

**„Freier Fall“ - frei nach Galilei
– Fallrinnenversuche mit modernen schulischen Mitteln –**

Bärbel Fromme

Universität Bielefeld, Fakultät für Physik, Universitätsstr. 25, 33615 Bielefeld

Kurzfassung

In seinem Buch „Discorsi e dimostrazione mathematiche“ beschreibt Galilei Versuche zum freien Fall. Bei diesen Versuchen ließ er keine Körper fallen, sondern Kugeln in einer geneigten „Fallrinne“ (schiefe Ebene) rollen, um so den Bewegungsablauf zu verlangsamen und mit den Mitteln seiner Zeit messbare „Fallzeiten“ zu erhalten. Er variierte den Neigungswinkel der Fallrinne und ging davon aus, dass die Bewegung der Kugel in den freien Fall übergeht, wenn der Neigungswinkel gegen 90° strebt und die an der schiefen Ebene gefundenen Gesetzmäßigkeiten daher auch für den freien Fall gelten. Galileis Experimente lassen sich mit einfachen, jedoch für Schülerinnen und Schüler interessanten, modernen schulischen Mitteln (z. B. Messungen mit der PC-Soundkarte oder Taschenrechner-Messsystem mit Ultraschallabstandssensor) nachvollziehen.

1. Formulierung der Fallgesetze

Im Jahre 1609, also vor exakt 400 Jahren, soll Galilei die Fallgesetze erstmalig formuliert haben [1]. Er beschreibt seine Überlegungen (und auch seine Experimente) 1638 in seinem Buch „Discorsi e dimostrazione mathematiche“ mit den Worten [2]: „Wenn ich daher bemerke, daß ein aus der Ruhelage von bedeutender Höhe herabfallender Stein nach und nach neue Zuwüchse an Geschwindigkeit erlangt, warum soll ich nicht glauben, dass solche Zuwüchse in allereinfachster, jedermann plausibler Weise zustande kommen? Wenn wir genau aufmerken, werden wir keinen Zuwachs einfacher finden als denjenigen, der in immer gleicher Weise hinzutritt. (...) Mit diesem Geiste erkennen wir diese Bewegung als einförmig und in gleichbleibender Weise stetig beschleunigt, da in irgendwelchen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszunahmen sich addieren“.

In heutigen Worten könnte man diese Aussage folgendermaßen formulieren: Während des freien Falls nimmt die Geschwindigkeit des fallenden Körpers immer mehr zu. Die Zunahme läuft nach einfachen Gesetzmäßigkeiten ab. Was könnte einfacher sein, als die Zunahme der Geschwindigkeit um gleiche Beträge in gleichen Zeiteinheiten? Diese Formulierungen entsprechen dem Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

$$v \propto t \Leftrightarrow v(t) = a \cdot t \quad \{1\}$$

Nun war und ist es schwierig Momentangeschwindigkeiten zu messen – das Fallgesetz war in dieser Form für Galilei also nicht experimentell überprüfbar. Er brachte seine Vermutung daher in eine experimentell besser zugängliche Form, die man in heu-

tiger Notation folgendermaßen formulieren würde ([2], [3]): Man macht zunächst den Übergang von der Momentangeschwindigkeit $v(t)$ zur mittleren Geschwindigkeit \bar{v} im Intervall $[0, t]$. Unter der Annahme, dass der Körper vor Beginn des Falls ruht ($v(0) = 0$) ergibt sich:

$$v = a \cdot t \Rightarrow \bar{v} = \frac{1}{2} a \cdot t \quad \{2\}$$

Nimmt man weiter an, dass sich der fallende Körper im betrachteten Zeitintervall mit dieser mittleren Geschwindigkeit gleichförmig bewegt, ergibt sich für den Fallweg s das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

$$s(t) = \bar{v} \cdot t = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad \{3\}$$

Aus Gleichung {3} folgt für zwei verschiedene Fallwege und -zeiten natürlich sofort:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2} \quad \{4\}$$

Die Proportionalität zwischen Geschwindigkeit und Fallzeit (Gl. {1}) ist also direkt mit der Tatsache verknüpft, dass sich die Fallwege wie die Quadrate der zugehörigen Fallzeiten verhalten (Gl. {4}). Dieses wurde auch bereits von Galilei erkannt und ähnlich formuliert (s. 2.). Er erhält auf diese Weise Messgrößen – nämlich Strecken und Zeiten –, die er mit den Mitteln seiner Zeit bestimmen konnte.

2. Galileis Fallrinnenversuche

Galilei wandte für seine Fallversuche ein „experimentelles Näherungsverfahren“ an, um bei kurzen Fallwegen (z. B. im Labor) längere, für ihn messbare Fallzeiten zu erhalten: Er ließ nicht Gegenstände fallen, sondern Kugeln in einer sogenannten „Fallrinne“ (Abb. 1) – also im Prinzip auf einer schiefen Ebene – rollen und maß die „Fallzeiten“ (= Rollzeiten) sowohl für verschiedene „Fallwege“ als auch für verschiedene Neigungswinkel.



Abb. 1: Galilei bei seinen Fallrinnenversuchen [4]

Er nahm an, dass die Bewegung in die des freien Falls übergeht, wenn der Neigungswinkel der Rinne gegen 90° strebt und damit auch die an der Fallrinne gefundenen Gesetzmäßigkeiten für den freien Fall gültig sind. Galilei beschreibt seine Experimente und Ergebnisse selbst folgendermaßen: „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 glattpolierte 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 Zehntel eines Pulsschlages. (...); 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 Kanals, in dem die Kugel lief. (...) 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 voneinander abwichen.“ [2]

Ob Galilei wirklich die Messungen mit der Fallrinne so wie beschrieben durchgeführt hat, wird und wurde kontrovers diskutiert (siehe z. B. [5], [6], [7] und Referenzen darin). Zweifel an den Fallrinnenversuchen werden insbesondere in Zusammenhang mit der reibungsmindernden Auskleidung der Fallrinne mit Pergament geäußert: Da Pergament aus Schafs-, Kalbs- oder Ziegenhaut gewonnen wird, wären bei der großen Länge der Rinne mehrere Stücke erforderlich gewesen. Dieses müsste zu Bewegungsunregelmäßigkeiten bzw. Reibungserhöhung an den Ansatzstellen geführt haben, was Galilei jedoch nicht beschreibt.

Die Extrapolation der Versuchsergebnisse der Rollbewegung auf der schiefen Ebene auf die des freien Falls ist jedoch auch bei Berücksichtigung von Reibungseffekten physikalisch durchaus legitim. Die Rollbewegung - und in guter Näherung auch die Reibungseffekte - haben nur einen Einfluss auf die absolute Größe der auftretenden Beschleunigungen, jedoch nicht auf die Form der Bewegung. Die reibungsbehaftete Rollbewegung ist gleichmäßig beschleunigt (s. 3.) und die von Galilei für den freien Fall vermuteten bzw. formulierten Gesetzmäßigkeiten (Gl. {1}- {4}) gelten infolgedessen auch hier.

3. Berücksichtigung von Rollbewegung und Reibung

Die Rollbewegung auf der schiefen Ebene wird in vielen Lehrbüchern des Grundstudiums ausführlich behandelt (siehe z. B. [8] und [9]). Die wesentlichen Ergebnisse seien hier deshalb nur kurz zusammengefasst.

Rollt ein Körper über die Höhendifferenz Δh (ohne dabei zu rutschen oder zu gleiten) wird seine potentielle Energie sowohl in kinetische Energie als auch in Rotationsenergie umgewandelt:

$$m \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2} m \cdot v^2 + \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad \{5\}$$

wobei m die Masse, I das Trägheitsmoment und v die Schwerpunktseschwindigkeit des rollenden Körpers ist.

$$\omega = \frac{v}{R} \quad \{6\}$$

ist die Winkelgeschwindigkeit mit der der Körper rollt (R : Radius des Körpers).

Die teilweise Umwandlung in Rotationsenergie führt dazu, dass die Schwerpunktsbeschleunigung mit der sich der Körper auf der schiefen Ebene mit Neigungswinkel α bewegt, nicht der Hangabtriebsbeschleunigung des reibungsfreien Gleitens ($g \cdot \sin \alpha$) entspricht, sondern um einen konstanten Faktor

kleiner ist, der vom Trägheitsmoment herrührt. Bei der Kugel ist dieser Faktor $5/7$, sodass sich für die Schwerpunktsbeschleunigung einer auf der schiefen Ebene rollenden Kugel ergibt:

$$a = \frac{5}{7} g \cdot \sin \alpha \quad \{7\}$$

Tatsächlich wird die Beschleunigung natürlich noch durch Reibung vermindert. Die Reibungskraft ist der Hangabtriebskraft entgegen gesetzt gerichtet und betragsmäßig im wesentlichen proportional zur Normalkraft $F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$. Gleiches gilt dann natürlich auch für die entsprechenden Beschleunigungen. Proportionalitätskonstante ist für nicht zu große Neigungswinkel der Rollreibungskoeffizient. Für große Neigungswinkel werden die Verhältnisse schwieriger. Hier kann die Kugel zu gleiten beginnen und es dürfte eine Mischform aus Gleit- und Rollreibung vorliegen, bevor die Bewegung in den freien Fall übergeht, bei dem die Rotation dann entfällt.

Fazit: die Rollbewegung auf der schiefen Ebene ist auch unter Berücksichtigung von Reibungseffekten in guter Näherung eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Die von Galilei für den freien Fall angenommenen Gesetzmäßigkeiten sind also auch hier gültig, allerdings mit einer Beschleunigung, die geringer als die Erdbeschleunigung ist. Galilei selbst hat keine quantitativen Angaben über die auftretenden Beschleunigungen gemacht.

4. Fallrinnenexperimente für den Unterricht

4.1 Einführung

Galileis Fallrinnenversuche wurden in der jüngeren Vergangenheit mit historisch möglichst getreuen Fallrinnen und Zeitmessverfahren vielfach nachvollzogen (siehe beispielweise [3], [7], [10]), wobei zumeist die Frage nach der Genauigkeit der Messung im Vordergrund stand und auch der Frage nachgegangen wurde, ob Galilei – so wie von ihm selbst beschrieben – gemessen haben könnte.

Wir haben nun Fallrinnenversuche für den Unterricht konzipiert. Dabei wurde Wert auf die Verwendung einer einfach, schnell und preiswert zu bauenden Fallrinne gelegt; moderne, computerunterstützte Messverfahren, die für viele Schülerinnen und Schüler interessant sind, sollten zur Anwendung kommen. Es handelt sich hierbei zum einen um Messungen der Fallzeiten mit Hilfe der PC-Soundkarte. Das Verfahren ist wenig kosten- und zeitaufwändig und erlaubt die Verifikation des Fallgesetzes in der Formulierung Galileis (Gl. {4}). Zum anderen wurden Messungen mit einem grafikfähigen Taschenrechner, zugehörigem Interface und Abstandssensor durchgeführt. Wir verwenden Rechner der Fa. Texas Instruments mit dem Interface CBL2 und dem Abstandssensor CBR. Die Anwendung dieser zweiten Messmethode im Unterricht setzt natürlich das Vorhandensein entsprechender Geräte an der Schule

voraus, hat aber den großen Vorteil, dass nicht nur die Fallzeiten bestimmt werden können, sondern Weg-Zeit-Gesetz und Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung direkt gemessen werden können. Implementierte Kurvenfits erlauben den direkten Nachweis der quadratischen bzw. linearen Abhängigkeit der Messgrößen von der Zeit und die Bestimmung der auftretenden Beschleunigung.

Beide Messverfahren können im Unterricht natürlich auch mit einer streng nach dem historischen Vorbild durchgeführten Zeitmessung mit der Wasseruhr kombiniert und verglichen werden.

4.2 Verwendete Fallrinnen

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen Details der von uns verwendeten Fallrinnen.



Abb. 2: Einfache Fallrinne. Der Elektromagnet hält die Kugel bis zum Start fest.

Die Fallrinne in Abbildung 2 wurde mit preiswerten, einfach zu beschaffenden Materialien (Baumarkt) realisiert: Eine Kehlleiste wurde auf eine etwas massivere Holzplatte aufgeleimt. Auf eine Glättung oder Auskleidung der Rinne zur Verminderung der Reibung wurde bei den unten dargestellten Messungen komplett verzichtet. Abgesehen davon entspricht die Konstruktion auch in einem weiteren Punkt nicht dem von Galilei beschriebenen historischen Vorbild: Die Kugel läuft hier nicht „in der Rinne“, sondern liegt nur im unteren Bereich auf. Um einen möglichst großflächigen Kontakt zu erzielen und damit sowohl der historischen Beschreibung nahe zu kommen als auch eine Schlängelbewegung der Kugel auf der Bahn zu vermeiden, sollte die Kugelgröße der Bahn gut angepasst werden. Bei der hier verwendeten sehr breiten Profilleiste wird daher eine Stahlkugel von 5 cm Durchmesser benutzt. Bei Messungen mit dem Abstandssensor (s. u.), die keinen Elektromagneten als Startvorrichtung benötigen, können auch Vollgummibälle („Flummis“) passender Größe verwendet werden.

Die Fallrinne der Abbildung 3 entspricht eher Galileis historischem Aufbau. Diese Rinne, die sich in

unserer Sammlung befindet und nicht aus einfachen Baumarkt-Profilen gebaut werden kann, ist halb-kreisförmig ausgekehlt, so dass die Kugel in der Rinne läuft. Der Kugeldurchmesser beträgt hier 3 cm. Wesentliche Unterschiede in den Messergebnissen ergeben sich für die beiden Rinnen nicht (vgl. Abb. 8), so dass für den Unterricht durchaus die einfach zu bauende Version verwendet werden kann.



Abb 3: Fallrinne nach dem Vorbild Galileis.
Die Kugel „läuft in der Rinne“.

4.3 Messungen mit der PC-Soundkarte

Abbildung 4 zeigt den kompletten experimentellen Aufbau für unsere Messungen mit der Soundkarte. Die Kugel wird mit dem Elektromagneten am Startpunkt zunächst fixiert. Im Hintergrund befindet sich die Spannungsquelle für den Elektromagneten. Am unteren Bildrand ist das Computermikrofon zu sehen, das an einen PC angeschlossen ist. Beginn und Ende der Fallzeit sind mit einem akustischen Signal verbunden: Das Startsignal wird durch einen Piepton erzeugt, der ertönt, wenn der Strom durch die Spule abgeschaltet wird; das Ende der Fallzeit wird durch das Geräusch beim Aufschlagen der Kugel auf die Keksdose am Ende der Bahn markiert.

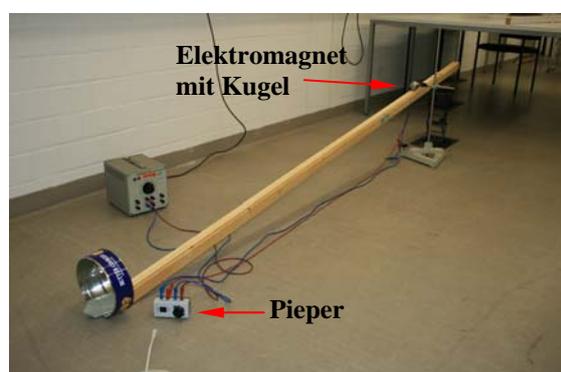


Abb. 4: Versuchsaufbau für die Messungen mit der PC-Soundkarte

Die Erzeugung des Startsignals wurde mit einer einfachen Schaltung (Abb. 5) realisiert, die in ein

kleines Gehäuse eingebaut wurde (Details in Abb. 6). Die Schaltung kann aber auch offen aufgebaut werden. Neben einem Pieper (Elektronik-Fachhandel oder Ausbau aus Rauchmelder) werden praktisch nur ein Widerstand, ein Kondensator und ein Umschalter benötigt. Widerstands- und Kapazitätswert wurden experimentell ermittelt. Die Spannung wird durch ein schulübliches Netzgerät geliefert. Die Höhe der Spannung richtet sich nach dem verwendeten Elektromagneten und beträgt für den von uns verwendeten (Lehrmittelfirma) 15 V.

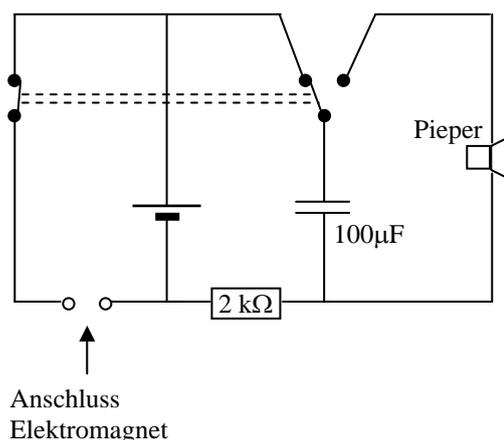


Abb. 5: Schaltplan für die Erzeugung des Startsignals.



Abb. 6: Detailaufnahme des „akustischen Starters“

Die in Abb. 5 dargestellte Schalterstellung entspricht dem Zustand vor dem Start der Kugel: Es fließt Strom durch den Elektromagneten. Gleichzeitig liegt Spannung am Kondensator an, so dass dieser aufgeladen ist. Zum Start wird umgeschaltet: Der Elektromagnet wird stromlos, die Kugel beginnt zu rollen. Zeitgleich entlädt sich der Kondensator über den Pieper, so dass kurzzeitig ein – wie der Entladestrom des Kondensators – exponentiell in der Lautstärke abklingendes Signal ertönt (Abb. 7). Der Pieper kann auch durch einen einfachen Lautsprecher ersetzt werden, der beim Entladen des Kondensators kurz knackt. Sollte die Lautstärke des Knackens

nicht ausreichen, muss für den Kondensator ein zusätzliches Netzgerät mit höherer Spannung verwendet und die in Abb. 5 dargestellte Schaltung entsprechend modifiziert werden.

Das akustische Start- und Stoppsignal wird mit der PC-Soundkarte unter Verwendung entsprechender Software (wir benutzen die shareware „Goldwave“ [11]) aufgezeichnet. Ein Beispiel für eine Messung zeigt Abb. 7.

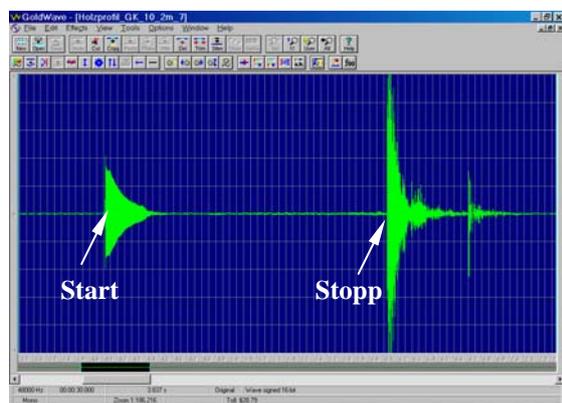


Abb. 7: Start- und Stoppsignal der Kugel, aufgenommen mit der Soundkarte. Die Messung wurde an der einfachen Fallrinne (Abb. 2) durchgeführt (Neigungswinkel 10° , Fallweg 2 m).

Der zeitliche Abstand der Signale kann aus der Aufzeichnung reproduzierbar und sehr genau ermittelt werden. Ein typisches Beispiel: Bei einem Neigungswinkel der Fallrinne (Abb. 2) von 10° und einem Fallweg von 2 m variierten die gemessenen Laufzeiten bei vier Messungen zwischen 1,869 s und 1,874 s, so dass sich hier eine mittlere Fallzeit von $(1,871 \pm 0,001)$ s ergibt.

Es wurden mit beiden Fallrinnen zahlreiche Messungen über Fallstrecken von 0,5 m, 1 m, 1,5 m und 2 m bei Neigungswinkeln von 10° und 20° durchgeführt und der Quotient der Fallzeitquadrate über dem Quotient der Fallwege (vgl. Gl. {4}) aufgetragen. Einige Ergebnisse für einen Neigungswinkel von 10° zeigt Abbildung 8. Die an beiden Fallrinnen gemessenen Werte unterscheiden sich allenfalls geringfügig – in Abb. 8 sind wegen der Überlappung der Kurvensymbole deshalb nicht alle Messwerte sichtbar.

Die Messung bestätigt Galileis Aussage zur gleichmäßig beschleunigten Bewegung: „Der Quotient der Fallzeitquadrate ist gleich dem Quotienten der Fallwege“ (Gl. {4}, Gerade in Abb. 8) recht gut. Leichte Abweichungen ergeben sich nur, wenn die Quotienten bei stark unterschiedlichen Fallwegen gebildet werden (z. B. 2 m und 0,5 m). Das hängt damit zusammen, dass die Beschleunigung bei unseren Fallrinnen eine geringfügige Abhängigkeit vom Fallweg zeigt: Bei gleich gebliebener Bahnneigung nimmt sie mit zunehmendem Fallweg leicht ab (bei einer

Bahnneigung von 10° z. B. von $1,176 \text{ m/s}^2$ bei 0,5 m Fallweg auf $1,106 \text{ m/s}^2$ bei 2m Fallweg), wie ausführliche Messungen mit dem Abstandssensor gezeigt haben. Die Ursache ist vermutlich in Reibungseinflüssen zu suchen. Die geringfügig kleinere Beschleunigung bei langen Fallwegen führt dazu, dass die Fallzeiten hier etwas höher sind, als bei Annahme einer absolut konstanten, weglängenunabhängigen Beschleunigung zu erwarten wäre. Die Gültigkeit der Gleichung {4}, also die Identität der Quotienten aus Fallwegen und Fallzeitquadrate, ist natürlich nur bei wirklich konstanter Beschleunigung gegeben.

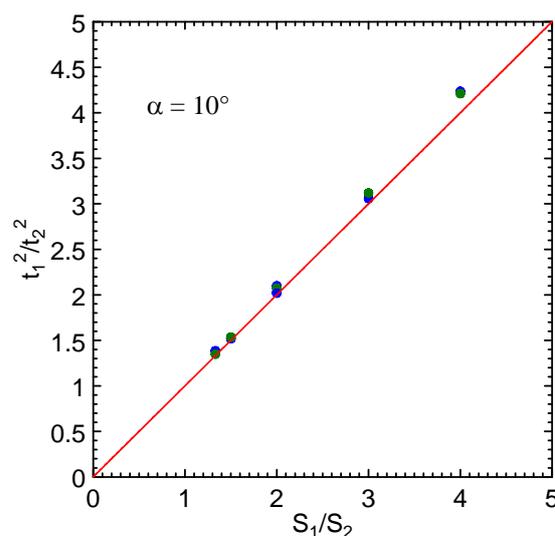


Abb. 8: Quotienten der Fallzeitquadrate aufgetragen über den Quotienten der Fallwege. Blau: Messungen an der einfachen Profilleiste (vgl. Abb. 2). Grün: Messungen an der ausgekehlten Fallrinne (vgl. Abb. 3). Die Gerade entspricht dem „theoretischen“ Verlauf (Gl. {4}).

4.4 Messungen mit Abstandssensor und grafikfähigem Taschenrechner

Wir haben an den Fallrinnen Messungen mit dem Ultraschallsensor CBR (ComputerBasedRanger, Fa. Vernier) durchgeführt, der über das Interface CBL2 (ComputerBasedLaboratory, Fa. Vernier) mit einem grafikfähigen Taschenrechner verbunden ist (TI-Voyage von Texas Instruments). Die Messung und Auswertung der Daten erfolgt mit dem zugehörigen Programm Datamate. Die Messwerte können auch auf den PC übertragen und dort mit geeigneter Software dargestellt und ausgewertet werden.

Für die Messungen mit dem Ultraschall-Abstandssensor wird dieser so aufgestellt, dass der komplette Lauf der Kugel in der Fallrinne verfolgt werden kann. Bei der einfachen selbstgebauten Fallrinne (Abb. 2) kann er auf die – dafür etwas länger gewählte – stabile Holzunterlage gestellt werden, auf der die Profilleiste befestigt ist. Eine quer aufgeleim-

te Vierkantleiste erleichtert die genaue Ausrichtung des Sensors (Abb. 9).

Der CBR-Sensor misst Abstände erst ab etwa 40 cm korrekt. Das muss bei der Wahl des Startpunktes der Kugel berücksichtigt werden. Auf Grund der Ultraschall-Abstrahlcharakteristik des Sensors führen seitlich zu dicht stehende Gegenstände zu Fehlmessungen. Die Fallrinne selbst stört die Messung hingegen nicht. Der Sensor muss vor Beginn der Messungen so aufgestellt werden, dass er den Abstand zu in der Bahn befindlichen Gegenständen (zum Beispiel Holzklötz oder mit Knetmasse fixierte Kugel) korrekt misst. Bei freier Fallrinne muss der Abstand zwischen Sensor und Boden oder Wand richtig angezeigt werden. Dieses erfordert etwas Justierarbeit.



Abb. 9: Positionierung des Abstandssensors vor der Fallrinne.

Eine Startvorrichtung für die Kugel (wie bei den Messungen mit der Soundkarte, siehe 4.3) ist hier nicht nötig und auch nicht sinnvoll, da sie sich innerhalb der seitlichen Reichweite des Sensors befinden und die Messung des Kugellaufs damit unmöglich machen würde. Die Kugel wird daher einfach auf der Bahn festgehalten und nach Start der Messung am Rechner losgelassen. Der Startzeitpunkt der Kugel kann aus der Messkurve abgelesen werden. Beim Start muss darauf geachtet werden, dass sich die festhaltende Person seitlich außerhalb der Reichweite des Sensors befindet. Das Problem ist einfach zu lösen, indem man einen langen, schmalen Gegenstand (Maßstab, Stativstange) vor die Kugel hält und diesen schnell wegzieht.

Abb. 10 und 11 zeigen exemplarisch eine Originalmessung von Weg-Zeit- und Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz für eine Fallstrecke von 1,5 m bei einem Neigungswinkel von 10° . Die angegebene Beschleunigung von $1,126 \text{ m/s}^2$ wurde mit Hilfe des im Rechner implementierten Polynomfits ermittelt. Die

Zeitdifferenz zwischen zwei Messpunkten der Kurven beträgt 50 ms. Ein kleineres Messintervall kann hier nicht gewählt werden, da bei den auftretenden großen Abständen zwischen Kugel und Sensor die Ultraschalllaufzeiten im Laufe der Messung so lang werden, dass das an der Kugel reflektierte Signal nicht vor Aussendung eines neuen Signals verarbeitet werden kann.

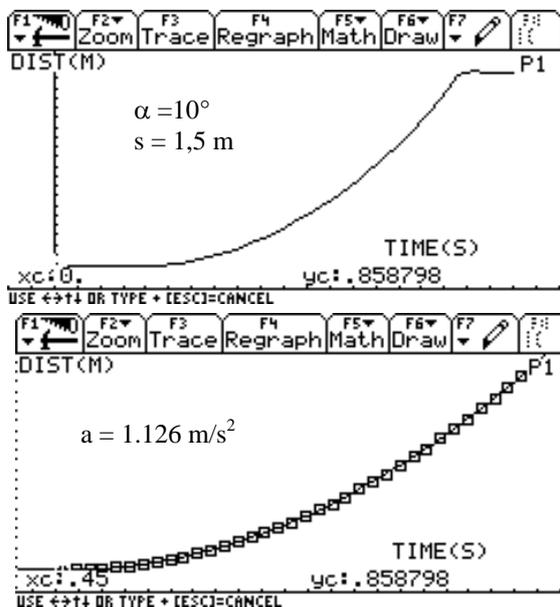


Abb. 10: Originalmessung des Weg-Zeit-Gesetzes mit dem Abstandssensor (oben) und Polynomfit des für die Bewegung relevanten Bereichs (unten).

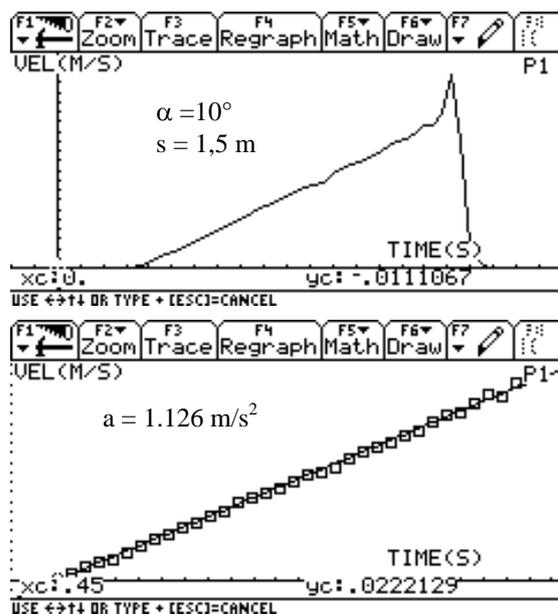


Abb. 11: Originalmessung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes mit dem Abstandssensor (oben) und Polynomfit des für die Bewegung relevanten Bereichs (unten).

Zur genaueren Analyse der Messkurven empfiehlt es sich, die Messwerte auf einen PC zu übertragen und hier weiter auszuwerten. Ein Beispiel für die in Abb. 10 dargestellte Messung zeigt Abb. 12.

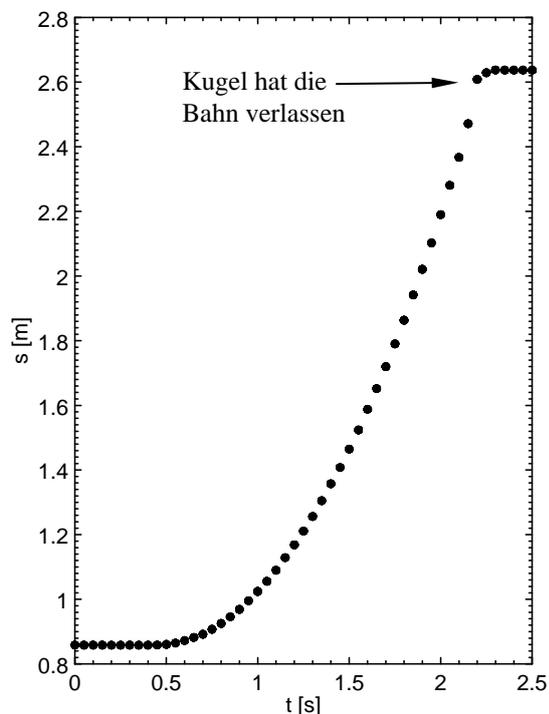


Abb. 12: Weg-Zeit-Abhängigkeit der Kugelbewegung in der Fallrinne, detailreichere Darstellung.

Deutlich zu erkennen ist die beschleunigte Bewegung an der Zunahme der Fallwege während identischer Zeitintervalle und der Sprung in der Abstandsmessung, wenn die Kugel die Rinne verlassen hat – hier wird der Abstand des Sensors zum Boden gemessen. Der Startzeitpunkt der Kugel kann aus den Messungen relativ gut bestimmt werden. Die Unsicherheit beträgt auf Grund des Messintervalls von 50 ms etwa ± 25 ms. Bei der Messung der Abbildung 12 wurde die Kugel zwischen $t_0 = 0,45$ und $0,5$ s gestartet. Der Startpunkt s_0 lag knapp 90 cm vom Sensor entfernt.

Die Messwerte liegen – wie für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung zu erwarten – praktisch exakt auf einer Parabel. Das zeigt die Darstellung derselben Messwerte in Abbildung 13 deutlich. Hier wurden die während der Fallzeit gemessenen Werte in einer für Schülerinnen und Schüler einfacher zu überblickenden Form dargestellt, indem Startpunkt und Startzeitpunkt der Kugel durch Subtraktion der jeweiligen Anfangswerte in den Ursprung des Koordinatensystems verlegt wurde. Die durchgezogene Linie wurde durch Anfitzen eines Polynoms der Form $s = a_2 t^2 + a_1 t + a_0$ erzeugt. Es ergaben sich die Werte $a_2 = 0,5601$, $a_1 = -0,0113$ und $a_0 = 0,0018$. Da die Koeffizienten a_0 und a_1 kaum von Null ver-

schiedenen sind, ist die Kurve praktisch identisch zur Parabel $s = a_2 t^2$. Die Bewegung der Kugel in der Fallrinne ist also tatsächlich gleichmäßig beschleunigt. Aus dem Fit hier erhält man eine Beschleunigung $a = 2a_2 = 1,12$ m/s². Beschleunigungswerte, die man aus Kurvenfits des Taschenrechnermessprogramms und entsprechender PC-Programme erhält, stimmen jeweils hervorragend überein (vgl. dazu auch die Abbildungen 10 und 11). Kleinere Abweichungen, sind i. a. in einer geringfügig unterschiedlichen Anzahl berücksichtigter Messpunkte begründet.

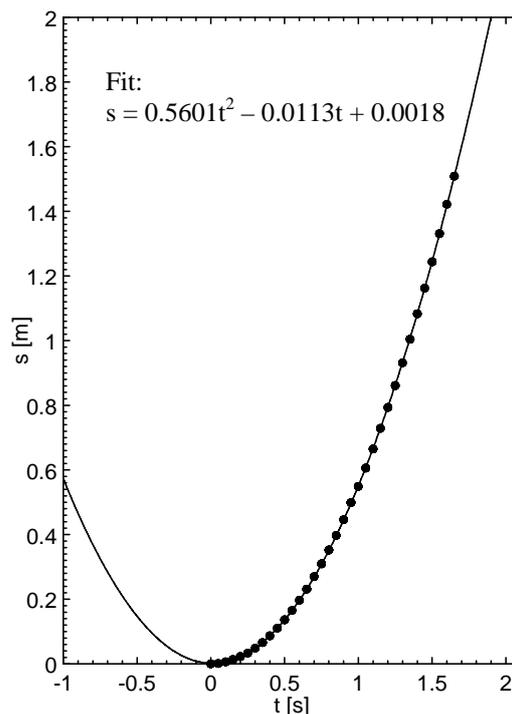


Abb. 13: Polynomfit der Weg-Zeitabhängigkeit der Kugelbewegung in der Fallrinne. Die Kurve wurde in den Ursprung verschoben. Die Messwerte liegen praktisch exakt auf einer Parabel.

Auch aus den Messungen mit dem Abstandssensor kann natürlich die Fallzeit (= Gesamtlaufzeit der Kugel in der Bahn) bestimmt werden. Die Werte sind auf Grund des Messintervalls von 50 ms jedoch etwas ungenauer als beim Verfahren mit der Soundkarte und dürften grundsätzlich etwas zu klein ausfallen. Das hängt – neben der Unsicherheit des Startzeitpunktes – damit zusammen, dass die Kugel natürlich nicht genau beim Verlassen der Bahn letztmalig durch den Sensor erfasst wird, sondern an einem Ort, an dem sie sich bis zu 50 ms davor befand.

5. Resümee

Fallrinnen können mit preiswerten, leicht zu beschaffenden Materialien einfach und mit wenig Zeitaufwand gebaut werden. Galileis Versuche las-

sen sich daran mit schulgeeigneten, computerunterstützten Messmethoden hervorragend nachvollziehen. Sowohl die Messungen mit der Soundkarte als auch die Messungen mit dem Abstandssensor zeigen, dass die Bewegung gleichmäßig beschleunigt ist.

Computerunterstützte Messungen mit dem Ultraschallabstandssensor erfordern das Vorhandensein der entsprechenden experimentellen Ausstattung und Übung im Umgang mit dem Messprogramm und in der Justierung des Sensors. Sie haben den Vorteil, dass sich die quadratische Abhängigkeit des Fallweges und die lineare Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Zeit direkt aus der Messung ergeben.

Messungen mit der Soundkarte sind auf Grund ihrer Einfachheit und der Vertrautheit im Umgang mit dem PC bei Schülerinnen und Schülern erfahrungsgemäß beliebt. Computermikrofone sind für wenige Euro zu haben, so dass Messungen auch zuhause durchgeführt und der Umgang mit der Software geübt werden kann. Für die Messungen an der Fallrinne werden neben PC und Mikrofon nur Geräte aus der Schulsammlung (Elektromagnet, Netzgerät und Stativmaterial) und preiswerte Elektronikbauteile (Pieper, Widerstand, Kondensator und Umschalter) benötigt. Ist die Schaltung für den akustischen Startmechanismus einmal aufgebaut, lassen sich Galileis Fallrinnenversuche für verschiedene Fallstrecken und Neigungswinkel bequem innerhalb einer Unterrichtsstunde durchführen. Die Fallzeiten lassen sich sehr genau bestimmen und es ergibt sich die Gesetzmäßigkeit der gleichmäßig beschleunigten Bewegung in der Formulierung Galileis: „Die Quotienten der Fallzeitquadrate verhalten sich wie die Quotienten der Fallwege“.

6. Literatur

- [1] Hermann, Armin (2007): Lexikon Geschichte der Physik A - Z. Köln: Aulis Verlag Deubner
- [2] Simonyi, K (2001): Kulturgeschichte der Physik. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch
- [3] Ramsauer, Carl (1953): Grundversuche der Physik in historischer Darstellung, Erster Band. Berlin: Springer Verlag
- [4] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph10_g8/geschichte/04galilei_methode/g_galilei_methode.htm
(Stand 4/2009)
- [5] Di Trocchio, Federico (1999): Der große Schwindel – Betrug und Fälschung in der Wissenschaft. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag
- [6] Zankl, Heinrich (2003): Fälscher, Schwindler, Scharlatane – Betrug in Forschung und Wissenschaft. Weinheim: Wiley-VCH Verlag
- [7] Riess, Falk; Heering, Peter; Nawrath, Dennis (2005): Inclined Plane Experiments for Teaching Purposes. In: Proceedings of the 7th IHPST conference in Leeds:
<http://www.ihpst2005.leeds.ac.uk/papers.htm>
(Stand: 4/2009)
- [8] Dorfmueller, Thomas (1998): Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 1. Berlin: de Gruyter
- [9] Demtröder, Wolfgang (1998): Experimentalphysik 1. Berlin: Springer (1998)
- [10] Settle, Thomas B. (1961): An Experiment in the History of Science. In: Science 133, 19
- [11] Die jeweils aktuelle Version des Programms Goldwave kann als Shareware von der Seite www.goldwave.com heruntergeladen werden.
(Stand: 4/2009)