

Aus: *Sportunterricht*, 36 (1987) 11: 409 - 423

Klaus Wiemann

## **Das Phänomen der Scheinrotation**

### **Einführung und sportpraktische Anwendung**

Man stelle sich einen Schüler vor, der sich - nach einem Anlauf, Absprung vom Reutherbrett, Flug über den Längskasten, Stütz mit Hockbewegung am entfernten Kastenende - in der zweiten Flugphase der Hocke über den Längskasten befindet! Man stelle sich zusätzlich vor, der Schüler habe – aus welchen Gründen auch immer – eine zu große „Vorlage“, um einen sauberen Niedersprung hinlegen zu können! (Der weniger mit dem Turnen vertraute Leser möge sich einen alpinen Abfahrtsläufer in der Flugphase nach einem Geländesprung vorstellen!) Kann der entsprechende Sportler während der Flugphase seine Körperlage korrigieren? Kann er sich aus einer für die Landung ungünstigen Vorlage „aufrichten“? Kann er vielleicht sogar eine Vorwärtsrotation (1) „anhalten“ oder gar in eine Rückwärtsrotation „umkehren“? Sind zur Lösung der Fragen Nebenbedingungen irgendwelcher Art zu berücksichtigen? Diese und ähnliche Fragen diskutieren Lehrer und Schüler des Leistungsfaches Sport, Sportstudenten Trainer und Autoren von Beiträgen in Fachzeitschriften stets aufs neue. Im folgenden soll versucht werden, mit Hilfe von Beispielen und Experimenten, aber mit einem geboten erscheinenden Minimum an physikalischen Gesetzen und Formeln die Lösung aufzuzeigen.

#### **1. Experiment mit Katze**

Eine Katze, so weiß der Volksmund zu berichten und so lehrt es die Beobachtung, landet nach einem Sturz stets auf den Pfoten. Diese Fähigkeit machen sich seit jeher Physiklehrer zunutze, um die Wirkung eines physikalischen Phänomens, das unter der Bezeichnung „Scheinrotation“ bekannt ist und das man auch mit dem Begriff „Drehrückstoß“ umschreiben kann, zu demonstrieren – ein Experiment, das jeder, sofern ihm eine Katze zur Verfügung steht, leicht nachvollziehen kann: Nachdem man sich vergewissert hat, dass das Versuchssubjekt ohne Protest am Experiment teilzunehmen gedenkt (vorsorglich sollte man feste Lederhandschuhe bereithalten), ergreife man die Katze an den Läufen - in der einen Hand beide Vorderläufe, in der anderen Hand die Hinterläufe - und halte sie mit dem Rücken nach unten hängend rund 1,5 m über dem Boden oder -sofern man dem Ausgang des Experiments oder dem guten Willen der Katze mißtraut - über einem Federbett oder einem Schaumstoffpolster. Dann öffne man, ohne der Katze den geringsten seitlichen Stoß zu geben, gleichzeitig beide Hände, und man wird sehen, dass die Katze tatsächlich

während des Fallens eine Drehung um die Längsachse vollführt und auf den Pfoten landet!

Bevor nun festgestellt wird, auf welche Weise die Katze dies zuwege bringt, und bevor überlegt wird, ob man von dieser Beobachtung eine Hilfe zur Lösung der anstehenden Fragen und einen Hinweis für die Ausführung sportmotorischer Fertigkeiten erwarten kann, müssen einige Begriffe und Gesetze aus der Physik angesprochen werden. Dabei werden nicht nur Katzen, sondern auch Astronauten, Sportler und Kaninchen als Versuchsobjekte dienen.

## 2. Der physikalische Begriff "Impuls"

Eine Bewegung ist in der Physik definiert als die **Ortsveränderung eines Körpers mit fortschreitender Zeit bezüglich eines Koordinatensystems**. Will also ein Physiker „Bewegung“ messen, muss er mit Hilfe einer Waage, eines Metermaßes und einer Stoppuhr die Masse (**m**) des sich bewegenden Körpers auswiegen, den Weg (**s**) bestimmen, den der Körper zurücklegt und die Zeit (**t**) stoppen, die der Körper für das Zurücklegen der Wegstrecke benötigt. Die mathematische Beziehung **Masse mal Weg pro Zeit ( $m \cdot s/t$ )** gibt die „Größe“ der Bewegung wieder, der Physiker nennt sie „Impuls“ (**p**) und ersetzt darin den Term **s/t** durch die Geschwindigkeit (**v**), so dass die **Größe der Bewegung**, der Impuls, der Formel

$$[1] \quad p = m \cdot v$$

(gemessen in Kilogramm mal Meter pro Sekunde,  $kg \cdot m/s$ )  
genügt.

Der Impuls ist nicht nur durch seinen Betrag bestimmt, sondern wird auch durch seine Richtung charakterisiert. Physikalische Größen, die sich sowohl durch einen Betrag als auch durch eine Richtung kennzeichnen, werden **vektorielle Größen** genannt.

Man betrachte z. B. zwei Sprinter, von denen der erste 60 kg und der zweite 70 kg wiegen soll, die aber beide mit der gleichen Geschwindigkeit von 10 m/s nebeneinander in Richtung Ziel sprinten (Abb. 1). Sie besitzen - trotz gleicher Geschwindigkeit - unterschiedliche Impulse (2); das bedeutet: ihre Bewegung Richtung Ziel ist unterschiedlich "groß". Der eine Sprinter verfügt über den Impuls

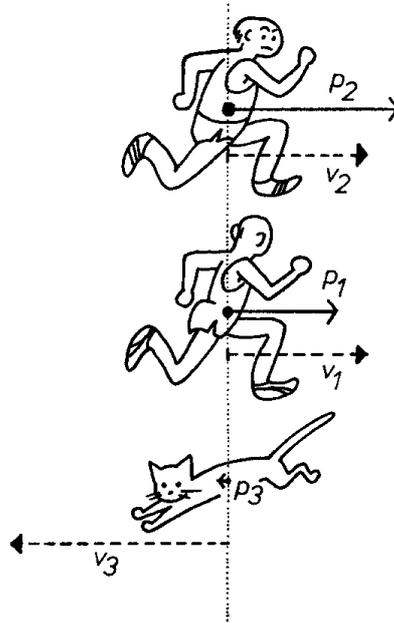
$$p_1 = 600 \text{ kg} \cdot \text{m/s},$$

der andere Sprinter über den Impuls

$$p_2 = 700 \text{ kg} \cdot \text{m/s}.$$

Die Richtungen der Impulse **p<sub>1</sub>** und **p<sub>2</sub>** sind durch die Laufrichtung festgelegt. Bildlich lassen sich Impulse als Pfeile darstellen (Abb. 1), die in die Bewegungsrichtung zeigen und deren Längen sich wie ihre Beträge zueinander verhalten müssen. Begegnet den Sprintern eine Katze mit der Masse 1,5 kg und der Geschwindigkeit 16 m/s, dann hat

ihr Körper trotz der größeren Geschwindigkeit nur den Impuls  $p_3 = 24 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ . Außerdem ist ihr Impulsvektor denen der Sprinter entgegengerichtet.

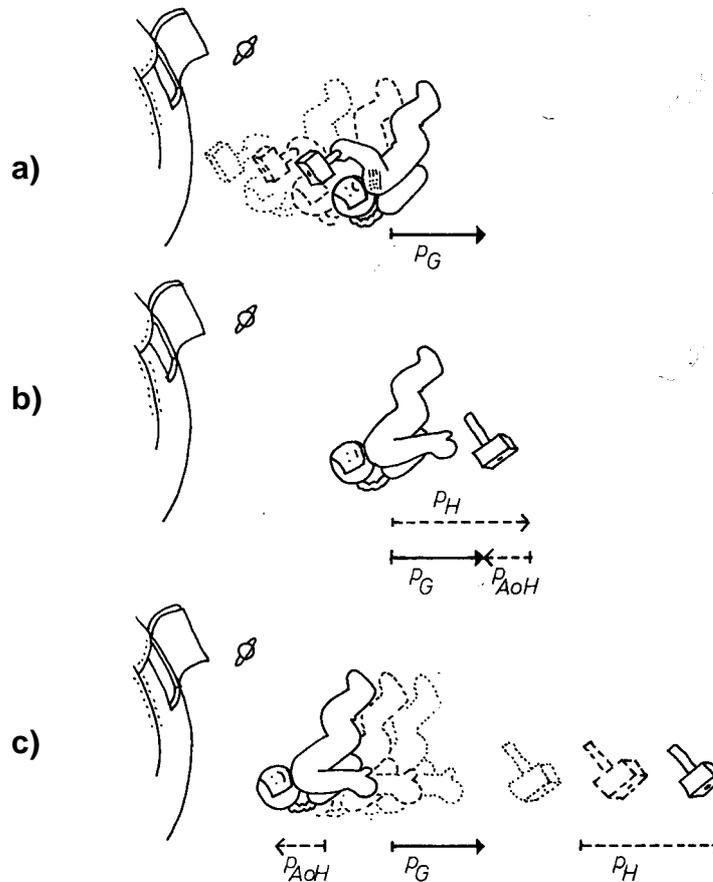


**Abb. 1** Darstellung von Impulsen unterschiedlicher Beträge und Richtungen

### 3. Der Impulserhaltungssatz

Nun gilt für die Bewegung aller Körper das Naturgesetz von der Erhaltung der Impulse. Dieses Gesetz besagt, dass der Betrag und die Richtung des Impulses eines Körpers erhalten bleiben, solange nicht von außen Kräfte auf den Körper einwirken. Man kann auch sagen, daß nur Kräfte, die von außen auf einen Körper einwirken, die Geschwindigkeit und die Richtung der Bewegung eines Körpers ändern können. Die Bedeutung dieses Gesetzes läßt sich am besten am Beispiel eines Astronauten (Abb. 2) erläutern, der sich - im Zustand der Schwerelosigkeit - außerhalb seiner Raumkapsel befindet und der (was nur in unserer Vorstellung geschehen möge) durch eine ungeschickte Bewegung seinen Körper von der Raumkapsel abgestoßen hat. Die Kraft, die zwischen seinem Körper und der Raumkapsel gewirkt hat, ist die Ursache für den Impuls (3), mit dem der Astronaut sich mit konstanter Geschwindigkeit und unveränderbarer Richtung von der Raumkapsel fortbewegt (Abb. 2). Da jetzt keine Kräfte mehr zwischen seinem Körper und anderen Körpern (Raumkapseln, Sternschnuppen, Monden usw.) wirken können, nennt man seinen Körper ein *kräftefreies System*. Das soll nicht heißen, der Astronaut könne in diesem Zustand seinen Bizeps nicht kräftig anspannen, etwa um sich ob seines Missgeschicks vor den Kopf zu schlagen. Aber diese Kraft kann, da sie nur zwischen Teilkörpern des

Astronautenkörpers wirkt, den Betrag und die Richtung des Impulses des Astronautenkörpers nicht ändern.



**Abb. 2** Darstellung des Impulserhaltungssatzes.  $p_G$  Gesamtimpuls.  $p_H$  Teilimpuls „Hammer“.  $p_{AoH}$  Teilimpuls „Astronaut ohne Hammer“

Ist nun das Schicksal des Astronauten, der sich langsam aber stetig von der Raumkapsel fort bewegt, endgültig besiegelt? Kann er überhaupt nichts tun, um wieder zurück an die Raumkapsel zu gelangen? Nun, ganz so hoffnungslos ist es nicht! Nehmen wir an, der Astronaut trage einen schweren Hammer bei sich, mit dem er an der Raumkapsel defekte Niete festschlagen muss. Stößt er diesen, so kräftig er kann, in die Richtung, in die er sich - von der Raumkapsel fort - bewegt, so kann er unter bestimmten Voraussetzungen seine Bewegung von der Raumkapsel weg stoppen und in eine Bewegung zur Raumkapsel hin umändern. Um einzusehen, dass hier der Impulserhaltungssatz nicht „auf den Kopf gestellt wird“, müssen folgende in Bezug zur Raumkapsel beobachtbaren Impulse betrachtet werden (Abb. 2):

1. Der Gesamtimpuls  $p_G$  des Astronauten, zusammen mit allen Objekten, die er bei sich trägt, einschließlich des Hammers,
2. der Impuls  $p_H$  des Hammers nach der Wurfaktion des Astronauten,

3. der Impuls  $\mathbf{p}_{AoH}$  des Astronauten ohne Hammer (3).

Nach dem Impulserhaltungssatz muß der Impuls  $\mathbf{p}_G$  nach Betrag und Richtung erhalten bleiben. Da aber die Impulse  $\mathbf{p}_H$  und  $\mathbf{p}_{AoH}$  zusammen den Impuls  $\mathbf{p}_G$  ergeben, braucht der Impuls des Hammers ( $\mathbf{p}_H$ ) nur einen Betrag zu erhalten, der größer als der Betrag des Gesamtimpulses ist, um den Impuls des Astronauten ohne Hammer ( $\mathbf{p}_{AoH}$ ) negativ werden zu lassen, was bedeutet, dass er dem Impuls des Hammers entgegengerichtet ist, den Astronauten also wieder zur Kapsel zurückbewegt (Abb. 2c). Die vektorielle Addition des Impulses des Hammers von der Raumkapsel weg und des Impulses des Astronauten zur Raumkapsel hin ergibt in der Gesamtbilanz einen Impuls ( $\mathbf{p}_G$ ) des Systems „Astronaut plus Hammer“ in der ursprünglichen Größe und Richtung (4):

$$[2] \quad \mathbf{p}_H + \mathbf{p}_{AoH} = \mathbf{p}_G$$

Generell läßt sich feststellen: Wird im Körper A ein Impuls erzeugt, muß in einem Körper B, von dem sich Körper A abstößt, ein gleich großer, aber entgegengerichteter Impuls entstehen, wobei sich die Geschwindigkeiten der Körper umgekehrt proportional verhalten wie ihre Massen, oder - allgemeiner ausgedrückt - ein **Impulsgewinn** des Körpers A ist stets mit einem gleich großen **Impulsverlust** des Körpers B verbunden, bewirkt durch einen Stoß (Kraftstoß = Kraft mal Wirkungszeit der Kraft,  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{t}$ ) zwischen Körper A und Körper B (5).

#### 4. Der Drehimpuls

Diese Gesetze gelten generell auch für Drehbewegungen. Ist bei einer geradlinigen Bewegung (6) die Größe der Bewegung durch die Beziehung „Masse mal Geschwindigkeit“ bestimmt, so gilt für die Größe der Drehbewegung die Beziehung Drehmasse mal Drehgeschwindigkeit. Die „Größe der Drehbewegung“ heißt in der Physik **Drehimpuls** ( $L$ ), die Drehmasse wird **Trägheitsmoment** ( $I$ ), die Drehgeschwindigkeit wird **Winkelgeschwindigkeit** ( $\omega$ , Omega) genannt,

$$[3] \quad L = I \cdot \omega$$

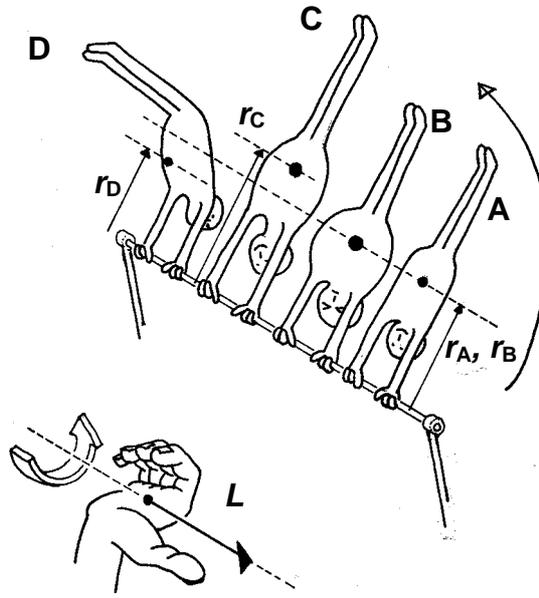
(Drehimpuls = Trägheitsmoment mal Winkelgeschwindigkeit).

Will ein Physiker den Drehimpuls eines Körpers bestimmen, benötigt er neben der Waage und der Stoppuhr einen Winkelmesser, um zu messen, um welchen Winkel sich der Körper in der Zeit dreht. Er kann aber auf das Bandmaß nicht etwa verzichten, sondern benötigt dieses, um die Drehmasse (das Trägheitsmoment) zu bestimmen. Der Betrag des Trägheitsmomentes hängt nämlich nicht nur von der Masse ( $m$ ) ab, sondern auch vom Abstand ( $r$ ) der Masse von der Drehachse, genauer: vom Quadrat des Abstandes der Masse von der Drehachse. Die Formel [3] läßt sich also auch wie folgt schreiben:

$$[4] \quad L = m * r^2 * \omega$$

(gemessen in Kilogramm mal Meter zum Quadrat mal Grad pro Sekunden,  $\text{kg} * \text{m}^2 * \text{°/s}$ ).

Als erläuterndes Beispiel sollen vier Turner betrachtet werden, die nebeneinander an einem Reck eine Riesenfelge turnen, also eine Drehbewegung ausführen (Abb. 3).



**Abb. 3** Darstellung von Drehimpulsen unterschiedlicher Beträge und der Bestimmung der Richtung des Drehimpulsvektors

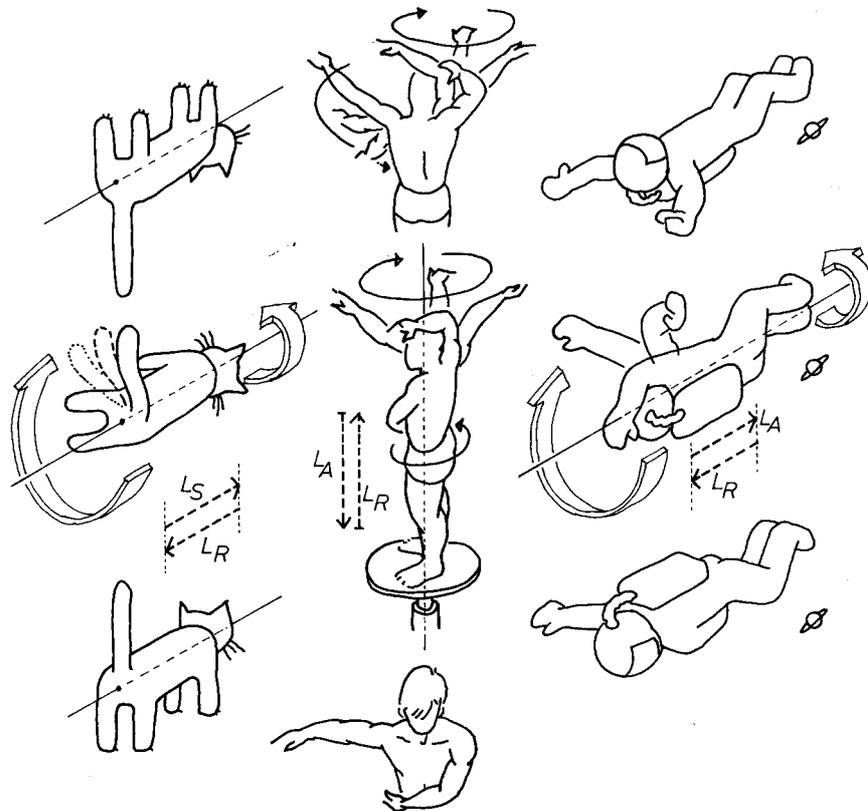
Bewegen sich Turner A (60 kg) und Turner B (70 kg), beide gleich groß, mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit, ist der Drehimpuls des Turners B aufgrund der größeren Masse größer. Hat Turner C ebenfalls die Masse 70 kg, ist er jedoch größer als Turner B, hat er bei gleicher Winkelgeschwindigkeit einen größeren Drehimpuls, weil Teile seines Körpers weiter von der Drehachse, der Reckstange, entfernt sind, also sein Trägheitsmoment (1) größer ist. Turner D soll nun die gleiche Masse und gleiche Körpergröße wie Turner A besitzen und in ebenfalls gleicher Winkelgeschwindigkeit turnen. Da er aber die Schulter- und Hüftgelenke gewinkelt hält, Teile seiner Körpermasse sich also näher an der Drehachse befinden als bei Turner A, ist sein Drehimpuls aufgrund des kleineren Trägheitsmomentes kleiner als der Drehimpuls des Turners A.

Auch Drehimpulse sind gerichtete Größen. Der Vektor wird nach offizieller Übereinkunft in die Drehachse verlegt und weist bei einer Drehbewegung im Uhrzeigersinn vom Betrachter weg, bei einer Drehung gegen Uhrzeigersinn auf den Betrachter zu. Am leichtesten lässt sich die Richtung des Drehimpulsvektors mit den Fingern der rechten Hand demonstrieren wie Abb. 3 darstellt. Ebenso gilt für den Drehimpuls sinngemäß der Impulserhaltungssatz

Nach dieser Feststellung sind die Voraussetzungen geschaffen, das eingangs beschriebene Katzenexperiment zu erläutern.

### 5. Theoretische Erklärung des Katzenexperiments

Wenn es im eingangs beschriebenen Experiment gelingt, die Katze so fallen zu lassen, dass sie nicht den geringsten Drehabstoß erfährt, besitzt die Katze zu Beginn der Fallbewegung einen Drehimpuls mit dem Betrag  $L = \text{Null}$ . Da sich die Katze während des Fallens nicht an der Außenwelt abstoßen kann (da sie außerdem keine Werkzeuge oder ähnliche Dinge mit sich führt, von denen sie sich abstoßen könnte, wie der vorn als Beispiel dienende Astronaut), bleibt die Größe des Drehimpulses erhalten ( $L = 0$ ), solange die Katze nicht den Boden berührt.



**Abb. 4** Scheinrotationen bei fehlendem Gesamtdrehimpuls.  $L_A$  Teildrehimpuls „Arme“.  $L_R$  Teildrehimpuls „Restkörper“.  $L_S$  Teildrehimpuls „Schwanz“

Nun ist der Körper der Katze keine starre, sondern eine äußerst bewegliche (besser: gelenkige) Masse. So kann die Katze während des freien Falles einzelne Körperteile, etwa den Kopf oder den Schwanz, gegenüber dem Rumpf in Drehbewegung versetzen. D. h. in dem betreffenden Körperteil wird ein Drehimpuls erzeugt. Da aber nach dem Impulserhaltungssatz die Gesamtbilanz aller im Katzenkörper erzeugten Drehimpulse nach wie vor den Betrag  $L = 0$  ergeben muss, wird die Erzeugung einer

Drehbewegung in dem einen Körperteil (Schwanz) notwendigerweise mit dem Entstehen einer entgegengerichteten Drehbewegung von gleicher „Größe“ in einem anderen Körperteil (Rumpf, Kopf, Beine) gekoppelt sein. Die Katze brauchte - theoretisch(!) - also lediglich den senkrecht zur Körperlängsachse abgespreizten Schwanz schnell genug **rechts herum** zu kreisen, um im restlichen Körper eine Drehung um die Längsachse **links herum** zu erzeugen (Abb. 4).

## 6. Praktische Überprüfung des Katzenexperiments

Wie kann man nun am eigenen Leibe überprüfen, ob die theoretische Lösung des Problems des Katzenexperimentes richtig ist? Man müßte dazu den eigenen Körper in den Zustand der Schwerelosigkeit versetzen. Leider müssen wir diese in jeder Beziehung interessante Erfahrung den Astronauten überlassen. Man kann aber den eigenen Körper in einen „quasi-kräftefreien“ Zustand versetzen, indem man sich ruhig auf einen gut geölten Drehstuhl stellt (Abb. 4), Arme in Seit-Vorhochhalte: Der Drehimpuls in bezug zur Körperlängsachse beträgt  $L = 0$ . Schwingt man nun den rechten Arm zuerst nach rechts außen, dann nach hinten, über den Kopf nach links und wieder nach vorn und rechts außen, gleichsam in weiten horizontalen Armkreisen über dem Kopf rechts herum in der Luft rührend, setzt sich der Körper mit der Sitzfläche des Drehstuhls langsam nach links in Drehung und hat nach etwa 5 bis 7 Armschwüngen eine Umdrehung um  $180^\circ$  um die Längsachse vollendet. Je schneller und weiter man die Arme nach rechts kreist, desto zügiger dreht sich der Körper nach links. Sobald man den Arm anhält, stoppt auch die Drehbewegung des Körpers. Die anfängliche Drehung des Körpers nach links lässt sich noch durch einen weiten Schwung des linken Armes aus der Seithalte nach vorn rechts bis vor die Brust unterstützen. Die Versuchsperson kann sich also tatsächlich um die Längsachse drehen, ohne einen Drehimpuls zu besitzen. In gleicher Weise könnte auch der Astronaut im schwerelosen Zustand Rotationen um die Längsachse erfolgreich ausführen, sofern ihm sein Raumanzug genügend Bewegungsfreiheit dazu läßt (Abb. 4).

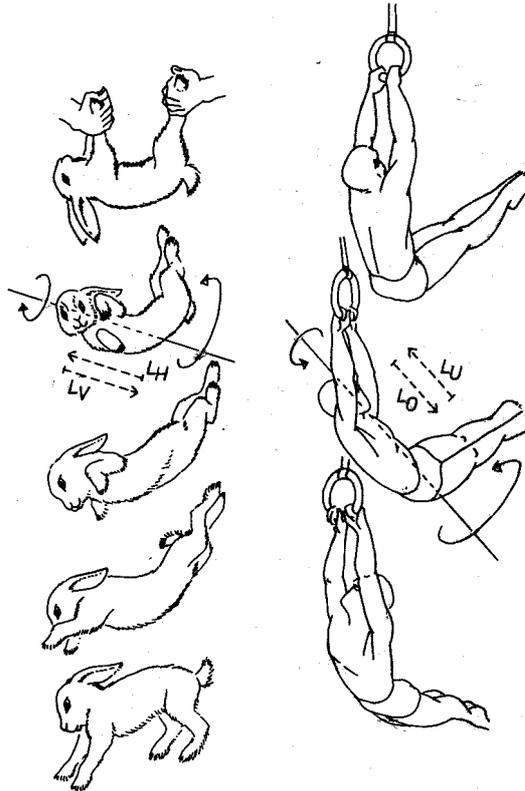
Nun mag dem einen oder anderen Zweifler das Drehstuhlexperiment als Beweis nicht genügen, da – zugegeben - der Körper im Stand auf dem Drehstuhl nicht völlig kräftefrei ist. In diesem Fall sollte man einen Trampolinspringer zu folgendem Experiment bitten: Zuerst werden mit dem Trampolinspringer die im Drehstuhlexperiment erklärten Armbewegungen derart geübt, daß er sich - auf einem Drehstuhl stehend - mit ihrer Hilfe auf Zuruf nach rechts oder links drehen kann. Danach läßt man ihn auf dem Trampolin hohe Schlußsprünge ausführen. Ruft man ihm, sobald er die Absprungstelle verlassen hat, eine Drehrichtung (rechts oder links) zu, hat er - auch wenn man als Reaktionszeit rund  $1/4$  s berücksichtigt - genügend

Zeit, durch die beschriebenen Armbewegungen eine Umdrehung in die geforderte Richtung von etwa  $90^\circ$  bis  $130^\circ$  zu vollenden, bevor er wieder mit dem Sprungtuch in Berührung kommt. Der Trampolinspringer hat demnach seinen Körper in der Flugphase um die Längsachse gedreht, ohne einen Drehimpuls besessen zu haben und ohne sich von der Umwelt abstoßen zu können (8). Dieses Phänomen wird in der Physik „**Scheinrotation**“ genannt. Scheinrotationen sind nur möglich, wenn durch innere Kräfte Teile der Körpermasse der gewünschten Drehrichtung entgegengedreht werden. Dieses Phänomen ähnelt dem Rückstoß des Astronauten von Abb. 2 und kann deshalb auch als „Drehrückstoß“ bezeichnet werden.

## 7. Die Katzenschraube des Kaninchens

Die praktischen Erfahrungen aus dem Drehstuhl- und Trampolinexperiment lehren, dass es nicht besonders effektiv ist, den Körper um die Längsachse zu drehen, indem man einen oder beide Arme entgegenkreist. Offensichtlich ist das Trägheitsmoment des Armes im Vergleich zum Trägheitsmoment des Rumpfes zu klein. Das gilt auch, wenn man versucht, durch weites Strecken der Arme senkrecht zur Längsachse das Trägheitsmoment der Arme möglichst groß zu gestalten. Die Wirkung eines günstigeren Verhältnisses der Trägheitsmomente läßt sich leicht zeigen, indem man bei einer Wiederholung des Drehstuhlexperiments eine 3-kg-Hantel über dem Kopf kreist.

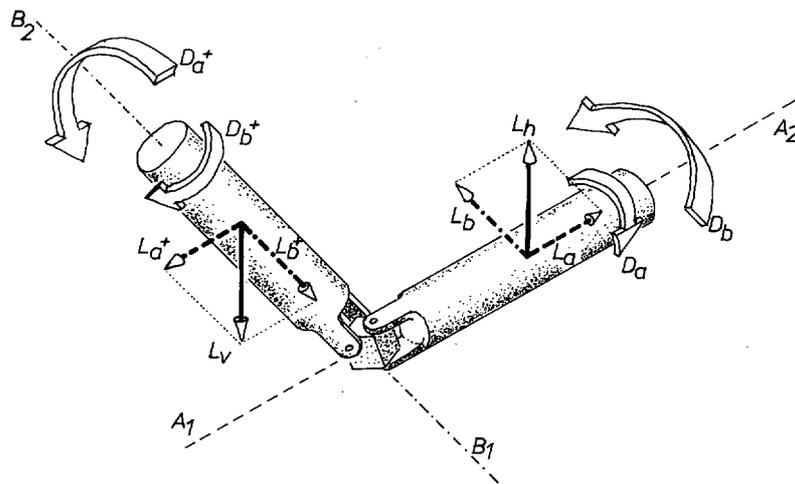
Dieses Problem müsste auch für die theoretische Lösung des Katzenexperimentes zutreffen. Schätzt man die Trägheitsmomente des Katzenkörpers und des Schwanzes, müsste die Katze in der ihr für den freien Fall zur Verfügung stehenden Zeit von  $1/2$  s den Schwanz etwa  $2\frac{1}{2}$  bis 3mal um die Körperlängsachse kreisen, um den Körper  $1/2$ mal um die Längsachse zu drehen (9), sicher ein recht unökonomisches Verhalten. Das gilt auch für eine Katze, die - im Gegensatz zu der in Abb. 4 dargestellten - die Beine zur Verkleinerung des Trägheitsmomentes eng an den Körper anlegt. Der Verdacht liegt also nahe, dass sich die Katze vielleicht wesentlich schlauer bewegt, als hier vermutet wurde. Außerdem: Wenn die hier postulierte Verhaltensweise die einzige Möglichkeit wäre, sich im freien Fall herumzudrehen, dürften Vierbeiner, die nicht über einen solch langen Schwanz verfügen wie eine Katze, zu diesem Kunststück nicht fähig sein. Beide Probleme lassen sich leicht klären. Dazu bietet sich in idealer Weise ein Kaninchen an; denn zum einen besitzt es im Vergleich zur Katze nur einen kümmerlichen Rest einer Schwanzwirbelsäule, zum anderen wird ein Protest des Kaninchens gegen die Beteiligung am Experiment weniger unangenehme Folgen mit sich bringen als bei einer Katze. Nun, an den Beinen hochgehoben (s. vorn) und fallengelassen, landet das Kaninchen überraschender Weise auch auf den Pfoten!



**Abb. 4** Katzenschraube.  $L_H$  Teildrehimpuls „Hinterteil“.  $L_O$  Teildrehimpuls „Oberkörper“.  $L_U$  Teildrehimpuls „Unterkörper“.  $L_V$  Teildrehimpuls „Vorderteil“

Da nun die Bewegungen des Kaninchens so blitzschnell erfolgen, dass man sie mit bloßem Auge kaum identifizieren kann, wird nur die Einzelbildbetrachtung eines Filmes exakten Aufschluß über das Verhalten des Kaninchens liefern (Abb. 5): Den Rumpf zuerst bauchwärts dann seitwärts gebogen, verdreht das Kaninchen Vorder- und Hinterteil gegeneinander und „schraubt“ sich in die Landeposition - eine Verhaltensweise, die tatsächlich auch die Katze in gleicher Situation praktiziert und die deshalb „Katzenschraube“ genannt wird. Physikalisch bedeutet dieses Verhalten die Erzeugung gleich großer, aber entgegengerichteter Drehimpulse im Vorder- und Hinterteil, die sich im Gesamtkörper zu Null addieren. (Es kann nicht verschwiegen werden, daß sich dieses Verhalten aus physikalischer Sicht komplizierter darstellt, als es vorn beschrieben wurde. Dies läßt sich an Hand von Abb. 6 nachvollziehen!).

Die Wirkung der Katzenschraube läßt sich leicht in der Sportpraxis überprüfen. Dazu hänge man sich mit beiden Händen an einen Schaukelring und hebe die Beine bis zur Waagerechten (Abb. 5). Dann schwinde man die Beine in der horizontalen Ebene nach links. Als Konsequenz wird sich der Rumpf mit den Armen automatisch rechts herumdrehen, so daß man über ein seitliches „Verschrauben“ in den gestreckten Hang gelangt, jedoch mit dem Blick entgegen der ursprünglichen Blickrichtung. Es wurde eine 180°-Drehung um die Längsachse durchgeführt, ohne daß dem Gesamtkörper ein Drehimpuls vermittelt werden konnte.

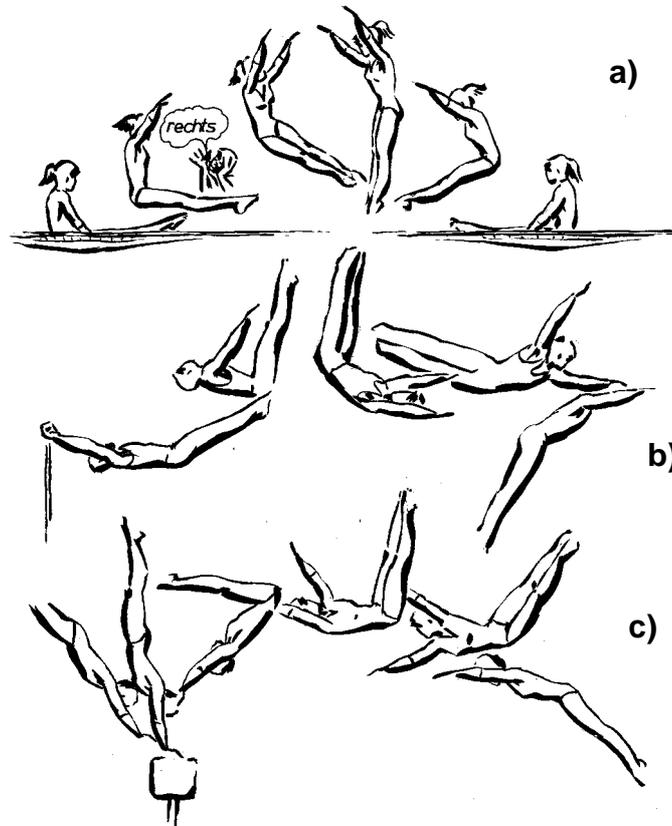


**Abb. 6** Verdeutlichung der Drehimpulse der „Katzenschraube“ am Modell einer Kardanwelle, in deren Gelenk man sich ein hypothetisches Element zur Erzeugung von Drehkräften denken muss. *rechts*: „Katzenhinterteil“, *links*: „Katzenvorderteil“. Die Erzeugung der Drehbewegung des Hinterteils im Drehsinn  $D_b$  mit dem Drehimpulsvektor  $L_b$  in Bezug zur Achse  $B_1$ - $B_2$  ist an die Erzeugung eines gleich großen entgegengerichteten Drehimpulses  $L_b^+$  des Vorderteils in Bezug zur gleichen Achse gekoppelt. Die Drehung  $D_b^+$  des Vorderteils erzwingt durch die Art der Befestigung der beiden Teilkörper die Drehbewegung  $D_a$  des Hinterteils um die Achse  $A_1$ - $A_2$  mit dem Drehimpulsvektor  $L_a$ . Das ist aber nur möglich bei gleichzeitiger Entstehung eines gleich großen entgegengerichteten Drehimpulses  $L_a^+$  im Vorderteil um die Achse  $A_1$ - $A_2$  mit dem Drehsinn  $D_a^+$ . Die vektorielle Addition von  $L_b$  und  $L_a$  ergibt den Gesamtvektor  $L_h$  der Drehbewegung des Katzenhinterteils, die Addition von  $L_b^+$  und  $L_a^+$  den Vektor  $L_v$  der Drehbewegung des Vorderteils. (Diese Kausalitätskette ist in beliebiger „Reihenfolge“ erklärbar!)

Auch bei diesem Experiment mögen leicht Bedenken aufkommen, ob der Körper im Hang auch wirklich die Bedingung, kräftefrei zu sein, erfüllt. Auch hier können die Bedenken nicht völlig ausgeräumt werden, weil der Körper über Ring und Seil äußeren Kräften unterliegt. Deshalb wird ein Trampolinspringer benötigt: In dem Augenblick, in dem er gerade vom Strecksitz auf dem Tuch abgefedert ist, wird ihm eine Drehrichtung (rechts oder links) zugerufen (Abb. 7a)! Tatsächlich ist er in der Lage, im Flug eine  $180^\circ$ -Drehung um die Längsachse auszuführen, indem er eine „Katzenschraube“ produziert, die er vorher möglichst an einem Schaukelring geübt hat. Er dreht sich also um die Längsachse, obwohl sein Körper keinen Drehimpuls besitzt, was nur durch die Erzeugung entgegengerichteter, dem Betrag nach gleicher Teil Drehimpulse möglich ist.

Es zeigt sich also, dass sich mit Hilfe der Katzenschraube zumindest eine  $1/2$ -Drehung um die Längsachse realisieren läßt, auch dann, wenn der Sportler keinen Drehimpuls in Bezug zur Längsachse besitzt. Dies wird nicht nur beim Trampolinspringen, sondern auch im Gerätturnen und Wasserspringen praktiziert, wenn im Laufe gebückter Salti

vorwärts oder rückwärts 1/2-„Schrauben“ um die Längsachse zu produzieren sind (Abb. 7b und 7c) (10).



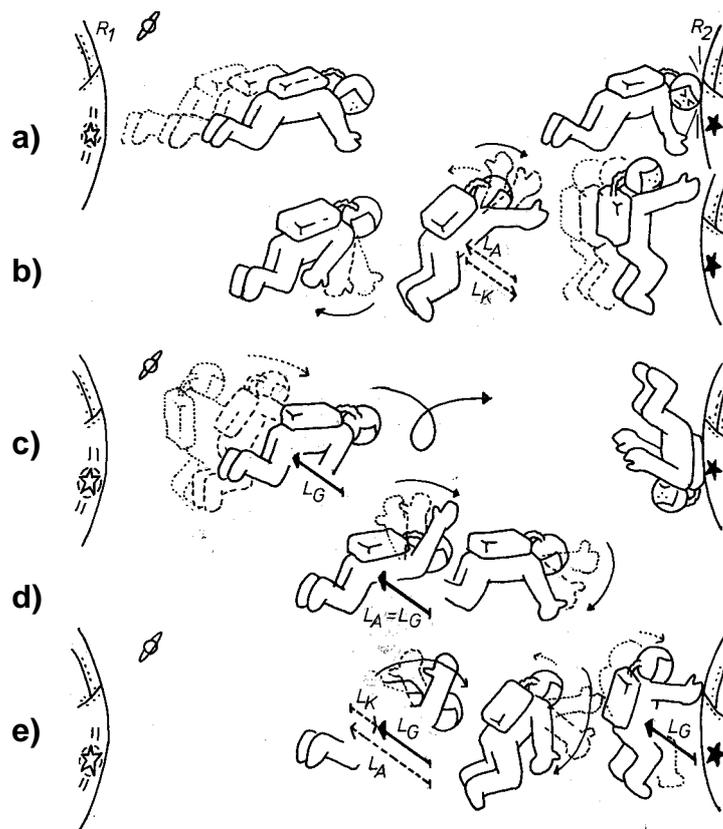
**Abb. 7** „Katzenschrauben“ im Laufe sportmotorischer Fertigkeiten. a: Katzenschraube am Trampolin. b: Überschlag rückwärts gebückt vom Reck mit  $\frac{1}{2}$ Drehung um die Längsachse. c: Yamashita mit  $\frac{1}{2}$ Drehung um die Längsachse

## 8. Scheinrotationen um die Breitenachse

Trampolinspringen und gebückte Salti vorwärts und rückwärts mit 1/2-Schrauben sind nicht jedermanns Sache. Doch Scheinrotationen spielen auch im Laufe von Alltagsbewegungen und von weniger anspruchsvollen sportlichen Fertigkeiten eine recht bedeutende Rolle. Beim Gehen, Laufen, beim Balancieren und in der Flugphase von Sprüngen werden die Lage des Körpers ständig mehr oder weniger merklich durch Gegendrehungen (durch Drehrückstoß) korrigiert und Drehbewegungen des Gesamtkörpers kontrolliert.

Dies soll zuerst am Beispiel eines „Gedankenexperimentes“ mit Astronauten verdeutlicht werden, weil es hier besonders leichtfällt, sich einen „kräftefreien“ Zustand vorzustellen: Der Astronaut der Abb. 8a beabsichtigt, von der Raumfähre  $R_1$  in die etwa 10 m entfernte Raumfähre  $R_2$  umzusteigen. Dazu hat er sich von der Raumfähre  $R_1$  vorsichtig abgestoßen und schwebt nun - Kopf voran - geradlinig und

ohne Drehbewegung langsam in Richtung Raumfähre  $R_2$ . Da er nun nicht mit dem Kopf gegen die Raumfähre  $R_2$  anstoßen möchte, versucht er, das Phänomen des Drehrückstoßes auszunutzen, um seine Körperlage im Raum zu korrigieren: Er schwingt seine Arme in möglichst weiten Vorwärtskreisen mehrfach um die Schulterachse, was seinem Körper eine Rückwärtsdrehung um die Breitenachse vermittelt (Abb. 8b). Hat er die gewünschte Position in Bezug zur Raumfähre  $R_2$  erreicht, stoppt er die Armkreise, was selbstverständlich auch die Körperdrehung stoppen läßt: Der Astronaut bewegt sich geradlinig weiter, ohne Drehbewegung aber in geänderter (= „gedrehter“) Position.



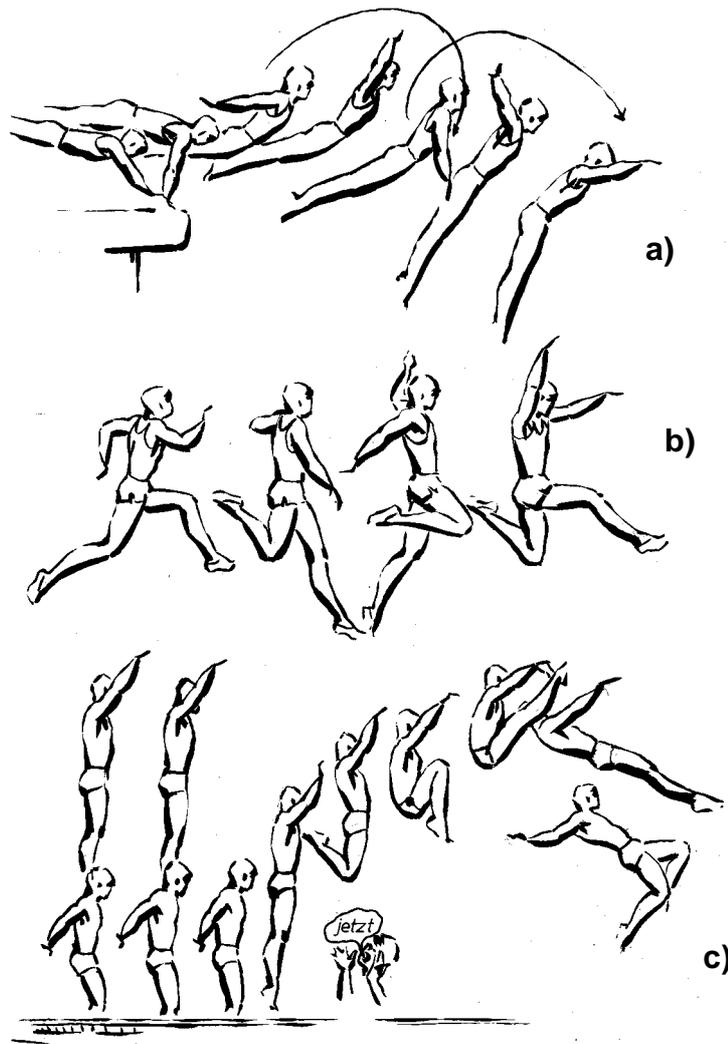
**Abb. 8** Rotationen und Scheinrotationen um die Breitenachse.  $L_A$  Teildrehimpuls „Arme“.  $L_G$  Gesamtdrehimpuls.  $L_K$  Teildrehimpuls „Restkörper“

Nach den Erläuterungen in Kap. 3 bis 7 müßte klar sein, dass der Astronaut zu Beginn des Manövers einen Drehimpuls mit dem Betrag  $L = 0$  besitzt, der (aufgrund fehlender Abstoßmöglichkeit) auch während der Positionskorrektur gemäß dem Impulserhaltungssatz gleich Null bleiben muß. Die Erzeugung des Drehimpulses ( $L_A$ ) in den Armen ist zwangsläufig an die Entstehung eines Drehimpulses ( $L_K$ ) von gleichem Betrag, aber entgegengesetzter Richtung im restlichen Körper (11) gekoppelt, wobei sich  $L_A$  und  $L_K$  im Gesamtkörper zu Null addieren.

Ein zweiter Astronaut, der auch das Umsteigemanöver erledigen will, möge sich nun so ungeschickt von der Raumkapsel  $R_1$  abstoßen, daß er zusätzlich einen Drehimpuls ( $L_G$ ) bekommt (Abb. 8c), der ihn langsam im Vorwärtsdrehsinn um die Breitenachse drehen läßt: Der Astronaut läuft Gefahr, mit dem Rücken voran gegen die Raumkapsel  $R_2$  zu stoßen (Abb. 8c). Kann auch hier ein Drehrückstoß die Körperhaltung bzw. die Drehbewegung beeinflussen? Kann der Astronaut trotz des vorhandenen Drehimpulses ( $L$  ungleich 0) die Drehbewegung stoppen oder gar umkehren? Schwingt der Astronaut wie sein Kollege der Abb. 8b die Arme kreisförmig um die Schulterachse vorwärts, also in diejenige Richtung, in die sich sein Körper ohnehin dreht, ist dieser Gewinn an Drehimpuls der Arme nur bei gleichzeitigem Verlust an Drehimpuls im restlichen Körper möglich: Die Arme drehen sich also schneller, der restliche Körper dreht sich langsamer als vor Beginn der Armbewegungen. Ist nun der Drehimpuls der Arme ( $L_A$ ) exakt so groß wie der Drehimpuls des Gesamtkörpers ( $L_G$ ), muß zwangsläufig der Restkörper einen Drehimpuls mit dem Betrag Null annehmen: Die Vorwärtsdrehung des Restkörpers ist „aufgehoben“, nur noch die Arme drehen vorwärts (Abb. 8d). Kreist der Astronaut die Arme jedoch so schnell vorwärts, dass der Drehimpuls der Arme ( $L_A$ ) größer wird, als der Drehimpuls des Gesamtkörpers ( $L_G$ ), muß im Restkörper (11) ein Drehimpuls ( $L_K$ ) im entgegengerichteten (rückwärtigen) (1) Drehsinn entstehen, der sich mit dem Drehimpuls der Arme ( $L_A$ ) zum Gesamtdrehimpuls ( $L_G$ ) addiert (Abb. 8e). Der Körper des Astronauten dreht sich während der schnellen Vorwärtsarmkreise rückwärts, obwohl nach wie vor im Gesamtkörper ein Drehimpuls mit Vorwärtsdrehsinn vorliegt. Hält der Astronaut die Arme an, hört selbstverständlich der Restkörper sofort auf, sich rückwärts zu drehen, und alle Teile des Gesamtkörpers zeigen wieder gemeinsam die anfängliche Vorwärtsdrehung gemäß dem vorhandenen Gesamtdrehimpuls  $L_G$ .

Nach diesen Erläuterungen drängen sich die Antworten zu den eingangs gestellten Fragen auf. Ein Schüler kann während der zweiten Flugphase der Hocke über den Kasten eine für die Landung ungünstige Vorlage korrigieren. Indem er Vorwärtsarmkreise (1) ausführt, richtet er den Körper auf, wie etwa der einen Hecht springende Turner der Abb. 9. Letzterer hat während der 2. Flugphase genügend Zeit, mindestens einen 1 1/2-fachen beidseitigen Armschwung vorwärts auszuführen, was ausreicht, seinen Körper um rund  $20^\circ$  im Sinne einer Rückwärtsdrehung (1) „aufzurichten“! Für den Kampfrichter wäre dieses Armkreisen natürlich ein Indiz, dass der betreffende Turner seinen Sprung - vor allem die Stützphase - nicht perfekt realisiert hat, da sonst die Korrekturaktionen nicht notwendig wären. Das Astronautenbeispiel zeigt zusätzlich, dass es für die Klärung der Wirkungsweise der Armschwünge des Hocke springenden Schülers unerheblich ist zu wissen, wie die starke Vorlage verursacht wurde, ob der Schüler während der Flugphase einen Drehimpuls mit Rückwärtsdrehsinn oder mit Vorwärtsdrehsinn oder keinen Drehimpuls

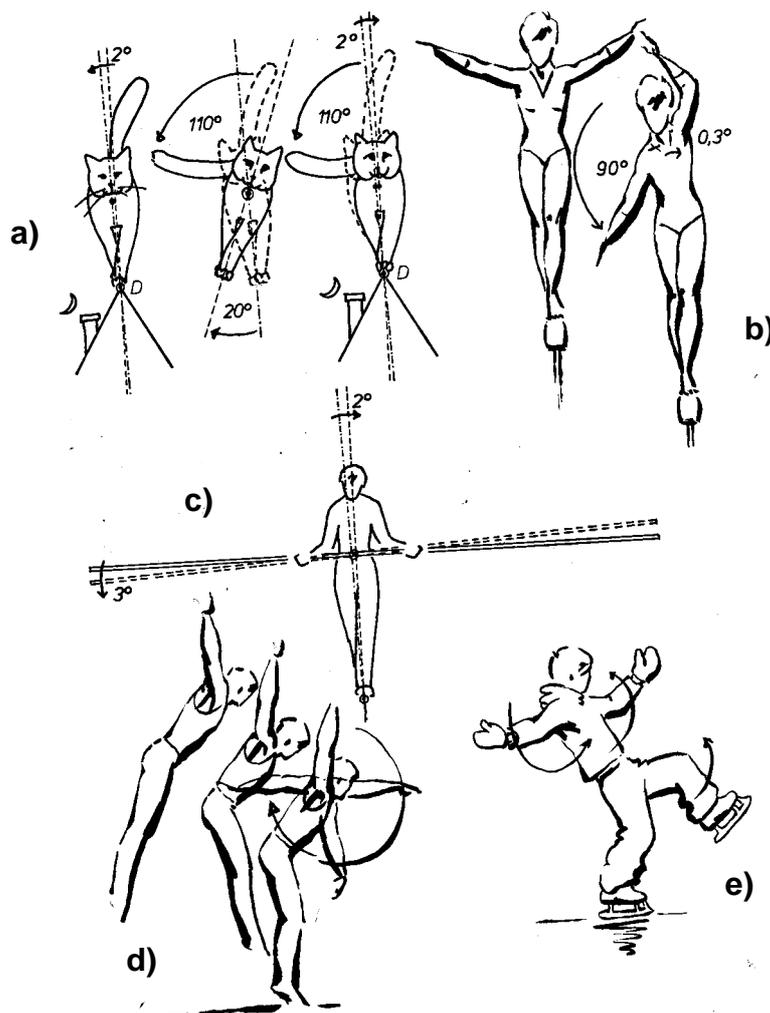
um die Breitenachse besitzt, -die Drehrichtung und die Drehgeschwindigkeit der Armkreisschwünge bestimmen, ob Körperdrehungen „erzeugt“, „angehalten“ oder „umgekehrt“ werden - wohlgemerkt: **solange die Armschwünge andauern** (s. o.). Demgemäß läßt sich bei der Beobachtung alpiner Abfahrtsläufer aus dem Verhalten der Arme während eines Geländesprunges leicht ablesen, ob der Absprung den Körper korrekt „getroffen“ hat, oder ob eine für die Landung drohende Vor- oder Rücklage zu korrigieren ist.



**Abb. 9** Scheinrotationen um die Breitenachse im Laufe sportmotorischer Fertigkeiten

Der Weitspringer, der im Laufe der Flugphase in der Hitch-Kick-Technik weiträumige Laufschriffe und zusätzlich beidseitige Armschwünge vorwärts ausführt (Abb. 9b), also in Beinen und Armen Drehimpulse im Vorwärtsdrehsinn erzeugt, muß zwangsläufig im Körper einen Drehimpuls im Rückwärtsdrehsinn von gleichem Betrag erfahren, sei es um eine vom Absprung resultierende Vorlage aufzuheben oder einen durch den Absprung bedingten Vorwärtsdrehimpuls zu kompensieren, zum Zwecke einer optimalen Landehaltung. Die Wirkung dieser Beinaktionen läßt sich mit einem

Trampolinspringer nachprüfen, der, nachdem er zu einem hohen Schlußsprung das Sprungtuch verlassen hat, durch Zuruf den Auftrag bekommt, zuerst die Füße anzufersen, dann die gewinkelten Beine an die Brust zu hocken und die Knie und danach die Hüfte zu strecken (Abb. 9c, in Seitlage auf einem Drehschemel ausgeführt nicht minder aufschlußreich!). Interessant in diesem Test wird das Verhalten des Springers sein, wenn er nach Ausführung der verlangten Aktion - von der erreichten Rücklage überrascht - unwillkürliche Korrekturbewegungen zur Gewährleistung einer Landung im Stand ausführt. Der aufmerksame Leser sollte jetzt in der Lage sein, diese korrekt vorauszusagen.



**Abb. 10** Balancieren durch Drehrückstoß

Auch die Korrektur der Körperlage beim Balancieren kann als Scheinrotation angesehen werden. Die Katze auf dem Dach, die Turnerin auf dem Schwebebalken, der Hochseilartist, der Eisläufer oder der Turner nach dem Niedersprung produzieren als Korrekturbewegungen nicht ohne Grund **reine Drehbewegungen** in diejenige Richtung, in die sie das Gleichgewicht zu verlieren drohen (Abb. 10). Der mit der

Erzeugung des Drehimpulses der Korrekturbewegung verbundene Gegendrehimpuls dreht den Körper wieder in die Senkrechte. Frei im Raum schwebend würde sich der Körper um eine Schwerpunktsachse drehen (bei der Katze der Abb. 10a, mittlere Figur, ist es die Körperlängsachse). Durch den Kontakt der Füße mit der Unterlage ist die Drehachse jedoch in den Fußpunkt verlagert. Dadurch wird allerdings das Trägheitsmoment des Körpers deutlich vergrößert (etwa 4fach bei der Turnerin Abb. 10b, sogar fast 10fach bei der Katze (9) gegenüber einem Trägheitsmoment bezügl. der betreffenden Schwerpunktsachse), die Konsequenzen für die Effektivität der Korrekturbewegungen sind aus Abb. 10a abzulesen. Abb. 10 hilft zusätzlich die Frage zu beantworten, aus welchem Grund die Arme bei den Korrekturbewegungen möglichst lang gestreckt geschwungen werden und aus welchem Grund die Balancierstange des Hochseilartisten möglichst lang (bis 5 m) und schwer (bis 25 kg) und zudem im mittleren Bereich hohl sein sollte.

### Anmerkungen

- (1) Durch die Angabe der Drehrichtung („vorwärts“, „rückwärts“) ist bei Berücksichtigung ihrer sport- bzw. turnsprachlichen Bedeutung die Breitenachse als Drehachse eindeutig festgelegt.
- (2) Tatsächlich läßt sich der Impuls eines Sprinters nur grob angenähert in dieser Weise bestimmen. Die Zusatzbedingungen der wellenförmigen Bewegung des Schwerpunktes, der unterschiedlichen Rotationen der Gliedmaßen u. a. m. sollen hier unberücksichtigt bleiben. Ähnliches gilt für die weiteren Aussagen zur Größe der Impulse und Drehimpulse der angeführten Beispiele.
- (3) Aus dem vorgeschalteten Text geht hervor, daß die Koordinaten dieses Impulses an der Raumkapsel „festgemacht“ sind.
- (4) Die erzeugte Kraft ist in bezug auf das Gesamtsystem „Astronaut plus Hammer“ eine innere Kraft, in bezug auf den Astronautenkörper und in bezug auf den Hammer eine äußere Kraft. D. h. der Schwerpunkt des Systems „Astronaut + Hammer“ bewegt sich mit der ursprünglichen Geschwindigkeit und Richtung von der Raumkapsel fort.
- (5) Impulsänderungen gehorchen generell dem gleichen Prinzip. Von „Rückstoß“ spricht man in der Regel, wenn sich der Beobachter nicht mit einem der beteiligten Körper mitbewegt.
- (6) Exakter wäre der Begriff „Translation“. Die definitorische Abgrenzung von Translation und Rotation soll hier jedoch verschwiegen werden.
- (7) Dies gilt nur für eine punktförmig im Schwerpunkt konzentrierte Masse, was die Art der Darstellung in Abb. 3 andeuten soll. Das Trägheitsmoment physikalischer Körper wird nach dem STEINERSchen Satz berechnet, was aus didaktischen Gründen hier nicht abgeleitet werden soll.
- (8) Im Trampolinturnen werden allerdings Drehungen um die Längsachse im Laufe von Schlußsprüngen auf andere, hier nicht zur Debatte stehende Weise, erzeugt.
- (9) Berechnet nach dem STEINERSchen Satz (s. z.B. BERGMANN/SCHAEFER.' Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. 1, Berlin 91974. S. 98ff.): Die beteiligten Teilkörper sind zur Berechnung der Trägheitsmomente auf Zylinder mit geschätzten Massen und gemittelten räumlichen Abmessungen reduziert.

- (10) Eine andere hier nicht zur Debatte stehende Möglichkeit, im Laufe von Salti Schraubendrehungen auszuführen: von dem vorhandenen Drehimpuls um die Breitenachse wird ein Teil "abgezweigt", um die Drehung um die Längsachse zu garantieren.
- (11) Da die Arme am Astronautenkörper befestigt sind, kann sich der „restliche Körper“ nicht rückwärtsdrehen, ohne die Arme mitzunehmen". Streng genommen entsteht also der Gegendrehimpuls zum Drehimpuls der Arme im Gesamtkörper, was bei der Berechnung der Trägheitsmomente der beiden sich entgegengesetzt drehenden Körper nach dem STFINERschen Satz berücksichtigt werden muß. Dies gilt für alle hier gebrachten Beispiele zum Drehrückstoß, soll aber im Text nicht hervorgehoben werden, da es den weniger physikalisch geschulten Leser verwirren könnte.