

Anmerkungen zum da Vinci Experiment

von WOLFGANG ILLIG

Der EPOCH TIMES Redakteur Tim Sumpf hat mich auf das da Vinci-Experiment aufmerksam gemacht [1], verbunden mit der Frage, ob ich etwas dazu sagen könne. Aus meinem Interesse daran ist dieser kleine Text entstanden. Er beschreibt das Gedankenexperiment aus heutiger theoretischer Sicht, versucht zu erfahren, was da Vinci damals wissen konnte und ob er damit die Fallbeschleunigung hätte bestimmen können.

Auf der CalTech-Webseite *Leonardo da Vinci's Forgotten Experiments Explored Gravity as a Form of Acceleration* [5] ist die hier im Bild 1 wiedergegebene Skizze von Leonardo da Vinci abgebildet, die einen Versuch zur Bestimmung der Fallbeschleunigung g zeigen soll. Eine weitere animierte Graphik auf dieser Seite zeigt die Durchführung des Experiments am CalTech mit modernen Mitteln.

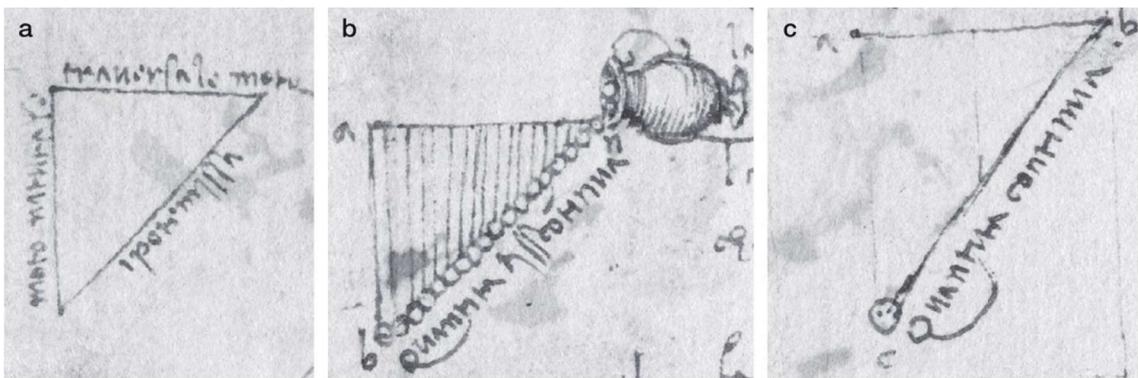


Bild 1 zeigt Skizzen von Leonardo da Vinci. Aus einem sich waagrecht und gleichmäßig beschleunigt bewegten Krug rollen einzeln Kugeln oder Sandkörner. Bei konstanter waagerechter Beschleunigung von gleicher Größe wie die Fallbeschleunigung, sollten die Kugeln nach einem festen Zeitpunkt auf einer 45°-Geraden, also der Hypotenuse eines gleichschenkligen und rechtwinkligen Dreiecks liegen. Die Hypotenuse dient also zum Ausgleich oder der Anpassung der waagerechten an die Fallbeschleunigung. Auf die Idee dazu soll da Vinci nach [3] durch die Beobachtung von ziehenden und Hagel regnenden Wolken gekommen sein. (Quelle: Das Bild ist [5] entnommen, die Originale befinden sich im *Codex Arundel* in der British Library.)

Das da Vinci-Experiment

Leonardo da Vinci zieht in seinem Gedankenexperiment einen mit Kugeln oder Sand gefüllten Krug in waagerechter Richtung – vielleicht auf einer Tischkante, der Krugschnabel über die Kante ragend – und versucht dabei das Ziehen so anzupassen, dass die Kugeln bei ihrem Fallen eine um 45° geneigte Gerade bilden. Hat er das geschafft, so muss sein Ziehen mit konstanter Beschleunigung a erfolgt sein, bei einer 45°-Geraden ist $a = g$, bei jeder anderen Geraden bleibt die Beschleunigung konstant, weicht aber von der Schwerebeschleunigung g ab. Damit hat Leonardo, modern gesprochen, die Gleichwertigkeit der durch die Schwerkraft oder Schwere erzeugten Fallbeschleunigung mit einer durch Mensch oder Technik erzeugten Beschleunigung angenommen oder intuitiv erfasst. Dass er das Äquivalenzprinzip vorweggenommen hätte, wäre zu hoch gegriffen.

Aus heutiger Sicht ist es prinzipiell möglich, die Schwere- oder Fallbeschleunigung sowohl theoretisch als auch praktisch – von der Genauigkeit abgesehen – mit diesem Experiment zu bestimmen. Ob es da Vinci möglich war, dieses Experiment praktisch durchzuführen oder ob er es durchgeführt hat, ist nicht bekannt. Und wenn ja, hätte er ohne die Kenntnisse von Galileo Galilei und Isaac Newton, ohne genau gehende Uhren (Kurzzeitmessungen – Zeit als Wassermenge – nutzte Galilei als erster) auch die Fallbeschleunigung bestimmen können? Zur Verdeutlichung sind einige Aspekte des Experiments aus theoretischer Sicht mit heutigem Wissen in Bild 2 zusammen- und dargestellt.

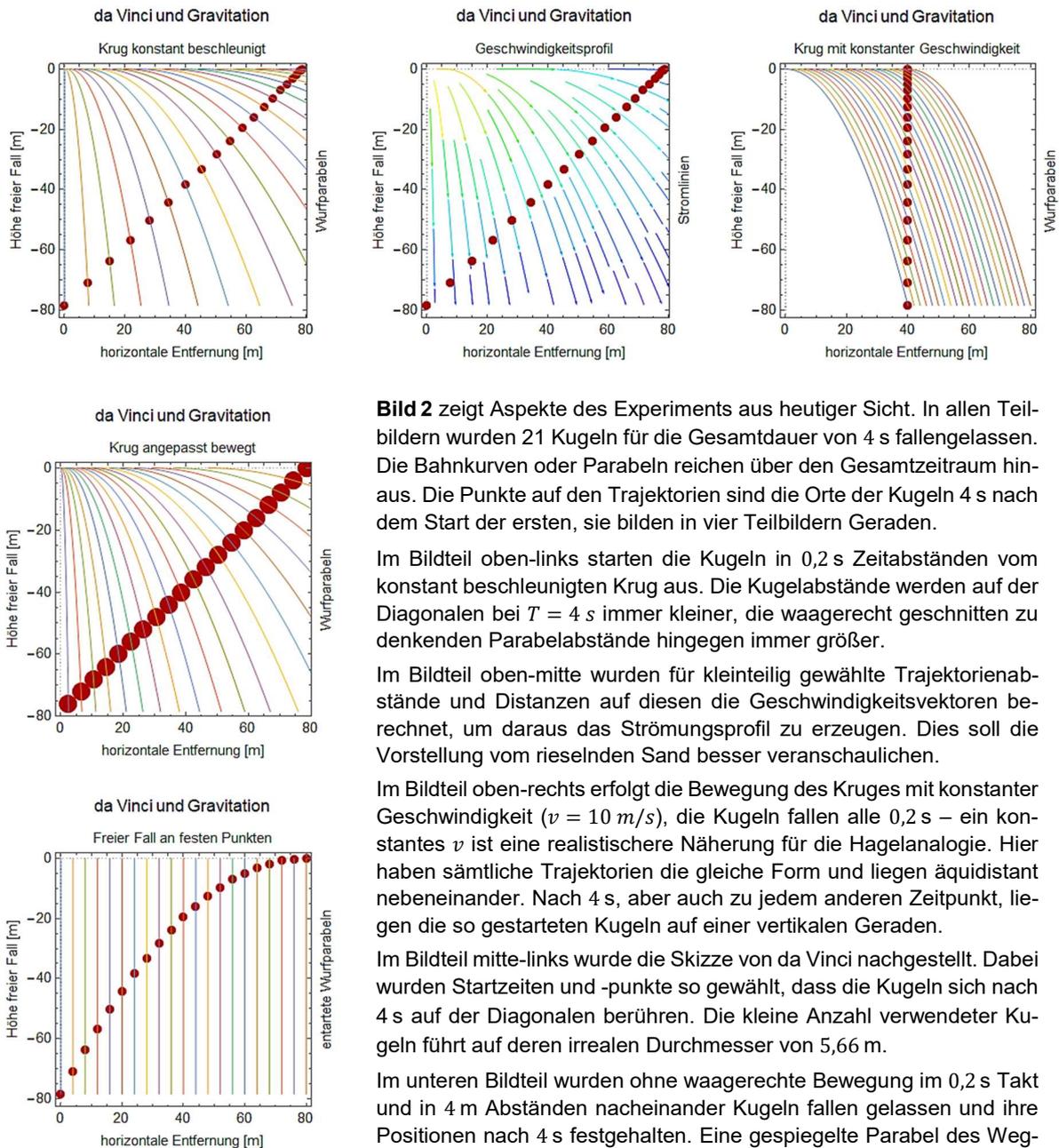


Bild 2 zeigt Aspekte des Experiments aus heutiger Sicht. In allen Teilbildern wurden 21 Kugeln für die Gesamtdauer von 4 s fallengelassen. Die Bahnkurven oder Parabeln reichen über den Gesamtzeitraum hinaus. Die Punkte auf den Trajektorien sind die Orte der Kugeln 4 s nach dem Start der ersten, sie bilden in vier Teilbildern Geraden.

Im Bildteil oben-links starten die Kugeln in 0,2 s Zeitabständen vom konstant beschleunigten Krug aus. Die Kugelabstände werden auf der Diagonalen bei $T = 4$ s immer kleiner, die waagrecht geschnitten zu denkenden Parabelabstände hingegen immer größer.

Im Bildteil oben-mitte wurden für kleinteilig gewählte Trajektorienabstände und Distanzen auf diesen die Geschwindigkeitsvektoren berechnet, um daraus das Strömungsprofil zu erzeugen. Dies soll die Vorstellung vom rieselnden Sand besser veranschaulichen.

Im Bildteil oben-rechts erfolgt die Bewegung des Kruges mit konstanter Geschwindigkeit ($v = 10$ m/s), die Kugeln fallen alle 0,2 s – ein konstantes v ist eine realistischere Näherung für die Hagelanalogie. Hier haben sämtliche Trajektorien die gleiche Form und liegen äquidistant nebeneinander. Nach 4 s, aber auch zu jedem anderen Zeitpunkt, liegen die so gestarteten Kugeln auf einer vertikalen Geraden.

Im Bildteil mitte-links wurde die Skizze von da Vinci nachgestellt. Dabei wurden Startzeiten und -punkte so gewählt, dass die Kugeln sich nach 4 s auf der Diagonalen berühren. Die kleine Anzahl verwendeter Kugeln führt auf deren irrealen Durchmesser von 5,66 m.

Im unteren Bildteil wurden ohne waagerechte Bewegung im 0,2 s Takt und in 4 m Abständen nacheinander Kugeln fallen gelassen und ihre Positionen nach 4 s festgehalten. Eine gespiegelte Parabel des Weg-Zeit-Gesetzes ist entstanden. (Die Graphiken erstellte der Autor.)

Zur Bestimmung der Fallbeschleunigung g

Die Kugeln sollen zu äquidistanten Zeitpunkten fallen und dienen als Maß auf der Zeitachse. Die Abstände der roten Kugeln von der rechten oberen Ecke aus gemessen nach links unten sind ein Maß für die Wurfweite bzw. Fallhöhe (vgl. Bild 2 oben-links). Da x- und y-Achse für Entfernungen stehen und sie Seiten eines gleichschenkligen rechtwinkligen Dreiecks sind, ist das Abstandsmaß auf der Hypotenuse um $\sqrt{2}$ gestreckt, sodass die Division mit $\sqrt{2}$ auf die realen Abstände führt. Diese dann über der Zeitachse aufgetragen liefert das hier graphisch im Bild 3 dargestellte Weg-Zeit-Gesetz. Findet man dafür einen funktionalen Zusammenhang, kann man die Fallbeschleunigung g bestimmen. Diese soll, nach dem Artikel [2] von Gharib u.a., da Vinci mit 97%iger Genauigkeit bestimmt haben. (Problem: Der Autor konnte bis 08/2025 keine Zugang zur Quelle finden, was eine Einschätzung unmöglich macht.)

Da wir aus heutiger Sicht wissen, dass die Abstände je zwei benachbarter Kugeln, gleich getaktet fallengelassen, eine arithmetische Folge 2. Ordnung bilden, können wir auf ein $c \cdot t^2$ -Gesetz schließen, wobei $c = \frac{1}{2} g$ ist. Bei einer arithmetische Folge 2. Ordnung liefern die zweiten Differenzen konstante Werte ($9,81 = const$), im Folgenden für insgesamt 4 s mit 1 s Zeitschritten gezeigt:

Ausgangsfolge Newton	4,91	19,62	44,14	78,47	nach $s = \frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot t^2$, $t = 1, \dots, 4$
1. Differenz		14,71	24,52	34,33	
2. Differenz			9,81	9,81	
Ausgangsfolge Galilei	1	4	9	16	nach $s = t^2$, $t = 1, \dots, 4$
1. Differenz		3	5	7	ungerade Zahlen
2. Differenz			2	2	

Wegen der konstant gewählten Zeitdifferenz von einer Sekunde können wir die Differenzen 1. Ordnung als mittlere Geschwindigkeiten zwischen je zwei benachbarten Zeitpunkten ansehen und die Differenzen 2. Ordnung als mittlere Beschleunigungen. Für sehr kleine Zeitdifferenzen und durch diese geteilt, würden die mittleren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sich den realen Werten an den jeweiligen Punkten annähern und in die Werte der 1. und 2. Ableitung des Weg-Zeit-Gesetzes übergehen.

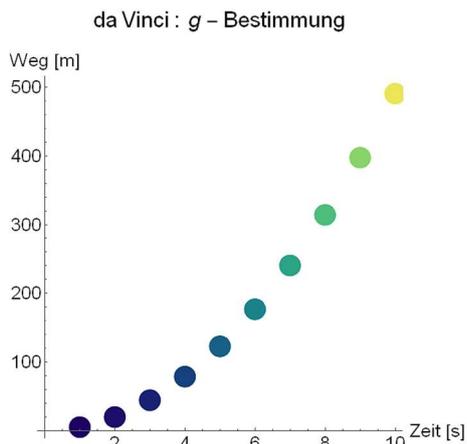


Bild 3 zeigt eine Möglichkeit die Fallbeschleunigung g zu bestimmen. Dazu wurden wegen der Anschauung jetzt für 10 s im Sekundentakt Kugeln fallengelassen. Dieser Takt dient als Zeitachse. Die Abstände der roten Kugeln werden von der rechten oberen Ecke aus nach links unten gemessen und sind ein Maß für die Wurfweite bzw. Fallhöhe (vgl. dazu Bild 2 oben-links). Alternativ dazu könnte man auch das Lot von jeder Kugel auf die x-Achse fallen und dort die Abstände in umgekehrter Richtung ablesen. Trägt man diese Abstandswerte über der Zeitachse auf, erhält man das hier graphisch dargestellte Weg-Zeit-Gesetz. Für die praktische Auswertung wäre die Datendarstellung in Tabellenform geeigneter. Um damit g bestimmen zu können, muss man aber einen Ansatz für ein Weg-Zeit-Gesetz bereitstellen oder kennen, etwa $s = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t + s_0$, hier mit $v_0 = 0$ und $s_0 = 0$. (Die Graphik erstellte der Autor.)

Da Vinci hätte aus experimentellen Daten auf ein Gesetz der Form $c \cdot t^2$ schließen und damit die Konstante c so anpassen können, dass eine bestmögliche Übereinstimmung mit den Daten hergestellt würde. Er soll nach [5] ein 2^t -Gesetz verwendet haben, welches sich aber in dem von ihm verwendeten Zeitintervall nur wenig von einem t^2 -Gesetz unterscheiden würde und somit sein Ergebnis nur minimal hätte verfälschen können. Die Konstante c müsste er nach der Wahl der Zeitabhängigkeit dann noch bestimmen. Da c aber nur die halbe Fallbeschleunigung ist, hätte er grob auf den Wert 4,9 kommen müssen und nicht auf 9,8, wie Gharib u.a. (nach Neves u.a. in [3]) angeben. Hier dürfte ihm das Konzept oder die Theorie gefehlt haben, um den Zusammenhang $g = 2c$ herstellen zu können. Galilei konnte die 2 herleiten und Isaac Newton wurde sie rund 200 Jahre später durch einen fallenden Apfel aus dem Kopf geschlagen – Chapeau für zwei weitere Genies.

Was wusste da Vinci (1452-1519)

oder was hätte er wissen können? Die Arbeit mit Differenzenfolgen ist seit Fibonacci (1170-1240) bekannt. Der Zusammenhang mit der Differentialrechnung war mit Sicherheit Leonardo nicht bekannt, da diese erst von Newton (1643-1727) und Leibniz (1656-1716) entwickelt wurde. Der Begriff der Geschwindigkeit soll, wenn auch unscharf, seit der Antike bekannt gewesen sein, Galilei (1564-1641) hat ihn und den Beschleunigungsbegriff nachweislich korrekt verwendet. Man kann annehmen, dass da Vinci etwa 100 Jahre früher den Begriff der Geschwindigkeit kannte, korrekt verwendete und die Beschleunigung intuitiv richtig erfasst hatte. Das bestätigen auch Mach in [4] und der Artikel von Neves u.a., der einen sehr guten Einblick in diese Zeit und die damals verwendeten Methoden gibt. Dieser Arbeit zufolge soll Leonardo überhaupt keinen Wert angegeben haben und das ihm zugeschriebene Weg-Zeit-Gesetz soll von der Form $s = c \cdot (t + t^2)$ gewesen sein. Ein Best-Fit-Modell um c mit dieser Formel zu bestimmen und auf (mit $s = \frac{1}{2} g t^2 + v_0 t + s_0$) berechnete „Messwerte“ angewandt, führt immer auf zeitabhängige c -Werte (die Versuchsdauer betreffend), die kleiner sind als $\frac{1}{2}g = 4,9$. Galilei hat nach Ernst Mach als erster Fallversuche mit wissenschaftlicher Methodik durchgeführt und damit einen Grundstein zur klassischen Mechanik gelegt. Zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit der Fallhöhe hat er ungerade Zahlen verwendet. Denn die Summe aufeinanderfolgender ungerader Zahlen bei 1 beginnend führt immer auf eine Quadratzahl. Anders gesagt: Ungerade Zahlen sind die 1. Differenz einer

Folge aufeinanderfolgender ganzzahliger Quadratzahlen (s. oben). Mit der t^2 -Abhängigkeit ist Galilei die richtige Beschreibung seiner Fallversuche gelungen. Nach Neves u.a. hat auch da Vinci mit Differenzenfolgen gearbeitet. Er verwendete zusätzlich gerade Zahlen; das war falsch. Ein Beispiel für $t = 3$: Nach da Vinci gilt: $1 + 2 + 3 = 6 < 3^2 = t^2 = 9$. Richtig ist nach Galilei: $1 + 3 + 5 = 9 = 3^2 = t^2$.

Anmerkungen zu Leonardos Skizze

Im Bild 1b sieht man, dass die Kugeln auf der Diagonalen dicht an dicht liegen, wie bei einer Perlenkette. Das ist aber bei gleichen Startzeitabständen nicht möglich, da die Horizontalgeschwindigkeit der Kugeln mit zunehmender Startzeit ebenfalls stetig zunimmt.

Will man den Versuch derart durchführen, dass Leonardos Skizze entsteht, muss man die Startzeiten für äquidistante Fallhöhen bestimmen und mit diesen dann in umgekehrter Reihenfolge die waagerechten Startorte ermitteln; das Ergebnis ist in Bild 2 mitte-links zu sehen. Dies setzt aber die Kenntnis der genauen Bewegungsgesetze voraus, die da Vinci unmöglich kennen konnte. Da die Startzeiten proportional zur Wurzel aus der Fallhöhe sind und damit auch die Startorte nicht gleichmäßig aufeinander folgen, wäre der experimentelle Aufwand zur Realisierung der Anordnung in da Vinci's Skizze sehr aufwendig, sodass man schließlich die Skizze nicht als die Realität beschreibend ansehen kann.

Auch andere Interpretationen scheitern. Senkrechte Linien, wie im Bild 1b, können lediglich als Projektionslinien auf die horizontale Achse aufgefasst werden. Diese führen aber nicht auf den Startort der Kugel, sondern geben die zurückgelegte Fallstrecke der Kugeln vom oberen Ende der Hypotenuse aus nach links gemessen an, also die um $\sqrt{2}$ bereinigte Entfernung auf der Hypotenuse. Würden die Kugeln aber ohne waagerechte Geschwindigkeitskomponente, also senkrecht von gleichabständigen Orten aus fallen, dann könnte man zwar senkrechte Linien zeichnen, aber das Bild aller Kugeln zu einer festen Zeit wäre eine Parabel (vgl. Bild 2 unten), für die man keine Perlenkettanalogie erreichen kann.

Fazit

Da Vinci war zweifellos ein Genie und mit Sicherheit in vielen Bereichen seiner Zeit weit voraus. In seinem Gedankenexperiment stellt er – nur das kann man ohne weiteres sagen – die Schwerebeschleunigung einer horizontalen so gegenüber, dass er durch Bewegungsausgleich die Fallbeschleunigung im Prinzip hätte bestimmen können, wie hier dargestellt. Ob er damit die Äquivalenz von Gravitation und Beschleunigung vorwegnahm, intuitiv vielleicht, muss Spekulation bleiben.

Gharib u.a. kamen zu dem Ergebnis, da Vinci habe die Fallbeschleunigung mit rund $9,8 \text{ m/s}^2$ bestimmt, während Neves u.a. im historischen Kontext auf einen weniger als halb so großen Wert kamen. Nach unserer Ansicht hätte Leonardo höchstens auf ein c von $4,9 \text{ m/s}^2$ kommen können, wenn er seine Skizze im Sinne von Bild 2 oben-links interpretiert und den beschriebenen oder einen ähnlichen Auswertungsweg eingeschlagen hätte. Aber das ist höchst unwahrscheinlich – Bildinterpretation unklar, Verwendung einer falschen Differenzenfolge, die praktische Versuchsdurchführung unbekannt und Messergebnisse nicht vorhanden oder noch nicht aufgefunden.

Wir zweifeln das Resultat von Gharib u.a. ebenfalls stark an, auch wenn wir ihre Veröffentlichung nur durch Fremdmittelungen kennen und stimmen den Ansichten von Neves u.a. zu, dass Leonardo sein intuitiv richtiges Verständnis von Schwere und Beschleunigung nutzte, um die Fallbeschleunigung durch Bewegungsausgleich im Prinzip zu bestimmen, er aber nie einen Wert ermittelt hat.

Quellen, Weblinks

- [1] Sumpf, Tim: Wurde die Schwerkraft schon 200 Jahre vor Newton entschlüsselt?, Epoch Times, Ausgabe 29.08.2025; <https://www.epochtimes.de/wissen/wurde-die-schwerkraft-schon-200-jahre-vor-newton-entschluesst-a5197277.html>.
- [2] Gharib, Roh, Noca: Leonardo da Vinci's Visualization of Gravity as a Form of Acceleration Unavailable, 023; <https://direct.mit.edu/leon/article-abstract/56/1/21/113863/Leonardo-da-Vinci-s-Visualization-of-Gravity-as-a>.
- [3] Neves u.a.: LEONARDO DA VINCI DESCOBRIU A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NO TEMPO ... DA GRAVIDADE; <https://www.researchgate.net/publication/377891060>.
- [4] Mach, Ernst: Die Mechanik in ihrer Entwicklung, 3. Auflage, Brockhaus, Leipzig, 1897.
- [5] Perkins, Robert.: Leonardo da Vinci's Forgotten Experiments Explored Gravity as a Form of Acceleration; <https://www.caltech.edu/about/news/leonardo-da-vincis-forgotten-experiments-explored-gravity-as-a-form-of-acceleration>.