

## ZUM FALL DES FREIEN FALLES

H. JOACHIM SCHLICHTING

*Es gehört für die Newtons, in dem Sturz eines Apfels  
 die Ordnung des Weltsystems zu finden*

Johann Gottfried Herder

### EINLEITUNG

Der freie Fall ist ein besonderer Fall der Lehrens und Lernens und damit des Verstehens von Physik schlechthin. Obwohl und weil er von "fertigen" Physikern als einfach angesehen wird, bereitet er Laien große Schwierigkeiten, die weniger in den fachwissenschaftlichen Anforderungen begründet sind, als vielmehr in den stillschweigenden Voraussetzungen, die bei der Konzeptualisierung des freien Falls zugrundegelegt werden müssen. Der Fall wird nicht einfacher dadurch, daß wir im Alltag mit zahlreichen Fällen zu tun haben, denn der freie Fall ist kaum dabei, eher ist das Gegenteil der Fall.

Der freie Fall ist ein Idealfall. Er ist es zum einen im wissenschaftstheoretischen Sinne. Die verschiedensten Erscheinungen, von denen manche erst auf den zweiten Blick überhaupt als etwas Fallendes zu erkennen sind, werden physikalisch auf den freien Fall zurückgeführt, indem die phänomenologischen Abweichungen vom Idealfall durch das Vorhandensein äußerer Einflüsse (z.B. der Luftwiderstand) wegdiskutiert werden. Zum anderen ist der freie Fall auch im fachdidaktischen Sinne ideal, weil an ihm die Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler, die mit der Überwindung der Differenz zwischen lebensweltlicher und physikalischer Sehweise zusammenhängen, an einem experimentell relativ einfachen, umfassend zugänglichen und überschaubaren Fall erfahrbar gemacht und erörtert werden können.

### DIE WELT ALS FALL

"Die Welt ist alles, was der Fall ist" (Wittgenstein 1968). In der Tat: Alles, was sich selbst überlassen ist, fällt: Dachziegel vom Dach, Regen aus den Wolken, der Reiter vom Pferd...Im letzteren Fall spricht man eher von einem Unfall. Auch der meist als Sündenfall bezeichnete Vorfall, der die Vertreibung von Adam und Eva aus dem Paradies zur Folge hatte, wird oft als Unfall bezeichnet. Mit ihm beginnt jedoch die von vielen weiteren Fällen gekennzeichnete Menschheitsgeschichte. Muß man sich da wundern, wenn das Bild, das sich die Menschheit (aus naturwissenschaftlicher Sicht) von der Entstehung der Welt macht, vom selben Typus ist. Demnach verdankt sich die Welt einer Explosion, dem sogenannten Urknall, der sich in einer unüberschaubaren Zahl auseinanderfallender bzw. – driftender Galaxien manifestiert. Die Galaxien und ihre sichtbaren Bestandteile, die Sterne unterliegen der Gravitationskraft und fallen aufeinander zu, meist jedoch ohne ineinander zusammenzufallen. In den meisten Fällen ergeben sich kompliziertere Fallbewegungen: Sterne rotieren um das Zentrum einer Galaxie, Planeten wälzen sich um Sonnen, Monde um Planeten.

Alles dreht sich, und alles dreht sich um den Fall. Selbst die Welt unterhalb der Schwelle der Wahrnehmung ist davon nicht ausgenommen. Der radioaktive Zerfall brachte die Wissenschaftler auf die Spur eines in sich strukturierten Mikrokosmos. Bei der Erschließung dieser Strukturen standen aus dem Makrokosmos vertraute, mit der Fallbewegung verknüpfte Vorstellungen Pate. Das Planetenmodell des Atoms war das erste tragfähige Bild auf dem Wege zum unendlich Kleinen. Heute gelingt es, Atome am unaufhörlichen Fall zu hindern, aber dann befinden sie sich in der Falle.

**aus zufall**

aus zufall  
einfall

aus einfall  
überfall

aus überfall  
unfall

aus unfall  
wegfall

aus wegfall  
abfall

aus zufall  
abfall

Eugen Gomrin-

Seit dem Sündenfall ist alles hinfällig. Dies gilt insbesondere für die Vorgänge auf der Erde. Die Erde ist insofern ein Sonderfall, als sie bis auf weiteres der einzige Ort im Weltall zu sein scheint, auf der Leben, insbesondere intelligentes Leben vorkommt. Ob dies, wie manche Wissenschaftler vermuten, ein Einzelfall ist, der sich dem Zufall verdankt, kann vorerst nicht abschließend beantwortet werden.

Durch das Leben auf der Erde wird die Vielfalt der Fälle noch gesteigert. Neben den Fallbewegungen, mit denen alle sich selbst überlassenen Gegenstände in Richtung auf den Erdmittelpunkt zu fallen, (genannt seinen hier nur der Wasserfall, der Schneefall), sind die Lebewesen in besonderer Weise mit Fällen ver-

bunden. Das Leben ist ganz allgemein dem Zerfall in anorganische Konstituenten (und anderen Ausfallserscheinungen, die hier nicht behandelt werden können) ausgesetzt. Dies äußert sich nicht nur in der Sterblichkeit, sondern auch in der Produktion großer Abfallmengen, die sich als ernsthafte Gefahr insbesondere für höheres Leben auszuwachsen droht. In düsteren Szenarien ist vom Rückfall auf niedrigere Entwicklungsstufen der Evolution oder gar vom Wegfall des höheren Lebens die Rede, wodurch dieses zu einem bloßen Zwischenfall der kosmischen Entwicklung degradiert werden würde.

Die Menschen selbst sind außerdem zahlreichen metaphorischen Fällen ausgesetzt. Im Krieg fallen Soldaten in andere Länder ein und die Armeen fallen übereinander her, wobei zahlreiche Soldaten auf dem Schlachtfeld fallen. Aber auch im zivilen Leben gibt es Vorfälle, die zu den negativen Aspekten des Falls zählen. Man denke nur an Überfälle, Ausfälle, Unfälle und Streitfälle. Erinnert sei in diesem Zusammenhang auch an den Fall des Richters Adam in Kleists *Zerbrochener Krug*, der schon vom Namen her mit dem Sündenfall in Verbindung gebracht werden kann:

"Ihr stammt von einem lockern Ältervater,  
Der so beim Anbeginn der Dinge fiel,  
Und wegen seines Falls berühmt geworden..."

Auch bei Krankheiten ist oft der Fall im Spiel. Man denke nur an die Fallsucht, den Malariaanfall, den Virenbefall, den Durchfall und den Rückfall, vom Eindruck, daß Krankheiten manchmal geradezu vom Himmel zu fallen scheinen, ganz zu schweigen.

Aber nicht jeder Fall ist ein Unglücksfall oder ein Notfall. Es gibt auch Glücksfälle, die unser Wohlgefallen finden. Dazu gehört der gute Einfall, an dem oft ein weiterer Fall, nämlich der Zufall beteiligt ist. Großes Gefallen finden wir auch am Beifall, den wir dafür erhalten.

Wenn man sich schließlich wünscht, sich einfach fallen lassen zu können, möchte man sich paradoxerweise durch diesen Fall der ständigen Aufmerksamkeit der in den verschiedensten Verkleidungen lauern den Wechselfälle des Lebens entziehen. Ob dabei auch das Gefühl der Kräftefreiheit als eine Art absoluter Leichtigkeit gedacht wird, ist jedoch fraglich.

## VON THALES FALL BIS ZUM FALL GALILEI

Thales von Milet ist nicht nur durch seine glänzenden Einfälle im Bereich der Mathematik und Physik bekannt geworden, sondern ebenso durch eine Art Unfall: Beim Betrachten der Sterne *fällt* er in eine Grube. Dieser Vorfall brachte ihm keinen Beifall, sondern ausfallend, spöttische Bemerkungen seiner Thrakischen Magd ein. Ihrer lebensweltlichen Überzeugung entsprechend, war es abwegig, in die Ferne zu schweifen und das Naheliegende zu übersehen. Offenbar hat weder das Mißgeschick des Meisters noch der Spott darüber seiner Größe etwas anhaben können. Was gelten schon abfällige Bemerkungen einer Magd, die zudem aus dem kulturell als rückständig angesehenen Thrakien stammte? Dennoch ist diese Anekdote nicht zum Verstummen zu bringen, macht sie doch auf eindrucksvolle Weise auf Differenzen zwischen unterschiedlichen Sehweisen aufmerksam, denen verschiedene sozio- kulturelle, visuell- begriffliche u.a. Hintergründe entsprechen: Während die thrakische Magd das lebensweltliche Denken, den Common Sense, verkörpert, das zu gefühlsbestimmten, unmittelbarem, aus subjektiven Motiven folgenden Tun führt, steht der griechische Gelehrte für das auf Abstandnehmender Beobachtung, Trennung von Subjekt und Objekt, auf Unparteilichkeit und Leidenschaftslosigkeit beruhende Handeln. Thales wird als einer jener großen alten Männer angesehen, die den physikalischen Blick begründeten.

Um deutlich zu machen, daß Thales trotz seines unglücklichen Falls nicht zu jener Spezies abgehobener Denker gehört, deren Tun sich in folgenloser und abwegiger geistiger Spekulation erschöpfte, gibt es bereits von Aristoteles eine Gegenanekdote: "Man beschimpfte Thales wegen seiner Armut, die zeige, wie unnütz die Philosophie sei. Da sah Thales, so erzählt man, aufgrund seiner Astronomie eine reiche Ölernte voraus, und noch im Winter, als er gerade ein wenig Geld hatte, sichert er sich durch eine Anzahlung die gesamten Ölpresen in Milet und Chios; er konnte sie billig mieten, da niemand ihn überbot. Als die Zeit kam, war plötzlich eine starke Nachfrage da; da vermietete er sie nach seinen Bedingungen weiter, verdiente viel Geld und bewies, daß Philosophen leicht reich sein können, falls sie wollen, aber daß dies nicht ihr Ziel ist" (Aristoteles).

Thales Fall kann sowohl metaphorisch als auch tatsächlich als ausdrucksstarkes Fallbeispiel für die den Naturwissenschaften inhärente Dichotomie zwischen weltfremder Theorie und praktischer Anwendung angesehen werden. Zum einen muß der Blick weg von den einer unmittelbaren Konzeptualisierung sich widersetzenden komplexen Vorgängen auf der Erde zu den einfachen Vorgängen am Himmel insbesondere auf die Planeten und den Mond als Ausgangspunkt für eine Wissenschaft angesehen werden, die schließlich zur Raumfahrt und Landung auf dem Mond führte. Zum anderen handelt es sich bei dem tatsächlichen Fall in die Grube um einen Vorfall, dessen Konzeptualisierung durch Galilei und Newton als freier Fall einen zentralen Aspekt eben dieser Naturwissenschaft ausmacht.

Auch Galilei kommt über den Blick zum Himmel und seiner Darstellung dessen, was er dort zu sehen glaubte, zu Fall. In diesem Fall fällt er nicht in eine Grube, sondern in die Hände der Inquisitoren. Weil er der kopernikanischen Sehweise, daß sich die Erde um die Sonne dreht, Ausdruck verleiht, wird er zum Fall für die Kirchenjustiz.

## DER FREIE FALL IM VAKUUM

*Nicht daß man etwas Neues zuerst sieht,  
sondern daß man das Alte, Altbekannte, von jedermann Gesehene  
und Übersehene wie neu sieht,  
zeichnet die eigentlich originalen Köpfe aus.*  
Friedrich Nietzsche

Wie verfiel Galilei auf die Idee des freien Falles, wonach - anders als es die Beobachtung von Bewegungen auf der Erde nahelegt - alle sich selbst überlassene Gegenstände gleich schnell (genauer: mit gleicher Beschleunigung) zur Erde fallen? Letztlich fiel sie im doppelten Wortsinn vom Himmel. Zum einen bewegen sich die Himmelskörper auf einfachen Bahnen, die in ihrer Form erhalten bleiben. Darin könnte Galilei einen wesentlichen Aspekt für Einfachheit und Vorhersagbarkeit gesehen und sich gefragt haben: Wie würden sich Gegenstände auf der Erde verhalten, wenn sie sich wie die Himmelskörper ungehindert bewegen könnten? Zum anderen läßt sich zumindest für Außenstehende kein Zusammenhang zwischen irdische und im Unterschied zu ihnen geradezu als fallunfähig angesehene Himmelskörper erkennen. Eine Situation, in der sich die Gegenstände so frei wie möglich von Einflüssen der Umgebung bewegen können, liegt vor, wenn man sie los und damit fallen läßt. Die aus der Alltagssprache bekannte Redewendung, sich einfach fallenzulassen, d.h. sich von allen Einschränkungen und Bedenken zu lösen, und den Dingen ihren Lauf (bzw. Fall) zu lassen, bringt diese Tatsache sehr schön zum Ausdruck. Allerdings weiß man aus Erfahrung, daß trotzdem kein einheitliches Verhalten der fallenden Körper zu beobachten ist: Im Gegensatz zu Galileis Behauptung, fallen verschiedene Körper verschieden schnell. Nach aristotelischer Vorstellung fallen Körper mit einer Geschwindigkeit proportional zu ihrer Schwere. Eine Kugel fällt ohne Umschweife zu Boden, während ein Blatt umständlich vom Baum herabtorkelt.

Doch Galilei "beweist" auf bestechend elegante Weise, daß Aristoteles auch in dieser Hinsicht unrecht hat. Wenn ein schwerer Körper schneller falle als ein langsamer – so in etwa seine Argumentation - dann müsse ein aus dem schweren und leichten zusammengesetzter Körper eine dazwischen liegende Geschwindigkeit annehmen, weil der schwere den leichten schneller, der leichte den schweren aber langsamer mache. Andererseits sei der zusammengesetzte Körper noch schwerer als der schwere und müsse demnach noch schneller fallen als dieser (Galilei 1973, S. 57f).

An diesem Beweis fällt jedoch auf, daß das Verhalten der Natur offenbar durch reines Denken gewonnen wird. Von Empirie keine Spur. Galileis angeblichen Fallversuche vom schiefen Turm von Pisa sind wohlweislich von ihm nie durchgeführt worden (Koyré 1988). "Hinter seinen Entdeckungen steht nicht die nüchterne Geschäftigkeit des besessenen Experimentators, der sein Datenmaterial so lange vermehrt, bis es ihm die verborgene Formel preisgibt, sondern die spekulative Antizipation des immer noch an den aristotelischen Prämissen hängenden Vertrauens auf die schlechthin einfachen Mittel der Natur zu ihren Wirkungen" (Blumenberg 1980, S.50).

Und darin liegt Carl Friedrich von Weizsäcker zufolge die eigentliche Bedeutung Galileis Schritts, "die Welt so zu beschreiben, wie wir sie nicht erfahren" (Weizsäcker 1966, S.107). Galilei setzt sich über Alltagserfahrungen hinweg, "weil (so könnte man mit Christian Morgenstern sagen) so schließt er messerscharf, nicht sein kann, was nicht sein darf". Aber er tut es mit einer tieferen Berechtigung, denn der himmlischen Herkunft seiner Idee entsprechend hat er den freien Fall nicht für die profane Welt, sondern für das Vakuum, (aus dem der größte Teil des Himmels besteht) konzipiert, wo keine Widerstandskräfte auftreten und der Fall frei, also unabhängig von Größe und Form des Körpers erfolgt. So gesehen ist sein Beweis tautologisch oder trivial und allenfalls von rhetorischer Bedeutung. Physikalisch denken im Sinne Galileis und der neuzeitlichen Physik seit Galilei heißt also vor allem, die Grenzen der jeweiligen Situation zu denken und dies als Gestalt zu sehen, im vorliegenden Fall als Vakuum bzw. als symmetrische Falllinie eines im Vakuum fallenden Gegenstandes.

Der geniale Einfall Galileis auf dem Wege zum freien Fall und damit zur neuzeitlichen Physik liegt darin, das Phänomen des Fallens von realen Körpern zu separieren und aus dem empirischen Kontext herausgelöst anzusehen. Denn, "wenn man sagt - die Körper fallen - steckt die Schwierigkeit nicht in der Synthese, sondern in der vorangegangenen Analyse, bei der man ein Ensemble von Phänomenen in *Körper* und in *Fall* zerlegt hat" (Valéry 1988, S.31). Da zu Galileis Zeit die Existenz des Vakuums auf der Erde weder denkbar (*horror vacui*), noch ein luftverdünnter Raum realisierbar war, – dies gelang erst einem seiner Schüler Evangelista Torricelli, aufgrund dieses Einfalls – haben sicherlich Erfahrungen im Umgang mit anderen Medien wie Wasser, Öl, Honig usw. geholfen, eine Folge abnehmenden Widerstands bis hin

zum Grenzfall des Verschwindens zu konzipieren, der mit dem Begriff des Vakuums zusammenfällt. Darin verhalten sich alle Körper gleichartig, indem sie mit derselben Beschleunigung fallen.

Der freie Fall geht so gesehen aus der Dekonstruktion realer Fälle bis hin zum Grenzfall eines in jedem Fall invarianten Elementarereignisses hervor. Seine enorme Erschließungsmächtigkeit entfaltet er dann, wenn ein beliebiger konkreter realer Fall in seiner Differenz zum invarianten Hintergrund des freien Falls rekonstruiert und damit unter einheitlichen Gesichtspunkten beschrieben wird. Erst dadurch wird die Differenz begrifflich (etwa als Luftwiderstand) erfaßbar und kalkulierbar. So gesehen gilt, was Luigi Pirandello sehr viel allgemeiner verstanden wissen will, mutatis mutandis auch in diesem Fall: "Die überflüssigen Einzelheiten verschwinden, und alles, was der lebendige Zusammenhang eines Charakters verlangt, wird verschmolzen zur Einheit eines Seins, das weniger real und dennoch viel wahrer ist" (Pirandello 1987, S. 87).

## FALLEN DURCH ROLLEN

Wenn alle Körper gleich schnell fallen, dann genügt die Untersuchung eines Körpers um festzustellen, wie schnell er fällt. Schon die Erfahrung, daß ein aus größerer Höhe fallender Körper gefährlicher ist als einer, der aus niedrigerer Höhe fällt, zeigt, daß die Geschwindigkeit sich während des Falls ändern muß. Wie ändert sie sich? Diese Frage war zur Zeit Galileis eine große Herausforderung, weil der freie Fall mit Geschwindigkeiten verbunden ist, die jenseits des menschlichen Reaktionsvermögens liegen, und Galilei keine geeigneten Uhren zur Verfügung standen. Ein weiterer großer Einfall, der ebenfalls zum Meilenstein für die neuzeitliche Physik und zum weiteren Problemfall für das Lehren und Lernen werden sollte, kam Galilei in dieser Situation zur Hilfe. Er fand wesentliche quantitative Aussagen zum Fallgesetz in der Zeitlupe der schiefen Ebene, indem er von der physikalisch falschen, für eine qualitative Bestätigung der Erwartung aber brauchbaren Voraussetzung ausging, daß das Fallen durch Rollen ersetzt werden kann. Auf dem Gefälle der schiefen Ebene wird der Fall so verlangsamt, daß der eigene Pulsschlag oder das ausfließende Wasser einer Wasseruhr ausreicht, die Geschwindigkeitsänderungen pro Zeiteinheit zu messen. Durch Verkleinerung der Neigung der Ebene schuf Galilei eine Situation, die der Verminderung der Stärke der Gravitationskraft gleichkommt. Sie gehört damit zur großen Ahnenreihe paradigmatischer Geräte: "Die schiefe Fläche des Galilei, der Perpendikel des Huygens, die Quecksilberöhre des Torricelli, die Luftpumpe des Otto Guericke, und das gläserne Prisma des Newton haben uns den Schlüssel zu großen Naturgeheimnissen gegeben (Kant 1968, S. 801).

## DER FALL DER PLANETEN

*Es brauchte schon einen Newton,  
um zu bemerken, daß auch der Mond fällt,  
wo doch jeder genau sieht, daß er nicht fällt.*

Paul Valéry

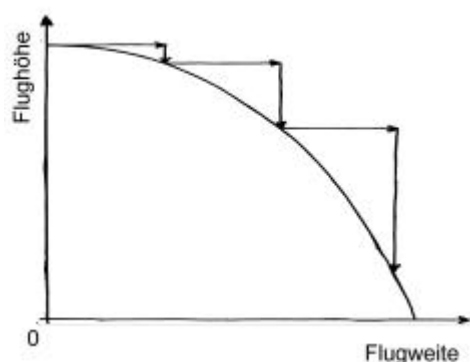


Abb. 1: Je ein Paar eines waagerechten und senkrechten Pfeils zeigt die Bewegung während drei aufeinanderfolgender Zeiteinheiten, die sich ergäbe, wenn der Pfeil zunächst nur in waagerechter und dann nur in senkrechter Richtung flöge. Da die Fallbeschleunigung quadratisch mit der Zeit wächst, nimmt die durchfallene Strecke pro Zeiteinheit zu, während die entsprechende horizontale Strecke stets gleich bleibt.

Obwohl Galilei durch die Dauerhaftigkeit und Gleichförmigkeit der Planetenbahnen am Himmel zu seinen weitreichenden Einfällen inspiriert worden sein könnte, war erst Newton in der Lage, auf der Grundlage des freien Falls, wie ihn Galilei konzipiert hatte, die Bewegungen der Planeten selbst als einen Sonderfall des freien Falls zu sehen.

Es ist interessant, daß sich auch diese auf den ersten (durch lebensweltliche Erfahrungen geprägten) Blick abwegige Ansicht, ebenfalls einer Idee verdankt, die als gedankliche Zerlegung einer als elementar und irreduzibel erfahrenen Figur beschrieben werden kann, der Kreisbewegung. Während Galilei noch an der Idealgestalt des Kreises und der Fallunfähigkeit der Planeten festhielt – auch in dieser Hinsicht war er noch Aristoteliker – sah Newton die Kreisbewegung (genauer: der Bewegung auf einer Ellipsenbahn) als erklärungsbedürftig an. Er sah die Kreisbahn als Ergebnis des Zusammenwirkens zweier Bewegungen an: einer gleichförmigen und einer (beschleunigten) Fallbewegung.

Läßt man eine Kugel fallen, so unterliegt sie (im Vakuum) einzig der Schwerkraft, die die Kugel zum Mittelpunkt der Erde hin beschleunigt. Daran ändert sich auch nichts, wenn man der Kugel mit einer horizontalen Anfangsgeschwindig-

keit versteht. Es ergibt sich aber eine andere Fallbahn. Während ihrer beschleunigten Bewegung in Richtung auf den Erdmittelpunkt behält sie unabhängig davon (Prinzip der freien Superposition) die horizontale Komponente der Geschwindigkeit bei. Die vertikale Komponente (aufgrund der Schwerkraftbeschleunigung) und die horizontale Komponente der Geschwindigkeit setzen sich zur Gesamtgeschwindigkeit zusammen, mit der sich die Kugel auf einer gekrümmten Bahn auf die Erde zu bewegt (Abb. 1). Sie trifft um so weiter von der Startposition entfernt auf, je größer ihre horizontale Anfangsgeschwindigkeit ist. Da die Erde nicht eben, sondern kugelförmig ist, tritt bei genügender Steigerung der horizontalen Anfangsgeschwindigkeit schließlich der Fall ein, daß die Erde überhaupt nicht mehr erreicht wird, weil sie sich in gleichem Maße unter der Kugel wegkrümmt, wie sich diese der Erde annähert (Abb. 2).

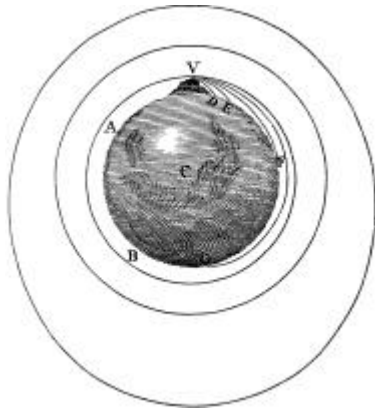


Abb. 2: Je größer die horizontale Anfangsgeschwindigkeit ist, desto weiter entfernt ist der Auftreffpunkt.

Wir haben es also mit dem ohne diese von Newton stammende Sehweise paradox erscheinenden Fall zu tun, daß eine Kugel auf die Erde fällt, ohne sie je zu erreichen. Auch der Mond und die Satelliten werden natürlich von der Erde angezogen und fallen auf sie zu, erreichen sie aber ebenfalls nicht. Ihre immer wieder durchlaufene Bahn kann als der wiederholte Versuch angesehen werden, das Ziel schließlich doch noch zu erreichen. Und diese Versuche sind nicht ganz aussichtslos. Da nämlich auch im Weltraum kein absolutes Vakuum existiert und stets, wenn auch verschwindend kleine Störungen auftreten, findet eine allmähliche Abbremsung statt, die schließlich zum spiralförmigen Niederfall führt. Für leichtere Objekte, wie etwa die vom Menschen hochgeschossenen Satelliten kommt es jedoch (zum Glück) meist nicht so weit. Durch die mit der Annäherung an die Erde immer dichter werdende Luft treten schließlich so starke Reibungskräfte auf, daß die Objekte aufgeheizt werden und in der Atmosphäre verglühen. Der Zerfall als ultimativer Fall steht letztlich auch dem Planetensystem bevor.

Auch hier zeigt sich wieder das schon bei Galilei beobachtete Umschlagen der "Quantität" einer gedanklichen Operationssequenz in die Qualität einer neuen Idee. Während Galilei durch eine Folge abnehmenden Widerstands zum widerstandslosen Vakuum gelangt, geht bei Newton die Folge der nach demselben Schema ausgeführten horizontalen Würfe mit steigender Anfangsgeschwindigkeit in eine völlig neue Bewegungsfigur über, in die geschlossene Bahnkurve von Satelliten und Planeten. Der freie Fall der Planeten auf die Sonne endet zwar vorerst nicht in einem Aufprall, aber die Planeten befinden sich insofern in einer Falle, als sie zum (annähernden) Dauerfall der Umkreisung der Sonne verurteilt sind.

Newton hat den Fall auch noch in anderer Hinsicht verallgemeinert, indem er davon ausging, daß nicht nur die Erde einen fallenden Apfel anzieht, sondern auch der Apfel die Erde. Dies kommt in seinem Gravitationsgesetz durch eine symmetrische Abhängigkeit der Gravitationskraft  $F$  von den Massen  $M_E$  und  $M_S$  der beteiligten Körper, Erde und Apfel zum Ausdruck:

$$F = \gamma M_E M_S / r^2,$$

(wobei  $\gamma$  die allgemeine Gravitationskonstante und  $r$  der Abstand der aufeinander zu fallenden Körper sind).

Wer auf wen fällt, ist also weitgehend Ansichtssache, wie in der folgenden Situation eines fallenden Menschen, der dem Wein etwas zu stark zugesprochen hat, zum Ausdruck kommt: "Ich tastete mich durch den Hof, bis der Hof sich plötzlich erhob und mir kräftig eins auf die Schnauze gab. Aber ich ließ mich nicht zurückhalten, nahm, wenn auch wankend, meinen Weg wieder auf, mehrmals kam der Hof wieder hoch und verpaßte mir viele Abreibungen hintereinander" (Meneghello 1993, S. 174).

## NEWTONS APFEL

*Auch Gedanken  
fallen manchmal unreif vom Baum.*

Ludwig Wittgenstein

Interessanterweise wird auch Newtons Einfall einer Vereinigung von freiem Fall und kreisenden Planeten als Ergebnis einer empirischen Begebenheit inszeniert. Dabei sollte für ihn wie schon für Adam der Apfelbaum zum Baum der Erkenntnis werden: Einer in verschiedenen Versionen vorkommende Anekdote zufolge, fiel er ausgerechnet über einen fallenden Apfel, um auf den Fall der Planeten um die Sonne zu kommen, und darin einen Sonderfall des freien Falls zu sehen. Vielleicht sah er den Apfel gerade (perspektivisch) gleich groß neben dem Mond im Hintergrund. Vielleicht verfiel er dadurch auch auf die Frage, warum sich diese Gleichheit nicht auch im Verhalten beider Objekte fortsetzen sollte. Denn für die entscheidende Tat Newtons, die Himmelskörper wie irdische Gegenstände anzusehen, die man gewisser-

maßen in die Hand nehmen kann, gibt es – wie für die Entdeckung neuer, d.h. nicht durch Ableitungen aus dem Alten zu gewinnender Zusammenhänge - keine andere rationale Erklärung.

Die Frage, warum der Apfel vor Newtons Augen fiel, dem es dann wie Schuppen von den Augen fallen sollte, muß hier unerörtert bleiben. Aus wissenschaftstheoretischer Sicht spricht einiges dafür, daß der Apfel fallen mußte, weil er reif war.



Abb. 3: Der *Paradiesapfel* von Franz Radziwill.

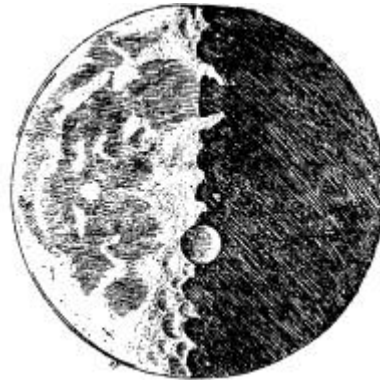


Abb. 4: Die Oberfläche des Mondes, wie sie Galilei sah, unrein wie ein Apfel.

Auch die Version der Anekdote, wonach der Apfel Newton auf den Kopf gefallen sei, erscheint insofern plausibel, als durch den Aufprall auf den (ähnlich geformten) Kopf Newtons die ineinander verhakten Gedanken gelöst und seinen ausgefallenen Einfall bewirkt haben könnten. Denn "selbst der gute Kopf will angestoßen sein, um etwas Neues zu sehen" (Lichtenberg 1972).

Darin, daß sowohl der Mond, Kopf und Apfel für jedermann sichtbar vom platonischen Idealfall einer glatten Kugel abweichen, kommt außerdem die für die neuzeitliche Physik entscheidende Verknüpfung von lebensweltlichem Realismus und himmlischem "Idealismus" zum Ausdruck.

Dieser Aspekt der Anekdote verdient deshalb besondere Beachtung, weil in der Apfelbaumszene an sich ein Rückfall in vorgalileische Zeiten gesehen werden kann: "Dem seit Menschengedenken fallenden Apfel war nichts anzusehen, was er (Newton; HJS) daran hätte beschreiben können. Die List der Sichtbarmachung der Fallbeschleunigung hatte längst Galilei gefunden. Gegenüber seinen Versuchen des verlangsamten Fallablaufs war der Apfel ein Rückschritt ins Vortheoretische, der nicht einmal Veränderung der Fallhöhen erlaubte" (Blumenberg 1997, S.72).

Läßt man sich schließlich vom Atmosphärischen der Anekdote verführen, so drängt sich die folgende Frage geradezu auf: "War nicht der im Garten am Fall des Apfels zur neuen Wissenschaft verführte Newton ein anderer Adam, insofern auch er über die weitere Geschichte der Menschheit entschied?" Andererseits war die Welt "schon zu einheitlich und einförmig geworden, als daß es bevorzugte Blickrichtungen (wie die zum Himmel, HJS) überhaupt noch gegeben hätte, in denen etwas zu erfahren war, was in jeder anderen Blickrichtung nicht gleichfalls erfahren werden konnte" (Blumenberg 1997, S. 62)

## DER FREIE FALL ALS DIDAKTISCHE FALLE

Aus der Sicht der neuzeitlichen Physik ist der freie Fall, wonach beliebige Gegenstände mit gleicher Beschleunigung fallen, eine äußerst einfache Angelegenheit. Eine Fülle phänomenologisch verschiedener Bewegungen, wie etwa die der Satelliten und Planeten bis hin zu den Elektronen im Bohrschen Atommodell können als einheitlicher Fall, als freier Fall angesehen werden.

Doch fachwissenschaftliche Einfachheit muß nicht Einfachheit schlechthin bedeuten. Wie die obigen Ausführungen gezeigt haben, ist der freie Fall aus lebensweltlicher Sicht alles andere als naheliegend, vor allem deshalb, weil es die unterstellte Freiheit in (der) Wirklichkeit nicht gibt. Sie existiert nur im fiktiven Idealfall einer von allen widerständigen Elementen befreiten Situation, der man sich durch mehr oder weniger aufwendige Konstruktionen allenfalls asymptotisch annähern kann.

Die Tatsache, daß es seit den ersten Anfängen naturwissenschaftlichen Denkens bei den Griechen etwa zwei Jahrtausende gedauert hat, ehe die neuzeitliche Sehweise zum Durchbruch gelangte, kann als deutliches Indiz für die Lebensferne der grundlegenden physikalischen Ideen angesehen werden. Man stelle sich nur einmal vor, was vor dem geistigen Auge der Schülerinnen und Schüler abläuft, wenn sie sich die Aussage: 'Alle Gegenstände fallen gleich schnell' vorzustellen versuchen. Vielleicht sehen sie einen Ziegel vom Dach herunterfallen und am Boden zerschellen, ein Blatt vom Baum langsam zu Boden schweben oder Löwenzahnsamen im Wind verwehen. Beim besten Willen können solche Vorstellungen nicht verhindert werden, auch wenn zehnmals darauf hingewiesen wird, die Aussage gelte streng genommen nur bei Vernachlässigung des Luftwiderstands.

Die Schwierigkeit liegt weniger in der intellektuellen Anforderung, den luftleeren Raum als einen abstrak-



ten Raum ohne störende Medien zu denken. Die Schülerinnen und Schüler müssen sich auch in anderen Bereichen zuweilen mit sehr anspruchsvollen theoretischen Konstrukten auseinandersetzen. Man denke etwa an komplizierte, abstrakte Zusammenhänge im Mathematikunterricht oder an literarische Fiktionen im Deutschunterricht. Problematisch wird die Sache vor allem durch den Anspruch der Physik, daß die für Idealgestalten "gewonnenen" Aussagen als Aussagen über die Wirklichkeit schlechthin verwendet werden. Dadurch kommt implizit oder sogar explizit die eigene Lebenswelt der Lernenden ins Spiel. Hier prallen Reales und Gedachtes, sicheres Wissen und vage Vermutungen unversöhnlich aufeinander. Insbesondere muß aus Sicht der Lernenden befremden, daß die mit der physikalischen Beschreibung einhergehende Unterstellung, im luftleeren Raum, in dem kein Leben existieren kann (Abb. 5), dem man sich allenfalls mit technischem Aufwand (Vakuumpumpe oder Weltraumraketen) anzunähern vermag, gehe es gewissermaßen realer zu als in der luftgefüllten Welt, in der wir leben.



Abb. 5: Starke Emotionen werden ausgelöst angesichts einer in einer evakuierten Vakuumblocke immer hilfloser flatternden Taube.

"Der Sternenhimmel (bzw. der luftleere Weltraum, HJS) ist zum Lehrbuch für die Technik dessen geworden, was natürlicherweise auf der Erde nicht gefunden werden kann" (Blumenberg 1981, S 784).

Wenn dieses Problem leichtfertig beiseite geschoben wird, indem den Lernenden versichert wird, daß im Grunde doch alles ganz einfach sei, müssen sie ihre eigene Unzulänglichkeit als Ursache ihrer Verständnislosigkeit ansehen und beginnen, das Fach abzulehnen.

Daß der horror vacui nicht nur von der Natur, sondern auch von den Menschen nachempfunden werden kann, kommt in dem Gemälde von Wright of Derby (Abb. 5) zum Ausdruck. In dem mit zunehmendem Luftentzug ersterbenden Flattern der in einer Vakuumblocke eingesperrten Taube, zeigt sich der Horror des Vakuums auf eine sehr lebensweltliche Art: Je idealer desto lebensbedrohlicher wird die Situation.

freien Fluge die Luft teilt, deren Widerstand sie fühlt, könnte die Vorstellung fassen, daß es ihr im luftleeren Raum noch viel besser gelingen werde. Ebenso verließ Plato die Sinnenwelt, weil sie dem Verstande so enge Grenzen setzt, und wagt sich jenseits derselben, auf den Flügeln der Ideen, in den leeren Raum des reinen Verstandes. Er bemerkte nicht, daß er durch seine Bemühungen keinen Weg gewönne, denn er hatte keinen Widerhalt, gleichsam zur Unterlage, worauf er sich steifen und woran er seine Kräfte anwenden könnte, um den Verstand von der Stelle zu bringen" (Kant 1968, S. 51).

Bei Immanuel Kant löst diese Begebenheit einiges Nachdenken über das ambivalente Verhältnis von physikalischen Ideal- und lebensweltlichen Realgestalten aus: „Die leichte Taube, indem sie im

### Exkurs: Zur Annäherung an den freien Fall im Unterricht

Der oder die Lehrende läßt ein Blatt Papier (z.B. eine Postkarte) fallen, indem er es aus einiger Höhe losläßt. Das Blatt torkelt in nicht vorhersagbarer Weise Kapriolen schlagend zu Boden, der meist weit entfernt vom Fußpunkt der Stelle erreicht wird, wo der Fall begann.

Der Versuch wird wiederholt, indem das Papier diesmal senkrecht ausgerichtet losgelassen wird. Nach einer kurzen Fallstrecke, verfällt das Papier in eine gleichmäßige Drehbewegung um die horizontale Achse und landet in einer bestimmten Entfernung links oder rechts vom Startpunkt. Daß diese Entfernung stets in etwa dieselbe bleibt und es vom Zufall abhängt, ob das Papier links oder rechts vom Startpunkt landet, wird demonstriert, indem zahlreiche Blätter auf die gleiche Weise fallengelassen werden. Es entstehen schließlich zwei gleich weit vom Startpunkt entfernte Papieransammlungen.

In einem dritten Versuch wird vor den Augen der Schülerinnen und Schüler er aus dem Blatt Papier einen Papierhubschrauber ausgeschnitten und gefaltet, den man ebenfalls aus (möglichst großer Höhe) fallenläßt. Nach kurzem senkrechten Fall verfängt sich der Hubschrauber in einer eindrucksvollen Bewegungsfigur, indem er gleichmäßig rotierend zu Boden sinkt.

Der vierte Versuch besteht darin, daß der Papierhubschrauber zu einer Kugel zusammengeknüllt und ebenfalls fallengelassen wird. Die Kugel fällt wie ein Stein zum Boden.

Von den demonstrierten Versionen des Falls ist der letzte zwar der langweiligste, aber der, auf den es ankommt, weil er dem freien Fall am nächsten kommt. Die Versuchsserie ist geeignet zu zeigen, daß im freien Fall jegliche Wechselwirkung mit dem Medium der Luft, die zu interessanten Figuren führt, unterbunden wird.

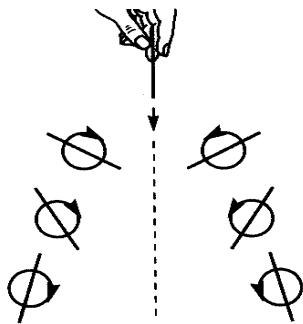


Abb. 7: Rotierend entfernt sich das Blatt Papier zur Seite.

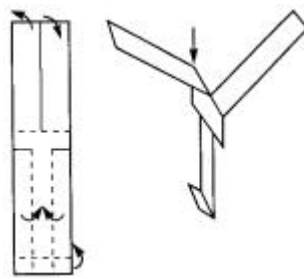


Abb. 6: Papierhubschrauber: an den durchgezogenen Linien ausschneiden, an den gestrichelten falten.

Diese Versuche sollen dazu dienen, Verständnis für die Bedeutung des freien Falls und damit exemplarisch für andere Idealgestalten in der Physik zu vermitteln. Den Lernenden soll klar werden, daß diese hier fast als Zerstörung empfundene Dekonstruktion des kunstvoll gefalteten Papiers einerseits der Verminderung des Luftwiderstands und damit der Annäherung an den freien Fall dient. Andererseits muß dieser als Voraussetzung zur Beschreibung der komplizierten Bewegungsfigur aufgefaßt werden. Nicht die

Nähe eines Konzepts zu realen Vorgängen, sondern gerade die Ferne (das wußte schon Thales) steigert die Erschließungsmächtigkeit eines physikalischen Konzepts.

### Zur Inszenierung einer physikalischen Beobachtung

Die Inszenierungsbemühungen zum freien Fall stellen für einige Schülerinnen und Schüler eine Herausforderung des als Metalesson des Unterrichts vermittelten Empirieverständnis dar. Demnach gehen sie davon aus, daß die Natur im Rahmen der Physik so beschrieben wird, wie sie an und für sich ist. Damit verbinden sie die Vorstellung, daß der Beobachter nicht aktiv in die zu beobachtende Situation eingreifen darf. Aber genau das passiert in der physikalischen Variante der Beobachtung, dem Experiment, in dem die Wirklichkeit nach Maßgabe einer wie auch immer vorgefaßten Meinung (genauer: Theorie) manipuliert und konstruiert wird. Lehrende, die in ihrer physikalischen Befangenheit auf diese Schülervorstellungen nicht vorbereitet sind, können in äußerst irritierende Situationen geraten, wie im folgenden Beispiel skizziert wird (aus: Schlichting 1996)

In einer sehr gut vorbereiteten Lehrprobe hatte der Unterrichtende eigens eine Vakuumapparatur besorgt, um zu demonstrieren, daß im luftleeren Raum einer evakuierten Glasröhre verschiedene Körper gleich schnell fallen.

Die Schülerinnen und Schüler konnten zunächst den aufwendigen Vorgang miterleben, durch den die Röhre unter glucksenden und zischenden Geräuschen leergepumpt wurde, um dann an dem auch - oder besser: vor allem - für den eingeweihten Betrachter immer wieder faszinierenden Schauspiel teilzuhaben, bei dem die Flaumfeder und die Papierschnitzel genauso schnell die Röhre hinunterfielen wie das Stück Holz und das Stück Blei.

Merkwürdigerweise erschienen einige Schülerinnen und Schüler weniger beeindruckt, als man aufgrund des nicht alltäglichen Vorgangs hätte erwarten dürfen. Durch Nachfragen des Lehrers brachte eine Schülerin das virulente Unbehagen auf den Punkt. Warum sollte sie sich darüber wundern, so ihre Einlassung. Daß man mit Hilfe von Technik alles machen könne, sei doch klar. Man hätte ebenso gut die Gegenstände mit der Hand herunterdrücken können (sie machte eine entsprechende Handbewegung), dann wären sie auch alle gemeinsam unten angekommen.

Aus der lebensweltlichen Perspektive der Lernenden besagt das Experiment mit der evakuierten Röhre nur, daß man (mit entsprechendem Aufwand) verschiedene Körper zwingen bzw. dazu bringen kann, gleich schnell zu fallen. Das empfinden sie nicht als besonders bemerkenswert, weil man das notfalls auch durch direktes Ein"greifen" mit der Hand machen könnte. Diese Aussage offenbart ein tiefgreifendes Mißverständnis über die Rolle des Experimentes im Physikunterricht. Die experimentelle "Manipulation" wird als willkürliche Einwirkung verstanden.

Dieser Eindruck ist dann geradezu zwangsläufig, wenn der Unterricht darauf verzichtet, den Unterschied zwischen lebensweltlicher und physikalischer Sehweise wenigstens beispielhaft deutlich zu machen. Ohne diesen Punkt hier weiter vertiefen zu wollen, müssen die Lernenden eingesehen haben, daß physikalische Aussagen nur unter genau spezifizierten Bedingungen, also beispielsweise im Vakuum, gelten. Nur in Ausnahmefällen können sie direkt durch Beobachtungen in der Lebenswelt nachvollzogen werden.

Im Falle des freien Falles liegt eine solche Situation vor, wenn man mit derart dichten Körpern (z.B. eine Eisenkugel) hantiert, daß der Einfluß der Luft vergleichsweise gering ist. Die bewußte Wahl von Fallkör-



pern darf daher nicht verschwiegen werden, sondern sollte als Gelegenheit benutzt werden, das Experiment als Versuch anzusehen, sich den Voraussetzungen für die Gültigkeit der physikalischen Aussage wenigstens anzunähern. Nur dann werden die Lernenden in der Lage sein, den Fall der Eisenkugel nicht mehr stillschweigend als lebensweltliche, sondern als physikalische Situation anzusehen. Dies ist besonders dann wichtig, wenn wie im vorliegenden Fall die Differenz zwischen der physikalischen und lebensweltlichen Situation gering ist und leicht übersehen werden könnte.

Erst vor diesem Hintergrund kann der Fall von anderen weniger dichten Körpern (Flaumfeder, Styropor) im Vakuum als eine zwar aufwendigere aber im Prinzip äquivalente Situation begriffen werden, obwohl sie aus lebensweltlicher Sicht viel künstlicher erscheint. Die geschaffene Situation wird dann nicht mehr als Ergebnis technischer Willkür begriffen, sondern als im Sinne des physikalischen Vorverständnisses (Theorie) notwendige Voraussetzung für die Beobachtung eines Vorgangs.

Der Reiz des Vakuumexperiments besteht so gesehen nicht im Phänomen gleich schnell fallender Gegenstände, von denen wir wissen, daß sie normalerweise unterschiedlich schnell fallen, sondern sehr viel indirekter darin, daß eine aus theoretischer physikalischer Einsicht gewonnene Erwartung tatsächlich erfüllt wird.

Wie weiter oben am Beispiel von Galilei und Newton skizziert wurde, erfahren die Lernenden an solchen Beispielen, daß physikalische Ordnungen bzw. Gesetze weder in der Welt vorgefunden werden noch vom Himmel fallen, sondern vielmehr das Ergebnis der Herstellung von Ordnung sind. Damit werden allgemeine Einsichten in die physikalische Sehweise möglich: Aufgrund theoretischer Ideen, allgemein akzeptierter Normen und einer ausgefeilten experimentellen Praxis werden die Sachverhalte so zurechtgelegt, daß sie ihnen am verständlichsten, einfachsten, überschaubarsten und plausibelsten erscheinen. Dabei fließen stillschweigende Voraussetzungen (implizites Wissen), Vorurteile, ästhetische und andere Anschauungen ein und reflektieren implizit das herrschende physikalische Paradigma (Schlichting 1996).

## ROLLEN IST NICHT FALLEN

Bei der Herstellung physikalischer Situationen spielt der Einsatz technischer Mittel eine wichtige Rolle. Mit Hilfe von lichtschrankengesteuerten elektronischen Uhren ist es eine Leichtigkeit, die den menschlichen Sinnen direkt nicht zugänglichen Änderungen der Bewegung beim freien Fall, sehr präzise zu erfassen. Dabei muß man die high- tech- Geräte selbst aufgrund ihrer Komplexität meist unhinterfragt akzeptieren. Darin besteht an sich noch kein Problem. Im konkreten Einzelfall kann jedoch durch den Einsatz der Technik der Blick für den eigentlichen Vorgang verstellt werden, indem die Aufmerksamkeit auf sachfremde Aspekte gelenkt wird. Daher empfiehlt es sich häufig, auch dann bei einfachen low- tech- Experimenten zu bleiben, wenn die Ergebnisse damit weitaus schlechter ausfallen.

Das war auch die Motivation eines Unterrichtsversuchs, bei dem der Unterrichtende mit einem Nachbau der schiefen Ebene Galileis einen Zugang zum freien Fall erarbeitete.

Er ließ eine Kugel in einer Rinne hinabrollen, so daß man die ungleichförmige Bewegung mit Hilfe eines Bandmaßes und einer Stoppuhr erfassen konnte. Der Versuch verlief fast reibungslos im doppelten Sinne des Wortes. Bei der Diskussion des Ergebnisses wurde jedoch der Erfolg durch die Äußerung einer Schülerin in Frage gestellt. Diese wollte wissen, was die in einer schrägen Rinne rollende Kugel mit einem frei fallenden Gegenstand zu tun habe. Angesichts des etwas verständnislos blickenden Lehrers präzierte sie: "Ich meine, die fallende Kugel ist frei und völlig losgelöst. Die rollende Kugel berührt aber die Rinne und wird von ihr beeinflusst. Wenn die Rinne eine scharfe Kurve machen würde, müßte die Kugel sie mitmachen." Ein Schüler fragte außerdem, ob denn rollende Kugeln sich nicht anders verhielten als fallende.

Um die Bewegung auf der schiefen Ebene als experimentellen Zugang zum Fallgesetz anzusehen, muß man sie zunächst als Sonderfall des freien Falls, als Fall mit verringerter Schwerkraft begreifen. Das allein setzt bereits ein tiefes Verständnis dessen voraus, was u.a. gerade mit diesem Versuch erarbeitet werden soll. Man müßte nachvollziehen, daß reibungsfreies Gleiten eine Art Fallen ist. Da reibungsfreies Gleiten aber nicht leicht zu verwirklichen ist, nähert man sich ihm durch "gebundenes" Rollen an, weil Rollen i.a. mit einer geringeren Reibung verbunden ist als Gleiten. Problematisch ist jedoch, daß Rollen nicht nur lebensweltlich, sondern auch physikalisch gesehen etwas völlig anderes ist als Gleiten bzw. Fallen, und eine Identifizierung nur dann zu vertreten ist, wenn dadurch keine falschen Vorstellungen verfestigt werden und außerdem der dadurch bedingte Meßfehler vernachlässigt werden kann.

Eine derartig komplexe Argumentation läßt sich im Grunde nur post hoc führen, und nur dann nachvollziehen, wenn man das Ziel schon ziemlich genau kennt. Mit der schiefen Ebene kommt man Galileis Erfolg zum Trotz nicht auf den freien Fall. Dieser kann damit allenfalls im Nachhinein illustriert werden.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Tatsache, daß schwere Gegenstände fallen, ist lebensweltlich gesehen eine Selbstverständlichkeit, eine Frage von oben und unten. Sie kommt in einer Vielfalt von realen und metaphorischen Wendungen im Alltag zum Ausdruck. Indem die Physiker sich angeschickt haben, diese Selbstverständlichkeit zu hinterfragen, kommt die physikalische Sehweise ins Spiel. In dem physikalischen Bemühen, in die empirische Vielfalt des Falls eine einfache aber keineswegs "einfäl(l)tige" Ordnung zu bringen, werden die realen Fälle als Grenzfälle eines idealen Falls angesehen. Dieser Idealfall wird aber dadurch gewonnen, daß man sich schrittweise den Widerständigkeiten der realen Lebenswelt entzieht, indem man sich gedanklich oder mit technischem Aufwand den himmlischen Verhältnissen des luftleeren Raums annähert und / oder die fallenden Gegenstände auf einen widerstandslosen Punkt reduziert. Der Vorteil liegt auf der Hand: Man kommt auf diese Weise auf ein einfaches, für alle Gegenstände geltendes Verhalten. Mit anderen Worten: Der Physiker "abstrahiert sich von dieser Welt eine eigne, von welcher er die Gesetzbücher gleichsam selbst in Händen hat"(Lichtenberg 1972) befreit. Ganz im Sinne des an Invarianzvorstellungen geknüpften physikalischen Denkens findet sich aber diese Komplexität in den Voraussetzungen wieder, die unsere Schülerinnen und Schüler durchschauen lernen müssen, wenn sie in der Lage sein sollen, von der lebensweltlichen zur physikalischen Sehweise zu wechseln.

Am Fall des freien Falles sollte deutlich gemacht werden, daß der Physiker ebenso wie der Dichter "niemals das Wirkliche, sondern immer nur das Idealische oder kunstmäßig Ausgewählte aus einem wirklichen Gegenstand" behandelt (Schiller 1952)

Solange diese Problematik weder von den Lernenden noch von den Lehrenden gesehen wird, gibt es keine Anhaltspunkte, den typischen Schwierigkeiten beim Lernen von Physik auf die Spur zu kommen, die nicht zuletzt dazu beitragen, daß Physik zu den unbeliebtesten Fächern gehört und sich in der Gesellschaft großen Akzeptanzproblemen ausgesetzt sieht.

## LITERATUR

Aristoteles: Politik A 11; 1259 a 9-18 (deutsch v. B. Snell)

Blumenberg, Hans.: Siderius Nuntius. Frankfurt 1980, S.50

Blumenberg, Hans: Die Vollzähligkeit der Sterne. Frankfurt:Suhrkamp 1997

Blumenberg, Hans: Die Genesis der kopernikanischen Welt - Suhrkamp. - Frankfurt, 1981 S 784

Galilei, Galileo: Unterredungen und mathematische Demonstrationen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1973

Kant, Immanuel: Kritik der reinen Vernunft (Einleitung). Werke Bd.4. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft 1968

Kant, Immanuel: Versuch den Begriff der negativen Größen in die Weltweisheit einzuführen. Werke Bd.2. Darmstadt: Wiss. Buchges. 1968, S. 801

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

Lichtenberg, Georg Christoph: Schriften und Briefe, Bd. III. München: Hanser 1972, S. 9

Meneghello, Luigi: Wieder da! Berlin: Wagenbach 1993

Pirandello, Luigi: Caos. Leutkirch: Amann 1987

Schlichting, H. Joachim: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts. Physik in der Schule 34/9,10 (1996), S. 283ff und S. 339ff

Schiller, Friedrich: Unsterbliche Hoffnung. Wien und Stuttgart: Georg Prachner Verlag, 1952, S. 78

Valéry Paul: Cahiers 2. Frankfurt: S. Fischer 1988, S.31

Weizsäcker, Carl Friedrich von: Die Tragweite der Wissenschaft. Stuttgart: Hirzel 1966

Wittgenstein, Ludwig: Tractatus logico-philosophicus. Frankfurt: Suhrkamp 1968