

Zur Theorie von Messung der Relativbewegungen beim Fallexperiment

Gyula Imre Szász*

Date: 19. August 2015

Einleitung

Wir wollen aus der Messung des Ortes von Probekörpern relativ zu einer Unterlage, auf der die Probekörper von dem Fallexperiment, $t < 0$, ruhten, also aus der Funktion des Ortes mit der Zeit $s(t)$ für $t > 0$ die Bestimmung der Relativgeschwindigkeit und der Relativbeschleunigung analysieren. Für die Größe $s(t)$ gilt zwar die theoretische und die praktische Voraussetzung $s(t_0 \leq 0) = 0$, aber für die Zeitpunkte $t_i > 0$ sind die Orte nur mit gewissen Fehlern behaftet bestimmbar. Die erste Zeitableitung $\dot{s}(t)$ und die zweite Zeitableitung $\ddot{s}(t)$ sind für $t > 0$ zunächst theoretische Größen und die wollen wir praktisch bestimmen. Zu der praktischen Bestimmung der gesuchten Größen steht eine Videoaufnahme des Autors zur Verfügung, die er am 21.06.2004 im Vakuumrohr des Fallturmes vom ZARM aufgenommen hatte, und die die Relativbewegungen von Li, Be, B, C, Al, Fe und Pb zu der überwiegend aus Al bestehenden Fallkapsel festhält. Hier wollen wir die theoretischen Überlegungen zur Messung voranstellen, um dann die konkrete Durchführung der Auswertung mit dem erzielten Ergebnis abzuschließen.

Für die Zeitmessung steht uns eine Digitaluhr zur Verfügung, die die hundertstel Sekunden $0.01s$ anzeigt und ein Filmaufnahmegerät, ein Videorekorder, der mit 25 Frames/Sekunde arbeitet. Die aufeinander folgenden Einzelbilder registrieren die Vorgänge in $0.04s$ Zeitintervallen. Der Videofilm wird in Einzelbilder, in Frames, zerlegt und für die Auswertung durchnummeriert. Auf den Einzelbildern sind die Anzeige der Digitaluhr, eine cm-Skala im Hintergrund und natürlich die Probekörper zu sehen. Das Ausklinken der Fallkapsel ist mit der Digitaluhr synchronisiert, d.h. die Anzeige der Uhr läuft bei $t = 0$ los. Die Frames der Videokamera sind mit dem Ausklinken NICHT synchronisiert, d.h. von den Einzelbildern können wir lediglich ein Frame bestimmen, wo die Digitaluhr erstmals eine von Null verschiedene Anzeige hatte. Mit dem Frame davor werden wir den Beginn des Fallexperiments als $t = 0$ markieren. Von da an zählen die Einzelbilder die Zeit in $0.04s$ Zeitintervallen. Auf dem konkreten Videofilm, den ich am 21.06.2004 aufgenommen habe, und was mir zur Messung der Relativbewegung zur Verfügung steht, zeigt Frame407 den Anfang des Fallexperiments $t = 0$ an. Das Ende des freien Falles der Fallkapsel ist auf dem

*gyulaszasz42@gmail.com

Frame524 zu sehen, d.h. die Fallzeit von ca. 110m Fallhöhe in dem Vakuumrohr des Fallturms von ZARM betrug $117 \cdot 0.04s = 4.68s$. Das Vakuum hat nach Angaben von ZARM ca. 10^{-6} des normalen Luftdrucks im Vakuumrohr des Fallturms betragen. Zu der Zeitauflösung will ich vermerken, dass ich für das Fallexperiment eigentlich eine Videokamera mit 200 Frames/Sekunde, also mit der Zeitauflösung von $1s/200 = 0.005s$ bestellt habe. ZARM hat aber entgegen der Verabredung eine Videokamera mit 25 Frames/Sekunde für das Vorhaben eingebaut.

Von den Einzelbildern kann ich die Orte von Probekörpern mit $0.001m = 1mm$ genau ablesen. Genauer gesagt, ich kann die Relativentfernung der Probekörper $s(t_i)$ von der Unterlage als Funktion der Zeit $t = t_i > 0$ nur mit dieser Unsicherheit feststellen. Die Unterlage war ein fester Bestandteil der überwiegend aus dem chemischen Element Al bestehenden Fallkapsel. Die Probekörper selbst waren zu 99.99% aus demselben Isotop der chemischen Stoffe Li, Be, B, C, Al, Fe und Pb. Mit dem Fallexperiment messen wir die Relativbewegung dieser Stoffe verglichen mit Aluminium. Während des ganzen Fallexperiments ist die Relativbewegung so klein, dass man die Probekörper mit Abmessungen von ca. 1cm immer scharf sehen kann. Die relativen Orte $s(t_i)$, von der Unterlage entfernt, können wir für jeden Probekörper also mit der Genauigkeit von 1mm ablesen. Da die Fallstrecke 110m beträgt, steht für die theoretische Unsicherheit der registrierten Relativbewegung zunächst mal ein Wert von $1mm/1.1 \cdot 10^5mm \sim 10^{-5}$ zur Verfügung.

Die Relativbewegung ist so schwach, dass man in einer sehr guten Näherung die Bewegung als quadratisch in der Zeit in den gesamten, noch auszuwählenden Zeitintervallen ansetzen darf. D.h. die abgelesenen Wertepaare $s(t_i)$ und t_i pro Probekörper werden in gewissen Zeitintervallen genommen und das Polynom

$$s(\text{Probekörper}, t) = v0(\text{Probekörper}) \cdot t + a(\text{Probekörper})/2 \cdot t^2,$$

gefitet, um die konstanten Anfangsgeschwindigkeiten $v0(\text{Probekörper})$ und die konstanten Relativbeschleunigungen $a(\text{Probekörper})$ zu bestimmen. Die Anfangsgeschwindigkeit der Probekörper entsteht durch einen Kraftstoß auf die Probekörper beim Ausklinkvorgang. Danach bewegen sich die Probekörper schwebend nur unter dem Einfluss der Gravitation der Erde, wenn man von der Ankopplung der Probekörper an die fallende Kapsel und von dem normalen Luftdruck in der Kapsel absieht. Die Schwerkraft ist parallel zu der Ebene der cm-Skala nach unten gerichtet. Die Fallkapsel mit der cm-Skala in das berühmte beschleunigte Bezugssystem, in dem die Messung vollzogen wird. Auf jeden Fall, wenn verschiedene $a(\text{Probekörper}) > 0$ auftreten sollten, also wenn sich der Probekörper beschleunigt von der Unterlage erhebt, ist eine Verletzung der Universalität des Freien Falles (UFF) im Fallexperiment für den Probekörper gegeben. Für eine allgemeine Feststellung der Verletzung der UFF sind die Ausführung von mehreren Fallexperimenten erforderlich, in denen Verbesserungen eingebaut sind. Solche Verbesserungen wären auch die Probekörper im Vakuum fallenzulassen und die Adhäsion der Probekörper an die Unterlage zu minimieren. Gegen die Ankopplung der Probekörper an der fallenden Kapsel kann man

zunächst nicht viel unternehmen, denn die ist durch die Versuchsanordnung gegeben. Leider konnte ich die Fallexperimente mit den Verbesserungen in dem Fallturm vom ZARM nicht wiederholen, da sich ZARM vehement gegen die Fortsetzung des Fallexperiments gewährt hat. Ich habe also nur diese einzige Videoaufnahme zur Verfügung.

Bei der Auswertung traten auch praktische Probleme auf. Die Anzeige der Digitaluhr erschien, wegen der Versuchsanordnung, spiegelbildlich auf den Einzelbildern. Zusätzlich ist die hundertstel Sekundenanzeige der Uhr verschmiert zu sehen, da während 0.04s die Zeitanzeige der Uhr sprang. Durch Zählung der Frames, d.h. die Feststellung der Zeitpunkte t_i von Anfang, $t_0 = 0$, ist dieses Problem jedoch einfach lösbar.

Das Ablesen der Relativentfernung von der Unterlage $s(t_i)$ wird z.T. dadurch erschwert, dass sich die Probekörper drehen. In diesem Fall habe ich den nächsten und den entferntesten Punkt des Probekörpers von der Unterlage genommen, daraus den Mittelpunkt der Probekörper berechnet, um dann die Entfernung des Mittelpunkts von der Unterlage zu ermitteln. Das war beim Li und beim C der Fall. Der Probekörper aus Li hat irgendwann die Wand des durchsichtigen Begrenzungsrohrs berührt. Diese durchsichtigen Zylinder waren durch die Sicherheitsmaßnahmen beim Experiment vorgeschrieben.

Ich musste also auch die Zeitintervalle bestimmen, wann die Probekörper freischwebend waren. Dazu habe ich jeweils die Geschwindigkeit $s(t_i)/t_i$ gebildet, und nur wenn diese Größe zugenommen hat, habe ich die Zeitintervalle für das Fitten der Relativbewegung genommen. Die Zeitintervalle für das Fitten wurden als 2.43s für Li, 4.63s für C und 3.63 für Pb bestimmt, die waren mit dem 60., 115. und 90. Frames vom Anfang gezählt. Die Ortsangaben $s(t_i)$ sind mit der Genauigkeit von 1mm abgelesen worden, bis auf eine Ausnahme für Li bei $t_i = 0.35s$, Da beim mehrmaligen Ablesen der Wert 0.5cm genau so oft vorkam wie 0.6cm, habe ich dort 0.55cm genommen.

Für die Zeitangaben t_i habe ich, im Nachhinein etwas unlogisch, äquidistante Abstände beginnen bei $t_i = 0.35s$ bestimmt. Die äquidistanten Zeitschritte sollten ca. 0.28s sein. Da ich mich bei der Erstellung der Tabelle im Buch auf der Seite 134 [1] an der schlecht ablesbaren Anzeige der Digitaluhr orientierte, muss ich mir eine gewisse Kritik an die Zeitangaben gefallen lassen. Man kann es besser machen, indem man die Frames beginnend mit Frame407 zählt und die Anzahl mit 0.04s multipliziert. Die $s(t_i)$, t_i Tabellen vom Buch wurden in den Zeitintervallen 2.43s für Li, 4.63s für C und 3.63 für Pb genommen und mit χ^2 -Fitts durch Jörg Friedrich, Universität Mainz, die Anfangsgeschwindigkeiten $v_0(\text{Probekörper})$ und die Relativbeschleunigungen $a(\text{Probekörper})$ ermittelt.

Das Ergebnis des Fallexperimentes und seine Besprechung

Die Probekörper bestehend aus Be, B, Al und Fe zeigten relativ zu der aus Al bestehenden Fallkapsel keine messbaren Effekte. D.h. wenn für diese Probekörper Relativbeschleunigungen aufgetreten sollten, dann waren sie kleiner als 10^{-5} . Bei Be und B vermutet der Autor das Vorhandensein der Adhäsion der Probekörper zu der Unterlage. Beim Al und Fe erwartet der Autor keine Effekte,

Section 6. in [1]. Siehe auch die Homepage des Autors www.atomsz.com

Die ermittelten Werte der Anfangsgeschwindigkeiten, der Relativbeschleunigungen und die Relativbeschleunigungen zu der Schwerebeschleunigung $a_0 = 9.81m/s^2$ waren

$$\text{Li: } 1.63(4)cm/s, 0.434(5)cm/s^2, a(Li)/a_0 = 0.0442(5)\%$$

$$\text{C: } 0.00(1)cm/s, 0.150(3)cm/s^2, a(C)/a_0 = 0.0152(5)\%$$

$$\text{Pb: } 1.81(2)cm/s, 0.102(8)cm/s^2, a(Li)/a_0 = 0.0104(8)\% .$$

Die Messung hat die Verletzung der UFF ergeben, und zwar mit Werten, die erheblich über den nach den Eötvös-Messungen zu erwarteten 10^{-12} lagen. Leider kann ich meine Werte aus dem Fallexperiment nicht mit Messungen anderer Kollegen vergleichen, denn in der Fachliteratur sind aus ca. 100m Fallhöhe keine Messungen mit verschiedenen chemischen Elementen und mit der Genauigkeit von 10^{-5} verfügbar.

Der Autor hat bei seinen theoretischen Überlegungen zu der Messung des Freien Falles auch wichtige Hinweise zur Messung der Gleichzeitigkeit von Ereignissen, und zu der Zeitmessung überhaupt, erhalten. Darüber hinaus wichtige Hinweise zur Messung der Relativbewegung von Körpern herausgeschält. Der in der klassischen Physik so sorglos verwendete und akzeptierte Begriff, die Möglichkeit von genauen Angaben zu einem Anfangsort und zu einer Anfangsgeschwindigkeit eines Körpers zu einem bestimmten Zeitpunkt $t = 0$, ist physikalisch nicht realisierbar, dieser Begriff hat keine physikalische Evidenz.

Ebenso ist die aufgestellte Behauptung, dass alle Körper die gleiche Relativbeschleunigung im Schwerfeld besitzen, experimentell nicht konsequent nach geprüft worden. Das vorliegende Fallexperiment mit verschiedenen chemischen Stoffen stellt Galileis Hypothese zur Universalität des Freien Falles in Frage, denn die Relativbeschleunigungen der Stoffe bezogen auf a_0 sind in der hier besprochenen Messung bereits mit mehr als 10^{-4} unterschiedlich. Die theoretische Unsicherheit der Messung war 10^{-5} .

Nach einer Prognose des Autors nach der **Atomistischen Theorie der Materie** sind die Relativbeschleunigungen bis zu 0.893% unterschiedlich [1], da die schwere Masse $m^g(\text{Probekörper})$ und die träge Masse $m^i(\text{Probekörper})$ von Probekörpern sich unterscheiden und die Schwerebeschleunigung

$$a(\text{Probekörper}) = -a_0 \cdot m^g(\text{Probekörper})/m^i(\text{Probekörper})$$

$$= -a_0 \cdot (1 + \Delta(\text{Probekörper}))$$

mit den phänomenologisch bekannten relativen Massendefekten der Isotope $-0.109\% < \Delta(\text{Probekörper}) < +0.784\%$

ausdrücken lässt. Der Δ vom 1H ist -0.109% und vom ^{56}Fe ist $+0.784\%$.

Referenz

[1] Gy. I. Szász, *Physics of Elementary Processes; Basic Approach in Physics and Astronomy*, Cerberus, Budapest (2005), ISBN: 963 219 791 7, Section 6.