

Bewegungsgesetze:

Irrtum kommt vor dem Fall

von Michael McCloskey

Wir haben erstaunlich falsche Vorstellungen von den physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Sie entsprechen eher denen von Donald Duck als der Newtonschen Mechanik. In welche Richtung fliegt zum Beispiel eine Kugel, die aus einem gekrümmten Gewehrlauf abgefeuert wird? Fliegt sie im Kreis herum oder geradeaus? Leonardo da Vinci hätte sich für die erste Möglichkeit entschieden. Und Sie?

Karl Koyote schießt in der Zeichentrick-Serie *Road Runner* bei einer hitzigen Verfolgungsjagd schnurgerade über eine Felskante hinaus, läuft ein Stück in der Luft weiter, hält inne, wird sich bewußt, daß er über einem tiefen Abgrund schwebt - und saust, eine Rauchwolke hinter sich herziehend, kerzengerade hinunter.

Comics und Zeichentrickfilme haben sich schon immer Freiheiten gegenüber den Bewegungsgesetzen herausgenommen. Kein Betrachter käme ja auch auf die Idee, daß Karl Koyote tatsächlich in der geschilderten Weise über den Felsrand stürzen könnte... Oder etwa doch? Als wir an der John Hopkins University in Baltimore Schüler einer Oberschule und College-Studenten danach fragten, wie ein Gegenstand über eine Felswand hinabfällt, fanden wir viele, die tatsächlich meinten, dieses Objekt würde wie der Koyote zunächst geradeaus und dann exakt im rechten Winkel in die Tiefe stürzen.

Wir haben deshalb mehrere Befragungen durchgeführt, um herauszufinden, wie unsere intuitiven Vorstellungen über die Bewegung von Gegenständen aussehen.

Unsere Ergebnisse und die anderer Forscher zeigen: Viele von uns haben bemerkenswert ungereimte Vorstellungen von Bewegungsabläufen in scheinbar ganz unkomplizierten Situationen. Diese Mißverständnisse liegen in einer intuitiven Bewegungstheorie, die den elementarsten Grundsätzen der Newtonschen Mechanik widerspricht, jedoch interessanterweise einer mittelalterlichen Theorie ähnelt, die in den drei Jahrtausenden *vor* Newton tonangebend war.

In dem Film "Der Weg nach Bali" (*The Road to Bali*) mit Bing Crosby und Bob Hope biegt ein Gorilla den Lauf eines Gewehres halbkreisförmig um. Vom Eingang einer Hütte aus schießt Bing Crosby mit diesem Gewehr auf einen anspruchsvollen Tiger. Die Kugel zischt in mehreren Kreisen um die Hütte herum, die Bewohner sitzen in der Falle. Auch hier hatten es die Filmemacher nicht auf einen realistischen, sondern auf einen komischen Effekt angelegt. Wie sieht die wirkliche Bahn einer Kugel aus, die aus einem gekrümmten Gewehrlauf abgefeuert wird?

Die Psychologen Alfonso Caramazza, Bert Green und ich haben Collegestudenten eine ähnliche Frage gestellt: Denken Sie sich eine spiralförmig gewundene Röhre, die auf einer waagerechten, glatten Oberfläche liegt. Legen Sie dann am inneren Ende der Spirale eine Kugel in die Röhre und schicken Sie sie mit hoher Geschwindigkeit hindurch. Was für eine Bahn beschreibt die Kugel wenn sie am anderen Ende der Röhre wieder zum Vorschein kommt?

Newtons erstes Bewegungsgesetz sagt daß sich Objekte immer geradlinig fortbewegen, es sei denn, es wirkt von außen eine Kraft auf sie ein. Folglich lautet die richtige Antwort: Die Kugel bewegt sich geradlinig in die Richtung, in die das Ende der Röhre zeigt. Doch nur etwa die Hälfte der befragten Studenten gab diese Antwort; die andere Hälfte meinte, die Kugel würde einen Bogen beschreiben. Sie glaubten offensichtlich, daß ein Objekt, das in eine gekrümmte Bahn gebracht worden ist, sich nach dem Verlassen dieser Bahn noch einige Zeit in die alte Richtung weiterbewegt.

Um herauszufinden, ob sich derart falsche Vorstellungen auch auf unser Handeln auswirken, gaben die Doktorandin Deborah Kohl und ich in einem Experiment einigen Studenten einen kleinen "Puck", dem ein eingebautes Kugellager eine gleichmäßige Bewegung ermöglichte. Wir baten die Studenten, diesen "Puck" durch einen auf die Tischplatte gemalten gekrümmten Tunnel zu schießen, ohne daß er an den Seiten anstößt.

Ein großer Teil der Studenten erkannte, daß dieses Objekt in gerader Linie durch den Tunnel rollen kann, wenn man es nur richtig anstößt, und lösten die Aufgabe mit Erfolg. Ein Viertel der Studenten jedoch schob den "Puck" in einem Bogen an die Tunnelöffnung heran - in der Hoffnung, er würde dann eine gekrümmte Lauf-

bahn einschlagen. Die meisten von ihnen waren erstaunt, daß der "Puck" keinen Bogen machte.

Irrtümer dieser Art beschränken sich nicht nur auf Kreisbewegungen. Angenommen ein kräftig ausschreitender Mann läßt aus Schulterhöhe im Gehen einen Ball fallen. Welcher Bahn folgt der Ball während des Falls?

Diese auf den ersten Blick so einfache Frage erweist sich als ziemlich knifflig. Die richtige Antwort lautet: Der Ball fällt im Bogen nach vorn und bleibt parallel zu dem sich bewegenden Körper des Mannes bis er auf dem Boden ankommt. Wenn der Ball losgelassen ist, bewegt er sich mit derselben Geschwindigkeit nach vorn wie der Mann, denn es wirkt - vom Luftwiderstand abgesehen - keine andere Kraft auf ihn ein, die seine Vorwärtsbewegung verändern könnte. Nach den Gesetzen der Schwerkraft fällt der Ball während der Vorwärtsbewegung mit stetig wachsender Geschwindigkeit nach unten. Beide Bewegungen - vorwärts und abwärts - ergeben den Bogen einer Parabel.

Meine Kolleginnen Allyson Washburn, Linda Felche und ich haben Studenten gebeten, die Bahn des fallenden Balles vorherzubestimmen. Rund die Hälfte gab an, der Ball würde sich im Fall nach vorn bewegen. Die Mehrzahl der übrigen glaubte, er würde gerade hinunterfallen und senkrecht unterhalb der Stelle ankommen, wo er losgelassen wurde. Dabei handelte es sich nicht nur um ein theoretisches Mißverständnis: Als wir die Studenten baten, quer durch einen Raum zu gehen und dabei einen Golfball auf ein am Boden markiertes Ziel fallenzulassen, bemühte sich die Hälfte von ihnen, den Ball genau über dem Zielpunkt loszulassen.

Warum glauben so viele, daß sich ein Gegenstand nach dem Verlassen einer gekrümmten Bahn im Bogen weiterbewegt, oder daß ein beim Gehen fallengelassenes Objekt senkrecht unten ankommt? Neuere Untersuchungen zeigen, daß diese und ähnliche Fehlannahmen auf einer intuitiven Theorie beruhen, die auffallende Ähnlichkeit mit den mittelalterlichen Vorstellungen von Triebkraft (Impetus) hat - Vorstellungen, die vom 14. bis zum 16. Jahrhundert die Naturwissenschaft beherrschten.

Nach dieser Impetus-Theorie teilt sich einem Objekt, das in Bewegung gesetzt wird, eine innere Kraft oder ein Impetus mit, der es auch dann noch in Bewegung

hält, wenn es nicht mehr mit dem ursprünglich wirksamen Antrieb in Verbindung steht.

Jean Buridan, ein französischer Philosoph des 14. Jahrhunderts aus Paris, schrieb: "Wenn ein Antrieb einen Körper in Bewegung setzt, pflanzt er ihm einen bestimmten Impetus ein, das heißt, eine Kraft, die diesen Körper befähigt, sich in die Richtung zu bewegen, die der Antrieb ihm gegeben hat - sei es aufwärts, abwärts, seitwärts oder im Kreis herum: Der Impetus ist Ursache dafür, daß ein Stein, wenn der Werfer ihn losgelassen hat."

Die meisten Verfechter dieser Theorie waren der Ansicht, daß ein Objekt sowohl für geradlinige als auch für kreisförmige Bewegungen Impetus aufnehmen könne. Leonardo da Vinci zum Beispiel wandte den Gedanken des kreisförmigen Impetus auch für den Fall an, daß ein Stein durch Schleuderbewegungen in Gang gesetzt wird: "Alles Bewegliche, das in die Luft geworfen wird, setzt die Bewegung seines Bewegers fort, wenn letzterer es im Kreis bewegt und aus dieser Bewegung freiläßt bewegt es sich demnach ebenfalls im Kreise."

Wenn diese mittelalterlichen Ideen auch heute noch fortbestehen, dann weil sie auf scheinbar einleuchtende Art einen großen Teil unserer alltäglichen Bewegungswahrnehmungen erklären: Beispielsweise erläutert die intuitive Impetus-Theorie, was dem Schein nach passiert, wenn ein Kind seinem Spielzeugauto einen Schubs gibt. Der Stoß gibt dem Auto Schwung oder eine innere Kraft, die es auch dann noch in Bewegung hält, wenn das Kind seine Hand schon wieder zurückgezogen hat. Wenn dieser Schwung verpufft, wird das Auto langsamer und steht schließlich still.

Viele von uns beantworten die Frage, wie sich Gegenstände bewegen, aus der Sicht der Impetus-Theorie. In einer von Kohl, Washburn und mir erarbeiteten Studie erklärte ein Schüler der Oberschule die Bewegung des Spielzeugautos mit den Worten: "Am Anfang hat das Auto noch die Kraft des Stoßes; deshalb fährt es schnell. Wenn diese Kraft nachläßt, wird es immer langsamer. Gefragt, warum sich eine Kugel, die aus einer gewundenen Röhre herauskommt, ihrer Ansicht nach weiter im Bogen bewegt, geben viele die mittelalterliche Vorstellung des kreisförmigen Impetus wieder. Ein Schüler erklärte dazu: "Durch die Schwingkraft, die die Kugel von der gebogenen Röhre aufnimmt, erhält ihre Bahn die

Krümmung. Irgendwann ist diese Kraft aufgezehrt, und dann bewegt sich die Kugel in gerader Linie.

Obwohl diese Sichtweise gar nicht so unvernünftig erscheint, widerspricht sie dem elementaren Grundsatz der Newtonschen Mechanik, nach dem weder Kraft notwendig ist, um einen Körper in Ruhe, noch, um ihn in Bewegung zu halten.

Ein Körper bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig weiter, solange keine Kraft auf ihn einwirkt. Er wird nur dann langsamer und kommt zur Ruhe, wenn seine Bewegung von außen durch eine Kraft gebremst wird. Wenn das Spielzeugauto langsamer wird und schließlich anhält, dann nicht, weil sein Impetus verpufft wäre, sondern aufgrund der Reibung - einer Kraft, die in die entgegengesetzte Richtung wirkt, in die sich das Auto bewegt.

Ebenso wie unsere Untersuchungen haben auch die Versuche des Physikers John Clement, University of Massachusetts, der Pädagogikprofessoren Audrey Champagne und Leopold Klopfer, University of Pittsburgh, und Laurence Viennots von der Pariser Universität ergeben: Die meisten, die nie etwas von Physik gehört haben, aber auch viele, die über entsprechende Kenntnisse verfügen, orientieren sich an der Lehre vom Impetus.

Warum, so überlegten wir, lassen sich so viele Menschen von falschen Vorstellungen über gekrümmte Bewegungen und fallende Gegenstände leiten? Und wie kommen sie eigentlich zu solchen Ansichten?

Um diese Frage zu klären, untersuchten die Psychologen Mary Kaiser, University of Michigan, Dennis Proffitt, University of Virginia, und ich gemeinsam die Vorstellungen, die Kinder von Bewegungsvorgängen haben. Verändern sich diese Vorstellungen mit zunehmendem Alter? Dazu führten wir Kindern zwischen vier und zwölf Jahren eine Modelleisenbahn vor, die auf einem etwa 90 Zentimeter hohen Tisch eine ovale Trasse befuhr. Ein flacher, offener Güterwagen hinter der Lokomotive hatte eine Stahlkugel "geladen". Nachdem sich die Kinder die im Oval fahrende Eisenbahn angesehen hatten, gaben sie Voraussagen darüber ab, wo die Kugel auftritt, wenn sie aus dem fahrenden Güterwagen auf den Boden fällt. Sie stellten eine Schale auf den Boden, um die Kugel darin aufzufangen.

Außerdem wurde den Kindern eine Kugel gezeigt, die durch eine durchsichtige, neben den Eisenbahnschienen bis an den Tischrand führende Plastikröhre lief.

Die Kugel in der Röhre bewegte sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Zug. Auch jetzt stellten die Kinder wieder eine Schale dorthin, wo die Kugel ihrer Meinung nach landen würde, wenn sie nach dem Austritt aus der Röhre über den Tischrand rollt.

Die Antworten der Kinder ließen eine interessante Gesetzmäßigkeit erkennen. Die Mehrzahl der Vier- und Fünfjährigen glaubte, daß die Kugel sowohl beim Fall aus dem fahrenden Zug als auch beim Sturz über die Tischkante eine schnurgerade senkrechte Bahn beschreiben würde. Bei den älteren Kindern war sich ein höherer Anteil darüber klar, daß sich die Kugel im Fallen nach vorn bewegt. Von den ältesten (elf und zwölf Jahre) begriff über die Hälfte diesen Sachverhalt. Dagegen brachte das Experiment mit der aus dem fahrenden Zug fallenden Kugel bei den älteren Kindern keine wesentlich besseren Ergebnisse: Nur 25 Prozent der ältesten Kinder sagten, daß sich die Kugel beim Fall aus dem Zug gleichzeitig auch nach vorn bewegt.

Wodurch kommt es zu diesen unterschiedlichen Ergebnissen? Wenn Kinder durch eigene Anschauung lernen, daß sich ein von einem Tisch rollender Gegenstand während des Falls weiter vorwärtsbewegt, warum lernen sie dann nicht auch, daß sich ein auf einer fahrenden Eisenbahn mitgeführter Gegenstand ebenso verhält? Aus früheren Forschungsarbeiten über die Wahrnehmung von Bewegungen wissen wir, wie leicht man Opfer einer optischen Täuschung wird, wenn man ein Objekt vor einem *bewegten Bezugssystem* sieht.

Wenn zum Beispiel ein Wolkenband nach rechts am Mond vorbeizieht, scheint sich der Mond nach links zu bewegen. Zugleich erscheint die auf die Wolken bezogene Linksbewegung des Mondes auch als eine in der gleichen Richtung verlaufende Bewegung des Himmels. Das allerdings ist eine optische Täuschung.

Eine ähnliche Täuschung kann auftreten, wenn ein Kind Gegenstände beobachtet, die von einem sich bewegenden Träger fallengelassen werden. Wenn ein laufender Mann zum Beispiel ein Buch verliert, stellt wahrscheinlich er das Bezugssystem dar, vor dem das Kind das Buch sieht. Da es - auf den Mann bezogen - senkrecht herunterfällt, kann es in den Augen des Kindes offenbar auch im Verhältnis zum Fußboden senkrecht fallen. Vermutlich hindert eine optische Täu-

schung dieser Art Kinder wie Erwachsene daran, zu erkennen, daß ein von einem sich bewegenden Träger fallender Gegenstand immer nach vorn stürzt.

Washburn, Felche und ich fanden diese Hypothese bekräftigt, als wir Collegestudenten Videobänder von zwei einfachen Vorgängen zeigten. Auf dem einen Band sah man einen Ball von einem Aktenschrank herunterrollen, auf dem anderen ließ eine Frau, die langsam vorwärtsging, aus Schulterhöhe einen Ball fallen. Die Bahn, die der Ball beschrieb, war in beiden Fällen die gleiche. Beim Ansehen des ersten Bandes meinten alle Befragten, der Ball bewege sich während des Falls nach vorn. Als dagegen die Frau den Ball fallenließ, glaubten die meisten, er sei senkrecht heruntergefallen.

Wie Kaiser, Proffitt und ich festgestellt haben, gehen physikalische Fehlannahmen nicht nur auf optische Täuschungen zurück. Als wir das Experiment mit der gebogenen Röhre bei Kindern wiederholten und sie aufforderten, die Bahn der Kugel nach dem Austritt aus der Röhre zu beschreiben, erlebten wir eine Überraschung. Die jüngsten Kinder gaben mehr richtige Antworten als die älteren; ihre Antworten trafen ebenso oft ins Schwarze wie die der Collegestudenten. Während nur 35 Prozent der Kindergarten- und Vorschulkinder glaubten, die Kugel würde einer gebogenen Bahn folgen, waren es bei den Neun- und Zehnjährigen 73 Prozent. Bei den höheren Jahrgängen wurde wieder seltener auf eine gebogene Bahn getippt: Waren es bei den Elf- und Zwölfjährigen noch 59 Prozent, so sank die Zahl bei den Collegestudenten auf 40 Prozent.

Warum verschlechtern sich die Vorhersagen der Kinder mit zunehmendem Alter und werden später auf einmal wieder besser? Ein beim kindlichen Spracherwerb auftretendes ähnliches Muster liefert uns einen Hinweis. Die ersten Verbformen der Vergangenheit, die die Kinder gebrauchen, sind korrekte Imperfektformen häufiger Verben. Viele von ihnen sind unregelmäßig, das heißt das Imperfekt wird - wie bei "ging" oder "brach" - nicht durch Anfügen von "te" an das Präsens gebildet. Einige Monate, nachdem die Kinder zum ersten Mal Vergangenheitsformen benutzt haben, fangen sie jedoch auf einmal an, die "normale" Endung "te" an regelmäßige und unregelmäßige Verben anzuhängen. Sie sagen also etwa "gehte" statt "ging", oder "brechte" statt "brach". Einige Zeit später kehren sie wieder zu den korrekten Formen der unregelmäßigen Verben zurück.

Augenscheinlich lernen die Kinder zunächst einige spezifische Verbformen, einschließlich unregelmäßiger Verbformen wie "ging" oder "brach". Später entdecken sie zwar die allgemeine Regel, daß das Imperfekt durch Anhängen von "te" an das Präsens gebildet wird, wenden sie aber gleichermaßen auf regelmäßige wie unregelmäßige Verben an. Dabei entstehen dann Schöpfungen wie "gehte". Schließlich formen sie die Regel so um, daß sie regelmäßige und unregelmäßige Verben einschließt.

Unsere Ergebnisse bei dem Problem der gekrümmten Röhre lassen sich wahrscheinlich auf einen ähnlichen Entwicklungsprozeß zurückführen. Die jüngsten Kinder gehen noch ganz konkret an das Problem heran: Sie erinnern sich an vorhergehende Situationen, in denen sie einen Ball über einen Tisch oder über den Boden rollen sahen, und zeichnen deshalb eine korrekte, gerade Bahn für die Kugel. Die älteren Kinder haben sich schon angewöhnt, abstrakte Prinzipien zu Hilfe zu nehmen, um alltägliche Bewegungsvorgänge vorherzubestimmen und zu erklären. Beobachtungen, wie die, daß sich ein Spielzeugauto noch einige Zeit in die Richtung bewegt, in die es geschubst wurde, oder daß ein in die Luft geworfener Ball einige Zeit hochsteigt führen sie zu dem Schluß, "daß sich ein Gegenstand, der in Bewegung gesetzt wird, noch eine zeitlang weiter in die Richtung bewegt, in die er gestoßen worden ist. Wenn die Kinder diese allgemeine Regel auch auf Kreisbewegungen anwenden, können sie zu der Annahme kommen, daß eine Kugel nach dem Verlassen einer gewundenen Röhre eine gebogene Bahn einhält.

Die meisten von uns lernen schließlich - sei es durch die konkrete Erfahrung sei es im Physikunterricht - daß gebogene Bewegungen im Unterschied zu geraden nur dann zustande kommen, wenn eine Kraft von außen kontinuierlich auf das sich bewegende Objekt einwirkt. Da ein großer Teil der Erwachsenen bei dem Problem der gewundenen Röhre eine gebogene Bahn für die Kugel zeichnet, ist anzunehmen, daß viele von ihnen weiterhin glauben, daß sich einmal in Gang gebrachte gebogene oder geradlinige Bewegungen in derselben Weise fortsetzen.

Offenbar finden sich viele von uns trotz des fehlerhaften intuitiven Wissens über Bewegungsvorgänge im Alltag ganz gut zurecht. Wer kommt denn auch schon jemals in die Lage, vom Flugzeug aus Bomben abzuwerfen oder eine Kugel aufzu-

fangen, die aus einer gewundenen Röhre rollt. Ist es da noch nötig, sich aufzuraffen und einen Kurs in Physik für Anfänger zu belegen?

Bedenken Sie einmal die prekäre Situation, in die einer meiner Freunde geriet, als er in sechs Meter Höhe von einem Dach auf eine Leiter steigen wollte. Als ihm die Leiter wegrutschte, versuchte er, sich so vom Dachrand abzustößen, daß er - um den Fall ein wenig abzumildern - einen Meter vor der Hauswand in einem Busch landen würde. Er sprang jedoch leider etwa drei Meter über das Ziel hinaus und brach sich den Arm.

War dies das Ergebnis einer zufälligen Fehleinschätzung, oder hatte sich mein Freund so kraftvoll abgestoßen, weil er instinktiv glaubte, daß er sich erst ein kurzes Stück nach außen bewegen und dann senkrecht hinunterfallen würde? Ich wage es nicht zu sagen. Aber wie dieser Vorfall zeigt, können die Gesetze der Physik jederzeit praktische Bedeutung erhalten und unsere liebenswerten Schwächen in gefährliche Unkenntnis verwandeln.

Michael McCloskey ist Kognitiver Psychologe an der John Hopkins University in Baltimore, USA.

aus: Psychologie heute, 09/1984