fallrinnen-Experiments*



Galileo Galilei
 1564 – 1642

Gemälde des Holländers Justus Sustermans von 1635 (Galerie der Uffizien, Florenz)



Salviati: »Auf einem Holzbrette von 12 Ellen Länge, bei einer halben Elle Breite und drei Zoll Dicke, war auf dieser letzten schmalen Seite eine Rinne von etwas mehr als einem Zoll Breite eingegraben. Dieselbe war sehr gerade gezogen, und um die Fläche recht glatt zu haben, war inwendig ein sehr glattes und reines Pergament aufgeklebt in dieser Rinne liess man eine sehr harte, völlig runde und glattpolirte Messingkugel laufen. ... Bei wohl hundertfacher Wiederholung fanden wir stets, dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten: und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene, d.h. des Kanales, in dem die Kugel lief.«¹

¹ Galilei, Galileo: *Discorsi*, S. 162 f.

* Das Bild ist die Vorlage eines zu Ehren Galileis von G.Bezzuoli (1784 – 1855) gemalten Frescos im Museo Zoologico ("La Specola") von Florenz. aus: R.Sexl u.a., *Das mechanische Universum*, Frankfurt am Main 1980, S.16.



Rekonstruktion des Arbeitsraumes von Galilei im Deutschen Museum



Deutschen Museum München

Titelbild von Galileis »Dialog ... «

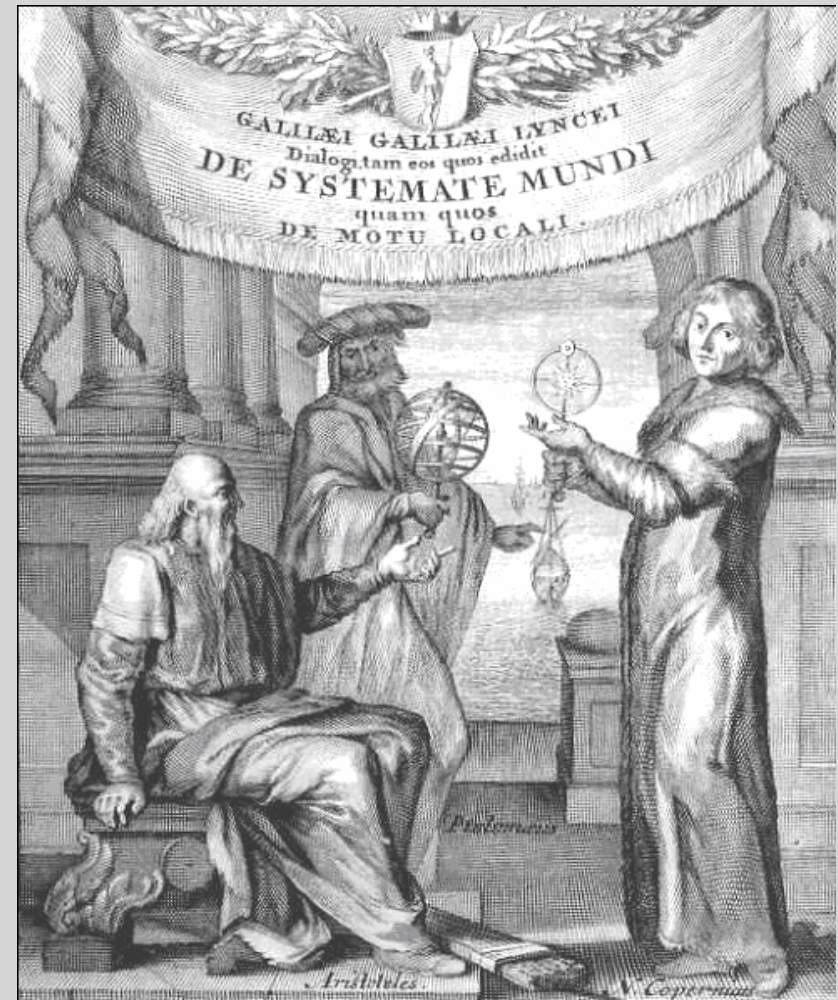
Die Gesprächspartner im »Dialogo«

Salviati (Galilei) der im Dialog als der überlegene Gesprächsführer in Erscheinung tritt, ist in der Regel auch die Stimme Galileis selbst. Er ist der kluge und moderne Wissenschaftler, der unter anderem alle gegen die Erdbewegung geltend gemachten Argumente zu entkräften weiß. Zugleich ist die Wahl des Namens ein Freundesdank Galileis an seinen intimen Schüler Filippo Salviati, geboren am 19. Januar 1582 zu Florenz, der schon in Padua seine Vorlesungen hörte. ... Zum großen Kummer Galileis starb er bereits 1614 auf einer Reise nach Spanien.

Sagredo (interessierter Laie) nimmt als Dialogpartner die zweite Stelle ein. Durch seine präzisen Fragen und durch gutes Verständnis der Probleme trägt er wesentlich zum Gelingen der Gespräche bei. Auch er erinnert an einen guten Freund Galileis, an Giovanni Francesco Sagredo, der am 19. Juni 1571 in Venedig geboren wurde und als Senator in seiner Vaterstadt am 5. März 1620 starb. Mit Sorge hatte er Galilei von Padua scheiden sehen und ihn frühzeitig vor den Intrigen der Jesuiten gewarnt. Galilei war ihm von Herzen zugetan.

Simplicio (Aristoteles) als Vertreter der Aristoteliker und Peripatetiker ist eine Symbolfigur, die schon durch den Namen »der Einfache« oder gar »der Einfältige« ironisch gekennzeichnet ist. Da er der Wortführer für die Einwendungen gegen die Lehre des Kopernikus ist, sich auch gelegentlich der von den Jesuiten des Collegium Romanum aufgestellten Thesen bedient und sogar an einer Stelle wörtlich eine Entgegnung von Papst Urban VIII. vorträgt, ist es nicht verwunderlich, daß Galilei sich durch diesen »Simplicio« zusätzliche Feindschaft erworben hat. Denn für solche Anspielungen war man in Rom hellhörig, und schließlich sieht sich niemand gerne selbst in der Rolle einer durch geistige Befangtheit und Dummheit beschränkten, lächerlichen Gestalt.¹

¹ aus: Hemleben, Johannes: Galileo Galilei in Selbstzeugnissen und Bilddokumenten, Reinbek bei Hamburg 1981, S. 112.



Aristoteles

Ptolemäus

Kopernikus

Titelbild der lateinischen Ausgabe von Galileis »Dialog über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische«



Die historischen Personen des Dialogs in den Discorsi

Titelbild von Galileis »Discorsi ... «



Simplicio
(Aristoteles)

Sagredo
(interessierter Laie)

Salviati
(Galilei)



Simplicio

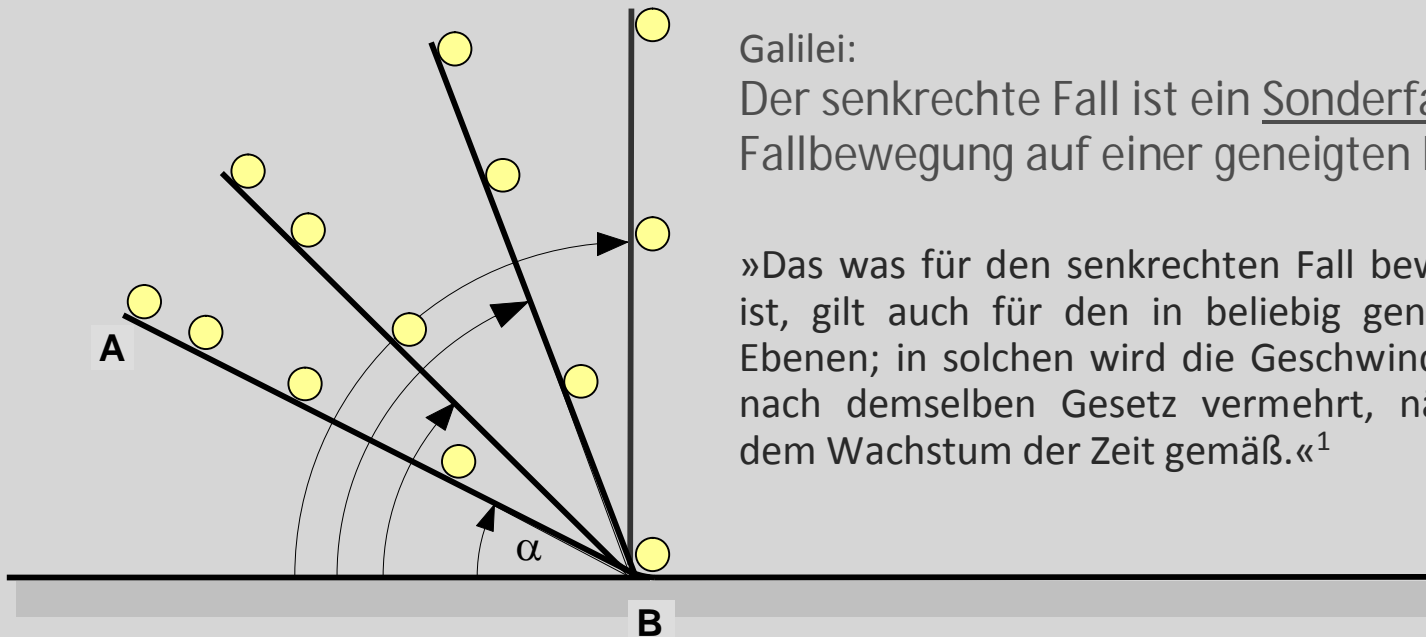
Sagredo

Salviati

Im Museo Galileo (Florenz) nachgestellte Discorsi-Szene.

Titelbild der italienischen Ausgabe von Galileis »Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend.« (1638)

Warum die Bewegung auf der schiefen Ebene ein Fallbewegung ist.



Galilei:

Der senkrechte Fall ist ein Sonderfall der Fallbewegung auf einer geneigten Ebene.

»Das was für den senkrechten Fall bewiesen ist, gilt auch für den in beliebig geneigten Ebenen; in solchen wird die Geschwindigkeit nach demselben Gesetz vermehrt, nämlich dem Wachstum der Zeit gemäß.«¹

Schlussfolgerung Galileis: Auch auf der schiefen Ebene gelten die Fallgesetze.
In heutiger Darstellung:

$$v \sim t \Rightarrow v = a \cdot t$$

$$s \sim t^2 \Rightarrow s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Beschleunigungswerte:

Beim senkrechten Fall ist: $a = g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Auf der geneigten Ebene ist: $a = g \cdot \sin \alpha$

¹ Galilei, Discorsi, S. 164 sowie Dialogo, S. 24 f.

Galilei lässt Kugeln auf einer geneigten Ebene von A nach B »fallen«

Daten des Fallrinnen-Experiments von Galilei:

Länge der Fallrinne: 12 Ellen = 12 • 0,58 m = 6,96 m

Steigungen der Fallrinne: $\alpha = \arctan(2/12) = 9,46^\circ \Rightarrow a = 1,61 \text{ m/s}^2$

$\alpha = \arctan(1/12) = 4,76^\circ \Rightarrow a = 0,81 \text{ m/s}^2$

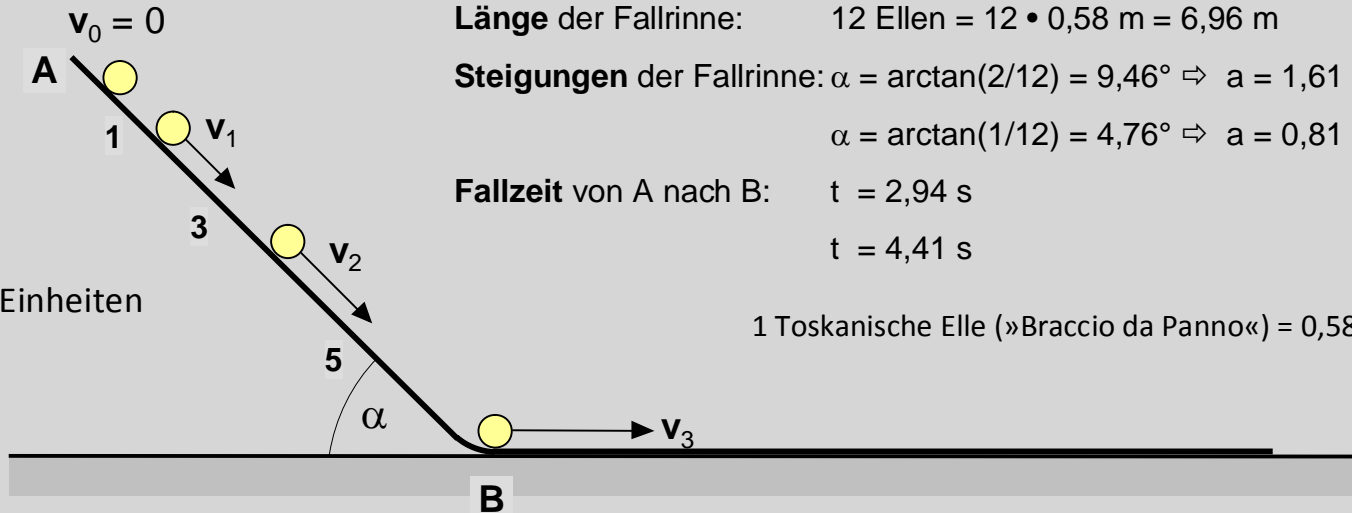
Fallzeit von A nach B: $t = 2,94 \text{ s}$

$t = 4,41 \text{ s}$

1 Toskanische Elle (»Braccio da Panno«) = 0,58 m

Beobachtung:

Zuwachs der Weg-Einheiten
z. B. in Dezimeter.



Zur Funktion dieses Experiments

Offensichtlich wollte Galilei mit diesem Experiment anschaulich zeigen, dass seine theoretisch gewonnenen Gesetzmäßigkeiten der gleichförmigen Beschleunigung mit dem wirklichen Bewegungsverhalten einer Kugel auf einer geneigten Ebene übereinstimmen.

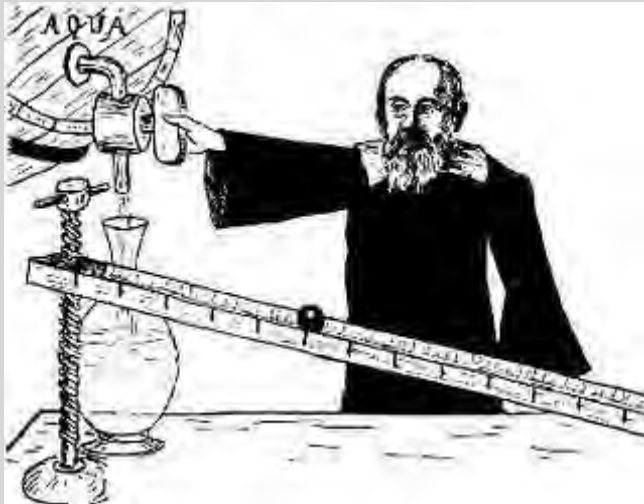
Die Fallzeiten konnten gegenüber denen des senkrechten Falls deutlich verlängert werden. So entsprachen diese Zeiten denen senkrechter Fallhöhen von ca. 42 m bzw. 95 m. Im zweiten Fall waren sie damit sogar deutlich länger als die, die am schiefen Turm zu erwarten waren.



Fallrinne im Museo Galileo Florenz

Galilei über die Zeitmessung bei seinem Fallrinnen-Experiment

»Dann liess man die Kugel durch den Kanal fallen und verzeichnete in sogleich zu beschreibender Weise die Fallzeit für die ganze Strecke: häufig wiederholten wir den einzelnen Versuch, zur genaueren Ermittlung der Zeit, und fanden gar keine Unterschiede, auch nicht einmal von einem Zehnthheil eines Pulsschlages. Darauf liessen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen, und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strecken, und verglichen die gemessene Fallzeit mit der zuletzt erhaltenen und mit denen von $\frac{2}{3}$ oder $\frac{3}{4}$ oder irgend anderen Bruchtheilen; bei wohl hundertfacher Wiederholung fanden wir stets, dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten: und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene, d.h. des Kanales, in dem die Kugel lief.«¹



Galilei misst die »Fallzeit« der Kugel mit einer Wasseruhr.

»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 von einander abwichen.«²

Simplicio: Wie gern hätte ich diesen Versuchen beigewohnt; aber da ich von Eurer Sorgfalt und Eurer wahrheitsgetreuen Wiedergabe überzeugt bin, beruhige ich mich und nehme dieselben als völlig sicher und wahr an.

Salviati: Nun, so können wir unsere Lektüre wieder aufnehmen und weiter gehen.³

¹ Galiei, Discorsi, S. 163. ² ebenda. ³ ebenda

Stimmen zu Galileis Fallrinnen-Experiment

»Eine Messingkugel, die in einer "glattpolierten" Rinne in einem Holzbrett läuft! Ein Gefäß mit Wasser, das durch eine kleine Öffnung rinnt und das man in ein kleines Glas einfängt, um es danach zu wiegen und so die Fallzeiten zu messen: was für eine Häufung von Quellen des Irrtums und der Ungenauigkeit! Es ist offensichtlich, daß die Versuche Galileis völlig wertlos sind.«¹

»Das Experiment hat also für Galilei mehr illustrativ-verifikativen als innovatorischen Charakter.«²
»Oft hat es den Anschein, daß das Experiment bei Galilei eigentlich nur für den da ist, der (noch) zu wenig Vertrauen in die mathematische Struktur der Wirklichkeit setzt – Experimente als Zugabe an den schon leicht in seiner Meinung schwankend gewordenen Aristoteliker.«³

»Die Galileo zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden waren so unvollkommen, daß es nur gewagter Spekulation möglich war, die Lücken in den empirischen Daten zu überbrücken. So gab es z.B. keine Mittel, um Zeiten unter einer Sekunde zu messen.«⁴

Simplicio: Wie gern hätte ich diesen Versuchen beigewohnt; aber da ich von Eurer Sorgfalt und Eurer wahrheitsgetreuen Wiedergabe überzeugt bin, beruhige ich mich und nehme dieselben als völlig sicher und wahr an.
Salviati: Nun, so können wir unsere Lektüre wieder aufnehmen und weiter gehen.⁵

¹ Koyré, Alexandre: Leonardo, Galilei, Pascal – Die Anfänge der neuzeitlichen Naturwissenschaften, Frankfurt a.M. 1998, S. 157.

² Heidelberger, Michael: Zur Entstehung der naturwissenschaftlichen Methode – Die Rolle der Erfahrung: Experiment und Instrument, in: Andreas Wenzel (Hrsg.): Naturwissenschaften alternativ, Band 8, Bielefeld 1977, S. 142.

³ Heidelberger, Michael/Thiessen, Sigrun: Natur und Erfahrung, Von der mittelalterlichen zur neuzeitlichen Naturwissenschaft, Reinbek bei Hamburg 1981., S. 157 f.

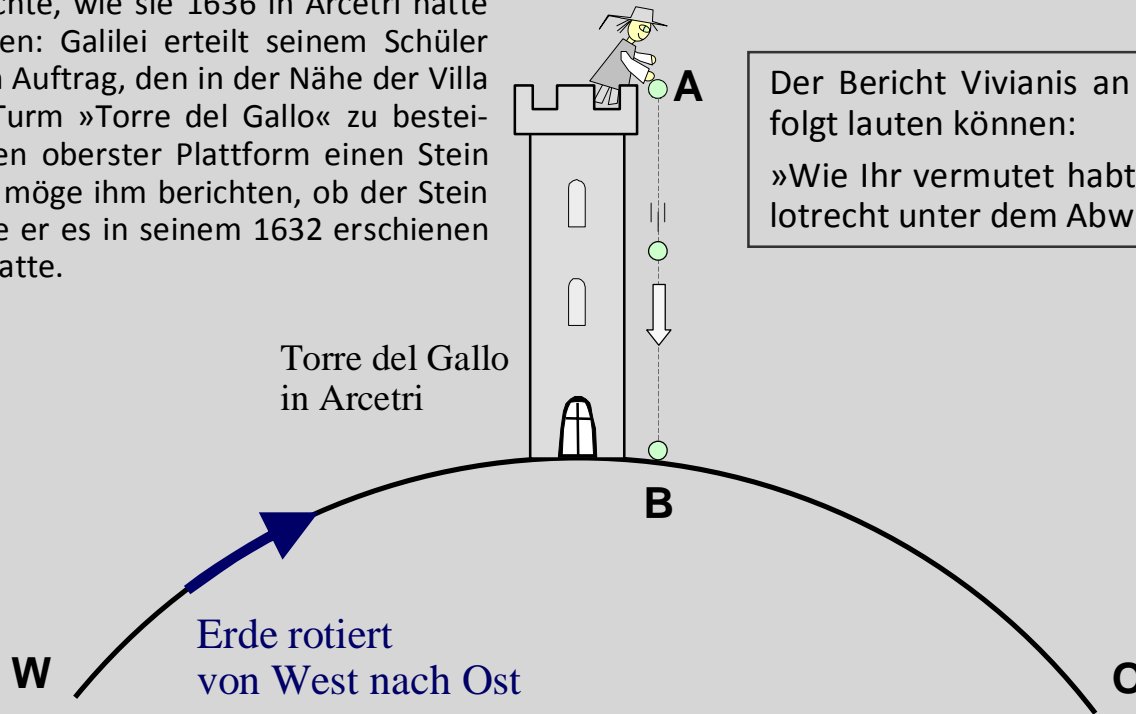
⁴ Einstein, a.a.O., S. XII ⁵ Discorsi, S. 162

Szenenwechsel: **Senkrechter Fall von einem Turm**

Eine fiktive Geschichte, wie sie 1636 in Arcetri hätte passiert sein können: Galilei erteilt seinem Schüler Vincenzo Viviani den Auftrag, den in der Nähe der Villa Galilei gelegenen Turm »Torre del Gallo« zu besteigen und von dessen oberster Plattform einen Stein fallen zu lassen. Er möge ihm berichten, ob der Stein sich so bewegt, wie er es in seinem 1632 erschienen Dialog behauptet hatte.



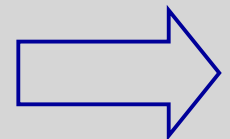
Torre del Gallo
in Arcetri bei Florenz



Der Bericht Vivianis an Galilei hätte in etwa wie folgt lauten können:

»Wie Ihr vermutet habt, trifft der Stein in der Tat lotrecht unter dem Abwurfpunkt auf.«

Warum dieser
Szenenwechsel?



Behauptung Galileis zum freien Fall bei Erdrotation (Dialogo, 1632, S. 171):

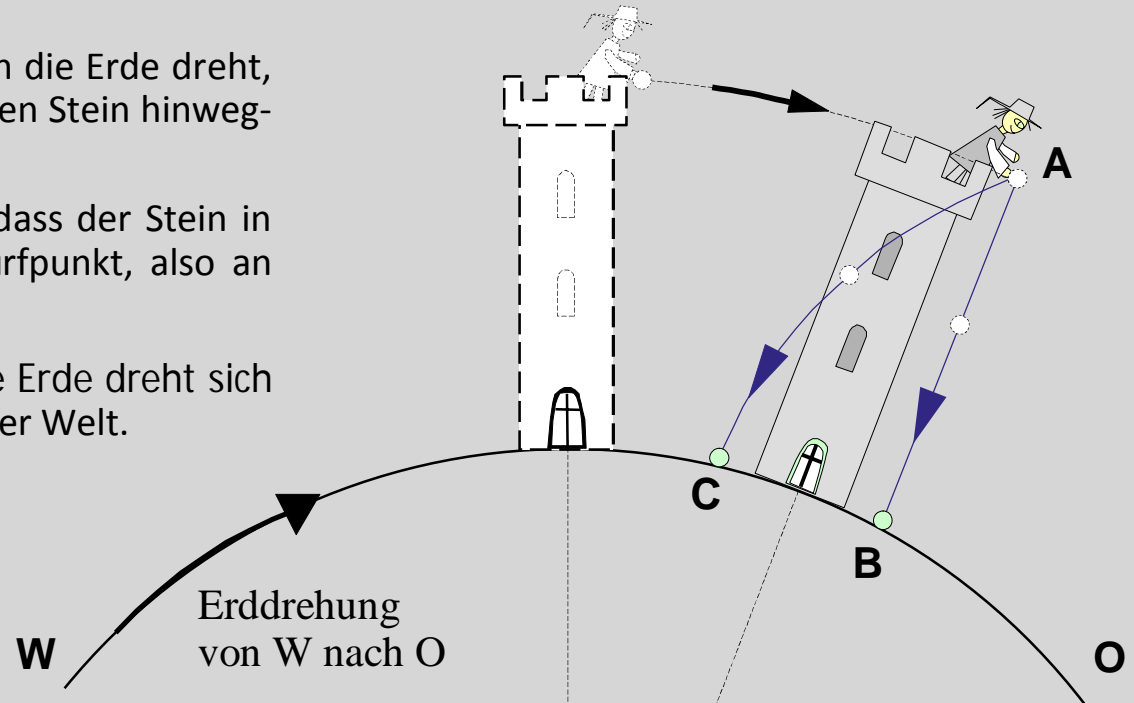
Sagredo: So erlaube ich mir Euch, Signore Salviati, zu fragen, ... welche Vorstellung man von der Bahn eines schweren Körpers sich zu bilden habe, wenn er von der Turmspitze in natürlichem Fallen sich abwärts bewegt.

Salviati: ... Einzig und allein diejenige Bewegung des Steines, welche wir nicht mitmachen, ist für uns bemerkbar. Daß diese aber in gerader Linie vor sich geht, lehrt uns die sinnliche Wahrnehmung, denn der Stein fällt stets parallel zu eben jenem Turme, und letzterer ist geradlinig und lotrecht zur Erdoberfläche gebaut.

Argument der Geozentriker: Wenn sich die Erde dreht, müsste sich die Erde unter dem fallenden Stein hinwegdrehen und an der Stelle C auftreffen.

Die Wahrnehmung lege jedoch nahe, dass der Stein in Wirklichkeit lotrecht unter dem Abwurfpunkt, also an der Stelle B auftreffe.

Schlussfolgerung der Geozentriker: Die Erde dreht sich nicht. Sie ist der ruhende Mittelpunkt der Welt.

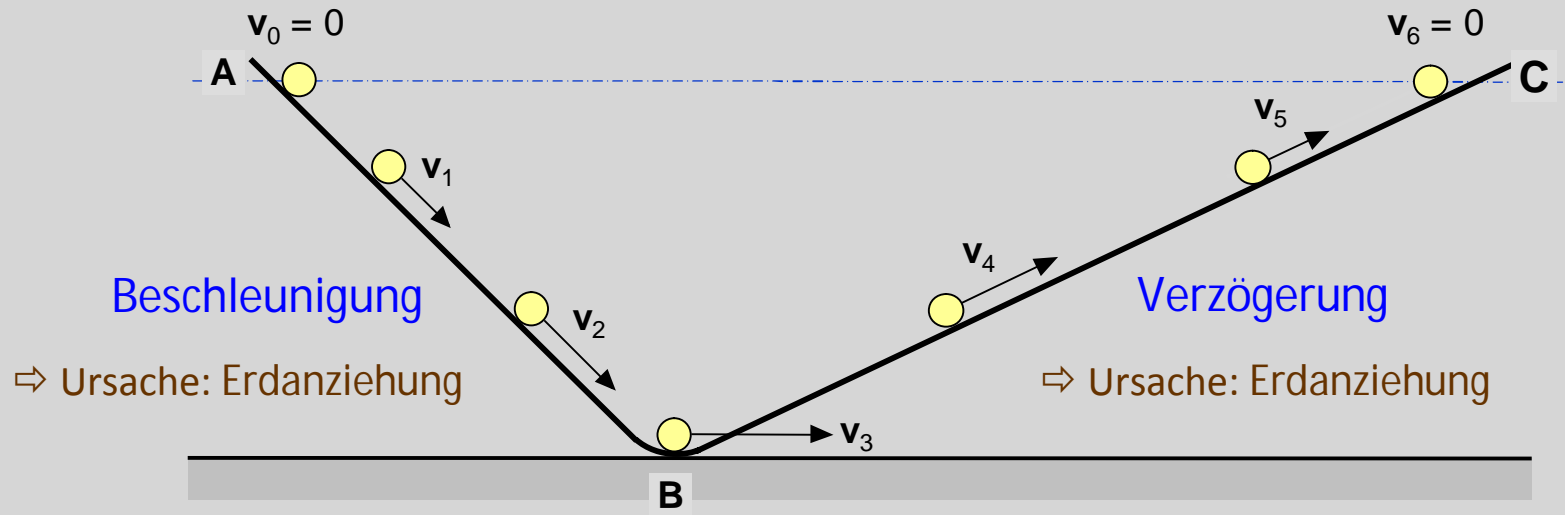


Mit seinen Überlegungen, die später in die Theorie Newtons als Trägheitsprinzip eingegangen sind, versuchte Galilei zu zeigen, dass der Stein trotz der Erdrotation senkrecht von A nach B fällt. Zur anschaulichen Darstellung seiner Gedanken zur Trägheit diente ebenfalls eine Kugelrinne, die allerdings aus zwei Teilen zusammengesetzt war, einer nach unten und einer nach oben geneigten Ebene, so dass die Kugel hinab- und hinaufrollen konnte. Dazu mehr im Folgenden.

¹ Vgl. Dialogo, S. 171 f. und Dijskterhuis, a.a.O., S. 389 ff.



Gedankenexperiment von Galilei: **Eine Kugel bewege sich reibungsfrei auf einer aus zwei schiefen Ebenen zusammengesetzten Kugelrinne.**



Bewegungsform in Punkt B ?
gleichförmige Bewegung

\Rightarrow Ursache: Trägheit



Kugelrinnen im Museo Galileo Florenz

¹ Discorsi, S. 194. Vgl. auch Dialogo S. 152 ff. und Pukies, Jens: Das Verstehen der Naturwissenschaften, Braunschweig 1979, S. 147 ff. und Dijksterhuis, a.a.O., S. 386 f.

Übergang

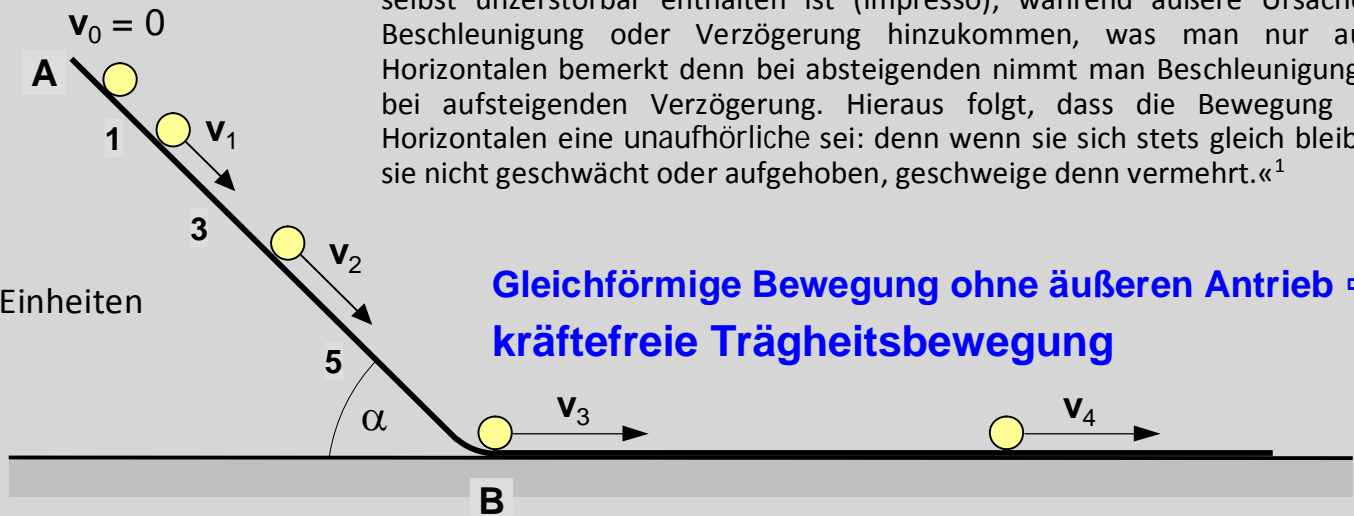
zur Bewegung auf der Horizontalen:

Wie und warum bewegt sich die Kugel ab dem Punkt B, wenn die Steigung der rechten Kugelrinne bis in die Horizontale abgesenkt wird?

Bewegung auf der Horizontalen

In der »Horizontalebene ist die Bewegung eine gleichförmige. ... Indess ist zu beachten, dass der Geschwindigkeitswerth, den der Körper aufweist, in ihm selbst unzerstörbar enthalten ist (impresso), während äußere Ursachen der Beschleunigung oder Verzögerung hinzukommen, was man nur auf der Horizontalen bemerkt denn bei absteigenden nimmt man Beschleunigung wahr, bei aufsteigenden Verzögerung. Hieraus folgt, dass die Bewegung in der Horizontalen eine unaufhörliche sei: denn wenn sie sich stets gleich bleibt, wird sie nicht geschwächt oder aufgehoben, geschweige denn vermehrt.«¹

Beobachtung:
Zuwachs der Weg-Einheiten
z. B. in Dezimeter.



**Gleichförmige Bewegung ohne äußeren Antrieb \Rightarrow
kräftefreie Trägheitsbewegung**

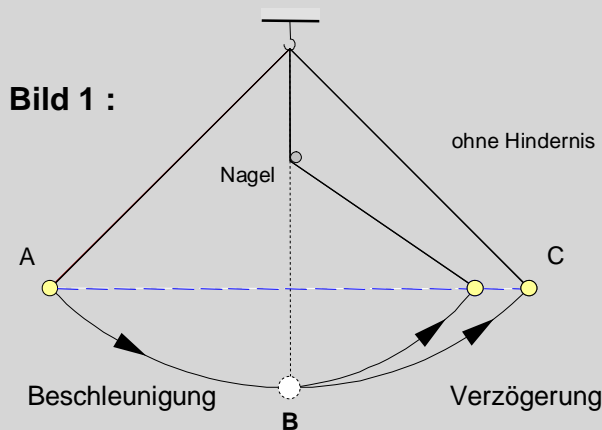
Zur Funktion dieses Experiments

Offensichtlich wollte Galilei mit diesem Gedanken-Experiment anschaulich zeigen, dass ein Körper auch ohne äußeren Antrieb, allein durch eine Eigenschaft, die dem Körper selbst innewohnt (nämlich seine Trägheit), bewegt werden kann. Er knüpfte dabei an die Impetustheorie an, ohne sich in deren Widersprüchlichkeit zu verfangen, und entwickelt zugleich die Idee einer kräftefreien Trägheitsbewegung, die einerseits keiner Erfahrung zugänglich ist, andererseits aber die Möglichkeit eröffnet, reale Bewegungen wie den waagerechten Wurf oder die Bewegung auf einer Kreisbahn bezüglich ihrer Ursachen plausibel und widerspruchsfrei zu erklären.

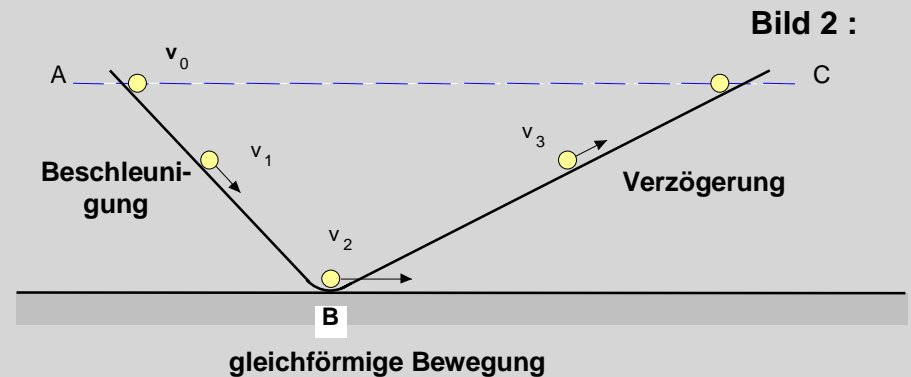
¹ Vgl. Discorsi, S. 194. Vgl. auch Dialogo S. 152 ff. und Pukies, Jens: Das Verstehen der Naturwissenschaften, Braunschweig 1979, S. 147 ff.

Stationen der Entwicklung des Trägheitsbegriffs durch Galilei

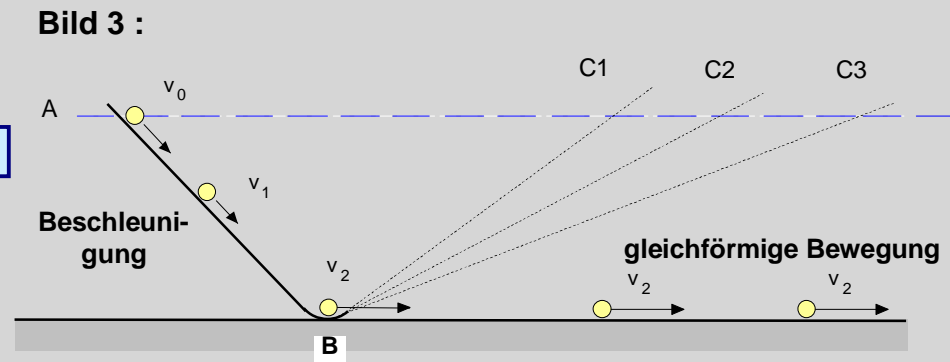
1. Galileis *Beobachtung* einer gestörten Pendelbewegung Galilei, Discorsi, S. 156



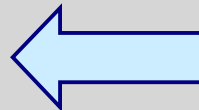
2. Galileis *Analogie*: Übertragung der Pendelbewegung auf das Modell einer reibungsfreien Kugelrinne Galilei, Discorsi, S. 157 f. und S. 193 f.



3. Galileis *Gedankenexperiment*: Variation der Steigung der rechten Kugelrinne Galilei, Discorsi, S. 194 ff.



Fazit: »Wenn ein Körper einmal in Bewegung ist, bewegt er sich ewig, falls ihn nicht etwas anderes hindert.« (Hobbes, 1651)¹

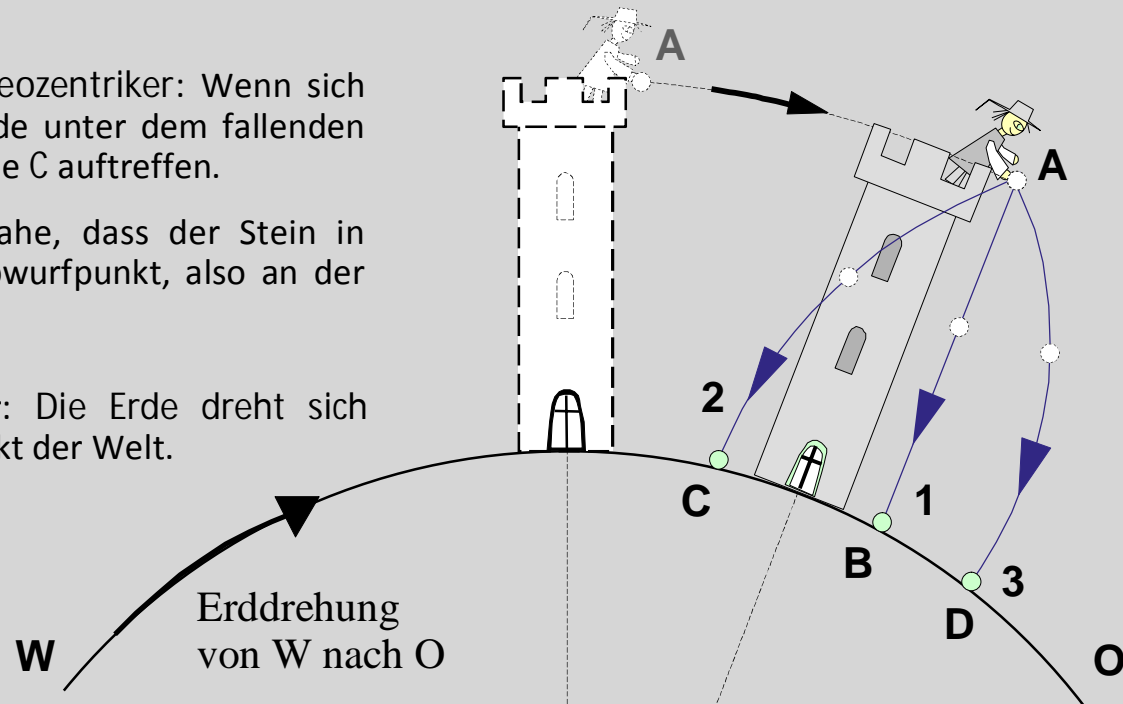


¹ Hobbes, Thomas: Leviathan (1651), Hamburg 1996, S. 11.
Hobbes traf Galilei 1636 in Arcetri.

Noch einmal das Argument der Geozentriker: Wenn sich die Erde dreht, müsste sich die Erde unter dem fallenden Stein hinwegdrehen und an der Stelle C auftreffen.

Die Wahrnehmung lege jedoch nahe, dass der Stein in Wirklichkeit lotrecht unter dem Abwurfpunkt, also an der Stelle B auftreffe.

Schlussfolgerung der Geozentriker: Die Erde dreht sich nicht. Sie ist der ruhende Mittelpunkt der Welt.



Gegenargument Galileis: Im Moment des Abwurfs hat der Stein eine ihm eigene Geschwindigkeit, die er aufgrund seiner Trägheit während des Fallens in Bewegungsrichtung der Erde und damit jeweils auf Kreisbahnen parallel zur Erde beibehält.

Deshalb trifft er trotz der Erddrehung in Wirklichkeit lotrecht unter dem Abwurfpunkt, also an der Stelle B auf.

Schlussfolgerung: Die Tatsache, dass der Stein bei B auftrifft, ist kein Beweis dafür, dass sich die Erde nicht dreht.

Newton (1687): Der Stein trifft tatsächlich an der Stelle D auf, denn er hat im Abwurfmoment eine höhere Bahngeschwindigkeit als der lotrecht unter dem Abwurfmoment liegende Punkt auf der Erde. Diesem fällt er gleichsam voraus. Diese Ostabweichung konnte mit der Newtonschen Theorie berechnet und in späteren Versuchen nachgewiesen werden. (Vgl. Planck, Max: Allgemeine Mechanik, Leipzig 1920, S. 81 f.)

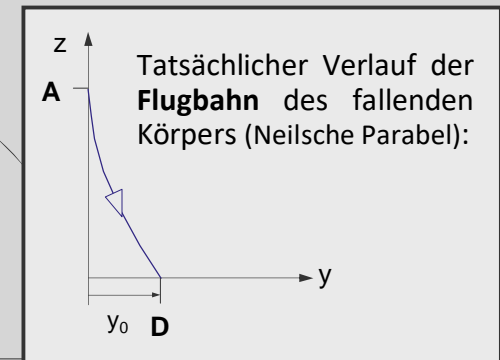
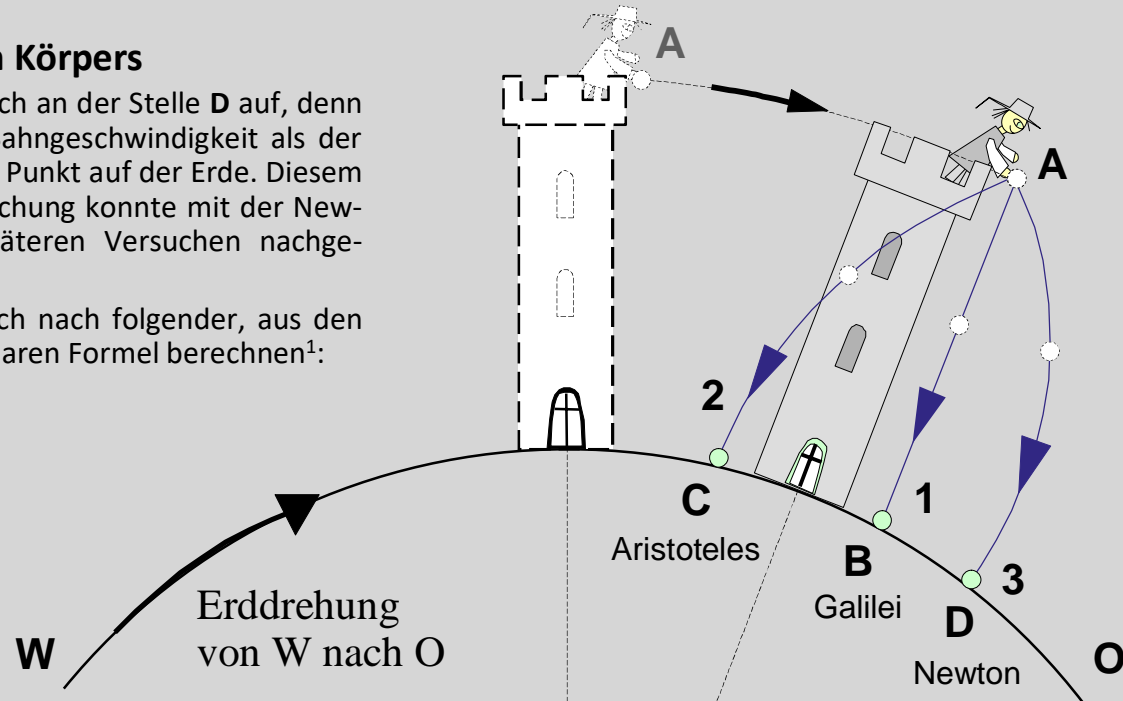
Zur Ostabweichung des fallenden Körpers

Newton (1687): Der Körper trifft tatsächlich an der Stelle **D** auf, denn er hat im Abwurfmoment eine höhere Bahngeschwindigkeit als der lotrecht unter dem Abwurfpunkt liegende Punkt auf der Erde. Diesem fällt er gleichsam voraus. Diese Ostabweichung konnte mit der Newtonschen Theorie berechnet und in späteren Versuchen nachgewiesen werden.

Die Länge y_0 der **Ostabweichung** lässt sich nach folgender, aus den Newtonschen Bewegungsgesetzen ableitbaren Formel berechnen¹:

$$y_0 = \frac{\omega}{3} \cdot \cos \beta \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot h^3}{g}}$$

wobei $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$



T ... Umlaufdauer der Erde um ihre Achse in s ($T \approx 7,23 \cdot 10^5$ 1/s)

ω ... Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation in 1/s

φ ... Drehwinkel der Erdrotation in ° oder rad ($\varphi = 90^\circ - \beta$)

β ... Breitengradwinkel in ° oder rad

h ... Fallhöhe in m

g ... Erdbeschleunigung in m/s^2 ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$)

Bei einer Fallhöhe von $h = 10 \text{ m}$ ergibt sich bei einer Erdrotation um 45° ($= \pi/4$) eine Ostabweichung von $y_0 = 0,0154 \text{ m} = \mathbf{1,54 \text{ cm}}$.

¹ Die Formel und deren Herleitung ist angegeben in: Planck, Max: Allgemeine Mechanik, Leipzig 1920, S. 81 f.

Literaturverzeichnis

- Bulthaup, Peter: Genesis und Funktion des Trägheitsbegriffs, in: ders.: Das Gesetz der Befreiung und andere Texte, Lüneburg 1998.
- Crombie, Alistair C.: Von Augustinus bis Galilei, Die Emanzipation der Naturwissenschaft, München 1977.
- Einstein, Albert: Briefe an Maurice Solovine, Berlin 1960.
- Dijksterhuis, Eduard Jan: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin Heidelberg New York 1983.
<http://books.google.de/books?id=Awag7E8Egy8C&pg=PP6&lpg=PP1&dq=Dijksterhuis&hl=de>
- Duhem, Pierre: Ziel und Struktur der physikalischen Theorien (1907), autorisierte Übersetzung von Friedrich Adler mit einem Vorwort von Ernst Mach und einer Einleitung von Lothar Schäfer, Hamburg 1998. (Experiment: S. XXIII, 188 ff. und S. 238 ff.)
- Galilei, Galileo: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische. übersetzt von Emil Strauss (1891), Nachdruck hrsg. von Roman Sexl und Karl von Meyenn, Stuttgart 1982. Italienische Erstausgabe: Florenz 1632. Hier zitiert als **Dialogo**.
- Galilei, Galileo: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend. In deutscher Übersetzung hrsg. von Arthur v. Oettingen, Leipzig 1890, Nachdruck: Darmstadt 1973. Italienische Erstausgabe: Leyden 1638. Hier zitiert als **Discorsi**.
- Gasper, Helmut: Wahrnehmung und Denken in der naturwissenschaftlichen Erkenntnis, in: Gesellschaftswissenschaftliches Institut e.V. (Hrsg.), Traditionell kritische Theorie, Würzburg 1995, S. 7–11.
- Hawking, Stephen: Eine kurze Geschichte der Zeit, Die Suche nach der Urkraft des Universums, Reinbek bei Hamburg 1991.
- Hemleben, Johannes: Galileo Galilei in Selbstzeugnissen und Bilddokumenten, Reinbek bei Hamburg 1981.
- Holton, Gerald.: Thematische Analyse der Wissenschaft – Die Physik Einsteins und seiner Zeit, Frankfurt a.M. 1981.
- Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft, Werkausgabe Band III, Frankfurt a.M. 1982 (Suhrkamp).
- Kühne, Ulrich: Die Methode des Gedankenexperiments, Frankfurt am Main 2005.
- Koyré, Alexandre: Leonardo, Galilei, Pascal – Die Anfänge der neuzeitlichen Naturwissenschaften, Frankfurt a.M. 1998.
- Maier, Anneliese, Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert, Roma 1949.
<http://books.google.de/books?id=TGbOllQJQgC&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false>
- Planck, Max: Einführung in die Allgemeine Mechanik, Leipzig 1920.
- Pukies, Jens: Das Verstehen der Naturwissenschaften, Braunschweig 1979.
- Weizsäcker, C.F.v. : Die Tragweite der Wissenschaft, Stuttgart 1964 sowie ders.: Große Physiker, Wiesbaden 2004.

Internetverknüpfungen

- **Filmausschnitt** zur Rekonstruktion des **Fallrinnenexperiments** von Galilei (4 Minuten aus dem Film »Galileo Galilei – Der Kampf um die Sterne«): <http://www.youtube.com/watch?v=CEqcOsRXusg>.
- **Videsequenz** zum **Fallrinnenexperiment** auf der Homepage des »Museo Galileo«: <http://catalogue.museogalileo.it/multimedia/GalileoScienceMotion.html>.
- **Simulation** des **Fallrinnenexperiments** auf der Homepage des »Museo Galileo«: <http://catalogue.museogalileo.it/multimedia/InclinedPlane.html>.
- Galilei, Galileo: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische (1632), zit. als »**Dialogo**«. Online-Version: <https://archive.org/stream/dialogberdiebe00galiuoft#page/n5/mode/2up>.
- Galilei, Galileo: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend (1638), zit. als »**Discorsi**«. Online-Version: <https://archive.org/stream/unterredungenun05galigoog#page/n2/mode/2up>.
- Wikipedia: Galileo Galilei (seit 2004 auf die Liste der exzellenten Artikel): http://de.wikipedia.org/wiki/Galileo_Galilei.
- Maier, Anneliese: Die **Vorläufer Galileis** im 14. Jahrhundert, Roma 1949. Online-Version <http://books.google.de/books?id=TGbOIlleQJQgC&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false> .
- Dijksterhuis, Eduard Jan: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin Heidelberg New York 1983. Online-Version: <http://books.google.de/books?id=Awag7E8Egy8C&pg=PP6&lpg=PP1&dq=Dijksterhuis&hl=de>
- Galilei – Ein wissenschaftshistorisches Forschungsprojekt der ETH Zürich: <http://www.library.ethz.ch/exhibit/galilei/>.
- Galilei-Manuskripte – Ein Kooperationsprojekt des Max-Planck-Instituts für Wissenschaftsgeschichte: http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Galileo_Prototype/INDEX.HTM.
- Galilei-Projekt der Rice-University in Houston (Texas, USA): <http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo>

Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit.

Falls Ihnen später noch Fragen einfallen:

j.sicars@t-online.de

Unterrichtsmaterialien (demnächst): www.sicars-didactica.de

Anhang 1

Erkenntnistheoretische Grundlegungen und Modelle

Grundquellen der Erkenntnis

Wahrnehmung

der Sinne ermöglichen die Gewinnung des Gegenstandes und **Erfahrung**

Wechselwirkung

im Erkenntnisprozess

Denken

ermöglicht die theoretische Reflexion des Gegenstandes mit Verstand und Vernunft

- Nach KANT gehören „zur Erkenntnis zwei Stücke: erstlich der **Begriff**, dadurch überhaupt ein Gegenstand gedacht wird, und zweitens die **Anschauung**, dadurch er gegeben wird.“¹
- Weiter heißt es bei KANT: „Alle unsere Erkenntnis hebt von den **Sinnen** an, geht von da zum **Verstande** und endigt bei der **Vernunft**.“²
- Und: „**Vernunft** ist das Vermögen, von dem Allgemeinen das Besondere abzuleiten und dieses letztere also nach Prinzipien und als notwendig vorzustellen.“³

¹ Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft, Werkausgabe Bd. III, Frankfurt am Main 1982 (Suhrkamp), S. 145. Vgl. auch ebenda, S. 97 f. und S. 131 f.

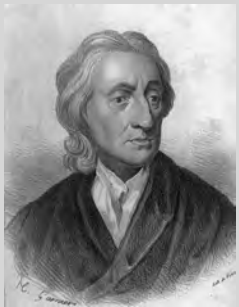
² Kant, ebenda, S. 311.

³ Kant, Immanuel: Anthropologie in pragmatischer Absicht, 1. Buch, § 43 (VII200).

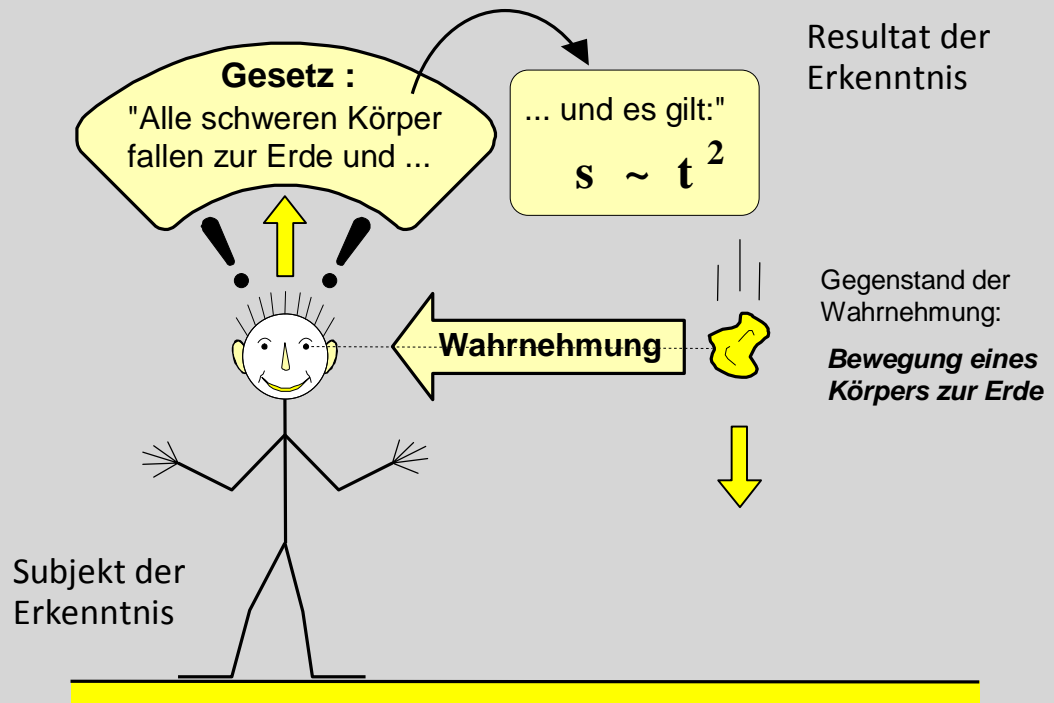
Erkenntnismodell des (naiven) Empirismus (und Sensualismus):
»Nichts ist im Verstand, was nicht vorher in den Sinnen gewesen wäre.«¹



Thomas v. Aquino
1225 – 1274



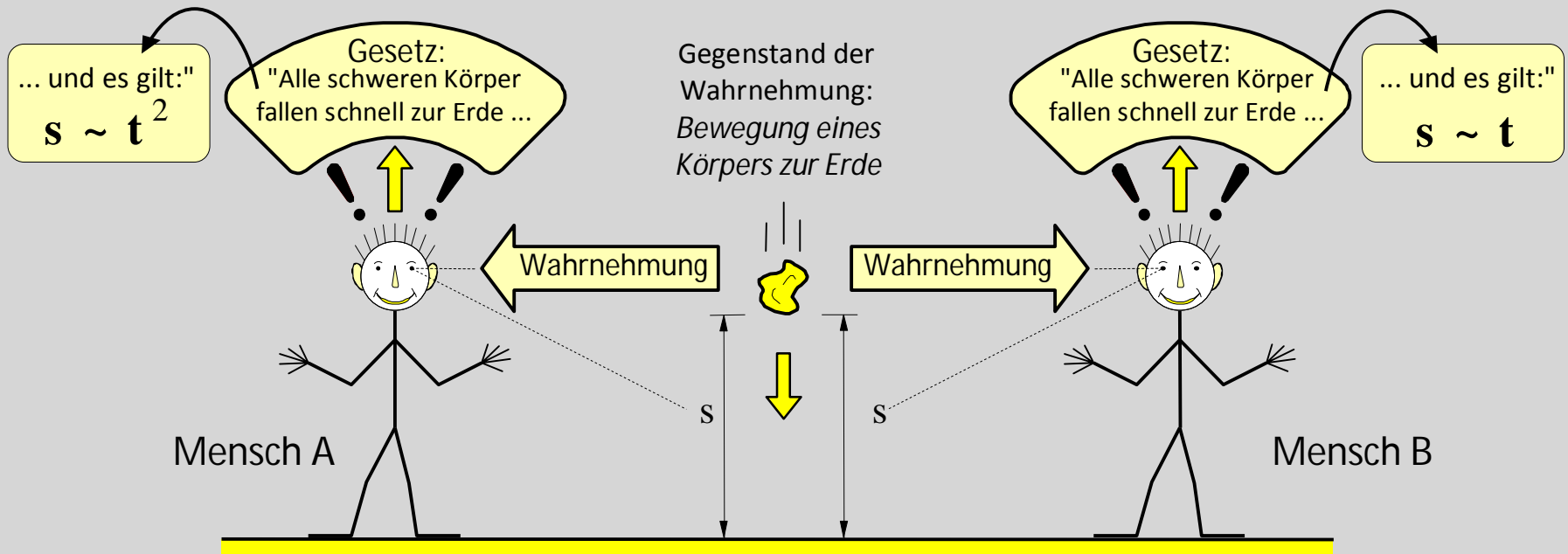
John Locke
1632 – 1704



¹ Thomas von Aquino: nihil est in intellectu quod non sit prius in sensu. in: De veritate (1256), Quaestiones 2 - 3 arg. 19, online: www.corpusthomicum.org/qdv02.html#51886 und Locke, John: Ein Versuch über den menschlichen Verstand (An essay concerning human understanding, 1690), in: Hansen, Frank-Peter (Hrsg.): Philosophie von Platon bis Nietzsche, Digitale Bibliothek Band 2, Berlin 1998, S. 101 (S. 13.855).

Grundlegendes Problem des Empirismus

Problem: Ein und derselbe Gegenstand kann von verschiedenen Menschen ganz unterschiedlich wahrgenommen werden (wie z.B. Zeiten, Längen, Bewegungen, Geschwindigkeiten).



Folgerung: Physikalische Theorien und Gesetze können aus Wahrnehmungen allein nicht gewonnen werden. Denn: „Wahrnehmungen ohne Begriffe sind blind.“ (Immanuel Kant)

Erkenntnismodell des (naiven) Idealismus (auch Rationalismus) :
»Nichts ist in den Sinnen, was nicht vorher im Verstand gewesen wäre.«¹



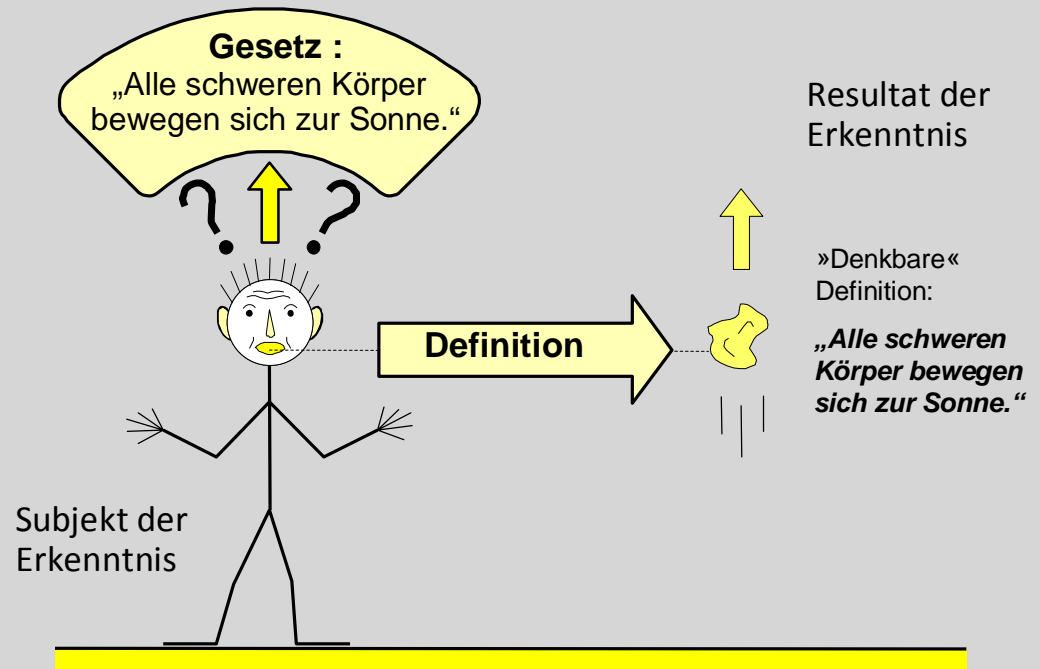
Platon
427 – 347 v. Chr.

Idealismus beinhaltet »die Ansicht, die das objektiv Wirkliche als Idee, Geist, Vernunft bestimmt und auch die Materie als eine Erscheinungsform des Geistes betrachtet, entweder mehr nach der Seite Idee hin: *objektiver Idealismus* (Platon, Schelling, Hegel) oder mehr nach der Seite der Vernunft hin: *subjektiver Idealismus* (Descartes, Malebranche, Fichte).



René Descartes
1596 – 1650

Erkenntnistheoretisch ist Idealismus der Standpunkt, der die Dinge als Komplexe von Vorstellungen auffaßt, das Sein nur als Bewußtsein anerkennt: Sein = Wahrgenommenwerden (*esse est percipi*; Leibniz, Berkeley, Schopenhauer.)²

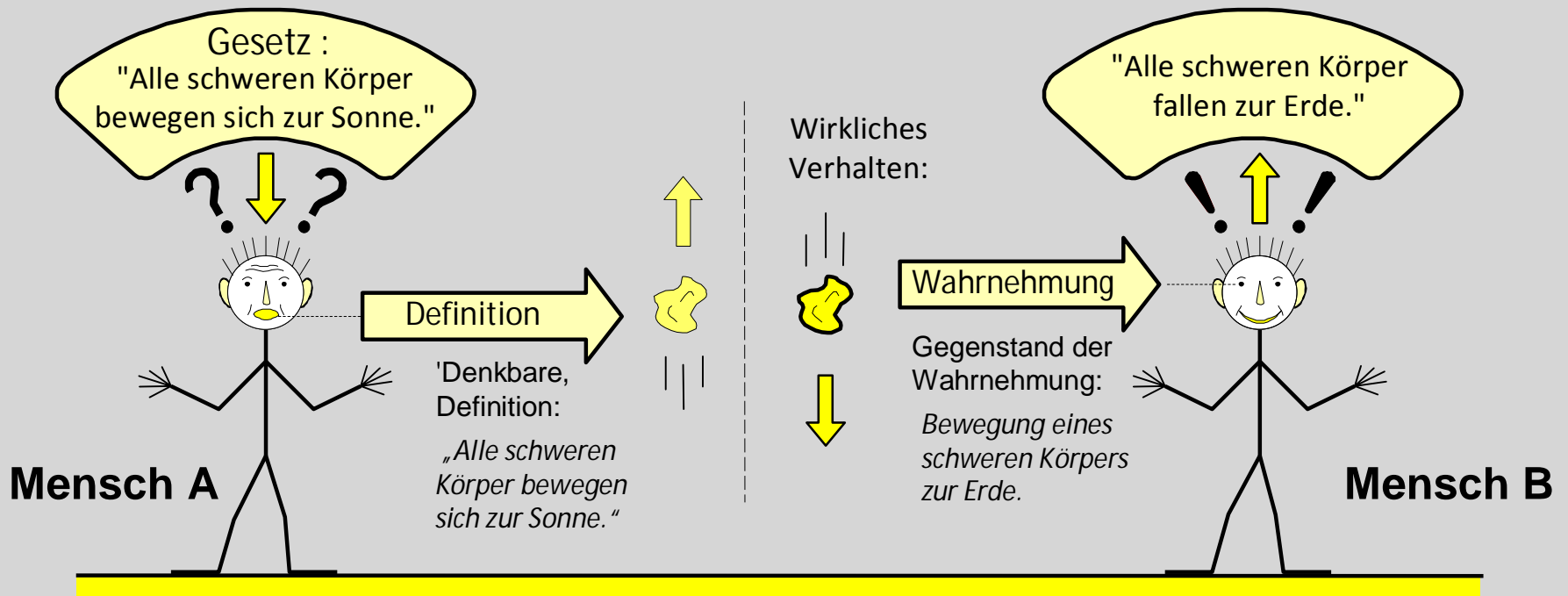


¹ Hegel, G.W.F.: Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften I (1830), Werke in 20 Bänden, Band 8, Frankfurt a.M. 1970, S. 52. Vgl. ebenda, S. 51

² Schischkoff, Georgi (Hrsg.): Philosophisches Wörterbuch, Stuttgart 1991, S. 321.

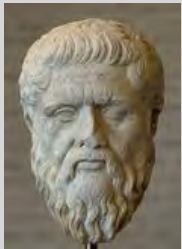
Grundlegendes Problem des Idealismus

Problem: Definitionen können willkürlich sein und insofern etwas anderes angeben, als die Gegenstände sich wirklich verhalten.



Folgerung: Physikalische Theorien und Gesetze können durch reine Verstandestätigkeit allein nicht gewonnen werden. Denn: „Begriffe ohne Wahrnehmungen sind leer.“ (Immanuel Kant)

Noch zwei ergänzende Zitate zum Idealismus:



Platon
427 – 347 v. Chr.

Platon (ca. 375 v. Chr.): »Was dem Erkennbaren Wahrheit verleiht und dem Erkennenden das Vermögen der Erkenntnis, bestimme ich als die Idee des Guten. ... Die Objekte der Erkenntnis erhalten nicht nur das Erkenntwerden, sondern auch Existenz und Wesen vom Guten, das nun nicht selbst ein Seiendes ist.«¹

Descartes (1644): »Deshalb ist die Erkenntnis: „Ich denke, also bin ich.“ von allen die erste und gewisseste, welche bei einem ordnungsmässigen Philosophieren hervortritt.«²



René Descartes
1596 – 1650

Dialektische Verknüpfung von Empirismus
und Idealismus in dem
E-J-A-S-E-Modell Einsteins



¹ Platon, Der Staat (ca. 375 v. Chr.), zit. nach: Kunzmann, P. u.a., dtv-Atlas Philosophie, München 1991, S. 39.

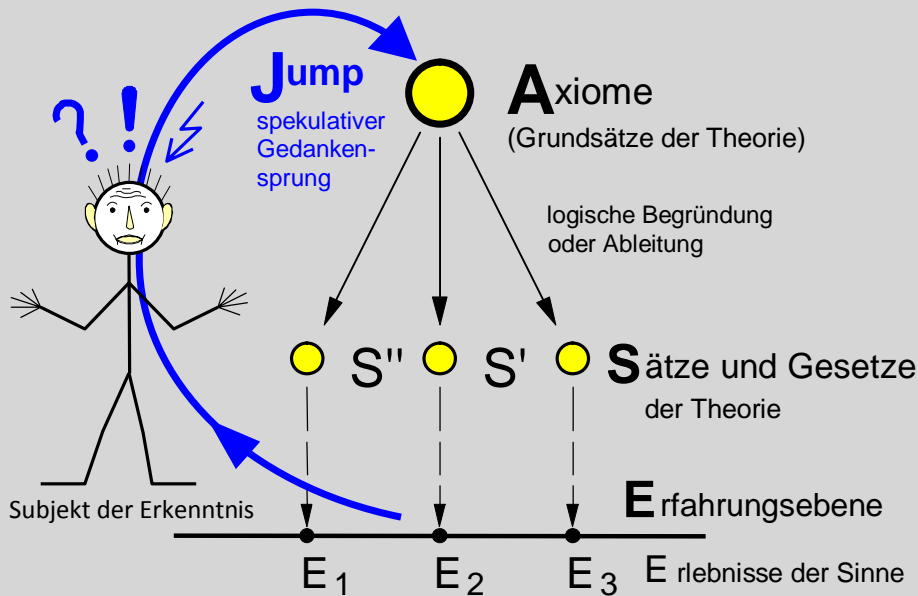
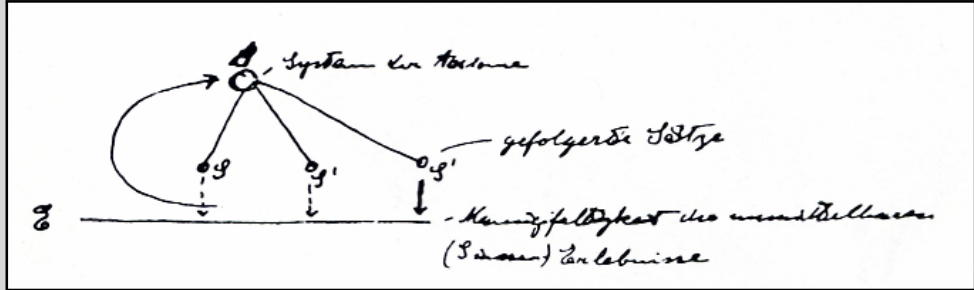
² René Descartes: Prinzipien der Philosophie (1644), in: Philosophie von Platon bis Nietzsche, Digitale Bibliothek Band 2, S. 6 f. (S. 15904 und 15905).

Conrad Habicht • Maurice Solovine • Albert Einstein



Die »Akademie Olympia«
(ca. 1903)

Albert Einstein: Das E-J-A-S-E-Modell



EINSTEIN erläutert sein erkenntnistheoretisches EJASE-Modell 1952 in einem Brief an seinen Freund Maurice Solovine¹:

1. »Die E (Erfahrungen der Sinne) sind uns gegeben. ...
2. A sind die Axiome (Grundsätze), aus denen wir Folgerungen ziehen. Psychologisch beruhen die A auf E. Es gibt aber keinen logischen Weg von den E zu A, sondern nur einen intuitiven Zusammenhang, der immer auf Widerruf ist.« Dieser Weg zu den Axiomen ist für EINSTEIN ein "Jump", ein häufig „wilspekulativer“ Gedankensprung.
3. Aus A werden auf logischem Weg Einzel-Aussagen S abgeleitet, welche den Anspruch auf Richtigkeit erheben können. ...
4. Die S werden mit den E in Beziehung gebracht (Prüfung an der Erfahrung). Diese Beziehungen sind nicht logischer Natur«.

¹ Holton, Gerald: Einsteins Methoden zur Theorienbildung, in: Physik und Didaktik, Heft 4/1979, S. 303, 305, 309, 310. Vgl. auch: ders.: Thematische Analyse der Wissenschaft, Frankfurt a.M. 1981, S. 374-412, Einstein, Albert: Briefe an Maurice Solovine, Berlin 1960, S.118-121 und Kühne, Ulrich: Die Methode des Gedankenexperiments, Frankfurt am Main 2005, S. 271 ff.

Fazit zum Verhältnis von Wahrnehmung und Denken¹

- ▶ Es gibt **kein** methodisch geregeltes oder gar logisches Verfahren, wie man zu einer physikalischen Theorie kommt.
- ▶ **Wahrnehmung Denken** sind die **Grundquellen** physikalischer Erkenntnis.
- ▶ Die **Gegenstände** der physikalischen Theorien (wie z.B. die Körperbewegungen) werden den Menschen durch **Wahrnehmungen** vermittelt.
- ▶ Diese Gegenstände sind keine unmittelbaren Naturgegenstände, sondern werden nach einem bestimmten Plan, den sich die Menschen zuvor **ausdenken**, systematisch im naturwissenschaftlichen **Experiment** »produziert« (z.B. die Fallrinne von Galilei).
- ▶ Über die so gewonnenen Gegenstände müsse dann **nachgedacht** werden. In dieses **Nachdenken** können die historisch jeweils vorhandenen, von den Menschen bis dahin schon angeeigneten Erkenntnisse als theoretische Voraussetzung eingehen. So setzt z.B. Newtonsche Theorie der Bewegungen die Kinematik Galileis und dessen Trägheitsbestimmungen oder die Theorie der Elektrodynamik eine entwickelte mechanische Theorie, nämlich die von Newton, voraus.
- ▶ Das Ergebnis dieses Nachdenkens sind die **allgemeingültigen Gesetze** der Physik. In diesen Gesetzen erscheinen die Wahrnehmungen einzelner Menschen als **objektiv**, d.h. als unabhängig von den einzelnen, wahrnehmenden Subjekten. Damit sind sie für alle Menschen gleichermaßen gültig.

¹ Vgl. Gasper, Helmut: Wahrnehmung und Denken in der naturwissenschaftlichen Erkenntnis, in: Gesellschaftswissenschaftliches Institut e.V. (Hrsg.), Traditionell kritische Theorie, Würzburg 1995, S. 7–11.

Anhang 2

Zur Mechanik des Aristoteles

1. Die Voraus-Setzungen des Aristoteles

Kausalitätsprinzip

- »Wenn die zureichenden Realgründe für das Eintreten einer Wirkung gegeben sind, so tritt sie mit Notwendigkeit ... ein.
- Jeder physikalische Vorgang hat eine oder mehrere Ursachen, von denen er mit Notwendigkeit hervorgebracht wird.«¹



Aristoteles
(384 – 322 v. Chr.)

Ursachen

Aristoteles unterscheidet vier Ursachen ²

- **causa materialis:** Materialursache (Stoff, aus dem etwas wird)
- **causa formalis:** Formursache (die zu verwirklichende Form)
- **causa finalis:** Zweckursache (der zu verwirklichende Zweck)
- **causa efficiens:** Wirkursache (das, was das Geschehen tatsächlich bewirkt)

¹ Maier, Anneliese: Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert, Roma 1949, S. 219.

² Maier, ebenda, S. 53 und Dijksterhuis, E.J.: Die Mechanisierung des Weltbildes, Berlin 1983, S. 45 und Aristoteles: Physik, II 3

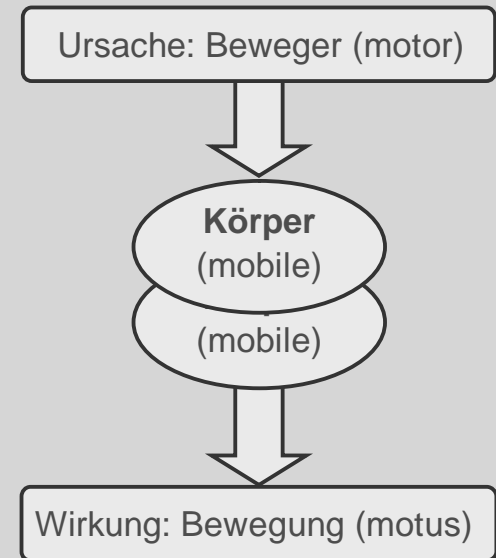
2. Die mechanische Theorie des Aristoteles

a) Grundsatz der Mechanik des Aristoteles

Alles was in Bewegung ist, wird von etwas anderem bewegt.

(Omne quod movetur ab alio movetur.)

Dabei muss der Bewegter (motor) dem sich bewegenden Körper (mobile) selbst innewohnen oder ein mit dem bewegten Körper verbundener Bewegter, ein "motor conjunctus" sein.



b) Erste Unterscheidung der Bewegungen nach Aristoteles

Bewegung von Körpern

Bewegung schwerer Körper (z.B. Stein)

- ▶ Sie streben nach **unten**.
- ▶ Ihr **natürlicher Ort** ist die **Erde**.



Bewegung leichter Körper (z.B. Feuer)

- ▶ Sie streben nach **oben**.
- ▶ Ihr **natürlicher Ort** ist der **Himmel**.



Weitere Unterscheidungen



c) Weitere Unterscheidung der Bewegungen nach Aristoteles

Aristoteles ging davon aus, dass »die Prinzipien (Ursachen) der wahrnehmbaren Dinge selbst auch wahrnehmbar sein müssen«.

Da bei manchen Bewegungen deren Ursache wahrgenommen werden kann (z.B. beim Pferdewagen), bei anderen hingegen nicht (z.B. beim fallenden Stein), unterschied Aristoteles die Bewegungen der unbelebten Körper nach diesem Kriterium.

So nannte er die mit den wahrnehmbaren Ursachen »erzwungene Bewegungen«, die mit den nicht wahrnehmbaren Ursachen »natürliche Bewegungen«.

Bewegung s c h w e r e r Körper

Bewegung u n b e l e b t e r
schwerer Körper

Bewegung b e l e b t e r schwerer Körper
Beispiel: Taube ⇒ motor : Seele (anima)

N a t ü r l i c h e Bewegung
schwerer Körper

E r z w u n g e n e Bewegung schwerer Körper
Beispiel: Pferdewagen ⇒ motor : Pferd
fliegender Pfeil ⇒ motor : Luft (das Medium)

Irdische Bewegung

Beispiel:
fallender Stein ⇒ motor:
Schwere (grave) als inneres naturhaftes Bewegungsprinzip des Körpers

Himmlische Bewegung

Beispiel:
Mond und Planeten ⇒ motor:
Gott, der unbewegte Beweger

3. Widersprüche in der Mechanik des Aristoteles

- ▶ **Ziel** der mechanischen Theorie des Aristoteles: Die Unterscheidung der Bewegungen nach dem Kriterium ihrer **wahrnehmbaren Ursachen** sollte zu einem System *in sich widerspruchsfreier Klassen von Bewegungen* führen.
- **Problem:** Die von Aristoteles gebildeten Klassen sind in sich **nicht** widerspruchsfrei. So endet z.B. die **erzwungene Bewegung** eines Pferdewagens, wenn das Pferd stehen bleibt oder gar vor Erschöpfung zusammenbricht, d.h. wenn die **Ursache** der Bewegung (der "motor conjunctus") entfällt. Hingegen endet die von dem Bogenschützen **erzwungene** Bewegung eines Pfeiles selbst dann **nicht**, wenn dieser die Sehne des Bogens verlassen hat, obwohl er sich damit von seiner (wahrnehmbaren) Bewegungs**ursache** getrennt hat.
- ▶ **Lösungsversuch** des *Aristoteles*: Der Pfeil (bewegter Körper) überträgt die bewegende Kraft auf die Luft (Medium), die ihrerseits die Kraft auf den Pfeil überträgt und dieser dann wiederum auf die Luft usw.. Demnach ist die Luft, also das Medium, die bewegende Ursache (der "motor conjunctus") des fliegenden Pfeiles.
- **Problem:** Wenn die Luft die **Ursache** der Pfeilbewegung darstellt, so müßte der Pfeil auch ohne Bogen allein von der Luft bewegt werden können. M.a.W.: Wenn die Ursache (Luft) vorhanden ist, muss auch die Wirkung (Bewegung) da sein. Luft aber kann keinen ruhenden Pfeil –oder gar einen anderen Körper wie z.B. einen Mühlstein– in Bewegung setzen. (Einwand des *Johannes Philoponos* etwa 550 n.Chr.).
- ▶ **Lösungsversuch** (*Impetustheorie* ab ca. 1300 n. Chr.): Jeder bewegte Gegenstand ist sein **eigener** Beweger, die **Ursache** der Bewegung ist **ihm als Prinzip eingepägt**, ist eine Eigenschaft von **ihm selbst**. Der "motor conjunctus" wird überflüssig, er wird statt dessen in den bewegten Körper hineinverlegt. Dieses bewegende Prinzip wurde von den Scholastikern (wie z.B. Jean *Buridan*, William *Ockham*) als "**Impetus**" (Schwung) bezeichnet.
- **Problem:** Wenn der bewegte Körper den "motor" der Bewegung in sich trägt, dann dürfte **keine Bewegungsänderung** auftreten, die Bewegung dürfte nie enden, ein Abbremsen und zur Ruhe kommen wäre nicht denkbar.
- ▶ **Lösung** (*Trägheitsprinzip* – *Galilei* und *Newton* ab ca. 1610): Der einmal in Bewegung gesetzte Körper würde sich in der Tat bis in alle Ewigkeit **gleichförmig** und **geradlinig** weiterbewegen, sofern nicht irgendwelche Kräfte ihn daran hindern. Die Bewegungs**änderung** (z.B. Abbremsung) indessen wird durch äußere **Kräfte** verursacht.

Vgl. Crombie, Alistair C.: Von Augustinus bis Galilei, S. 283 ff.

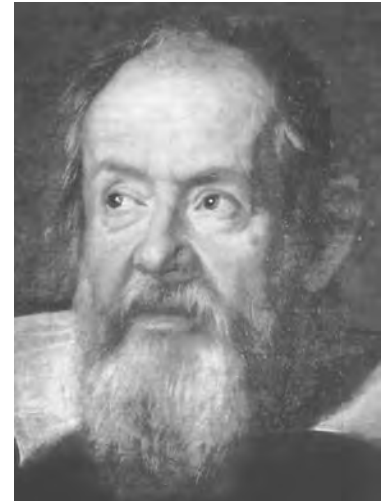


Anhang 3

Weitere Dokumente zu Galilei

Leben des Galileo Galilei – Eine Kurzbiographie

- 1564** Galileo Galilei am 15.2.1564 in **Pisa** geboren
- 1581 – 1585 Studium an der Universität zu **Pisa**
- 1589 – 1592 Professor für Mathematik an der Universität zu **Pisa**
- 1590/91 :
Erste Experimente zur Fallbewegung
Erste theoretische Entwürfe zur Fallbewegung
in der Schrift "*De motu*"
-



GALILEO GALILEI

Gemälde des Holländers Justus Sustermans
von 1635 (Galerie der Uffizien, Florenz)

- 1592 – 1610 Professor für Mathematik an der Universität zu **Padua**
- 1599 : Verhältnis mit Marina Gamba (1600 -
1606 : Geburt der 3 Kinder)
- 1604: Experimente zu den Fallgesetzen mit der Fallrinne
- 1609 : Konstruktion des Fernrohres
- 1610 : Entdeckung der Jupitermonde
Bekenntnis zum Weltbild des Kopernikus
-

- 1610 – 1633 Hofmathematiker und Philosoph des Großherzogs Cosimo II. in **Florenz**
- 1632: Veröffentlichung des "*Dialogs über die Weltsysteme*" in Florenz
- 1633:
Febr. – Juni : Prozeß vor dem Inquisitionsgericht in **Rom**
- Juli : Reise nach **Siena** zum Erzbischof Ascanio Piccolomini
(Aufenthalt: 5 Monate vom 9.7. bis 6.12.1633)
- Dezember : Abreise nach **Arcetri**
-

- 1633 – 1642 Leben in der Verbannung in der Villa »Il Gioiello« in **Arcetri** bei Florenz
- 1635: Veröffentlichung des "*Dialogs über die Weltsysteme*" in Holland
- 1638: Veröffentlichung der "*Discorsi*" in Holland
- 1642** Galilei stirbt am 8. Januar in Arcetri und wird in Santa Croce in Florenz beigesetzt
-

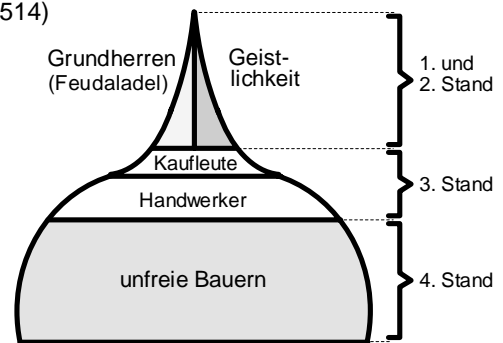
- 1643 Isaac Newton am 4. Januar Woolsthorpe geboren
- 1835 Der "*Dialogs über die Weltsysteme*" wird vom Index gestrichen
- 1980 – 1992 Wiederaufnahme des Prozesses gegen Galilei und Rehabilitierung

Mittelalter : Feudalistische Gesellschaft (ca. 500 n.Chr. bis ca. 1400 n.Chr.)

Übergangsphase vom Mittelalter zur Neuzeit

1. Phase : **Renaissance** (ca. 1440 – 1540)

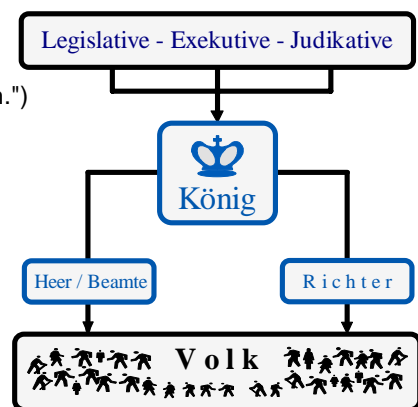
- ▶ **Technik**: Erfindung des Buchdrucks (um 1450), Weiterentwicklung des Bergbaus, der Metallgewinnung und der Pumpentechnik
- ▶ **Wirtschaft**: Ausdehnung des Waren- und Geldhandels (Fugger, Welser, Tucher) und Entstehung des Verlagssystems
- ▶ **Gesellschaft**: Bauernkriege gegen die Unterdrückung durch die Feudalherren (um 1525)
- ▶ **Schifffahrt**: große Entdeckungsreisen (Columbus 1492, Magellan 1517, Vasco da Gama 1498)
- ▶ **Astronomie**: Heliozentrisches Weltbild (Kopernikus 1514)
- ▶ **Philosophie**: Humanismus (Erasmus v. Rotterdam)
- ▶ **Kunst**: L. da Vinci, Michelangelo, A.Dürer
- ▶ **Politik**: Spanien wird zur Weltmacht (Karl V./Philipp II.)
- ▶ **Kirche**: Reformation (1517 veröffentlicht Luther seine 95 Thesen)

2. Phase : **Religionskriege** (ca. 1540 – 1650)

- ▶ **Frankreich**: Hugenottenkämpfe (1560 – 1598)
- ▶ **Deutschland**: 30-jähriger Krieg (1618 – 1648)
- ▶ **Wissenschaft**: Entstehung der modernen Naturwissenschaft – Galileo Galilei (1564 – 1642) und Isaac Newton (1643 – 1727)

3. Phase : **Absolutismus** (ca. 1640 – 1789)

- ▶ **Staat**:
 - Absolutes Königtum (Ludwig XIV. : "Der Staat bin ich.")
 - Entstehung des modernen Zentralstaates
- ▶ **Wirtschaft**:
 - Entstehung des Manufaktursystems
 - Wirtschaftspolitik : Merkantilismus
- ▶ **Gesellschaft**:
 - Aufstieg des Bürgertums
 - Entstehung des Proletariats (Lohnarbeiter)
- ▶ **Philosophie**:
 - Aufklärung (J.Locke, Rousseau, Kant etc.)

**Neuzeit** : Bürgerlich-kapitalistische Gesellschaft (ca. ab 1789 n.Chr.)

Merkantilismus (in Frankreich) – mercator (lat.): Kaufmann

Als »Merkantilismus« bezeichnet man die durch staatliche Lenkung und Förderung von Handel- und Gewerbe geprägte Wirtschaftspolitik des absoluten Staates.

Begründer des Merkantilismus in Frankreich:

Jean-Baptiste **Colbert** (1619-1683), Finanzminister unter Ludwig XIV.

Ziele des Merkantilismus:

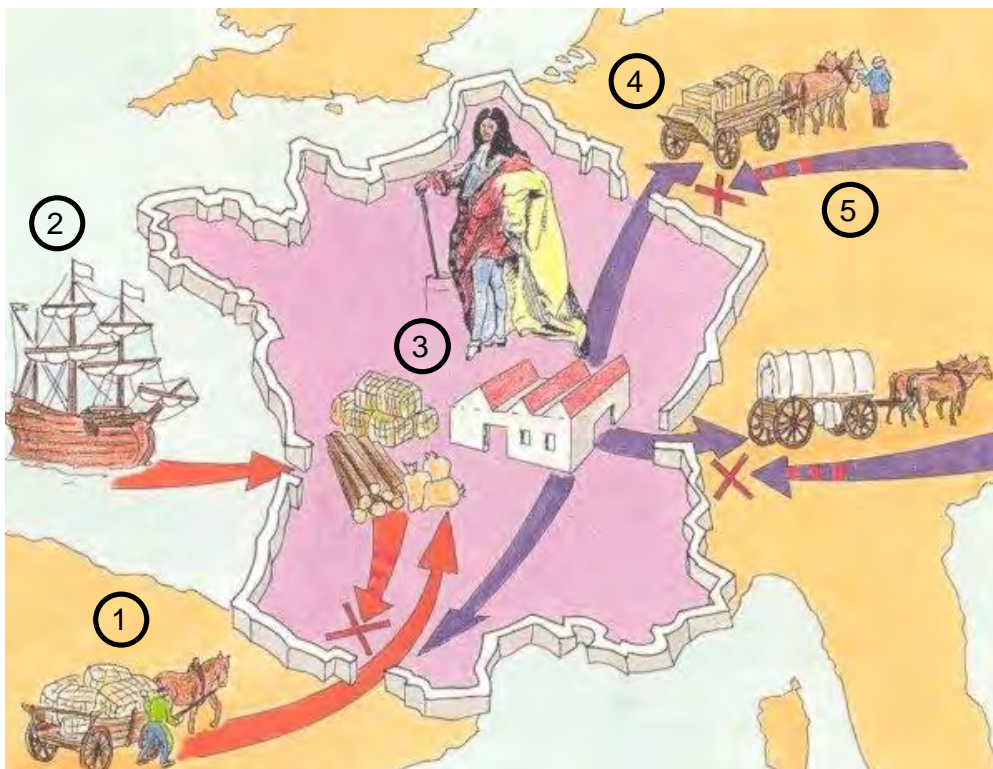
Es sollte möglichst viel Geld nach Frankreich und in die französische Staatskasse fließen, um die steigenden Staatsausgaben für das aufwendige Leben am Hofe des Ludwig XIV., die Rüstungs- und Kriegsausgaben (stehendes Heer) und die Staatsverwaltung zu finanzieren.

Durch gezielte staatliche Eingriffe zur Handels- und Gewerbeförderung auf der Grundlage eines Haushaltsplanes sollte erreicht werden, dass mehr Waren ausgeführt als eingeführt werden. Eine Reihe absolutistischer Herrscher wie z.B. die Medici in der Toskana versprachen sich auch durch die Förderung der Wissenschaft, insbesondere der Naturwissenschaft, positive Impulse für die Wirtschaft.



Jean-Baptiste Colbert
(1619-1683)

Maßnahmen der Handels-, Zoll- und Gewerbepolitik zur Verwirklichung der Ziele:



- ① **Rohstoffe:** Begünstigung der Einfuhr und Beschränkung der Ausfuhr
- ② a) Erwerb von **Kolonien** zur Erweiterung der Rohstoffbasis und Erschließung neuer Absatzmärkte sowie
b) Verbesserung und Sicherung von **Verkehrswegen** (Straßen und Kanäle, Seewege)
- ③ Förderung der Gründung leistungsfähiger **Manufakturen** durch Darlehen, Zuschüsse, Privilegien, Steuervorteile, Befreiung von Zunftzwängen, Anwerbung ausländischer Fachkräfte
- ④ **Exportförderung** durch niedrige oder gar keine Ausfuhrzölle für einheimische Erzeugnisse
- ⑤ **Importbeschränkung** durch hohe Einfuhrzölle auf ausländische Gewerbeerzeugnisse
- ⑥ Beseitigung von Binnezöllen zur Schaffung eines **einheimischen Handelsraumes**



Galilei beobachtet 1583 als 19-jähriger Student die Schwingungen des Kronleuchters im Dom zu Pisa

Gemälde von Luigi Sabatello, Museo Zoologico – La Specola (früher: Museo di Fisica e Scienze Naturali), Florenz (Bild aus: Johannes Hemleben, Galilei, Reinbek bei Hamburg 1969, S.21)

Um so bedeutsamer für die Entwicklung des jungen Physikers wird ein Erlebnis, das er, wahrscheinlich während eines Besuches der Messe, im Dom zu Pisa hat. Sein Blick fällt auf einen sich leise bewegenden Kronleuchter. Was vor ihm Tausende gesehen haben, sieht auch er: die Schwingung des vom Deckengewölbe herabhängenden Leuchters. Er begnügt sich nicht mit dieser Wahrnehmung, seine Gedanken beginnen zu arbeiten und versuchen das Wahrgenommene aufzuhellen. Er bemerkt, daß die Schwingungsausschläge nach und nach geringer werden, die Zeit aber während des Hin- und Herpendelns, gemessen an seinem eigenen Herzschlag, die gleiche bleibt. Auf elementarste Weise hat er so entdeckt, daß ein einfaches Mittel, die Zeit zu messen, durch ein schwingendes Pendel gegeben ist.

Man hat viel Intelligenz darauf verschwendet, zu ergründen, ob Vivianis Bericht über die erste Auffindung der Pendelgesetze auch wirklich der Wahrheit entspricht. Dieses Bemühen, historisch genau zu sein, in allen Ehren - produktiv ist es nicht. Man kann in der Regel nach mehr als dreihundert Jahren nicht den äußeren Verlauf eines geschichtlichen Tatbestandes besser rekonstruieren wollen, als es den Zeitgenossen Galileis gelang. Viviani, dem wir, wie gesagt, die erste Biographie über Galilei verdanken, war sein Schüler und hat seine Aufzeichnungen nach selbstgehörten Erzählungen Galileis vorgenommen. Mag er in seinem Eifer von sich aus manches hinzugefügt haben - der Mythos vom schwingenden Kronleuchter im Dom zu Pisa trifft den Ansatzpunkt der Galileischen Physik besser als alle anderen, «gesicherten» Aussagen. Auch wenn Galilei sich selbst in seinen Werken über diesen Vorgang nicht geäußert hat — Viviani beschreibt mit seinem Bericht treffsicher die Geburtsstunde der modernen Dynamik.

Text und Bild aus: Johannes Hemleben, Galilei, Reinbek bei Hamburg 1969, S.22

● Das Trägheitsmodell von GALILEO GALILEI (etwa 1638)

Siehe dazu auch das **Physik-Arbeitsblatt Nr. 18 / Seite 1 und 1 a)**

Aristoteles' Ansicht, daß schwere Körper schneller fallen als leichte Körper, hatte Galilei mit plausiblen Gedankenexperimenten widerlegt. Wie stand es nun mit der Behauptung, daß zur Aufrechterhaltung einer Bewegung eine ständige Kraft nötig ist?

«Aristoteles schien hier recht zu haben; denn wie die Erfahrung lehrt, kommen tatsächlich alle Körper früher oder später zur Ruhe, wenn sie nicht ständig angetrieben werden. Allerdings ist auch überall die Reibung am Werk. Macht man sie kleiner, so dauert die Bewegung länger an. Eine angestoßene Kugel beispielsweise kommt auf einer waagrechten, rauhen Unterlage rasch zur Ruhe. Auf einer glatten Unterlage rollt sie schon sehr viel weiter. Kein Zweifel also, die Reibung bremst! Was aber macht die Kugel, wenn keine Reibung vorhanden ist? Kommt sie auch zur Ruhe, vielleicht erst nach sehr langem Lauf?

Da wir nicht in der Lage sind, die Reibung völlig zu beseitigen und den Lauf der Kugel beliebig lange zu verfolgen, ist diese Frage durch das Experiment nicht zu beantworten. Dennoch fand Galilei durch eine sehr geistreiche Überlegung die Lösung des Problems.

Galilei bemerkte - man sagt, angeregt durch einen im Dom zu Pisa schaukelnden Kronleuchter -, daß ein Pendel, wenn es nach einer Seite ausgelenkt und losgelassen wird, auf der anderen Seite fast bis zu seiner Anfangshöhe wieder emporsteigt. Daran ändert sich auch nichts, wenn der Pendelfaden beim Hinüberschwingen durch ein Hindernis, etwa durch einen eingeschlagenen Nagel, abgelenkt wird (siehe Bild 1). Offenbar ist es also dem Widerstand der Luft und des Fadens, aber nicht der Bahn des Pendelkörpers zuzuschreiben, daß die Anfangshöhe nicht mehr präzise erreicht wird. Wären diese Widerstände nicht vorhanden, würde das schwingende Pendel seine Anfangshöhe exakt erreichen. Dasselbe wäre auch zu beobachten, wenn der Pendelkörper nicht durch einen Faden, sondern von einer entsprechend gebogenen Rinne reibungsfrei geführt würde (siehe Bild 2).

Da man sich eine derartige Rinne aus sehr vielen schiefen Ebenen zusammengesetzt denken kann, betrachtet Galilei nun einen Körper, welcher auf einer schiefen Ebene herabgleitet und mit der erlangten Endgeschwindigkeit auf einer zweiten schiefen Ebene wieder aufsteigt. Der Körper muß dann, falls von der Reibung abgesehen wird, genau bis zu seiner Anfangshöhe aufsteigen, gleichgültig wie groß die Neigung der schiefen Ebene ist.

Nun denkt sich Galilei die Neigung der zweiten schiefen Ebene kleiner und kleiner gemacht (siehe Bild 3). Stets wird der Körper auf seine alte Höhe hinaufklettern. Die Bahn und die Laufzeit freilich werden dabei länger und länger und die Verzögerung kleiner und kleiner. Hierauf geht Galilei zum Grenzfall über, zur Waagrechten. Wenn sich der Körper konsequent verhält, so muß er jetzt mit konstanter Geschwindigkeit unaufhörlich weiterlaufen, sich also auf geradliniger Bahn gleichförmig dahinbewegen, ganz im Gegensatz zur Behauptung des Aristoteles. Galilei kommt zu der wichtigen Erkenntnis:

Trägheitssatz

Ein Körper, auf den keine Kraft wirkt, verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung auf geradliniger Bahn.

Eine schwerelose Flintenkugel würde also im luftleeren Raum geradlinig in Richtung des Flintenlaufes fortfliegen und sich mit konstanter Geschwindigkeit beliebig lange weiterbewegen. Sie benötigt demnach nicht die Luft als antreibendes Mittel, wie Aristoteles glaubte. Ganz im Gegenteil! Die Luft würde die Bewegung allmählich abbremsten.

Aristoteles war bestrebt, die komplizierten Naturerscheinungen, so wie sie vor unseren Sinnen ablaufen, direkt in Gesetze zu fassen. Galilei dagegen untersuchte mit gezielten Experimenten zunächst nur einfache Spezialfälle und tastete sich so allmählich an die niemals beobachtbaren Idealfälle heran. An diesen las er die Gesetze ab und leitete daraus umgekehrt die komplizierten Erscheinungen der beobachtbaren Welt her. Aristoteles' Weg erwies sich als nicht gangbar. Galileis Methode dagegen führte bis zum heutigen Tage zu einer Fülle neuer Erkenntnisse. So wurde er - und nicht Aristoteles - zum Begründer der heutigen Physik.

Die einfachen Spezialfälle sind es also, die untersucht werden müssen. Das ist der tiefere Grund, warum man in der Physik so wirklichkeitsfremde Situationen, wie z. B. das Abgleiten eines Körpers auf der schiefen Ebene unter Vernachlässigung der Reibung oder den freien Fall unter Außerachtlassung des Luftwiderstandes, betrachtet. Es sind dies die einfachsten Elemente, aus denen sich die Erscheinungen der Umwelt zusammensetzen lassen.»

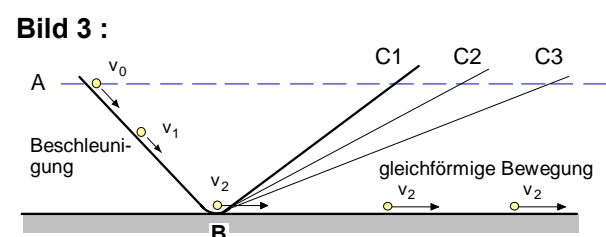
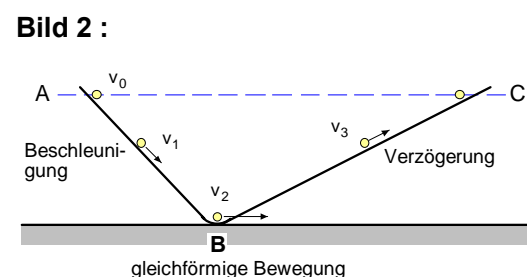
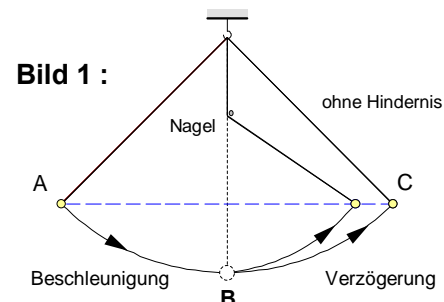
Quelle : R.Sextl u.a., Das mechanische Universum, Frankfurt a.M. 1980, S.17 f.



Galileo Galilei

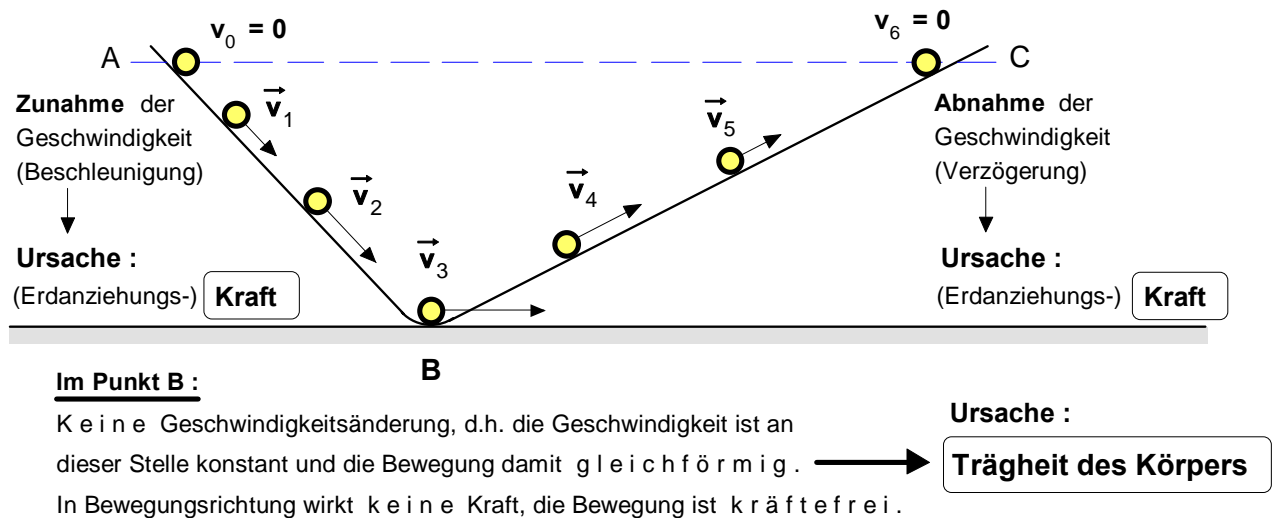
Abb. 1 : Galileo Galilei wurde 1564 in Pisa geboren. Hier studierte Medizin, Mathematik und Physik. Mit 25 Jahren wurde er Mathematikprofessor in Pisa, 1592 ging er an die Universität zu Padua. Dort entwickelte er ein Fernrohr, mit dem er u.a. die Oberflächenstruktur des Mondes und die Monde des Jupiter entdeckte, und bekannte sich erstmals zum Weltbild des Kopernikus, das er fortan vehement verteidigte. Deshalb wurde ihm von der Inquisition der Prozeß gemacht, er mußte abschwören und wurde 1633 zu lebenslanger Haft verurteilt (siehe dazu die Pressemeldung unten). 1642 starb Galilei in seiner Verbannung in Arcetri bei Florenz.

Galilei zur Analogie von Pendelbewegung und Fallbewegung auf einer schiefen Ebene



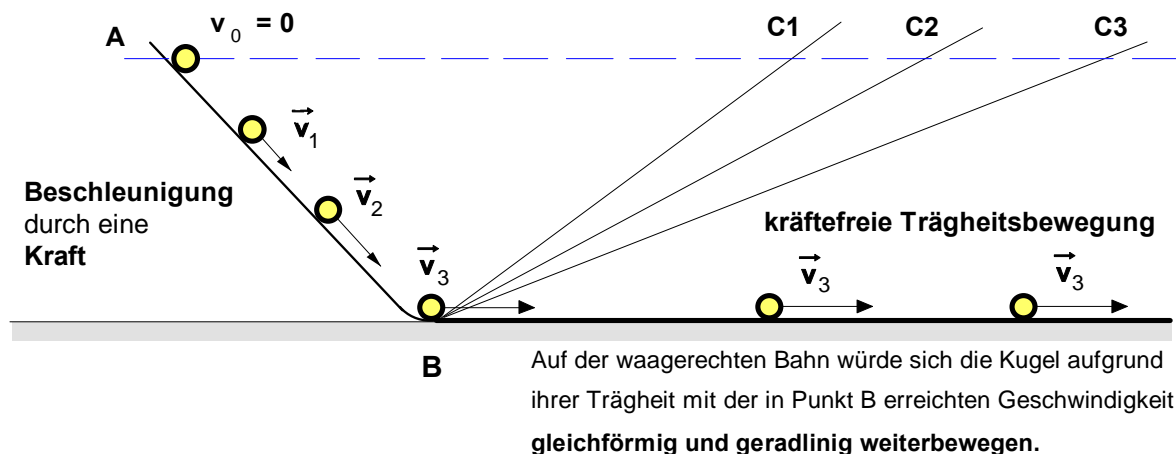
● Einige ergänzende Hinweise zum Trägheitsmodell von Galileo Galilei (etwa 1638)

1. Bewegungsformen einer Kugel auf einer reibungsfreien Kugelrinne (Modell)



2. Reibungsfreie Kugelrinne mit verschiedenen Neigungen der rechten schiefen Ebene

Auch wenn man die Neigung der rechten schiefen Ebene immer kleiner wählt, würde die Kugel stets wieder bis zu ihrer Anfangshöhe aufsteigen, wenn man von der Reibung absieht. Je geringer die rechte Bahn geneigt ist, desto länger werden die Bahn und die Laufzeit der Kugel und desto langsamer nimmt die Geschwindigkeit ab, d.h. die Verzögerung wird kleiner und kleiner. Neigt man die rechte Rinne schließlich so weit, daß sich eine **waagerechte Bahn** ergibt, so wäre die Verzögerung der Kugel unendlich klein, sie würde also keine Geschwindigkeitsänderung mehr erfahren und sich mit der im Punkt B erreichten Geschwindigkeit v_3 **gleichförmig** (d.h. mit konstanter Geschwindigkeit) und **geradlinig** weiterbewegen, ohne je zum Stillstand zu kommen, denn auch in diesem Fall hätte sie das Bestreben, wieder bis zu ihrer Anfangshöhe aufzusteigen. Da sich die Kugel auf der waagerechten Bahn nicht aufgrund einer Kraftwirkung, sondern allein durch ihre Trägheit weiterbewegt, sprechen wir in diesem Fall von einer **kräftefreien Trägheitsbewegung**.



► Aus diesen Überlegungen folgt für den **Begriff der Kraft**:

- Ein Körper, auf den **keine Kraft** wirkt und damit **kräftefrei** ist, verharrt im Zustand der **gleichförmigen geradlinigen Bewegung** oder der **Ruhe**. (Trägheitsprinzip von Newton)
- Wenn sich ein Körper im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung befindet, bedarf es einer **Kraft**, um diesen Zustand zu ändern. Die **Kraft** ist demnach die **Ursache** der **Bewegungsänderung** (Beschleunigung, Verzögerung oder Richtungsänderung) von Körpern.



Zeitgenössische Darstellung des etwa 1591 von Galilei in Pisa vorgeführten Fallrinnen-Experiments

Das Bild ist die Vorlage eines zu Ehren Galileis von G. Bezzuoli (1784 – 1855) gemalten Frescos im Museo Zoologico ("La Specola") von Florenz. aus: R. Sexl u.a., Das mechanische Universum, Frankfurt am Main 1980, S.16. Vgl. auch J.-P. Maury, Galileo Galilei, Ravensburg 1986, S.74

Galileis Beschreibung des Versuchs mit der Fallrinne

Salviati: Ihr stellt in der That, als Mann der Wissenschaft, eine berechtigte Forderung auf, und so muss es geschehen in den Wissensgebieten, in welchen auf natürliche Consequenzen mathematische Beweise angewandt werden; so sieht man es bei Allen, die Perspective, Astronomie, Mechanik, Musik und Anderes betreiben; diese alle erhärten ihre Principien durch Experimente, und diese bilden das Fundament des ganzen späteren Aufbaues: lasst uns es nicht für überflüssig halten, wenn wir mit grosser Ausführlichkeit diesen ersten und fundamentalen Gegenstand behandelt haben, auf welchem das immense Gebiet zahlloser Schlussfolgerungen ruht, von denen ein kleiner Theil von unserem Autor im vorliegenden Buche behandelt wird; genug, dass er den Eingang und die bisher den spekulativen Geistern verschlossene Pforte geöffnet hat. Der Autor hat es nicht unterlassen, Versuche anzustellen, und um mich davon zu überzeugen, dass die gleichförmig beschleunigte Bewegung in oben geschildertem Verhältniss vor sich gehe, bin ich wiederholt in Gemeinschaft mit unserem Autor in folgender Weise vorgegangen:

Auf einem Lineale, oder sagen wir auf einem Holzbrette von 12 Ellen Länge, bei einer halben Elle Breite und drei Zoll Dicke, war auf dieser letzten schmalen Seite eine Rinne von etwas mehr als einem Zoll Breite eingegraben. Dieselbe war sehr gerade gezogen, und um die Fläche recht glatt zu haben, war inwendig ein sehr glattes und reines Pergament aufgeklebt in dieser Rinne liess man eine sehr harte, völlig runde und glattpolirte Messingkugel laufen. Nach Aufstellung des Brettes wurde dasselbe einerseits gehoben, bald eine, bald zwei Ellen hoch; dann liess man die Kugel durch den Kanal fallen und verzeichnete in sogleich zu beschreibender Weise die Fallzeit für die ganze Strecke: häufig wiederholten wir den einzelnen Versuch, zur genaueren Ermittlung der Zeit, und fanden gar keine Unterschiede, auch nicht einmal von einem Zehnthheil eines Pulsschlages. Darauf liessen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen, und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegen früher. Dann wählten wir andere Strecken, und verglichen die gemessene Fallzeit mit der zuletzt erhaltenen und mit denen von $\frac{2}{3}$ oder $\frac{3}{4}$ oder irgend anderen Bruchtheilen; bei wohl hundertfacher Wiederholung fanden wir stets, dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten: und dieses zwar für jedwede Neigung der Ebene, d.h. des Kanales, in dem die Kugel lief. Hierbei fanden wir ausserdem, dass auch die bei verschiedenen Neigungen beobachteten Fallzeiten sich genau so zu einander verhielten, wie weiter unten unser Autor dasselbe andeutet und beweist. 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) von einander abwichen.

Simplicio: Wie gern hätte ich diesen Versuchen beigewohnt; aber da ich von Eurer Sorgfalt und Eurer wahrheitsgetreuen Wiedergabe überzeugt bin, beruhige ich mich und nehme dieselben als völlig sicher und wahr an.

Salviati: Nun, so können wir unsere Lektüre wieder aufnehmen und weiter gehen.

Quelle: Galileo Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, Leyden 1638. In deutscher Übersetzung hrsg. von Arthur v. Oettingen, Nachdruck: Darmstadt 1973, S. 162 f.

Hinweise zu den Rollen von Salviati, Sagredo und Simplicio in der Darstellung Galileis

Salviati, der im Dialog als der überlegene Gesprächsführer in Erscheinung tritt, ist in der Regel auch die Stimme **Galileis** selbst. Er ist der kluge und moderne Wissenschaftler, der unter anderem alle gegen die Erdbewegung geltend gemachten Argumente zu entkräften weiß. Zugleich ist die Wahl des Namens ein Freundesdank Galileis an seinen intimen **Schüler Filippo Salviati**, geboren am 19. Januar 1582 zu Florenz, der schon in Padua seine Vorlesungen hörte und wohl durch Galileis Einfluß schon mit 30 Jahren (1612) die ehrenvolle Ernennung als Mitglied der Accademia dei Lincei in Rom erfuhr. Zum großen Kummer Galileis starb er bereits 1614 auf einer Reise nach Spanien in Barcelona.

Sagredo nimmt als Dialogpartner die zweite Stelle ein. Durch seine präzisen Fragen und durch gutes Verständnis der Probleme trägt er wesentlich zum Gelingen der Gespräche bei. Auch er erinnert an einen guten **Freund Galileis**, an **Giovanni Francesco Sagredo**, der am 19. Juni 1571 in Venedig geboren wurde und als Senator in seiner Vaterstadt am 5. März 1620 starb. Mit Sorge hatte er Galilei von Padua scheiden sehen und ihn frühzeitig vor den Intrigen der Jesuiten gewarnt. Galilei war ihm von Herzen zugetan und hatte durch den gleichfalls frühen Tod dieses Bundesgenossen im geistigen Kampf einen herben Verlust erlitten.

Simplicio als Vertreter der **Aristoteliker** und Peripatetiker¹⁾ ist eine Symbolfigur, die schon durch den Namen «der Einfache» oder gar «der Einfältige» ironisch gekennzeichnet ist. Da er der Wortführer für die Einwendungen gegen die Lehre des Kopernikus ist, sich auch gelegentlich der von den Jesuiten des Collegium Romanum aufgestellten Thesen bedient und sogar an einer Stelle wörtlich eine Entgegnung von Papst Urban VIII. vorträgt, ist es nicht verwunderlich, daß Galilei sich durch diesen «Simplicio» zusätzliche Feindschaft erworben hat. Denn für solche Anspielungen war man in Rom hellhörig, und schließlich sieht sich niemand gerne selbst in der Rolle einer durch geistige Befangenheit und Dummheit beschränkten, lächerlichen Gestalt.

Quelle: J.Hemleben, Galilei, Reinbek bei Hamburg 1981, S. 112

¹⁾ So heißen die Schüler und Anhänger des Aristoteles nach den Wandelgängen [*Peripato*] des Lykeion-Gymnasiums, in denen er zuerst lehrte.

Abb. rechts: Titelblatt des von Galilei während seiner Verbannung zwischen 1634 bis 1637 in Arcetri verfaßten und 1638 im holländischen Leyden veröffentlichten Buches "**Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend**" (die sog. "**Discorsi**")



Galileis Arbeitsraum
(Nachbildung im Deutschen Museum in München)



- Nach **Aristoteles** besitzt jeder "schwere Körper", wie beispielsweise ein Stein, den man vom Boden aufhebt und dann wieder losläßt, die Eigenschaft, mit einer **bestimmten**, im gleichsam "von Natur aus" eingepprägten **Geschwindigkeit** zur Erde zu fallen, denn die Erde sei der "natürliche Ort" dieser Körper. Bei Körpern mit größerem Gewicht sei dieses Bestreben von "Natur aus" stärker ausgeprägt als bei leichteren. Daher fallen nach Aristoteles schwerere Körper auch rascher zur Erde als leichtere, denn ihnen sei von "Natur aus" nur eine geringere Fallgeschwindigkeit eingepragt. Diese Auffassung scheint mit unseren Erfahrungen weitgehend übereinzustimmen. So fällt gemäß unseren Alltagswahrnehmungen z.B. eine Bleikugel schneller zur Erde als eine Flaumfeder.

- Zu dieser Frage, **ob schwere Körper schneller zur Erde fallen als leichte**, zunächst **zwei Lehrbuchtexte** :

1. In einem weit verbreiteten Hochschullehrbuch der Experimentalphysik wird dazu festgestellt :

»Zwei gleich große Kugeln aus Aluminium und Blei, die also sehr verschiedenes Gewicht haben, lassen wir gleichzeitig aus derselben Höhe zu Boden fallen. Wir stellen fest, daß sie zur gleichen Zeit am Boden aufschlagen, wie bereits **Galilei** 1590 durch Fallversuche am schiefen Turm von Pisa festgestellt hat.« Nach einer kurzen Beschreibung eines weiteren Versuchs, demzufolge eine Flaumfeder und eine Bleikugel, die man in einem luftleer gepumpten Glasrohr gleichzeitig fallen läßt, »im gleichen Augenblick auf den Boden des Rohres aufschlagen«, kommt der Autor zum Schluß: »Wir dürfen also das **Erfahrungsgesetz** aussprechen: **Im luftleeren Raum fallen alle Körper gleich schnell.**«

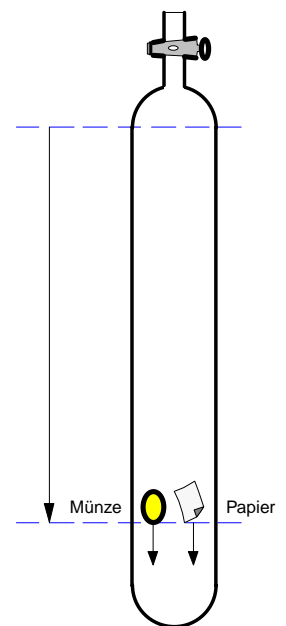
Quelle: L.Bergmann - Cl.Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band I, Berlin 1961, S. 33 f.

2. In einem Physikbuch für die Oberstufe heißt es dazu:

»Galilei habe - so wird berichtet - den schiefen Turm von Pisa bestiegen und von oben verschieden schwere Körper gleichzeitig hinabgeworfen. Wengleich dies wohl eine Legende sein dürfte, so steht doch fest, daß er Fallversuche tatsächlich durchgeführt hat. Er beobachtete dabei, daß die Körper trotz ihres unterschiedlichen Gewichtes nahezu gleichzeitig den Boden erreichten. ...

Man kann **Galileis Versuch (I)** leicht wiederholen. Man nehme eine Münze und ein kleines Stück Papier und lasse sie gleichzeitig aus der gleichen Höhe zu Boden fallen. Die Münze wird schnell unten sein, während das Stück Papier sich sehr viel länger in der Luft herumtreibt. Zerknüllt man aber das Papier und rollt es zu einem kleinen Kügelchen zusammen, dann wird es fast so schnell fallen wie die Münze. Läßt man die Fallbewegung schließlich in einem **luftleer gepumpten Glasrohr** (siehe Abb. rechts) vor sich gehen, so wird man feststellen, daß die Münze und das Stück Papier mit genau der gleichen Geschwindigkeit zu Boden fallen.«

Quelle: R.Sexl u.a., Das mechanische Universum, Eine Einführung in die Physik, Band 1, Frankfurt am Main 1980, S. 15



- **Zwei kurze historische Zwischenbemerkungen:**

1. **Galilei** ist am 8. Januar **1642** in Arcetri **gestorben**.
2. Die **Vakuumpumpe** wurde **1650** von dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke erfunden.

- **Galileis Begründung des "freien Falls" im Vakuum** als allgemeine Form der Fallbewegung

Salviati: ... Nachdem ich mich von der Unwahrheit dessen überzeugt hatte, daß ein und derselbe Körper in verschiedenen widerstehenden Mitteln Geschwindigkeiten erlange, die den Widerständen umgekehrt proportional seien, sowie von der Unwahrheit dessen, daß Körper von verschiedenem Gewicht in ein und demselben Mittel diesen Gewichten proportionale Geschwindigkeiten erlangen ... , kombinierte ich beide Erscheinungen, indem ich Körper verschiedenen Gewichtes in verschieden widerstehende Medien brachte, und fand, daß die erzeugten Geschwindigkeiten um so mehr von einander abwichen, als der Widerstand des Mediums größer war, und zwar in solchem Betrage, daß zwei Körper, die in der Luft nur sehr wenig verschieden fallen, im Wasser um's Zehnfache differieren können; auch kommt es vor, daß ein Körper in der Luft fällt, im Wasser dagegen schwebt, d.h. sich gar nicht bewegt, ja sogar emporsteigt. ... Angesichts dessen glaube ich, daß wenn man den Widerstand der Luft ganz aufhobe, alle Körper ganz gleich schnell fallen würden.

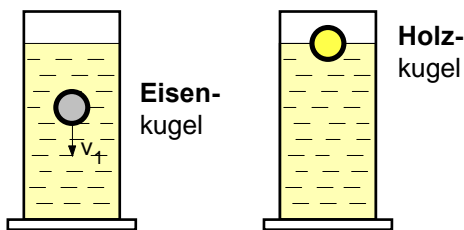
Simplicio: Das ist eine gewagte Behauptung, Herr Salviati. Ich meinerseits werde nie glauben, daß in ein und demselben Vakuum, wenn es in demselben eine Bewegung gibt, eine Wollflocke ebenso schnell wie Blei fallen werde.

Salviati: Nur gemacht, Herr Simplicio, Euer Bedenken ist nicht so begründet, und ich bin nicht um Antwort in Verlegenheit. Zu meiner Rechtfertigung und zu Eurer Belehrung hört mich an : Wir wollen die Bewegung der verschiedensten Körper in einem nicht widerstehenden Mittel untersuchen, **so daß alle Verschiedenheit auf die fallenden Körper zurückzuführen wäre.** Und da nur ein Raum, der völlig luftleer ist und auch keine andere Materie enthält, sei dieselbe noch so fein und nachgiebig, geeignet erscheint das zu zeigen, was wir suchen, und da wir solch einen Raum **nicht** herstellen können, so wollen wir prüfen, was in feineren Medien und weniger widerstehenden geschieht im Gegensatz zu anderen weniger feinen und stärker widerstehenden. Finden wir tatsächlich, daß verschiedene Körper **immer weniger verschieden sich bewegen**, je nachgiebiger die Medien sind, und dass schließlich, trotz sehr großer Verschiedenheit der fallenden Körper im allerfeinsten Medium der allerkleinste Unterschied verbleibt, ja eine kaum noch wahrnehmbare Differenz, dann, scheint mir, dürfen wir mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen, daß im Vakuum völlige Gleichheit eintreten werde.

Quelle: Galileo Galilei, Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, Leyden 1638. In deutscher Übersetzung hrsg. von Arthur v. Oettingen, Nachdruck: Darmstadt 1973, S. 62 und 65 f.

- Relativ willkürlich gewähltes **Zahlenbeispiel** zur **Verdeutlichung des Gedankenganges** von Galilei

1. Wasser als Medium



mittlere Fallgeschwindigkeit:

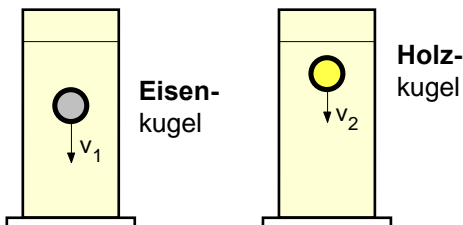
$$v_1 = 2 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 0 \text{ m/s}$$

Geschwindigkeits-
unterschied :

$$\Delta v = 2 \text{ m/s}$$

2. Luft als Medium



mittlere Fallgeschwindigkeit:

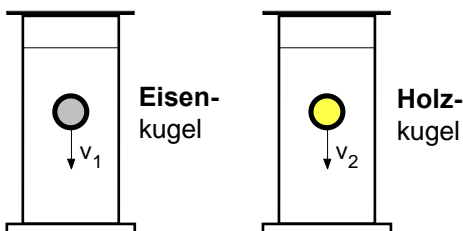
$$v_1 = 8 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 7,5 \text{ m/s}$$

Geschwindigkeits-
unterschied :

$$\Delta v = 0,5 \text{ m/s}$$

3. Vakuum



mittlere Fallgeschwindigkeit:

$$v_1 = 8,2 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 8,2 \text{ m/s}$$

Geschwindigkeits-
unterschied :

$$\Delta v = 0 \text{ m/s}$$

Fazit von Galilei:

Je dünner der Stoff (das „Medium“) ist, in dem die verschieden schweren Körper fallen, desto geringer sind die Geschwindigkeitsunterschiede.

Im völlig stofflosen, also im **leeren Raum** (Vakuum), gibt es überhaupt **keinen Unterschied** mehr, d.h. dort **fallen alle Körper gleich schnell.**

Anmerkung: Galilei spricht von der „Geschwindigkeit“ der fallenden Körper. Gemeint ist aber deren Beschleunigung. Denn was im stoffgefüllten unterschiedlich ist bzw. im Vakuum gleich ist, ist **nicht** die „Geschwindigkeit“, sondern die **Beschleunigung**, mit der die verschiedenen Körper fallen.

Zur Chronologie der Ereignisse*

- 21. Februar 1632** Der Druck des Buches »Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische« ist abgeschlossen.
- 25. Juli 1632** Pater Riccardi schreibt dem Inquisitor von Florenz, er solle die Verbreitung des Dialogs verhindern.
- 23. September 1632** Papst Urban VIII. befiehlt Galilei, er solle sich innerhalb des Oktobers in Rom einfinden.
- 17. Dezember 1632** Galilei erhält eine Bescheinigung, unterschrieben von drei Ärzten, daß er sich »wegen offensichtlich drohender Lebensgefahr« nicht auf die Reise begeben könne.
- 30. Dezember 1632** Der Papst droht Galilei, falls er sich nicht unverzüglich nach Rom begeben werde, werde er ihn von einem Kommissar, begleitet von Ärzten, abholen und wenn nötig in Ketten ins Gefängnis der Heiligen Uffizien bringen lassen.
- 20. Januar 1633** Galilei macht sich endlich auf die Reise und kommt am Abend des 13. Februars - nach einer Quarantäne wegen der wütenden Pest - in Rom an. Es wird ihm erlaubt, sich in der Botschaft der Toskana anstatt in den Kerkern der Heiligen Uffizien aufzuhalten.
- 12. April 1633** Er stellt sich den Heiligen Uffizien und wird zum ersten Mal von Kardinal Bellarmin verhört.
- 30. April 1633** Er gesteht die sogenannten »Fehler« und erklärt sich bereit, dem Dialog zwei weitere Tage anzufügen (dazu wird es allerdings nie kommen), in denen er die kopernikanische Lehre widerlegt.
- 21. Juni 1633** Erneut stellt er sich den Behörden der Heiligen Uffizien und wird verhört. Diesmal wird er festgehalten.
- 22. Juni 1633** Er wird in den grossen Saal der Dominikanerkirche Santa Maria sopra Minerva geführt, wo ihm das formelle Urteil (Kerkerhaft und Verbot des Dialogs) vorgetragen wird. Daraufhin schwört Galilei ab. Er bleibt zunächst in Arrest.
- 30. Juni 1633** Der Papst erlaubt Galilei sich in das Erzbistum Siena zu begeben. Dorthin reist er am 6. Juli 1633 und lebt unter strengem Hausarrest für ein halbes Jahr als »Gast« im Palais des ihm wohlgesonnenen Erzbischofs Ascanio Piccolomini.
- 1. Dezember 1633** Der Papst erlaubt Galilei, den lebenslänglichen Hausarrest in seinem eigenem Landhaus in Arcetri bei Florenz zu verbringen.



Titelblatt der Erstausgabe des »Dialogs über die beiden Weltsysteme« von 1632 – Das Titelblatt zeigt links Aristoteles, in der Mitte Ptolemäus und rechts Kopernikus, beide mit den unterschiedlichen Weltmodellen in den Händen.



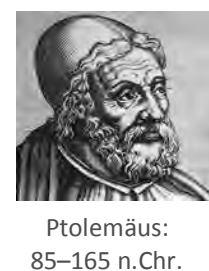
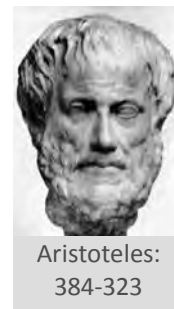
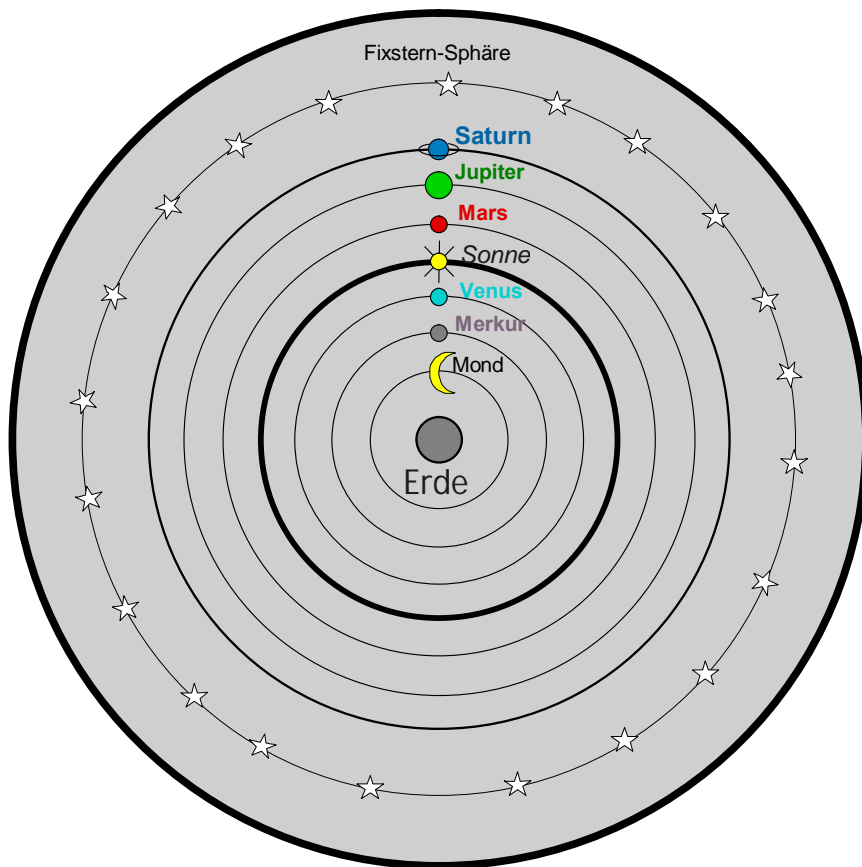
Kardinal Robert Bellarmin, der Gegenspieler von Galilei vor dem Inquisitionsgericht



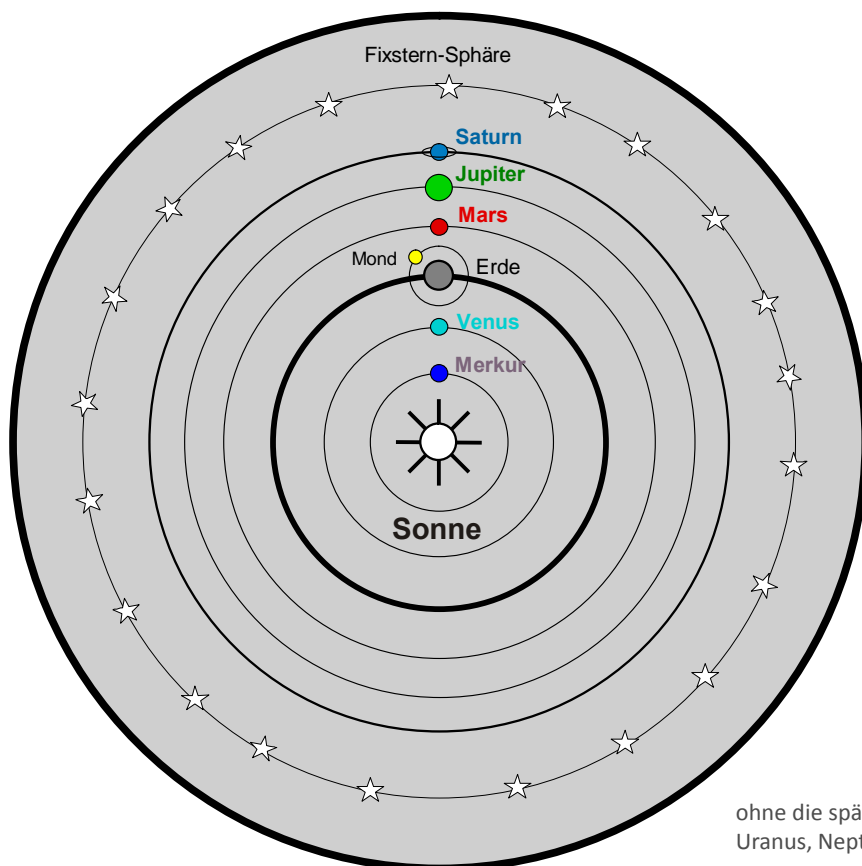
Bildnis des siebzigjährigen Galilei, 1635 gemalt von Justus Sustermans

*Quelle (von einigen wenigen redaktionellen Änderungen abgesehen): <http://www.library.ethz.ch/exhibit/galilei/galileo8.html>

Geozentrisches Weltbild: Die Erde ist der ruhende Mittelpunkt der Welt.

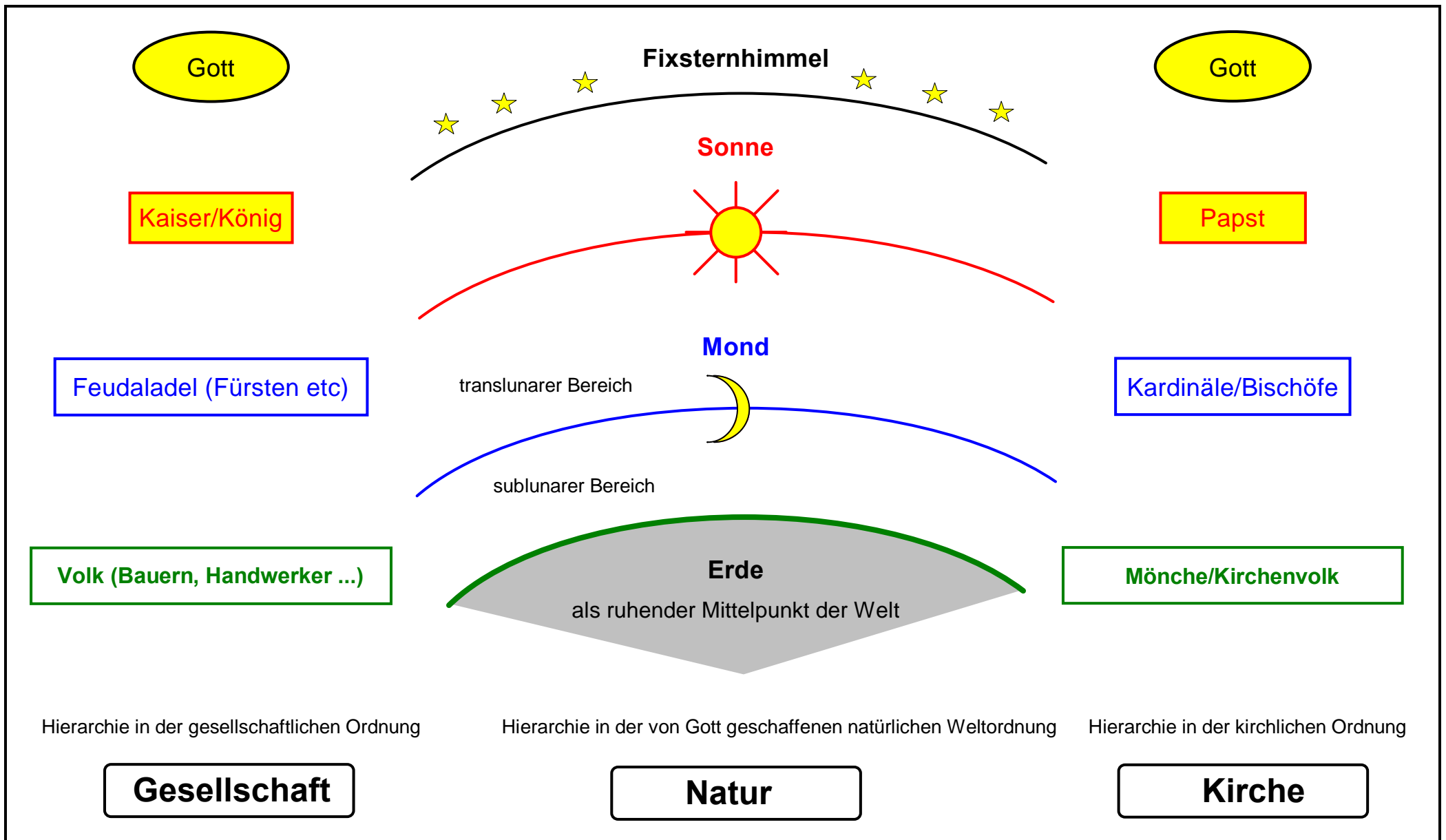


Heliozentrisches Weltbild: Die Sonne ist der ruhende Mittelpunkt der Welt.



ohne die später entdeckten
Uranus, Neptun und Pluto

Zur ideologisch-politischen Funktion des geozentrischen Weltbildes



Zeitgenössische Darstellung zur gesellschaftlichen Hierarchie in der mittelalterlichen Ständegesellschaft



Die Ständeordnung in der 1488 erschienenen *Pronostacio* des Astrologen Johannes Lichtenberger: Jesus Christus weist den drei Ständen ihre Aufgaben zu: *Tu supplex ora* („du bete demütig!“) zum Klerus, *Tu protege* („du beschütze!“) zu Kaiser und Fürsten, *Tuque labora* („und du arbeite!“) zu den Bauern

Quelle (alle Graphiken): Wikipedia: Ständeordnung <http://de.wikipedia.org/wiki/St%C3%A4ndeordnung>



Darstellung der drei Stände in der handschriftlichen Chronik der Herrschaft Grüningen von 1610, verfasst vom Dättliker Pfarrer Caspar Schwerter. Symbolisch sind der «Lehrstand», der «Wehrstand» und der «Nährstand» in den Figuren eines Gelehrten, des Kaisers und eines Bauern dargestellt. Der «Gelehrte» betet für alle, der «Kaiser» streitet für alle, der «Bauer» ernährt alle.

Abschwörungsurkunde von Galilei vom 22.Juni 1633

Ich, Galileo, Sohn des Vincenzo Galilei aus Florenz, siebenzig Jahre alt, stand persönlich vor Gericht und ich knie vor Euch Eminenzen, die Ihr in der ganzen Christenheit die Inquisitoren gegen die ketzerische Verworfenheit seid. Ich habe vor mir die heiligen Evangelien, berühre sie mit der Hand und schwöre, daß ich immer geglaubt habe, auch jetzt glaube und mit Gottes Hilfe auch in Zukunft glauben werde, alles was die heilige katholische und apostolische Kirche für wahr hält, predigt und lehrt. Es war mir von diesem Heiligen Offizium von Rechts wegen die Vorschrift auferlegt worden, daß ich völlig die falsche Meinung aufgeben müsse, daß die Sonne der Mittelpunkt der Welt ist, und daß sie sich nicht bewegt, und daß Erde nicht der Mittelpunkt der Welt ist, und daß sie sich bewegt. Es war mir weiter befohlen worden, daß ich diese falsche Lehre nie vertreten dürfe, sie nicht verteidigen dürfe und daß ich sie in keiner Weise lehren dürfe, weder in Wort noch in Schrift. Es war mir auch erklärt worden, daß jene Lehre der Heiligen Schrift zuwider sei. Trotzdem habe ich ein Buch geschrieben und zum Druck gebracht, in dem ich jene bereits verurteilte Lehre behandle und in dem ich mit viel Geschick Gründe zugunsten derselben bebringe, ohne jedoch irgendeiner Entscheidung zu gelangen. Daher bin ich der Ketzerei hohem Maße verdächtig befunden worden, darin bestehend, daß ich die Meinung vertreten und geglaubt habe, daß die Sonne Mittelpunkt der Welt und unbeweglich ist, und daß die Erde nicht Mittelpunkt ist und sich bewegt. Ich möchte mich nun vor Euren Eminenzen und vor jedem gläubigen Christen von jenem schweren Verdacht, den ich gerade näher bezeichnete, reinigen. Daher schwöre ich mit aufrichtigem Sinn und ohne Heuchelei ab, erwünsche und verfluche jene Irrtümer und Ketzereien und darüber hinaus ganz allgemein jeden irgendwie gearteten Irrtum, Ketzerei oder Sektiererei, die der Heiligen Kirche entgegen ist. Ich schwöre, daß ich in Zukunft weder in Wort noch in Schrift etwas verkünden werde, das mich in einen solchen Verdacht bringen könnte. Wenn ich aber einen Ketzer kenne, oder jemanden der Ketzerei verdächtig weiß, so werde ich ihn diesem Heiligen Offizium anzeigen oder ihn dem Inquisitor oder der kirchlichen Behörde meines Aufenthaltsortes angeben.

Ich schwöre auch, daß ich alle Bußen, die mir das Heilige Offizium auferlegt hat oder noch auferlegen wird, genauestens beachte und erfüllen werde. Sollte ich irgendeinem meiner Versprechen und Eide, was Gott verhüten möge, zuwiderhandeln, so unterwerfe ich mich allen Strafen und Züchtigungen, die das kanonische Recht und andere allgemeine und besondere einschlägige Bestimmungen gegen solche Sünder festsetzen und verkünden. Daß Gott mir helfe und seine heiligen Evangelien, die ich mit den Händen berühre.

Ich, Galileo Galilei, habe abgeschworen, geschworen, versprochen und mich verpflichtet, wie ich eben näher ausführte. Zum Zeugnis der Wahrheit habe ich diese Urkunde meines Abschwörens eigenhändig unterschrieben und sie Wort für Wort verlesen, in Rom im Kloster der Minerva am 22. Juni 1633. Ich, Galileo Galilei, habe abgeschworen und eigenhändig unterzeichnet.

Quelle: J.Hemleben, Galilei, Reinbek bei Hamburg 1969, S.7 f.

Das Urteil gegen Galilei vom 22.Juni 1633

Sie sind verdächtig, für wahr gehalten und geglaubt zu haben, daß die Sonne der Mittelpunkt der Welt ist, und daß sie sich nicht von Ost nach West bewegt, und daß die Erde sich bewegt und nicht der Mittelpunkt der Welt ist. Sie sind weiter verdächtig, zu meinen, daß man eine Meinung vertreten und als wahrscheinlich verteidigen dürfe, nachdem erklärt und festgestellt ist, daß sie der Heiligen Schrift zuwider ist. Infolgedessen sind gegen Sie alle die Verurteilungen und Strafen verwirkt, die das kanonische Recht und die anderen in Betracht kommenden allgemeinen und besonderen Vorschriften gegen solche Verbrecher vorschreiben und feststellen. Wir wollen Sie davon befreien, sofern Sie vorerst mit reinem Herzen und ungeheuchelt vor uns abschwören und jene Irrtümer und Ketzereien erwünschen und verfluchen, ebenso wie jeden anderen Irrtum und jede andere Ketzerei gegen die katholische apostolische Kirche in einer von uns vorzuschreibenden Art und Weise.

Damit aber Ihr schwerer Irrtum und Ihr schädlicher Fehltritt nicht gänzlich unbestraft bleiben und damit Sie künftig vorsichtiger sind und als abschreckendes Beispiel für andere, die ähnliche Verbrechen im Sinn haben, so verordnen wir durch öffentliches Edikt, daß der *Dialog* des Galilei verboten wird.

Sie verurteilen wir zu förmlicher Haft in diesem Heiligen Offizium nach unserem Gutdünken. Als heilsame Buße legen wir Ihnen auf, daß Sie drei Jahre lang wöchentlich einmal die sieben Bußpsalmen sprechen. Wir behalten uns das Recht vor, im ganzen oder im einzelnen die gegen Sie festgesetzten Strafen und Bußen zu verschärfen, zu verändern oder auch zu erleichtern.

Quelle: J.Hemleben, Galilei, Reinbek bei Hamburg 1969, S.131

Wird Galilei rehabilitiert?

Papst wünscht Rücknahme des kirchlichen Fehlurteils

VATIKANSTADT (ap). Der römisch-katholischen Kirche ist offenbar daran gelegen, den vor fast 350 Jahren wegen seiner modernen astronomischen Theorien als Ketzer verurteilten Galileo Galilei nachträglich Gerechtigkeit widerfahren zu lassen. Wie aus dem vatikanischen Sekretariat zu hören ist, soll der Fall Galilei mit größter Objektivität noch einmal aufgerollt werden. Dies geschehe auf ausdrücklichen Wunsch Papst Johannes Pauls II.

Bereits im vorigen Jahr hatte der Papst die Verurteilung des italienischen Naturwissenschaftlers, Mathematikers und Philosophen vom 22. Juni 1633 ein Fehlurteil genannt. Bis heute ist der Vorwurf der katholischen Kirche offiziell nicht zurückgenommen, Galilei habe das damals geltende ptolemäische Weltbild erschüttern wollen, demzufolge die Erde feststehender Mittelpunkt der Welt sei, um den sich die anderen Himmelskörper drehten.

Galilei hatte sich in einem Buch als Anhänger des Astronomen Kopernikus bekannt, der herausgefunden hatte, daß sich die Erde in Wirklichkeit mit ihren Nachbarplaneten um die Sonne dreht. "Und sie bewegt sich doch", soll Galilei gesagt haben, nachdem er vor dem Gericht seinen "ketzerischen Theorien" abschwören mußte und in seinem Landhaus bei Florenz unter lebenslangen Hausarrest gesetzt wurde.

Darmstädter Echo vom 23.10.1980

Die Erde darf um die Sonne kreisen

Papst Johannes II. rehabilitiert Galilei - Als Ketzer verurteilt

ROM (ap). Fast 360 Jahre nach der Verurteilung durch die Inquisition ist der italienische Physiker und Mathematiker Galileo Galilei von der katholischen Kirche offiziell rehabilitiert worden. Papst Johannes Paul II. bekannte am Samstag vor Mitgliedern der vatikanischen Akademie der Wissenschaften, daß die Kirche geirrt habe, als sie Galilei am 22. Juni 1633 wegen seiner Lehre verurteilte, wonach die Erde um die Sonne kreise und nicht umgekehrt, wie nach damaliger offizieller Kirchenlehre.

Galilei hatte seiner der Lehre des Kopernikus entnommenen These abschwören müssen und war zulebenslanger Haft verurteilt wor-

den. Sie wurde später in Hausarrest umgewandelt.

Die Erklärung des Papstes ist das Ergebnis dreizehnjähriger Beratungen und Untersuchungen einer von Johannes Paul ernannten Kommission. Die Verurteilung Galileis sei Ergebnis eines "tragischen gegenseitigen Nichtverstehens" und sei in der Folgezeit zu einem Symbol der unterstellten Ablehnung des wissenschaftlichen Fortschritts durch die Kirche geworden, sagte der Pontifex maximus in seiner Rede in der Sala rega des Apostolischen Palastes.

Die Theologen der damaligen Zeit hätten in ihrer Annahme geirrt, daß der Wortsinn der

Heiligen Schrift den physischen Zustand der Welt beschreibe, sagte Johannes Paul weiter. Der Fall Galilei sei sogar ein Beispiel für die Vereinbarkeit von Wissenschaft und Religion. Man habe damals nur nicht erkannt, daß es "zwei Reiche des Wissens gibt: eins, dessen Quelle die Offenbarung ist und eins, welches der Verstand durch eigene Kraft erkennen kann".

Der Papst mahnte die Wissenschaftler besonders in Hinblick auf Biologie und Biogenetik, bei ihrer Forschung die spirituelle Seite des Menschseins nicht zu vergessen.

Darmstädter Echo vom 2.11.1992



Darmstädter Echo vom 2.11.1992

GALILEO GALILEI*

Von ALBERT EINSTEIN

Galileos *Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme* ist eine Fundgrube für jeden, der sich für die Geistesgeschichte des Westens und für deren Rückwirkung auf die ökonomische und politische Entwicklung interessiert.

Da offenbart sich ein Mann, der den leidenschaftlichen Willen, die Intelligenz und den Mut hat, sich als Vertreter des vernünftigen Denkens der Schar derjenigen entgegenzustellen, die auf die Unwissenheit des Volkes und die Indolenz der Lehrenden in Priester- und Professoren-Gewände sich stützend, ihre Machtpositionen einnehmen und verteidigen. Seine ungewöhnliche schriftstellerische Begabung erlaubt es ihm, zu den Gebildeten seiner Zeit so klar und eindrucksvoll zu sprechen, daß er das anthropozentrische und mythische Denken der Zeitgenossen überwand und sie zu einer objektiven, kausalen Einstellung zum Kosmos zurückführte, die mit der Blüte der griechischen Kultur der Menschheit verlorengegangen war.

Wenn ich dies so ausspreche, sehe ich zugleich, daß ich der weitverbreiteten Schwäche aller derer zum Opfer falle, die trunken von einer übermäßigen Verliebtheit die Statur ihrer Heroen übertrieben darstellen. Es mag sein, daß die Lähmung der Geister durch starre autoritäre Tradition des dunklen Zeitalters im siebzehnten Jahrhundert bereits so weit gemildert war, daß die Fesseln einer überlebten intellektuellen Tradition nicht mehr für die Dauer standhalten konnten — mit oder ohne Galileo.

Nun, dieser Zweifel betrifft ja nur einen Sonderfall der Frage, inwieweit der Verlauf der menschlichen Geschichte durch einzelne Individuen und deren als zufällig und einmalig empfundene Qualitäten entscheidend beeinflusst werden kann. Unsere Zeit steht solchen Auffassungen skeptischer gegen-

* Einstein schrieb dieses »Vorwort« für die amerikanische Ausgabe des *Dialogo*, die 1953 von Stillman Drake, neu übersetzt und kommentiert, herausgegeben wurde (für den ausführlichen bibliographischen Nachweis siehe S. 600 der Bibliographie am Schluß des Bandes). Einstein hat noch nach seinem Weggang aus Deutschland stets die ihm vertrautere deutsche Sprache für seine schriftlichen Aufzeichnungen bevorzugt. Auch der hier wiedergegebene Text ist die Originalfassung, welche zusammen mit einer Übersetzung in der amerikanischen Ausgabe als *Vorwort* abgedruckt wurde. Herrn Dr. Otto Nathan und dem Estate of Albert Einstein, New York, N. Y., danken wir für die Erlaubnis zum Wiederabdruck. [Anm. d. Red.]

über als das achtzehnte Jahrhundert und die erste Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts — begreiflicherweise. Denn die weitgehende Spezialisierung der Berufe und des Wissens läßt den Einzelnen gewissermaßen als „auswechselbar“ erscheinen wie den Einzelteil einer durch Massenfabrikation hergestellten Maschine.

Der Wert des »Dialogs« als Dokument ist glücklicherweise von der Stellung zu solch prekären Fragen unabhängig. Vor allem gibt der »Dialog« eine überaus lebendige und überzeugende Darstellung der herrschenden Ansichten über den Bau des Kosmos im Großen. Die im früheren Mittelalter herrschende kindliche Auffassung der Erde als einer flachen Scheibe, verknüpft mit ganz unklaren Ideen über den von den Sternen erfüllten Raum und die Bewegung der Gestirne, waren längst durch das Weltbild der Griechen, speziell durch Ideen des Aristoteles und durch die ptolemäische konsequente räumliche Auffassung der Gestirne und deren Bewegung verbessert. Das Weltbild, welches zur Zeit Galileos noch vorherrschte, war etwa folgendes:

Es gibt einen Raum, der einen bevorzugten Punkt, den Weltmittelpunkt besitzt. Die Materie — wenigstens der dichtere Teil derselben — sucht sich diesem Punkt möglichst zu nähern. Sie hat demzufolge ungefähr Kugelgestalt angenommen (Erde). Vermöge dieser Entstehung der Erde fällt der Mittelpunkt dieser Erdkugel praktisch mit dem Weltmittelpunkt zusammen. Sonne, Mond und Sterne sind, damit sie nicht nach dem Weltmittelpunkt fallen, auf (durchsichtigen) starren Kugelschalen befestigt, deren Mittelpunkt mit dem Weltmittelpunkt (oder Raummittelpunkt) zusammenfällt. Diese Kugelschalen drehen sich um den ruhenden Erdball (bzw. um den Weltmittelpunkt) mit etwas verschiedenen Winkelgeschwindigkeiten. Die Mondschale hat den kleinsten Radius; sie umschließt alles „Irdische“. Die äußeren Schalen mit ihren Gestirnen repräsentieren die „himmlische Sphäre“, deren Objekte als ewig, unzerstörbar und unveränderlich gedacht sind, im Gegensatz zur „unteren, irdischen Sphäre“, die durch die Mondschale umschlossen wird und alles enthält, was vergänglich, hinfällig und „sündhaft“ ist.

Natürlich ist diese kindliche Konstruktion nicht den griechischen Astronomen zur Last zu legen, die sich bei ihrer Darstellung der Sternbewegungen abstrakter geometrischer Konstruktionen bedienten, die mit wachsender Genauigkeit der Gestirn-Beobachtungen immer komplizierter wurden. In Ermangelung einer Mechanik suchte man alle die komplizierten (scheinbaren) Bewegungen auf die für die denkbar einfachst gehaltene zurückzuführen, nämlich auf die gleichförmige Kreisbewegung und die Superposition solcher Bewegungen. (Die Anhänglichkeit an die Idee der Kreisbewegung als der wahrhaft natürlichen spürt man noch sehr wohl bei Galileo; sie hat es wohl verhindert, daß er das Trägheitsprinzip und dessen zentrale Bedeutung *völlig* erkannte.)

Die obige Skizze stellt eine der barbarischen, primitiven Denkweise der damaligen Europäer angepaßte Vergrößerung der spätgriechischen Ideen dar, welche letztere zwar unkausal, aber doch objektiv und frei von animistischen Auffassungen waren – ein Vorzug, den man der aristotelischen Kosmologie allerdings nur bedingt zubilligen kann.

Wenn Galileo für die Lehre des Kopernikus eintrat und kämpfte, so war es ihm nicht etwa nur darum zu tun, eine Vereinfachung der Darstellung der Sternbewegungen zu erzielen. Sein Ziel war es, eine erstarrte und unfruchtbar gewordene Ideenwelt zu ersetzen durch das vorurteilslose, mühevoll Ringen um eine tiefere und konsequentere Erfassung der physikalischen und astronomischen Tatsachen.

Die Dialogform des Werkes mag zum Teil auf Piatos leuchtendes Vorbild zurückzuführen sein; sie erlaubte Galileos ungewöhnlicher literarischer Begabung eine scharfe und lebendige Gegenüberstellung der Meinungen. Freilich mag auch das Bedürfnis mitgewirkt haben, es auf diese Weise zu vermeiden, in eigener Person eine Entscheidung in den strittigen Fragen treffen zu müssen, die ihn der Vernichtung durch die Inquisition ausgeliefert hätte. Es war Galileo ja sogar direkt verboten worden, für die Lehre des Kopernikus einzutreten. Der »Dialog« stellt, abgesehen von seinem bahnbrechenden sachlichen Gehalt, einen geradezu schalkhaften Versuch dar, dies Gebot scheinbar zu befolgen, sich *de facto* jedoch darüber hinwegzusetzen. Es zeigte sich aber leider, daß die heilige Inquisition für solch feinen Humor nicht das adäquate Verständnis aufzubringen vermochte.

Die Theorie der ruhenden Erde stützte sich auf die Hypothese von der Existenz eines abstrakten Weltmittelpunktes. Dieser sollte den Fall der schweren Körper an der Erdoberfläche bewirken, indem die Körper das Streben haben sollen, sich diesem Weltmittelpunkte soweit zu nähern, als es die Undurchdringlichkeit zuläßt. Dies Streben führt dann zu der annähernden Kugelgestalt der Erde.

Galileo wendet sich gegen die Einführung dieses „Nichts“ (Weltmittelpunkt), das doch auf die materiellen Dinge wirken soll; dies findet er ganz unbefriedigend.

Ferner aber macht er darauf aufmerksam, daß diese unbefriedigende Hypothese auch zu wenig leistet. Sie erklärt nämlich zwar die Kugelgestalt der Erde, aber nicht die Kugelgestalt der übrigen Himmelskörper. Die Mondphasen und die von ihm durch das neuentdeckte Fernrohr entdeckten Phasen der Venus bewiesen aber die Kugelgestalt dieser beiden Himmelskörper, die genauere Beobachtung der Sonnenflecken die Kugelgestalt der Sonne. Überhaupt war damals wohl ein Zweifel an der Kugelgestalt der Planeten und der Sterne überhaupt kaum mehr möglich.

Die Hypothese des Weltmittelpunktes war daher durch eine solche zu ersetzen, welche die Kugelgestalt der Sterne überhaupt und nicht nur der Erde

verstehen läßt. Galileo sagt klar, daß dies eine Art Wechselwirkung (Bestreben gegenseitiger Näherung) der den Stern konstituierenden Materie sein muß. Diese selbe Ursache mußte nun (nach Aufgeben des Weltmittelpunktes) auch den freien Fall der Körper an der Erdoberfläche bewirken.

Ich möchte hier — in Form einer Einschaltung — darauf aufmerksam machen, daß eine weitgehende Analogie besteht zwischen Galileos Ablehnung der Setzung eines Weltmittelpunktes zur Erklärung des Fallens der Körper und der Ablehnung der Setzung des Inertialsystems zur Erklärung des Trägheitsverhaltens der Körper (welche Ablehnung der allgemeinen Relativitätstheorie zugrunde liegt). Beiden Setzungen gemeinsam ist nämlich die Einführung eines begrifflichen Dinges mit folgenden Eigenschaften:

Es ist nicht als etwas Reales gedacht, von der Art der ponderablen Materie (bzw. des „Feldes“).

Es ist maßgebend für das Verhalten der realen Dinge, ist aber umgekehrt keiner Einwirkung durch die realen Dinge unterworfen.

Die Einführung derartiger begrifflichen Elemente ist zwar vom rein logischen Gesichtspunkte nicht schlechthin unzulässig, widerstrebt aber dem wissenschaftlichen Instinkt.

Galileo erkannte auch, daß die Wirkung der Schwere auf frei fallende Körper in dem Auftreten einer vertikalen Beschleunigung von festem Werte sich manifestiere und daß dieser vertikalen Fallbewegung sich eine unbeschleunigte Horizontalbewegung superponieren lasse.

In diesen Erkenntnissen ist wenigstens qualitativ die Basis der später von Newton formulierten Theorie im wesentlichen bereits enthalten. Es fehlt aber bei Galileo erstens die allgemeine Formulierung des Trägheitsprinzipes, obwohl dieses durch Grenzübergang aus den von ihm gefundenen Gesetzen des freien Falles ganz leicht zu gewinnen war. (Übergang zu verschwindender Vertikalbeschleunigung.) Es fehlte insbesondere noch die Idee, daß dieselbe Materie eines Himmelskörpers, welche an dessen Oberfläche eine Fallbeschleunigung erzeugt, auch imstande wäre, einem anderen Himmelskörper eine Beschleunigung zu erteilen, und daß solche Beschleunigungen in Verbindung mit der Trägheit Umlaufbewegungen erzeugen können. Was aber gewonnen war, war die Erkenntnis, daß die Anwesenheit von Massen (Erde) eine Beschleunigung freier Körper (an der Erdoberfläche) bewirke.

Man kann sich heute nicht mehr vorstellen, was für eine große Phantasieleistung in der klaren Bildung des Begriffes der Beschleunigung und in der Erkenntnis der physikalischen Bedeutung dieses Begriffes lag.

Mit der wohlbegründeten Ablehnung der Idee von der Existenz eines Weltmittelpunktes war auch der Idee der ruhenden Erde und überhaupt der Idee einer Sonderstellung der Erde die innere Berechtigung genommen. Die Frage, was man bei der Darstellung der Bewegung der Himmelskörper als „ruhend“ zu betrachten habe, wurde dadurch zu einer Zweckmäßigkeitsfra-

ge. In Anlehnung an Aristarch-Kopernikus werden die Vorteile dargelegt, die man dadurch erzielt, daß man die Sonne als ruhend annimmt (nach Galileo nicht etwa eine bloße Konvention, sondern eine Hypothese, die „wahr“ oder „falsch“ ist). Da wird natürlich angeführt, daß die Annahme der Drehung der Erde um ihre Achse einfacher ist als eine gemeinsame Drehbewegung aller Fixsterne um die Erde. Ferner wird natürlich darauf hingewiesen, daß bei Annahme der Erdbewegung um die Sonne die Bewegungen der inneren und äußeren Planeten als gleichartig erscheinen und daß die so störenden rückläufigen Bewegungen der äußeren Planeten in Wegfall kommen, bzw. durch die Erdbewegung um die Sonne erklärt werden.

So stark diese Argumente sind, besonders in Verbindung mit dem von Galileo entdeckten Umstand, daß Jupiter mit seinen Monden gewissermaßen ein kopernikanisches System in Miniatur uns vor Augen stellt, so sind doch alle diese Argumente nur qualitativer Art. Denn da wir Menschen auf der Erde festsitzen, so geben uns unsere Beobachtungen keineswegs die „wirklichen“ Bewegungen der Planeten, sondern nur die Schnittpunkte der Blickrichtungen Erde — Planet mit der „Fixstern-Sphäre“. Eine Stützung des kopernikanischen Systems, die über das Qualitative hinausging, war nur möglich, wenn die „wahren Bahnen“ der Planeten ermittelt wurden — ein fast unlösbar scheinendes Problem, das aber von Kepler zu Galileos Zeiten in wahrhaft genialer Weise gelöst wurde. Daß in Galileos Lebenswerk dieser entscheidende Fortschritt keine Spuren hinterlassen hat, ist ein groteskes Beispiel dafür, daß schöpferische Menschen oft nicht rezeptiv orientiert sind.

Große Anstrengung wird von Galileo darauf verwendet, zu zeigen, daß die Hypothese von der Dreh- und Umlauf-Bewegung der Erde nicht dadurch widerlegt wird, daß wir keine *mechanischen* Wirkungen dieser Bewegung wahrnehmen. Es war dies ein Vorhaben, das, genau betrachtet, mangels einer vollständigen Mechanik unlösbar war. Ich finde, daß gerade in dem Ringen mit diesem Problem Galileos Originalität sich besonders imponierend zeigt. Es ist Galileo natürlich auch wichtig zu zeigen, daß die Fixsterne so weit weg sind, daß die durch die jährliche Bewegung der Erde erzeugten Parallaxen für die damalige Meßgenauigkeit unmeßbar klein sein müssen. Auch diese Untersuchung ist genial bei aller Primitivität.

Zu seiner unrichtigen Theorie von Ebbe und Flut wurde Galileo verführt durch seine Sehnsucht nach einem mechanischen Beweis für die Erdbewegung. Die faszinierende Überlegung, welche hierüber im letzten Gespräch gegeben wird, würde wohl von Galileo selbst als nicht beweisend erkannt worden sein, wenn sein Temperament nicht mit ihm durchgegangen wäre. Ich widerstehe nur mühsam der Versuchung, darauf näher einzugehen.

Das Leitmotiv von Galileos Schaffen sehe ich in dem leidenschaftlichen Kampf gegen jeglichen auf Autorität sich stützenden Glauben. Erfahrung und sorgfältige Überlegung allein läßt er als Kriterien der Wahrheit gelten.

Wir können uns heute schwer vorstellen, wie unheimlich und revolutionär eine solche Einstellung zu Galileos Zeit erschien, in welcher der bloße Zweifel an der Wahrheit von auf bloße Autorität sich stützenden Meinungen als todeswürdiges Verbrechen betrachtet und bestraft wurde. Wir sind zwar auch heute keineswegs so weit von einer solchen Situation entfernt, als sich viele von uns schmeicheln mögen; aber der Grundsatz, daß das Denken vorurteilsfrei sein soll, hat sich inzwischen wenigstens in der Theorie durchgesetzt, und die meisten sind bereit, diesem Grundsatz Lippendienste zu leisten.

Es ist oft behauptet worden, daß Galileo insofern der Vater der modernen Naturwissenschaft sei, als er die empiristische, experimentelle Methode gegenüber der spekulativen, deduktiven Methode durchgesetzt habe. Ich denke jedoch, daß diese Auffassung genauerer Überlegung nicht standhält. Es gibt keine empirische Methode ohne spekulative Begriffs- und System-Konstruktion; und es gibt kein spekulatives Denken, dessen Begriffe bei genauerem Hinsehen nicht das empirische Material verraten, dem sie ihren Ursprung verdanken. Solche scharfe Gegenüberstellung des empirischen und deduktiven Standpunktes ist irreleitend, und sie lag Galileo ganz ferne. Dies hängt schon damit zusammen, daß logische (mathematische) Systeme, deren Struktur völlig getrennt ist von jeglichem empirischen Gehalt, erst im neunzehnten Jahrhundert reinlich herausdestilliert wurden. Außerdem waren die Galileo zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden so unvollkommen, daß es nur gewagter Spekulation möglich war, die Lücken in den empirischen Daten zu überbrücken. (So gab es z. B. kein Mittel, um Zeiten unter einer Sekunde zu messen.) Die Antithese Empirismus — Rationalismus erscheint bei Galileo nicht als Streitpunkt. Galileo tritt bei Aristoteles und seinen Schülern deduktiven Schlußweisen nur dann entgegen, wenn deren Prämissen ihm willkürlich oder unhaltbar erscheinen, aber er tadelt seine Gegner nicht, weil sie sich überhaupt deduktiver Methoden bedienen. Er betont an mehreren Stellen im ersten Dialog, daß auch gemäß Aristoteles jede — auch die plausibelste — Überlegung fallengelassen werden müsse, wenn sie mit empirischen Befunden unvereinbar ist. Andererseits spielt auch bei Galileo die logische Deduktion eine wichtige Rolle; seine Bemühungen sind weniger auf das „Wissen“ als auf das „Begreifen“ gerichtet. Begreifen aber ist nichts anderes, als aus einem bereits akzeptierten logischen Systeme zu folgern.

Princeton, Juli 1952

Anhang 4

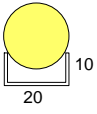
Daten zur verwendeten Fallrinne und weitere Hinweise zur Physik und Didaktik der schiefen Ebene

Zur didaktischen Bedeutung der unterrichtlichen Behandlung von Körperbewegungen auf einer »Schiefe Ebene« (Jochen Sicars)

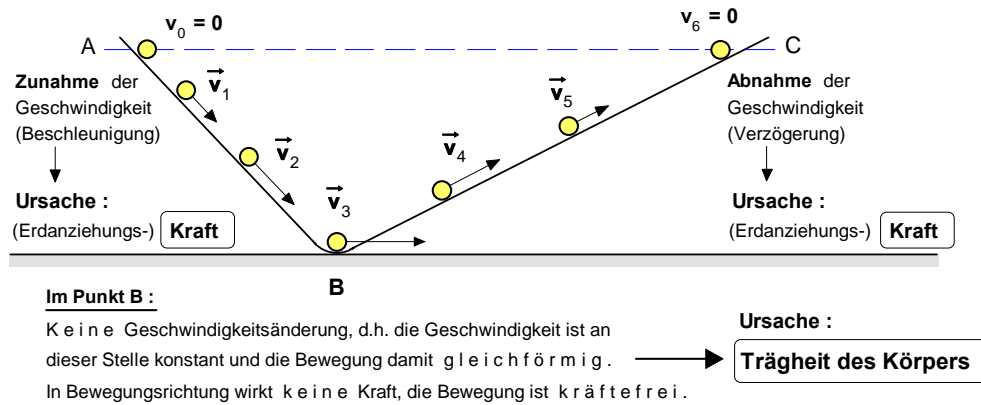
Experiment zur schiefen Ebene

Bewegung einer Kugel in einer Kugelrinne mit zwei gegenläufigen schiefen Ebenen

Wir unterscheiden zwei Bewegungsabschnitte:

a) Bewegung der Kugel nach unten Kugelrinne 1: abfallend \Rightarrow Beschleunigung	b) Bewegung der Kugel nach oben Kugelrinne 2: ansteigend \Rightarrow Verzögerung
<p>maßstäbliche Darstellung M 5:70</p> <p>Modell: Reibungsfreie Kugelrinne</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • Höhe: $h = 5,04 \text{ cm}$ • Basis: $x = 82,35 \text{ cm}$ • Länge: $l = 82,51 \text{ cm}$ • Steigungswinkel: $\alpha = 3,502^\circ$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhe: $h = 5,13 \text{ cm}$ • Basis: $x = 82,60 \text{ cm}$ • Länge: $l = 82,76 \text{ cm}$ • Steigungswinkel: $\alpha = 3,554^\circ$
<ul style="list-style-type: none"> • U-Profileschiene: $20 \times 10 \times 1000 \text{ mm}$ (Aluminium) • Kugel (Stahl): Durchmesser $D = 30 \text{ mm}$; Masse $m = 110 \text{ g}$ • Rollreibung Stahl/Aluminium: $\mu_R = ??$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Holzleiste: $18 \times 45 \times 2100 \text{ mm}$ • U-Profil mit Kugel (maßstäblich): 
<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeiten im Punkt B (Annahme: Kugelrinne sei reibungsfrei): $a = g \cdot \sin \alpha = 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \sin 3,502 \Rightarrow a = 0,6004 \text{ m/s}^2$ <p>bei $s = l = 0,8251 \text{ m}$ (beschleunigte Bewegung von A nach B):</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> $v = \sqrt{2 \cdot s \cdot a}$ </div> $v = \sqrt{2 \cdot 0,82504 \text{ m} \cdot 0,6004 \text{ m/s}^2} \Rightarrow v = 0,9907 \text{ m/s} = 3,57 \text{ km/h}$ <p>bei $s = 1,00 \text{ m}$:</p> $v = \sqrt{2 \cdot 1,00 \text{ m} \cdot 0,6004 \text{ m/s}^2} \Rightarrow v = 1,096 \text{ m/s} = 3,9456 \text{ km/h}$ $v = a \cdot t \Rightarrow t = \frac{v}{a} = \frac{1,096 \text{ m/s}}{0,6004 \text{ m/s}^2} \Rightarrow t = 1,825 \text{ s} \quad \text{– gemessen: } t = 1,95 \text{ s}$	
<h3>Phänomene und Anwendungen zur schiefen Ebene (Beispiele)</h3> <p>Phänomene (Alltag): Schlitten- und Skifahren, Achterbahn, Fahrradfahren auf abschüssiger und wieder ansteigender Straße, Kugelbahn-Spielzeug, Pass-Fahrt mit dem Auto, Parkhausauf- und abfahrt, Schiff gleitet vom Trockendock zu Wasser, Spielplatz: Rutschbahn, Seilbahn und Schaukel, Skateboard-Halfpipe</p> <p>Anwendungen: Schraube, Transport-Rutsche (Pakete), Gießerei-Rutsche, Rutsche bei Dacharbeiten, Laderampe,</p>	

Dynamische Analyse der Bewegung auf der Kugelrinne



Analogiemodelle zur Bewegung auf der Kugelrinne

Fallbewegung nach unten mit $v_0 = 0$

Senkrechter Wurf nach oben mit $v_0 = v_{\max}$

als Sonderfall mit Steigungswinkel $\alpha = 90^\circ$

Schwingung eines Fadenpendels (gestört und ungestört)

Galilei sah bezüglich des Bewegungsablaufs (Beschleunigung, gleichförmige Bewegung, Verzögerung) in der Kugelrinne mit zwei gegenläufigen schiefen Ebenen eine Übereinstimmung mit dem Fadenpendel (gestört und ungestört). Dies hat den Vorteil, dass es so gestaltet werden kann, dass die Reibung stark reduziert wird. (Discorsi, S. 156 ff.)

Wissenschaftshistorische Bedeutung des Experiments mit der Kugelrinne

Kinematik

Galilei: Schiefe Ebene als Modell zur experimentellen Untersuchung von Fallbewegungen mit $a \ll g$.

Resultat: Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung $s \sim t^2$.

Galilei: »Bei wohl hundertfacher Wiederholung fanden wir stets, dass die Strecken sich verhielten wie die Quadrate der Zeiten und dieses zwar für jedwede Neigungen der Ebenen, d.h. des Kanals, in dem die Kugel lief.« (Discorsi, S. 162 f.) ... »Das was für den senkrechten Fall bewiesen ist, gilt auch für den in beliebig geneigten Ebenen.« (ebenda, S.164) – Senkrechter Fall als Sonderfall der schiefen Ebene: ebenda, Figur 50

Dynamik

Galilei: Reibungsfreie Kugelrinne mit zwei gegenläufigen schiefen Ebenen als Gedankenexperiment zur Veranschaulichung des Trägheitgedankens: Steigungswinkel der rechten Kugelrinne wird auf 0 reduziert. Schlussfolgerung: Auf der horizontalen Bahn bewegt sich die Kugel gleichförmig und geradlinig, ohne dass eine Kraft in Bewegungsrichtung wirksam wäre, d.h. Es handelt sich um eine kräftefreie Trägheitsbewegung. (Galilei etwa 1632 (?): vgl. Dialogo (1632), S. 152 und Discorsi (1638), S. 326)

Newton (1. Axiom): »Jeder Körper beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen geradlinigen Bewegung, wenn er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, seinen Zustand zu ändern.« (Newton 1686)

Spätere Einschätzungen

Immanuel Kant über die erkenntnistheoretische Bedeutung des Galilei-Versuchs mit der Fallrinne:

»Als Galilei seine Kugeln die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen ... ließ, ... so ging allen Naturforschern ein Licht auf. Sie begriffen, daß die Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurfe hervorbringt.«¹

Einstein zur wissenschaftshistorischen Bedeutung der Bestimmung des Beschleunigungsbegriffs:

»Man kann sich heute nicht mehr vorstellen, was für eine große Phantasieleistung in der klaren Bildung des Begriffes der Beschleunigung und in der Erkenntnis der physikalischen Bedeutung dieses Begriffes lag.«²

¹ Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft, Vorrede zur zweiten Auflage, Werkausgabe in 12 Bänden hrsg. von Wilhelm Weischedel, Band III, Frankfurt am Main 1982, S.23

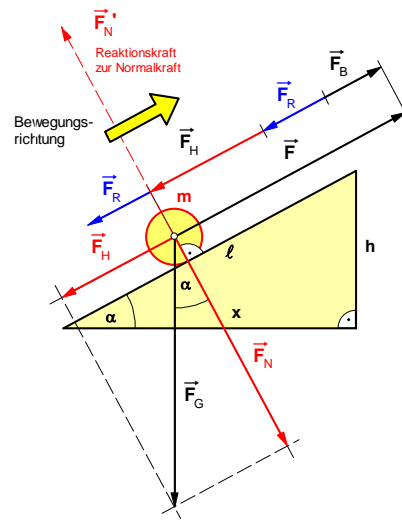
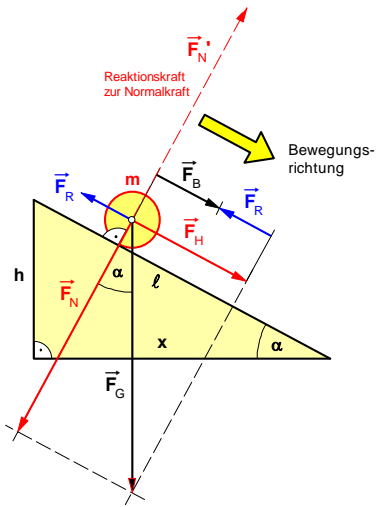
² Einstein, Albert: Galileo Galilei, Vorwort zur amerikanischen Ausgabe des Dialogo, Princeton 1952, in: Galilei, Galileo: Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische und das kopernikanische, Stuttgart 1982, S. X*.

Dynamische Betrachtung der beschleunigten Bewegung

Wir unterscheiden zwei Bewegungsrichtungen eines Körpers auf der schiefen Ebene:

a) **Bewegung des Körpers nach unten**

b) **Bewegung des Körpers nach oben**



Gewichtskraft \vec{F}_G : $F_G = m \cdot g$

Hangabtriebskraft \vec{F}_H : $F_H = F_G \cdot \sin \alpha$

Normalkraft \vec{F}_N : $F_N = F_G \cdot \cos \alpha$

Reibkraft \vec{F}_R : $F_R = \mu \cdot F_N$

- Für die **Bewegung nach unten** gilt:

Beschleunigungskraft \vec{F}_B :

$F_B = F_H - F_R$

- Für die **Bewegung nach oben** gilt:

Beschleunigungskraft \vec{F}_B :

$F_B = F - F_H - F_R$ \vec{F} ... Antriebskraft

Beschleunigung a nach unten:

$$F_B = m \cdot a \Rightarrow \text{a} = \frac{F_B}{m}$$

Beschleunigung a nach oben:

$$F_B = m \cdot a \Rightarrow \text{a} = \frac{F_B}{m}$$

- Steigungsangaben**

als Winkel in Grad (°): $\alpha = \arctan\left(\frac{h}{x}\right)$ Taschenrechner: Shift tan (h/x) = $\tan^{-1}(h/x)$

als Steigungsmaß: $m = \frac{h}{x}$

in Prozent (%): $m_{\%} = \tan\left(\frac{h}{x}\right) \cdot 100\%$

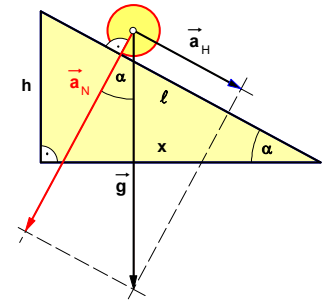
Umrechnung von % in °: $\alpha = \arctan\left(\frac{m_{\%}}{100\%}\right)$

Beispiel: $m_{\%} = 20\%$ $\alpha = \arctan\left(\frac{20\%}{100\%}\right) = \arctan(0,2) \Rightarrow \underline{\underline{\alpha = 11,31^\circ}}$

Kinematische Betrachtung der beschleunigten Bewegung

Für die **Beschleunigungsvektoren** gilt für das Modell einer *reibungsfreien* schiefen Ebene

$$\sin \alpha = \frac{a}{g} \quad \text{mit } g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad \text{wobei } \sin \alpha = \frac{h}{\ell} \quad \boxed{a = g \cdot \sin \alpha}$$



- Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz

$$\boxed{v = v_0 + a \cdot t}$$

- Weg-Zeit-Gesetz:

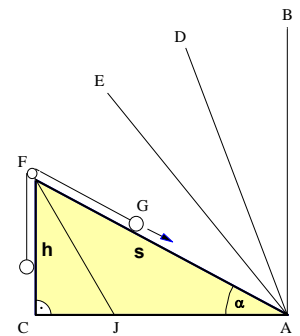
$$\boxed{s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2}$$

- Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg bei $v_0 = 0$:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad \text{mit } t = \frac{v}{a} \quad \text{gilt: } s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{v^2}{a^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{a} \Rightarrow \boxed{v = \sqrt{2 \cdot s \cdot a}}$$

- Wissenschaftshistorische Bezüge zu **Galileo Galilei**

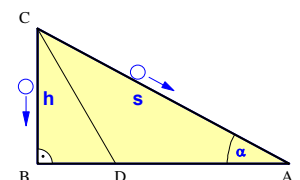
Galileis Analogie: **Der senkrechte Fall ist ein Sonderfall der Bewegung auf der schiefen Ebene** (Galilei, Discorsi, Fig. 50, S. 164). »Wenn man die Widerstände entfernt hat« (Galilei, Discorsi, S. 167), gelten nach Galilei für die reibungsfreie schiefe Ebene die gleichen Gesetze wie die des freien Falls (Galilei, Discorsi, S. 164): »Das was für den senkrechten Fall bewiesen ist, gilt auch für den in beliebig geneigten Ebenen; in solchen wird die Geschwindigkeit nach demselben Gesetz vermehrt, nämlich dem Wachstum der Zeit gemäß.«



Discorsi Fig. 50 (S.164)

Beschreibung der notwendigen Eigenschaften von Fallrinne und fallendem Körper: »Vorausgesetzt immer, dass alle zufälligen und äußeren Störungen fortgeräumt seien, und dass die Ebenen durchaus fest und glatt seien, und der Körper von vollkommendster Rundung sei, kurz Körper und Ebene frei von jeder Rauigkeit seien.« (ebenda, S. 155)

Zunächst lässt Galilei Sagredo die »gleichförmig beschleunigte Bewegung« definieren: »Die gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung ist eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitsmomente hinzukommen. ... Die Geschwindigkeitswerthe, welche ein und derselbe Körper bei verschiedenen Neigungen einer Ebene erlangt, sind einander gleich, wenn die Höhen dieser Ebenen einander gleich sind. ... Und zwar ist die Geschwindigkeit diesselbe, wie der Körper sie bei freiem Falle von C aus in B erlangt hätte.« (ebenda, S. 155).



Discorsi Fig. 44 (S. 155)

Von mir mit Größeneintragen versehen (in blau) und horizontal gespiegelt.

Der »Beweis« Galileis erfolgt auf der Grundlage der Betrachtungen der Streckenverhältnisse in Fig. 51 (S. 167 f.)

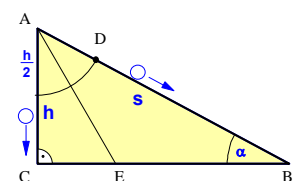
»Beweis« in der heute üblichen Darstellungsform mit physikalischen Formeln (bzw. Funktionsgleichungen) auf der Grundlage von Fig. 51:

- **Frei fallender Körper senkrecht von A nach C:**

v_C ... Geschwindigkeit im Punkt C t_C ... Fallzeit von A nach C
 g ... Fallbeschleunigung $h = AC =$ Fallhöhe

$$v_C = g \cdot t_C \quad \text{mit} \quad h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_C^2 \Rightarrow t_C = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} \quad \text{ergibt sich} \quad v_C = g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}$$

$$\text{Beide Seiten quadriert: } v_C^2 = g^2 \cdot \frac{2 \cdot h}{g} \Rightarrow \underline{\underline{v_C = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}}}$$



Discorsi Fig. 51 (S. 167)

Von mir mit Größeneintragen versehen (in blau) und horizontal gespiegelt.

- Für die **Bewegung eines von A nach B** entlang der »geneigten Ebene herabfallenden« (Galilei) Körpers gilt:

v_B ... Geschwindigkeit im Punkt **B** t_B ... "Fall"zeit von **A** nach **B**
 a ... Beschleunigung $s = AB = \text{Weg}$

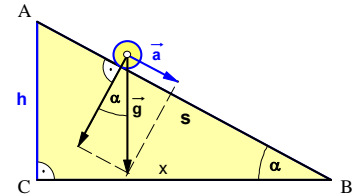
$$v_B = a \cdot t_B \quad \text{mit} \quad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t_B^2 \Rightarrow t_B = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} \quad \text{ergibt sich} \quad v_B = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}}$$

$$\text{Beide Seiten quadriert: } v_B^2 = a^2 \cdot \frac{2 \cdot s}{a} \Rightarrow v_B = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$$

$$\sin \alpha = \frac{h}{s} \quad \text{bzw.} \quad \sin \alpha = \frac{a}{g} \Rightarrow \frac{h}{s} = \frac{a}{g} \Rightarrow a = g \cdot \frac{h}{s}$$

diesen Ausdruck für a ingesetzt in die Gleichung für v_B ergibt:

$$v_B = \sqrt{2 \cdot a \cdot s} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{h}{s} \cdot s} \Rightarrow \underline{\underline{v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = v_C}} \quad \text{q.e.d.}$$



Energetische Betrachtung der beschleunigten Bewegung

Für die **Energie** gilt für das Modell einer *reibungsfreien* schiefen Ebene:

- **Potentielle** Energie
- **Kinetische** Energie

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad \quad \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

- **Energieerhaltungssatz**

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}} \Rightarrow m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \Rightarrow v^2 = 2 \cdot g \cdot h \quad \text{da} \quad \sin \alpha = \frac{h}{s} = \frac{a}{g}, \quad \text{gilt für} \quad g = \frac{a}{h} \cdot s$$

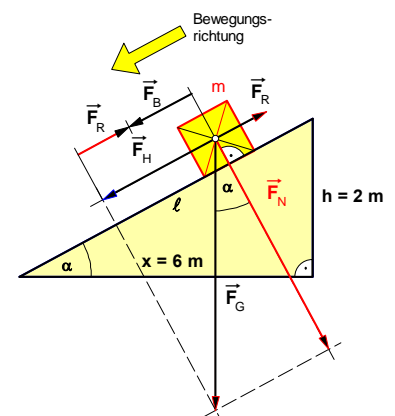
$$v^2 = 2 \cdot \frac{a}{h} \cdot s \cdot h \Rightarrow \boxed{v = \sqrt{2 \cdot s \cdot a}}$$

- **Anwendungsbeispiel:** Transportrutsche z.B. für Versandpakete in einem Logistikcenter

Die Reibungszahl der nebenstehenden Transportrutsche betrage 0,3. Welche Geschwindigkeit erreicht einer Kiste am Ende der schiefen Ebene?

Lösung:

$$\begin{aligned} W_{\text{kin}} + W_{\text{reib}} &= W_{\text{pot}} \\ \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + F_{\text{reib}} \cdot s &= m \cdot g \cdot h \quad \text{mit} \quad F_{\text{reib}} = F_N \cdot \mu = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu \\ \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu \cdot s &= m \cdot g \cdot h \\ \frac{v^2}{2} &= g \cdot h - g \cdot \cos \alpha \cdot \mu \cdot s \quad \text{mit} \quad s = \frac{x}{\cos \alpha} \\ \frac{v^2}{2} &= g \cdot \left(h - \cos \alpha \cdot \mu \cdot \frac{x}{\cos \alpha} \right) \\ v &= \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - \mu \cdot x)} \\ &= \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (2 \text{ m} - 0,3 \cdot 6 \text{ m})} = \sqrt{3,924 \text{ m}^2 / \text{s}^2} \\ v &= 1,98 \text{ m/s} = 7,128 \text{ km/h} \end{aligned}$$



Transportrutsche