

Höttecke, D.; Launus, A., Henke, A.; & Riess, F. (2010).

Was ist Bewegung?

[Moving Bodies: Lessons from Aristotle to Galilei about aspects of the nature of science].

Case study developed within the European project HIPST (History and Philosophy in Science Teaching),

<https://www.ew.uni-hamburg.de/einrichtungen/ew5/didaktik-physik/projekte/projekte-abgeschlossen/hipst/casestudies/01-d-gilbert>

Navigation durch die Fallstudie



| | |
|-------|---|
| 1 | <u>Titel der Fallstudie</u> |
| 2 | <u>Autoren und Institutionen</u> |
| 3 | <u>Kurzfassung der Fallstudie</u> |
| 4 | <u>Beschreibung der Fallstudie</u> |
| 5 | <u>Historischer und philosophischer Hintergrund einschließlich Lehr-Lern-Aspekten</u> |
| 5.1 | <u>Aristoteles: Leben - Wirken - Denken</u> |
| 5.1.1 | <i>Kurze Biografie des Aristoteles</i> |
| 5.1.2 | <i>Aristotelisches Denken</i> |
| 5.2 | <u>Galilei Galileo: Leben - Wirken - Denken</u> |
| 5.2.1 | <i>Kurzbiografie Galileis</i> |
| 5.2.2 | <i>Galileies Bild von Naturwissenschaft</i> |
| 5.3 | <u>Lehr-Lern-Aspekte über die Natur der Naturwissenschaften</u> |
| 5.3.1 | <i>Naturwissenschaftliche Kontroversen</i> |
| 5.3.2 | <i>Die Rolle von Gedankenexperimenten und Idealisierungen</i> |
| 5.3.3 | <i>Die Rolle der Mathematik bei der Deutung der Natur</i> |
| 5.3.4 | <i>Technische Innovationen können Wissenschaft voranbringen</i> |
| 6 | <u>Zielgruppe, curriculare Relevanz und didaktischer Ertrag</u> |
| 6.1 | Lernvoraussetzung |
| 6.2 | Kompetenzen |
| 7 | <u>Aufgaben, Methoden und Medien für den Unterricht</u> |
| 7.1 | Schüler/innen entwickeln ihr eigene Klassifikation von Bewegungen |
| 7.2 | Erarbeitung einer Klassifikation von Bewegungen nach Aristoteles |
| 7.3 | Konfrontation der Sichtweisen des Aristoteles und des Galilei auf das Problem der Bewegung |

| | |
|-----|--|
| 7.4 | Bewegungen untersuchen – ein Egg-Race |
| 7.5 | Von der Optimierung zur Idealisierung |
| 7.6 | Der Freie Fall |
| 7.7 | Das Fallgesetz als Zahlenreihe experimentell erkunden |
| 7.8 | Astronomische Beobachtungen und die Einheit der Physik |
| 8 | <u>Lernschwierigkeiten</u> |
| 8.1 | Präkonzepte zur Trägheit |
| 8.2 | Die "Reflection Corner" - eine Methode zur expliziten Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften |
| 9 | <u>Pädagogisch-didaktische Fähigkeiten</u> |
| 9.1 | Umgang mit Ergebnisoffenheit |
| 9.2 | Gestaltung der expliziten Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften |
| 9.3 | Philosophieren mit Kindern |
| 9.4 | Umgang mit Szenischen Dialogen |
| 10 | <u>Erprobung und Evaluation der Fallstudie</u> |
| 11 | <u>Verwendete und weiterführende Literatur</u> |
| 12 | <u>Lehr-Lern-Materialien</u> |

Was ist Bewegung?

Mechanik, Bewegungslehre, Trägheit, Idealisierung, Mathematisierung der Physik

2 Autoren und Institutionen

Dietmar Höttecke, University of Hamburg / Germany

Anna Launus, University of Oldenburg / Germany

Andreas Henke, University of Bremen / Germany

Falk Rieß, University of Oldenburg / Germany

3 Kurzfassung der Fallstudie

In der Unterrichtseinheit “Was ist Bewegung?” werden zwei gegensätzliche naturwissenschaftliche Sichtweisen auf das Wesen und die Ordnung von Bewegungen von Körpern in der Natur kontrastiert. Auf der einen Seite wird das antike Aristotelische Weltbild erarbeitet. Es stellt Kategorien und Ansichten bereit, die den Schülervorstellungen über Verlauf und Ursache von Bewegungen nahe kommen. Der Aristotelische und teleologische Betrachtungsweise wird die idealisierte und abstrahierte und neuzeitliche Weltsicht Galileis gegenüber gestellt. Er verkörpert die Perspektive moderner Physik. Der Natur wird unterstellt, sie werde von einheitlichen Gesetzmäßigkeiten bestimmt, die mit den Mitteln der Idealisierung und Abstraktion erkannt werden können. Die Mathematik spielt dabei als Sprache der Natur eine besondere Rolle. Im Unterricht werden beide Weltsichten einander gegenübergestellt. Es soll erfahrbar werden, dass die antike Weltsicht den eigenen vorwissenschaftlichen Vorstellungen durchaus nahe kommt und für lebensweltliche Beschreibungen nützlich ist. Zugleich soll die Leistungsfähigkeit von Idealisierung, Abstraktion und Mathematisierung für die Physik erfahrbar werden. Diese Leistungsfähigkeit geht aber mit einem Verlust an Anschaulichkeit und unmittelbarem Erfahrungsbezug einher. Zentrales fachliches Lernziel ist die Entwicklung des Trägheitskonzept als zentralem Konzept der Mechanik. Daneben werden am Rande im Zusammenhang mit der Entwicklung des Teleskops Aspekte der astronomischen Forschung behandelt, wobei auf die Bedeutung der Entwicklung von neuen Technologien und dabei vertiefend auf die gegenseitige Wechselbeziehung zwischen Naturwissenschaft und Technik eingegangen wird.

4 Beschreibung der Fallstudie

Die Fallstudie ist unterrichtsmethodisch flexibel und modular angelegt. Die einzelnen Teile der Fallstudie können entweder im Klassenverband oder auch in arbeitsteiliger Gruppenarbeit bearbeitet werden.



Im Rahmen der Fallstudie werden zwei physikalische Konzepte erarbeitet und kontrastiert, mit denen mechanische Bewegungen beschrieben, klassifiziert und gedeutet werden. Die Fallstudie zeigt wie die antike Aristotelische Mechanik ein Klassifikationssystem von Bewegungen von Körpern auf der Erde und im Kosmos entwirft. Teile dieses Systems sind lebensweltlichen Deutungen von Bewegungen sehr nahe. Die neuzeitliche Galileische Perspektive beschreibt Bewegungen dagegen bewusst idealisiert und sieht von lebensweltlichen Erfahrungen ab. Ein wichtiger methodischer Leitfaden der Fallstudie besteht in fiktiven szenischen Dialogen zwischen Aristoteles und Galilei. Daneben werden Aufgaben, Experimente und weitere Lernaktivitäten beschrieben. In der gesamten Fallstudie spielt die *Reflection Corne* als Methode der expliziten Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften eine wesentliche Rolle.

Reihe vorgelegter Bilder von Bewegungen ein **kriteriengeleitetes Klassifizierungssystem selbst entwickeln**. Anschließend werden sie mit den Hauptcharakteren Galilei und Aristoteles vertraut gemacht. Ihr eigenes Klassifizierungssystem dient dann als Bezugspunkt der Einordnung der verschiedenen physikalischen Klassifizierungen. Sicherlich werden einige Schüler Klassifizierungssysteme entwickeln, die dem antiken Aristotelischen ähnlich sind. Damit kann die Aristotelische Sichtweise als durchaus sinnvoll und authentisch erlebt werden, um sie im Fortgang des Unterrichts umso besser von der idealisierten Galileischen Sichtweise abzugrenzen.

Dem folgenden Unterricht können verschiedene **szenische Dialogtexte zwischen Aristoteles und Galilei** zugrunde gelegt werden, die die konträren Sichtweisen der

beiden Protagonisten herausstellen und anhand derer die Schüler unterschiedliche wissenschaftliche Arbeitsweisen herausarbeiten können. Durch den Vergleich der unterschiedlichen Ansichten sollen die SuS dazu angeleitet werden, ihre eigenen Vorstellungen kritisch zu reflektieren und begründet hin zu modernen Sichtweisen weiterzuentwickeln.

Die Idee der Idealisierung nach Galilei wird im Kontrast zu Aristotelischen Sichtweise herausgearbeitet. Als Hinführung zur Galileischen Trägheitsidee wird ein **Kugelweitrollwettbewerb** (Egg-Race) durchgeführt. Die SuS sollen ein Stück Knete eine schiefe Ebene aus vorgegebener Höhe hinunterrollen lassen. Als Baumaterial bietet sich z.B. ein großes Stück Tonpapier an, das auf verschiedene Weisen zu einer schiefen Ebene gestaltet werden kann. Das Knetestück soll möglich weit ausrollen. Um das zu schaffen, können die SuS die Versuchsbedingungen schrittweise optimieren. Dieser Optimierungsprozess wird anschließend reflektiert. Ein weitere szenischer Dialogtext zeigt, dass die Optimierung konsequent weitergedacht in einen **Idealisierungsprozess** übergeht, in dem Bedingungen unterstellt werden, die tatsächlich so nicht vorfindbar sein können (Reibungsfreiheit etc.). Abermals erfolgt eine Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften mit der Reflection Corner, hier v.a. auf den Aspekt der Idealisierung. Es bietet sich in diesem Kontext an, die Funktion von **Gedankenexperimenten** in der Physik zu thematisieren.

Die Fallstudie umfasst weiterhin die Frage, inwiefern **Mathematik als Sprache der Natur** zu verstehen sei. Diese Ansicht vertrat Galilei explizit, indem er die Bewegung von Körpern studierte, die der Schwerkraft überlassen werden (freier Fall). Um die Bewegung zu verlangsamen und messbar zu gestalten, hat er Messungen an der schiefen Ebene durchgeführt und ein Fallgesetz entwickelt. Für diese Fallstudie wird auf eine mathematische Beschreibung des Fallgesetzes, wie sie in Schulbüchern üblich ist, verzichtet. Allerdings sollen die Schüler im Rahmen eigener **Experimente mit der schiefen Ebene** erfahren, dass die Weg-Zuwächse einer hinabrollenden Kugel in jeweils gleichen Zeitabschnitten sich wie eine ungerade Zahlenreihe verhalten (1-3-5-7-9-...). Diese Darstellung des Fallgesetzes ist mit dem bekannten Zusammenhang aus Wegen und Quadraten der Zeit äquivalent. Allerdings wird die Frage nach der Mathematisierung von Naturprozessen auf suggestive Weise aufgeworfen: Kann die Natur zählen?

Im Rahmen der Aristotelischen Mechanik werden Bewegungen im Himmel und auf der Erde qualitativ unterschieden. Diese Unterscheidung wird von Galilei aber aufgegeben. Aus diesem Zusammenhang gewinnen die astronomischen Forschungen Galileis ihren Sinn. Galilei zeigte mit zahlreichen **Fernrohrbeobachtungen**, dass Himmelsobjekte keineswegs die Idealgestalten waren, die man dem Himmel mit seiner nicht-irdischen Physik zugewiesen hatte. Insofern sind z.B. Mondbeobachtungen an die Frage gekoppelt, wie Bewegungen in der Natur generell zu klassifizieren und zu interpretieren seien. Auch hier werden wieder

szenische Dialogtexte eingesetzt. Die Schüler können zusätzlich Himmelsobjekte beobachten und mit den Galileischen Beobachtungsdaten vergleichen.

5 Historischer und philosophischer Hintergrund einschließlich Lehr-Lern-Aspekten

5.1 Aristoteles: Leben - Wirken - Denken

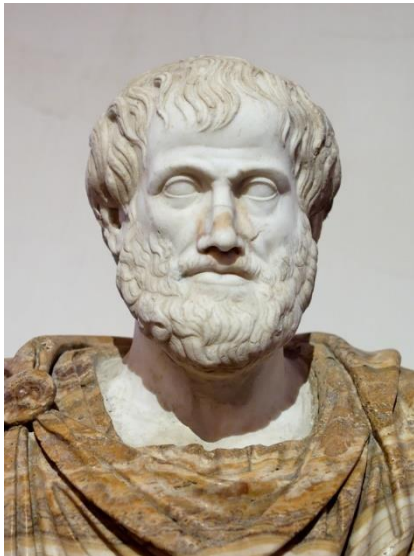
5.2 Galileo Galilei: Leben - Wirken - Denken

5.3 Lehr-Lern-Aspekte über die Natur der Naturwissenschaften

5.1 Aristoteles: Leben - Wirken - Denken

Aristoteles beschäftigte sich zu Lebzeiten intensiv mit den Phänomenen der Bewegung. Durch Beobachten und Nachdenken versuchte er die Bewegungen unter der Frage, was ihr Ziel sei, zu ergründen. Ein kurzer Szenischer Dialog kann zur Einführung genutzt werden [s. [Material 2](#)].

5.1.1 Kurze Biografie des Aristoteles



Aristoteles (384-322 v.u.Z.) wurde in der mazedonischen Stadt Stageira geboren. Er zählt bis heute zu den bekanntesten und einflussreichsten Philosophen. Im Alter von 17 Jahren trat er bereits ein umfangreiches väterliches Erbe an, was ihm Einkünfte und ein Leben frei von Erwerbsarbeit sicherte. Dort wurde er Schüler des Philosophen Platon in Athen. An Platons Akademie verbrachte er 20 Jahre, die ihn stark beeinflussten und an denen er sich an seinem Lehrer abarbeitete. Erst nach dem Tode Platons (347 v.u.Z.) verließ er Athen und wurde Erzieher des damals erst vierzehnjährigen Alexanders (des Großen), dem makedonischen Thronfolger. Wenige Jahre später (332 v.u.Z.) gründete er in Athen ein für seine Zeit ungewöhnlich großes Zentrum für Wissenschaft und Forschung. Dort befasst er sich mit den unterschiedlichsten Gebieten des antiken Wissens, der Philosophie und ihrer Geschichte, aber auch mit den Naturwissenschaften, der Medizin, der Geschichte, Politik, Ökonomie und Philologie. Die Schüler und Anhänger des Aristoteles wurden damals und bis in die frühe Neuzeit hinein Peripatetiker genannt. Der Philosoph besaß eine große Bibliothek und umfassende Sammlungen von Tieren und Gewächsen, die ihm Alexander von seinen Feldzügen hatte schicken lassen.

5.1.2 Aristotelisches Denken

Die religiöse/philosophische Weltanschauung seiner Zeit beeinflusste Aristoteles' Denken und somit auch seine physikalischen Überlegungen sehr: Mensch und Erde waren nach Auffassung Aristoteles unperfekt und dem perfekten Himmel untergeordnet. Sie müssten in allen Bereichen von ihm verschieden sein, denn auf der Erde könnte es nichts geben, was der absoluten Perfektion des Himmels gleich käme. Der Himmel sollte zudem aus einem eigenen, perfekten Element bestehen, der „Quintessenz“. Alles Irdische wäre zusammengesetzt aus den vier Elementen Luft, Feuer, Wasser, Erde. Das Streben nach Ruhe war für Aristoteles das letzte und natürlichste Prinzip. Alles in der irdischen Natur wäre letztlich auf diesen Zweck hin ausgerichtet. Demnach könnte jede Bewegung danach geordnet werden, ob sie diesen Zweck erfüllt oder nicht. Aus diesem Ansatz resultierte auch Aristoteles Trennung in die unterschiedlichen Bewegungstypen (s.o.). Die Bedeutung des Begriffs Bewegung ist für Aristoteles weiter gefasst als für uns heute, denn er versteht darunter jede Art von Veränderung.

Aristoteles schlug die Idee eines *unbewegten Bewegers* als Ursache dafür vor, dass es überhaupt Bewegung gebe. Bewegung kann weitere Bewegung verursachen, aber wenn alles zur Ruhe strebt, muss es einen Anfang und Ursprung der Bewegung geben. Diese Idee inspirierte Thomas von Aquin im Mittelalter zu einem Gottesbeweis. Die Idee beeinflusste nachhaltig das Bild des christlichen Gottes im Mittelalter und danach. Seit der Mitte des 13. Jahrhunderts war aristotelische Philosophie Pflichtprogramm an den Universitäten. Seine Hauptwerke lagen in der zeitgenössischen Wissenschaftssprache Latein vor. Aristoteles galt noch bis zum Ende des Mittelalters als unumstrittene Autorität.

Nach Aristoteles musste naturphilosophisches Wissen erklären, warum Dinge passieren ohne *Ausnahmen* zuzulassen. Dieser Ansatz setzt voraus, z.B. bei physikalischen Phänomenen genau das Merkmal ausfindig machen zu können, was allen gemeinsam ist und ohne das selbige Phänomene nicht auftreten können. Aristoteles nahm die eigenen Beobachtungen der Welt, die auf eine ganz bestimmte Weise analysiert wurden, als Grundlage für naturwissenschaftliches Wissen.

Aristoteles führte selbst kaum geplante Experimente durch und hielt sie auch nicht für nötig. Das ist nicht verwunderlich, da die experimentelle Methode erst in der Neuzeit etabliert hat und mit den Namen Bacon, Galilei oder Newton verknüpft ist. Aristoteles ging vielmehr davon aus, dass sich alles, was sich über die Natur wissen lässt, von ihr selbst *abschauen* ließe, wenn sie sich natürlich verhält. Aufgabe eines Naturphilosophen war demzufolge das Beobachten von Naturvorgängen und das Aufstellen von Gesetzen. Aristoteles ging davon aus, dass durch eine geeignete Ordnung und Analyse der Beobachtungen Gesetze aufgestellt werden können.

In seinem dritten Buch der Physik gab Aristoteles seine Kategorien noch etwas feiner aufgeschlüsselt an. Nach diesen Kategorien sollte sich alle Bewegung (oder allgemeiner: *Veränderung*) in der Welt fassen lassen. Jede Wissenschaft, die physikalisch genannt werden will, müsste sich mit diesen Kategorien befassen und

nach ihnen die Beobachtungen in der Welt ordnen. Bewegtes und Bewegendes werden unterschieden.

| | |
|-------------------------------------|--|
| Kategorie: Substanz / "WAS?" | Entstehen und Vergehen werden unterschieden |
| Kategorie Quantität / "WIEVIEL?" | Mengen / Anwachsen und Verringern werden unterschieden |
| Kategorie Qualität / "WIE?" | Farben und andere Eigenschaften werden unterschieden |
| Kategorie Ort / "WO?" | Positionen und Lagebeziehungen werden unterschieden |

Nach Aristoteles gab es keinen Nutzen in der mathematischen Behandlung der auftretenden Phänomene. Er führte sogar falsche Annahmen seines Lehrers Platon auf dessen Neigung zur Mathematisierung zurück. Aristoteles vertrat den Standpunkt, dass alle physikalischen Phänomene durch die eigene Wahrnehmung und Erfahrung zu beschreiben wären. Der Mathematik käme allenfalls die Funktion einer *Hilfswissenschaft* zu.

Aristoteles verfasste ein acht Bücher umfassendes Werk über die Natur: „*Die Physik*“. Es befasst sich mit der Erklärung und Erläuterung einiger grundlegender Begriffe, die bei der Beschreibung von Naturvorgängen im täglichen Leben gebraucht werden. Die wichtigsten davon sind: *Raum, Zeit, Bewegung und Ursache*. Es handelt sich nicht um eine mathematische Darlegung der Grundzüge der Natur in heutigem Sinne.

Gesetzesmäßige Aussagen von Aristoteles, die Bewegungen von Körper betreffend, kann man folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Bewegungsgesetze von **Himmel und Erde sind grundverschieden**.
- Im Himmel existieren nur **vollkommene Kreisbewegungen** – diese dauern ewig an.
- Auf der Erde kommen **Bewegungen** irgendwann zu einem **Ende** – schwere Körper (z.B. Steine) streben nach unten, leichte (z.B. Rauch) nach oben.
- Irdische **Bewegungen werden klassifiziert und geordnet** nach natürlichen (fallender Stein), selbstbestimmt natürlichen (laufender Mensch, fliegender Vogel) und unnatürlichen bzw. erzwungenen (vom Esel gezogener Karren).
- Je schneller eine unnatürliche Bewegung sein soll, desto größer muss die Kraft sein, die die Bewegung antreibt und aufrecht erhält. **Ohne Krafteinwirkung kommt jede unnatürliche Bewegung zum Ende**.

- Jedes sich selbst überlassene Objekt hat eine **natürliche Geschwindigkeit**, mit der es fällt (Stein) oder steigt (Rauch) und damit seinem **natürlichen Ort** anstrebt. Schwerere Objekte fallen schneller als leichtere.
- Jegliche irdische Bewegung ist durch **Reibung** beeinflusst – je geringer die Reibung, desto höher die Geschwindigkeit.
- Es gibt kein Vakuum und kann auch keines geben, da den Bewegungen sonst keine Reibung entgegen wirken würde. Sie würden dann mit unendlicher Geschwindigkeit sich bewegen (**horror vacui**).

Dieses System erweist sich als sehr geschlossen, da die Aussage jeweils andere bedingen. Im Falle der Widerlegung einer einzelnen Aussage könnte das ganze System zusammenbrechen. Auf der anderen Seite sind die Aussagen lebensweltlichen Erfahrungen sehr nahe, wenngleich letztere in der Regel nicht systematisiert und durchdacht werden.

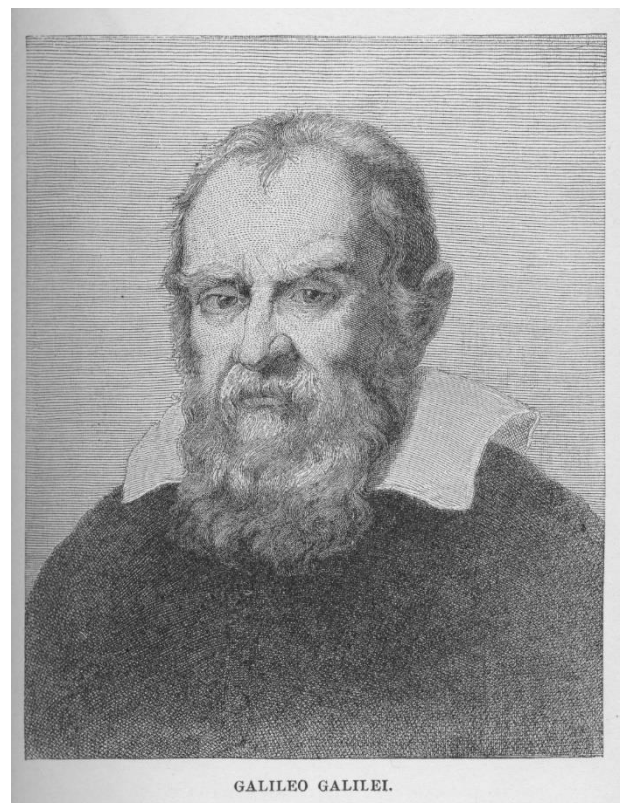
5.2 Galilei Galileo: Leben - Wirken - Denken

5.2.1 Kurzbiographie Galileis

Galileo Galilei wurde 1564 in der Stadt Pisa als Sohn einer Florentiner Patrizierfamilie geboren. Sein Vater Vincenzio Galilei war mit dem Herzen Musiker, obwohl er ursprünglich den angesehenen Beruf des Tuchhändlers gelernt hatte. Der Vater war, wie sein Sohn Galileo Galilei später auch, ein sehr guter Lautespieler. Als Galileo Galilei als erster Sohn in Pisa geboren wurde, ging es der Familie aufgrund der großen Mitgift der Mutter und des anerkannten Berufes des Vaters finanziell recht gut. Aufgrund seiner edlen Herkunft aus einer Patrizierfamilie zollte man Galilei großen Respekt.

Obwohl Galilei selbst niemals verheiratet war, konnte er nur bescheiden leben. Schließlich musste er für seine Schwestern eine hohe Mitgift aufbringen und auch seinen Bruder und seine Mutter nach dem Tod des Vater immer wieder unterstützen.

Galilei selbst hatte drei uneheliche Kinder mit seiner Haushälterin Marina Gamba, einer Venezianerin. Zu allen seinen Kindern hatte er sich bekannt und zahlte für sie Unterhalt, da sie ebenso wie die Mutter nicht in seinem Haus wohnten. Während die Mädchen Maria Celeste und Livia schon früh in einem Kloster untergebracht



wurden, was unehelichen Mädchen eine dauerhafte Versorgung garantierte, nahm er seinen Sohn Vincenzo 1613 zu sich auf und legitimierte ihn.

Galilei besuchte die traditionsreiche Schule eines Benediktinerklosters in der Nähe von Florenz. Als er sich dazu entscheiden wollte, Mönch zu werden, holte ihn sein Vater wieder nach Hause. Er nahm 1581 ein Studium der Medizin an der Universität Pisa auf. Allerdings entdeckte er bald seine Leidenschaft für die physikalische Lehre der Bewegungen, wenngleich diese noch nach der Aristotelischen Sichtweise vermittelt wurde. Als Galilei eine Vorlesung zur griechischen Geometrie des Euklid hörte, war er davon so fasziniert, dass er sich fortan diesem Gebiet intensiv widmete und sein Medizinstudium darüber völlig vernachlässigte.

An der Universität zu Pisa erhielt Galilei 1589 seine erste Stellung als Lektor der Mathematik. Zwar war sie schlecht bezahlt, aber immerhin musste er nur zwei Stunden pro Woche unterrichten. Sein Gehalt konnte er mit praktischen technischen Erfindungen aufbessern, die ihn bekannt gemacht hatten. Ein weiteres Zubrot erwirtschaftete er mit Privatstunden und der Erstellung von Horoskopen, was in jener Zeit für einen Wissenschaftler nicht ungewöhnlich war.

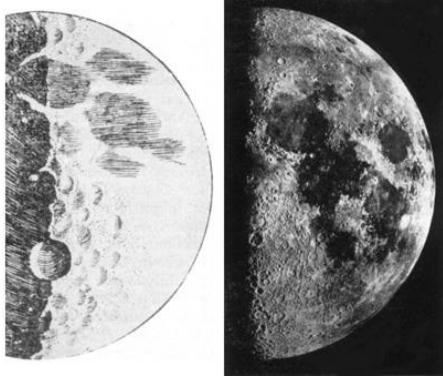
In Pisa veröffentlichte er sein erstes Werk über Bewegungen und Fallgesetze „De Motu“, nachdem er zuvor seine Experimente mit der Fallrinne durchführte. Galilei hatte sich wegen seiner zunehmenden Kritik an den Lehren des Aristoteles zunehmend den Unmut der Kollegen an der traditionsträchtigen Universität zu Pisa zugezogen. Eine Aussicht auf Verlängerung seiner Anstellung bestand daher nicht. So zog er 1592 für eine weitere Lehrtätigkeit nach Padua.



In Padua kam ihm eine neuartige holländische Erfindung zu Ohren, das Fernrohr. Er trug auch durch eigenes Linsenschleifen erheblich zur Verbesserung dieses Instruments bei. Zwar gilt Galilei nicht unbedingt als der erste, der ein Teleskop auch gen Himmel gerichtet hat, aber zumindest als der erste, der entscheidendes wissenschaftliches

(und nicht nur wissenschaftliches) Kapital daraus schlug. Er entdeckte die vier größten Jupitermonde, die Phase der Venus, dass die Milchstraße aus einzelnen Objekten bestehe, Flecken auf der Sonnenoberfläche und die Erden-ähnliche Gestalt der Mondoberfläche. Entsprechend sind uns sorgfältige Zeichnungen von Bergen und Tälern des Mondes erhalten, die er nebst anderen teleskopischen Beobachtungen 1610 in der Schrift *Siderius Nuncius* (Sternenbote) veröffentlichte.

Ein Fernrohr Galileis



Zeichnung des Halbmondes von Galilei



*Sonnenflecken beobachtet in der Sternwarte Bochum
(<http://wdrblog.de/teleskop/images/Junisonne.jpg>)*

Öffentlich bekannte er sich zum heliozentrischen Weltbild des Kopernikus, was zu dieser Zeit durchaus die Gefahr heraufbeschwor, ein Opfer der Inquisition zu werden. Als bekanntes Beispiel galt die Verbrennung des italienischen Philosophen Giordano Bruno, der nach mehrjähriger Kerkerhaft 1600 in Rom auf dem Scheiterhaufen hingerichtet worden war. Er vertrat die Idee einer unendlichen Welt, in der weder Erde noch Sonne ein Zentrum darstellten und erklärte damit der katholischen Kirche unerbittliche Gegnerschaft.

Galilei erhielt ebenfalls 1610 die ausgezeichnet bezahlte Stellung eines Hofphilosophen und Mathematikers in Florenz. Von nicht unerheblicher Bedeutung mag dabei gewesen sein, dass er die von ihm entdeckten Jupitermonde die Mediceischen Gestirne getauft hatte, eine gehörige Schmeichelei des florentinischen Herrscherhauses. Dort war er für den Unterricht des Großherzogs Cosimo II zuständig.

Seit seinen astronomischen Entdeckungen war Galilei darum bemüht, die Kopernikanische Lehre mit seiner Forschung zu unterstützen. Das hatte 1616 ein Dekret der Inquisition zur Folge, nach dem die kopernikanischen Lehren als falsch deklarierte und die Verbreitung verboten wurden. Infolge seiner Veröffentlichung

des *Dialogo* (Dialog über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme) aus dem Jahr 1632 wurde auch Galilei ein Jahr später in einem Inquisitionsprozess öffentlich angeklagt und gezwungen, den kopernikanischen Lehren völlig abzuschwören. Nur dadurch entging er dem Tode und wurde "nur" unter lebenslangen Hausarrest gestellt. Selbst ein Arztbesuch war ihm nicht gestattet. Während der Zeit des Arrestes verfasste er 1638 ein weiteres Werk, die *Discorsi* (Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und Fallgesetze betreffend).

Die letzten Jahre seines Lebens litt Galilei an zahlreichen körperlichen Beschwerden. Infolge der starken Schwächung seiner Sehstärke hatte er ab 1638 einen treuen Assistenten Vincenzo Viviani zur Seite. Schließlich erblindete Galilei völlig. Die *Discorsi* konnte er niemals vollenden. Galileis Leben endete nach den Angaben Vivianis am 8. Januar 1642 „nach langem verzehrenden Fieber und starken Herzklopfen, wodurch er zwei Monate nach und nach abgezehrt wurde und endlich [...] mit philosophischer und christlicher Beständigkeit verschied“. Er gilt bis heute neben Francis Bacon, René Descartes und Isaac Newton als Begründer der neuzeitlichen und auf Experimenten basierenden Naturwissenschaft.

5.2.2 Galileis Bild von Naturwissenschaften

Schon im antiken Platonismus waren die Himmelsbewegungen mit der Mathematik beschrieben worden. Galilei erweiterte diese Lehre, indem er die Beschreibung für die Erde übernahm. Er formulierte eine Art *mathematischen Schöpfungsgedanken*:

„Das Buch der Welt ist in mathematischer Sprache geschrieben und die Buchstaben sind Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren, ohne die es unmöglich ist, ein Wort auf menschliche Weise zu verstehen“.

Galilei verwendete in seinen Werken fast ausschließlich den geometrischen Beweis, der heute recht ungewöhnlich oder umständlich erscheint. Die geometrische Mathematisierung der irdischen Natur löste die vorgalileischen Arbeitsweisen der Physik ab. Die die Mannigfaltigkeit der Naturphänomene bestimmenden Gesetzlichkeiten werden erst entdeckt, wenn man von unmittelbaren Sinneseindrücken absieht. Diese Grundidee bestimmt physikalische Forschung bis heute und wurde zum Teil ihrer Erfolgsgeschichte.

Da er oftmals die Mathematik der Physik voranstellte, ließ sich Galilei durch widersprechende Sinneseindrücke nicht täuschen. Dies gelang ihm, indem er bestimmte auftretende Abweichungen als *Störungen* interpretierte, die den Blick auf den wesentlichen und hinter den unmittelbaren Erscheinungen wirkenden Zusammenhang versperrten.

Trotzdem stellte das real durchgeführte Experiment keinen unwichtigen oder zu vernachlässigenden Teil seiner Untersuchungen dar. Vielmehr war für Galilei das Experiment zur „*methodischen Befragung der Natur*“ von großer Bedeutung. Zur

Darstellung verwendete Galilei die spezielle Sprache der geometrischen Mathematik mit Kreisen, Kurven und Dreiecken. Die methodische Befragung erfolgte bei Galilei vorwiegend in *Demonstrationsversuchen*, zu dem Zweck, Folgerungen, die er auf mathematischem Wege erlangt hatte, zu *bestätigen*. Galilei ging demzufolge davon aus, dass schon vor jeglicher Erfahrung eine Theorie im Gedächtnis vorhanden sein müsse.

Im *Dialogo* verkündet einer seiner Hauptcharaktere:

„Ich bin ohne Versuch gewiss, dass das Ergebnis so ausfällt, wie ich es Euch sage, denn es muss so ausfallen“ und

„Ich habe einen Versuch angestellt, aber zuvor hatte die natürliche Vernunft mich ganz fest davon überzeugt, dass die Erscheinung so verlaufen musste, wie sie auch tatsächlich verlaufen ist“.

Galilei war es im Gegensatz zu Aristoteles bei seinen Experimenten viel wichtiger, die Bewegungsabläufe zu beschreiben, als allein die Ursachen zu erforschen. Anders als Aristoteles stellte er sich nicht primär die Frage, warum sich Dinge bewegen, sondern wie sich Dinge bewegen. Daher untersuchte er im Rahmen verschiedener Experimente, wie sich Körper verhalten, wenn man sie ungehindert fallen ließ. Um den freien Fall untersuchen zu können, arbeitete Galilei u.a. mit schiefen Ebenen. Dabei unterstellt er, dass die Bewegung auf einer schiefen Ebene nur langsamer von statten gehe, aber der gleichen Gesetzlichkeit unterworfen sei, wie ein fallender Stein. Das Studium einer möglichst reibungsfrei eine schiefe Ebene hinabrollenden Kugel dauerte lang genug an, um mit zeitgenössischen Methoden der Zeitmessung (Wasseruhren, Pulsschlag) erfassbar zu sein.

Verborgene Beziehungen ließen sich nach Galileis Ansicht durch Idealisierung und Abstraktion herausarbeiten. Dabei war sich Galilei dessen bewusst, dass seine idealisierten Gesetzlichkeiten nur annähernd komplexe, reale Phänomene beschreiben konnten. Galilei stellte Idealisierungen auf, die Physiklernenden heutzutage meist ganz vorbehaltlos mitgeteilt werden, die aber damals eine bahnbrechende Neuerung darstellten. Dazu gehören beispielsweise Annahmen wie Punktmasse, freier Fall im Vakuum und fehlende Reibung.

Bei der Idealisierung werden zuerst bestimmte Parameter als Störeinflüsse identifiziert und anschließend als vernachlässigbar charakterisiert. Für das idealisierte Objekt ist daher kein reales Gegenstück zu finden – es wird erst durch Hinzufügen der Störeinflüsse wieder real. Es kann bis heute überraschen, dass eine so erarbeitete physikalische Gesetzlichkeit wie die Fallgesetzte gar keine unmittelbar vorfindbare Natur beschreibt, gerade darauf aber ihre Leistungsfähigkeit beruht.

Um reale Prozesse und Objekte zu beschreiben, müssen die idealisierten Gesetzlichkeiten wieder konkretisiert werden. Fallbewegungen werden z.B.

beschrieben, indem dem Fallgesetz ein geschwindigkeitsabhängiger Reibungsterm hinzugefügt wird.

Die Kunst bei Idealisierungen besteht darin, Störeinflüsse benennen zu können, die als Abweichung vom Gesetz interpretiert werden. Letztlich wird damit die Komplexität mannigfaltiger Naturerscheinungen stark reduziert. Diese Auffassung wird im folgenden Zitat von Galilei deutlich:

„In Betreff des Widerstandes des Mediums gestehe ich zu, dass dessen störender Einfluss bemerklicher sein wird, und wegen seiner mannigfach verschiedenen Beschaffenheit kaum unter feste Regeln gebracht werden kann [...] über all die unendlich verschiedenen Möglichkeiten [...] kann keine Theorie gegeben werden.“ (Galilei: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend).

Folglich sind die Störeinflüsse für Galilei realer Bestandteil der Natur, der sicherlich auch irgendwann physikalisch fassbar werden, aber momentan noch eine zu große Herausforderung darstellt.

5.3 Lehr-Lern-Aspekte über die Natur der Naturwissenschaften

5.3.1 Naturwissenschaftliche Kontroversen

Die Szenischen Dialoge machen anhand der Figuren Aristoteles und Galilei exemplarisch deutlich, dass in der Wissenschaft gestritten wird. Wissenschaftliche Kontroversen sind kein Unfall oder Ausnahmezustand der Wissenschaft. Sie lassen sich häufig auch nicht durch eine Verbesserung der empirischen Datenlage beilegen, wie es eine naiv empiristische Einstellung nahelegen würde. Aus diesem Grund lässt sich Aristoteles in den Szenischen Dialogen auch von Galilei nicht einfach überzeugen. Zu verschieden sind ihre jeweiligen Grundannahmen.

Galileis Art Wissenschaft zu betreiben (Idealisierung, Mathematisierung und Experimentieren) sind für seine Zeit neu. Die Kontroversen, die Galilei ausfocht, so weit es ihm unter den Rahmenbedingungen seiner Zeit möglich war (Ketzereivorwurf durch die Inquisition), war eben nicht nur ein Streit über die Korrektheit von Beobachtungen, sondern vor allem ein Streit über die wissenschaftlichem Arbeiten zugrunde liegenden Prämissen.

5.3.2 Die Rolle von Gedankenexperimenten und Idealisierungen

Gedankenexperimente haben in der Geschichte der Naturwissenschaften ihren festen Platz (Kühne, 2007). In der vorliegenden Fallstudie werden zwei Gedankenexperimente Galileis im Rahmen von Szenischen Dialogen dargestellt. Ein Gedankenexperiment entwickelt die Idee der Trägheit unter idealen,

reibungsfreien Bedingungen (Material 4). Das zweite Gedankenexperiment betrifft die Argumentation Galileis, schwere und leichte Körper müssten gleich schnell fallen (Material 5 und Material 6). Beide Gedankenexperimente ersetzen keine empirische Erfahrung. Gedankenexperimente ersetzen reale Messung ja generell nicht. Was sie aber leisten ist ein theoretischer Perspektivwechsel. Sowohl das Konzept einer trägen Bewegung, die ohne Reibung endlos verlief, und die Idee, dass alle Körper gleich schnell fallen, widersprechen empirischen Erfahrungstatsachen. Real beobachtbare Bewegungen kommen nun einmal zu einem Ende und ein Stein fällt eben schneller als ein Seidentuch. Ziel des Gedankenexperiments ist daher eher, die hinter den etablierten Interpretationen wirkenden Prämissen in Frage zu stellen. So gelesen dienen die Gedankenexperimente Galileis nicht dazu, empirische Erfahrungen zu ersetzen, sondern sie unter veränderten Grundannahmen neu zu interpretieren. Physikalische Schulversuche mit Luftkissenbahnen und -tischen (um Reibung zu minimieren, s. Bild) oder mit Vakuumröhren (für Fallversuche) optimieren Versuchsbedingungen (Reibung verringern), um der Idealisierung (keine Reibung) des Galileischen Gedankenexperiments näher zu kommen.

Die Idealisierung von Versuchsbedingungen gleicht damit einem Was-wäre-wenn-Spiel. Unmögliches wird angenommen, um eine hinter der Mannigfaltigkeit der Naturphänomene liegende Gesetzlichkeit zu erschließen. Für Jugendliche erscheint gerade die Physik oft lebensfremd und alltagsfern. Darin könnte aber auch gerade ein Schlüssel für ihre Erklärungskraft liegen.



Beispiel für Optimierung: eine schulübliche Luftkissenbahn

Gedankenexperimente der Naturwissenschaften sind den Gedankenspielen nicht unähnlich. Im Gedankenspiel versetzt sich ein Kind zum Beispiel in die Situation, unsichtbar zu sein. Es könnte dann zwar nur noch bedingt kommunizieren, wäre aber zugleich in einer äußerst machtvollen Situation. Eine realitätsferne Situation wird gedanklich durchgespielt und als ein Was-wäre-wenn-Spiel lustvoll erprobt. Bezüglich der Ziele, der Strenge der Annahmen und der Kontrolle imaginierten Randbedingungen sind Gedankenspiel und Gedankenexperiment sich allerdings nicht ähnlich.

Für die Reflexion auf die Bedeutung von Gedankenexperimenten kann das Gedankenspiel ein willkommener Anlass sein. Die folgenden Fragen können eine Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften anregen:

- Stellen Naturwissenschaftler/innen Gedankenexperimente an, weil sie zum Experimentieren zu faul sind?
- Sind die Ergebnisse von Gedankenexperimenten ernst zu nehmen? Es sind doch nur Gedanken?
- In einem Gedankenexperiment stellen sich Naturwissenschaftler/innen die Frage: „Was wäre wenn...?“
- Hast du dir solche Fragen auch schon einmal gestellt?
- Worin besteht der Unterschied zu deiner Was-wäre-wenn-Frage und dem wissenschaftlichen Gedankenexperiment?

5.3.3 Die Rolle der Mathematik bei der Deutung der Natur

Die Mathematik ist einerseits das wichtigste Modellierungswerkzeug der Physik. Auf der anderen Seite ist sie selbst keine Naturwissenschaft. Mathematische Konstrukte sind menschliche Produkte. Ein Wunder also, dass die Mathematik so gut auf die Natur passt und man mit ihr in so hervorragender Weise physikalische Gesetze darstellen kann. Diesen Umstand formulierte der amerikanische Physiker Eugene P. Wigner in einem Vortrag 1959:

The first point is that the enormous usefulness of mathematics in the natural sciences is something bordering on the mysterious and that there is no rational explanation for it. Second, it is just this uncanny usefulness of mathematical concepts that raises the question of the uniqueness of our physical theories (Wigner, 1960).

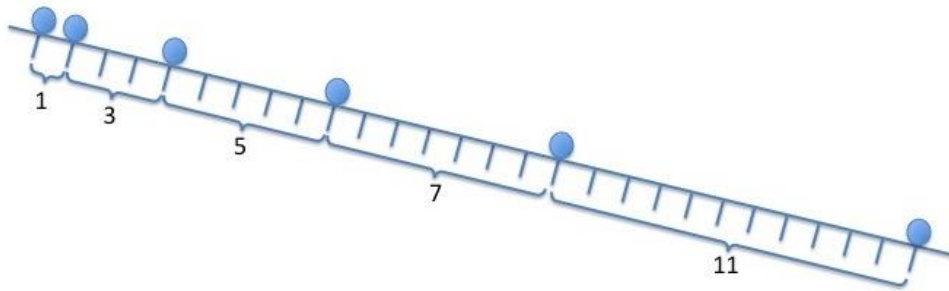
Mytheriös ist die Möglichkeit, mit Mathematik Natur zu beschreiben, aber nur dann, wenn man sich die Natur oder Wirklichkeit als von uns Menschen vollkommen unabhängige vorstellt. Ein solcher metaphysischer Realismus ist aber durchaus problematisch. Vielmehr scheint es so zu sein, dass Naturwissenschaftler die Mannigfaltigkeit der Naturphänomene unter der Perspektive der sie interessierenden Fragestellungen reduzieren. Galilei tut das mit der Methode der Idealisierung (s.o.).

Wir teilen die Welt sozusagen in das ein, was wir an ihr für wesentlich halten, und in das, was aus diesem Wesentlichen in irgendeiner für uns nicht ganz klaren, aber uns auch nicht ganz so genau interessierenden Weise zu resultieren scheint oder hoffentlich daraus resultiert. Das uns wesentlich Erscheinende nennen wir die ‚Naturgesetze‘, alles andere nennen wir Rand- und Anfangsbedingungen“ (Hedrich, 1993, S. 113f).

Dass die Mathematik auf die Natur passt, setzt also schon voraus, dass wir uns die Natur in besonderem Maße idealisieren und reduzieren. Darin steckt ein Stück Willkür, wenngleich die Natur sich sicher gegen viele Arten der Strukturierung verschließt. Nicht vergessen sollte man auch, dass Naturgesetze eingeschränkten

Gültigkeitsbereichen unterliegen (Allchin, 2007), woran jeweils deutlich wird, dass die physikalische Art der Naturinterpretation und die Natur selbst nur in Grenzen übereinstimmen.

Das Fallgesetz kann in der Fallstudie anhand einer Zahlenreihe erarbeitet werden. Wenn ein Körper in einer ersten Zeiteinheit den Weg 1 zurückgelegt hat, so wird nach Verstreichen der 2. Zeiteinheit der 4-fache und nach Verstreichen einer 3. Zeiteinheit der 9-fache Weg zurück gelegt worden sein. Die Differenzen der Wegstrecken entsprechen dann genau einer Reihe ungerader Zahlen.



| | | | | | | | |
|------------|---|---|---|----|----|----|----|
| t | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| s | 1 | 4 | 9 | 16 | 25 | 36 | 49 |
| Δs | | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 |

Dass eine Zahlenreihe den freien Fall eines Körpers beschreiben kann, kann man als ein Kuriosum auffassen: Kann die Natur zählen?

Die Frage, ob die Natur zählen könne (wenn auch nur mit ungeraden Zahlen), kann auch Schülern schon gestellt werden, um sie zu erkenntnistheoretischen Reflexion anzuregen. Stülpt der Mensch sein in Zahlen strukturiertes Bewusstsein der Natur über? Oder ist unser Bewusstsein, weil wir ja selbst Naturwesen sind, geeignet, die gesetzesartigen Strukturen in der Natur zu erkennen?

5.3.4 Technische Innovationen können Wissenschaft voranbringen

Im Jahre 1609 erreichte Galilei die Nachricht von der Erfindung des Fernrohrs durch den Holländer Jan Lipperhey. Galilei selbst entwickelte das Fernrohr technisch weiter, was ihm nicht zuletzt dadurch gelang, dass er in Venedig Zugang zu Meistern in der Herstellung geschliffener Gläser hatte. Noch im gleichen Jahr errichtete Galilei eine 9-fache Vergrößerung. Galilei gilt als erster, der das Fernrohr für astronomische Beobachtungen systematisch verwendete. Wegen der mit heutigen Linsensystemen verglichen geringen Qualität lagen Himmelsbeobachtungen den Zeitgenossen Galileis auch gar nicht nahe. In der Astronomie herrschte traditionell das Interesse vor, die genaue Position von Himmelsobjekten, nicht aber

deren Beschaffenheit zu untersuchen. Dieses Erkenntnisinteresse entsprach dem Aristotelischen Weltbild: Gilt im Himmel eine „eigene Physik“ nach der fort dauernde Bewegung von Himmelsobjekten auf Kreisbahnen möglich sind, dann ist die Beschränkung auf die Beschreibung von Bewegungen der Himmelsobjekte ein verständliches Anliegen.



Galilei statt dessen beobachtete, dass die Venus Phasen wie der Erdenmond aufweist, dass der Saturn von einem Ringsystem umgeben ist und auf dem Mond Gebirge zu beobachten sind, die denen der Erde ähneln. Galileis Beobachtungen korrespondierten daher mit seinem Weltbild, das der Aristotelischen Unterscheidung irdischer und himmlischer Physik nicht mehr folgte. Das

heliocentrische Weltbild Galileis wurde durch eine technische Innovation unterstützt. Die mit einem zeitgenössischen Fernrohr ermöglichten Beobachtungen darf man sich aber keineswegs als selbstevident vorstellen. So berichtete Galilei in seinen ersten Aufzeichnungen nicht von den Ringen, sondern den „Ohren“ des Saturn (Teichmann & Höttecke, 2009). Beobachtung und Geschick spielten im Umgang mit einer jungen Technologie wie der des Fernrohrs eine erhebliche Rolle, sodass Galilei wohl auch mit der „Schärfe seiner Intuition“ (Giorgio Abetti, 1923, zitiert nach Teichmann & Höttecke, 2009) beobachtet hat. Hier wird die Theoriebeladenheit der Beobachtung in den Naturwissenschaften sichtbar: theoretische Vorannahmen beeinflussen auf unhintergehbare Weise, was und wie man beobachtet. Wohl aus diesem Grund teilten viele Zeitgenossen Galileis seine Beobachtungen nicht, denn sie machten andere Vorannahmen.

6 Zielgruppe, curriculare Relevanz und didaktischer Ertrag

Die vorliegende Unterrichtseinheit wurde in ähnlicher Form bereits in einem achten Jahrgang eines Gymnasiums durchgeführt. Allerdings ist es ebenfalls denkbar, das Material in leicht abgewandelter Form und mit weniger Unterstützung durch die Lehrkraft auch in einer höheren Klassenstufe bis hin zur gymnasialen Oberstufe einzusetzen.

Im folgenden Abschnitt werden zuerst notwendige Voraussetzungen, die die Lerner mitbringen sollten, kurz aufgezeigt. Außerdem sollen die allgemeinen Lernziele, jeweils bezogen auf die einzelnen nach den kerncurricularen Vorgaben gültigen Kompetenzbereiche, dargestellt werden. Da es sich um eine speziell auf die *Natur der Naturwissenschaften* (auch *nature of science*, NoS) ausgerichtete Unterrichtskonzeption handelt, sind diese Lernziele gesondert aufgeführt.

6.1 Lernervoraussetzungen

Die Unterrichtseinheit ist für den Regelunterricht allgemeinbildender Schulen im Fach Physik konzipiert. Sie umfasst ca. acht Einzelstunden (je 45 Minuten). Das angefügte Material wurde bereits in Teilen im Physikunterricht einer achten Klasse (Alter ca. 13-14 Jahre) eines Gymnasiums in Niedersachsen erprobt. Es wäre aber ebenfalls denkbar, die Unterrichtseinheit für eine höhere Jahrgangsstufe zu nutzen, wobei dabei die Hilfestellungen deutlich zu reduzieren wären. Die Fallstudie eignet sich besonders für den Einstieg in das Thema Kinematik.

Vorerfahrungen im selbstständigen Experimentieren sind vorteilhaft.

6.2 Kompetenzen

Fachwissen

Die Schüler sollen...

...die Vielfalt natürlicher Bewegungen begründet klassifizieren

...ein Verständnis des Trägheitsprinzips entwickeln, indem sie die Methode des Idealisierens verwenden.

...ein Weg-Zeit-Gesetz des freien Falls kennen lernen.

...einen einfachen Strahlengang im Galilei-Teleskop erklären können.

Erkenntnisgewinnung

Die Schüler sollen...

...ihre experimentellen Fertigkeiten durch selbständige Planung und Durchführung von Experimenten erweitern.

...eigene Messergebnisse mit denen Galileis vergleichen, Unterschiede und Gemeinsamkeiten kritisch reflektieren.

...Messdaten qualitativ und quantitativ auswerten.

...eigenes Experimentierhandeln kritisch reflektieren und dabei Bezüge zum *wissenschaftlichen Forschungshandeln* herstellen.

Kommunikation

Die Schüler sollen...

...zwischen Alltagssprache und Fachsprache unterscheiden.

...Versuchsaufbauten skizzieren und die verwendeten Materialien beschreiben.

...die Einheiten der auftretenden Größen mit korrekter Fachsprache benennen.

...ihre Ergebnisse in angemessener Form als Gruppe präsentieren.

...aus kurzen historischen Quelltexten und fiktiven Szenischen Dialogen selbstständig relevante Informationen entnehmen.

...eigene Schwierigkeiten beim Experimentieren benennen.

Bewertung

Die Schüler sollen...

...am Alltagsdenken orientierte, Aristotelische und Galileische Klassifikationen von Bewegungen unterscheiden.

...die Methode der Idealisierung und des Gedankenexperiments einschätzen.

...die Bedeutung der Abstraktion von Randbedingungen wie Reibung als physikalische Methode erkennen.

7 Aufgaben, Methoden und Medien für den Unterricht

Die folgenden Unterrichtsabschnitte bilden keine strenge Chronologie. Einige Teile (z.B. Kap. 7.6 - 7.8) lassen sich auch in arbeitsteiliger Gruppenarbeit bearbeiten.

7.1 Schüler/innen entwickeln ihr eigene Klassifikation von Bewegungen

Zur Einführung in die Fallstudie erhalten die Schüler/innen die Aufgabe, eine Klassifikation von Bewegungsphänomenen anhand von Bildern zu erstellen. Dazu verwenden sie eine vorgegebene Sammlung von Bildern (Material 1), die unter folgendem Arbeitsauftrag bearbeitet werden:

Auf den Bildern sind Bewegungsvorgänge abgebildet.

a) Schneide die Bilder aus und sortiere sie.

b) Nenne deine Kriterien zur Sortierung der Bilder.

Zeit: 10 Minuten

- Material 1: Ordnen von Bewegungen / Classification of Bodies in Motion



Übersichts-Darstellungen von Material 1

Damit erarbeiten die Schüler/innen eine erste eigene Klassifikation von Bewegungsphänomenen und handeln damit in Grenzen analog zu Aristoteles oder Galilei. Dass Klassifizieren und Ordnen naturwissenschaftliche Arbeitsweisen sind, wird in einer späteren expliziten Reflexionsphase herausgearbeitet. Die Arbeitsergebnisse können später verglichen werden. Exemplarische werden hier Schüler-Klassifikationen einer 8. Klasse eines Gymnasiums in Niedersachsen dargestellt:

| Gruppe 1 | Gruppe 2 | Gruppe 3 | Gruppe 4 | Gruppe 5 |
|---|--|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Größe der Geschwindigkeit • Gegenstände aus der Natur • Gegenstände aus der Technik | <ul style="list-style-type: none"> • Unnatürliche Bewegung • Natürliche Bewegung • Menschen • Tiere • Universum | <ul style="list-style-type: none"> • Natur • "aus eigener Kraft" • Mechanische Bewegungen | <ul style="list-style-type: none"> • Maschinen • Bewegung in der Luft • Bewegung am Boden | <ul style="list-style-type: none"> • Fortbewegungsmittel • Sport • Bewegung im Weltraum • Bewegung in der Natur |

Das Beispiel macht deutlich, dass die Schüler/innen lebensweltliche Kategorien heranziehen, die nicht immer kohärent und deutlich zu interpretieren sind (z.B. mechanische Bewegung in Gruppe 3). Es wird auch deutlich, dass die Aristotelischen Kategorien annähernd „nach-entwickelt“ werden können. Dies wird bei Gruppe 2 besonders deutlich (Aristoteles: natürlich, selbstbestimmt natürlich, erzwungen, Himmelsbewegung).

7.2 Erarbeitung einer Klassifikation von Bewegungen nach Aristoteles

Nun kann zu den beiden Protagonisten der Fallstudie Aristoteles und Galilei übergeleitet werden. Sie können als zwei Wissenschaftler eingeführt werden, die sich selbst mit dem Problem befasst haben, wie Bewegungen in der Natur zu klassifizieren und zu beschreiben sind.

Es schließt sich eine kurze PowerPoint-Präsentation an, die in Leben und Werk beider Personen einführt und auch *persönliche Details* umfasst. Illustrierendes Bildmaterial kann dabei für einen hohen Grad an Anschaulichkeit sorgen. An dieser Stelle kann in die Methode der Szenischen Dialoge (Leisen, 1999) (hier fiktive Dialoge zwischen Aristoteles und Galilei) eingeführt werden, die sich wie ein roter Faden durch die ganze Fallstudie ziehen werden. In den Dialogen diskutieren Aristoteles und Galilei miteinander über verschiedene physikalische Probleme und vertreten dabei oft recht verschiedene Deutungen. Ein erster Szenischer Dialog [[Material 2](#)] führt in die Klassifikation von Bewegungen nach Aristoteles ein. Anhand dieses ersten Szenischen Dialogs werden die Schüler/innen in diese Dialogform eingeführt. Sie erarbeiten am Text die Ordnungs- und Klassifikationskriterien des Aristoteles. Als zusätzliche Aufgabe können die Schüler/innen die Aristotelische Elementen-Lehre und, was man heute unter einem (chemischen) Element versteht, recherchieren.

Im Folgenden werden die Ordnungskriterien des Aristoteles zusammengefasst. Im Anschluss sollen die Schüler/innen eine Neu-Einordnung der Bilder nach der Klassifikation des Aristoteles vornehmen und anschließend mit den eigenen, zuvor erarbeiteten Kriterien vergleichen. So kann deutlich werden, dass es unterschiedliche Möglichkeiten des Ordnen gibt. Gegebenenfalls kann eine Nähe der Schülervorstellungen zu den Ideen des Aristoteles herausgearbeitet werden. Vor allem soll deutlich werden, dass das Ordnen zu den wissenschaftlichen Arbeitsweisen zählt. Es bieten sich Hinweise zu weiteren naturwissenschaftlichen Ordnungs- und Klassifikationsprinzipien (Stammbäume in der Biologie, Periodensystem der Elemente in der Chemie, Klassifikation von Elementarteilchen in der Physik etc.) an. Methodisch bietet sich hier der Einsatz der Reflection Corner an.

7.3 Konfrontation der Sichtweisen des Aristoteles und des Galilei auf das Problem der Bewegung

Dieser Teil der Fallstudie dient dazu, die unterschiedlichen Sichtweisen der beiden Protagonisten auf das Problem der Bewegung zu kontrastieren. Es soll herausgearbeitet werden, dass Aristoteles der Idee folgt, die Bewegungen nach Zwecken zu klassifizieren. Galilei dagegen geht es um den Prozess der Bewegung selbst. Er untersucht daher den Verlauf von Bewegungen.

Die Schüler/innen erhalten einen zweiten Szenischen Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Perspektiven auf das Problem der Bewegung (Material 3). Die Lerner erhalten den Auftrag die Unterschiede zwischen der Aristotelischen und der Galileieschen Sichtweise zu den Arten der Bewegung herauszuarbeiten. Anschließend kann die Frage geklärt werden, warum die beiden Wissenschaftler sich nicht verstehen können. Es wird deutlich, wie sehr Aristoteles' Denk- und Arbeitsweise durch teleologisches Weltbild bestimmt sind. Es ist aber auch erkennbar, dass sich die grundlegenden Zugangsweisen in den Naturwissenschaften ändern können. Die Frage „Wozu?“ gilt heute und auch schon für Galilei nicht mehr als angemessen und wissenschaftlich.

Abschließend können die Schüler/innen wieder an Bildbeispielen erläutern, worin sich die unterschiedlichen Zugänge zum Problem der Bewegung unterscheiden. Eine alternative Aufgabe kann darin bestehen, selbst weitere Bewegungsphänomene z.B. mit videofähigen Mobiltelefonen oder Camcordern aufzunehmen und jeweils aus der Aristotelischen und Galileischen Perspektive zu deuten (Wozu? versus Wie?).

Die den Ansätzen des Aristoteles und des Galilei zugrundeliegenden Prämissen können im Rahmen einer Reflection Corner pointiert werden. Die Reflektion kann nun verstärkt auf die Themen Kontroversen und Streit unter Wissenschaftlern und Möglichkeiten, wissenschaftliche Wahrheiten zu finden, fokussieren (s. Kap. 5.3.1 -> Wissenschaftliche Kontroversen).

7.4 Bewegungen untersuchen – ein Egg-Race

Bei der Methode des Egg-Race handelt es sich ursprünglich um einen Wettbewerb, bei dem ein rohes Ei zum Beispiel mit absonderlichen Flugapparaten ohne zu zerbrechen transportiert werden soll. Diese Wettbewerbs-Idee kann zur methodischen Gestaltung einer Lernsituation genutzt werden, die in die wissenschaftliche Arbeitsweise der Optimierung experimenteller Bedingungen einführt und zur Arbeitsweise der Idealisierung nach Galilei überleitet. Die Schüler/innen werden nun selbst aufgefordert, Bewegungen in Gruppenarbeit zu untersuchen. Sie erhalten im Sinne eines Egg-Race die Aufgabe, ein Stück Knete eine Rampe hinunter rollen zu lassen. Den Wettbewerb hat die Schülergruppe gewonnen, deren Knete-Stück am weitesten kommt. Dazu werden nur zwei Versuchsbedingungen festgelegt: die Höhe der Rampe (z.B. 40 cm) und die Masse des Knete-Stücks (ca. 10g), das jede Schülergruppe erhält. Die Wahl des Materials der Rampe, ihre Form und die Form des Knete-Stücks wird den Schülern/innen freigestellt.

Im Rahmen dieser Aufgabenstellung nutzen sie diese Freiheit, um die Versuchsbedingungen im Sinne der Aufgabenstellung zu optimieren. Sie werden die

Knete zu einer möglichst glatten Kugel formen, die Rampe so wählen, dass die Geschwindigkeit der Kugel am Rampenende maximal wird und sie werden den Rollweg der Kugel möglichst reibungsarm gestalten. Sie werden also die Versuchsbedingungen optimieren. Nichtsdestotrotz wird die Kugel zwar mehr oder weniger weit rollen, aber immer stehen bleiben.

Abschließend sollen die Schüler/innen sich gegenseitig möglichst genau berichten, welche Schritte sind vorgenommen haben, damit ihr Knete-Stück möglichst weit ausrollt. Sie können dabei auch Vorschläge einbringen, was getan werden müsste, um die Kugel noch weiter rollen zu lassen, wenn sie die Versuchsbedingungen nach Belieben verändern könnten.

In der Reflection Corner können die Schüler/innen auf ihre eigenen Arbeitsweise reflektieren. Dabei sollte besonders deutlich werden, dass experimentelles Arbeiten in den Naturwissenschaften sehr häufig Optimierungsprozesse experimenteller Bedingungen voraussetzt. Hier können auch Erfahrungen mit Schulexperimenten aus früherem Unterricht eingebracht werden.

7.5 Von der Optimierung zur Idealisierung

Mit einem weiteren Szenischen Dialog wird die Idee der Idealisierung und letztlich der Trägheit eingeführt (Material 4). Dieser Dialog ist stark an einen Dialogabschnitt aus Galileis *Discorsi* angelehnt. In dem Dialog führt Galilei ein Gedankenexperiment, um zu zeigen, dass eine Kugel sich gleichförmig bewegen muss, wenn keine Reibungskräfte auf sie wirken. Sie verhält sich träge. Diese Idee ist heute jedem Physikstudenten bekannt. Aus der Perspektive unserer Alltagserfahrungen ist sie aber kaum glaubhaft. Der Idealisierungsprozess, den Galilei vorschlägt, ist für die Schüler/innen anschließend an das Egg-Race und die dort entwickelten Optimierungsstrategien verstehbar. Was Galilei vorschlägt, ist ja kaum etwas anderes als das, was die Schüler/innen selbst beim Optimieren ihres Kugel-Weit-Roll-Wettbewerbs getan haben, nur dass diese Art der Optimierung in der realen Welt nicht durchführbar ist. Im Gedankenexperiment lassen sich experimentelle Bedingungen auf unrealistische Weise verändern, die Phänomene werden idealisiert. Die Trägheitsidee selbst ist für Galilei nur durch diesen Idealisierungsprozess erkennbar.

Nach der Lektüre des Textes können die wissenschaftlichen Arbeitsweisen Optimierung und Idealisierung benannt und definiert werden. Die Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften fokussiert hier v.a. auf den Status von Idealisierungen und Gedankenexperimente (s. Kap. 5.3.2 -> Die Rolle von Gedankenexperimente und Idealisierungen). Als fachlicher Lernertrag sollte im Zuge der Idee der Idealisierung das Trägheitskonzept klar benannt werden.

7.6 Der Freie Fall

Während für Aristoteles der paradigmatische Fall einer Bewegung von einem Körper beschrieben wird, der seine Ruhelage anstrebt, ist es für Galilei der freie Fall eines sich selbst überlassenen Körpers. Im Rahmen der Aristotelischen Physik fällt jeder Körper auf eine ihm eigentümliche Weise. Nach Aristoteles ergibt sich ein Fallgesetz, das eine Proportionalität der Fallgeschwindigkeit zu Masse und Kraft

ausdrückt. Geschwindigkeitsänderungen werden nicht berücksichtigt. Schwere Körper sollten danach schneller fallen als leichte.

Galilei nimmt dagegen eine allen fallenden Körpern zugrunde liegende einheitliche Gesetzmäßigkeit an. Dabei handelt es sich um ein weiteres Beispiel der Arbeitsweise der Idealisierung von Naturphänomenen. Tatsächlich beobachtbar ist ja, dass Volumen und Form eines Körpers erheblichen Einfluss auf sein Fallverhalten haben. Das Galileische Fallgesetz gilt streng genommen nur, wenn von Reibungskräften abgesehen wird. Die tatsächliche Beschleunigung eines frei fallenden Körpers setzt sich ja neben einem Term für den freien Fall aus einem zweiten Term zusammen, der die Luftreibung beschreibt (Stokes-Reibung für kleine Geschwindigkeiten). Unsere Alltagserfahrung legt daher die Galileische Ansicht keineswegs nahe und entsprechend vertreten Schüler/innen (wie physikalische Laien generell) häufig eine Aristotelische Ansicht.

In das Thema freier Fall kann zum Beispiel eingeführt werden, indem die Schüler/innen zunächst einmal selbst Gelegenheit erhalten, ihre Vorstellungen zur Fallbewegung darzustellen und zu erläutern. Stegreif-Fall-Versuche mit unterschiedlich geformten Körpern können leicht deutlich machen, dass die Form eines Körpers entscheidend seine Fallzeit bestimmt. Lässt man beispielsweise ein Blatt Papier fallen, knüllt es anschließend zusammen und lässt es erneut aus der gleichen Höhe fallen, wird dieser Umstand anhand klar unterschiedlicher Fallzeiten des selben Körpers überzeugend dargelegt.

Die unterschiedlichen Ansichten der beiden Protagonisten Aristoteles und Galilei werden abermals mit dem Medium des Szenischen Dialogs pointiert (Material 5). Galilei verwendet darin ein auch heute noch von vielen als überaus überzeugend dargestelltes Gedankenexperiment: Wenn die Fallzeit von leichten Körpern größer ist als von schweren, dann müsste ein leichter Körper einen schweren beim Fallen abbremsen, wenn man die beiden verbindet. Andererseits ist die Summe der Massen des so verbundenen Körpers größer als die beiden einzelnen Massen. Der verbundene Körper müsste nach Aristoteles am schnellsten fallen. Es ergibt sich ein Widerspruch. Der Widerspruch entsteht aber nur, wenn man die Prämisse Galileis anerkennt, dass der so verbundene Körper sich nicht durch gänzlich neue Qualitäten von den beiden Körpern unterscheidet, aus denen er besteht. Aus diesem Grunde lässt sich Aristoteles am Ende des Szenischen Dialogs auch nicht einfach von der Schlussweise Galileis überzeugen, sondern zweifelt die Voraussetzungen Galileis an. Als alternatives Material für leistungsstarke oder bilingual unterrichtete Lerngruppen bietet sich ein Originaltext Galileis an (Material 6), in dem er sein Gedankenexperiment in zeitgenössischem Stil darstellt.

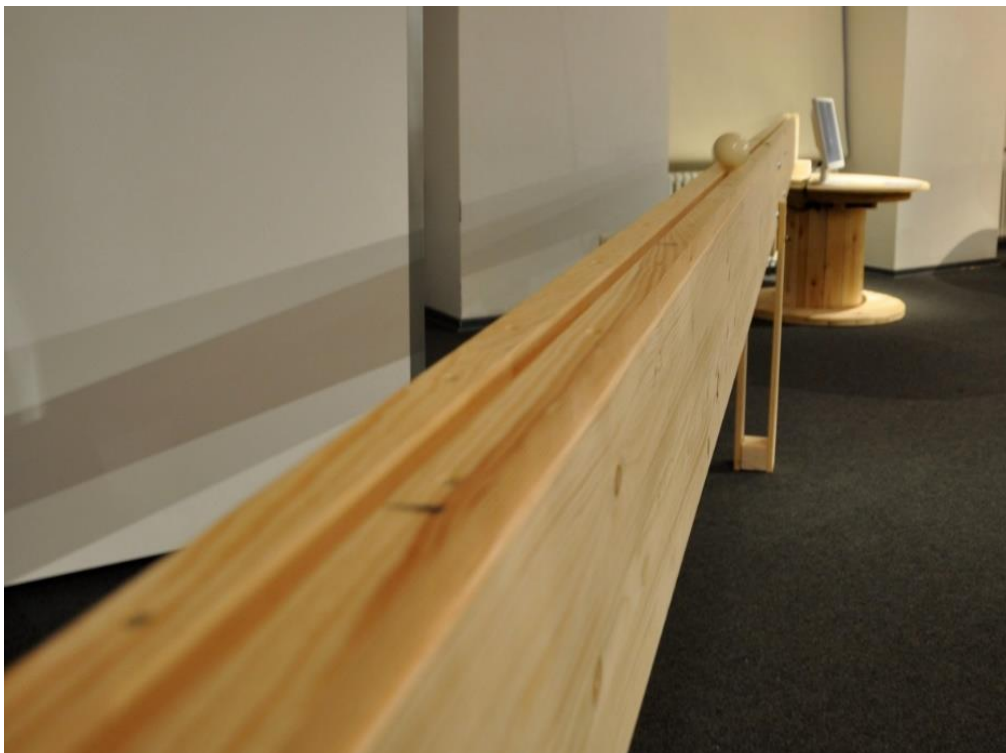
Im Unterricht kann nun erörtert werden, ob die Galileische Argumentation für die Schüler/innen überzeugend ist. Schließlich fallen doch Seidentücher deutlich langsamer als beispielsweise Steine. Ein leichter Fallschirm bremst die Fallbewegung eines Fallschirmspringers doch tatsächlich ab! Zu dieser Problematik können die Schüler/innen in Gruppen diskutieren, um ein Statement ihrer Gruppe dazu zu erarbeiten, ob sie sich von Galileis Idee überzeugen lassen.

Der Widerspruch zwischen Alltagserfahrung und Galileischem Gedankenexperiment löst sich letztlich nur auf, wenn deutlich erkennbar wird, dass auch hier die Galileische Methode der Idealisierung wieder von zentraler Bedeutung für seine Argumentation ist. Während die Hemmung von Bewegungen durch Reibung für Aristoteles zum Kernelement seiner Bewegungslehre zählt, will Galilei Reibung ja gerade durch Idealisierung aus dem Kernbereich seines Fallgesetzes herausdrängen. („But if there were some accidental cause, such as, for example, the shape of the mobile, it must not be classified amongst the causes per se”. s. [Material 6](#)).

Die Rolle der Idealisierung hatte der Szenische Dialog über Idealisierung und Trägheit ([Material 4](#)) bereits deutlich gemacht. Was aber sollen zufällige Ursachen und was Ursachen an sich sein? Galilei nimmt eine hinter den Erscheinungen wirkende Gesetzmäßigkeit an, die nur durch Idealisierung erkennbar wird. Die Unterscheidung in zufällige und grundlegende Ursachen ergibt sich aus der Beobachtung fallender Körper gar nicht, sondern ist ein Ergebnis physikalischer Theoriebildung. Die Reflection Corner kann diese Einsicht abermals methodisch unterstützen. Das in der Schulphysik so populäre Fallexperiment mit Vakuumröhren, in dem Stahlkugeln und Federn in einer evakuierten Röhre auf eindrucksvolle Weise gleich schnell fallen, kann an dieser Stelle unterstreichen, dass Galileis Annahme zwar der Aristotelischen überlegen ist, diese Überlegenheit aber nur durch ein hochgradig optimiertes (hohes Vakuum) Experiment zu haben ist. Ebenfalls kann die das Thema der Rolle von Gedankenexperimenten reflektiert werden.

7.7 Das Fallgesetz als Zahlenreihe experimentell erkunden

Der freie Fall wird im Schüler-Experiment an einer Fallrinne untersucht. Dazu wird eine ca. 6 m lange schiefe Ebene benötigt (-> Historisches Bildmaterial [Material 8-a](#)).



Im von uns erprobten Unterricht wurde mit einem an das Original Galileis angelehnten Nachbau gearbeitet.

Replication of an inclined plane according to Galilei (picture by W. Engels, Oldenburg group)

Die Galilei-Fallrinne ist mit Seidenpapier ausgelegt, um Reibung zu minimieren. Alternativ kann man mit V-Profilen aus Aluminium arbeiten, die in Schlossereien und Baumärkten zu bekommen sind. Wesentlich ist, dass die Auflagefläche einer hinabrollenden Kugel minimal ist.

Die Schüler/innen können mit einer Fallrinne selbst die Gesetze erforschen, die beim freien Fall wirksam sind. In diesem Abschnitt wird auch das Fallgesetz selbst eingeführt. Es wird aber nicht als Formel ($s=1/2 \cdot g \cdot t^2$), sondern als Zahlenreihe dargestellt (-> Kap. 5.3.3). Die Darstellung als Zahlenreihe macht vor allem für jüngere Schüler/innen deutlich, dass die Passung von Mathematik auf die Natur an sich ein Kuriosum darstellt, das durchaus fragwürdig ist. Der Abstraktionsgrad der Darstellung wird gering gehalten. Das erkenntnistheoretische Problem der Passung der Mathematik auf die Natur wird in der schülergerechten Frage pointiert:

Kann die Natur zählen?

Es bietet sich die folgende Realisierung im Unterricht an:

| | |
|----|---|
| 1. | <p>Der Szenische Dialog über Galileis Messungen an der Fallrinne (<u>Material 7</u>), dient den Schüler/innen als Vorlage für eigenes Experimentieren. Nach der Textlektüre erfolgt eine inhaltliche Klärung.</p> <p>Mögliche Arbeitsaufträge zur Sicherung des Verständnisses der Zeitmessung:</p> <p>Beschreibt das Prinzip der Zeitmessung mit der Wasseruhr in eigenen Worten!</p> <p>Worin liegen Vorteile und Nachteile der Messungen mit der Wasseruhr?</p> <p>Ist es immer notwendig Zeiten in den üblichen Einheiten Sekunden/Minuten/Stunden o.ä. zu messen?</p> <p>Mögliche Arbeitsaufträge zur Sicherung des Verständnisses der schiefen Ebene:</p> <p>Worin liegt der Zusammenhang zwischen freiem Fall und der Bewegung entlang dieser Fallrinne?</p> <p>Worin bestand nach Galilei der Vorteil dieses Aufbaus?</p> |
| 2. | <p>Ein zeitgenössischer Kupferstich (<u>Material 8-a</u>) stellt verschiedene Perspektiven auf Galileis Arbeit mit der Fallrinne dar: Gelandweilter Fürst, Gelehrte, die sich bewusst vom Experiment ab- und den alten Schriften zuwenden (Peripatetiker= Anhänger Aristotelischer Lehre) oder möglicherweise intrigante Höflinge. Der Künstler selbst hebt Galilei und seine Diskutanten positiv hervor. Das Material eignet sich zur zeitgeschichtlichen Einordnung. Ein Arbeitsauftrag könnte lauten, eine</p> |

| | |
|----|--|
| | <p>Bildfigur auszuwählen und die Situation aus der Perspektive dieser Figur zu schildern. Das Bild macht auch ohne einen weiteren Einstieg in die zeitgenössische Rezeption deutlich, dass Galileis Arbeits- und Denkweise von vielen seiner Zeitgenossen abgelehnt wurde.</p> |
| 3. | <p>Die Schüler/innen erstellen Baupläne für Wasseruhren zur Zeitmessung und bauen diese (zeitgenössische Wasseruhr -> <u>Material 8-c</u>). Eine geeignete Wasseruhr zeichnet sich durch einen möglichst konstanten und angemessen starken Wasserstrom aus. Das setzt einen möglichst konstanten hydrostatischen Druck in der Wasseruhr voraus. Alternativ können Wasseruhren vom Lehrer vorbereitet werden (Beispiel: <u>Material 8-d</u>).</p> |
| 4. | <p>Die Schüler/innen entwerfen einen Versuchsplan, um die Galileischen Messungen nachzustellen und nehmen Messwerte auf (Messwerte mehrmals bestimmen!). Sie schließen mit der Planung und Durchführung möglichst selbsttätig die Lücke zwischen der theoriegeleiteten Darstellung der Messergebnisse im Szenischen Dialog zum realen Experiment.</p> |
| 5. | <p>Anschließend werde die Messergebnisse mit denen Galileis verglichen. Abweichungen werden im Hinblick auf die Unterscheidung von <i>Optimierung</i> und <i>Idealisierung</i> diskutiert (Messungenauigkeit, systematische Fehler durch Reibung, systematische Fehler durch Rotationsenergie der Kugel).</p> |
| 6. | <p>Abschließend wird eine Phase des „Philosophierens mit Kindern“ eingeleitet. Die Schüler/innen entwickeln in Kleingruppendiskussionen eine vorläufige Antwort auf die Frage, ob die Natur zählen könne. Die Lehrkraft ordnet und moderiert die Ideen der Schüler/innen und kommentiert sie erst am Schluss (Hilfestellungen -> <u>Kap. 5.3.3 Die Rolle der Mathematik bei der Deutung der Natur</u>).</p> <p>Mögliche unterstützende Arbeitsaufträge:</p> <p>Diskutiert in Eurer Gruppe darüber, ob Mathematisierung für die Auswertung eures Experiments mit der schiefen Ebene einen Nutzen hatte. Diskutiert in der Gruppe darüber, ob es sich beim Mathematisieren um eine naturwissenschaftliche Arbeitsweise handelt. Zieht dabei auch weitere Beispiele aus dem Physikunterricht heran.</p> <p>Galilei bezeichnete die „Mathematik als Sprache der Natur“. Was meint er damit?</p> |
| 7. | <p>Die Ergebnisse der Reflexion auf die Rolle der Mathematik werden in der <u>Reflecion Corner</u> generalisiert (zentrale Stichworte: Mathematisierung der Natur, theoriegeleitetes Denken).</p> |

Alternativ kann auch eine Einstieg über die Experimentiertätigkeit der Schüler/innen gewählt werden. Der Szenische Dialog würde dann in einem folgenden Unterrichtsschritt als Deutungshilfe für die Messergebnisse eingesetzt

werden können. Prinzipiell besteht aber die Gefahr, die Schüler/innen mit einem eigenständigen Nacherfinden der Galileischen Experimente zu überfordern. Der oben geschilderte Unterrichtsverlauf hat den Vorteil, eine kleinschrittige Versuchsanleitung überflüssig zu machen. Der Szenische Dialog motiviert die Schüler/innen zur Rekonstruktion eines wissenschaftlichen Experiments. Ungeeignet ist der Arbeitsauftrag, die Galileischen Messergebnisse zu überprüfen, da er aus der Schülersicht wenig glaubhaft erscheint.

7.8 Astronomische Beobachtungen und die Einheit der Physik

In Abschnitt 7.3 wurden die unterschiedlichen Vorstellungen der Weltordnung zwischen Galilei und Aristoteles deutlich. Für Aristoteles war die Unterscheidung zwischen Bewegungsgesetzen, die auf der Erde oder für Himmelskörper gelten sollten, fundamental. Viele Zeitgenossen Galileis hielten an dieser Unterscheidung fest und sahen den Himmel von einem fünften Element ausgefüllt, in dem die Himmelskörper sich reibungsfrei und fortdauernd auf Kreisbahnen um die Erde bewegen konnten.

Galilei erhielt 1609 Kunde von einem neuartigen Instrument, dem Teleskop, auf das der Holländer Jan Lipperhey ein Patent angemeldet hatte. Es bestand aus einem konvexen Objektiv mit langer Brennweite, einem konkaven Okular mit kurzer Brennweite und einer Aperturblende zur Steigerung der Bildschärfe[1]. Durch Verwendung besserer Linsen konnte Galilei die Vergrößerung zunächst auf den Faktor 9 später noch weiter steigern. Mit diesem Instrument machte er zahlreiche astronomische Entdeckungen:

- Die Mondoberfläche hat eine Struktur aus Bergen und Tälern, die denen der Erde gleichen.
- Der Jupiter wird von mehreren Monden umkreist (Galilei entdeckte die vier größten Monde). Darin ähnelt er der Erde.
- Die Venus weist Phasen wie der Mond auf, was nur mit einer Umkreisung der Sonne erklärt werden konnte.
- Die Sonne ist kein perfekter Himmelskörper, sondern weist eine veränderliche Fleckenstruktur auf.
- Die Milchstraße besteht aus einzelnen Sternen und ist kein einheitliches Band.

Galilei sah darin starke Evidenz für das Kopernikanische Weltsystem. Himmelsobjekte erschienen gemäß seinen Beobachtungen weit weniger „unirdisch“ zu sein, als die Peripatetiker (Schule nach Aristotelischer Lehre) dies vertraten.

Die unterschiedlichen Weltsysteme werden im Zusammenhang mit der Frage, ob eine einheitliche oder uneinheitliche Physik (der Erde und des Himmels) gelte im Kontext der Neuentwicklung des Fernrohrs diskutiert. Dazu dient der Szenische Dialog in Material 9.

Zusätzlich können die Schüler/innen Nachbauten von Galilei-Teleskopen verwenden, um z.B. Mondbeobachtungen Galileis nachzustellen[2]. Dies kann im Rahmen einer „Sternguckernacht“ in der Schule geschehen. Dabei sollte die Qualität der Teleskope nicht unbedingt besonders hoch sein. Zwar waren die Linsen Galileis

nach zeitgenössischen Maßstäben recht hochwertig, können aber mit den heute industriell hochwertig hergestellten Linsen nicht verglichen werden. Aus diesem Grund hat Aristoteles im Dialog auch die Möglichkeit, die Beobachtungen Galileis anzuzweifeln. Die Interpretation der Beobachtungen als Evidenz der Kopernikanischen Theorie war daher – wie Beobachtungen in der Wissenschaft generell – theoriegeleitet.

Das Material 11 stellt einen Originaltext von Galilei an Markus Welser zur Verfügung, mit dem Galilei über wissenschaftliche Fragen korrespondierte. Galilei macht klar, dass ihm wichtige astronomische Beobachtungen ohne eine technische Innovation – das Teleskop – nicht möglich gewesen wären.

Zur Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften (z.B. für Reflection Corner) stellt dieser Abschnitt folgende Aspekte bereit:

- Theoriegeladenheit der Beobachtung
- Vereinheitlichungsbemühen der Naturwissenschaften
- Technische Innovationen treiben Erkenntnisprozesse voran

Weitere Anregungen und mögliche Arbeitsaufträge:

- Galilei beobachtete die Himmelskörper mit Hilfe eines Teleskops. Informiert euch, wie ein Galilei-Teleskop aufgebaut ist und erklärt mit Hilfe des Strahlengangs das Funktionsprinzip.
- Arbeitet die wesentlichen Entdeckungen Galileis heraus (Material 9 und/oder Material 10).
- Galilei unterstützt das Kopernikanische Weltsystem. Klärt, inwiefern seine Beobachtungen geeignet sind, dieses Weltsystem zu unterstützen.
- Galilei schreibt in seiner Astronomischen Botschaft (Material 10), die Entdeckungen seien nur dank des „Sehglases“ möglich gewesen. Diskutiert in der Gruppe darüber, inwiefern früher und auch heute die Entwicklung neuer Technologien/Forschungsinstrumente für neue Erkenntnisse in den Naturwissenschaften sorgt. Findet dazu weitere Beispiele aus den Naturwissenschaften.
- Galilei beobachtete unter anderem die Oberfläche des Mondes und fertigte detailgetreue Skizzen an. Beobachtet mit dem Nachbau des Galilei-Teleskops selbst die Mondoberfläche und fertigt eigene Skizzen an. Welche Schwierigkeiten könnten sich bei der Beobachtung des Mondes für Galilei ergeben haben, wenn er ein vergleichbares Teleskop benutzt hat? Betrachtet zum Vergleich die Mondoberfläche auch mit einem modernen und hochwertigen Teleskop und zeigt Unterschiede auf. (Alternativ können hier hochwertige Bilder des Mond, die durch ein Teleskop fotografiert wurden, zur Verfügung gestellt werden.)
- Folgenden Link (englisch) könnt Ihr nutzen, um euch über den Aufbau des Galilei-Teleskops und Galileis astronomischen Forschungsbereiche zu informieren:

<http://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/cannocchiale/index.html>

Führt auf dieser Seite auch die Simulation der Mondbeobachtung durch!

- Entwerft ein kurzes Streitgespräch zwischen einem Befürworter und einem Gegner des kopernikanischen Weltbildes, indem Ihr die Argumente Galileis, die er aus seinen astronomischen Beobachtungen gezogen hat, einbezieht! Spielt dieses Streitgespräch mit verteilten Rollen vor!

[1] Zur Entwicklungsgeschichte des Teleskops im Kontext der Entdeckungen Galileis siehe Teichmann und Höttecke (2009). Dort werden auch Lehr-Lern-Aspekte zur Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaft vorgestellt.

[2] Einfache Modelle von Galilei-Fernrohren sind z.B. erhältlich unter <http://www.astromedia.de/>

8 Lernschwierigkeiten

8.1 Präkonzepte zu Trägheit

Das physikalische Konzept der Trägheit entspricht nicht den Alltagserfahrungen von Schülerinnen und Schülern. Dass ein kräftefrei sich bewegender Körper sich tatsächlich träge verhält und Richtung und Betrag der Geschwindigkeit sich nicht ändern, ist nicht unbedingt glaubwürdig. Im Gegenteil, ein wesentliches Element des Schülervorverständnisses besteht darin, dass für eine Bewegung (auch für gleichförmige) eine Kraft als Ursache gedacht wird. Die Kraft wird von einigen Schülern und Schülerinnen auch ähnlich einer mittelalterlichen Impetustheorie als eine Art mitgegebene Kraft verstanden (Schwung, Ruck). Weiterhin zeigen empirische Studien, dass aus der Schülerperspektive ein qualitativer Unterschied zwischen Ruhe und Bewegung bestehen soll (z.B. Nachtigall, 1986). Auch diese Vorstellung entspricht unseren Alltagserfahrungen, widerspricht aber der modernen physikalischen Theoriebildung. Trägheit wird von Schülern auch als Lahm-Sein oder im Sinne einer zu überwindenden Schwelle verstanden. Es kann auch sein, dass Trägheit selbst als eine Art Widerstands-Kraft gegen Bewegung gedeutet wird (Jung & Wiesner, 1981). Dann wird die leibliche Erfahrung des träge Seins (z.B. in einem Auto, das beschleunigt) als Wirken einer Kraft gedeutet. Dies gilt aber aus der Perspektive nicht beschleunigter Systeme als physikalisch nicht korrekt.

Die vorliegende Fallstudie fokussiert die Entwicklung des Schülervorverständnisses über bewegte Objekte hin zu physikalisch-fachlichen Vorstellungen. Ruhe und Bewegung gelten bei Aristoteles noch explizit als zu unterscheidende Zustände. Indem die Aristotelische Mechanik im Unterricht explizit thematisiert wird, bieten sich den Lernern Anknüpfungspunkte für ihr eigenes Denken. Mit dem Übergang von der Aristotelischen zur Galileischen Mechanik wird eine neue Klassifikation von Bewegungen eingeführt. Ruhe und gleichförmige Bewegungen sind nun Teil der gleichen Klasse. Die beiden historischen Protagonisten dienen daher dazu, das Schülervorverständnis selbst zu explizieren und weiterzuentwickeln.

8.2 Die “Reflection Corner“ – eine Methode zur expliziten Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften

Die fachdidaktische Forschungslage zeigt an, dass ein Lernen über die Natur der Naturwissenschaften eher gelingt, wenn Lerngelegenheiten bereit gestellt werden, in denen die Schüler und Schülerinnen explizit auf dieses Thema reflektieren. Wie aber soll das geschehen? Die Vorgestellte Methode (Text in Englisch) ermöglicht eine strukturierte Reflexion auf die Funktionen, Möglichkeitsbedingungen oder Charakteristika von Naturwissenschaft und naturwissenschaftlichem Wissen. Es geht darum, vom thematisierten Einzelfall Rückschlüsse auf die Naturwissenschaften als solcher zu ziehen. Dabei dienen die Erfahrungen, die im Rahmen der Fallstudie gewonnen wurden, als Ausgangsbasis.

9 Pädagogisch-didaktische Fähigkeiten

9.1 Umgang mit Ergebnisoffenheit

Die Fallstudie umfasst mehrerer ergebnisoffene Aktivitäten.

Die Übung zur Ordnung und Klassifikation von Bewegungen (Kapitel 7.1) führt zu verschiedenen Schüler-Ergebnissen. Wie soll man als Lehrer damit umgehen? Es wäre sicher problematisch, Klassifikationen, die weder der Galileischen (was die Schüler/-innen überfordern würde) noch der Aristotelischen (was möglich ist) ähnlich sind, als falsch zu bemängeln. Ein Qualitätsunterschied in den Arbeitsergebnissen der Schüler/-innen lässt sich aber dennoch bestimmen und zurückmelden: Sind die Kategorien in sich konsistent? Konsistent wäre z.B., wenn Bewegungen nach dem Medium, in dem sie stattfinden, und ihrem Ort unterschieden würden (in der Luft, im Wasser, auf der Erde, im Weltraum). Inkonsistent wären z.B. Klassifikationen, die funktionelle Kategorien mit physikalischen mischen (z.B. Bewegungen zum Transportieren von etwas, Auftriebsbewegungen in einem Medium mit geringerer Dichte).

In der Egg-Race-Übung (Kap. 7.4) sollen die Schüler/-innen eine Knetekugel eine schiefe Ebene hinunter und dann möglichst weit ausrollen lassen. Dieser ergebnisoffene Versuch führt zur Idee der Optimierung. Die Schüler/-innen kommen zu verschiedenen Problemlösungen und -ergebnissen. Wie beurteilt man die verschiedenen Arbeitsergebnisse und gibt ein angemessenes Feedback? Neben dem Erfolge (die Knete rollt am weitesten aus) bietet sich auch die Systematisiertheit der Vorgehensweise der Schüler/-innen als Feedback-Kategorie an. Hat man Versuchsparameter wahllos oder strukturiert variiert? Sind Messergebnisse aufgenommen und verglichen worden? Hat man auf Vorwissen zurück gegriffen, um das Problem zu lösen?

9.2 Gestaltung der expliziten Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften

Die Moderation von Offenheit betrifft ebenfalls Schülerdiskussionen und offene Unterrichtsphasen wie die explizite Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften mit der Reflection Corner. Offene Diskussionsphasen sind im naturwissenschaftlichen Unterricht weniger üblich als in den Geisteswissenschaften. Der Lehrer hat die Funktion, die Beiträge der Schüler/-innen zu moderieren, zu ordnen und zu strukturieren. Ein Tafelbild kann hilfreich sein, in dem der Lehrer verschiedene Wortbeiträge der Schüler/-innen nach Themen clustert. Erst wenn das Tafelbild erstellt ist, wird es von den Schülern/-innen und abschließend vom Lehrer bewertet. Solche Moderationsmethoden sollen den sonst kleinschrittigen Lehrer-Schüler-Lehrer-Dialog durchbrechen, in dem die Schüler/-innen häufig nur zu erraten versuchen, was der Lehrer gern hören möchte.

Wissenschaftliche Studien zeigen, dass ein Wissen über die Natur der Naturwissenschaften auch in ansonsten gutem Fachunterricht nicht einfach miterworben wird. Das ist selbst dann nicht sehr wahrscheinlich, wenn der Unterricht sich sogar an Geschichte und Philosophie der Naturwissenschaften orientiert. Lernwirksamer dagegen sind explizite Reflexionen auf diesen Lernbereich. Aus diesem Grunde wurde die Methode der „Reflection Corner“ entwickelt, die dem Lehrer helfen soll, Reflexionsprozesse auf Seiten der Schüler anzuregen und zu moderieren.

9.3 Philosophieren mit Kindern

Die Fallstudie wirft die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Mathematik und physikalischer Beschreibung auf (Kap. 7.7). Vielen Physiklehrern fehlt es hier an philosophischer Hintergrundinformation, um die Schüler/-innen zu eigener philosophischer Reflexion anregen und ihre Diskussionsergebnisse einordnen und bewerten zu können. Hilfreich kann daher die Lektüre von Texten zum Thema sein (z.B. Text von E.P. Wigner und E. Hedrich). Ein wesentliches Ergebnis dieses Abschnitts der Fallstudie besteht darin, die Schüler/-innen erfolgreich zu eigenem Nachdenken anzuregen. Die Angemessenheit ihrer Antworten im Hinblick auf die philosophische Diskussion ist dagegen weniger wichtig.

9.4 Umgang mit Szenischen Dialogen

Im Literaturunterricht sind es Lehrer gewohnt, szenische Dialoge von Schülern/-innen vortragen oder auch inszenieren zu lassen. Im Physikunterricht dagegen nicht. Die folgenden Arbeitsschritte sind hilfreich für die Auswertung der Dialoge:

- Lesen mit verteilten Rollen
- erstes Leseverständnis sichern (Worum geht es?)

- intensive Textlektüre in Einzelarbeit, Schüler unterstreichen zentrale Textpassagen
- vertieftes Leseverständnis im Klassengespräch sicher, Lehrer stellt Schlüsselfragen
- abermalige szenische Lesung (nun mit vertieftem Textverständnis)
- eventuell wird ein Tafelbild mit den kontrastierenden Positionen erarbeitet
- subjektive Einschätzung der verschiedenen Positionen durch die Schüler/-innen im Hinblick auf Glaubwürdigkeit, Angemessenheit, Richtigkeit

10 Erprobung und Evaluation der Fallstudie

Die Fallstudie wurde in Teilen mehrfach im Unterricht der Mittelstufe (ca. 14-15 Jahre) erprobt. Die Erprobungsergebnisse sind unmittelbar in die Gestaltung der Materialien eingeflossen.

Um die Fallstudie fortwährend zu Verbessern, sind wir auf weitere Rückmeldung der Lehrerinnen und Lehrer angewiesen. Wenn Sie die Fallstudie "Was ist Bewegung?" oder Teile daraus unterrichtet haben, wären wir an Ihrer Einschätzung sehr interessiert. Bitte senden Sie eine E-Mail mit den Antworten auf unsere Fragen an Dietmar Höttecke. Vielen Dank im voraus!

Allgemeines:

- Angaben zur Klasse, Anzahl aufgewendeter Unterrichtsstunden, Alter der SuS?
- Gesamteinschätzung der Fallstudie bezüglich des Erwerbs fachlicher Konzepte (Trägheit), nos-Konzepte (Rolle von Mathematisierung, Optimierung, Idealisierung, wiss. Kontroversen, Rolle technischer Innovationen wie Fernrohr), Angemessenheit für die gewählte Jahrgangsstufe?
- Gesamteinschätzung von Interesse und Motivation der SuS auf der Sichtebeene des Unterrichts
- Ist der Unterricht über die Fallstudie den Arbeits- und Zeitaufwand wert?
- Musste die Fallstudie an besonderen Stellen gekürzt oder ausgedehnt werden? Wenn ja, wo und warum?
- Welche Gelingensbedingungen der Fallstudie in ihrer Gesamtheit lassen sich benennen?
- Welche groben Änderungen am Konzept der Fallstudie, an empfohlenen Methoden oder Materialien sind angezeigt?

Lehrerperspektive:

- Welche Teile der Fallstudie waren einfach, welche schwer zu unterrichten?
- Bedurfte es bestimmter Lehrerexpertise um Teile der Fallstudie (oder die ganze) zu unterrichten?
- Wurde der Unterricht aus Lehrersicht als besonders "anders" als herkömmlicher Physikunterricht empfunden?
- Würden Sie die Fallstudie oder Teile darauf auch in Zukunft unterrichten?
- Was würden sie einem Kollegen raten, wenn er diese Fallstudie demnächst unterrichten möchte?

- War der Vorbereitungsaufwand für Ihren Unterricht überdurchschnittlich hoch oder niedrig?

Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften:

Wurde die Reflection Corner eingesetzt? Wenn ja, wie und mit welchen Ergebnissen (Ergebnisse gegebenenfalls bitte aufbewahren)?

- Waren die Hinweise zur Nutzung der R.C. ausreichend und informativ für den Lehrer?
- Konnte auch auf andere Weise auf die Natur der Naturwissenschaften im Unterricht reflektiert werden?
- Haben die SuS das Thema Natur der Naturwissenschaften als verglichen mit sonstigem Physikunterricht als "andersartig" empfunden?
- Löste das Thema Natur der Naturwissenschaften Interesse aus (zumindest auf der Sichtebeine des Unterrichts)?
- Haben sich Vorstellungen der SuS über die Natur der Naturwissenschaften erkennbar entwickelt?
- Konnten bezüglich des Themas Lernschwierigkeiten erkannt werden?
- Ist der Prozess expliziter Reflexion auf die Natur der Naturwissenschaften gelungen?

Szenische Dialoge:

- Wie wurden die Dialoge eingesetzt (Lesung durch Schüler/Lehrer; mehrfache Inszenierung; theatralisch inszeniert oder vorgetragen...)?
- Wie wurden die Dialoge ausgewertet (s. z.B. die Hinweise für Lehrer im Wiki)?
- Welche zusätzlichen Medien, Unterrichtsschritte wurden eingesetzt oder sind empfehlenswert?
- Wie haben die SuS die Dialoge empfunden?
- Konnten die grundsätzlichen Positionen und ihr Konflikt jeweils erkannt und benannt werden?
- Gesamteinschätzung des Mediums Szenischer Dialog?

Klassifizieren und Ordnen von Bewegungen:

Welche Klassifikationen entwickeln die SuS selbst?

- Wird die Aufgabe, Bilder zu ordnen, motiviert bearbeitet?
- Sehen die SuS die Funktion und den Sinn der Aufgabe ein?
- Erkennen die SuS den lebensweltlichen Charakter der Aristotelischen Klassifikation von Bewegungen?
- Gelingt der Übergang zur Klassifikation nach Galilei?
- Wie beurteilen die SuS die abstrakte Klassifikation Galileis? Wird sie als lebensweltfremd angesehen (was sie ja ist)?
- Welche im Wiki angebotenen Aufgaben und Materialien wurden verwendet, abgewandelt (wie?) und haben sich bewährt oder nicht bewährt?

Schülerversuch Optimierung an einer schiefen Ebene (Egg-Race):

- Wie wurde der Schülerversuch motiviert?
- Haben die SuS kreativ und erfolgreich gearbeitet?
- Welche Ergebnisse haben die SuS wie erreicht?
- Konnten die SuS ihre eigenen experimentellen Ideen erfolgreich umsetzen?
- Wurden Versuchsbedingungen planvoll und strukturiert variiert oder tendieren die Schülerstrategien eher zu einer Versuch-Irrtum-Strategie?
- Welche fachlichen oder auch methodischen Lernschwierigkeiten konnten erkannt werden?
- Benötigten die SuS besondere Unterstützung durch den Lehrer?
- Wurde die Bedeutung des Optimierens experimenteller Bedingungen als wesentlicher Schritt des Experiments erkannt?
- Welche im Wiki angebotenen Aufgaben und Materialien wurden verwendet, abgewandelt (wie?) und haben sich bewährt oder nicht bewährt?

Idealisierung und Gedankenexperiment als Methode der Physik:

- Wie wurde der Übergang von der Optimierung zur Idealisierung vom Lehrer gestaltet?
- Haben die SuS die Funktion von Gedankenexperimenten, Abstraktion und Idealisierung verstanden?
- Wie wurden Idealisierung und Gedankenexperimente in den Naturwissenschaften von den SuS eingeschätzt?
- Welche im Wiki angebotenen Aufgaben und Materialien wurden verwendet, abgewandelt (wie?) und haben sich bewährt oder nicht bewährt?

Versuche mit Galileis schiefer Ebene - Mathematik als Sprache der Natur:

- Wurde der historische Nachbau der Fallrinne eingesetzt? Wenn ja, wie und mit welchem Erfolg?
- Wie wurden die Fallversuche motiviert und angeleitet?
- Wie wurde das Experimentieren mit der Fallrinne von den SuS beurteilt?
- Welche Hilfestellungen waren nötig, damit die SuS ein Fallgesetz erkennen?
- Wie formulieren die SuS ein Fallgesetz?
- Wurde der Charakter des Fallgesetz als Zahlenreihe erkannt? Wenn nicht von allein, mit welchen Hilfestellungen?
- Wurde die Frage, ob die Natur zählen könne, von den SuS als sinnvoll, fordernd, überfordernd, anregend empfunden?
- Gelang das Philosophieren mit Kindern über die Beschreibbarkeit von Natur mit Mathematik (Zahlen)?
- Welche im Wiki angebotenen Aufgaben und Materialien wurden verwendet, abgewandelt (wie?) und haben sich bewährt oder nicht bewährt?

Die Rolle von Fernrohrbeobachtungen: Der Himmel ist der Erde ähnlich:

- Wurden im Unterricht Fernrohrbeobachtungen angestellt? Wenn ja, mit welchen Instrumenten und welchem Ergebnis?

- Wie haben die SuS die Galileische Argumentation einer prinzipiellen Gleichartigkeit von Himmel und Erde empfunden? Schließlich wachsen sie in einer Kultur auf, die die Galileischen Einsichten mit großer Selbstverständlichkeit vertritt.
- Welche im Wiki angebotenen Aufgaben und Materialien wurden verwendet, abgewandelt (wie?) und haben sich bewährt oder nicht bewährt?

11 Verwendete und weiterführende Literatur

Fölsing, A. (1996). Galileo Galilei. Prozeß ohne Ende. Eine Biographie. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.

Galilei, Galileo (1623). *Il Saggiatore*, cited by Forinash, K., Rumsey, W., & Lang, C. (2000). Galileo's Mathematical Language of Nature. *Science & Education*, 9, 449-456.

Galileo, Galilei (reprint 1989). *Sidereus Nuncius or The Sidereal Messenger*. Translated with introduction, conclusion, and notes by Albert van Helden, Chicago and London: University of Chicago Press.

Galilei, Galileo (reprint 2007). *Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*. Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaften, Bd. 11, Verlag Harri Deutsch

Galileo, Galilei (o.J.). *Dialog über dei beiden hauptsächlichen Weltsysteme - Das ptolemäische und das kopernikanische*. Paderborn: Voltmedia, übersetzt aus dem Italienischen von Emil Strauss.

Kühne, U. (2007). Gedankenexperimente in der Physik. Eine wissenschaftshistorischer Überblick auf Chance und Risiken des anschaulichen Denkens. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* 5/56, S. 5-11.

Hedrich, R. (1993). Die nicht ganz so unglaubliche Effizienz der Mathematik in den Naturwissenschaften. *Philosophia naturalis*, 30, S. 106-125.

Jung, W. & Wiesner, H. (1981). Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik. In W. Jung et al. ,*Vorstellungen von Schülern über Begriffe der Newtonschen Mechanik*. Reprint in R. Müller, R. Wodzinski & M. Hopf (Hrsg.) (2004), *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis Verlag Deubner.

Alexandre Koyré: *Galilei. Die Anfänge der neuzeitlichen Wissenschaft*. Wagenbach, Berlin 1988.

Lawson, A.E. (2002). What Does Galileo's Discovery of Jupiter's Moons Tell Us About the Process of Scientific Discovery? *Science & Education*, 11.1-24.

Learner, R. (1991). Die Geschichte der Astronomie und die Entwicklung des Teleskops seit Galilei. Bindlach: Gondrom-Verlag.

Leisen, Josef (1999). Der Szenische Dialog. Ein unterrichtsmethodischer Vorschlag zu Physik und Philosophie. Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 48 (4) 35-37.

Nachtigall, Dieter (1986). Vorstellungen im Bereich Mechanik. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie, 13, S.16-20.

Teichmann, J. & Höttecke, D. (2009). Das Fernrohr Galileis. Materialien für Unterricht zur Wissenschaftsgeschichte und zum Nachdenken über die Natur der Naturwissenschaften. Naturwissenschaften im Unterricht - Physik, 20 (103), S. 18-22.

Wigner, E.P. (1960). The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. Communications in Pure and Applied Mathematics, vol. 13, No. I, <http://www.dartmouth.edu/~matc/MathDrama/reading/Wigner.html> (19.11.2009).

Übersicht über die Lehr-Lern-Materialien zur Fallstudie "Was ist Bewegung?"

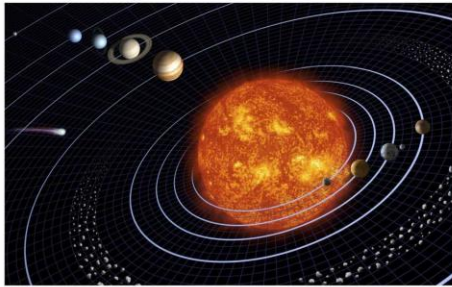
| | |
|--------------------|--|
| <u>Material 1</u> | Bildmaterial zur Aufgabe "Ordnung von Bewegungen" |
| <u>Material 2</u> | Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Die Lehre des Aristoteles |
| <u>Material 3</u> | Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Perspektiven auf das Problem der Bewegung. |
| <u>Material 4</u> | Szenischer Dialog zwischen Galilei und Aristoteles: Idealisierung und Trägheit |
| <u>Material 5</u> | Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Gedankenexperiment Freier Fall |
| <u>Material 6</u> | Gedankenexperiment zum freien Fall unterschiedlich schwerer Körper (englische Übersetzung eines Originaltextes von Galilei, <i>de motu</i>) |
| <u>Material 7</u> | Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei über den freien Fall und die Rolle der Mathematik in der Naturwissenschaft |
| <u>Material 8</u> | Bildmaterial zur Fallstudie |
| <u>Material 9</u> | Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei zu Fragen der Astronomie und des wahren Weltsystems |
| <u>Material 10</u> | Originaltext von Galilei: Astronomische Botschaft (Siderius Nuncius, um 1610, Auszug) |
| <u>Material 11</u> | Auszug aus einem Brief Galileis über die Rolle des Teleskops für seine astronomischen Entdeckungen |

Bewegung - Material 1

Material 1 ist auf dieser Seite im JPG-format und im Download als [pdf-Datei](#) erhältlich. Ähnliche Abbildungen wie die hier vorgeschlagenen findet man im Internet oder Zeitschriften

- Material 1: Ordnen von Bewegungen / Classification of Bodies in Motion





Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Die Lehre des Aristoteles

A: Mein lieber Galileo, Ihr vermögt Euch kaum vorzustellen, wie sehr es mich freut, mit einem Mann der Wissenschaft wie Euch diskutieren zu dürfen. Seid mir gegrüßt.

G: Die Freude ist auf meiner Seite. Auch ich erbiere Euch meinen ehrfürchtigen Gruß! Zu gern möchte ich mit euch über die Bewegungen der Körper in dieser Welt sprechen. Wir wissen doch noch wenig darüber.

A: Nun, das würde mich wundern. Schließlich habe ich schon vor langer Zeit vieles darüber geschrieben. Seitdem wird doch wohl einiges an neuem Wissen hinzugekommen sein?

G: Sicherlich! Doch auch vieles, was man ganz sicher zu wissen glaubte, wird heute in Frage gestellt.

A: Und muss ich befürchten, dass sich darunter auch einige meiner Ideen befinden?

G: Mein lieber Aristoteles, Ihr seid ein Mann der Wissenschaft und wisst, dass kaum eine Idee ewig besteht.

A: Da habt ihr recht. Aber die eigenen Ideen sind einem oft so lieb wie die eigenen Kinder.

Doch ich entsinne mich: So gab es schon zu meiner Zeit oft Auseinandersetzungen unter den Gelehrten.

G: Ich glaube, Ihr spielt darauf an, wie die Wissenschaftler Vorgänge in der Natur ordnen wollten?

A: Genau das meine ich.

Wie ordnet man die Natur? Eigentlich tun das ja alle Menschen, auch wenn sie keine Gelehrten sind. Sie ordnen nach oben und unten, schwer oder leicht, schnell oder langsam oder sie ordnen die Dinge nach ihren Funktionen. Ein Gabel ist eben etwas anderes als eine Mistforke.

Doch wir Gelehrten ordnen die Natur nach wohl überlegten Prinzipien, die vernünftig und durchdacht sein müssen. Das habe ich ja damals gezeigt.

G: Bis heute berufen sich sehr viele Gelehrte auf Eure berühmten wissenschaftlichen Schriften. Sie wollen dabei Eure Ideen aufs Wortwörtlichste wiedergeben. Doch ich hege diesbezüglich – verzeiht mir – großen Zweifel. Manch einer hat Eure Ideen auch falsch gedeutet. Umso glücklicher bin ich jetzt, dass ich die Gelegenheit habe, mit Euch selbst zu sprechen. Nehmt Euch ein wenig Zeit und berichtet mir bitte persönlich über Eure Sichtweisen zu dem Phänomen der Bewegung. Ich möchte doch sicher gehen, dass ich Eure großartigen Schriften nicht falsch verstehe.

A: Euer Durst nach Erkenntnis schmeichelt mir. Der Schlüssel für mein Wissen, so möchte ich Euch anvertrauen, liegt im Wesentlichen in der Nähe zur Natur. Auf zahlreichen Spaziergängen übte ich mich darin, die Natur mit allen meinen Sinnen zu erfahren.

G: Aber wie habt Ihr denn eine Ordnung in diese vielfältige Welt bringen können?

Mir erscheint es fast unmöglich, alle Details auf einmal zu berücksichtigen.

A: Nur nicht so ungeduldig! Ich sagte doch bereits, dass für uns Gelehrte gewisse Prinzipien die Grundlage einer jeden Ordnung bilden müssen.

G: Diese wollen dann aber wohlüberlegt sein.

A: Ja, wie ich ja schon sagte.

Erst nach langer Überlegung kam ich zu der Erkenntnis, dass sich Bewegungen nach ihren Zwecken ordnen lassen. Denn wahrhaft geschieht nichts in der Natur ohne einen Zweck zu verfolgen. Aus meinen Beobachtungen zog ich den Schluss, dass das natürliche Ziel sehr vieler Bewegungen auf der Erde die Ruhe sein muss. Dieses Ziel zu erreichen, treibt jede Bewegung an und ist ihre Ursache!

A. lässt einen Stein fallen.

Seht nur selbst. Der Stein bleibt liegen. Er hat seinen Zweck erreicht, zur Erde zu fallen und dort zur Ruhe zu kommen!

G: Nun ja, da habe ich meine Zweifel, aber dazu später.

Erklärt mir doch bitte jetzt, wie Ihr bei Eurer Arbeit vorgegangen seid!

A: Ja, ja, Moment. Ich bin ja noch nicht fertig.

Denkt doch nur an einen Stein, den Ihr anstoßt. Seht selbst!

A. stößt den Stein an. Der kommt zur Ruhe.

Nach kurzer Strecke wird er langsamer und langsamer, bis schließlich alle Bewegung vererbt ist und er unbeweglich auf einem Platz verharret. So verhält es sich mit allen Dingen: Sie kommen früher oder später zur Ruhe.

G: Soweit habe ich Sie verstanden, doch sollte das schon alles sein?

A: Nein, gewiss nicht. Des Weiteren stellte ich mir die Frage, wie sich Bewegungen noch weiter voneinander unterscheiden ließen.

G: Spielt Ihr auf die Unterteilung in vier Arten der Bewegung an?

A: Ich merke, Ihr habt meine Lehren eifrig studiert. Gut so! In der Tat lassen sich die Bewegungen in drei irdische und eine himmlische Bewegung unterteilen.

G: Könnt Ihr mir ein Beispiel geben, wie ihr Euer Ordnungsprinzip benutzt habt?

A: Wohlan, beginnen wir mit der ersten Art der Bewegungen. Diese geschieht, wenn sich ein Körper bewegt mit dem Zweck, an seinem natürlichen Ort zur Ruhe zu kommen. Das habe ich Ihnen ja schon mit dem Stein vorgeführt.

G: Meint Ihr damit die Klasse der von allein fallenden und aufsteigenden Körper?

A: Ja, denn die schweren streben dem Erdmittelpunkt zu, während die leichten gen Himmel steigen um dort ihren natürlichen Ort zu erreichen. So wie ein Stein zu Boden fällt, steigen Dampf oder Rauch nach oben. Diese Bewegungen gehören zu der ersten Art der Bewegung. Sie sind natürliche Bewegungen.

G: Gut, aber was ist mit lebendigen Menschen, Pflanzen und Tieren. Welchen Zweck ordnet Ihr deren vielfältiger Bewegung zu?

A: Diese Lebewesen tragen ihren Zweck in sich selbst. Sie können ihre Bewegung

selbst bestimmen. Das macht sie besonders. Daher ist auch diese zweite Art der Bewegung als natürlich anzusehen. Lebewesen sind schließlich Geschöpfe der Natur.

G (schmunzelnd): Ich verstehe Sie also richtig, dass es eine natürliche Bewegung zweiter Art ist, wenn ein Schwein sich auf den Futtertrog zu bewegt? Es verfolgt ja den Zweck zu fressen. Wenn das Futter dabei neben den Trog fällt, so nennt ihr diese Bewegung aber eine der ersten Art.

A (ernst): Ihr versteht mich recht gut. Aber, ich hoffe, dass Ihr Euch nicht über mich lustig macht!

G: Das würde ich mir niemals anmaßen! Doch nun sagt mir, was soll mit all den Bewegungen geschehen, die nicht natürlich sind?

A: In der Tat gibt es auch Bewegungen, die einen Körper aus seiner natürlichen Ruhe bringen. Stellt Euch beispielsweise vor (*nimmt den Stein auf und wirft ihn fort*), Ihr werft einen Stein in die Luft, der vorher unbeweglich auf dem Ackerboden ruhte. Sein natürlicher Zweck, die Ruhe auf dem Ackerboden, wird dadurch aufgehoben.

G: Ihr meint, ich zwingen diesem Stein nun einen anderen, ganz unnatürlichen Zweck auf?

A: Genau so ist es und daher nenne ich diese dritte Art der Bewegung eine erzwungene Bewegung. Sie geschehen nicht von selbst. Ein Wagen, der auf dem Feld steht, muss erst von einem Ochsen gezogen werden, bevor er sich bewegt. Lässt dieser äußerer Zweck nach, dann bleibt der Wagen stehen.

G: Doch wenn ich mich recht entsinne, sprachet Ihr noch von einer weiteren Art der Bewegung, nämlich der himmlischen. Was unterscheidet diese von den übrigen irdischen Arten?

A: Die Himmelsbewegungen sind wahrhaft perfekte Bewegungen. Die Planeten bewegen sich ewig ohne zur Ruhe zu kommen. Diese Bewegungen sind von ganz anderer Art als die irdischen Bewegungen.

G: Sie haben keinen Zweck?

A: Da irrt Ihr, denn auch die Himmelsbewegungen verfolgen einen Zweck: Die ewige Bewegung in Kreisbahnen um das Zentrum, die Erde.

G: Ich sehe nun, wie ihr durch den Zweck einer Bewegung zu vier unterschiedlichen Arten von Bewegung gelangen konntet. Auf diese Weise lässt sich wahrlich jede denkbare Bewegung einordnen! Und der Himmel scheint für Euch etwas ganz Besonderes zu sein.

A: Es war ja mein Ziel, alle Bewegungen, die wir beobachten können, zu ordnen. Wie ich schon zu Beginn meiner Ausführungen betonte, ist es von größter Wichtigkeit für uns, der Natur ihre eingeschriebene Ordnung zu entlocken, gerade weil die Natur erst einmal so unübersichtlich erscheint. Ich habe ja auch bereits erkannt, dass alle Materie nach den Elementen Erde, Feuer, Wasser, Luft und Himmelsmaterie zu ordnen ist. Ich hoffe, dass auch meine Elementen-Lehre heute noch gilt, mit der ich die Stoffe der Welt geordnet habe.

G: Nun ja, darüber lasst uns ein anderes Mal diskutieren.

Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Perspektiven auf das Problem der Bewegung.

G: Ich bin Euren Ausführungen über die verschiedenen Arten der Bewegung die ganze Zeit aufmerksam gefolgt. Doch stellt sich mir nun eine Frage, die im Laufe der Zeit fast quälend geworden ist.

A: Dann nur heraus damit!

G: Ich stimme durchaus mit Euch darin überein, dass Bewegungen eine bestimmte Ursache haben. Eines will sich mir doch nicht erschließen: Warum seht Ihr die Ursache einer Bewegung unbedingt darin, dass die bewegten Dinge den letzten Zweck der Ruhe verfolgen?

A (genervt): Ich habe Euch doch schon erklärt, dass bestimmte Kriterien zum Ordnen notwendig sind.

G: Ihr betrachtet den Stein, der von einem Berg herunter fiel, in seinem Endzustand auf dem Erdboden?

A: Gewiss, denn sein innerer Zweck ist es, diesen natürlichen Zustand der Ruhe zu erreichen.

G: Doch habt Ihr Euch noch niemals dem Verlauf der Bewegung angeschaut? Findet Ihr es nicht interessanter zu untersuchen, WIE der Stein fällt? Ich frage mich, was passiert auf dem Weg von dem Berg zum Boden.

A: Ich begreife nicht ganz. Es ist doch einzig wichtig zu wissen, WOZU sich der Stein bewegt. Da wir wissen, dass es sich um eine natürliche Bewegung handelt, wird der Stein naturbedingt in den Zustand der Ruhe streben, bis er diesen erreicht hat. WIE er das tut, lässt sich niemals vorhersagen – DAS ist für jeden Körper einzigartig!

G: Aber es kann doch nicht einzig die Frage geklärt werden, welchen Zweck die Natur letzten Endes bei Bewegungen verfolgt. Ich beschäftige mich nämlich in meinen Studien ebenfalls damit, wie Bewegungen ablaufen, also mit der Bewegung selbst. Das habt Ihr für die Himmelsbewegungen ja auch getan als ihr von den perfekten Kreisbahnen der Planeten gesprochen habt. Hier wollt Ihr sicher wissen, WIE sich die Planeten bewegen? Aber wenn Ihr die Bewegungen auf der Erde betrachtet, dann kümmert Ihr Euch nicht um den Verlauf einer Bewegung, sondern nur um ihren Zweck? Ihr widersprecht Euch!

A: Seid vorsichtig und vergesst nicht, dass die Himmelsbewegungen aufgrund ihrer göttlichen Vollkommenheit mit den irdischen Bewegungen nicht zu vergleichen sind. Nur die Himmelsbewegungen lassen sich von Menschen beschreiben, denn die Planeten sind durch göttlichen Einfluss auf ihre Bahnen gebracht worden. Ich halte Euren Ansatz daher nur für unnötige Arbeit. Ihr droht den wesentlichen Zweck ganz aus den Augen zu verlieren. Wenn Ihr nicht mehr nach den Zwecken fragt, dann werdet Ihr nicht zu wahren Wissen gelangen.

G: Verzeiht, werter Aristoteles, mir scheint, wir sind uns nicht beim Wissen selbst uneinig, sondern bei der Art und Weise, wie wir Wissenschaft betreiben.

A: Ihr wollt behaupten, es wäre falsch beim Forschen so zu verfahren, wie ich es

immer tat?

G: Aber nein! Ich kann euch beruhigen: Das Suchen nach einer Ordnung hinter den Phänomenen ist in der Wissenschaft nach wie vor von besonders großer Wichtigkeit. Nur ordnen wir heute die Bewegungen nicht mehr nach ihrem Zweck.

A: Erstaunlich!

Szenischer Dialog zwischen Galilei und Aristoteles: Idealisierung und Trägheit

(angelehnt an Originaltext Galileis)

Galileo: Ich möchte mit Euch ein kleines Gedankenexperiment unternehmen. Dabei braucht Ihr nichts zuzugeben, wovon Ihr nicht wirklich überzeugt seid.

Aristoteles: Das würde ich auch nie tun!

Galileo: Stellt Euch eine ebene und sehr glatte Fläche vor. Sie könnte zum Beispiel aus Glas sein. Die Fläche ist etwas geneigt. Und nun stellt Euch noch eine vollkommen runde Kugel vor. Sie könnte zum Beispiel aus Metall gefertigt sein. Wenn ich nun die Kugel auf die Fläche lege, meint Ihr nicht auch wie ich, dass sie dann liegen bleiben müsse?

G. schmunzelt spitzbübisch.

Aristoteles: Und die Fläche ist geneigt?

Galileo: Freilich, die Voraussetzung habe ich gemacht!

Aristoteles: Dann bleibt die Kugel auf keinen Fall in Ruhe. Sie rollt die geneigte Fläche hinab.

Galileo: Ihr seid ganz sicher, dass die Kugel hinabrollt?

Aristoteles: Ist doch ganz klar! Welche Frage!

Galileo: Ich will Euch nichts einreden.

Aristoteles (ungehalten): Ich glaube, Ihr wollt mich ganz kirre machen!

Galileo: Nun, so ist es. Wie lange und mit welcher Geschwindigkeit würde nun die Kugel fortfahren, sich zu bewegen? Beachtet, dass die Kugel vollkommen rund und die Fläche vollkommen glatt sein soll. Alle äußeren und zufälligen Einflüsse schließen wir aus. Auch von der Luft, die ja der Kugel einen Widerstand entgegensetzt, wollen wir absehen.

Aristoteles: Ich habe das schon verstanden. Die Kugel würde in diesem Fall immer schneller hinab rollen. Das liegt doch auf der Hand. Und je größer die Neigung der Glasfläche ist, desto schneller wird die Kugel werden.

Galileo: Denken wir uns die Sache einmal anders herum. Stellt Euch vor, dass die Kugel einen Stoß erhielte und die Glasfläche hinaufrollen würde. Wie lange würde diese Bewegung dauern?

Aristoteles: Die Bewegung wäre ja erzwungen. Wenn man die Kugel nicht immer wieder anstößt, dann würde ihre Bewegung ermatten. Sie würde ausrollen und zuletzt stehen bleiben.

Galileo: Ganz recht. Lässt man die Kugel hinab rollen, wird sie immer schneller. Stößt man sie aber an, damit sie eine Glasfläche hinauf rollt, dann wird sie immer langsamer. Was ist aber, wenn die Fläche weder abschüssig noch ansteigend wäre?

Aristoteles: Nun, die Kugel hat ja nun keinen Grund hinauf noch einen Grund hinab zu rollen. Dann müsste sie in ihrer natürlichen Lage bleiben und ruhen.

Galileo: Das ist auch meine Ansicht, vorausgesetzt, dass man sie nicht vorher

angestoßen hat. Aber was würde denn geschehen, wenn man die Kugel nun angestoßen hat?

Aristoteles: Wenn die Ebene nicht geneigt ist, dann hat die Kugel auch keinen Grund langsamer oder schneller zu werden.

Galileo (laut): Dann hat die Kugel auch keinen Grund, still liegen zu bleiben. Bis wohin würde die Kugel nun rollen?

Aristoteles: Die Kugel würde bis zum Ende dieser spiegelglatten Fläche rollen.

Galileo: Wenn die Fläche aber unbegrenzt wäre, dann dürfte die Bewegung auch niemals enden, oder?

Aristoteles (grübelnd): Mmh, das klingt zwar vernünftig, aber eine Bewegung, die niemals endet? Nein, das ist doch Unsinn! Ihr habt vielleicht Ideen!

Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei: Gedankenexperiment Freier Fall

A: Ich gebe zu, werter Galilei, die Methode der Idealisierung ist in manchen Bereichen ganz gut anzuwenden. Aber ich möchte ich Euch fragen, wie Ihr denn bei solch komplexen Bewegungsarten wie die Fallbewegung verfahren wollt. Ihr wollt diese Bewegungen durch einfache Regeln beschreiben. Ich habe den Fall verschiedener Körper bereits oft beobachtet. Dabei sah ich ganz deutlich, dass schwere Körper den Erdboden schneller erreichen, als leichtere Körper. Ein schwerer Steinbrocken fällt nun – das müsst Ihr zugeben – deutlich schneller nach unten als ein leichtes Seidentuch.

Auch dieses Phänomen kann ich mit meinen Ideen zu den Ursachen von Bewegungen erklären: Je schwerer der Körper ist, desto größer ist auch sein Bestreben zu seinem natürlichen Ort zu gelangen – in diesem Fall, zum Erdboden. Dadurch fällt er schneller als der leichtere Körper. Derselbige hat nämlich nicht so ein hohes Bestreben, den Erdboden zu erreichen. Schließlich steigen ganz leichte Körper wie Rauch sogar nach oben, da dort ihr natürlicher Ort ist. Wie wollt Ihr für all die unzähligen Körper, die es auf Erden gibt, eine einzige allgemeine Regel herausfinden?

G: Ich freue mich sehr, dass Euch meine Worte so stark zu weiteren Überlegungen anregen. Natürlich habe ich Eure Theorien zur Fallbewegung gelesen. Aber ich muss Euch schon wieder widersprechen. Ich glaube nicht, dass die Körper unterschiedlich schnell fallen. Denn es ist in Wahrheit ganz einfach: Alle Körper fallen gleich schnell.

A: Machen Sie die Augen auf, Galilei! Sie sehen sofort, dass Sie im Unrecht sind!

G: Wieder lasst Ihr Euch durch Eure Sinne von dem Wesentlichen ablenken. Ich will es Euch in einem kleinen Gedankenexperiment näher bringen.

A: Ein Gedankenexperiment? Jetzt kommt ihr mir schon wieder da mit!

G: Ich versichere Euch, Ihr werdet genauso aussagekräftige Ergebnisse erlangen, als wenn Ihr es tatsächlich durchführen würdet. Wartet ab und Ihr werdet mir am Ende zustimmen.

Nehmen wir an, es gibt zwei unterschiedlich große Körper aus dem gleichen Materials. Den großen nennen wir A und den kleineren B. Nehmen wir an, wir lassen diese beiden Körper von der gleichen Höhe gleichzeitig hinabfallen.

A: Ich sage Euch, der schwerere Körper A wird wie ein Steinbrocken eher am Boden ankommen. Er wird wegen seiner größeren Masse schneller fallen als der Körper B, der sich wie ein Seidentuch verhalten wird.

G: So habt Ihr es immer gesehen, werter Aristoteles. Wollen wir nun annehmen, wir vereinigen beide Körper A und B indem wir sie fest zusammen binden. Dann lassen wir sie wieder hinabfallen. Ist es dann nicht so, dass sich eine Vereinigung beider Teile, unserer Annahme entsprechend, sich langsamer bewegen müsste als A, der Steinbrocken?

A: Mmh! Da bin ich mir noch nicht so sicher.

G: Überlegt doch nur. Der Eurer Ansicht nach langsamere Körper B muss dann die Bewegung des schnelleren Körpers A abbremsen.

A: Merkwürdige Ideen habt ihr.

G: Wenn also A und B vereint werden, würde die Vereinigung sich langsamer als A allein bewegen. Nun werter Aristoteles, so werdet Ihr mir sicher Recht geben, dass andererseits die Vereinigung beider Körper A und B doch auch schwerer ist als A allein oder B allein. So müsste die Vereinigung, in der die Körper doch fest zusammengebunden sind, insgesamt schneller als A allein hinabfallen. Ihr sagt ja, dass schwere Körper schneller fallen als leichte.

A: Oh, ich erkenne den Widerspruch zur ersten Aussage. Die Vereinigung beider Körper kann nicht gleichzeitig schneller und langsamer als A hinabfallen.

G: Sehen Sie! Da haben wir es. Sie müssen mir recht geben!

A: Aber wissen Sie, lieber Galilei, ich meine, dass wenn Sie ihre Körper A und B zusammen binden ja ein völlig neuer Körper entsteht.

G: Ich sage Euch, die einzige Lösung ist die, dass alle Körper gleich schnell fallen! Körper A fällt so schnell wie Körper B und wenn man beide vereint, fällt auch die so schnell wie A oder B.

A: Und ich bleibe dabei, schwere Körper fallen schneller als leichte und mit ihren merkwürdigen Gedankenexperimenten machen Sie höchst seltsame Voraussetzungen.

Gedankenexperiment zum freien Fall unterschiedlich schwerer Körper

(englische Übersetzung eines Originaltextes von Galilei, *de motu*)

“Let there be two mobiles of the same species, the larger *a*, and the smaller *b*; and, if it can be done, as our adversaries hold, let *a* be moved more swiftly than *b*. There are then two mobiles one of which is moved more swiftly than the other; hence, according to what has been presupposed, the combination of the two will be moved more slowly than the part, which alone, was moved more swiftly than the other. If then *a* and *b* are combined, the combination will be moved more slowly than *a* alone: but the combination of *a* and *b* is larger than *a* alone: hence, contrary to our adversaries' view, the larger mobile will be moved more slowly than the smaller; which would certainly be unsuitable. What clearer indication do we require of the falsehood of Aristotle's opinion? But, I ask, who will not recognize the truth of this on the spot, when he examines it in a pure and simple and natural way? For if we presuppose that the mobiles *a* and *b* are equal and that they are very near each other, then, by the consensus of all, they will be moved with equal swiftness: and if we understand that while they are being moved, they are joined, why, I ask, will they double the swiftness of their motion, as Aristotle held, or increase it? Accordingly, let it be sufficiently confirmed that there exists no cause, *per se*, why mobiles of the same species should be moved with unequal speeds, but there certainly is one why they should be moved with equal speed. But if there were some accidental cause, such as, for example, the shape of the mobile, it must not be classified amongst the causes *per se*: and moreover, the shape helps or hinders the motion but little, as we shall show in the proper place. Also, one must not, as many are in the habit of doing, immediately revert to extremes, by taking, for example, a piece of lead of very large size, and, on the other hand, a tiny blade or a leaf of the same lead, which sometimes will even float on water: for since there is a certain cohesion and (so to speak) a tenacity and a viscosity of the parts of air as well as of water, this cannot be overcome by a very small heaviness.

Accordingly, the conclusion must be understood as concerning those mobiles where the heaviness and size of the smaller one is large enough that it is not hindered by that small tenacity of the medium; such as, for example, a leaden ball of one pound.

Moreover, as for scoffers of this kind, who perhaps persuade themselves that they can defend Aristotle, what happens to them if they revert to extremes, is this: the greater the difference between the mobiles that they choose, the more they will have to toil. For if they take a mobile that is a thousand times larger than the other, before they show that one surpasses the other a thousand times in speed, it will undoubtedly cost them sweat and toil.”

Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei über den freien Fall und die Rolle der Mathematik in der Naturwissenschaft

A: Wir beiden sind uns ja einig, dass der freie Fall für die Wissenschaft sehr bedeutsam ist. Aber er ist doch sehr schwer zu beschreiben. Kaum beginnt eine Körper zu falle, ist diese Bewegung doch schon wieder vorüber.

G: Da habt Ihr Recht und lange habe ich über eine geeignete Konstruktion nachdenken müssen, mit es mir gelingen sollte, den freien Fall zu verlangsamen, ohne das grundlegende Prinzip, das ihm zugrunde liegt, zu verändern.

A: Den freien Fall verlangsamen, sagt ihr? Wie denn nun das wieder?

G: Ich kam auf die Idee, eine Messingkugel eine schiefe Ebene hinabrollen zu lassen. Die Kugel rollt die Ebene hinunter. Tatsächlich fällt sie ja hinunter, nur eben langsamer als wenn ich sie hoch hielte und einfach fallen ließe.

A: Eine kluge Idee. Wenn die Ebene nur sehr wenig geneigt ist, dann fällt die Kugel tatsächlich sehr, sehr langsam. Man kann dabei zuschauen.

Doch ich sehe ein Problem! Ist nicht der Widerstand, den die Ebene der Bewegung der Kugel entgegensetzt, nicht viel größer als der Widerstand der Luft beim Fallen?

G: Da habt ihr schon recht. Das war ein großes Problem für mich. Daher glättete ich sämtliche Oberflächen, sowohl die der schiefen Ebene als auch die der Messingkugel. Auf diese Weise wurde die Kugel auf ihrem Weg nach unten kaum noch abgebremst. Ich glaube, ich kann mich rühmen, einen fast idealen Aufbau entwickelt zu haben.

A: Und wie habt Ihr die Zeit messen können? Mit einer Sanduhr vielleicht?

G: Zugegeben, die Zeitmessung war ein weiteres schwieriges Problem. Mit einer Sanduhr hätte ich kaum verlässliche Messungen machen können. Darum nutzte ich eine Wasseruhr.

A: Ja, ich hörte davon. Eine wahrlich nützliche Erfindung. Man muss ein Gefäß haben, aus dem Wasser aus einer kleinen Öffnung sehr gleichmäßig austritt. Das ausgeflossene Wasser entspricht dann der verstrichenen Zeit während einer Messung. Wiegt man das Wasser nach einer Messung, wiegt man eigentlich die Zeit. Eine schöne Idee!

G: Das will ich meine! Schließlich kam ich zu dem Ergebnis, dass die Kugel im Laufe ihrer Abwärtsbewegung immer schneller wurde. Ich wollte das Gesetz dieser Bewegung genauer verstehen. Ich unterteilte die gesamte Strecke der schiefen Ebene zunächst einmal in gleich lange Streckenabschnitte. Dann musste ich mit meiner Wasseruhr die Zeit messen, die die Kugel benötigte, um verschiedene Streckenabschnitte hinabzurollen.

A: Und, was habt ihr herausgefunden?

G: Ich kam zu einem exakten Gesetz der hinabrollenden Kugel. Zuerst legte die Kugel einen Streckenabschnitt in einer bestimmten Zeiteinheit zurück. Für den zweiten Streckenabschnitt benötigte die Kugel weniger Zeit, sie war

ja auch schneller geworden. In der gleichen Zeiteinheit, die die Kugel für den ersten Streckenabschnitt benötigt hatte, schaffte sie nun drei weitere Streckenabschnitte. Ich ließ die Kugel weiter hinabrollen. In einer dritten Zeiteinheit schaffte die Kugel nun 5 weitere Streckenabschnitte und in noch einer weiteren Zeiteinheit 7 weitere Streckenabschnitte. Das Schneller-Werden meiner Kugel folgte einem interessanten Gesetz: 1-3-5-7 und so weiter! Großartig nicht?

A: Aber ...

G (fällt A. ins Wort): Ich sage Euch, die Natur zählt der Kugel ihren Takt vor. 1-3-5-7-9-11! Hah! Ihr ahnt ja wohl, wie diese Reihe weiter verläuft.

A: Nun...

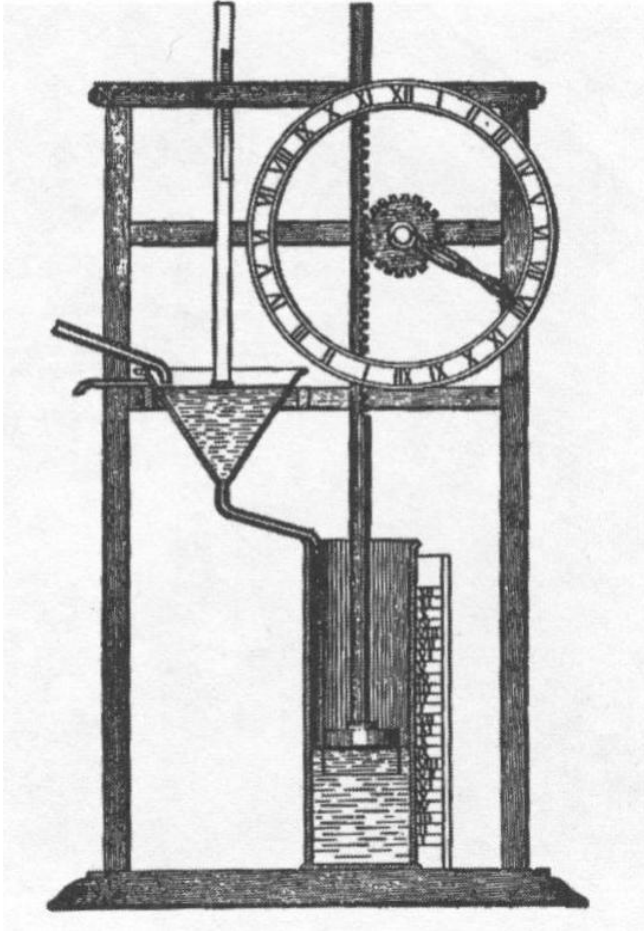
G (fällt A. ins Wort, enthusiastisch): Genau! Die ungeraden Zahlen! Ich sage Euch, wenn ein Körper fällt, dann fällt er nicht irgendwie oder mal so und dann mal wieder so! Er folgt einem klaren Gesetz!

A: Bei allem Respekt, Galileo, ihr argumentiert mir nun doch ein wenig zu mathematisch. So viele Zahlen! Habe ich doch schon bei meinem Lehrer Platon erkennen müssen, dass die Mathematik – widmet man ihr zu große Aufmerksamkeit – den Geist doch nur verwirrt. Und wenn er Euch gekannt hätte, dann hätte ihn das in seiner Ansicht nur bestärkt. Die Mathematik sollte allenfalls eine Hilfswissenschaft sein. Ihr aber wollt ein Naturgesetz einzig auf einem Zahlenspiel gründen.

G: Euren Argwohn gegenüber der mathematischen Beschreibung kann ich wirklich nicht teilen. Vielmehr bin ich der Ansicht, dass das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben ist. Die darin auftauchenden Buchstaben sind Zahlen und geometrische Figuren. Nur deshalb ist die Natur für den Mensch verständlich, da er die Sprache der Mathematik verstehen kann!

A: Oh, ich hoffe doch sehr, dass das nur Eure ganz persönliche Meinung ist. Die Wissenschaft kann doch nicht eine solche Entwicklung genommen haben.

G (freut sich): Ich fürchte, auch dieses Mal muss ich Euch enttäuschen.



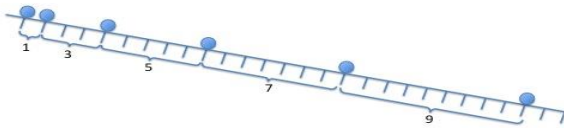
Wasseruhr (Cassidy, D., Holton, G. & Rutherford, James (2002).
Understanding Physics. New York: Springer.)

Bewegung - Material 8

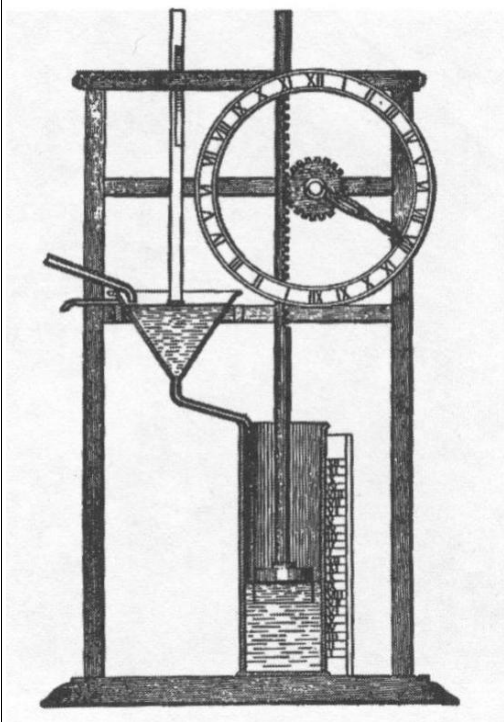


Material 8-a: Darstellung der Demonstration der Fallrinne Gallileis

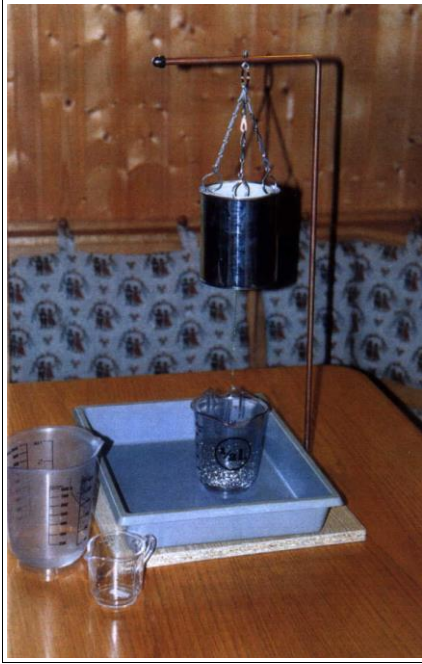
source: http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph07_g8/umwelt_tecnik/07freier_fall/frei_fall.htm



Material 8-b: In gleichen Zeitabschnitten addieren sich die zurückgelegten Wegabschnitte gemäß einer Zahlenreihe aus ungeraden Zahlen.



Material 8-c: Wasseruhr (Cassidy, D., Holton, G. & Rutherford, James (2002). Understanding Physics. New York: Springer.)



Material 8-d: Wasseruhr im Selbstbau

Szenischer Dialog zwischen Aristoteles und Galilei zu Fragen der Astronomie und des wahren Weltsystems

A: Mein lieber Galileo, im Laufe unseres Gespräches erwähntet Ihr mehrfach auch bezüglich der Himmelsbewegungen hättet Ihr einiges Neues zu berichten. Allerdings kann ich mir kaum vorstellen, dass es sich die Gemeinschaft der heutigen Wissenschaftler anmaßt, die Vollkommenheit des Himmels in Zweifel zu ziehen.

G: Nun...

A: Ihr müsst zugeben, alle Vorstellungen, die wir über uns über die Bewegungen der Sterne und Planeten am Himmel gemacht haben, stehen in vortrefflichem Einklang mit allem, was aufmerksame Augen während nächtlicher Beobachtungen des Himmelszelts erlangten.

G: Keine Frage! Ich stimme Ihnen ja vollkommen zu!

A: Und? Was ist denn das Neue, von dem Ihr mich nun überzeugen wollt? Heraus damit!

G: In der Tat bewegen sich die Himmelskörper auf geometrischen Kreislinien. Mir selbst gelang es mit meinem Teleskop die einzelnen Bewegungen zu verfolgen.

A: Ein Teleskop? Ein Weitgucker? Handelt es sich um ein spezielles wissenschaftliches Instrument? Ihr konstruiert wohl mit Vorliebe Geräte, die Euch beim Forschen behilflich sein müssen?

G: Ihr vermutet richtig. Eine wahrhaft großartige Erfindung. Mit ihm erscheint alles vergrößert. Ich darf mich rühmen, die Vergrößerung, die man mit einem Teleskop bewirkt, so verbessert zu haben, dass ein Blick auf die Himmelskörper uns zu ganze neuen Erkenntnissen geführt hat. Damit erscheinen viele Himmelskörper so nahe, als wären sie nicht in unendlicher Ferne, sondern vor Eurer Nase.^[1]

A: Ihr macht mich neugierig.

G: Ich beobachtete mit dem von mir so vortrefflich verbesserten Instrument nicht nur die Bewegung, sondern auch die Form und Oberfläche der einzelnen Himmelskörper.

A: Erstaunlich. Berichtet weiter, aber glaubt nicht, ich sei von der Wahrheit Eurer Beobachtungen überzeugt!

G: Werter Aristoteles, durch die starke Vergrößerung wurde mir ganz deutlich, dass es sich um zahlreiche Berge und Täler auf der Oberfläche des Mondes ähnlich denen auf Erden handeln muss.^[2] Der Himmel kann sich also gar nicht so sehr von der Erde unterscheiden.

A: So seid Ihr sicher, dass Ihr Eurem wunderlichen Instrument mehr vertrauen könnt als der Überlieferung durch große Wissenschaftler, dem Verstand und der Kraft eurer Sinne? Was maßt Ihr Euch an, Galilei?

G: Keine Frage. Ich vertraue dem Instrument, weil es sich bewährt hat. Als ich wieder einmal unzählige Stunden damit verbrachte, gebannt durch das Teleskop zu

schauen, erkannte ich auch auf der Oberfläche der Sonne einige Flecken.[3]

A (leicht höhnisch): Ihr hättet Euer Teleskop wohl besser putzen sollen, bevor Ihr hindurch schaut. Bestimmt eine Täuschung oder ein Fehler dieses Teleskops.

G: Werter Aristoteles, ich kann Euren Zweifel verstehen, denn ohne das Instrument sind diese Flecken wahrlich nicht zu erkennen.

A: Das habe ich mir gedacht!

G: Auch meine Freunde, ein jeder verständig in der Wissenschaft, waren zuerst ratlos, was sich hinter diesen Sonnenflecken verbergen könnte.

A: Ich tue Euch den Gefallen und will einmal annehmen, Euer Instrument funktionierte tatsächlich verlässlich und Eure Sonnenflecken seien nicht in Wahrheit die Flecken dieses Teleskops. Dann könnte es sich doch vielleicht um kleine Planeten handeln, deren Existenz meinen bloßen Augen aufgrund der schier unendlichen Entfernung und Helligkeit der Sonne verborgen blieb. Sie haben sich vor die Sonne geschoben. Warum also der vollkommenen Sonne Flecken andichten?

G: In der Tat war das eine der ersten möglichen Erklärungen. Doch im Laufe meiner Studien wurde mir offenbar, dass es sich nicht um weitere Himmelskörper handelte, sondern um einen Teil der Oberfläche des Sonnenkörpers selbst.

A: Galilei, das ist unmöglich! Im Himmel kann nichts Unvollkommenes sein! (scharf) Die Sonne KANN keine Flecken haben.

G: Ich glaube Ihr irrt und mit Euch etliche meiner eigenen Zeitgenossen. Alle Beobachtungen fügen sich in die kopernikanische Theorie ein nach der die Sonne im Zentrum des Alls steht und unsere Erde wie alle Planeten um die Sonne kreisen. Und auch die Sonne dreht sich um ihre eigene Achse. Ihre Flecken erscheinen von uns aus betrachtet, als würden sie über die Sonnenoberfläche wandern. Lassen wir uns nicht täuschen, die Sonne selbst dreht sich! Ihr müsst zugeben, auch die Sonne ist nicht vollkommen.[4]

A: Trotz Eures großen Geistes steht es Euch nicht zu, das Göttliche und Vollkommene so in Zweifel zu ziehen.

G: Viele Wissenschaftler teilten Eure Zweifel, aber es zeigte sich, dass sich aus der Entwicklung des Teleskops für die Wissenschaft schier ungeahnte Möglichkeiten ergaben, nun auch endlich den Konflikt um die Weltsysteme beizulegen. War doch Kopernikus schon früher davon ausgegangen, die Erde bewege sich um die Sonne, während die große Mehrheit die Ansicht vertrat, die Erde bilde das Zentrum.

A: Und nur Letzteres kann ich mit voller Überzeugung bestätigen.

G: Mein Glaube an die alten Theorien ist bei weitem nicht so beständig, wie der Eure. Ich ging der Theorie des Kopernikus auf den Grund und nutzte das Teleskop, um die Bewegungen im Himmel genau zu untersuchen. Schier unendliche Stunden verbrachte ich damit, durch das Fernrohr zu schauen, bis meine Mühe schließlich von Erfolg gekrönt war. Ich entdeckte vier kleinere Himmelskörper, vermutlich Monde, die um den größeren Himmelskörper Jupiter herumkreisten.

A: Nein, das kann nicht sein, denn alle Himmelskörper kreisen um die Erde. Sie ist das Zentrum.

G: Wieder muss ich Euch entschieden widersprechen. Denn einen weiteren Beweis

erhielt ich, als ich das Teleskop zahlreiche Wochen immer wieder auf die Venus ausrichtete. Unzweifelhaft erkannte ich, dass sie ähnlich wie der Mond zuerst ihr volles rundes Antlitz offenbarte und sie sich nach einiger Zeit in sichelförmiger Gestalt präsentierte. Auf der Suche nach einer Möglichkeit zur Beschreibung fand ich wieder in der Mathematik eine treue Helferin. Mit ihrer Hilfe bestimmte ich die, die einzelnen Himmelskörper für einen Umlauf benötigten.

A: Wie ich Euch schon einmal klar sagte, Ihr schenkt der Mathematik zu viel Beachtung und vertraut nicht auf Eure eigenen Sinne. Ihr solltet Euch in Acht nehmen, nicht die Vollkommenheit des Himmels so in Frage zu stellen.

G: Ich verstehe nicht ganz, warum ich mich in Acht nehmen sollte, eine alte Theorie zu hinterfragen, da sich doch neue Erkenntnisse auftun, die damit nicht in Einklang stehen.

Wenn sich die einzelnen Monde um den Jupiter drehen und sich ebenfalls die Venus in kontinuierlicher Bewegung befindet, so versichere ich Euch, dass auch der Himmel dem stetigen Wandel unterliegt und keineswegs einem unveränderlichen Kosmos gleicht. Nach reiflicher Überlegung bin ich fest davon überzeugt: Die Naturgesetze des Himmels und der Erde sind die gleichen!

A: Vieles habe ich akzeptiert und mich offen für Eure absonderlichen Ideen gezeigt. Aber das ist nun wirklich zu viel! Niemals können Eure Vorstellungen über die Himmelsbewegungen der Wahrheit entsprechen, da Ihr Euer Gebäude auf einem irrigem Fundament erbaut, indem Ihr Irdisches und Himmlisches miteinander vermischt. Das darf nicht sein! Ihr werdet mich niemals überzeugen!

Didaktische Hinweise

[1] Zeigen von Abbildungen eines Originalteleskops von Galilei bzw. Nachbau (Astromedia)

[2] Mondzeichnungen von Galilei auf der Folie/mit dem Beamer präsentieren.

[3] Abbildung von „Sonnenflecken“/Jupitermonden.

[4] Abbildung von Sonnenflecken (vgl. Internetseite)

Originaltext von Galilei: Astronomische Botschaft (Siderius Nuncius, um 1610, Auszug)

Astronomische Botschaft, worin die unlängst mit Hilfe eines neuen Sehglases auf dem Antlitz des Mondes und an den vier zuvor noch nie gesehenen Planeten gemachten Beobachtungen berichtet und erklärt werden.



Galileo über seine Mondbeobachtungen

Großes fürwahr unterbreite ich in dieser kurzen Abhandlung den einzelnen Naturforschern zur Anschauung und Betrachtung. Großes, so sage ich zum einen wegen der bislang unerhörten Neuheit und zum anderen wegen des Instrumentes, durch dessen Hilfe es sich unseren Sinnen offenbart hat.

Es ist sehr schön und ein ungemein erfreulicher Anblick, den von uns ungefähr sechzig Erdhalbmesser entfernten Mondkörper so aus der Nähe zu betrachten, als sei er nur zwei dieser Abmessungen von uns entfernt, so dass der Mond so viel größer erscheint, als wenn man ihn nur mit bloßem Auge betrachtet. Daraus kann nun jedermann die Gewissheit erlangen, dass der Mond keineswegs eine sanfte und glatte, sondern eine raue und ungleiche Oberfläche hat. Ebenso wie das Antlitz der Erde ist er voller gewaltiger Erhebungen, tiefer Höhlungen und Krümmungen.

Was aber über alle Maßen staunen macht und uns vornehmlich veranlasst, alle Astronomen und Philosophen zu unterrichten, ist indes, dass wir vier noch nie beobachtete Wandelsterne entdeckt haben, die in gleicher Weise wie Venus um die Sonne, um einen bestimmten und herausragenden Stern kreisen, ihm dabei bald voran gehen, bald folgen, aber nie über bestimmte Grenzen hinaus von ihm entfernen. Und all

das wurde vor nunmehr wenigen Tagen mit Hilfe eines von mir nach der Erleuchtung durch die göttliche Gnade erdachten Sehglases entdeckt und beobachtet.

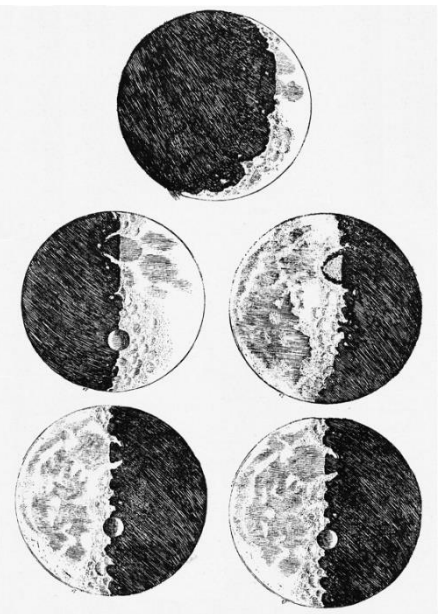
Weitere, noch vortrefflichere Dinge werden von nun an vielleicht von mir oder anderen mit Hilfe eines Instrumentes ähnlicher Art entdeckt werden, dessen Form und Bau sowie den Anlass zu seiner Erfindung ich zuerst kurz erwähnen möchte, dann werde ich den Bericht über die von mir gemachten Beobachtungen noch vertiefen.

Vor ungefähr zehn Monaten kam uns das Gerücht zu Ohren, von einem Mann aus Flandern sei ein Sehglas konstruiert worden, mit dessen Hilfe man sichtbare Gegenstände, auch wenn sie ziemlich weit vom Auge des Betrachters entfernt sind, so klar sehe, als seien sie in der Nähe. Selbiges wurde mir zudem einige Tage später von einem angesehenen französischen Edelmann bestätigt. Das war für mich schließlich der Anlass, mich ganz dem Erforschen der Grundlagen und Mittel zu widmen, um zur Erfindung eines ähnlichen Instrumentes zu gelangen, was mir letztlich auch gelingen sollte.

Ich bereitete mir zuerst ein Bleirohr, an dessen Enden ich zwei Sehgläser anbrachte, beide auf der einen Seite flach und auf der anderen Seite eines nach innen und das andere nach außen gewölbt. Dann legte ich das Auge an die nach innen gewölbte Seite und sah alle Gegenstände ziemlich groß und nah. Sie erschienen mir dreimal näher und neunmal größer. Ohne Kosten und Mühen zu scheuen, baute ich letztendlich ein Gerät, das mir die Gegenstände ungefähr tausendfach vergrößert und dreißigmal näher erscheinen ließ, als wenn man nur mit bloßem Auge sieht.

Es war vor allem erforderlich, ein ganz genaues Sehglas zu bauen, welches die Gegenstände hell und deutlich darzustellen vermag.

Zuerst werden wir uns aber nun dem Antlitz des Mondes zuwenden. Zum leichteren Verständnis teile ich es in zwei Teile, in einen helleren und einen dunkleren. Während der helle so strahlend leuchtet, erscheint der dunklere fleckig. Diese wenigen dunklen Flecken wurden von jedermann zu jederzeit gesehen. Deshalb nennen wir sie die großen alten Flecken, aber ich sah nun durch das Sehglas auch Flecken von deutlich geringerer Ausdehnung, die aber so zahlreich sind, dass sie die ganze Mondoberfläche übersäen. Durch die mehrmals wiederholten Beobachtungen jener Flecken aber gelangten wir zu der Auffassung und Gewissheit, dass die Oberfläche des Mondes nicht glatt, gleichmäßig und von vollkommener Kugelgestalt ist, wie eine große Schar von Philosophen von ihm und den anderen Himmelskörpern glaubte. Vielmehr ist sie ungleich rau und mit vielen Vertiefungen und Erhebungen, nicht anders als das Antlitz der durch Bergketten und tiefe Täler allerorts unterschiedlich gestalteten Erde.



Besonders verwunderlich schien mir anfangs, dass sich im finsternen Teil des Mondes sehr viele leuchtende Spitzen zeigen, völlig vom beleuchteten Gebiet getrennt und losgelöst. Nach einer gewissen Zeit gewinnen sie allmählich an Größe und Leuchtkraft, nach zwei oder drei Stunden vereinigen sie sich aber mit dem restlichen nun schon größer gewordenen leuchtenden Teil. Das Spiel setzt sich so fort und gleicht doch dem auf der Erde vor dem Sonnenaufgang. Werden dort nicht auch, wenn der Schatten noch auf den Ebenen liegt, die höchsten Bergespitzen schon von den Sonnenstrahlen erleuchtet. Nimmt dort nicht auch das Licht schon nach kurzer Zeit zu, bis dann auch die mittleren und breiteren Teile der Berge beschienen werden und fließt dann nicht zum Schluss, wenn die Sonne aufgegangen ist, die Helligkeit der Ebenen und der Hügel zusammen?

Doch muss ich zugeben, dass so mancher verwirrt sein kann, wenn er wie ich den Mond und seine Flecken über einen langen Zeitraum beobachten wird. Er wird feststellen dass die Flecken nicht immer die gleiche Gestalt haben und womöglich erst annehmen, der Mond zeige jeden Tag ein anderes Antlitz. Eben dieses Problem bereitet auch mir lange Zeit Grübeln, bis ich wieder im Vergleich mit den Gegebenheiten auf der Erde eine Lösung ersann. So ist die Veränderung der Gestalten, des Lichts, das von dem Mond zur Erde zurückgeworfen wird, nicht durch Verschiedenheit, sondern allein durch die unterschiedliche Beleuchtung durch die Strahlen der Sonne zu erklären, hervorgerufen je nach deren vielfältigen Stellungen der Sonne zum Mond.

Um auch ohne Sehglas dem geneigten Leser einen Eindruck zu vermitteln, habe ich Skizzen so detailgetreu, wie es mir irgend möglich war, angefertigt.

Galileo über die Beobachtung der Jupitermonde

So möchte ich mich nun noch, wie ich ankündigte, den Beobachtungen der vier Planeten zuwenden, die ich kürzlich als erster entdeckte. Selbst wenn man die Dauer der einzelnen Umläufe um den Jupiter nicht in Zahlen angeben kann, war es aus meinen Beobachtungen doch ersichtlich, dass sie Umdrehungen um den Jupiter vollziehen, während alle zusammen Umläufe von 12 Jahren um den Mittelpunkt der Welt ausführen. Des Weiteren bewegen sich die einzelnen Monde auf verschieden großen Kreisen, wobei die Bewegungen auf den engeren Kreisen schneller sind, so dass es mal zu einer Häufung mal zu einer weiten Entfernung der Monde untereinander kommt. Insgesamt sind alle meine Beobachtungen imstande, den aufmerksamen Geist zu überzeugen. Ich liefere so einen glänzenden Beweis für alle diejenigen,

Observationes Iovianae
(1610)

| | |
|----------------------------|-----------|
| 2. d. Jovis. mond H. 12 | ○ * * |
| 3. d. mond | * * ○ * |
| 2. Jovis. | ○ * * * |
| 3. mond | ○ * * |
| 3. H. 5. | * ○ * |
| 4. mond | * ○ * * |
| 6. mond | * * ○ * |
| 8. mond H. 13. | * * * ○ |
| 10. mond | * * * ○ * |
| 11. | * * ○ * |
| 12. H. 4. westl. | * ○ * |
| 13. mond | * * ○ * |
| 14. Jovis. | * * * ○ * |

die das kopernikanische System bereits hingenommen haben, aber die Annahme als irrsinnig verwerfen, der Mond allein umkreise die Erde, während Mond und Erde zusammen ihre jährliche Bahn um die Sonne vollführen. Doch diese Planeten, die Monde des Jupiters, liefern nun den Beweis, das selbiges möglich ist, denn nun haben wir nicht nur einen Planeten, sondern vier, die um einen anderen Planeten, den Jupiter kreisen und alle zusammen mit dem Jupiter die Kreisbahn um die Sonne in einem Zeitraum von 12 Jahren beschreiben.

Mit dieser Erkenntnis will ich für heute meinen Bericht beenden. Der geneigte Leser wird in Kürze mehr über die Astronomischen Erkenntnisse erfahren.

Brief des Galilei an Marcus Welser über astronomische Entdeckungen

Galileis Sehglas (Original von 1609/1610)

Auszug aus dem ersten Brief des Herrn Galileo Galilei an den Herrn Marcus Welser [\[1\]](#) über astronomische Fragen in Beantwortung des vorangegangenen Briefes (4. Mai 1612)

Und wenn Ihr Euch nun fragt, warum denn gerade das [die Phasen der Venus, D.H.] dem Kopernikus verborgen blieb, während es mir bekannt ist, dann verweise ich nur noch mal darauf, dass es auch mir ohne das geeignete Instrument nicht möglich gewesen wäre. Die Natur hat dem Menschen nicht die Vollkommenheit verliehen, dass die Wahrnehmung solcher Phänomene möglich wäre. Nachdem es aber in unseren Tagen Gott gefallen hat, dem Menscheinste eine so wunderbare Erfindung zu vergönnen, welche die Schärfe unsers Sehens so stark zu vergrößern vermag, sind unendliche viele Dinge, die uns entweder infolge ihrer Entfernung oder wegen ihrer außerordentlichen Kleinheit unsichtbar waren, mit Hilfe des Fernrohrs deutlich sichtbar geworden.

[\[1\]](#) **Marcus Welser**, auch Marx Welser (* 10. Juni 1558 in Augsburg; † 23. Juni 1614 in Augsburg) war ein deutscher Historiker, Verleger und ab 1611 Bürgermeister von Augsburg.