Wie fliegt und fällt ein Ball?

Das Fallgesetz nach Martin Wagenschein

von Hartmut Klein

Einführung der Herausgeber

Mit dem Fallen haben wir natürlich alle schon von Kindesbeinen an schmerzliche Erfahrungen gemacht. Aber das Wort »Fallgesetz« ruft ganz andere Erinnerungen hervor, es entführt uns aus dem Alltag in die Schulwelt: damals, im Physiksaal, da war doch diese blitzende Stahlkugel in einem superpräzisen Meßapparat. Und wie war doch noch die Formel? Irgendwie Fallweg und Fallzeit in Beziehung gesetzt, und dann noch die Erdanziehungskraft berücksichtigt? Und war nicht der eine Faktor halbiert, der andere quadriert? Richtig: $S = 1/2gt^2$. Übrigens sehr sonderbar, dieses t^2, diese Zeit im Quadrat: Quadratmeter kann ich mir ja vorstellen - wenn Länge mal Länge sich zur Fläche quadriert - aber was soll ich mir unter Quadratsekunden vorstellen: Flächenzeit? Na, egal! Seit Generationen gehört das Fallgesetz zur eisernen Ration des Physikunterrichts, zurecht, denn wissenschaftsgeschichtlich und wissenschaftssystematisch sind hier wichtige Erkenntnisschritte vom experimentell präparierten Problem zur formelklaren Lösung vollzogen. - Aber nochmals zurück: »Fallen nach Maß«: das ist doch eigentlich eine verrückte Idee, auf die man nie und nimmer im Leben gekommen wäre, eine typische Schulidee!

Hier, bei diesem verbreiteten Grundgefühl setzt Wagenscheins Unterrichtsentwurf ein. Denn für ihn sind die Schritte vom Problem zur Lösung erst die zweite Hälfte, der die Schritte vom Phänomen zum Problem vorangehen müssen, im individuellen wie im menschheitlichen Entwicklungsgang. Die präzise Präparation der Problemstellung ist ja eine wissenschaftsgeschichtlich späte Hochleistung - erst knapp 500 Jahre alt. Aber wie konnte die Menschheit, und wie kann erneut jeder einzelne Lerner auf die Hochebene dieser Fragestellung kommen, von der aus dann der Lösungsgipfel erklettert werden kann? Es geht also zunächst um einen in Alltagsphänomenen problemsichtigen, danach erst um einen problemlösenden Unterricht. - In unseren Einführungstexten bringen wir daher eine Wagenscheinminiatur, worin er ein Kind auf seinem langen und spannenden >Weg zur Physik< beobachtet, belauscht, bedenkt (Wagenschein ^{2}1988, S.196 f.); außerdem bringen wir (im Unterricht von H. Klein) einen Textausschnitt, in dem er die Rückübersetzung des physikalischen Fachwissens in den Common Sense des Alltags anmahnt. Dazwischen steht Hentigs Hinweis darauf, daß und inwiefern ein moderner Standardunterricht solcher Wagenschein'schen Rahmung und Begleitung bedarf (Hentig 1984, S. 32). - Während wir für unsere Inszenierung bei den Primzahlen auf eine narrative Vorlage zurückgreifen konnten, liegt »das Fallgesetz im Brunnenstrahl« nur als knappes 17schrittiges Unterrichtskonzept vor. Hartmut Kleins Unterrichtsinszenierungen - immer wieder in neuen Variationen, wie ein Vergleich mit Klein (1990) zeigt-hat inzwischen einen festen Platz im Unterrichtsrepertoire der Amöneburger Stiftsschule gefunden. Und auch in der Lehrer(fort)bildung hat sein Beispiel Schule gemacht, wie die Vergleiche mit Hertler (1990) und Straßner (1990) zeigen.

Leitsterne

Fallen lassen: Der unvergeßliche kleine zweijährige Italiener-Knabe Claudio, mit blonden Haaren und dunklen Augen. Er steht auf der Kiesterrasse und entdeckt, daß es Dinge gibt, die sich wiederholen lassen und uns so lehren, daß wir der Welt vertrauen dürfen. Tief versunken und unglaublich ernst hockt er sich nieder, füllt beide Hände mit den hellen Kieseln, steht langsam auf, den Blick auf die Hände gerichtet, daß nichts verlorengeht und öffnet sie dann langsam: Von selber fallen die Steine zur Erde, und immer wieder: Er wird nicht müde, es immer wieder zu tun, es in Frage zu stellen, herauszufordern, sich von neuem bestätigen zu lassen; ja, es zu üben, es auszuüben, was er sucht und braucht: Verläßlichkeit. Das Lächeln verläßt ihn zuletzt nicht mehr, und jedesmal, wenn »es« wieder gelingt, hebt er seinen dunklen Blick zu mir herauf, als wollte er sagen: Hast du es auch gesehen? Was ich kann? Was ich tun lassen kann?

Sprechen konnte er noch kaum. Und zu sagen brauchte auch ich nichts. Ganz allein machte er die uralte Grunderfahrung, aus der schließlich einmal Naturwissenschaft hervorbrechen sollte: Ordnung, Wiederkehr, Voraussagbarkeit ist - unter Umständen - in unsere Hände gegeben.

Bald wird Claudio nicht mehr staunen. Er wird sich gewöhnen. Es wird ihm selbstverständlich werden, daß man »wohnen« kann in dieser Welt. Er wird nicht mehr fragen, nicht mit Blicken, nicht mit Worten: Warum fallen die Steine?

Aber es kann sein, daß er nach vielen Jahren wieder dahin kommen wird, in ganz anderer Weise: Er wird vielleicht Physik gelernt haben: Sie beginnt zwar mit dem Verwundern über das Ungewöhnliche, aber sie gewinnt das Staunen über die gewohnte Ordnung zurück.

Wagenschein 1973

Auf einem Fest einer befreundeten Schule führten Schüler den Besuchern ihre verschiedenen Lerntätigkeiten in den verschiedenen Fachräumen vor. Im Physikraum saßen drei Schüler und simulierten am Bildschirm ihres Computers die Bahn eines Wurfgeschosses. Sie hatten dafür eine Formel und wendeten sie auf Fälle mit verschiedenen Variablen an: für den und den Abschußwinkel, die und die Schubkraft, das und das Gewicht des Projektils. Ihre Strategie (Programmierung) hatte folgende Elemente: Eingaben für die Maßstäblichkeit des Bildfeldes; Abstand und damit Zahl der Zeitpunkte, für die die Berechnung vorgenommen werden sollte - im Fall des von mir bestellten Projektils, eines Golfballs, bei je einer Zehntelsekunde; die Anweisung, das Bild auszudrucken. Dann arbeitete die Maschine, gab den Flugort des Balles für die einzelnen Meßpunkte an und verband diese Angaben mit einer säuberlichen Linie. Ob das im luftleeren Raum anders sei und wenn nicht, wie man den Luftwiderstand einbringe, konnten die Schüler nicht gleich sagen und auch nicht, wie sie zu der Formel gekommen waren und wieso diese immer Anwendung fand. Das hätten sie sagen können, wenn sie vorher einen Kurs bei Martin Wagenschein gehabt hätten - den schönen mit dem Wasserstrahl, in dem einem das Wunder des Fallgesetzes in mehreren einfachen Versuchen von höchster Anschaulichkeit aufgeht und nicht nur sein Inhalt mitgeteilt und eingeprägt wird. Mit anderen Worten: Wenn man die physikalische Erfahrung hat, die Martin Wagenschein vermittelt, und wenn man seinen Pythagoras kennt und versteht, dann kann man am Computer lernen, wie man dieses Wissen auch praktisch, sicher, schnell verwendbar macht, es - die Prinzipien nutzend - auf andere Lösungen ähnlicher Art überträgt. Dafür aber braucht man normalen Unterricht.

Hentig 1979

Hartmut Klein

Wie fliegt und fällt ein Ball?

Das Fallgesetz nach Martin Wagenschein

Einleitung

Das Fallgesetz ist ein Unterrichtsthema, an dem kein Abiturient vorbeikommt. Auch ich nicht. Die Art und Weise, in der man es mir beigebracht hatte, war vergessen. Geblieben war mir aber die Endformel: »Esgleicheinhalbgetequadrat«. Ich konnte mit dieser Formel umgehen, konnte sie anwenden, so wie viele andere physikalische Formeln. Es machte einmal großen Eindruck, als es mir gelang, die Tiefe eines Brunnens auszurechnen: Ich ließ einen Stein hinabfallen und maß die Zeit bis zu seinem Aufschlag.

Auf der Universität lernte ich Faszinierendes dazu: wie diese Formel Teil eines genialen und umfassenden Gedankengebäudes war, das es erlaubte, alle mechanischen Probleme aus wenigen Axiomen zu deduzieren. Die mit »sehr gut« bestandene Prüfung in Theoretischer Mechanik bestätigte mir, daß ich das Fallgesetz quasi auf einer höheren Stufe verstanden hatte.

Im fünften Semester erfuhr mein Wissen eine tiefe Erschütterung. Ich las in einem pädagogischen Lehrbuch das >Fallgesetz auf Deutsch<: »Wenn dies (ich zeige zwischen zwei senkrecht übereinandergehaltenen Fingerspitzen irgendeine Strecke) die Strecke bedeutet, die ein Stein in der ersten Zeiteinheit fällt, - es braucht nicht die Sekunde zu sein - dann fällt er in der zweiten Zeiteinheit das - nein, nicht 2fache, sondern - 3fache dieser Strecke; in der dann wieder nächsten, dritten, das 5fache; dann das 7fache, das 9fache und so fort. Sie sehen, die ungeraden natürlichen Zahlen treten der Reihe nach auf« (Wagenschein [2]1988, S.195). Sollte dies das Fallgesetz sein? - Ich brauchte einige Minuten, einige Rechnungen, bis ich begriff: Das ist genau der Inhalt des »Esgleicheinhalbgetequadrat«. Da hatte ich Jahre lang eine Formel benutzt, hatte die mir gestellten Aufgaben richtig gelöst, und erst jetzt begriff ich die eigentliche Aussage des Fallgesetzes.

Ein paar Jahre später sollte ich als junger Referendar das Fallgesetz anderen beibringen, und ich erinnerte mich des pädagogischen Seminars bei Prof. Berg. Dort ging es um den Pädagogen, der das Gesetz »auf Deutsch« formuliert hatte: Martin Wagenschein. Er hatte zudem Vieles mehr zu diesem Thema geschrieben, auch einen Grundriß zu einem Unterrichtsentwurf. Als ich daran arbeitete, stieß ich auf Wagenscheins Aufforderung, bei Galilei selbst nachzulesen. Galileo Galilei gilt als Begründer der neuzeitlichen Naturwissenschaft. Der Grund dafür ist nicht die berühmt-berüchtigte Auseinandersetzung mit der Kirche über die kopernikanische Lehre, sondern vielmehr seine Arbeit über mechanische Probleme. Insbesondere die Art und Weise, in der er das Fallgesetz entdeckt und anschließend formuliert hatte, gehört zu den Pionierleistungen, die eine neue Epoche einläuteten: Hier werden erstmalig die beiden Grundpfeiler sichtbar, auf die sich die neuzeitliche Naturwissenschaft stützt: das Experiment und die mathematische Analyse. Das Fallgesetz steht am Anfang der modernen Wissenschaften. Technischer und medizinischer Fortschritt, Deklaration der Menschenrechte, aber auch die ökologische Krise und die Massenvernichtungswaffen sind Folgen einer Entwicklung, die zur Zeit Galileis ihren Anfang nahm.

Freilich ist die Technologie der Atombombe hauptsächlich ein Kind des wissenschaftlichen Umsturzes, der zu Beginn unseres Jahrhunderts durch die Atomphysik stattfand. Um die neuen Phänomene zu verstehen, die im Zusammenhang mit der Erforschung der Atome auftauchten, waren die Physiker gezwungen, ihre Wissenschaft, die seit Galilei kontinuierlich gewachsen und gefestigt war, in ihren Grundlagen in Frage zu stellen und neu zu formulieren. Alles Wissen über die Natur, auch die Existenz der Naturgesetze, wurde radikal in Frage gestellt. Was kann der Mensch überhaupt über die Natur erfahren? Was bedeutet es, wenn eine Ordnung in der Natur gefunden wird? Warum sind solche Ordnungen mathematisch formulierbar? Und warum sind diese mathematischen Formeln von solcher Einfachheit und innerer Schönheit? - Denn Galileis Fallgesetz ist einfach: Die Falltiefe wächst wie das Quadrat der Fallzeit - in einer Formel: $s = {}^{1}/2\ g\ t^{2}$. Hieße es $s = {}^{1}/2\ g\ t^{1{,}986}$, so wäre auch dies eine mathematische Formel, jedoch nicht mehr so einfach und schön.

Alle Naturgesetze, gerade die grundlegenden der Atomphysik, sind von einer Einfachheit, die die großen Denker zu allen Zeiten herausgefordert hat. Werner Heisenberg und Albert Einstein sahen in der Einfachheit einer Formel ein Kriterium für ihre Wahrheit. Genau diese Erfahrung - natürlich auf einem ganz anderen Niveau - machte ich als Lehrer, der lernte, Schüler im Unterricht den Weg der Erkenntnis selbständig gehen zu lassen, mit all den Irr- und Umwegen, dem Stammeln und Tasten, dem Nichtweiterwissen und manchmal auch Nichtweiterwollen. Und wenn sich dann plötzlich, nach langen Anstrengungen eine einfache Formel herausbildet, knapp formulierbar, dann ertönt die erlösende, zufriedene Feststellung: »Ja, jetzt haben wir's«.

Der folgende Bericht zeigt, wie ein Unterricht zum Fallgesetz ablaufen kann, der auf Martin Wagenscheins Lehrstück »Das Fallgesetz im Brunnenstrahl« (Wagenschein 1975, S.45-58) beruht. Der Unterricht fand, inzwischen sechsmal, in einem dreistündigen Grundkurs der Jahrgangsstufe 11 der Stiftsschule St. Johann in Amöneburg statt, einer staatlich anerkannten und durch den Titel »Schule mit besonderer pädagogischer Prägung« gewürdigten Schule in freier katholischer Trägerschaft.

Der Einstieg

Martin Wagenschein schlägt als erste Frage vor: »Wie fliegt eigentlich ein geworfener Stein oder Ball? « Auf den ersten Blick nahezu trivial erscheinend, ist dies die Frage nach einem sehr komplexen Phänomen, dem Schiefen Wurf, der üblicherweise am Ende der Bewegungslehre behandelt wird. Mit einer solchen Frage vor 24 Mädchen und Jungen der elften Klasse einen Physikkurs zu beginnen, noch dazu draußen im Garten in der warmen Vormittagssonne, ist schon gewagt. Aber auf ein solches Wagnis kommt es an! Indem der Lehrer die apparatebestückte Trutzburg des Physiksaales verläßt und darüber hinaus mit der gewohnten Reihenfolge des systematischen Lehrgangs auch die bewährten Argumentationsmuster aufgibt, läßt er sich auf ein Unternehmen ein, dessen Ausgang höchst ungewiß ist. Aber er vollzieht damit eine nicht unwichtige Voraussetzung für ein erfolgreiches Lehren im Sinne Martin Wagenscheins: »Lehrer und Schüler müssen durch ein Problem, wenn es exemplarisch sein soll, nicht nur zum Tun, sie müssen aus ihrer Sicherheit herausgefordert werden« (Wagenschein [10]1992, S. 38 f.).

Die Wahl der Umgebung trägt dazu bei, doch geht es dann vor allem darum, die Herausforderung, die in der erwähnten Frage liegt, allen deutlich werden zu lassen. »Der Ball fliegt in einem Bogen zur Erde.« So die erste Antwort. »Und, tut er dies immer?« Zur Verdeutlichung dieser Frage werfe ich den mitgebrachten Tennisball ein wenig fester als vorher. Thorsten: »Wenn man sehr feste wirft, dann fliegt er erst ein Stück geradeaus.« »Und dann? Ist es so, wie ein Herr Santbach im Jahre 1561 vermutete, daß ein Kanonenprojektil bis zur Erschöpfung seiner Geschwindigkeit geradeaus fortgeht und dann vertikal herabfällt?« »Nein. So ist es nicht! Es ist ein Bogen.« -Einige amüsieren sich über die Meinung des Herrn Santbach. Es ist ein Bogen, darin stimmen alle überein. »Aber wann beginnt der Bogen? Nach der Erschöpfung der Geschwindigkeit?«

Jetzt wird die Sache langsam schwieriger. Die Meinungen gehen hin und her: Es habe etwas mit der Geschwindigkeit zu tun, mit der »Kraft«, mit der der Ball fliegt. Vielleicht beginne der Bogen dann, wenn die Kraft, die den Ball fliegen läßt, genauso groß ist wie die Kraft, die ihn zur Erde zieht. Aber warum solle denn die »Flugkraft« überhaupt abnehmen? Der Luftwiderstand kommt ins Spiel. Und die Eigendrehung des Balles. Jemand erinnert daran, daß erst kürzlich der Littbarski wieder eine »Ecke 'reingedreht« hat. »Vielleicht wäre es auch nützlich zu wissen, ob es ein Kreisbogen ist, den wir untersuchen. « Mit dieser Äußerung macht Henrik das Durcheinander komplett. Richtiges und Falsches steht vom Lehrer unkommentiert nebeneinander. »Die schon bei Sokrates berühmte Verwirrung ist eingetreten. Alle sitzen ratlos da. Das anfangs Gewisse ist ihnen ungewiß geworden. Anstatt Klarheit in ihre Vorstellungen zu bringen, fühlen sie sich der Fähigkeit beraubt, durch Denken irgendetwas klar zu stellen. « (Nelson 1970, S. 297) Der in der sokratischen Methode erfahrene Leonard Nelson trifft die Situation recht gut.

Aber wie soll es weitergehen? Die Geister scheiden sich: Manche beginnen erneut mit Wurfexperimenten, andere strengen ihre Köpfe an, wieder andere wissen längst nicht mehr, worum es geht und albern herum, eine vierte Gruppe schaut sich alles amüsiert an und wartet erst einmal ab. Die Nachdenkenden erörtern die Frage nach den Kräften. Heiko erkennt, daß die »Flugkraft«, oder besser die »Wurfkraft«, nur so lange wirkt, bis der Ball die Hand verlassen hat. Ab dann hat man es nur noch mit der Erdanziehungskraft zu tun. »Aber was hat der Ball, daß er weiterfliegt? « fragt Martin.

Diese Gedanken entstehen langsam im Hin und Her der Argumente. Unterbrochen auch immer wieder durch die praktisch Begabten, die zur Erhellung der Problematik nach einem geeigneten Experiment suchen. So werden etwa zwei große, unterschiedlich schwere Steine aus dem dritten Stock des Schulgebäudes fallen gelassen, um zu überprüfen, was in der Mittelstufe gelehrt wurde: Zwei Körper fallen unabhängig von ihrer Masse gleich schnell zu Boden, sofern der sie bremsende Luftwiderstand vernachlässigbar ist. In den Köpfen war dieser Lehrsatz wohl drin, aber keiner hätte seine Hand dafür auf den Block gelegt. So wird die Sache auf unterschiedlichen Wegen weitergebracht, doch spüren alle, daß die entscheidende Idee noch fehlt. Sie reift bei den Praktikern heran: Die Wurfbewegungen, die sie untersuchen, laufen alle zu schnell ab. Man müßte sie verlangsamen, irgendwie sichtbar machen oder konservieren. Hier geschieht Wesentliches: der Übergang vom alltäglichen und sehr komplexen Phänomen hin zum gezielten Experiment. Alle sehen diese Forderung ein und lassen ihrer Phantasie freien Lauf: Stroboskopaufnahmen mit der Fotokamera, und die mit hoher Frequenz Bälle abschießende Tennismaschine sind die besten der zahlreichen Vorschläge. Dann geschieht Unerwartetes, wenngleich still Erhofftes: Thorsten und Rainer, die seit ein paar Minuten herumalbern, entdecken einen Gartenschlauch. »Wir können ja mal Wasser spritzen« schlägt Thorsten vor, »das ist ja auch so ein Bogen.« Der Schlauch liegt nicht zufällig dort im Garten. Der Hausmeister hatte ihn auf mein Bitten hin angeschlossen. Dankbar greife ich also Thorstens Idee auf. Es ist wirklich ein schöner, in Ruhe beobachtbarer Bogen, den der dicke Wasserstrahl dort im Sonnenlicht beschreibt. »ja können wir das denn vergleichen, den Stein und das Wasser?« Susanne formuliert, was alle denken. Die Stroboskopaufnahmen und die Tennismaschine waren einleuchtender, handelte es sich doch immer um einzelne

Geschosse und nicht wie beim Wasserstrahl um ein Ganzes. Wagenschein hat einen beweiskräftigen Versuch parat: »Man muß den Zufluß hin und wieder absperren, unterbrechen, das Wasser in Portionen zerhacken, Wasser-Stücke, WasserStangen, Wasser-Geschosse, um zu sehen: das ist geworfenes Wasser! Denn man sieht: Wenn so ein Wasserstück aus dem Zusammenhang herausgenommen wird, gelöst vom Vorher-Schießenden und vom Nachdrängenden, so ändert das nichts an der Gestalt des eigentümlich gebogenen Strahls: Wir haben haben also das Recht, den zusammenhängenden Strahl in Gedanken in Tropfen zu zerlegen (Wagenschein 1975, S. 46). So haben wir am Ende der ersten Doppelstunde diese Einsicht gefunden: Ein Wasserstrahl repräsentiert die Flugbahn eines geworfenen Balles.

Das Experiment

Von nun an finden alle Unterrichtsstunden in der normalen Umgebung des Physikraumes statt. Einen Wasserbogen herzustellen ist leicht, in Ruhe kann er nun beobachtet werden. Die entscheidenden Fagen aber sind noch nicht beantwortet: Wann beginnt der Bogen? Welcher Art ist der Bogen? Was hat das Wasser, daß es weiterfliegt? Wir müssen entscheiden, welche Frage wir zuerst angehen wollen. Die dritte Frage führt zum Trägheitsgesetz, das in Wagenscheins Ausführungen keine Rolle spielt. Es ist auch an dieser Stelle nicht nötig, wenn man sich den ersten beiden Fragen zuwendet. Einmal kam es vor, daß sehr gescheite Denker im Laufe einer Stunde den Trägheitssatz von alleine fanden, ohne Experiment, nur durch gemeinsames nachdenkliches Weiterfragen. Aber dies ist nicht die Regel. Wagenschein beschreibt den Fortgang, der aus der ersten Frage folgt.

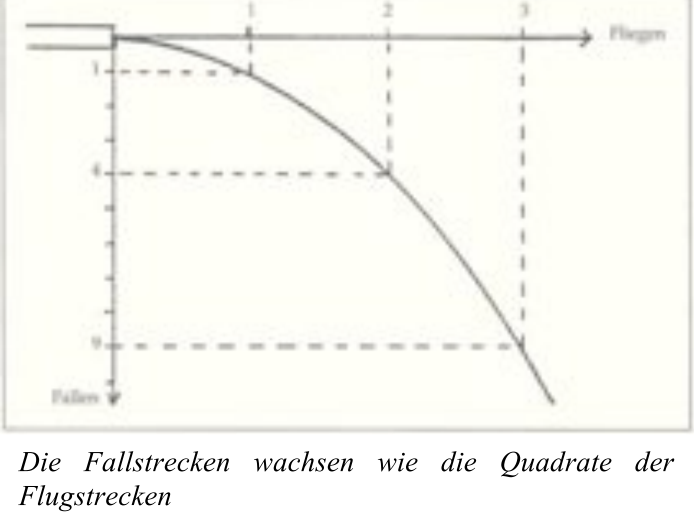
Am geradlinigsten führt meist die zweite Frage weiter: Welcher Art ist der Bogen? Dies zu entscheiden bedarf es genauer Informationen. Ein Kreisbogen ist wie jede andere mathematische Figur exakt definiert. Es ist leicht einzusehen, daß ein Vermessen des Wasserbogens weiterhelfen wird. Wir einigen uns zunächst, daß wir den einfachsten Fall untersuchen wollen: das waagerechte Ausströmen. Vermessen bedeutet, die Wurfweiten und die entsprechenden Falltiefen festzustellen. Nun wäre dies eine nasse Angelegenheit. Wagenschein schlägt vor, den Bogen auf eine Tafel oder etwas Ähnliches zu übertragen. Eine weitaus bessere Methode stammt von Emil Straßner, einem Lehrer am TrifelsGymnasium in Anweiler: Mit einem Overhead-Projektor wirft man den Schatten des Bogens an die Wand. Ein wenig Übung reicht aus und man kann den Bogen auf einer Folie nachzeichnen. Diese Folie kann kopiert und jedem Schüler die Bahnkurve zum Ausmessen ausgehändigt werden. Besser noch: Es werden verschiedene Kurven aufgenommen und ausgewertet (vgl. Straßner 1990, S. 400).

Eine weitere, sehr schöne Möglichkeit, die Bahnkurve eines Balles festzuhalten, ist eine photographische Aufnahme. Dieses Vorgehen wird oft von Schülern vorgeschlagen und nicht selten findet sich jemand, der sowohl Fachkenntnis als auch die nötige Ausrüstung mitbringt, um die Sache zu unternehmen. Im Schein einer hellen Lampe läßt man eine gut polierte Stahlkugel vor schwarzem Hintergrund fliegen und fotographiert mit einer so langen Belichtungszeit, daß die gesamte Flugbahn sichtbar wird. In der Regel ist eine ganze Belichtungsreihe nötig. Um der Kugel immer die gleiche Anfangsgeschwindigkeit zu geben, baut man zunächst eine Art »Sprungschanze«.

Die entwickelte Schwarzweißaufnahme kann, wie die Overheadfolien, ebenfalls leicht kopiert und den Schülern zur Auswertung gegeben werden.

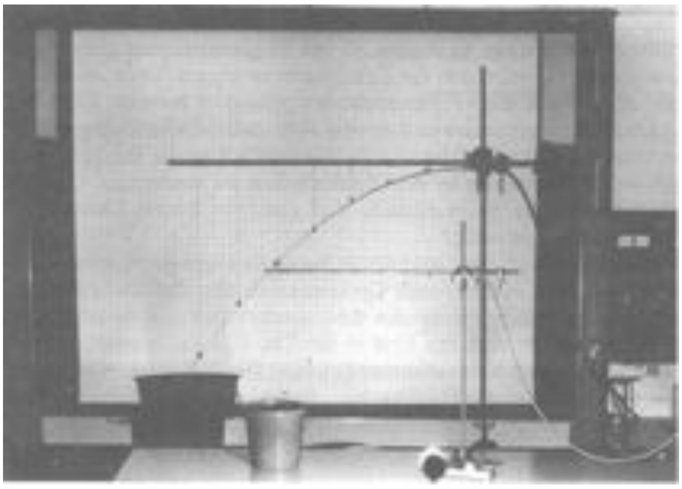
Die Schüler können dies zu Hause tun, ohne irgendwelche Vorgaben. Natürlich legt jeder das Lineal an und mißt die Längen in der Einheit Zentimeter. Kein heutiger Schüler käme auf die Idee, die Längen in beliebigen Einheiten zu messen, so wie Wagenschein vorschlägt und wie notwendig wäre, um das Experiment in seinem Sinne auszuwerten. Aber durch die »Folienmethode« gelingt es bestens. Jeder hat etwas anderes gemessen und so sind viele individuelle Zahlenreihen entstanden. Wir schreiben so viele wie möglich an die Tafel und nun gilt es, Gemeinsames in den Zahlenreihen zu entdecken. Dies ist unter Umständen nicht einfach. Viel Zeit, viel Raten, Umrechnen und Zuordnen ist nötig.

Diese langwierige, aber spannende Suche ist allein getragen von der Hoffnung, daß es überhaupt Gemeinsames gibt, daß diese Zahlenreihen nicht zufällig entstanden sind, sondern daß sich dahinter eine Gesetzmäßigkeit verbirgt. Und in der Tat, eine zahlenmäßige Ordnung scheint sich herauszukristallisieren: Die Fallstrecken wachsen

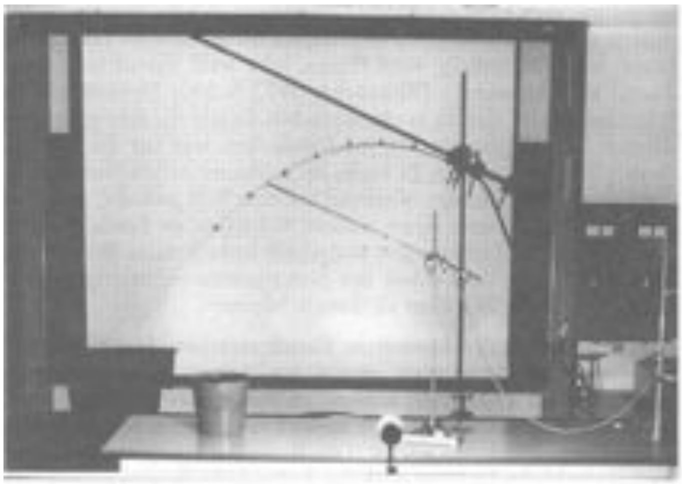


Die Fallstrecken wachsen wie die Quadrate der Flugstrecken wie die Quadrate der Flugstrecken. Ja, so ist es. Alle Zahlenreihen werden überprüft. Diese einfache Ordnung faßt alle Messungen zusammen. Wir sind am Ziel.

In einem Demonstrationsversuch gehen wir noch einmal von einer anderen Seite an das Problem heran. Durch kleine Gewichte, die mit Angelschnüren an einen Stab gebunden sind, wird ein quadratischer Zusammenhang von Falltiefe und Wurfweite vorgegeben.



Die Bahnkurve beim Waagerechten Wurf



Die Bahnkurve beim Schiefen Wurf

Gelingt es nun, die Wasserstromstärke so einzustellen, daß der Strahl genau an den Gewichten entlang strömt? Im abgedunkelten Raum betrachten wir die Schattenprojektion. Es herrscht gespannte Stille. Es geht! Dadurch ermutigt verlassen wir den waagerechten Wurf und stellen schiefe Strömungswinkel her: Langsam drehe ich den Stab mitsamt der Wasserdüse steil nach oben, dann wieder hinunter, bis es fast senkrecht nach unten strömt, und wieder hinauf. Die quadratische Zuordnung hält vollkommen stand. Die Stille im Raum wird plötzlich durch spontane Beifallskundgebungen der Schüler unterbrochen. Diese Demonstration ist ergreifend. Mehrfach habe ich es erlebt. Das Gesetz stimmt! Seine Einfachheit und Universalität rühren uns in seltsamer Weise an.

Philosophieren?

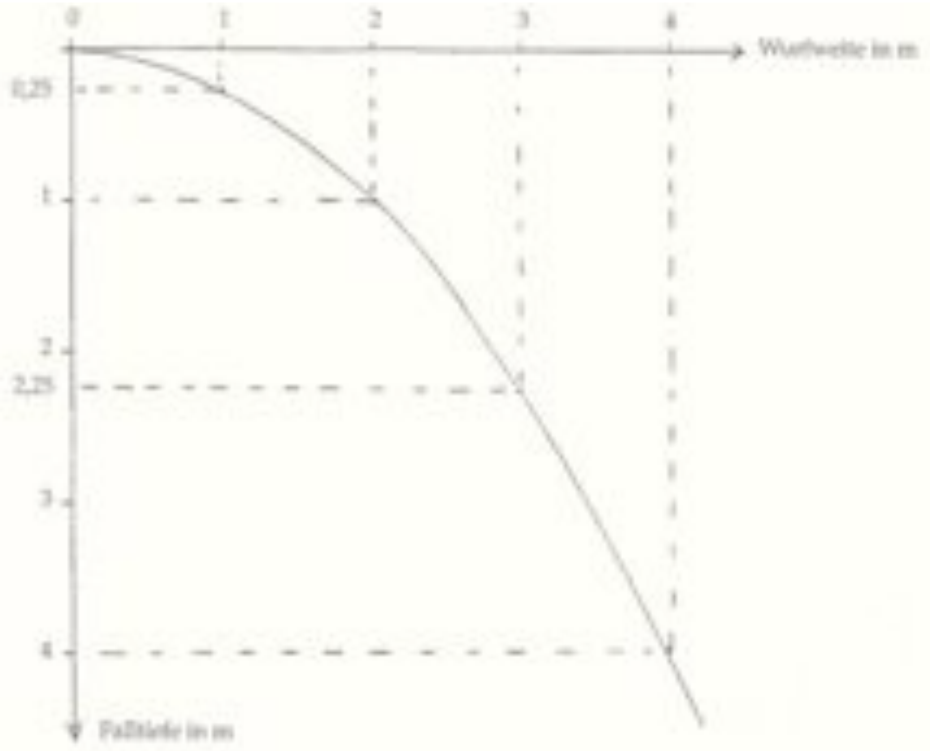
Walter Hertler, der das Fallgesetz nach Martin Wagenschein am Stuttgarter Heidehofgymnasium unterrichtet hat, berichtet, daß seine Schüler einmal das Auftreten der Quadratzahlen hinterfragt haben. Die Quadratzahlen entstehen ja dadurch, daß man die natürlichen Zahlen der Reihe nach mit sich selbst multipliziert. Dies geschieht in unseren Köpfen - aber woher weiß die Natur davon? Jemand sagte: »Der Mensch denkt gleich, wie die Natur ist.« (Hertler 1990, S.441) Oder: »Im menschlichen Hirn finden sich die Strukturen der Natur wieder. « Die Diskussion endete mit der Frage: Was kann der Mensch in der Natur erkennen und entdecken?

Ergeben sich solche Fragen aus dem Unterricht, so kann der Lehrer vielleicht reagieren, indem er die Ansichten großer Naturforscher zu Wort kommen läßt. Viele der großen Denker der Menschheitsgeschichte standen vor solchen Fragen. Carl Friedrich von Weizsäcker fragt: »Was wird entdeckt, wenn sich zeigt, daß gerade die Grundgesetze (...) wirklich einfach sind? Diese Frage stellt Heisenberg und ich glaube, man kann mit gutem Gewissen sagen, die Wissenschaftstheorie unseres Jahrhunderts weiß darauf keine Antwort. Nun ist die Frage: weiß Heisenberg, weiß Platon, oder weiß irgendein anderer darauf eine Antwort?« (Weizsäcker 1977, S.240) Denken wir an Johannes Kepler, der im mathematischen Gesetz die Schöpfungsgedanken Gottes erkannte. Sie nachzudenken war für ihn Gottesdienst. Oder an Leibnitz. Er findet im mathematischen Naturgesetz den Geist in der Materie. Niemand hat eine Welt gedacht, in der so einfache Grundgesetze einen solchen Reichtum an Erscheinungen beschreiben. Für Leibnitz gibt es deshalb keine bessere Welt als die existierende. Die Einfachheit der Naturgesetze rechtfertigen trotz allen Übels in der Welt Gott als ihren Schöpfer.

Längst haben wir den Bereich der Physik verlassen. Halten wir uns den Gang der Dinge noch einmal vor Augen: Ausgehend vom ursprünglichen Phänomen kommt es zum gezielten Experiment. Indem wir uns der Wirklichkeit dieses Experimentes mit Maß und Zahl nähern, schränken wir zwar die Breite der Erkenntnis ein - beispielsweise bleibt die Frage nach der Ästhetik des Bogens ausgeklammert-erreichen jedoch im Auffinden eines einfachen, mathematisch faßbaren gesetzmäßigen Zusammenhanges eine Tiefe der Erkenntnis, die die physikalische Methode der Naturbetrachtung einerseits rechtfertigt, andererseits auch wieder aus der Physik hinausführt in den metaphysischen Bereich hinein. Martin Wagenschein macht deutlich, um was es dabei pädagogisch geht: »Die physikalisch betrachtete Natur enthüllt eine Ordnung: Sie gibt einen Beitrag zum Wichtigsten, das wir im Leben brauchen: zum Vertrauen und Selbstvertrauen. Zwar ist das Vertrauen zu den Mitmenschen noch wichtiger. Aber es bedeutet schon etwas, zu erkennen, daß wir in einer zuverlässigen Welt leben, und es stärkt das Selbstvertrauen, daß wir es herausgebracht haben« (Wagenschein).

Der moderne Mensch hat im Zuge des naturwissenschaftlichen Denkens viel an Geborgenheit verloren. Dies ist der eine Aspekt. Der andere, der eine geheime Ordnung offenbart und Vertrauen weckt, gehört jedoch genauso zur Physik. »Beides richtig einzuschätzen, nämlich als nur im Lichte einer bestimmten beschränkenden Methode als Aspekt sich zeigend, ist das Ziel eines bildenden Physikunterrichts« (Wagenschein [10]1992, S. 44). - So unerläßlich solche Überlegungen für den Lehrer sind, sein Handwerk hat auch ganz andere Seiten, z. B. Sicherung der Ergebnisse oder Feststellung und Bewertung der Schülerleistungen.

Sichern und Üben



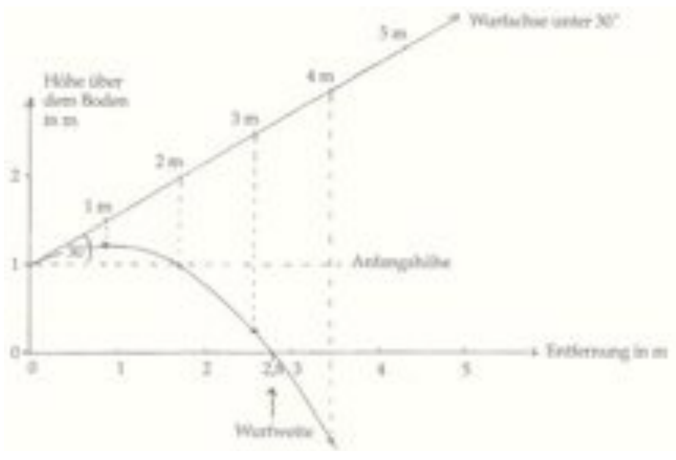
Die vorgegebene Bahnkurve

Neben den üblichen Auswertungsverfahren (Ursprungsgerade und Proportionalität) ist es hier möglich, die Entfernung des Aufschlages bei einem Schiefen Wurf graphisch zu ermitteln. Ihre rechnerische Behandlung gehört zu den anspruchvollsten Aufgaben, die im Rahmen des ganzen Halbjahreskurses später geleistet werden. Das Experiment mit den verschiedenen Wurfwinkeln eröffnet hier einen ganz einfachen Zugang. Wir gehen zunächst noch einmal aus von der Bahnkurve eines waagerecht geworfenen Balles und stellen uns dann die Frage, wie weit der Ball fliegen würde, wenn wir ihn mit gleicher Anfangsgeschwindigkeit nun nicht waagerecht, sondern - sagen wir: unter einem Winkel von 30 ° gegenüber der Horizontalen - aus einer bestimmten Höhe, z. B. 1 m, abwerfen würden. Aus der vorgegebenen Bahnkurve lesen wir dazu einige Werte für die Falltiefe bei entsprechender Wurfweite ab.

Wurfweite	in m	1	2	3	4
Falltiefe	in m	0,25	1	2,25	4

Die abgelesene Wertetabelle

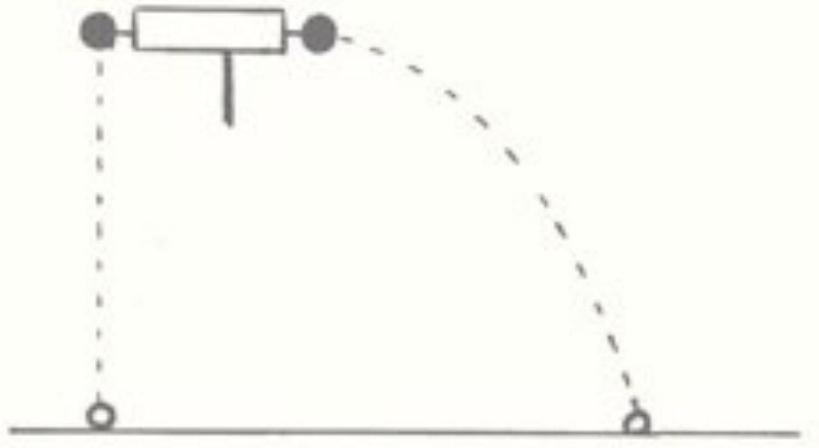
Diese Werte übertragen wir nun in ein neues Diagramm. Auf der schiefen Wurfachse werden die Wurfweiten abgetragen und senkrecht zum Erdboden (!) die entsprechenden Falltiefen. Bei 4 m Weite wäre der Ball bereits unterhalb des Erdbodens. Bei 2,8 m schlägt er auf.



Graphische Bestimmung der Wurfweite bei einem

Das Fallgesetz

Die eingangs gestellte Frage nach der Flugbahn des Balles ist ja nun beantwortet, insofern sind wir am Ziel. Aber es hieße einen Elfmeter zu verschießen, wenn wir nicht ein wenig mehr investieren und das Fallgesetz herleiten würden. Die Gesprächsführung im Unterricht wird sich dabei etwas ändern. War es dem Lehrer bislang möglich, weitgehend die Rolle der »sokratischen Hebamme« zu spielen, so wird er jetzt stärker führen, Demonstrationsexperimente einbringen und im großen und ganzen ein fragend-entwickelndes Gespräch führen.



Der Vergleich einer waagerecht geworfenen Kugel mit einer senkrecht fallenden

Offensichtlich ist das »Quadratzahlengesetz« unabhängig von den Eigenarten des Werfens: Weder die anfängliche Geschwindigkeit noch die Abwurfwinkel ändern etwas. Könnte es sein, daß dieses Gesetz ausschließlich »der anderen Macht, der Macht des Fallens« (Wagenschein) angehört? Ich präsentiere den Schülern ein Experiment: Mit Hilfe eines kleinen Schußapparates, der sich in jeder Physiksammlung findet, kann man gleichzeitig eine Kugel abschießen und eine andere fallen lassen. Dadurch können wir beide Bewegungen miteinander vergleichen.

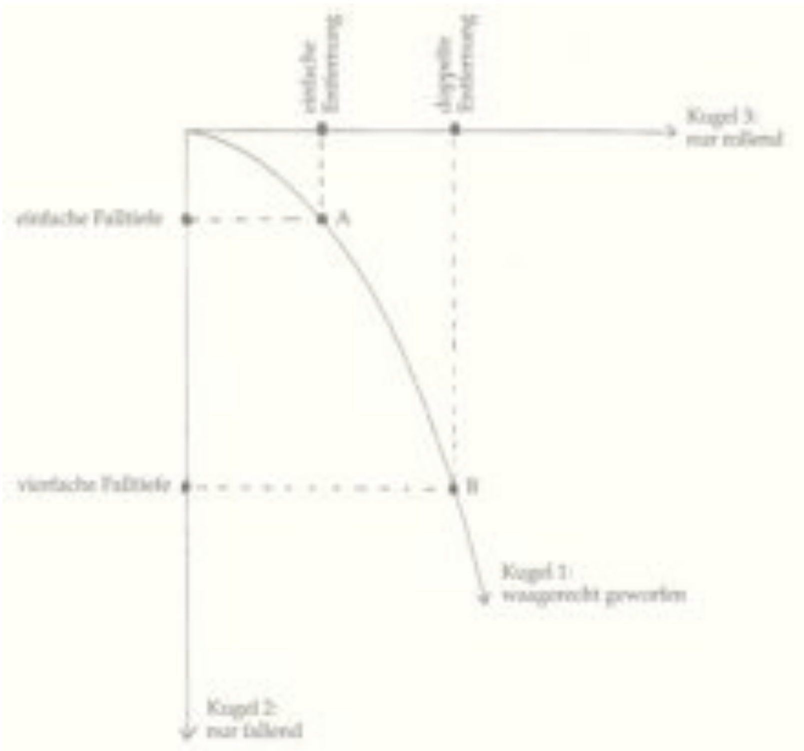
Das Ergebnis ist erstaunlich: Alle hören, daß beide Kugeln gleichzeitig auf den Boden schlagen. Aber einige trauen ihren Ohren nicht. Noch einmal! Doch, es stimmt. Wir variieren die Anfangshöhe: 10 cm über der Tischplatte oder hoch auf dem Tisch stehend bis auf den Boden. Es stimmt immer! Dann wird fester geschossen, so daß die eine Kugel quer durch den ganzen Raum fliegt, oder nur ganz lokker: die Ohren hören immer das gleiche!

Die Köpfe können sich wohl nicht so recht vorstellen, daß die Ohren recht haben. Wolfgang ist Sportschütze und sein Einwand gibt Vielen neue Nahrung: »Das heißt ja,« überlegt er, »wenn ich mit meinem Gewehr schieße, und die Kugel fliegt ein paar hundert Meter weit, dann gilt das auch?« - »Also ich kann mir das nicht vorstellen«, stimmt Frank zu. Zwischen den Schülern entspinnt sich ein längeres Gespräch, das die »Ungläubigen« überzeugen soll. Es gibt im wesentlichen ein einziges Argument: nämlich daß die weitfliegende Kugel ja eine viel größere Geschwindigkeit hat und somit in der gleichen Zeit auch eine größere Strecke zurücklegen kann.

Ob man dies einsieht, hängt wohl davon ab, inwieweit man einen als richtig erkannten Sachverhalt konsequent weiterdenken kann und will, auch in einen Bereich hinein, der sich der direkten sinnlichen Wahrnehmung verschließt. Das Ergebnis des Ganzen fassen wir folgendermaßen zusammen: Das Fallen wird durch das Werfen nicht gestört. Für das Fallen an sich ist es unerheblich, ob noch eine seitliche Bewegungskomponente hinzukommt. Gilt das auch umgekehrt: Wird das Werfen auch nicht durch das Fallen gestört? Wir suchen nach einem Experiment, das hierüber Aufschluß geben könnte. Nach einigem Hin und Her hat Martin die entscheidende Idee: »Man müßte einen Ball werfen und gleichzeitig sein Fallen verhindern. « Die einfachste Möglichkeit besteht darin, den Ball einfach über einen Tisch rollen zu lassen. Wenn es ein glatter Tisch ist und der Ball durch eine Stahlkugel ersetzt wird, spielt die Reibung keine große Rolle. So lassen sich wiederum zwei Kugeln miteinander vergleichen, die eine wie gewohnt waagerecht abgeworfen und die andere nur rollend.

Der Vergleich einer waagerecht geworfenen Kugel mit einer waagerecht rollenden.

Das Ergebnis überrascht nun nicht mehr: Beide Kugeln erreichen gleichzeitig die Wand. Also: Auch das Werfen wird durch das Fallen nicht gestört. Wir halten beide Experimente in einer Tafelskizze fest:



Tafelskizze

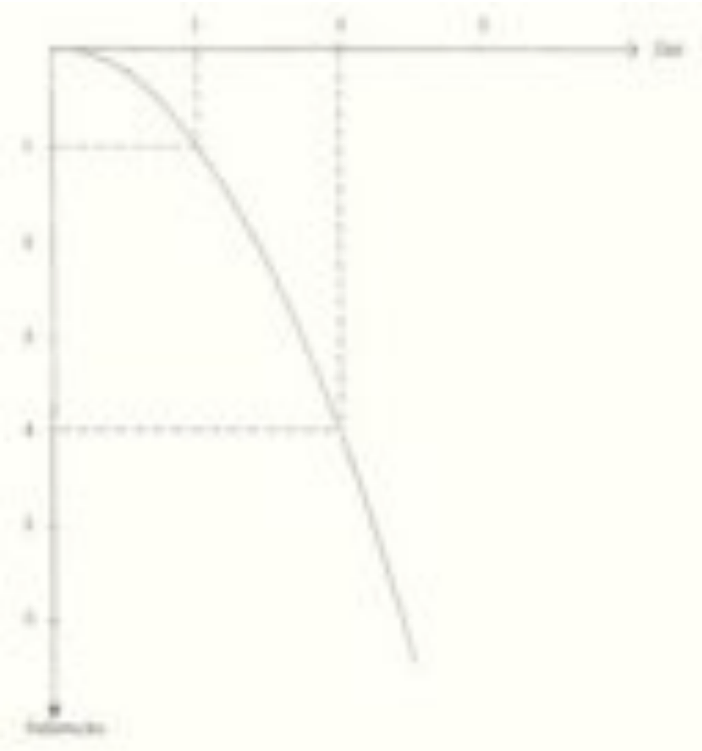
Wir denken uns drei Kugeln: die erste wie gewohnt geworfen, die zweite nur fallengelassen, die dritte nur rollend. Hat die erste einen bestimmten Punkt A auf ihrer Bahn erreicht, so ist die zweite genauso tief gefallen wie die erste und die dritte genauso weit gerollt. Zu einem späteren Zeitpunkt ist die erste Kugel in B angekommen. Die zweite Kugel werden wir entsprechend waagerecht - auf gleicher Höhe - neben ihr finden, die dritte genau senkrecht über ihr. Kugel 3 markiert uns die früheren »Wurfweiten« und Kugel 2 die dazugehörenden »Falltiefen«. Wir wissen ja bereits, daß zwischen beiden das » Quadratzahlengesetz« gilt. D. h., wenn Kugel 3 die doppelte Entfernung zurücklegt, so ist Kugel 2 um das Vierfache gefallen, bei dreifacher Entfernung das Neunfache und so weiter. Wenn man nun einsieht, daß die Bewegung der dritten Kugel eine gleichförmige Bewegung ist, daß sie also in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurücklegt, so ist man am Ziel.

Der Betrachter, der sich auf seine Sinneswahrnehmung verläßt, sieht dies im wahrsten Sinne des Wortes ein: Ein Geschwindigkeitsverlust der rollenden Stahlkugel ist auf dem waagerechten Tisch nicht feststellbar. Rollt die Kugel aber mit konstanter Geschwindigkeit weiter, so legt sie in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurück.

Der Nachdenkliche hingegen wittert ein Problem: Ist der Tisch nur lang genug, so kommt die Kugel irgendwann zur Ruhe. Sie wird durch die Reibung und den Luftwiderstand abgebremst. Und dies geschieht auch dann, wenn der Tisch nur klein ist. Es ist auf der kurzen Strecke nur nicht ohne weiteres sichtbar, aber mit Hilfe einer genauen Messung wird man den Geschwindigkeitsverlust schon feststellen. Dieser Gedanke ist ganz richtig, aber er ist noch nicht zu Ende gedacht. Man betrachte zum Beispiel die Reibung einer rollenden Kugel auf dem Tisch. Die Reibung läßt sich vermindern, indem die Oberfläche des Tisches noch glatter poliert oder eine geeignetere Kugel verwendet wird. Dadurch wäre der Geschwindigkeitsverlust pro Strecke geringer. Man könnte noch einen Schritt weitergehen und das Experiment in einem Glaskasten ablaufen lassen, aus dem die Luft abgepumpt wird, so daß der Luftwiderstand keine Rolle mehr spielt. Es ließe sich gewiß erreichen, daß der Geschwindigkeitsverlust auf der kurzen Strecke auch mit einer Meßapparatur nicht mehr wahrgenommen werden kann, weil er zu gering ist. »Na Gut«, entgegnet der Spitzfindige, »dann muß man eine bessere Meßapparatur nehmen. « - »Wenn Du Deine Apparate aufrüstest, dann rüste ich nach und poliere den Tisch so lange, bis die Kugel ohne meßbaren Geschwindigkeitsverlust rollt.« Der »Rüstungswettlauf« kann beginnen.

Eine »ideale« Bewegung, also eine mit vollkommen gleichmäßiger Geschwindigkeit, läßt sich in der Realität nicht herstellen, allerdings kann man auch nicht beliebig genau messen. Wer theoretisch die absolut genaue Messung fordert, muß im Gegenzug auch von der idealen Bewegung ausgehen. Es wird deutlich, daß die Angelegenheit eine Frage der Genauigkeit ist. Am Ende steht, was der »naive« Beobachter schon immer gewußt hat: Die dritte Kugel legt in glei-

Die waagerechte Raumachse entspricht einer Uhr chen Zeiten gleiche Strecken zurück. Eine solchermaßen gleichmäßige oder gleichförmige Bewegung läßt sich als Uhr verstehen. Das gleichförmige Herumgehen des Zeigers ist ja das Charakteristische einer Uhr: Eine bestimmte Strecke, zwischen zwei Markierungen etwa, entspricht einer bestimmten Zeit. Genauso entspricht der Raumchase, auf der die zurückgelegten Strecken der dritten Kugel markiert sind, eine Uhr:



Das Fallgesetz

Eine bestimmte Strecke (1) wird in einer bestimmten Zeit (1) zurückgelegt. Für die doppelte Strecke braucht es dann die doppelte Zeit und so fort. Ersetzen wir die Raumachse in Abb. 10 durch die Zeitachse, so wandelt sich die Bahnkurve der waagerecht geworfenen Kugel in ein Diagramm, das Auskunft gibt über den Zusammenhang zwischen der Falltiefe einer nur fallenden Kugel und der dafür benötigten Fallzeit. Das »Quadratzahlengesetz« bleibt nach wie vor erhalten, aber es erscheint in einem neuen Gewand.

Durchfällt ein Körper in einer bestimmten Zeit eine gewisse Strecke, so durchfällt er in der doppelten Zeit das Vierfache dieser Strecke, in der dreifachen Zeit das neunfache und so weiter. Die Fallstrecken wachsen wie die Quadrate der Fallzeiten. Das ist die Kernaussage des physikalischen Fallgesetzes.

»Schauen wir jetzt den Brunnenstrahl noch einmal an, wie er ruhig und glitzernd seinen Weg nimmt, so sehen wir seine Schönheit nach wie vor. Nur sehen wir noch ein feines Gespinst außerdem: feine Linien, Zugstraßen unseres Denkens, umgeben und durchdringen ihn und das Feld der um ihn und in ihm lautlos streitenden, lautlos sich einigenden Mächte: des gleichförmig durch den Raum Geschleudertseins und des quadratisch beschleunigten Sturzes. Es ist dadurch der Anmut dieses Strahles nichts genommen. Sie ist uns nur noch einmal gegeben: wir schauen sie nicht nur, wir denken sie auch« (Wagenschein 1975, S.54).