

Vorbemerkung zum Text

Die berühmten "Discorsi" von Galileo Galilei („*Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno due nuove scienze attenenti alla mecanica & i movimenti locali*“) stellen eine Zusammenfassung des gesamten physikalischen Schaffens des großen italienischen Forschers dar und bilden die Grundlage der neuen Physik. In diesem "ersten Lehrbuch der neuzeitlichen Physik" (so Max von Laue) hat Galilei (wie auch in anderen Werken) die Form eines fiktiven Dialogs zwischen den Personen Salviati, Sagredo und Simplicio gewählt. Salviati spricht in der Regel die Meinung Galileis aus, Sagredo hilft durch das formulieren genauer Fragen den Gedankengang zu entwickeln und Simplicio vertritt die Positionen der antiken Philosophie bzw. Physik (vor allem Aristoteles). Unterbrochen wird der Text von längeren (auch mathematischen) Ausführungen, die keiner der Personen zugeordnet sind. Hier spricht also Galilei direkt zum Leser. Sprechen die Personen des fiktiven Dialogs von „dem Autor“ beziehen sie sich ebenfalls auf ihn. Mit dieser Dialogform stellt Galilei die verschiedenen Auffassungen nicht nur didaktisch geschickt gegenüber, sondern zeichnet auch ein literarisches Bild von den geistig-politischen Verhältnissen seiner Zeit. Das unter Arrest verfasste Manuskript wurde heimlich außer Landes geschmuggelt, um dann 1638 - als Galilei bereits erblindet war - in Holland gedruckt zu werden, nachdem im übrigen Europa keine Druckerlaubnis zu erhalten war. Der Text ist in 6 Kapitel („6 Tage“) geteilt, an denen der Dialog stattfindet. Unsere Auszüge spielen am dritten Tag.

Galileo Galilei

Auszug aus „Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend“

Über die örtliche Bewegung

Ueber einen sehr alten Gegenstand bringen wir eine ganz neue Wissenschaft. Nichts ist älter in der Natur als die **B e w e g u n g**, und über dieselbe giebt es weder wenig noch geringe Schriften der Philosophen. Dennoch habe ich deren Eigenthümlichkeiten in grosser Menge und darunter sehr wissenschaftliche, bisher aber nicht erkannte und noch nicht bewiesene, in Erfahrung gebracht. Einige leichtere Sätze hört man nennen: wie zum Beispiel, dass die natürliche Bewegung fallender schwerer Körper eine stetig beschleunigte sei. In welchem Maasse aber diese Beschleunigung stattfindet, ist bisher nicht ausgesprochen worden; denn so viel ich weiss, hat Niemand bewiesen, dass die vom fallenden Körper in gleichen Zeiten zurückgelegten Strecken sich zu einander verhalten wie die ungeraden Zahlen. Man hat beobachtet, dass Wurfgeschosse eine gewisse Curve beschreiben; dass letztere aber eine Parabel sei, hat Niemand gelehrt. Dass aber dieses sich so verhält und noch vieles andere, nicht minder wissenschaftliche, soll von mir bewiesen werden, und was noch zu thun übrig bleibt, zu dem wird die Bahn geebnet, zur Errichtung einer sehr weiten, ausserordentlich wichtigen Wissenschaft, deren Anfangsgründe diese vorliegende Arbeit bringen soll, in deren tiefere Geheimnisse einzudringen Geistern vorbehalten bleibt, die mir überlegen sind.

In drei Theile zerfällt unsere Abhandlung. In dem ersten betrachten wir die gleichförmige Bewegung. In dem zweiten beschreiben wir die gleichförmig beschleunigte Bewegung. In dem dritten handeln wir von der gewaltsamen Bewegung oder von den Wurfgeschossen.

Über die natürlich beschleunigte Bewegung

Bisher war die gleichförmige Bewegung behandelt worden, jetzt gehen wir zur beschleunigten Bewegung über. Zunächst muss eine der natürlichen Erscheinung genau entsprechende Definition gesucht und erläutert werden. Obgleich es durchaus gestattet ist, irgend eine Art der Bewegung beliebig zu

ersinnen und die damit zusammenhängenden Ereignisse zu betrachten (...), so haben wir uns dennoch entschlossen, diejenigen Erscheinungen zu betrachten, die bei den frei fallenden Körpern in der Natur vorkommen, und lassen die Definition der beschleunigten Bewegung zusammenfallen mit dem Wesen einer natürlich beschleunigten Bewegung. Das glauben wir schliesslich nach langen Ueberlegungen als das Beste gefunden zu haben, vorzüglich darauf gestützt, dass das, was das Experiment den Sinnen vorführt, den erläuterten Erscheinungen durchaus entspreche. Endlich hat uns zur Untersuchung der natürlich beschleunigten Bewegung gleichsam mit der Hand geleitet die aufmerksame Beobachtung des gewöhnlichen Geschehens und der Ordnung der Natur in allen ihren Verrichtungen, bei deren Ausübung sie die allerersten einfachsten und leichtesten Hilfsmittel zu verwenden pflegt; denn wie ich meine, wird Niemand glauben, dass das Schwimmen oder das Fliegen einfacher oder leichter zu Stande gebracht werden könne als durch diejenigen Mittel, die die Fische und die Vögel mit natürlichem Instinct gebrauchen. 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 zu Stande kommen? Wenn wir genau aufmerken, werden wir keinen Zuwachs einfacher finden, als denjenigen, der in immer gleicher Weise hinzutritt. Das erkennen wir leicht, wenn wir an die Verwandtschaft der Begriffe der Zeit und der Bewegung denken: denn wie die Gleichförmigkeit der Bewegung durch die Gleichheit der Zeiten und Räume bestimmt und erfasst wird (denn wir nannten diejenige Bewegung gleichförmig, bei der in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurückgelegt wurden), so können wir durch ebensolche Gleichheit der Zeittheile die Geschwindigkeitszunahmen als einfach zu Stande gekommen erfassen: mit dem Geiste erkennen wir diese Bewegung als einförmig und in gleichbleibender Weise stetig beschleunigt, da in irgend welchen gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszunahmen sich addiren. So dass, wenn man vom Anfangspunkte der Zeit an ganz gleiche Zeittheilchen nimmt von der Ruhelage aus, die Fallstrecke hindurch, die Geschwindigkeit des ersten Zeittheils mitsammt dem Zuwachs des zweiten, auf den doppelten Werth hinansteigt: in drei Zeittheilchen ist der Werth der dreifache, in vieren der vierfache vom ersten. Deutlicher zu reden, wenn der Körper seine Bewegung nach dem ersten Zeittheile in gleicher Weise mit der erlangten Geschwindigkeit fortsetzte, so würde er halb so langsam gehen, als wenn in zwei Zeittheilchen die Geschwindigkeit erzeugt worden wäre; und so werden wir nicht fehlgehen, wenn wir die Vermehrung der Geschwindigkeit (intentionem velocitatis) der Zeit entsprechen lassen; hieraus folgt die **Definition** der Bewegung, von welcher wir handeln wollen. Gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung nenne ich diejenige, die von Anfang an in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitszuwüchse ertheilt.

(...)

Sagredo: So viel ich gegenwärtig verstehe, hätte man vielleicht deutlicher ohne den Grundgedanken zu ändern definieren können: Einförmig beschleunigte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Geschwindigkeit wächst proportional der zurückgelegten Strecke; sodass z.B. nach einer Fallstrecke von vier Ellen die Geschwindigkeit doppelt so groß sei, als wenn er durch zwei Ellen gesunken wäre, und diese das doppelte von der bei einer Elle Fallstrecke erlangten Geschwindigkeit. Denn ohne Zweifel wird ein von sechs Ellen herabfallender Körper den doppelten Antrieb durch Stoß hervorrufen im Vergleich zu den von drei Ellen Höhe herabkommenden; und den dreifachen Antrieb im Vergleich zur Fallhöhe von zwei Ellen, den sechsfachen zu der von einer Elle Höhe.

Salviati: Es ist mir recht tröstlich, in diesem Irrtum einen solchen Genossen gehabt zu haben; überdies muss ich Euch sagen, dass Eure Überlegung so wahrscheinlich zu sein scheint, dass selbst unser Autor eine Zeitlang, wie er mir selbst gesagt hat, in demselben Irrtum befangen war. Was mir aber am meisten Staunen erregt hat, war die Tatsache, dass zwei sehr wahrscheinlich klingende Behauptungen, die mir von vielen, denen ich sie vorlegte, ohne Weiteres zugestanden waren, mit nur vier ganz schlichten Worten als ganz falsch und ganz unmöglich erwiesen wurden.

Simplicio: Wahrlich, auch ich würde jenen Annahmen beipflichten; der fallende Körper erlangt im Falle seine Kräfte, indem die Geschwindigkeit proportional der Fallstrecke anwächst, und das Moment des Stoßes ist doppelt so groß, wenn die Fallhöhe die doppelte. Diesen Sätzen kann man ohne Widerstreben beipflichten.

Salviati: Und dennoch sind sie dermaßen falsch und unmöglich, wie wenn jede Bewegung instantan¹ wäre. Folgendes ist die allerdeutlichste Erläuterung. Wenn die Geschwindigkeiten proportional den Fallstrecken wären, die zurückgelegt worden sind oder zurückgelegt werden sollen, so werden solche Strecken in gleichen Zeiten zurückgelegt; wenn also die Geschwindigkeit, mit welcher der Körper vier Ellen überwand, das doppelte der Geschwindigkeit sein sollte, mit welcher die zwei ersten Ellen zurückgelegt wurden, so müssten die zu diesen Vorgängen nötigen Zeiten einander ganz gleich sein; aber eine Überwindung von vier Ellen in derselben Zeit wie eine von zwei Ellen kann nur zustande kommen, wenn es eine instantante Bewegung gibt; wir sehen dagegen, dass der Körper Zeit zum Fallen gebraucht, und zwar weniger für zwei als für vier Ellen Fallstrecke; also ist es falsch, dass die Geschwindigkeiten proportional der Fallstrecke wachsen.(...)

Sagredo: Mit zu viel Evidenz und Gewandtheit erklärt Ihr uns die verborgensten Dinge; diese Fertigkeit macht, dass wir die Erkenntnis weniger schätzen, als wir damals zu tun glaubten, als wir noch der Wahrscheinlichkeit des Gegenteils huldigten. Die mit wenig Mühe errungenen allgemeinen Kenntnisse würdigt man wenig im Vergleich zu denen, die mit langen unerklärlichen Vorstellungen umgeben sind.

Salviati: Es wäre sehr traurig, wenn denjenigen, welche kurz und deutlich die Irrtümer allgemein für wahr gehaltener Sätze aufdecken, statt Beifall nur Missachtung gezollt würde; aber eine bittere und lästige Empfindung wird bei denjenigen erweckt, die auf demselben Studiengebiet sich jedem anderen gewachsen glauben und dann erkennen, dass sie das als richtige Schlussfolgerung zugelassen haben, was später von einem anderen mit kurzer leichter Überlegung aufgedeckt und als irrig gekennzeichnet wurde. Ich möchte solch eine Empfindung nicht Neid nennen, der gewöhnlich in Hass und Zorn gegen den Aufdecker der Irrtümer ausartet, viel eher wird es ein Sucht und ein Verlangen sein, altgewordene Irrtümer lieber aufrecht zu erhalten, als zuzugestehen, dass neuentdeckte Wahrheiten vorliegen, und dieses Verlangen verführt die Leute oft, gegen vollkommen von ihnen selbst erkannte Wahrheiten zu schreiben, bloß um die Meinung der großen und wenig intelligenten Menge gegen das Ansehen des anderen aufzustacheln. Von solchen falschen Lehren und leichtfertigen Widerlegungen habe ich oft unseren Akademiker reden gehört, und ich habe sie mir wohl gemerkt.

Sagredo: Sie sollten uns dieselben nicht vorenthalten, sondern gelegentlich mitteilen, selbst wenn wir in diesem Interesse eine besondere Zusammenkunft vereinbaren müssten. Unser Gespräch wieder aufnehmend, will mir scheinen, dass wir bis jetzt die Definition der gleichförmig beschleunigten Bewegung festgestellt haben, auf welche die folgenden Untersuchungen sich beziehen, nämlich: Die gleichförmig oder einförmig beschleunigte Bewegung ist eine solche, bei welcher in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitsmomente hinzukommen.

Nach diesen Ausführungen beweist Galilei, dass aus der gleichmäßigen Beschleunigung folgt, dass beim freien Fall die Fallstrecken wie t^2 anwachsen. Diese Begründung erfolgt ähnlich wie in unserem Unterricht: Wächst die Geschwindigkeit proportional mit der Fallzeit ($v=at$), so ist die mittlere Geschwindigkeit nach einem Fall aus Ruhe $v_m=\frac{1}{2}v=\frac{1}{2}at$. Dann ist die zurückgelegte Strecke jedoch $s=v_m t=\frac{1}{2}at^2$.

Auf längere mathematische Ausführungen dieser Art wendet Simplicio ein:

Simplicio: (...) Ob aber die Beschleunigung, deren die Natur sich bedient, beim Fall der Körper eine solche sei, das bezweifle ich noch, und deshalb würden ich und Andere, die mir ähnlich denken, es für sehr erwünscht halten, jetzt einen Versuch herbeizuziehen, deren es so viele geben soll, und die sich mit den Beweisen decken sollen.

Salviati: Ihr stellt in der That, als Mann der Wissenschaft, eine berechnete Forderung auf, und so muss es geschehen in den Wissensgebieten, in welchen auf natürliche Konsequenzen mathematische Beweise angewandt werden; so sieht man es bei allen, die Perspective, Astronomie, Mechanik, Musik und anderes

¹ Instantan bedeutet hier so viel wie „sofort“ bzw. „ohne dass Zeit vergeht“

betreiben; diese alle erhärten ihre Principien durch Experimente, und diese bilden das Fundament des ganzen späteren Aufbaus ... Der Autor hat es nicht unterlassen, Versuche anzustellen, und um mich davon zu überzeugen, daß die gleichförmig beschleunigte Bewegung in oben geschildertem Verhältnis vor sich gehe, bin ich wiederholt in Gemeinschaft mit unserem Autor in folgender Weise vorgegangen:

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 einen 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 glatt polierte Messingkugel laufen. Nach Aufstellung des Brettes wurde dasselbe... (an einem Ende um eine Elle angehoben); dann ließ man die Kugel durch den Kanal fallen und verzeichnete... die Fallzeit für die ganze Strecke... (Nachdem die Kugel durch die ganze Strecke gefallen war), ließen wir die Kugel nur durch ein Viertel der Strecke laufen und fanden stets genau die halbe Fallzeit gegenüber früher. Dann wählten wir andere Strecken und (maßten die zugehörigen Zeiten)...; 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...

An einer früheren Stelle kommt es zu diesem Dialog zwischen Sagredo und Salviati:

Sagredo: Aufgrund dieser Überlegung, scheint mir, könnte man eine recht zutreffende Lösung der von Philosophen erörterten Fragen gewinnen, welches die Ursache der Beschleunigung bei der natürlichen Bewegung schwerer Körper sei. (...)

Salviati: Es scheint mir nicht günstig, jetzt zu untersuchen, welches die Ursache der Beschleunigung der natürlichen Bewegung sei, worüber von verschiedenen Philosophen verschiedene Meinungen vorgeführt worden sind; einige führen sie auf die Annäherung an das Zentrum zurück, andere darauf, dass immer weniger Teile des Körpers auseinander gehen wollen; wieder andere auf eine gewisse Vertreibung des umgebenden Mittels, welches hinter dem fallenden Körper sich wieder schließt und den Körper antreibt und von Stelle zu Stelle verjagt; alle diese Vorstellungen und noch andere müssen geprüft werden und man wird wenig Gewinn haben. Für jetzt verlangt unser Autor nicht mehr, als dass wir einsehen, wie es uns einige Eigenschaften der beschleunigten Bewegung untersucht und erläutert (ohne Rücksicht auf die Ursache der letzteren), sodass die Momente seiner Geschwindigkeit vom Anfangszustand der Ruhe aus stets anwachsen jenem einfachsten Gesetze gemäß, der Proportionalität mit der Zeit, d.h. so, dass in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeitsanwüchse statt haben. Sollte sich zeigen, dass die später zu besprechenden Erscheinungen mit der Bewegung der beschleunigt fallenden Körper übereinstimmen, so werden wir annehmen dürfen, dass unsere Definition den Fall der schweren Körper umfasst und dass es wahr sei, dass ihre Beschleunigung proportional der Zeit sei, so lange die Bewegung andauert.

Bearbeitungsauftrag

1. Welche Hypothese (bzw. Hypothesen) formuliert Galilei?
2. Wie begründet er diese? (Ins Besondere: In welchem Verhältnis stehen Theorie und Experiment zu einander?)
3. Was ist nach Galilei das Ziel seiner Untersuchungen bzw. der Physik insgesamt?