Von der Schwierigkeit, die Masse von Exoplaneten zu bestimmen

Oder: Warum schweben die ISS-Astronauten eigentlich?

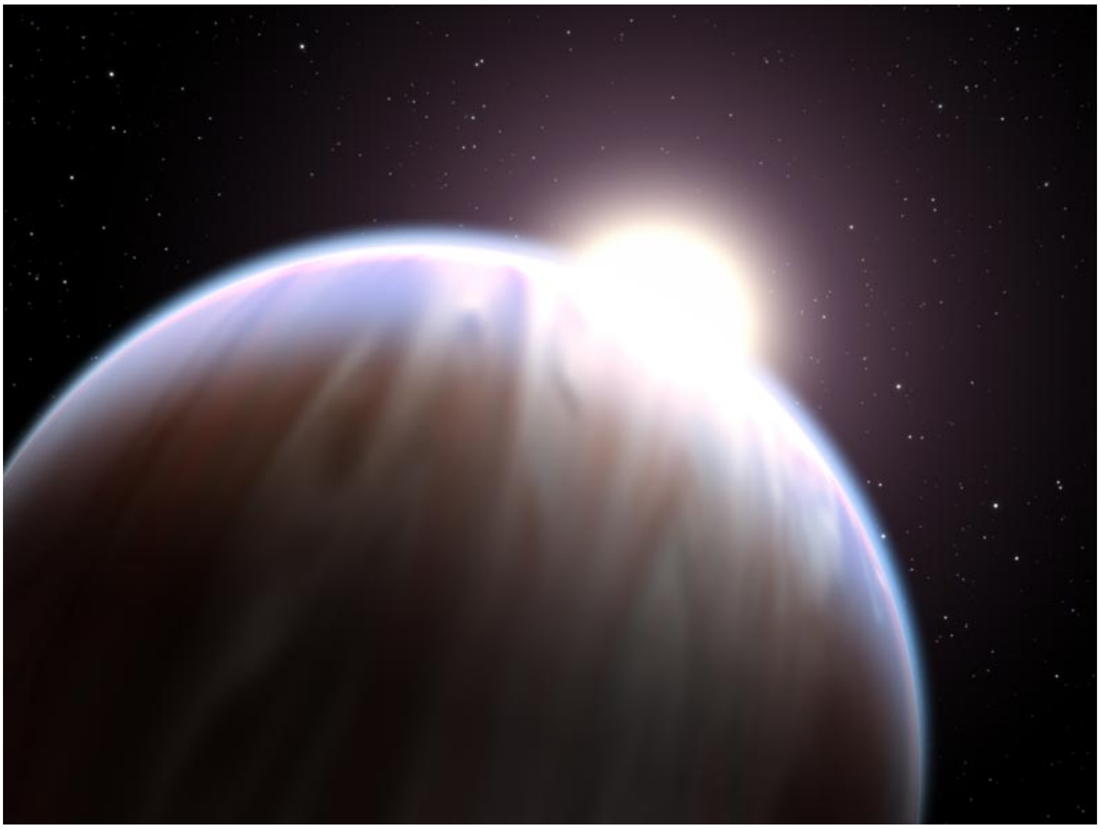
In Bezug auf den SuW-Beitrag „Kepler 10c – ein massereicher Gesteinsplanet“ (in Heft 10/2014 Blick in die Forschung: Nachrichten, Brennpunkt 1314)

Dr. Daniel Ahrens

Um zu klären, ob es sich bei einem Exoplaneten um einen Gesteins- oder einen Gasplaneten handelt, muss neben der *Größe* (Durchmesser, Volumen) auch die *Masse* des Trabanten bestimmt werden. Intuitiv würde man erwarten, dass sich die Masse aus der Umlaufdauer des Planeten, seiner Entfernung vom Zentralstern bzw. der Masse des Zentralsterns irgendwie errechnen ließe. Das ist aber nicht der Fall.

Im vorliegenden Artikel soll dargestellt werden, dass und wie man sogar ohne aufwändige physikalische Fachbegrifflichkeiten (also bereits in der Unterstufe) verstehen kann, warum dies nicht funktioniert. Dabei lernt man gleichzeitig die richtige Antwort auf die von fast allen falsch beantwortete Frage kennen, warum die Astronauten in der ISS eigentlich schweben.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	**Mechanik (Kinematik)**	**Freier Fall, schwere und träge Masse, Kreisbewegungen**
Astronomie	**Planeten**	**Bewegungen im Gravitationsfeld, Keplersche Gesetze, Parabelflüge**
Fächerverknüpfung	**Physik – Geschichte**	**Wissenschaftsgeschichte: Lektüre historischer Texte**



Künstlerische Darstellung eines extralsolaren Planeten
(http://www.jpl.nasa.gov/images/hubble/20080319/extrasolar-browse.jpg)

Inhalt

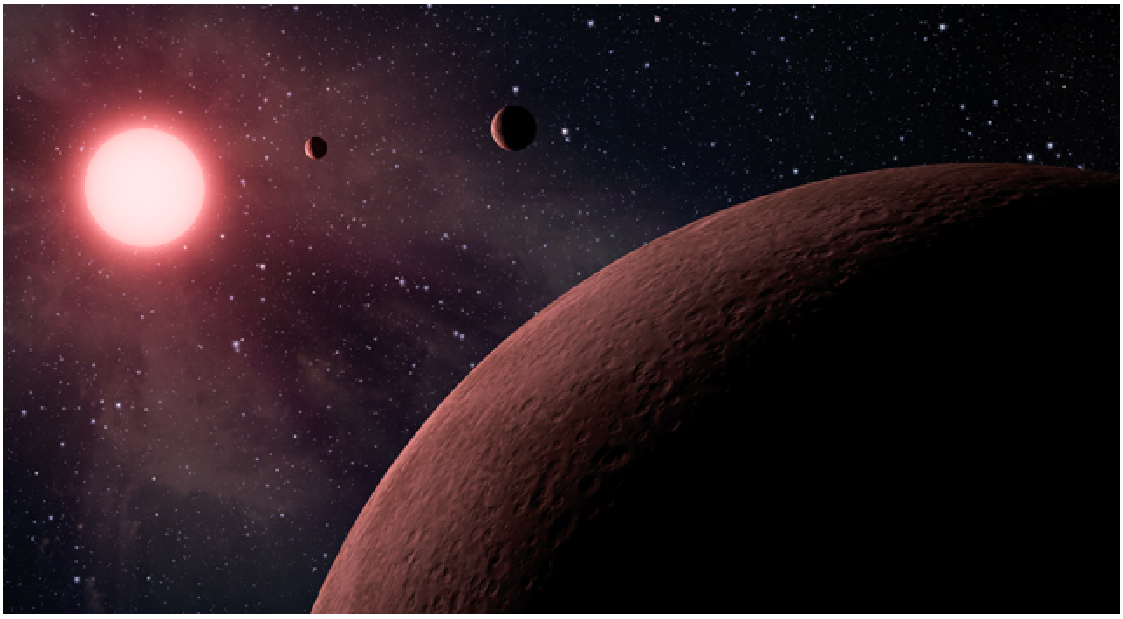


Abbildung 1: Künstlerische Darstellung eines extrasolaren Planeten (http://www.jpl.nasa.gov/images/kepler/20120111/pia15257-640.jpg)

I Einleitung

1 Das physikalische Problem: Von der Schwierigkeit, die Masse von Exoplaneten zu bestimmen

Im Heft SuW 10/2014 wird berichtet, dass der extrasolare Planet *Kepler 10c* einen Rekord hält. Er gilt als der „bislang massereichste Himmelskörper, der wie unsere Erde überwiegend aus silikatischen Gesteinen und metallischem Eisen besteht." Wie aber lässt sich eine solche Diagnose über die gigantische Entfernung von 560 LJ stellen? Wie gibt ein nicht selbst leuchtender Körper eigentlich Informationen über seine innere Beschaffenheit Preis?
Schnell hat man die Idee, dass das wohl über die Berechnung der Dichte des Exoplaneten funktioniert, die wiederum auf Volumen- und Massenbestimmung zurückgeht. Es ist also im Grunde nichts weiter zu tun, als Durchmesser und Masse des Exoplaneten zu bestimmen. Nichts weiter? Leicht gesagt, denn obwohl es heutzutage gleich mehrere, z.T. hochgenaue Methoden zur Messung des Durchmessers und damit des Volumens von Exoplaneten gibt, so ist die Massebestimmung derselben dagegen ein großes Problem, mindestens aber eine große Herausforderung. Warum?
Die „Gleichheit" von träger und schwerer Masse führt dazu, dass die leicht beobachtbaren Größen Bahnradius und Umlaufdauer des Exoplaneten keine Aussage über seine Masse zulassen. In einer bestimmten Entfernung vom Zentralgestirn besitzen Objekte jeder beliebigen Masse die gleiche Umlaufzeit. Wäre also unsere Erde nur halb so voluminös (hätte sie bei gleicher Beschaffenheit also auch die Hälfte der aktuellen Masse), würde sie dennoch mit der gleichen Umlaufzeit von einem tropischen Jahr in der bekannten Entfernung von einer astronomischen Einheit (AE) um unsere Sonne kreisen. Umlaufdauer und Entfernung vom Zentralgestirn lassen also keinerlei Aussage über die Masse eines kreisenden Objekts zu.
Ziel des vorliegenden WIS-Beitrages ist es also nicht, Schüler(innen) (im weiteren Verlauf „SuS" abgekürzt) in die zum Teil hoch komplexe Massebestimmung von Exoplaneten einzuführen, als vielmehr ihnen verständlich zu machen, warum das mit konventionellen Methoden nicht funktioniert (es soll also das Scheitern *verstehbar* gemacht werden). Die besondere Herausforderung besteht darin, dabei ohne allzu viel (häufig ohnehin nur halb verstandenes) Fachvokabular auszukommen, das Scheitern der intuitiven Ideen quasi „auf Deutsch" zu verdeutlichen.

2 Didaktische Vorüberlegungen

Die vorliegende Fragestellung passt sicherlich am besten in den unterrichtlichen Zusammenhang der Oberstufenthemen *Gravitationsgesetz* bzw. *Bewegungen im Gravitationsfeld*. Hier lernen die SuS neben dem Newtonschen Gravitationsgesetz auch die Keplerschen Gesetze kennen und bedienen, wobei regelmäßig auch Massen von Sternen oder Planeten berechnet werden. Man könnte also denken, aus den relativ leicht beobachtbaren Umlaufdaten eines Exoplaneten (T und r) könnte man auch dessen Masse (m) bestimmen. Lässt man die SuS aber mit den Formeln hantieren, stellen diese schnell fest, dass die Masse in den Keplerschen Gesetzen nicht vorkommt, und sich beim Gleichsetzen von Gravitationsgesetz und Zentrifugalkraft die Masse m des kreisenden Gestirns herauskürzt. Die Masse des *Zentralgestirns* („das große M".) lässt sich zwar aus den beobachtbaren Daten errechnen, nicht aber die Masse des *Trabanten*. Das kommt vielen SuS merkwürdig vor. Es leuchtet intuitiv einfach nicht ein, warum man aus der Entfernung und Umlaufdauer eines kreisenden Trabanten nicht dessen Masse berechnen kann. Ein großer und schwerer Trabant muss doch anders kreisen als ein kleiner leichter.
Außerdem stellt sich die Frage, wie die Astronomen die ja sehr genau bekannte Masse der Planeten unseres Sonnensystems bestimmt haben. Offenbar funktioniert das nur, wenn die Planeten selbst Trabanten, sprich Monde, besitzen, die dann eine Massebestimmung des Zentralobjekts erlauben. Zum Glück werden die meisten Planeten unseres Systems tatsächlich von Monden umkreist. Bei anderen, wie der Venus, kennt man die Masse erst genau, seit die Menschheit in den 1960er Jahren Trabanten, in diesem Falle Raumsonden, hinschickte und deren Umlaufzeit sehr genau vermaß.

So bemerken Oberstufenschüler(innen) also schnell, dass das mit den bislang kennengelernten Formeln irgendwie nicht klappt und durchstöbern die Formelsammlung nach Alternativen. Sie realisieren damit zwar das Scheitern ihrer Versuche; das Problem wirklich verstanden haben sie deswegen aber noch lange nicht. Es lohnt sich also m.E. auch für die Oberstufe, an dieser Stelle etwas innezuhalten und im Wagenscheinschen Sinne „Verstehen zu lehren“.[1]
Da die genannten Inhalte der Oberstufenphysik tatsächlich zunächst weder zum Bestimmen der Masse eines kreisenden Objekts noch zum Verständnis, warum das nicht klappt, beitragen, möchte ich an dieser Stelle den Versuch wagen, das Oberstufen-Physikarsenal (Theorie der Kreisbewegungen, Gravitationsgesetz in seiner quantitativen Form, Keplersche Gesetze) wegzulassen und die Problematik auf dem Niveau der Sekundarstufe I anzugehen. Kann man also mit einfachen Mitteln verstehen(!), warum man an die Masse von in großer Entfernung kreisenden Objekten so schwer herankommt? Es wäre sicherlich der Mühe wert.

II Im „Dreischritt“ zum Verstehen

1 Newtons Gedankenexperiment

Als im Jahre 1665 in London die Pest wütete und die Menschen scharenweise starben, floh der damals 23-jährige Mathematikstudent Isaak Newton in sein Heimatdorf Woolsthorpe. Im Laufe eines Jahres entwickelte er dort in der großen Abgeschiedenheit mehrere zum Teil bahnbrechende Ideen, darunter seine Theorie der Gravitation. Eine besondere Rolle spielte dabei ein Gedankenexperiment, das 300 Jahre später von den beiden großen Lehrern der Physik, R.P. Feynman[2] und M. Wagenschein[3], aufgenommen und didaktisch fruchtbar gemacht wurde. Newton ging es um die Frage, ob sich denn die irdische Schwerkraft bis zum Mond erstrecke, ob also die Kraft, die uns alle auf der Erde hält, eine bis ins Weltall reichende, eine universelle Kraft sei, die tatsächlich alles anzieht.
Dazu stellte er sich vor, jemand steht auf einem sehr, sehr hohen, einem extrem unrealistisch hohen Berg und wirft einen Stein horizontal von sich; zunächst schwach, dann immer fester. Dabei beobachtet er die Flugbahn des Steines. Jedes Kind, das schon einmal einen Gegenstand von sich weg geworfen hat, weiß (und hat die Erfahrung gemacht), dass die Dinge sich im Bogen Richtung Erdboden bewegen und irgendwann dort aufschlagen. Es ist hier unerheblich, welche mathematische Form diese Flugbahn besitzt[4], es reicht zu wissen, dass sich der Stein kontinuierlich dem Boden nähert und irgendwann dort ankommt. Je fester man abwirft, desto weiter fliegt der Gegenstand (Abb. 2).

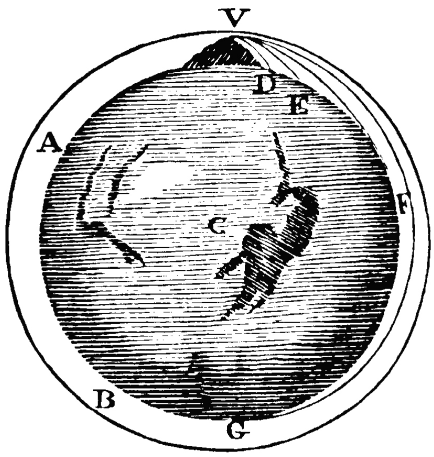


Abbildung 2
(http://www.kadenz.nu/3_2000/images3_2000/newton_jorden.gif)

[1] Wagenschein, M. ([2]2013): Verstehen lehren. Weinheim/Basel: Beltz.
[2] Feynman, R. (2003): Sechs physikalische Fingerübungen. München: Piper.
[3] Wagenschein, M. (1960): Der Mond und seine Bewegung. In: Wagenschein, M.: Natur physikalisch gesehen. Frankfurt u.a.: Diesterweg.
[4] Oberstufenschüler lernen, dass es sich hierbei um Wurfparabeln handelt. Berücksichtigt man allerdings, dass der Wurf nicht in einem *homogenen*, sondern einem *radialsymmetrischen* Gravitationsfeld stattfindet, müsste man eigentlich von Ellipsenabschnitten (in deren einem Brennpunkt der Erdmittelpunkt liegt) sprechen.

Wäre die Erde nun eine Scheibe, wäre damit alles gesagt. In Wirklichkeit *krümmt* sich aber die Erde unter der Flugbahn des Steines. Mit Hilfe von Abb. 3 leuchtet nun unmittelbar ein, dass „bei einer ganz bestimmten Anfangsgeschwindigkeit der besondere ‚Fall' (und Wurf) erreicht ist, dass der Stein die Erde nicht mehr erreichen kann, obwohl er es ja ständig versucht. Die Bahnkrümmung ist gleich der Erdkrümmung geworden."[5] Der Stein fällt also die ganze Zeit, obwohl er der Erde nicht näher kommt. Er fällt aber insofern, „als er von der geraden Bahn herunterfällt, die er einschlüge, wären keine Kräfte wirksam."[6] Wagenschein und Feynman sprechen im Anschluss an Newton einmütig davon, dass der Stein nicht *auf* die Erde, sondern *um* die Erde falle.[7]

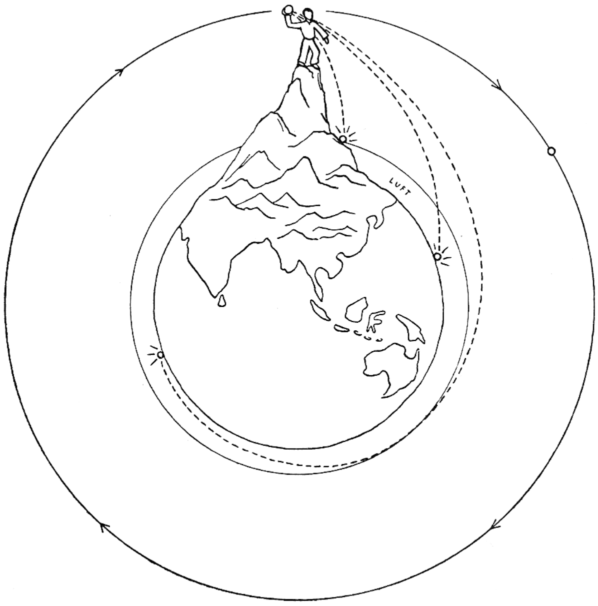


Abbildung 3
(Wagenschein, M.: Natur physikalisch gesehen. Frankfurt u.a.: Diesterweg, S. 52)

So zeigt Newton, „wie aus dem uns allen vertrauten Werfen das unbegreiflich scheinende Kreisen werden kann."[8] Monde, (Exo-)Planeten, Satelliten, Sonden u.ä. sind also Objekte, die in einer ganz bestimmten Entfernung und mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit um einen Zentralköper herum*fallen*.[9]
Dies ist der erste Schritt auf dem Weg zum Verständnis des hier zu behandelnden Problems.

2 Das Fallen von leichten und schweren Körpern

Im nächsten Schritt muss man das Fallen näher untersuchen, insbesondere im Hinblick auf die Frage, ob und gegebenenfalls wie schwere Gegenstände anders fallen als leichte. Dazu ist der Unterschied zwischen dem „Schwer-Sein" und dem „Träge-Sein" in den Blick zu nehmen.

---

[5] Wagenschein, M. (1960): Der Mond und seine Bewegung. In: Wagenschein, M.: Natur physikalisch gesehen. Frankfurt u.a.: Diesterweg, S. 51.
[6] Feynman, R. (2003): Sechs physikalische Fingerübungen. München: Piper, S. 153.
[7] Newton, und in seiner Nachfolge auch Wagenschein und Feynman, zeigen noch, dass die Abweichung des um die Erde fallenden Mondes von der geraden Bahn gerade zur Stärke der irdischen und sich quadratisch in den Raum ausbreitenden Schwerkraft passt. Das ist historisch und physikalisch zwar höchst relevant, für die didaktischen Überlegungen an dieser Stelle aber ohne Bedeutung.
[8] Wagenschein, M. (1960): Der Mond und seine Bewegung. In: Wagenschein, M.: Natur physikalisch gesehen. Frankfurt u.a.: Diesterweg, S. 51.
[9] Auf der folgenden Internetseite kann man das Werfen mit variablen Anfangsbedingungen ausprobieren und die entsprechenden Folgen sehr schön beobachten: www.abi-physik.de/buch/astronomie/satellitenbahnen/

a) Experimentelle Untersuchung

Es ist ein Leichtes, SuS im Real- oder Gedankenexperiment erfahren zu lassen, dass sich die gleiche Kraft auf Gegenstände kleiner Masse erheblich mehr hinsichtlich Geschwindigkeitszunahme auswirkt als auf Gegenstände großer Masse. Mit aller zur Verfügung stehenden Kraft einen PKW (z.B. zwecks Starthilfe) anzuschieben hat nicht die gleiche Wirkung wie das Anschieben der Freundin auf dem Fahrrad. Wir können es also spüren: Gegenstände mit viel Masse verhalten sich erheblich träger als Gegenstände mit wenig Masse. Ebenfalls spürbar ist die alltägliche Erfahrung, dass Gegenstände mit viel Masse schwerer sind als Gegenstände mit wenig Masse. Hängt man Objekte an die Federwaage, ist das sogar leicht quantifizierbar.

Was bedeutet das nun für den Vorgang des Fallens? Gegenstände mit viel Masse werden zwar stärker von der Erde angezogen, zeigen aber weniger Effekt hinsichtlich des Schnellerwerdens beim freien Fallen. Die Frage ist: Welche Eigenschaft überwiegt nun – die Trägheit oder die Schwere?

In der Oberstufe könnte man an dieser Stelle in einem unkomplizierten Experiment mit der Luftkissenfahrbahn zeigen, dass die Verdopplung der beschleunigenden Kraftwirkung durch das Gravitationsfeld (auf die schwere Masse) bei gleichzeitiger Verdopplung der zu beschleunigenden (trägen) Masse zu einer identischen Bewegung führt. Aufwändige Lichtschrankenaufbauten sind unnötig; es reicht aus, die Gesamtfahrzeit des Schlittens zu messen. Und die ist in beiden Fällen gleich.

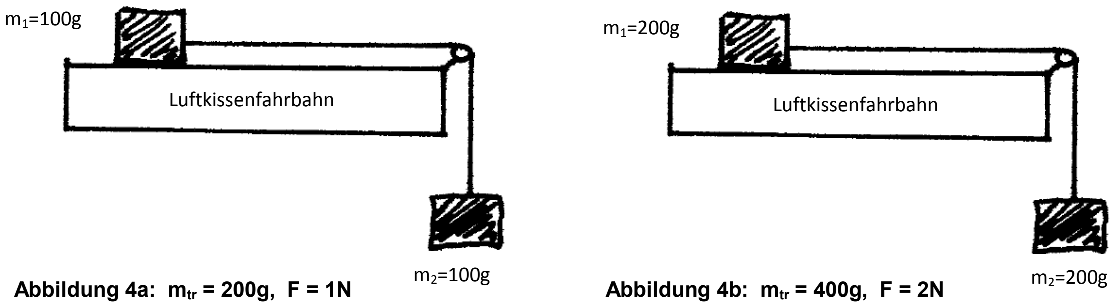


Abbildung 4a: m_{tr} = 200g, F = 1N

Abbildung 4b: m_{tr} = 400g, F = 2N

Abbildung 5: Evakuierbare Fallröhre.

In der Unter- und Mittelstufe bietet sich das evakuierbare Fallrohr (mit Geldstück und Feder im Inneren) an, das zunächst – noch luftgefüllt – unsere Erfahrung stützt, dass Gegenstände durchaus unterschiedlich schnell fallen, nach Abpumpen der Luft aber zeigt, dass sich die beiden gegenläufigen Effekte (a) „je massebehafteter, desto träger“ und (b) „je massebehafteter, desto schwerer“ gerade gegenseitig kompensieren.[10] Doppelt so träge Gegenstände werden auch gerade doppelt so stark von der Erde angezogen. Und so fallen sie alle gleich, „sozusagen ohne Ansehen der Person.“[11] Permanent werden alle Gegenstände im freien Fall schneller (ältere SuS können das als linearen Anstieg der Fallgeschwindigkeit mit der Zeit quantifizieren), aber alle im gleichen Maße. Sie fallen – gleichzeitig losgelassen – permanent nebeneinander her. Zeit-Weg- und Zeit-Geschwindigkeitsgesetze sind an dieser Stelle nicht nötig.

---

[10] Quellennachweis für Abb. 5:
http://www.weltderphysik.de/media/?tx_wdpmedia_pi2%5Bimage%5D=4239&tx_wdpmedia_pi2%5Baction%5D=image&tx_wdpmedia_pi2%5Bcontroller%5D=Gallery&cHash=5e28c74c928637cb8090013b56e81d83

[11] Wagenschein, M. (1960): Der Mond und seine Bewegung. In: Wagenschein, M.: Natur physikalisch gesehen. Frankfurt u.a.: Diesterweg, S. 53.

b) Gedankenexperiment von Galilei

Als eine sehr spannende ergänzende oder auch alternative Möglichkeit auf dem Wege zum Verstehen schlage ich die Lektüre eines Textes von Galilei vor. In dem dialogisch angelegten Werk „Discorsi" vertritt Simplicio am ersten Tag der Debatte die aristotelische und für uns alle intuitiv naheliegende Idee, jedem Körper käme beim Fallen eine von Natur aus bestimmte, sich aus seinen individuellen Eigenschaften ergebende Geschwindigkeit zu (der Feder eine andere als z.B. der Eisenkugel), „die nur in einem neuen Antrieb vermehrt oder durch ein Hemmnis vermindert werden kann."[12] Wir erfahren täglich die Wirkung des Luftwiderstandes, die diese Position stützt, die aber einem Verständnis der sich dahinter verbergenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten im Wege steht. Im Galileischen Dialog nimmt die Person des Salvati die falsche Annahme des Simplicio (der unsere intuitive Ansicht vertritt und übrigens nicht umsonst diesen Namen trägt), ernst und zeigt, dass sie in einem relativ leicht nachvollziehbaren Gedankenexperiment zu Widersprüchen führt. Der tiefsinnige Text regt dazu an, wirklich physikalisch zu denken und zu argumentieren und nicht nur Sachverhalte zur Kenntnis zu nehmen. Womöglich kann er als Einstieg und Anlass für ein sokratisches Gespräch dienen.

So haben wir also im zweiten Schritt verstanden, dass die Gegenstände dieser Welt im freien Fall ihre Individualität verlieren, dass sie im Fallen alle gleich sind, also auch ihre Größe und Masse keine Rolle spielen!

3 „Reines Fallen" und „geworfenes Fallen"

Es deutet sich durch die ersten beiden Schritte des hier vorgeschlagenen didaktischen Weges an, dass alle Trabanten, unabhängig von ihrer Masse, bei gleichem Abstand auch in der gleichen Zeit um den Zentralkörper herum fallen. Einleuchtend, dass man dann aus r und T nicht auf die Masse m schließen kann. Q.e.d.

Ein begrüßenswerter (weil das Verständnis erneut fördernder) Einwand seitens der SuS wäre aber noch zu klären: Zwar haben wir das reine Fallen untersucht, bei Newtons Gedankenexperiment werden die Gegenstände aber doch horizontal abgeworfen und fallen gar nicht einfach frei nach unten. Man müsste also noch das gänzlich freie Fallen mit dem Fallen während des Geworfenseins vergleichen. Das gelingt in der Tat experimentell und zwar am leichtesten mit einer von Sprockhoff vorgeschlagenen Methode, bei der man lediglich ein Brettchen mit zwei Nägeln, zwei Kugeln, ein Stückchen Pappe und einen Hammer benötigt: „Man schlägt zwei Nägel seitlich in ein Brettchen und klemmt es mit einer Kreuzmuffe an einem Stativ fest. Über die Nägel legt man einen Pappstreifen von etwa 3cm x 8cm und auf diesen die beiden Kugeln. Führt man nun in waaggerechter Richtung einen Schlag mit einem leichten Hammer gegen die Kugel A, so beschreibt sie die Bahn eines waagerecht geworfenen Körpers, während die Kugel B lotrecht herunterfällt."[13]

Das Ergebnis ist für die meisten SuS überraschend: Die beiden Kugeln treffen unabhängig von der Stärke des Hammerschlages und der Falltiefe hörbar(!) gleichzeitig auf, obwohl doch die geworfene Kugel einen viel längeren Weg zurücklegen muss. Doch hat sie natürlich auch durch den Hammerschlag eine höhere Geschwindigkeit mitbekommen. Das gleicht sich offenbar gerade aus. „Die beiden Bewegungen verwirren also einander nicht, sie durchsetzen sich, als wüssten sie nichts voneinander. Das Fallen wird durch das Werfen (…) nicht gestört."[14] „Reiner Fall" und „geworfener Fall" unterscheiden sich also hinsichtlich des Fallens nicht!

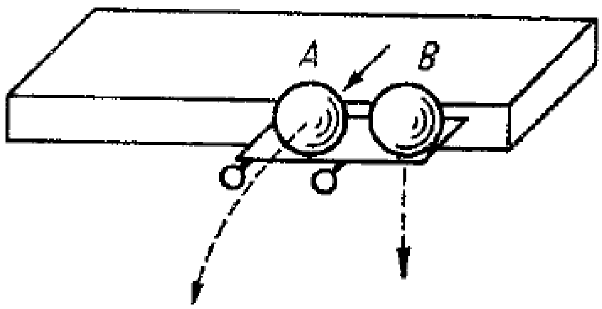


Abbildung 6
Abwurfvorrichtung zum Vergleich der Fallzeiten.
(aus: Sprockhoff (1980), S. 71)

[12] Galilei: Discorsi, 1. Tag (s. Anhang).
[13] Sprockhoff, G. (1980): Physikalische Schulversuche, Mechanik II; Dynamik fester Körper. Köln: Aulis, S. 71.
[14] Wagenschein, M. (1960): Das Fallgesetz im Brunnenstrahl. In: Wagenschein, M.: Natur physikalisch gesehen. Frankfurt u.a.: Diesterweg, S. 36.

4 Zusammenfassung

Es konnte gerade im dargestellten Dreischritt verstehbar gemacht werden, dass sich extrasolare Planeten – wie alle Trabanten – im freien Fall um ihr Zentralgestirn befinden. Ihre Masse spielt für die Fallbewegung keine Rolle; auch nicht die Tatsache, dass es sich dabei um ein „geworfenes Fallen“ handelt.
Durch Messung von Parametern dieses Kreisens (Umlaufzeit und Bahnradius) ist die Masse von Exoplaneten also nicht zu ermitteln.

III „Nebenprodukte“

1 Warum ISS-Astronauten schweben

Anlässlich der z.Zt. regelmäßigen Berichterstattung über den deutschen Astronauten auf der ISS (Alexander Gerst) hat der Verfasser jüngst etwa 70 Studierende des gymnasialen Lehramts an der Philipps-Universität Marburg die Frage schriftlich beantworten lassen, warum denn die Astronauten in der ISS eigentlich schweben. Unter den Studierenden befanden sich etwa 40 mit mindestens einem naturwissenschaftlichen Fach, davon drei Studierende mit dem Fach Physik. Ergebnis: Bis auf einen einzigen Studenten gaben alle die falsche Antwort. Praktisch geschlossen äußerten die Studierenden die Ansicht, jenseits der Luftschicht, mindestens aber in der Bahnhöhe der ISS, gäbe es keine Schwerkraft mehr. Auf Nachfrage stellte sich heraus, dass 60% der Studierenden mindestens noch ein Jahr das Fach Physik in der Oberstufe belegt hatten (mehrere sogar als Leistungskurs), also dem Gravitationsgesetz auch in seiner quantitativen Form begegnet waren; dies jedoch offenbar ohne wirkliches Verständnis des Sachverhaltes. Die Hartnäckigkeit, mit der sich dieses Misskonzept in intelligenten Köpfen hält, sollte uns Lehrer(innen) der Naturwissenschaften tatsächlich beunruhigen.
Die Ergebnisse des dargestellten Dreischrittes werfen nun die Antwort auf die Frage nach der merkwürdigen Schwerelosigkeit auf der ISS quasi als Nebenprodukt ab. Hat man nämlich verstanden, dass große/schwere und kleine/leichte Gegenstände im Fallen einander gleichen, sich also beim freien Fall nicht von der Seite weichen, versteht man auch, warum Gegenstände in der ISS genau an der Stelle bleiben, an der man sie loslässt (sie schweben im Raum), warum der Boden keinen Druck mehr ausübt, man also seine Schwere nicht mehr fühlt, ob-gleich sie doch weiterhin existiert! Die drei folgenden Abbildungen verdeutlichen dies:

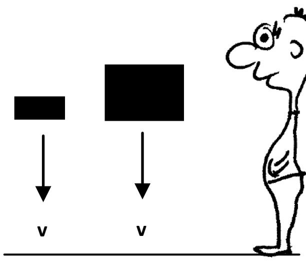


Abbildung 7a: Beobachter und frei fallende Gegenstände im irdischen Labor.

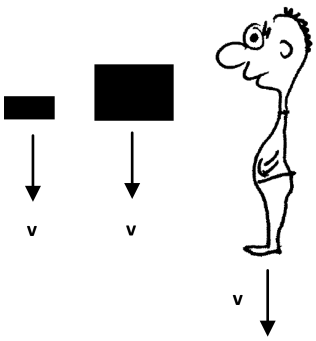


Abbildung 7b: Nun fällt der Beobachter ebenfalls frei.

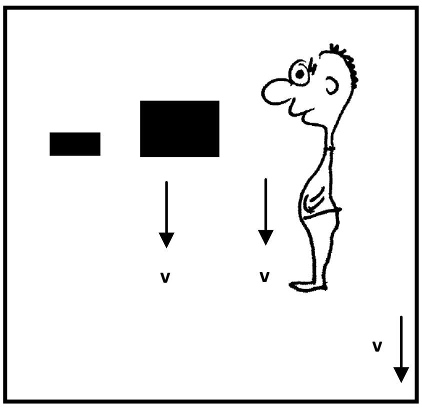


Abbildung 7c: Frei fallender Beobachter und frei fallende Gegenstände in einem frei fallenden Labor.

Auf der Erde beobachtet man, dass alle Gegenstände im gleichen Maße fallen (Abb. 7a). Daran ändert sich auch nichts, wenn der Beobachter ebenfalls fällt (Abb. 7b). Jetzt bleiben die beiden Gegenstände von Abb. 7a immer direkt vor ihm und werden gemeinsam und im gleichen Maße mit ihm schneller; der Beobachter, der von seinem eigenen freien Fall nichts spürt, beobachtet ein Schweben der beiden Gegenstände (Abb. 7b). Baut man nun noch um die drei fallenden Objekte eine „Kiste“, die ebenfalls

frei fällt (nennen wir sie ISS), fallen Gegenstände, Beobachter und Kiste gemeinsam und im gleichen Maße schneller werdend, Richtung Erdmittelpunkt (Abb. 7c). An diesem Fallen, so hatten wir gesehen, ändert sich durch eine horizontale Abwurfgeschwindigkeit nichts. Dann fallen einfach alle gemeinsam um die Erde herum. Da das Fallen „ohne Ansehen der Person" ist, ändert sich an der relativen Position der Objekte zueinander nichts, der Beobachter erlebt also eine Schwerelosigkeit, die eigentlich keine ist, denn in der ISS-Flughöhe von 400 km herrschen noch immer etwa 90% der Anziehungskraft verglichen mit der Erdoberfläche.[15]
Die ISS ist also ein von Menschenhand in einer Höhe von knapp 400km über dem Erdboden mit der passenden Horizontalgeschwindigkeit abgeworfenes Labor, das sich im freien Fall *um* die Erde befindet.

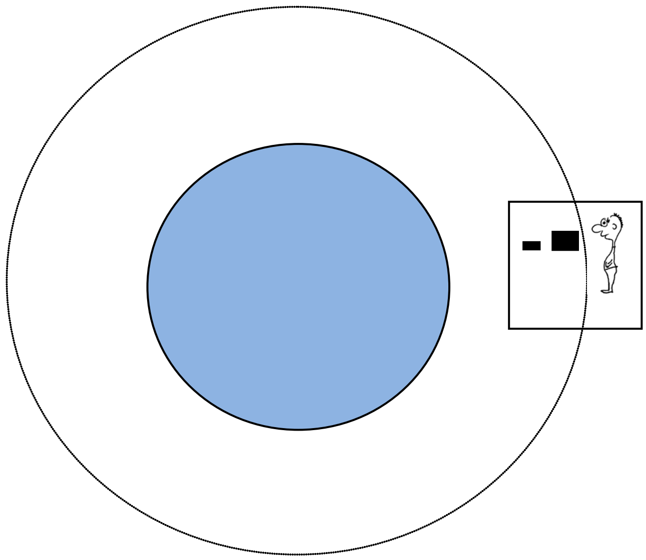


Abbildung 8: Um die Erde fallende Raumstation.

So kann man also auch ohne das Fachvokabular der Oberstufenphysik verstehen, warum in der ISS Schwerelosigkeit herrscht – ein sehr lohnendes Nebenprodukt des dargestellten Dreischritts.[16]

2 Vom „Schweben" bei Parabelflügen

Und noch etwas wirft der Dreischritt ab: An der „Schwerelosigkeit" ändert sich noch nicht einmal etwas, wenn man die „Kiste" nicht horizontal, sondern z.B. schräg abwirft. „Schießt" man eine Raumstation o.ä. schräg nach oben, befindet sie sich unmittelbar nach Beendigung der Beschleunigungsphase im freien Fall, obwohl sie sich dann zunächst sogar nach oben bewegt, sich also vom Erdboden entfernt. Und wir hatten ja gesehen, dass im freien Fall die Dinge „schwerelos" sind.
Diesen Effekt nutzt man bei sogenannten Parabelflügen aus[17], bei denen Flugzeuge während des Aufwärtsfluges die Düsen abschalten (wegen der Luftreibung muss allerdings ein kleiner Restschub bleiben) und sich auf einer Parabelbahn frei fallen lassen. Während der gesamten antriebslosen Flugphase herrscht im Flugzeug Schwerelosigkeit. Das ist insbesondere für die Phase der Aufwärtsbewegung intuitiv erstmal nicht einzusehen. Vor dem Hintergrund, dass es sich dabei aber im Grunde um ein „Sich-aufwärts-fallen-lassen" handelt und im Anschluss an den oben dargestellten Dreischritt, aber dann doch verstehbar.

---

[15] Im Übrigen würde ohne die Erdanziehungskraft weder das Kreisen der ISS noch das Kreisen unseres Mondes (das fast 1000-mal weiter entfern als das Kreisen der ISS stattfindet) funktionieren. Beide würden der Erde entfliehen und nicht um sie herum kreisen!

[16] In Abb. 8 sieht man zusätzlich noch, dass Raumstationen, die relativ zur Erdoberfläche ihre Lage beibehalten wollen, sich bei jeder Erdumdrehung auch ein Mal um sich selbst drehen müssen, also einen zusätzlichen Eigendrehimpuls benötigen.

[17] http://de.wikipedia.org/wiki/Parabelflug

IV Und so bestimmt man die Masse von Exoplaneten …

Die bereits erwähnten Methoden zur Bestimmung der Masse eines Planeten erfolgt über die Bahnbestimmung seiner Monde oder von Raumsonden im Vorbeiflug. Das kommt allerdings bei Exoplaneten nicht in Frage. Daher musste man alternative Methoden entwickeln.

1 Doppler-Spektroskopie

„Bisher ist die sogenannte Doppler-Spektroskopie die wichtigste Methode, um abzuschätzen, wie schwer ein Exoplanet ist: Die Methode nutzt aus, dass Planeten beim Umlauf ihr Zentralgestirn ins Schlingern bringen. Die Wellenlänge des vom Stern ausgesandten Lichts verändert sich dadurch periodisch, empfindliche Instrumente auf der Erde detektieren diese Veränderung und Forscher berechnen auf Basis der Daten eine Untergrenze für die Planetenmasse. Die Methode stößt jedoch an ihre Grenze, wenn damit Planeten mit geringer Masse vermessen werden sollen. Auch wenn ein Planet elliptische Bahnen um seinen Stern zieht, der Stern schwach leuchtet oder eine variable Helligkeit hat, ist die ‚Radialmethode' ungeeignet."[18]

2 „MassSpec"

„Astronomen haben eine neue Methode entwickelt, die Masse von Exoplaneten einzugrenzen. Julien de Wit und Sara Seager vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge nutzten aus, dass ferne Planeten manchmal von der Erde aus betrachtet ihren Mutterstern verdecken. Hat der Exoplanet eine Atmosphäre, filtert diese für kurze Zeit das Sternlicht. Aus dem Transit ließen sich vielerlei Informationen über den Planeten ziehen, schreiben die Autoren: Neben dem Radius und der chemischen Atmosphären-Zusammensetzung sind das auch die Dichte der Moleküle in der Atmosphäre, ihre Temperatur sowie die Höhe, in der sie für Strahlung einer bestimmten Wellenlänge transparent wird. Mit diesen Informationen ließe sich die Gesamtmasse des Exoplaneten eingrenzen, glauben de Wit und Seager.
(…)
Die neue Methode mit dem Namen "MassSpec" könnte die erprobte Doppler-Spektroskopie ergänzen, hoffen die Autoren: Sie eigne sich vor allem für Gasplaneten und Planeten mit einer dünnen Atmosphäre, während die Radialmethode für schwere Planeten im Orbit verhältnismäßig leichter Sterne prädestiniert ist.
Aus Sicht der Autoren steht die Exoplanetenforschung an der Schwelle zu einer neuen Phase der Erforschung fremder Welten: In den vergangenen zwei Jahrzehnten wollten Forscher vor allem herausfinden, wie häufig bestimmte Planeten im Orbit ferner Sterne sind. In den kommenden Jahrzehnten wird es hingegen darum gehen, einige interessante Exemplare genauer zu studieren. Die Masse sei hierbei ein grundlegender Parameter, so die Autoren – unter anderem weil von ihr abhänge, ob ein Planet aus Fels oder Gas besteht. Für den 2005 entdeckten Gasplaneten HD189733b in unmittelbarer Nähe eines sehr hellen Sterns konnten die Forscher ihre Methode bereits testen: Die Ergebnisse stimmten gut mit denen der Radialmethode überein.
Bei Felsplaneten werden de Wit und Seager ihre Methode jedoch erst mit zukünftigen Teleskopen testen können: Das für 2018 geplante James Webb Weltraumteleskop (JWST) könnte bei einigen Planeten im Orbit alter Roter Zwerge das Atmosphärenspektrum aufnehmen, aber nur, wenn diese in unmittelbarer Nachbarschaft der Sonne durchs All driften. Alte Rote Zwergsterne gelten als besonders geeignet für Atmosphärenstudien, schreiben die Autoren. Mit JWST ließe sich demnach die Masse erdgroßer Felsplaneten nur dann bestimmen, wenn sie von der Erde höchstens 160 Lichtjahre entfernt sind – und die ihren Roten Zwergstern für die Augen des JWST verdecken. Ob es solche Planeten gibt, soll ab 2017 der NASA-Satellit TESS herausfinden."[19]

---
[18] http://www.spektrum.de/news/ein-neuer-weg-zur-planetenmasse/1218609
[19] http://www.spektrum.de/news/ein-neuer-weg-zur-planetenmasse/1218609

3 Analyse von Pulsarstrahlung

„Das neue Messverfahren ist auf 0,03 Promille der Erdmasse oder ein Zehnmillionstel der Masse von Jupiter genau. Zum Team gehören Forscher aus Australien, Deutschland, den USA, Großbritannien und Kanada.
Eine gängige Methode zur Bestimmung der Massen eines Planeten erfolgt über die Bahnbestimmung seiner Monde oder von Raumsonden im Vorbeiflug. Masse erzeugt Schwerkraft und die Anziehungskraft des Planeten bestimmt wiederum die Bahn eines jeden Objekts, das sich um den Planeten bewegt, in Größe und Umlaufzeit. Die hier beschriebene neue Methode zur Bestimmung von Planetenmassen basiert auf den Korrekturen, die die Astronomen bei der Analyse der Signale von Pulsaren anbringen. Pulsare sind Sterne geringen Durchmessers mit sehr hoher Dichte, die sich extrem schnell um ihre eigene Achse drehen und dadurch periodische Signale mit hoher Zeitgenauigkeit aussenden. Die genaue Ableitung von Planetenmassen auf diese Weise könnte Daten liefern, die für künftige Raumfahrtmissionen von Bedeutung sind.
‚Dadurch konnten zum ersten Mal Planeten komplett gewogen werden - und zwar das jeweils gesamte System inklusive aller Monde und Ringe‘, sagt David Champion vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie, der Leiter des Forschungsteams. ‚Außerdem tragen wir mit einer unabhängigen Methode dazu bei, vorhandene Ergebnisse zu überprüfen, und unterstützen damit die Arbeit der Planetenforscher.‘
Die Erde umläuft die Sonne. Die Bewegung beeinflusst den genauen Zeitpunkt, an dem die Signale von Pulsaren auf der Erde eintreffen. Um diesen Effekt zu korrigieren, berechnen die Astronomen den Zeitpunkt, an dem die Pulse das Massenzentrum des Sonnensystems, das sogenannte Baryzentrum oder Rotationszentrum für alle Planeten, erreichen. Da die Stellung der Planeten zueinander sich mit der Zeit ändert, erfolgt auch eine Bewegung des Baryzentrums relativ zur Sonne.
Zur Bestimmung der genauen Position des Baryzentrums arbeiten die Astronomen mit Tabellen der Planetenpositionen am Himmel (den sogenannten Ephemeriden) sowie mit den bereits gemessenen Werten für die Massen der Planeten. Solange die Ergebnisse vom korrekten Wert abweichen und auch die Position des Baryzentrums nicht korrekt bestimmt ist, tritt ein reguläres sich wiederholendes Muster in den Zeitfehlern bei den Ankunftsdaten der Pulsarsignale auf. ‚Wir sehen zum Beispiel, wenn die Massenbestimmung für Jupiter und seine Monde falsch ist, ein Muster in den Zeitfehlern der Pulsarsignale, das sich über jeweils 12 Jahre wiederholt, das ist die Zeit eines Umlaufs vom Jupiter um die Sonne‘, sagt Dick Manchester vom australischen Forschungsinstitut CASS (CSIRO Astronomy and Space Science). ‚Sobald der Wert für die Jupitermasse korrigiert wird, verschwinden die zeitlichen Abweichungen.‘ Das ist genau der Rückkopplungsprozess, den die Astronomen zur Bestimmung der Planetenmassen genutzt haben.
(…)
Die neue Messmethode ist bis auf 200 Billiarden ($2 \cdot 10^{17}$) Tonnen genau - das sind gerade mal 0,03 Promille der Erdmasse oder ein Zehnmillionstel der Masse des Jupiters. Kurzfristig wird die Massenbestimmung mit Hilfe von Raumsonden die genauesten Resultate für einzelne Planeten liefern, aber die Pulsarmethode ist unverzichtbar für Planeten, die noch nicht von Raumsonden besucht worden sind sowie für die Bestimmung der kombinierten Massen von Planeten und ihren Monden. Die Wiederholung der Messungen ermöglicht eine nochmalige Verbesserung der Genauigkeit. Durch die Beobachtung von insgesamt 20 Pulsaren über einen Zeitraum von sieben Jahren könnte man die Jupitermasse genauer bestimmen als mit jeder Raumsonde. Das gleiche für Saturn würde 13 Jahre Beobachtungszeit erfordern.
‚Wir Astronomen benötigen diese extrem genauen Zeitreihenmessungen von Pulsaren für die Jagd nach Gravitationswellen, wie sie von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt werden‘, stellt Michael Kramer fest, der Leiter der Forschungsgruppe *Radioastronomische Fundamentalphysik* am Max-Planck-Institut für Radioastronomie. ‚Das Aufspüren dieser Wellen hängt vom Nachweis winziger Änderungen im zeitlichen Eintreffen der Pulsar-Signale ab. Dazu müssen wir alle potentiellen Fehlerquellen ausschalten, inklusive der Spuren von Planeten unseres Sonnensystems.‘ “[20]

[20] http://www.raumfahrer.net/news/astronomie/24082010151010.shtml

V Anhang: Textausschnitt Galileo „Discorsi“ (Tag 1)

Galileio Galilei (1564 – 1642)
aus „Discorsi“ (1. Tag)

Simplicio
Man sieht aus Ihrer Darstellung, dass Ihr darüber experimentiert habt; denn sonst würdet Ihr nicht vom *Nachprüfen* reden.

Sagredo
Aber ich, Herr Simplicio, der ich keinen Versuch angestellt habe, versichere Euch, dass eine Kanonenkugel von 100, 200 und mehr Pfund um keine Spanne vor einer Flintenkugel von einem halben Pfund Gewicht die Erde erreichen wird, wenn beide aus 200 Ellen Höhe herabkommen.

Salvati
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, wenn beide aus gleichem Stoff bestehen, und überhaupt alle jene Körper, von denen Aristoteles spricht. Denn sagt mir, Herr Simplicio, gebt Ihr zu, dass jeder fallende Körper eine ihm von Natur zukommende Geschwindigkeit habe, so dass, wenn diese vermehrt oder vermindert werden soll, eine Kraft angewandt werden muss oder ein Hemmnis.

Simplicio
Unzweifelhaft hat ein Körper in einem gewissen Mittel eine von Natur bestimmte Geschwindigkeit, die nur mit einem neuen Antrieb vermehrt oder durch ein Hemmnis vermindert werden kann.

Salvati
Wenn wir zwei Körper haben, deren natürliche Geschwindigkeit verschieden sei, so ist es klar, dass, wenn wir den langsameren mit dem geschwinderen vereinigen, dieser letztere von jenem verzögert werden müsste, und jener, der langsamere, müsste vom schnelleren beschleunigt werden. Seid Ihr hierin mit mir einverstanden?

Simplicio
Mir scheint die Schlussfolgerung völlig richtig.

Salvati
Aber wenn dieses richtig ist, und wenn es wahr wäre, dass ein großer Stein sich z. B. mit acht Maß Geschwindigkeit bewegt und ein kleinerer mit vier Maß, so würden beide vereinigt eine Geschwindigkeit von weniger als acht Maß haben müssen. Aber die beiden Steine zusammen sind doch größer als jener größere Stein war, der acht Maß Geschwindigkeit hatte. Mithin würde sich nun der größere langsamer bewegen als der kleinere, was gegen Eure Voraussetzung wäre. Ihr seht also, wie aus der Annahme, ein größerer Körper habe eine größere Geschwindigkeit als ein kleinerer Körper, ich Euch weiter folgern lassen konnte, dass ein größerer Körper sich langsamer bewege als ein kleinerer.

Simplicio
Ich bin ganz verwirrt; denn mir will es nun scheinen, als ob der kleine Stein, dem größeren zugefügt, dessen Gewicht und daher durchaus auch dessen Geschwindigkeit vermehre oder jedenfalls, als ob letztere nicht vermindert werden müsste.

Salvati
Hier begeht Ihr einen neuen Fehler, Herr Simplicio, denn es ist nicht richtig, dass der kleine Stein das Gewicht des größeren vermehre.

Simplicio
So? Das überschreitet meinen Horizont.

Salvati
Keineswegs, sobald ich Euch von dem Irrtum, in dem Ihr Euch bewegt, befreit haben werde: und merket wohl, dass man hier unterscheiden muss, ob ein Körper sich bereits bewegt oder ob er in Ruhe ist. Wenn wir einen Stein auf eine Waagschale tun, so wird das Gewicht durch Hinzufügen eines zweiten Steines vermehrt, ja selbst die Zulage eines Stückes Werg wird das Gewicht um die 6 bis 8 Unzen anwachsen lassen, die das Wergstück hat. Wenn Ihr aber den Stein mitsamt dem Werg von großer Höhe frei herabfallen lasst, glaubt Ihr, dass während der Bewegung das Werg den Stein drückt und dessen Bewegung beschleunigt? Oder glaubt Ihr, dass der Stein aufgehalten wird, indem das Wergstück ihn trägt? Fühlen wir nicht die Last auf unseren Schultern, wenn wir uns gegen die Bewegung derselben stemmen wollen; wenn wir uns aber mit derselben Geschwindigkeit bewegen wie die Last auf unserem Rücken, wie soll uns dann diese drücken und beschweren? Seht Ihr nicht, dass das ähnlich wäre, als wenn wir den mit der Lanze treffen wollen, der mit derselben Geschwindigkeit vor uns herflieht? Zieht also den Schluss, dass beim freien Fall ein kleiner Stein den großen nicht drückt und sein Gewicht nicht - so wie in der Ruhe - vermehrt.

Simplicio
Aber wenn der größere Stein auf dem kleineren ruht?

Salvati
So würde er das Gewicht vermehren müssen, wenn seine Geschwindigkeit überwöge; aber wir fanden schon, dass, wenn die kleinere Last langsamer fiele, sie die Geschwindigkeit des großen vermindern müsste und sich mithin die zusammengesetzte Menge weniger rasch bewegte als ein Teil, was gegen Eure Annahme spricht. Lasst uns also feststellen, dass große und kleine Körper sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegen.