

# Der Bumerang

## ein Spielzeug mit verblüftenden Flugeigenschaften

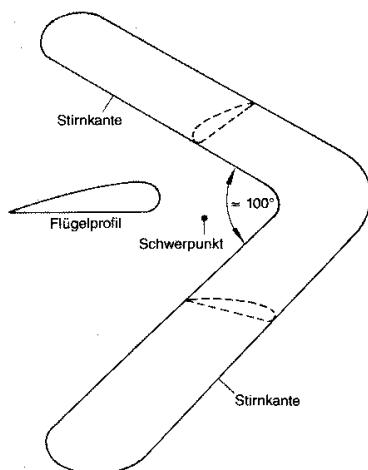
Von Hans Joachim Schlichting und Bernd Rodewald

### Einleitung

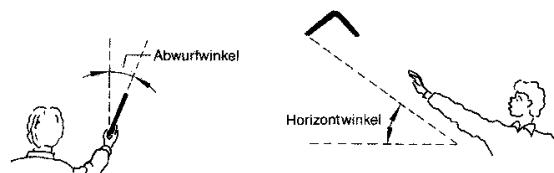
Seit der zurückkehrende Bumerang in Europa bekannt ist, hat er die Menschen immer wieder fasziniert und zu zahlreichen Beschreibungen und Erklärungen seines erstaunlichen Flugverhaltens geführt (vgl. das Literaturverzeichnis in [1]). Ein Physiklehrer, der diese Faszination im Unterricht nutzen möchte, sucht dennoch häufig vergeblich nach unterrichtsnahen physikalischen Beschreibungen: Die wenigen physikalisch korrekten und durchsichtigen Veröffentlichungen, die zur Zeit auf dem Markt sind, beziehen sich u. E. entweder zu wenig auf einen möglichen Physikunterricht (z. B. [2], [3], [4]) oder sie treiben eine Elementarisierung nur bis zum Niveau des Hochschulunterrichts oder eines Leistungskurses der Sekundarstufe II (z.B. [5], [6])

Im folgenden soll versucht werden, unter weitgehendem Verzicht auf quantitative Einzelheiten die physikalischen Prinzipien des Bumerangs so weit zu vereinfachen, daß dieser auch im Unterricht der Sekundarstufe [behandelt werden kann. Unsere Darstellung ist jedoch so angelegt, daß darauf eine quantitative Beschreibung aufbauen kann.

Am Anfang eines solchen Unterrichts steht notwendigerweise zunächst der Bau und die Handhabung des Bumerangs, denn viele käuflich zu erwerbende Bumerangs der Spielzeugindustrie fliegen u. E. schlecht. Bauanleitungen findet man z.B. in [2], [7] und [8], auf die wir hier der Kürze halber verweisen müssen. Ein Beispiel für einen zurückkehrenden Bumerang (nur diese sollen hier besprochen werden) für Rechtshänder gibt Abb. 1 wieder (nach [2]). Er wird aus fünffach verleimtem Sperrholz (am besten finnische Birke) von 5-7 mm Stärke hergestellt. Einer der wenigen guten käuflichen Bumerangs ist der aus Kunststoff bestehende „Comeback“ von W. Urban, den wir neben unseren selbstgefertigten Holzbumerangs ebenfalls benutzt haben (Bezug. Dipl.-Kfm. Gerda Urban, Postfach 67, 8801 Leutershausen). Auch bezüglich der genauen Wurftechnik verweisen wir auf die Literatur (empfehlenswert z. B. [7], [9], [10]). Um



**Abb. 1:** Beispiel eines zweiflügeligen Bumerangs für Rechtshänder (Tragflügelprofil: abgerundete Stirnkante gewölbte Oberseite, flache Unterseite, scharfe Hinterkante)



**Abb. 2:** Zur Definition von Abwurfwinkel und Horizontwinkel

hier von einer Vorstellung zu geben, sei gesagt, daß der Bumerang an einer Flügel spitze

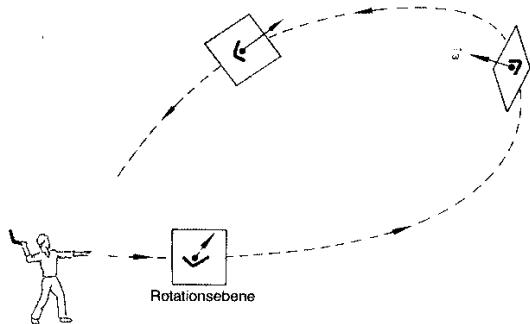
ergriffen und mit der gewölbten Flügeloberseite zum Werfer weisend aus nahezu senkrechter Position so weggeschleudert wird, daß er in Rotation gerät. Für einen guten Flug sind die richtigen Größen von Abwurfwinkel (Winkel zwischen der Vertikalen und der anfänglichen Rotationsebene des Bumerangs), Horizontalwinkel und Luvwinkel (Winkel zwischen Abwurfrichtung und Windrichtung) wichtig (vgl. Abb. 2). Sie hängen von der Form und dem Gewicht des Bumerangs und von den Windverhältnissen ab. Details müssen durch Versuche ermittelt werden. Gute Erfahrungen ha-

ben wir z. B. beim „Comeback“ mit einem Abwurfwinkel von  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  und einem Horizontwinkel von  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$  gemacht. Der Luvwinkel richtet sich ausgesprochen stark nach dem Wind: Je stärker dieser weht, desto weiter muß der Werfer ihm den Rücken zukehren. Genauere Angaben hierzu, insbesondere auch zur Behebung von Wurffehlern, findet man in der angegebenen Literatur.

### Die Bewegungselemente des fliegenden Bumerangs

Laien vermuten meistens in der bananenähnlichen Form des Bumerangs den Grund für dessen Rückkehr zum Werfen. Doch beim Wurf entsprechend geformter Hölzer wird man eines besseren belehrt, denn sie werden i. a. nicht zurückkehren. Tatsächlich ist die Formgebung von untergeordneter Bedeutung, da man z.B. alle Buchstaben des Alphabets als Bumerangform nutzen kann [7].

Wesentlich ist vielmehr die Profilierung des Hol-



**Abb. 3:** Die Bahn des Bumerangs und die Orientierung seiner Rotationsebene bzw. des Vektors  $\vec{w}$  der Winkelgeschwindigkeit während des Fluges

zes nach dem Muster eines Tragflügels. Hinzu kommt die Notwendigkeit, dem Bumerang beim Abwurf eine hinreichend große Rotation zu erteilen, damit er wieder bis zum Werfer zurückkehren kann. Physikalisch sind damit zwei Phänomenbereiche angesprochen, auf die der Bumerangflug aufbaut: die Aerodynamik am Tragflügel und das Verhalten eines sich um eine Achse drehenden Körpers, eines Kreisels also.

Die Bahn eines gut geworfenen Bumerangs ist eine geschlossene Kurve, die sehr unterschiedliche Formen annehmen kann. Sie ist im einfachsten Fall eine Kreisbahn auf der Oberfläche einer gedachten großen Kugel (Abb. 3). Dabei beschreibt der rechtshändige Bumerang in allen Flügen eine Linkskurve. In der Endphase des Fluges sind jedoch auch manchmal entgegengesetzte Kurven möglich, so daß sich diverse Schleifenformen, 8- und S-Formen als Flugbahnen ergeben können.

Wir gehen im folgenden zunächst von der einfachen Flugbahn aus und stellen also fest:

- Der Bumerang beschreibt eine Kreisbahn.

Dieses ist sicherlich das auffälligste Phänomen, in dem sich der Flug eines Bumerangs von dem eines weggeworfenen Stockes unterscheidet.

Des weiteren fällt auf daß sich die Orientierung der Ebene, in der sich der Bumerang um seinen Schwerpunkt dreht (Rotationsebene) während des Flugs verändert (Abb. 3). Während ein normaler Stock, der beim Abwurf um eine waagerechte Achse rotiert, dieses auch noch am Ende seines geradlinigen Flugs tut, ändert die Rotationsachse des Bumerangs ihre Richtung im Raum. Genauer: Zeigt der Vektor  $\vec{w}$  der Winkelgeschwindigkeit des Bumerangs beim Abwurf (vom Werfer aus gesehen) nach links, so zeigt er beim Rückflug des Bumerangs nach rechts und ist dabei oft auch noch mehr oder weniger schräg nach oben orientiert. Nimmt man beim Abwurf eine in erster Näherung vertikal ausgerichtete Rotationsebene an, so läßt sich die Änderung ihrer Orientierung durch zwei Bewegungsanteile erfassen:

- Die Rotationsebene und demzufolge auch der Vektor  $\vec{w}$  der Winkelgeschwindigkeit werden um eine senkrechte Achse gedreht.
- Der Bumerang legt sich mehr oder weniger flach, was einer Drehung von  $\vec{w}$  um eine waagerechte Achse entspricht.

Bei einigen Bumerangs (z. B. beim „Comeback“) tritt bei manchen Würfen in der Endphase des Flugs noch eine zusätzliche Erscheinung auf:

- Der Bumerang zeigt am Schluß des Fluges das Verhalten der Autorotation.

Damit ist gemeint, daß der Bumerang zum Schluß parallel zur Erdoberfläche rotiert und im Vergleich zur vorhergehenden Flugphase deutlich langsamer sinkt und schneller rotiert. Diese Autorotation hat mit der eigentlichen Rückkehr des Bumerangs nichts mehr zu tun.

Sieht man daher also zunächst einmal von der Autorotation ab, so weisen die Bewegungselemente des Bumerangfluges auf das Vorhandensein dreier physikalischer Größen hin:

- eine Zentripetalkraft, die den Bumerang auf eine Kreisbahn zwingt,
- ein Drehmoment, welches die Rotationsebene des Bumerangs um eine senkrechte Achse dreht,
- ein Drehmoment, welches die Rotationsebene des Bumerangs um eine waagerechte Achse dreht und ihn damit flachlegt.

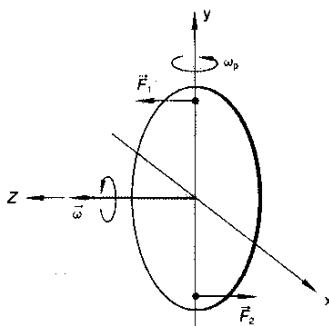
Als Ursache für die Entstehung dieser von außen angreifenden Kraft und dieser äußeren Momente muß offensichtlich die Wechselwirkung des rotierenden Bumerangs mit der Luft angesehen werden.

Eine grobe physikalische Erklärung für die Bewegung des Bumerang

Der rotierende Bumerang ist ein Kreisel

Der Kreisel wird üblicherweise in der Sekundarstufe I nicht behandelt. Für das Verständnis des Bumerangs genügt es jedoch, wenn Schüler an Spielzeugkreiseln, am Jo-Jo, am Diabolo, am Diskus, am rotierenden Rad etc. die folgenden Erfahrungen gesammelt haben:

- Ein rotierender Kreisel behält seine Drehachse im Raum bei, sofern keine äußeren Kräfte auf ihn wirken.
- An einem wie in Abb. 4 rotierenden Kreisel



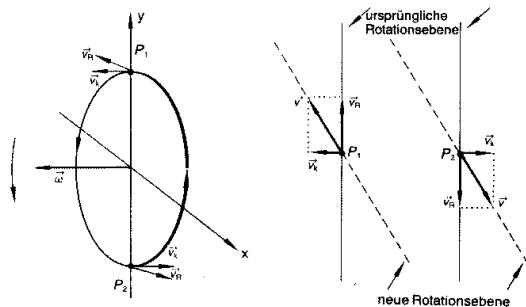
**Abb. 4** Präzession eines Kreisels (als rotierende Scheibe dargestellt), der mit der Geschwindigkeit  $\omega$  um die z-Achse rotiert. Die Präzession erfolgt um die y-Achse mit der Präzessionsfrequenz  $\omega_p$

greife ein Drehmoment an, welches ihn um die x-Achse zu kippen versucht (z. B. kann das Drehmoment wie in der Abbildung durch ein Kräftepaar  $(\vec{F}_1, \vec{F}_2)$  mit  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$  entstehen).

Dann kippt der Kreisel nicht um, sondern er dreht sich - und zwar so, daß sein Vektor  $\vec{\omega}$  der Rotationsgeschwindigkeit in die Richtung der (positiven) x-Achse wandert. Diese Drehung heißt Präzession und erfolgt um die y-Achse mit der Präzessionsfrequenz  $\omega_p$ .

Diese Präzession läßt sich nach Abb. 5 in einfacher Weise verstehen. Greift nämlich ein kippendes Moment wie in Abb. 4 am Kreisel an, so erhält jeder Punkt des Kreisels eine zusätzliche Geschwindigkeit  $\vec{v}_k$  senkrecht zur Rotationsebene. Diese Geschwindigkeit ist in Abb. 5a) für zwei Punkte  $P_1$  und  $P_2$  eingezeichnet.  $\vec{v}_k$  überlagert sich mit der Rotationsgeschwindigkeit  $\vec{v}_R$  in diesen

Punkten einer neuen Geschwindigkeit  $\vec{v}$ , wie es in Abb. 5b) dargestellt ist. Die Bewegungsrichtung der Punkte  $P_1$  und  $P_2$  wird damit geändert, was einer Drehung der Rotationsebene des Kreisels entspricht, wie sie in Abb. 5b) eingezeichnet ist. Diese Drehung erfolgt in der Tat um die y-Achse mit der oben angegebenen Richtung der Präzession.



**Abb. 5:** Zur Erklärung der Präzessionsbewegung eines Kreisels. In Abb. b) blickt man von oben entgegen der y-Achse auf die Punkte  $P_1$  und  $P_2$

Der Bumerang ist ein Tragflügel

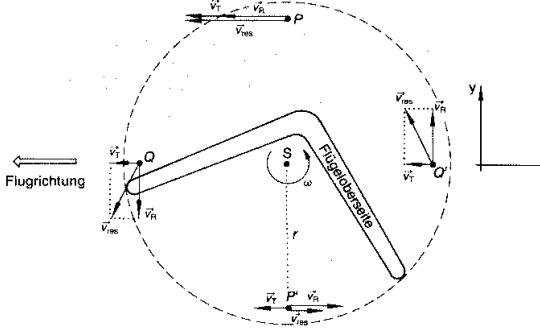
Der Bumerang erfährt damit beim Flug von der umgebenden Luft eine Kraft, die sich in einen Widerstandsanteil und einen (dynamischen) Auftriebsanteil zerlegen lässt. Das Wirken der Widerstandskraft führt zu einer langsamen Abnahme der Bewegungsenergie des Bumerangs und äußert sich dementsprechend in einer Verringerung des Betrags  $v_T$  der Translationsgeschwindigkeit und der Rotationsfrequenz  $\omega$  des Bumerangs. Diese Tatsache ist für den Mechanismus der Rückkehr des Bumerangs nicht von Bedeutung und soll daher im folgenden vernachlässigt werden.

Wesentlich für das Verständnis des Bumerangs ist das Vorhandensein von Auftriebskräften. Wir gehen an dieser Stelle davon aus, daß die Auftriebskraft im Unterricht bereits in einem Umfang behandelt wurde wie es z. B. in [11] dargestellt ist.

Es soll also bekannt sein, daß ein Luftumströmter Tragflügel eine Auftriebskraft  $\vec{F}_A$  senkrecht zur Strömungsrichtung und zur gewölbten Flügeloberseite weisend erfährt. Weiterhin setzen wir die Kenntnis der Tatsache voraus, daß der Betrag  $\vec{F}_A$  umso größer ist, je größer die Relativgeschwindigkeit  $\vec{v}$  zwischen dem Flügel und der senkrecht auf die Stirnkante weisenden Strömungskomponente der Luft ist. Dieses wird quantitativ durch

$$F_A = k \cdot v^2 \quad (1)$$

ausgedrückt, wobei die Größe  $k$  von geometrischen Daten des Flügels, von der Dichte der Luft und von der jeweils vorhandenen Art von Strömung (laminar oder turbulent) abhängt.

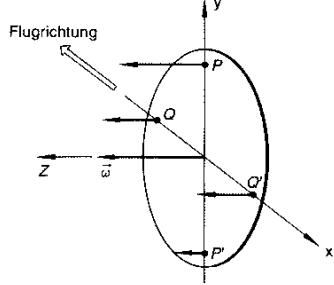


**Abb. 6:** Translationsgeschwindigkeit  $\vec{v}_T$  und Rotationsgeschwindigkeit  $\vec{v}_R$  am fliegenden Bumerang für verschiedene Punkte die bei einer Volldrehung überstrichen werden.  $\vec{v}_T + \vec{v}_R = \vec{v}_{res}$  wird zur Bestimmung des Auftriebs benötigt.

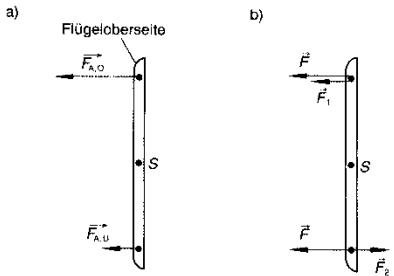
Um einen Eindruck von der Größe der Auftriebskräfte am rotierenden Bumerang zu bekommen, hat man sich also zunächst zu überlegen, wie groß die relative Geschwindigkeit eines Tragflügelabschnitts in der umgebenden Luft ist, wenn dieser z. B. die Punkte P, P', Q, Q' in Abb. 6 passiert. Diese Punkte haben den gleichen Abstand  $r$  zum Drehzentrum S und liegen in der kreisförmigen Fläche, die der rotierende Bumerang während einer Volldrehung überstreichet, wenn man sich mit dem Schwerpunkt S mitbewegt. Nehmen wir der Einfachheit halber Windstille an, so ist die gesuchte Relativgeschwindigkeit einfach durch  $\vec{v}_{res} = \vec{v}_T + \vec{v}_R$  gegeben, wobei  $\vec{v}_T$  durch die Translation und  $\vec{v}_R$  durch die Rotation des Bumerangs zustande kommen. Die Richtung von  $\vec{v}_R$  hängt vom jeweils betrachteten Punkt ab, sein Betrag  $v_R = \omega r$  ist für vorgegebenen Abstand  $r$  zum Drehzentrum S jedoch konstant. Während sich im oberen Punkt P der Translations und der Rotationsanteil zu einem Maximalwert addieren, kompensieren sie sich teilweise im unteren Punkt P', was  $v_{res}$ , dort minimal macht. In den Punkten Q und Q' ist der Betrag  $v_{res}$  der resultierenden Geschwindigkeit gleich und liegt zwischen den in P und P' ermittelten Werten.

Läßt man an dieser Stelle zunächst noch die Tatsache unberücksichtigt, daß zur Ermittlung des Auftriebs noch die Komponente von  $\vec{v}_{res}$  zu bestimmen ist, welche senkrecht zur Stirnfläche des Tragflügels weist, so folgt wegen der Beziehung (1) aus der Abbildung 6 sofort eine Auftriebsverteilung im überstrichenen Kreis, wie sie durch Abb. 7 wiedergegeben wird. Ohne zunächst wei-

tere Punkte des überstrichenen Kreises näher zu untersuchen, sollen im nächsten Abschnitt die Auswirkungen dieser Kräfteverteilung diskutiert werden.



**Abb. 7:** Schema der Auftriebsverteilung in den Punkten P, P', Q, Q' von Abb. 6 unter der Annahme eines konstanten Auftriebsfaktors k



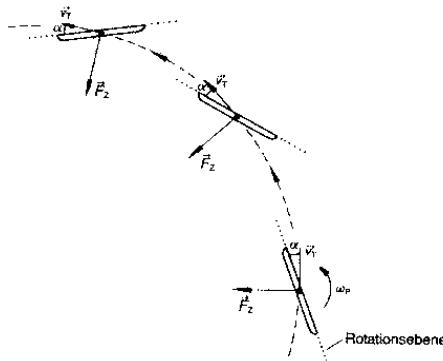
**Abb. 8:** a) Auftriebskräfte oben ( $\vec{F}_{A,O}$ ) und unten ( $\vec{F}_{A,U}$ ) auf der vorn Bumerang überstrichenen Kreisfläche b) Zerlegung dieser Kräfte in einen verschiebenden Anteil  $\vec{F}$  und ein Kräftepaar ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ ) mit  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

Die „geheimnisvolle“ Rückkehr des Bumerangs

Die Auftriebskräfte sind also in der überstrichenen Scheibe von Abb. 6 bzw. Abb. 7 oben größer als unten. Sieht man dem wegfliegenden Bumerang hinterher, so liegt offensichtlich eine physikalische Situation vor wie in Abb. 8a), welche zur Darstellung in Abb. 8b) äquivalent ist. Die dort gezeichnete Kraft  $\vec{F}$  bewirkt eine seitliche Verschiebung des Bumerangs bei gleichbleibender Orientierung der Drehachse  $\vec{w}$  während das Kräftepaar ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ ) dem wegfliegenden Bumerang ein Drehmoment erteilt, welches ihn entgegen dem Uhrzeigersinn zu kippen sucht, wegen der kieselnden Bumerangbewegung jedoch zu einer Drehung (Präzession) um die vertikale y-Achse führt. Beide Bewegungen wirken zusammen und führen zu der beobachteten Kreisbahn.

Abb. 9 veranschaulicht dieses Zusammenwirken etwas genauer. Dort ist die Bewegung des (rechtshändig geworfenen) Bumerangs aus der Vogelperspektive dargestellt, wobei wir der besseren Übersicht wegen die im oberen Teil des rotierenden Bumerangs auftretende Kraft  $\vec{F}$  (vgl. Abb. 8b)) durch deren resultierende Kraft  $\vec{F}_z$  im Schwerpunkt ersetzt haben.

Als eine auftriebsbedingte Kraft weist  $\vec{F}_z$  stets senkrecht zur momentanen Geschwindigkeit  $\vec{v}_r$  des Bumerangschwerpunktes und stellt damit eine Zentripetaikraft dar.  $\vec{F}_z$  bewirkt eine Krümmung der Flugbahn nach links und damit eine Drehung des Geschwindigkeitsvektors  $\vec{v}_r$  entgegen dem Uhrzeiger Sinn. Das oben genannte Drehmoment paßt die Rotationsebene des Bumerangs dieser sich ändernden Geschwindigkeitsrichtung an. Es läßt die Rotationsebene so entgegen dem Uhrzeigersinn (in Abb. 9) präzidieren, daß der Winkel  $\alpha$  zwischen dem Vektor  $\vec{v}_r$  und der Rotationsebene stets konstant bleibt. Dieses garantiert einen stets gleich großen Auftrieb und damit die Konstanz des Betrages  $F_z$  der Zentripetalkraft, so daß der



**Abb. 9:** Der Flug des Bumerangs aus der Vogelperspektive

Bumerang eine geschlossene Kreisbahn beschreiben muß.

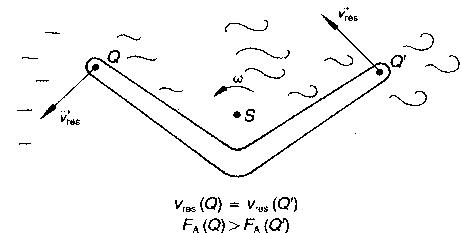
#### Das Flachlegen des Bumerangs

Die bisherigen Überlegungen können das Flachlegen des Bumerangs, d. h. das Drehen der Rotationsachse in die vertikale Richtung mit der gewölbten Flügelseite nach oben nicht erklären. Wegen der Kreiseigenschaften des Bumerangs würde diese Drehung nämlich ein Drehmoment voraussetzen, welches durch unterschiedlich große Auftriebskräfte in den links und rechts liegenden Punkten Q und Q' des überstrichenen Kreises der Abb. 6 zustande käme. Nach Abb. 7 sind die dort herrschenden Auftriebskräfte jedoch gleich groß.

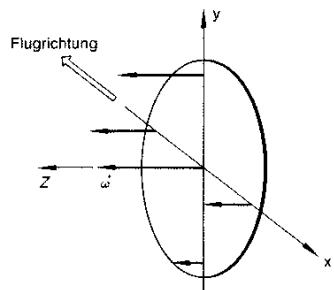
Damit wird eine Links-Rechts-Symmetrie im überstrichenen Kreis suggeriert, die tatsächlich nicht vorhanden ist. Dieses verdeutlicht Abb. 10. Zwar sind dort (wie in Abb. 6) in den Punkten Q und Q' die relativen Strömungsgeschwindigkeiten gleich groß,  $v_{res}(Q) = v_{res}(Q')$  jedoch kann man im Falle der Bumerang Stellung von Abb. 10 sicherlich nicht auf entsprechend gleich große Auftriebskräfte schließen.

Ein solcher Schluß nach Gleichung (1) hätte die Annahme eines gleich großen Faktors k zur Voraussetzung. Im Gegensatz zu Abb. 6 ist dieses in Abb. 10 jedoch nicht gerechtfertigt. Der Punkt Q' taucht dort nämlich in die mehr oder weniger turbulente Strömung ein, die der linke vorauseilende Flügel hinter sich erzeugt. Durch diese Verwirbelungen fällt (im Gegensatz zur laminaren Anströmung bei Q) ein gewisser Anteil der Luft bei Q' so ungünstig auf die gewölbte Flügeloberseite ein, daß er netto den Gesamtauftrieb reduziert. Dies schlägt als verkleinerter k-Faktor zu Buche, so daß trotz  $v_{res}(Q) = v_{res}(Q')$  die Linksymmetrie  $F_A(Q) > F_A(Q')$  entsteht (Abb. 11). Damit wird die Links-Rechts-Symmetrie im überstrichenen Kreis gebrochen und führt zu dem Drehmoment, welches das beobachtete Flachlegen verursacht.

Es hängt von der Größe dieses Moments ab, wie schnell die Flächenbewegung erfolgt. Je nach Bumerang kann das Drehmoment so stark ausgeprägt



**Abb. 10:** Erzeugung von auftriebsniedrigenden Turbulenzen durch den vorauseilenden Flügel



**Abb. 11:** Schema der Auftriebsverteilung auf der vom Bumerang während einer Drehung überstrichenen Kreisfläche bei Berücksichtigung von Turbulenzeffekten

sein, daß die Rotationsebene sich bis zum Ende des Flugs nicht nur in die Horizontale dreht, sondern darüber hinaus sich wieder schräg stellt - jetzt allerdings mit der Oberseite der Flügel zur anderen Seite weisend, so daß sich an die Linkskurve eine Rechtskurve anschließt. Auf diese Weise kommen S- und 8förmige Bumerangflugbahnen zustande.

### Vertiefung der bisherigen physikalischen Überlegungen

#### Eine genauere Analyse der Auftriebsverteilung

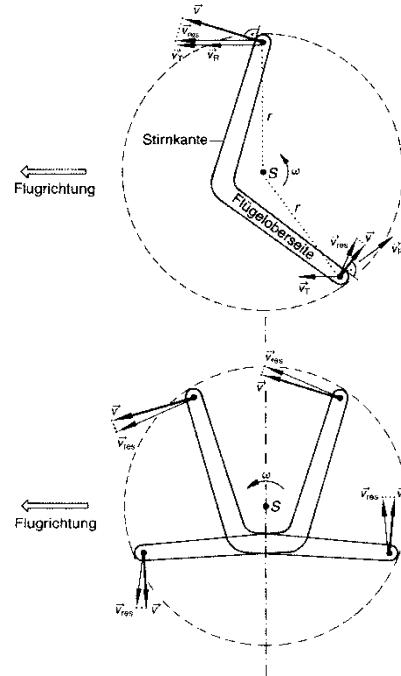
Eine genauere Analyse der Auftriebskräfte hat die Tatsache zu berücksichtigen, daß der Auftrieb  $F_A$  nicht durch den „vollständigen“  $\vec{v}_{res} = \vec{v}_T + \vec{v}_R$  der Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Flügelsegment bestimmt ist, sondern nur durch die Teilkomponente  $\vec{v}$  von  $\vec{v}_{res}$  welche senkrecht zur Stirnkante des Flügels weist. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 12 für einige herausgegriffene Bumerangstellungen dargestellt.

Man erkennt, daß die bisherigen qualitativen Betrachtungen durch diese detaillierteren Überlegungen keine Abänderung erfahren. Je näher man auf dem Flügel zum Schwerpunkt S rückt, desto kleiner wird  $r$  und damit  $v_R$  und als Folge auch  $v_{res}$ ,  $v$  und  $F_A$ . Es gilt jedoch nach wie vor, daß im Mittel im oberen Teil des überstrichenen Kreises der Auftrieb größer ist als im unteren Teil, da dort auch  $\vec{v}$  zu größeren Beträgen tendiert. (Abb. 12b) macht weiterhin deutlich, daß Bumerangpositionen, die bzgl. der vertikalen Achse durch S spiegelbildlich zueinander liegen, in der gleichen „Höhe“ des überstrichenen Kreises eine Störungskomponente  $\vec{v}$  gleicher Größe besitzen. Nach wie vor müssen daher die oben angesprochenen Turbulenzeffekte herangezogen werden, um den etwas unterschiedlichen Auftrieb im linken und rechten Teil des überstrichenen Kreises zu erklären. Das Auftriebsschema der Abb. 11 hält daher auch dieser genaueren Betrachtung stand.

#### Der Radius der Bumerangkreisbahn

Ist der Bumerang an seinen Ausgangspunkt zurückgekehrt, so hat er sich gerade einmal um seine vertikale Präzessionsachse gedreht. Die Präzessionsgeschwindigkeit  $\omega_p$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_R$  der Kreisbahnbewegung stimmen also überein:

$$\mathbf{w}_p = \mathbf{w}_R \quad (2)$$



**Abb 12:** Ermittlung der für den Auftrieb wirksamen Geschwindigkeitskomponente  $\vec{v}$  für drei Bumerangstellungen. Die symmetrisch zueinander liegenden Bumerangpositionen in Abb. b) besitzen an den (bzgl. der vertikalen Achse durch S) spiegelbildlich zueinander liegenden Flüelpunkten gleich große Geschwindigkeitskomponenten  $\vec{v}$

Auf der Sekundarstufe II läßt sich hieraus eine Aussage über den Radius R der Kreisbahn gewinnen. Allerdings muß dem Schüler dann die Beziehung

$$\mathbf{w}_p = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{q} \cdot \mathbf{w}} \quad (3)$$

bekannt sein, in der M das präzidierende Moment und  $\theta$  das Trägheitsmoment des Bumerangs bzgl. seiner Drehachse angibt. Für den Radius R folgt dann nämlich aus  $v_T = \omega_R \cdot R$ , Gl. (2) und (3) die Beziehung

$$R = \frac{v_T \cdot \mathbf{q} \cdot \mathbf{w}}{M} \quad (4)$$

Nun ist aber das präzidierende Moment M proportional zum Betrag der in Abb. 8 gezeichneten Kraft  $\vec{F}_1$  bzw.  $\vec{F}_2$ :  $M \sim F_1 \cdot F_2$  bestimmt sich aus den oben und unten am Bumerang auftretenden Auftriebskräften

$$\vec{F}_{A,O} = \vec{F} + \vec{F}_1$$

$$\text{und } \vec{F}_{A,U} = \vec{F} + \vec{F}_2$$

zu  $F_1 = \frac{1}{2}(F_{A,O} - F_{A,U})$ .

Weiterhin schätzt man nach Abb. 6 (vgl. Gl. (1))

$$F_{AO} \sim (\mathbf{w}r + v_T)^2$$

und  $F_{AU} \sim (\mathbf{w}r - v_T)^2$

ab, so daß insgesamt folgt:

$$\begin{aligned} M &\sim F_{AO} - F_{AU} \\ &\sim (\mathbf{w}r + v_T)^2 - (\mathbf{w}r - v_T)^2 \quad (5) \\ &\sim v_T \cdot \mathbf{w} \end{aligned}$$

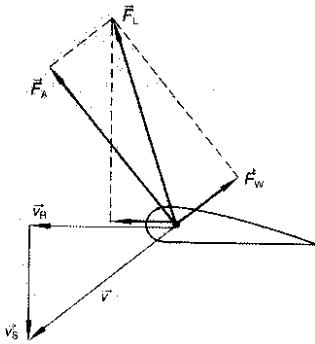
Setzt man jetzt (5) in (4) ein, so fallen  $v_T$  und  $\omega$  offensichtlich aus der rechten Seite von (4) heraus.

Der Radius des vom Bumerang durchflogenen Kreises hängt folglich nicht von der Drehfrequenz  $\omega$  des Bumerangs und seiner Bahngeschwindigkeit  $v_T$  ab. Der Bumerangwerfer kann seinem Bumerang beim Abwurf also noch so viel Translation und Rotation mitgeben, die Größe des durchflogenen Kreises ändert er damit nicht (eine genauere Analyse zeigt allerdings, daß Radius nur unabhängig vom Quotienten  $\omega/v_T$  ist [1, S. 497ff.]).

Dieses Ergebnis läßt sich natürlich sehr einfach im Experiment überprüfen. Hierzu muß sich lediglich eine gewisse Anzahl von Schülern an die Positionen begeben, die vom Bumerang überflogen werden, um auf diese Weise die Flugbahn auf der Erde zu markieren. Für den „Comeback“ haben wir auf diese Weise einen Radius von ca. 20m ermittelt. Beeinflussen kann man die Größe des durchflogenen Kreises lediglich durch eine andere Profilierung des Flügels und durch eine andere Massenverteilung im Wurfgerät (d.h. durch Veränderung des Trägheitsmoments). Letzteres läßt sich sehr einfach dadurch realisieren, daß man mit Hilfe einer Klebefilms Geldmünzen an den Flügelenden befestigt. Die Reichweite des Bumerangs wird dadurch vergrößert.

## Die Phase der Autorotation

Bei einigen Bumerangs ist bei geeigneten Würfen die kinetische Energie der Translationsbewegung zum Ende des Flugs weitgehend dissipiert. Die entstehenden Auftriebskräfte sind dann praktisch nur noch durch die Rotationsbewegung des bestimmt, was zu einer völlig symmetrischen Auftriebsverteilung führt. Die eigentliche Bumerangbewegung ist damit beendet, da dann keine Präzessionsmomente mehr vorhanden sind. Ein Bumerang, der sich flach gelegt hat, beginnt in dieser



**Abb. 13:** Zur Autorotation des Bumerangs

Phase der sog. Autorotation wie z. B. ein rotierender Ahornsamen zu Boden zu segeln.

In dieser Phase tritt neben der rotationsbedingten Geschwindigkeit  $\vec{v}_R$  eine Geschwindigkeit  $\vec{v}_S$  auf, die durch das Absinken des Bumerangs zustande kommt.

Deren Resultierende  $\vec{v} = \vec{v}_S + \vec{v}_R$  weist vom Bumerangflügel schräg nach unten (Abb. 13) und gibt Anlaß zu einer Gesamtkraft  $\vec{F}_L = \vec{F}_A + \vec{F}_w$  welche in Drehrichtung des Bumerangflügels geneigt ist. Dabei haben wir neben dem Auftrieb  $\vec{F}_A$  jetzt auch die Widerstandskraft  $\vec{F}_w$  mit berücksichtigt. Abb. 13 macht deutlich, daß  $\vec{F}_L$  damit eine Komponente in Drehrichtung besitzt, die den Flügel beschleunigt: Der Bumerang rotiert mit höherer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , was auch in der Praxis gut zu beobachten ist.

Das Anwachsen von  $\omega$  ist jedoch begrenzt. Denn mit  $\omega$  erhöht sich auch die Geschwindigkeitskomponente  $\vec{v}_R$  was wiederum bedeutet, daß der Vektor  $\vec{v}$  flacher auf den Flügel auftrifft. Dadurch neigt sich der Luftkraftvektor  $\vec{F}_L$  in Abb. 13 nach hinten, bis schließlich die Position erreicht ist, in der keine beschleunigende Komponente mehr auftaucht. Dann hat  $\omega$  seinen stationären Wert erreicht (näheres zur Autorotation in [12]).

## Ausblick

Wir haben versucht, ein einfaches Erklärungsmodell für das Flugverhalten eines Bumerangs anzugeben. Andere am Bumerang anknüpfbare Fragestellungen mußten dabei notwendigerweise offen bleiben. So haben wir z. B. den Einfluß einer Variation der verschiedenen Abwurfwinkel auf die Flugbahn nicht näher diskutiert. Daher sei hier zumindest der Hinweis angebracht, daß sich dieses Problem experimentell auch im Rahmen der Schule sehr leicht untersuchen läßt, wenn man

den Bumerang mit brennenden Wunderkerzen bestückt und Nachtaufnahmen seines Fluges herstellt [13].

Des weiteren lassen sich noch zahlreiche Fragen an die Beschaffenheit des Krummholzes anknüpfen. Welches Tragflügelprofil ist optimal? Fliegt ein genarbter Bumerang (ähnlich wie ein Golfball) weiter als ein glatt geschliffener? Würde ein gerader Stock als Bumerang funktionieren, wenn man seinen Querschnitt tragnügelartig profiliert? Die üblichen Überlegungen zum Bumerang sprechen bei der letzten Frage dagegen [4]. Wird der Stock jedoch aus sehr leichtem Holz (Balsa) gebaut, richtig dimensioniert und korrekt geworfen, so kehrt er auch zurück. Eine Erklärung hierfür kann die übliche Bumerrangtheorie allerdings nicht liefern [14].

#### Literatur:

- [1] F. Hess: Boomerangs, Aerodynamics and Motion. Dissertation, Groningen 1975
- [2] J. Walker: Bumerangs. Spektrum der Wissenschaft 5/1979, 5. 107
- [3] J. Walker: Bumerangs. Spektrum der Wissenschaft 6/1979, S. 109
- [4] F Hess. The aerodynamics of boomerangs Sci. American Nov. 1968, S. 124
- [5] A. L. King: Project Boomerang, Am. J Phys. 43(1975), S. 770
- [6] Plempe, W. und Schön, L.: Der Bumerang - Ein Spielzeug im Physikunterricht. In: Scharmann, A. et al. (Hrsg.): DPG Fachausschuss Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung 1981 Gießen. Gießen 1981, S. 147
- [7] Veit, G.: Bumerangs. Werfen, Fangen und Selberbauen. München: Hugendubel 1983
- [8] Schurink, G.: Bumerangs Selbstbau und Wurftchnik. Stuttgart 1982
- [9] Urban, W.: Geheimnisvoller Bumerang. Kleines Lehrbuch, Leutershausen 966
- [10] Urban, W.: Der Sportbumerang „Comeback“ Begleitschrift zum Bumerang „Comeback“
- [11] Schlichting, H. J. und Rodewald, B.: Ikarus' Traum und die aerodynamische Wirklichkeit. PdN-Ph 35 (1986). S. 7 (in diesem Heft)
- [12] Schlichting, H. J. und Rodewald, B.: Papierhubschrauben PdN-Ph 35 (1986). S. 30 (in diesem Heft)
- [13] Röhrs, W.: Der Bumerang - Experimentelle Untersuchungen mit einfachen Mitteln. Staatsexamensarbeit, Osnabrück 1984
- [14] Vos, H.: Straight Boomerang of balsa wood and its physics. Am. J. Phys. 53 (3985), S. 524