



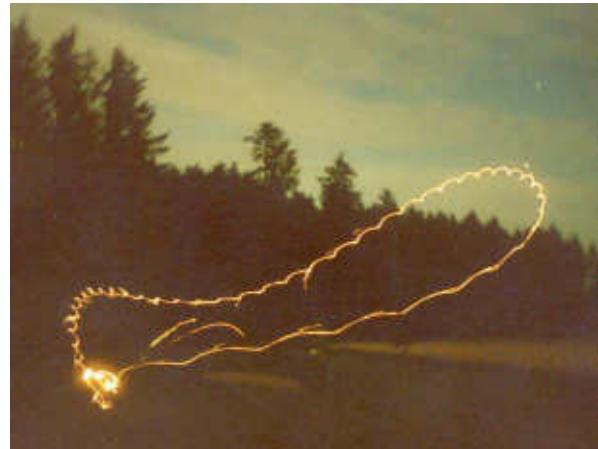
Gymnasium Ottobrunn

Kollegstufe 2001 / 2003

Leistungskurs Physik

Facharbeit

**Der Bumerang -
Physikalische Grundlagen,
Beobachtungen an einem
selbstgebauten Modell**



Verfasser: Georg Hennig

Kursleiter: OStR Franz-Josef Hiermeyer

Bewertung: Punkte

Unterschrift des Kursleiters:

Inhaltsverzeichnis

A. Historisches und praktisches Hintergrundwissen	S. 4- 9
1. Allgemeines	S. 4
2. Der ursprüngliche Bumerang	S. 5- 7
a) Herkunft und Allgemeines	S. 5
b) Nutzung	S. 5- 6
c) Entstehung und Entwicklung	S. 6- 7
d) Verbreitung in Australien	S. 7
3. Der Bumerang außerhalb Australiens	S. 7- 9
a) Antike Bumerangs	S. 7- 8
b) Heutige Verbreitung	S. 8
c) Heutige Verwendung	S. 9
d) Entwicklung des physikalischen Verständnisses	S. 9
B. Physikalische Untersuchungen	S. 10-41
1. Grundlagen	S. 10-23
a) Grobe Beschreibung der Flugbahn	S. 10
b) Auftrieb am Tragflügel	S. 10-14
a) Bernoulli-Gleichung	S. 11
b) Magnus-Effekt	S. 11-13
γ) Übertragung des Magnus-Effekts auf den Tragflügel	S. 13-14
c) Auswirkungen des Auftriebs auf den Bumerang	S. 14-15
a) Wirkung gegen die Schwerkraft	S. 14
b) Seitliches Kippen	S. 14-15
d) Präzession	S. 15-17
a) Grundsätzliche Wirkung	S. 15
b) Veranschaulichung mit Fahrrad und Bierdeckel	S. 15-16
γ) Grund für Präzession	S. 16-17
e) Auswirkungen der Präzession auf den Bumerang	S. 17
f) Kreisbahn durch Zusammenwirken von Präzession und Auftrieb	S. 18
g) Weitere Effekte	S. 19-23
a) Flachlegen am Ende des Flugs	S. 19
b) Abhängigkeit des Radius der Kreisbahn von v und ω	S. 20-21

γ) Autorotation	S. 21-22
δ) Geradeaus fliegende Bumerangs	S. 22
ε) Bumerangs für Linkshänder	S. 23
2. Quantitative Beschreibung der Flugbahn	S. 23-28
a) Bewegungsgleichungen allgemein	S. 23-24
b) Vereinfachte Differentialgleichungen von Felix Hess	S. 24-26
c) Allgemeine Lösung von Differentialgleichungen	S. 26
d) Beispiel einer Lösung	S. 26-28
3. Versuche am selbstgebauten Modell	S. 28-41
a) Bau eines Bumerangs	S. 28-30
b) Wurf des Bumerangs	S. 31
c) Bestimmung der Abwurfs- und Rotationsgeschwindigkeit	S. 32-33
d) Auswirkungen von Änderungen beim Abwurf	S. 33-37
α) Probleme bei der Untersuchung der Flugbahn	S. 33
β) Grundsätzliche Beschreibung der Flugbahn	S. 33-34
γ) Nachweis durch das Computerprogramm	S. 35-37
e) Aufnahmen realer Würfe	S. 37-41
C. Ausblicke	S. 42-43
1. Optimierung des Bumerangs	S. 42
2. Sportliche Verwendung	S. 42
3. Ästhetischer Aspekt des Bumerangflugs	S. 43
D. Anhang	S. 44
E. Literaturverzeichnis und Abbildungsnachweis	S. 45
F. Erklärung	S. 46

A. Historisches und praktisches Hintergrundwissen

1. Allgemeines



*„War einmal ein Bumerang;
War ein wenig zu lang.
Bumerang flog ein Stück,
Aber kam nicht mehr zurück.
Publikum - noch stundenlang -
Wartete auf Bumerang.“*
(Ringelnatz, 1998, S. 27)

Abbildung 1

Sehr kurz und präzise beschreibt Joachim Ringelnatz den Bumerang: Richtig geworfen, kann dieses Stück Holz wegen seiner Eigenschaft, wie magisch zum Werfer zurückzukehren, den Zuschauer immer wieder in Erstaunen versetzen. Unrichtig ist aber, dass eine geringfügige Änderung derart große Auswirkungen hat. Vielmehr lassen sich Ungenauigkeiten in der Verarbeitung durch richtige Wurfweise ausgleichen.

„Stück Holz“ ist natürlich keine genaue Beschreibung eines Bumerangs. Prinzipiell besteht ein Bumerang aus zwei oder mehr Tragflächen, die, in eine stabile Rotation versetzt, die Luft durchschneiden, und dessen Flugbahn sich dadurch deutlich von der eines „gewöhnlichen“ Stück Holzes unterscheidet.

Der Form eines Bumerangs sind kaum Grenzen gesetzt, wie die selbstgebauten Modelle in Abbildung 2 belegen.



Abbildung 2

Ein Bumerang aus nur **einem** Flügel wäre auch denkbar, doch wird es schwierig sein, ihn stabil rotieren zu lassen.

2. Der ursprüngliche Bumerang

a) Herkunft und Allgemeines

Wie allgemein bekannt sein dürfte, kommt der Bumerang aus Australien, wo er von den Aborigines gebaut wurde (vgl. Abb. 3).

Der Name „Bumerang“ ist keinem der vielen Stämme Australiens geläufig. Vielmehr stammt er wahrscheinlich von dem am Hunter-River gebräuchlichen „burramanga“ oder „boomori“ ab, was beides Wind und Wurffholz bedeutet. Eine andere Möglichkeit wäre die aus Neu-Süd-Wales stammende Wurzel „buma“ (schlagen, kämpfen, töten). (vgl. Wilpert, S. 175)

Zunächst ist aber zu sagen, dass die meisten Bumerangs der Aborigines **nicht** zurückkehrten (genannt „Kylies“). Vielmehr wurden sie hauptsächlich als Jagd- und Kriegsgerät eingesetzt, wobei eine ungerade Flugbahn sehr hinderlich gewesen wäre.

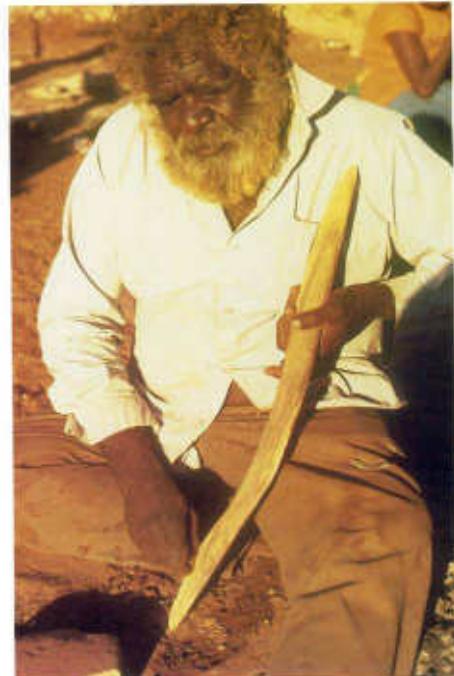
Zerbrochene Bumerangs wurden – wenn möglich – repariert:

„Die Anfertigung eines Bumerangs kostet viel Zeit und Mühe. Deshalb werden zerbrochene Wurf- und Schlaghölzer sorgfältig ausgebessert, wenn es sich noch lohnt. Die Ausbesserung ist auf zweierlei Weise möglich. Entweder klebt man die einzelnen Stücke mit Harz zusammen, das aus Stachelschweingras gewonnen wird, oder man bindet sie mit nassen Känguruuhsehnen aneinander. Die letztere Art soll die bessere sein.“ (Nevermann, 1925, S. 43; zitiert nach: Hess, 1975, S. 41)

b) Nutzung

Man findet bei den Aborigines aber auch die uns geläufigen zurückkehrenden Bumerangs („Rückkehrer“), die meist nur als Spielzeug verwendet wurden:

„It is also generally believed that the returning boomerang is a weapon and that it is used in war and for hunting. These functions, however, with few exceptions, are found associated only with ordinary boomerangs. The returning boomerang is regarded by the aborigines as a toy to be thrown for amusement. In only a few instances are there reports that it is used for other purposes, although in emergencies it may be utilized as a weapon in the same manner as any other suitable object.“ (Davidson, 1935b, S. 163; zitiert nach: Hess, 1975, S. 24)



*Old Nipper, ein Mann aus Zentralaustralien bei der Herstellung eines Bumerangs
(Foto: H. Peier)*

Abbildung 3

Der (zurückkehrende) Bumerang war – und ist – selten ein Jagd- oder Kriegsgerät: Die kaum vorhandene Einsatzmöglichkeit der Rückkehrer zu diesen Zwecken belegt dies.

„Die eigentliche Funktion war wohl die gleiche, wie sie es auch heute noch ist: Spiel und Sport. Das Bumerangwerfen ist bestes Training für die Bewegungsfähigkeit des ganzen Körpers, für das Reaktionsvermögen und für ein sicheres Auge, was alles beim Jagen mit dem Kylie wertvolle Hilfe bedeutet.“ (Veit, 1991, S. 13)

Wegen seiner relativ schwer durchschaubaren Fähigkeit, zum Werfer zurückzukommen, wurden ihm oft magische Kräfte zugeschrieben.

„In ganz besonders reich geschnitzten Ausführungen wurde er dann auch in rituellen Handlungen, wie z. B. dem weiblichen Initiationsritus, verwendet.“ (Veit, 1991, S. 14) (vgl. auch McConnel, 1935, S. 49 f.; nach Hess, 1975, S. 55)

Ebenfalls rituellen und spirituellen Charakter hatten Musikinstrumente.

„Als solche eignen sich auch Bumerangs, die durch Schlagen auf andere Gegenstände oder durch Aneinanderschlagen und –reiben Geräusche erzeugen können.“ (Veit, 1991, S. 14)

Die Verwendungen als Schlagwaffe oder als Gerät zum Graben leuchten auch unmittelbar ein.

Doch gibt es auch viele weitere Möglichkeiten, den Bumerang einzusetzen:

„Neben der Verwendung als Jagd- und Kampfwaffe nennt er [Johann E. J. Lennoch] folgende weitere Verwendungsweisen: als Sportgerät, Spielzeug, Würdezeichen, Kult- und Zeremoniegerät, Grabbeigabe, Zaubermittel, Musikinstrument, Tanzkeule, Botenstab, Tauschobjekt, Feuersäge. Ergänzen wir aus der Liste von Hanns Peter: Hebel, Hackmesser, Abschläger und Abdrücker zur Bearbeitung von Flintstein, Harke, Feuerhaken, Messer, Sense, Werkzeug zum Graben, Gerät zum Glätten, Schneidegerät, Tragstock, für Wettkämpfe im Werfen.“ (Wilpert, 1988, S. 172)

c) Entstehung und Entwicklung

Da die Ureinwohner Australiens keine tiefgehenden physikalischen Kenntnisse besaßen, stellt sich die Frage, wie sie überhaupt darauf kamen, ein gekrümmtes Holz so zu formen, dass es zum Bumerang wurde.

Dies kann man leider nicht eindeutig beantworten.

Es spielt aber wohl die natürliche Weiterentwicklung einer zufälligen Entdeckung eine Rolle, welche sich über tausende Jahre hinweg erstreckt haben kann:

„Instinct prompts him to eat, little better than instinct would enable him to select from amongst his weapons such as are found most suitable for obtaining food, and we have already seen how he may have been led to the adoption of such an instrument as the boomerang, purely through the laws of accidental

variation, guided by the natural grain of the material in which he worked.””
 (Lane Fox, 1868, S. 425; zitiert nach: Hess, 1975, S. 86)

Die Vorteile eines Bumerangs im Vergleich zu einem normalen Wurfgegenstand liegen auf der Hand:

„Die Kylies sind ca. einen Meter lang, zwei und mehr Zentimeter dick und aus massivem Hartholz. Sie werden, anders als Bumerangs, waagerecht abgeworfen und sausen dann nur knapp über dem Boden in einer geraden Linie auf ihr Ziel zu. Man kann sich vorstellen, mit welcher Wucht das strömungsgünstig geformte, schwere Holz, das bis zu 200 m weit fliegen soll, auftrifft, zumal es durch die Drehung mit dem Flügelende einen regelrechten Schlag gegen das Zielobjekt ausführt.“ (Veit, 1991, S. 11 f.)

d) Verbreitung in Australien

Verbreitet war der Bumerang in nahezu ganz Australien:



Abbildung 4

3. Der Bumerang außerhalb Australiens

a) Antike Bumerangs

In den meisten anderen Ländern der Erde ging die Entwicklung in eine andere Richtung: Statt der ebenfalls bekannten Wurfhölzer verwendete man später Speere und Pfeil und Bogen. Die geographische Abgelegenheit Australiens ließ eine eigene Entwicklung zu.

Doch auch in anderen Ländern sind „Bumerangs“ nachweisbar. In Tasmanien, auf Neuseeland, Vanuatu, den Celébes, im Nahen Osten und in Afrika wurden bumerang-ähnliche Gegenstände gefunden, die aber oft nicht gesichert belegt werden können und nur unzureichend die Eigenschaften eines Bumerangs aufweisen.

In Amerika, Indien und vor allem im alten Ägypten sind die Belege eindeutiger: Die Hopi oder Moqui Pueblo-Indianer besaßen Wurfhölzer in Bumerangform, die ihnen, verglichen mit normalen Wurfhölzern, eine größere Flugweite verlieh. (vgl. Hess, 1975, S. 59 ff.)

„From the available literature it appears that ancient Egyptian boomerangs can have various cross sections, often not unlike those of Australian boomerangs. Therefore it seems possible that some of them are of the returning kind, and purposely made to be such, whereas some others may be non-returning or even straight-flying boomerangs.“ (Hess, 1975, S. 73)

So wurde zum Beispiel um 1870 ein Nachbau angefertigt:

„I have practised with the boomerangs of different nations. I made a *facsimile* of the Egyptian boomerang in the British Museum, and practised with it for some time upon Wormwood Scrubs, and I found that in time I could increase the range from fifty to one hundred paces, which is much farther than I could throw an ordinary stick of the same size with accuracy. I also succeeded in at last obtaining a slight return of flight; in fact it flies better than many Australian boomerangs, for they vary considerably in size, weight and form, and many will not return when thrown.“ (Lane Fox, 1872, S. 324; zitiert nach: Hess, 1975, S. 70)

Diese weite Verbreitung legt nahe:

„It seems likely that sticks have been thrown almost all over the world, at any time. Implements specially adapted for being thrown (throw-sticks, throwing clubs etc.) also are, or have been, extensively used in various regions. But as regards boomerangs the evidence is scanty, except, of course, for Australia.“ (Hess, 1975, S. 81)

b) Heutige Verbreitung

Aber auch heute ist der Bumerang weit verbreitet: In fast jedem Erdteil kann man kommerziell gefertigte Bumerangs, längst nicht mehr nur aus Holz, kaufen.

Die Verbreitung der modernen Bumerangs setzte im 19. Jahrhundert ein:

„Als um 1830 die ersten Nachrichten über Bumerangs Europa erreichten, verursachten sie beträchtliches Aufsehen. So schreibt ein Journalist im „Dublin University Magazine“ im Februar 1838:

„Unter all den vorteilhaften Dingen, die wir von unseren australischen Siedlungen empfangen haben, scheinen keine mehr totale Befriedigung zu geben als die Einführung einiger Stücke gekrümmter Hölzer, geformt wie eine Mondsichel und Bumerangs genannt. Noch bevor ihre Wirkungsweise ganz verstanden worden ist, haben die Tischler mit allen anderen Arbeiten aufgehört; die Schaufenster der Spielzeugläden zeigen kaum etwas anderes; Spazierstöcke und Regenschirme sind aus der Mode gekommen; und sogar in dieser regenreichen Jahreszeit trägt niemand etwas anderes als einen Bumerang; es ist auch nicht zu erkennen, daß diese Krankheit zurückzugehen scheint.“ (Wilpert, 1988, S. 175)

c) Heutige Verwendung

Tatsächlich hält jedes bessere Spielwarengeschäft ein Sortiment Bumerangs bereit.



Abbildung 5

Meistens ist von solchen Bumerangs aber abzuraten, da sie wegen ungenauer Fertigung schlecht fliegen. Besser sind die selbstgebauten Modelle, für deren Herstellung man bei den meisten Holzhändlern entsprechendes „Bumerang-Sperrholz“ kaufen kann.

Doch lässt sich der Bumerang nicht nur als Spielzeug, sondern auch als modernes Sportgerät betrachten. Anerkannte „Boomerangclubs“ gibt es in vielen Ländern. Doch beschränkt sich die Zahl der Bumerangwerfer nicht auf deren Mitglieder. Das weitreichende Interesse am Bumerang kann durch den – 1982 eingestellten – jährlichen Bumerang-Wettbewerb des Smithsonian Instituts auf der Mall in Washington D.C. belegt werden (s. Abb. 5).

d) Entwicklung des physikalischen Verständnisses

Dieses große Interesse erstreckte sich natürlich auch auf die Physiker. Schon 1838 war im Dublin University Magazine eine prinzipiell richtige Erklärung der Rückkehr des Bumerangs zu lesen. Problematisch war nur die Erklärung der aerodynamischen Kräfte auf die Flügel, „[...] but a better understanding of aerodynamics was perhaps impossible at that early time.“ (Hess, 1975, S. 115)

Viele Wissenschaftler veröffentlichten später Schriften über den Bumerangflug, die aber häufig unvollständig oder gar falsch waren.

Eine genaue Untersuchung ließ allerdings auf sich warten, und erst Felix Hess veröffentlichte 1975 die sehr ausführliche wissenschaftliche Untersuchung des Bumerangs „Boomerangs, Aerodynamics and Motion“. Die Berechnung der aerodynamischen Kräfte wäre aber wohl heute mit Hilfe besserer Computer und Programme genauer möglich.

B. Physikalische Untersuchungen

1. Grundlagen

Im Folgenden soll nun eine kurze Erklärung gegeben werden, warum der Bumerang zurückkommt, wie sich die Flugbahn rechnerisch darstellen lässt und wie man einfache Versuche mit dem selbstgebauten Bumerang durchführen kann.

Dabei werden, wenn nicht anders angegeben, einfache zweiflügelige Bumerangs für Rechtshänder betrachtet.

a) Grobe Beschreibung der Flugbahn

Ferner soll als Ausgangsbasis für alle Betrachtungen grundsätzlich der (Rückkehr-) Flug eines Bumerangs betrachtet werden:

Senkrecht, oder leicht vom Körper weg geneigt, wird der Bumerang, an einem Ende gehalten, schnell rotierend mit hoher Geschwindigkeit parallel zum Boden oder leicht nach oben abgeworfen. Zunächst scheint er geradeaus zu fliegen, dreht dann aber nach links ein und beschreibt eine kreisähnliche Bahn, die beim Werfer zu Ende geht, wo der Bumerang meist flach in der Luft liegt und langsam zu Boden sinkt. Oft kann er dann gefangen werden.

Man stellt schnell fest, dass ein zu langsam rotierender, sowie ein zu schwach geworfer Bumerang nicht zurückkehrt.

Grundsätzlich liegen beim Bumerang zwei Effekte vor:

„Ein Bumerang ist sowohl ein Segelflieger als auch ein Kreisel.“ (Bürger, 2001, S. 97)
Also müssen sowohl das Prinzip des Auftriebs an einer Tragfläche, als auch auftretende Kreiseleffekte betrachtet werden.

b) Auftrieb am Tragflügel

Bei der Betrachtung eines Bumerangs fällt sofort die Bearbeitung der Arme auf: Sie sind tragflächenartig geformt:



Da der Bumerang rotiert, müssen die Arme so geformt sein, dass – relativ zur Luft – der breitere Teil der Tragfläche vorne liegt.

Daraus ergibt sich die in Abbildung 6 angedeutete Anordnung der Flügelform.

Also tritt an den Armen des Bumerangs der gleiche Effekt auf, der jedes Flugzeug in der Luft hält, nämlich der Tragflächenauftrieb.

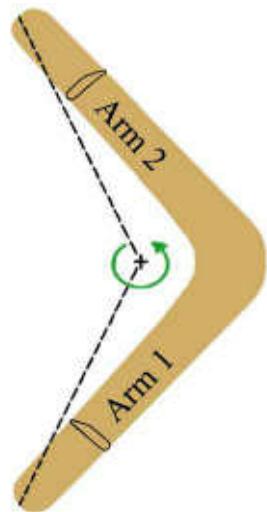


Abbildung 6

Um das zu erklären, muss ein wenig ausgeholt werden.

Zunächst betrachtet man einen ruhenden Körper, der fallengelassen wird. Da seine Gesamtenergie konstant ist (= Energieerhaltungssatz), wird ein Teil seiner ursprünglichen potentiellen Energie in kinetische Energie umgewandelt:

$$E_{pot}' + E_{kin}' = E_{pot} \quad \text{also:} \quad F_G \cdot h' + \frac{m}{2} \cdot v'^2 = F_G \cdot h_0$$

Genauso lässt sich einem laminar (= reibungslos und wirbelfrei) strömenden Gas potentielle und kinetische Energie zuordnen. Die potentielle Energie pro Raumeinheit ist beim Gas leicht als statischer Druck p zu erkennen [$\frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2}$]. Die kinetische Energie wird durch den Staudruck $q = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$ (mit ρ = Dichte und v = Strömungsgeschwindigkeit des Gases) angegeben. Dabei ist p_{ges} das gesamte Arbeitsvermögen je Kubikmeter Gas.

$$\frac{\rho}{2} \cdot v^2 + p = p_{ges} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (\text{Bernoulli-Gleichung})$$

Also: *Staudruck + statischer Druck = Gesamtdruck*.

(vgl. Dubs, 1954, S. 36f.)

β) Magnus-Effekt

Um nun auf den Auftrieb am (Flugzeug-) Flügel zu schließen, bietet sich ein Umweg über den **Magnuseffekt** an: Dieser beschreibt die Kraft auf einen rotierenden Zylinder, die senkrecht zur anströmenden Luft wirkt (s. Abb. 7).



Abbildung 7

„Vom Standpunkt des Impulssatzes kann die Entstehung des erwähnten Auftriebes A nur damit erklärt werden, daß der rotierende Zylinder die Luft nach unten ablenkt. Um der Lösung dieses Problemes näher auf den Leib zu rücken, muß in erster Linie der Stromlinienverlauf um den rotierenden Zylinder bestimmt werden.“ (nach Ackeret, 1925; zitiert nach: Dubs, 1954, S. 92)

Der idealisierte Stromlinienverlauf um den ruhenden Zylinders sieht folgendermaßen aus:

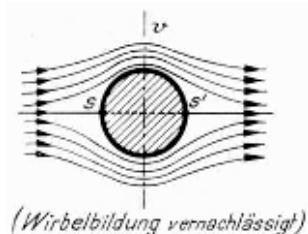


Abbildung 8

Wegen der Luftreibung an der Zylinderwand erzeugt der rotierende Zylinder eine Zirkulationsströmung (s. Abb. 9).

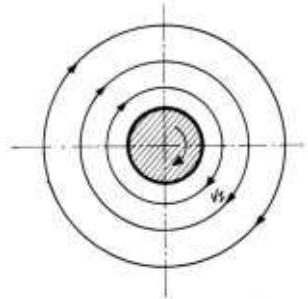
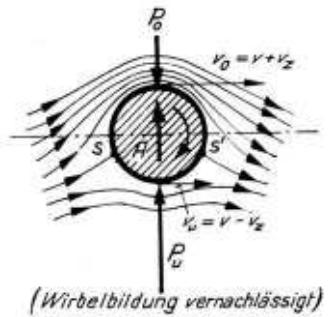


Abbildung 9

Überlagert man nun beide Strömungen, erhält man nebenstehendes Strömungsbild:



Idealisiertes Strömungsbild beim Magnus-Effekt.

Abbildung 10

Dabei ist die Strömungsgeschwindigkeit oben ($v_o = v + v_z$) größer als unten

($v_u = v - v_z$):

$$v_o > v_u .$$

Also wirkt auf die Oberseite ein kleinerer Druck als auf die Unterseite (entsprechend

der Gleichung von **Bernoulli**: $p = p_{ges} - \frac{\rho}{2} \cdot v^2$)

Also: $P_o < P_u$.

Der resultierende Auftrieb A am Zylinder hat daher nachstehende Größe:

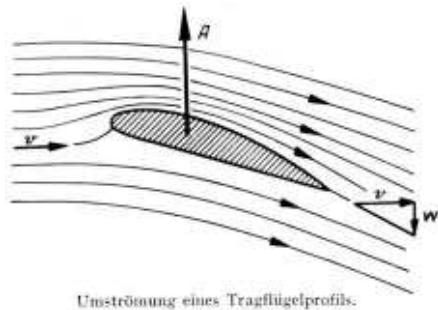
$$A = P_u - P_o.$$

(vgl. Dubs, 1954, S. 92f.)

γ) Übertragung des Magnus-Effekts auf den Tragflügel

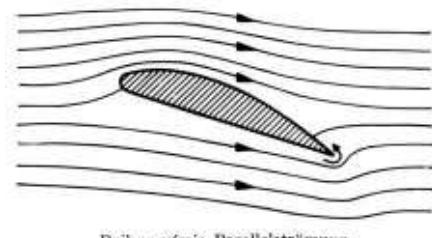
Ebenso wie bei einem rotierenden Zylinder lässt sich bei der Tragfläche über den Impulssatz auf eine Ablenkung der Luft schließen.

„Es war der geniale Strömungsforscher **Ludwig Prandtl**, der Begründer der modernen Strömungslehre, welcher 1914 für die Entstehung des Auftriebs eine bis heute unwiderlegte anschauliche Erklärung fand. Seiner Ansicht nach kommt die um eine Tragfläche sich ausbildende Strömung [s. Abb. 11] durch Überlagerung einer Parallelströmung [s. Abb. 12] mit einer Zirkulationsströmung [s. Abb. 13] zustande. Diese Erklärung deckt sich im Prinzip mit derjenigen des Magnus-Effektes. Die [...] [in Abb. 12] wiedergegebene Parallelströmung um ein Flügelprofil, welche auf die Dauer nur in einer reibungsfreien Strömung aufrechterhalten werden kann, liefert keinen Auftrieb. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Hinterkante des Profils umströmt wird. Diese Umströmung der scharfen Hinterkante findet in mit Reibung behafteten Strömungsmedien, wie Luft, Wasser usw., nur im ersten Moment statt. In der Folge stellt sich sehr rasch die Ablösung der Strömung an der Hinterkante ein, bei gleichzeitiger Bildung eines Wirbels, des sogenannten *Anfahrwirbels*, der mit der Strömung davonschwimmt. Ein Wirbel besteht jedoch nie allein, sondern ist immer von einem zweiten, entgegengesetzt drehenden begleitet[, weil der Drehimpuls im Gesamtsystem erhalten bleibt, und weil er vorher Null war, muss er während der Bewegung auch Null sein]. Dieser zweite Wirbel ist die Zirkulationsströmung um den Flügel [s. Abb. 13]. Im Gegensatz zum Anfahrwirbel bleibt die Zirkulationsströmung am Flügel bestehen, wenigstens so lange die Strömung am Flügel anliegt.“ (Dubs, 1954, S. 99f.)



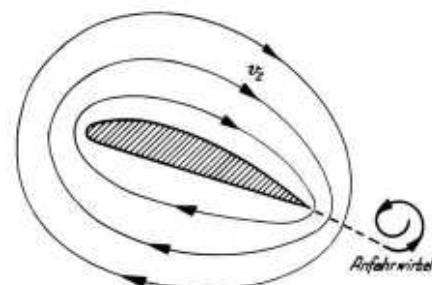
Umströmung eines Tragflügelprofils.

Abbildung 11



Reibungsfreie Parallelströmung.

Abbildung 12



Zirkulationsströmung mit Anfahrwirbel.

Abbildung 13

Genau wie beim Magnuseffekt bildet sich deshalb an der Oberseite des Tragflügels ein geringerer Druck als an der Unterseite. Der Flügel wird also nach oben „gesaugt“.

„Ebenso vergrößert sich der Auftrieb [hier: Normalkraft], wenn der Flügel etwas „angestellt“ ist. Das darf jedoch nicht übertrieben werden, da gleichzeitig der Luftwiderstand größer wird.“

Zu beachten ist ferner: Der Wind muß zur Entwicklung des Auftriebs am Flügel entlangstreichen. Wie schon [...] erwähnt, wird das gefährdet, wenn die Stirnkante zu scharf ist. Als Folge davon löst sich der Windstrom nämlich vom Flügel ab.

Das gleiche passiert beim zu steil angestellten Flügel.“ (Veit, 1991, S. 59)

c) Auswirkungen des Auftriebs auf den Bumerang

a) Wirkung gegen die Schwerkraft

Die so erzeugte Normalkraft des Bumerangs genügt für die Erklärung des deutlich weiteren Fluges im Vergleich zu einem normalen Stück Holz: Durch Schräglage des Bumerangs wirkt eine Komponente dieser Normalkraft als Auftrieb entgegen der Schwerkraft (s. Abb. 14).

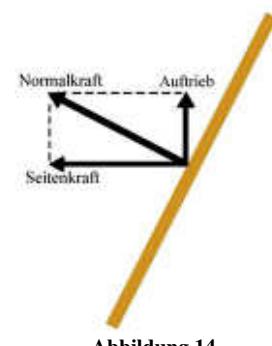


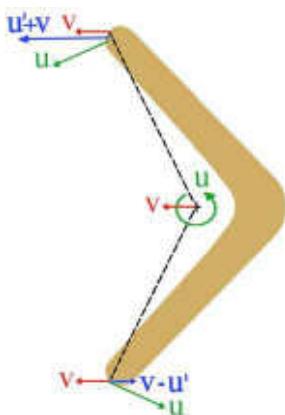
Abbildung 14

b) Seitliches Kippen

Doch bleibt die Wirkung der Normalkraft der Arme des Bumerangs nicht auf eine Kraft gegen die Schwerkraft beschränkt.

Vielmehr wirkt damit auch eine waagrechte Kraft, die Seitenkraft.

Diese hängt von der Geschwindigkeit der Tragflächen relativ zur Luft ab.



So addiert sich die zum Erdboden parallele Komponente u' der Rotationsgeschwindigkeit u oben wegen der Bewegung nach links zur Schwerpunktsgeschwindigkeit v . Also bewegt sich der Bumerangflügel dort mit $u' + v$. Unten wirkt die Rotationsgeschwindigkeit der Schwerpunktsgeschwindigkeit entgegen, weshalb sich der Arm des Bumerangs dort nur mit $v - u'$ fortbewegt (vgl. Abb. 15).

Abbildung 15

Die nebenstehende Kräfteverteilung (Abb. 16) zeigt, dass der Bumerang – von hinten gesehen – während seines Fluges aufgrund der Rotation oben einen stärkeren Auftrieb erfährt als unten, weshalb er nach links zu kippen droht.

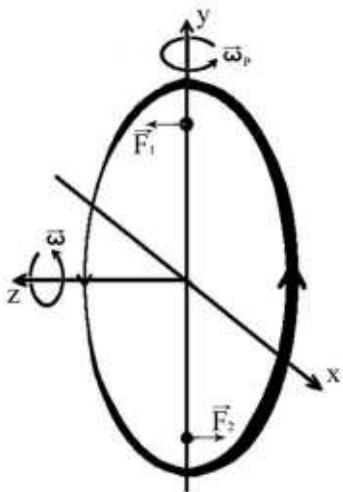


Abbildung 16

d) Präzession

a) Grundsätzliche Wirkung

Grundsätzlich ist für den Kurvenflug die **Präzession** verantwortlich. Diese Bewegung entsteht, wenn auf einen rotierenden Körper („freier Kreisel“) seitlich (mit einer Komponente senkrecht zu $\vec{\omega}$) ein Drehmoment wirkt.



In Abbildung 17 sind die Kräfte \vec{F}_1 und \vec{F}_2 die Ursache für ein Drehmoment um die x-Achse (*Drehmoment = Kraft mal Hebelarm*). Daher „will“ die mit $\vec{\omega}$ um die z-Achse rotierende Scheibe um die x-Achse nach links kippen. Aus der Wechselwirkung dieser beiden Drehmomente folgt ein drittes, das wegen der Präzession die Scheibe zu einer Linksdrehung $\vec{\omega}_p$ um die y-Achse zwingt (Präzession).

Abbildung 17

b) Veranschaulichung mit Fahrrad und Bierdeckel

Diese Scheibe könnte man sich als das Vorderrad eines Fahrrads vorstellen, das frei-händig gefahren wird: Wird das schnell rotierende Rad nach links geneigt, dreht sich wegen der Präzession das zu kippen drohende Vorderrad nach links; das Fahrrad beschreibt eine Linkskurve. So kann man wegen der nun entstehenden Fliehkraft (parallel zum Kurvenradius) das Fahrrad vor dem Umkippen bewahren.

Der Effekt der Präzession ist ebenso auf einen mit der rechten Hand geworfenen Bierdeckel übertragbar:

„Das von der anströmenden Luft auf die Kreiselscheibe ausgeübte Drehmoment ruft eine große Präzession der Kreiselachse hervor, und durch sie wird der Anstellwinkel vergrößert und verdreht.“ (Pohl, 1964, S. 77)



Abbildung 18



Abbildung 19

Der Auftrieb sorgt also mit dem Drehmoment um die z-Achse und dem um die x-Achse für ein Drehmoment um die y-Achse, da sich der Bierdeckel entgegen der y-Achse bewegt, so dass der Bierdeckel zunächst leicht nach oben, dann stark nach links unten fliegt (vgl. Abb. 19).

y) Grund für Präzession

Nun soll geklärt werden, warum das Drehmoment aus der Präzession in einer auf den ersten Blick unerwarteten Weise wirkt.

Diese Präzession lässt sich nach Abb. 20 und 21 in einfacher Weise verstehen. Greift nämlich ein Kippmoment wie in Abb. 17 am Kreisel an, so erhält jeder Punkt des Kreisels eine zusätzliche Geschwindigkeit \vec{v}_k senkrecht zur Rotationsebene. Diese Geschwindigkeit ist in Abb. 20

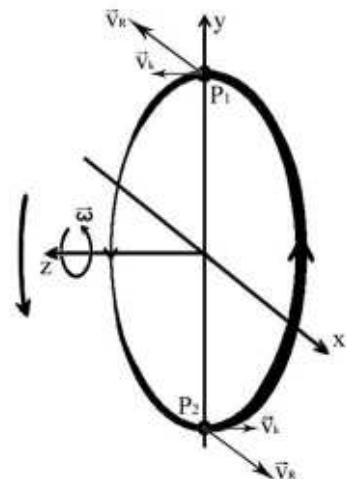


Abbildung 20

und 21 für zwei Punkte P_1 und P_2 eingezeichnet.

\vec{v}_k überlagert sich mit der Rotationsgeschwindigkeit \vec{v}_R in diesen Punkten zu einer neuen Geschwindigkeit \vec{v} (s. Abb. 21). Die Bewegungsrichtung der Punkte P_1 und P_2 wird damit geändert, was einer Drehung der Rotationsebene des Kreisels entspricht (s. Abb. 21). Diese Drehung erfolgt in der Tat um die y-Achse mit der oben angegebenen Richtung der Präzession. (vgl. Schlichting, 1986, S. 3)

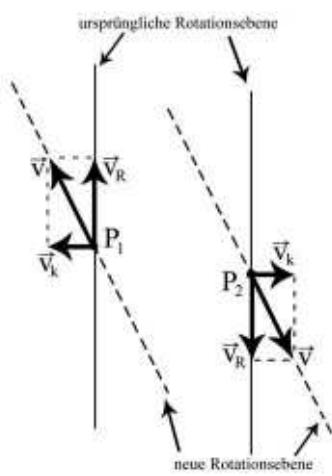


Abbildung 21

Eine andere Erklärung ist über den **Drehimpuls** möglich. Dieser ist – ähnlich dem normalen Impuls (*Impuls = Masse mal Geschwindigkeit*) – als $\vec{L} = J \cdot \vec{\omega}$ (*Drehimpuls = Trägheitsmoment mal Winkelgeschwindigkeit*) definiert (Hammer, 2000, S. 20).

J ist das **Trägheitsmoment**. Beispielsweise besitzt eine punktförmige Masse m im Abstand r von der Drehachse das Trägheitsmoment $J = m \cdot r^2$. Für den Bumerang ist die Berechnung des Trägheitsmoments deutlich komplizierter. Einfacher wäre eine experimentelle Bestimmung.

In unserem Fall ist also der Drehimpuls um die z-Achse $\vec{L}_z = J_z \cdot \vec{\omega}$. Hinzu kommt nun der Drehimpuls um die x-Achse $\vec{L}_x = J_x \cdot \vec{\omega}_x$. Der resultierende Drehimpuls \vec{L}_y ist das vektorielle Produkt der anderen Drehimpulse: $\vec{L}_y = \vec{L}_x \times \vec{L}_z$.

Dieses so genannte Kreuzprodukt (Vektorprodukt) führt dazu, dass die resultierende Drehachse auf der Ebene, die die beiden anderen aufspannen, senkrecht steht (y-Achse):

„Unter dem Vektorprodukt der Vektoren a und b [...] versteht man einen Vektor c von der Länge $a \cdot b \cdot \sin \varphi$ [...], der auf den Vektoren a und b senkrecht steht [...]“ (Bronstein, 1969, S. 449)

Nach der Drehregel der rechten Hand zeigen die Finger außer dem Daumen die Drehrichtung, der Daumen selbst die Achsenrichtung der bekannten Drehimpulse an (x- und z-Achse).

Für die Bestimmung der Richtung der resultierenden Drehachse lässt sich die Dreifingerregel der rechten Hand anwenden: Die z-Achse als ursprüngliche Drehachse wird durch den Daumen angedeutet, die x-Achse durch den Zeigefinger. Die resultierende Drehachse (y-Achse) ist dann durch den Mittelfinger bestimmt; sie zeigt nach oben. Über die Drehregel der rechten Hand (mit dem Daumen in Achsenrichtung) zeigen die Finger die Drehrichtung an.

e) Auswirkungen der Präzession auf den Bumerang

Der Effekt der Präzession lässt sich leicht auf den Bumerang übertragen:

Wegen der oben beschriebenen Auftriebskräfte droht der Bumerang nach links zu kippen (vgl. Abb. 16). Wegen seiner schnellen Rotation tritt Präzession auf: Der Bumerang dreht nach links ein (vgl. auch das rotierende Vorderrad eines Fahrrads in d)β)).

f) Kreisbahn durch Zusammenwirken von Präzession und Auftrieb

Doch würde die Drehung des Bumerangs nicht ausreichen, ihn in eine Kreisbahn zu zwingen: Er könnte ja durchaus weiter geradeaus fliegen, und dabei seine Rotationsebene drehen.

Hier kommt nun die Kraft F (s. Abb. 22) ins Spiel, die im Schwerpunkt des Bumerangs angreift, und alle parallel zum Boden wirkenden Kräfte repräsentiert (vgl. Abb. 14).

Als eine auftriebsbedingte Kraft weist F stets senkrecht zur momentanen Geschwindigkeit v des Bumerangschwerpunktes und stellt damit eine Zentripetalkraft dar. F bewirkt eine Krümmung der Flugbahn nach links und damit eine Drehung des Geschwindigkeitsvektors \vec{v} entgegen dem Uhrzeigersinn. Das oben genannte Drehmoment passt die Rotationsebene des Bumerangs dieser sich ändernden Geschwindigkeitsrichtung an. Es lässt die Rotationsebene so entgegen dem Uhrzeigersinn (in Abb. 22) präzidieren, dass der Winkel ψ zwischen dem Vektor \vec{v} und der Rotationsebene stets konstant bleibt. Dieses garantiert einen stets gleich großen Auftrieb und damit die Konstanz des Betrages F der Zentripetalkraft, so dass der Bumerang eine geschlossene Kreisbahn beschreiben muss.

(vgl. Schlichting, 1986, S. 5)

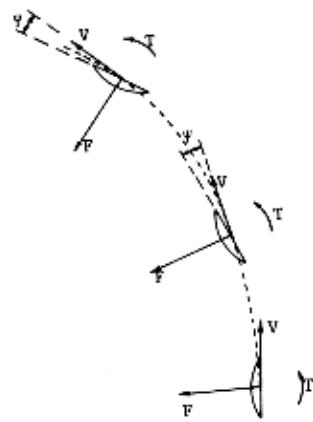


Abbildung 22

Zusammenfassend kann man nun sagen, dass Auftriebskräfte, die oben stärker sind als unten, den Bumerang in eine Kippbewegung nach links zu bringen versuchen. Wegen der Präzession „weicht er diesem Kippen aus“ indem er von hinten gesehen nach links eindreht. Der im Schwerpunkt wirkende Auftrieb „zieht“ den Bumerang in die Kreisbahn.

„Der Bumerang ist ein Gegenstand, der, von Hand geworfen, sich sowohl vom Werfer weg bewegt als auch um seinen Schwerpunkt rotiert, so daß die aerodynamische Kraft des Auftriebs in Verbindung mit der von ihr induzierten Präzession einen Kreisflug verursacht, der das Gerät zum Werfer zurückführt.“
(Wilpert, 1988, S. 168)

g) Weitere Effekte

a) Flachlegen am Ende des Fluges

Nun ist grundsätzlich geklärt, warum der Bumerang zurückkehrt. Allerdings bleibt immer noch unbeantwortet, warum er sich im Laufe des Flugs immer flacher legt, so dass er im Idealfall über dem Werfer waagrecht kreisend langsam zu Boden sinkt.

Grund hierfür ist Präzession in eine andere Richtung: Da die Rotation des Bumerangs die selbe ist, aber die resultierende Kraft eine Drehung im Uhrzeigersinn um die x-Achse (vgl. Abb. 17) zur Folge hat, muss die dafür ursächliche Kraft so wirken, dass sie den Bumerang zu einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn (von oben gesehen) um die y-Achse (vgl. Abb. 17) zwingen will.

Auf den Bumerang übertragen heißt das, dass vorne eine größere Auftriebskraft herrschen muss als hinten, wodurch ein „kippendes“, d.h. drehendes Moment entsteht, analog zu Abbildung 16.

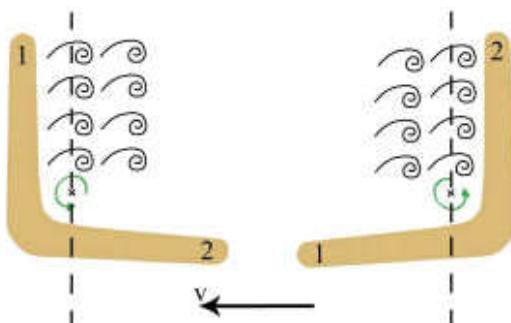


Abbildung 23

Dies kann man folgendermaßen erklären:
Arm 1 erreicht den maximalen Auftrieb, wenn er die Luft senkrecht und gleichzeitig in Richtung der Bewegung des Schwerpunkts durchschneidet (s. Abb. 23 links).
Das gleiche gilt für Arm 2.

Also würden sich die Auftriebe von Arm 1 und 2, die auf unterschiedlichen Seiten der senkrechten Drehachse (vgl. y-Achse Abb. 17) liegen, sich so ausgleichen, dass keine Drehung um diese Achse zustande kommt.

Aber:

„Arm 2 produziert aber wegen der Wirbel, die Arm 1 hinterläßt, weniger Auftrieb, so daß sich die Stelle des maximalen Auftriebs geringfügig verschiebt.“
(Veit, 1991, S. 63)

Also erzeugt Arm 1 mehr Auftrieb als Arm 2. Daher wirkt in Abbildung 23 links der Senkrechten eine größere Kraft auf den Beobachter hin als rechts. Also kommt es eben doch zu einer Drehbewegung um die Senkrechte.

Deshalb tritt durch Einwirkung der Präzession um die x-Achse (vgl. Abb. 17) der oben beschriebene Effekt des „Flachlegens“ auf.

ß) Abhängigkeit des Radius der Kreisbahn von v und ω

Interessant könnte es auch sein, den Radius des Bumerangflugs abzuschätzen. Denn aus Beobachtungen geht hervor, dass er nicht von der Abwurfgeschwindigkeit oder der Rotation abhängt, sondern nur vom Bumerang.

Für eine Abschätzung sind folgende Voraussetzungen nötig:

$$F = c_A \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Dabei ist F der Auftrieb, c_A (Auftriebsbeiwert), A (Fläche der Tragfläche) und ρ (Dichte der Luft) sind konstant. (vgl. Hammer, 2000, S. 30)

Also gilt: $F = k \cdot v^2$ (1)

mit k konstant.

Ferner gilt: $\omega_p = \omega_r$ (2),

wobei ω_p die Präzessionsgeschwindigkeit und ω_r die Winkelgeschwindigkeit der Kreisbahn ist. Diese sind gleich, weil sich die Rotationsebene des Bumerangs bei einem Umlauf ja auch genau einmal dreht.

Außerdem: $\omega_p = \frac{M}{\theta \cdot \omega}$ (3) (vgl. Jaworski, 1972, S. 89),

mit dem präziderenden Moment M , dem Trägheitsmoment θ des Bumerangs bzgl. seiner Drehachse und der Drehgeschwindigkeit ω des Bumerangs.

Aus $v = \omega_r \cdot R$ (mit v als Geschwindigkeit des Schwerpunkts) folgt, wenn man (2) einsetzt:

$$v = \omega_p \cdot R,$$

mit (3) eingesetzt: $v = \frac{M}{\theta \cdot \omega} \cdot R$

Also: $R = \frac{v \cdot \theta \cdot \omega}{M}$ (4)

Aus (1) folgt: $F \sim v^2$ (5)

Da die Kraft, die den Bumerang zu kippen versucht, die Differenz aus der oben wirkenden und der unten wirkenden Auftriebskraft ist (vgl. Abb. 16), gilt:

$$F_R = F_o - F_u$$

Aus (5) folgt: $F_o \sim v_{ges}^2$

v_{ges} setzt sich aber zusammen aus v und ω (vgl. Abb. 15).

Also folgt: $F_o \sim (\omega r + v)^2$

Analog gilt: $F_u \sim (\omega r - v)^2$

Da das präzessierende Moment zu F_R proportional ist, gilt:

$$M \sim F_R$$

Weil aber

$$F_R \sim F_o - F_u \sim (\omega r + v)^2 - (\omega r - v)^2$$

und

$$(\omega r + v)^2 - (\omega r - v)^2 \sim v \cdot \omega$$

gilt:

$$M \sim v \cdot \omega$$

Eingesetzt in (4) sieht man sofort, dass sich v und ω weggürzen, der Radius also nicht von seiner Drehfrequenz ω oder seiner Bahngeschwindigkeit v abhängt.

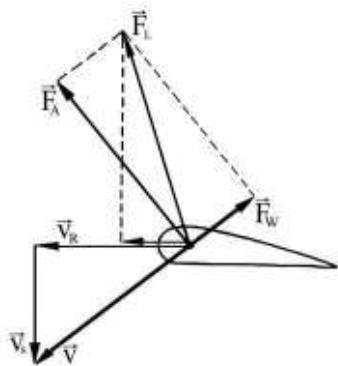
Der Werfer kann also noch so schnell werfen, der Radius der Flugbahn wird sich nicht ändern. (vgl. Schlichting, 1986, S. 6f.)

„[...] eine genauere Analyse zeigt allerdings, daß [der] Radius nur unabhängig vom Quotienten $\frac{\omega}{v}$ ist.“ (Schlichting, 1986, S. 7)

Trotzdem erscheint es für den Werfer, als wäre der Radius von beiden Einzelgrößen unabhängig, weil durch schnelleres Werfen beinahe automatisch auch eine höhere Rotation hervorgerufen wird.

γ) Autorotation

Bei der Rotation lässt sich auch folgende Beobachtung machen: Am Ende des Flugs, wenn der Bumerang sich aus den oben genannten Gründen flachgelegt hat, scheint seine Rotation zuzunehmen – und wird damit deutlich schneller als beim Abwurf. Da die Vorwärtsbewegung des Bumerangs zu diesem Zeitpunkt weitgehend verschwunden ist, findet auch keine Präzession, welche die gekrümmte Flugbahn zur Folge hat, mehr statt. Als Folge bleibt der Bumerang in derselben waagrechten Rotationsebene und sinkt langsam zu Boden, wobei sich seine Rotationsgeschwindigkeit erhöht.



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 Geschwindigkeit $\vec{v} = \vec{v}_s + \vec{v}_R$ weist vom Bumerangflügel schräg nach unten (Abb. 24) und

Abbildung 24

gibt Anlass zu einer Gesamtluftkraft $\vec{F}_L = \vec{F}_A + \vec{F}_w$, 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. 24 macht deutlich, dass \vec{F}_L damit eine Komponente in Drehrichtung besitzt, die den Flügel beschleunigt: Der Bumerang rotiert mit höherer Winkelgeschwindigkeit ω , was auch in der Praxis gut zu beobachten ist. Das Anwachsen von ω ist jedoch begrenzt. Denn mit ω 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 Abbildung 24 nach hinten, bis schließlich die Position erreicht ist, in der keine beschleunigende Komponente mehr auftaucht. Dann hat ω seinen stationären Wert erreicht. (vgl. Schlichting, 1986, S. 7)

In dieser Phase kann man den Bumerang mit einem Hubschrauberrotor vergleichen, der ja auch aus mehreren um eine Achse rotierenden Tragflächen zusammengesetzt ist.

δ) Geradeaus fliegende Bumerangs

Jetzt soll noch ein kurzer Blick auf geradeaus fliegende Bumerangs geworfen werden, die Kylies: Das komplizierte Zusammenspiel von Auftrieb, Schwerkraft, Präzession und Fliehkraft lassen zunächst den Bau eines genau geradeaus fliegenden Bumerangs nahezu unmöglich erscheinen. Tatsächlich stellt man fest:

„It is important to recognise that the lift and moment distributions required by straight-flying boomerangs [...] are appreciable more complex than those required for a return boomerang. Because of this return boomerangs are easier to construct than straight-flying ones.”” (Musgrove, 1974, S. 189; zitiert nach: Hess, 1975, S. 112)

Wie schon erwähnt, werden Kylies horizontal geworfen. Damit keine Präzession entsteht, die den Kylie aus seiner Bahn bringen würde, darf keine Drehung um die x- oder z-Achse entstehen (vgl. Abb. 17). Also müssen die Arme des Kylies unter Berücksichtigung von Wirbelbildung – und damit verminderter Auftrieb – geformt werden. Ein leicht zu stark oder zu schwach ausgeprägtes Profil würde den Kylie bei seiner langen Flugbahn stark beeinflussen.

e) Bumerangs für Linkshänder

Zuletzt noch ein Wort zu den Bumerangs für Linkshänder.

Solche sind notwendig, da ein Rechtshänder-Bumerang nur schlecht von einem Linkshänder geworfen werden kann, und umgekehrt. Der Grund dafür liegt in der Wurftechnik:

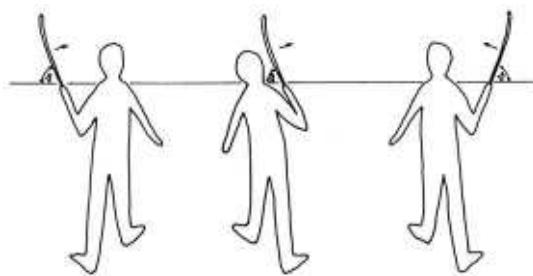


Abbildung 25

Einmal an die eine gewöhnt, kann man sich nur noch schwer umstellen. So muss ja der Rechtshänder-Bumerang leicht nach rechts geneigt abgeworfen werden (vgl. Abb. 25 rechts), der Linkshänder-Bumerang also nach links geneigt (vgl. Abb. 25 links). Mit der rechten Hand käme man mit einem Linkshänder-Bumerang mit dem

Kopf in Konflikt (vgl. Abb. 25 Mitte).

Linkshänder-Bumerangs sind genau spiegelbildlich zu Rechtshänder-Bumerangs geformt. Ebenso spiegelbildlich ist dann die Flugbahn, die statt einer Links- eine Rechtskurve beschreibt.

Die physikalischen Erscheinungen wirken ebenso wie beim Rechtshänder-Bumerang, nur spiegelbildlich.

2. Quantitative Beschreibung der Flugbahn

Eine besondere Herausforderung stellt die quantitative Beschreibung der Flugbahn eines Bumerangs dar.

a) Bewegungsgleichungen allgemein

Dazu betrachtet man allgemein einen bewegten und rotierenden starren Körper im Raum.

„Die Bewegung eines ausgedehnten starren Körpers lässt sich immer zusammensetzen aus der Translation des Schwerpunktes plus der Rotation des Körpers um den Schwerpunkt.“ (Demtröder, 1998, S. 137)

Die „Translation“ ist dabei die Bewegung des Schwerpunktes in die drei Richtungen des Raums.

Um die Translation zu beschreiben, greift man auf die wirkende Kraft zurück. Zusammengefasst lautet dann für sie die allgemeine Gleichung:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Also „Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung“ (Newtons zweites Axiom).

Diese Formel kann man in drei Formeln für die Kräfte in x-, y- und z-Richtung zerlegen.

Die Rotation beschreibt man mit dem Drehmoment; diese kann ebenfalls um drei verschiedene Achsen stattfinden. Allgemein lautet die Gleichung für das Drehmoment:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

Also ist das Drehmoment gleich der Ableitung des Drehimpulses nach der Zeit.

Auch diese Formel kann man in drei Formeln für x-, y- und z-Richtung zerlegen.

Damit sind nun die Bewegung in x-, y- und z-Richtung und die Rotation um die x-, y- und z-Achse beschrieben.

b) Vereinfachte Differentialgleichungen von Felix Hess

Felix Hess hat in seiner Dissertation „Boomerangs, Aerodynamics and Motion“ von 1975 vereinfachte Bewegungsgleichungen für den Bumerang aufgestellt. Dafür wird die Rotation in einem eigenen Koordinatensystem betrachtet, das sich durch das Koordinatensystem der „echten Welt“ bewegt (sog. Inertialsystem). Die Lage zueinander wird mit den in Abbildung 26 dargestellten Winkeln, den so genannten „Euler-Winkel“, bestimmt:

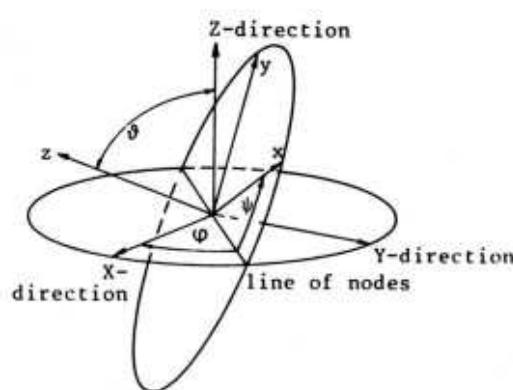


Abbildung 26

Die Gleichungen von Hess lauten:

$$\dot{\omega}_z = \frac{T_z}{I_3}$$

$$\dot{V} = \frac{1}{m} \cdot (-F_x \cdot \cos \Psi - F_z \cdot \sin \Psi)$$

$$\dot{\Psi} = \frac{1}{m \cdot V} \cdot (F_x \cdot \sin \Psi - F_z \cdot \cos \Psi) + \frac{T_x}{I_3 \cdot \omega_z}$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{1}{I_3 \cdot \omega_z} \cdot (-T_y \cdot \cos \psi - T_x \cdot \sin \psi)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{I_3 \cdot \omega_z} \cdot \frac{1}{\sin \vartheta} \cdot (-T_y \cdot \sin \psi + T_x \cdot \cos \psi)$$

$$\dot{\psi} = -\frac{F_y}{m \cdot V \cdot \cos \Psi} - \tan \Psi \cdot \frac{T_y}{I_3 \cdot \omega_z} - \cos \vartheta \cdot \dot{\phi}$$

$$\dot{X} = V \cdot [-\cos \Psi (\cos \psi \cdot \cos \varphi - \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot \cos \vartheta) - \sin \Psi \cdot \sin \varphi \cdot \sin \vartheta]$$

$$\dot{Y} = V \cdot [-\cos \Psi (\cos \psi \cdot \sin \varphi + \sin \psi \cdot \cos \varphi \cdot \cos \vartheta) + \sin \Psi \cdot \cos \varphi \cdot \sin \vartheta]$$

$$\dot{Z} = V \cdot (-\cos \Psi \cdot \sin \psi \cdot \sin \vartheta - \sin \Psi \cdot \cos \vartheta)$$

(vgl. Hess, 1975, S. 347)

Dabei sind:

$X, Y, Z:$	Koordinaten im Raum	[m]
$V:$	Geschwindigkeit des Schwerpunkts im Raum	[$\frac{m}{s}$]
$m:$	Masse	[kg]
$I_3:$	Trägheitsmoment um die z-Achse	[kg · m ²]
$\omega_z:$	Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse	[s ⁻¹]
$T_x, T_y, T_z:$	Drehmoment um die x-, y- und z-Achse	[Nm]
$F_x, F_y, F_z:$	Kräfte um die x-, y- und z-Achse	[N]
$\Psi:$	Winkel zwischen negativer x-Achse und Geschwindigkeitsvektor des Schwerpunkts	[°]
$\vartheta, \varphi, \psi:$	Winkel, wie in Abb. 26 angegeben	[°]

Hierbei müssen die aerodynamischen Anteile der Kräfte und Drehmomente, die sich ja auch im Verlauf des Flugs ändern, zu den verschiedenen Zeitpunkten bekannt sein.

Hess hat leider keine zufrieden stellenden Gleichungen zur Bestimmung dieser Kräfte gefunden. Ihre numerische Berechnung ist sehr kompliziert und wäre – wie schon in der Einleitung gesagt – mit heutigen Mitteln besser möglich.

Eine andere Bestimmungsmethode sind experimentelle Versuche im Windkanal, wo man mit Hilfe geeigneter „Waagen“ die verschiedenen Kräfte und Momente für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Anstellwinkel messen kann. Beide Methoden bedeuten jedoch einen sehr hohen Aufwand.

c) Allgemeine Lösung von Differentialgleichungen

Gleichungen wie die oben genannten können nicht algebraisch gelöst werden:

„[The] equations [...] have to be integrated numerically“ (Hess, 1975, S. 347)

Also muss man, um dennoch eine Lösung zu bekommen, eine numerische Lösung finden.

Dazu benutzt man die bekannten Startwerte (hier die Werte zum Zeitpunkt t_0 des Abwurfs des Bumerangs) und schließt aus den Differentialgleichungen, die ja eine zeitliche Änderung der Bewegungsgrößen angeben, auf die Werte an einem wenig späteren Zeitpunkt $t_0 + \Delta t$. Dies wiederholt man, bis die Bewegung zu Ende ist, also der Bumerang auf dem Boden auftrifft.

Diese Zeitschritte Δt dürfen nicht zu groß sein, damit eine starke Änderung der Bewegungsgrößen berücksichtigt werden kann.

Eine solche Menge von Werten für so viele Zeitpunkte lässt man sinnvollerweise einen Computer berechnen.

d) Beispiel einer Lösung

Das Programm zur Berechnung des Bumerangfluges (Quellcode *rang.bas* bzw. *rang.c*) hat Gerhard Bertling geschrieben.

Dabei wird nur ein bestimmter Bumerang beschrieben, und bei diesem die Rotation vernachlässigt. Die Berechnung der Werte erfolgt im Abstand von 0,1 Sekunden.

Trotzdem lassen sich recht gute Ergebnisse erzielen (s. Abb. 27).

Hier wurde das Programm für Linux kompiliert.

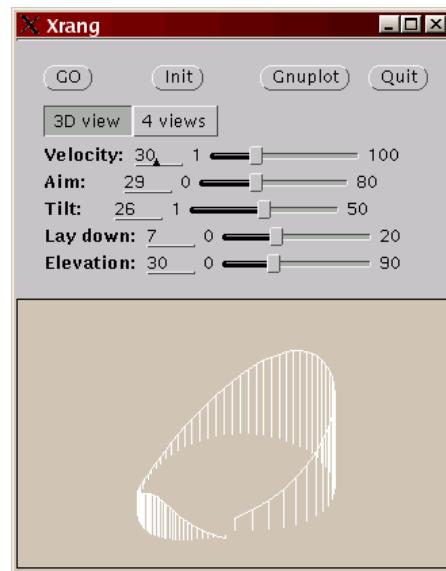


Abbildung 27

Um den dreidimensionalen Flug besser sichtbar zu machen, habe ich den vorliegenden Algorithmus von Gerhard Bertling in ein Programm eingebaut, das den Flug in einer OpenGL-Umgebung zeichnet. Dadurch kann man leicht die Ansicht in alle Richtungen drehen und verschieben, sowie vergrößern bzw. verkleinern. Dabei wurde Qt 3.0.4 (Linux) bzw. 2.3.0 (Windows) für das Fenster benutzt, um das Programm sowohl für Linux, als auch für Windows verfügbar zu machen. Das komplette Fenster des Programms sieht dann so aus:

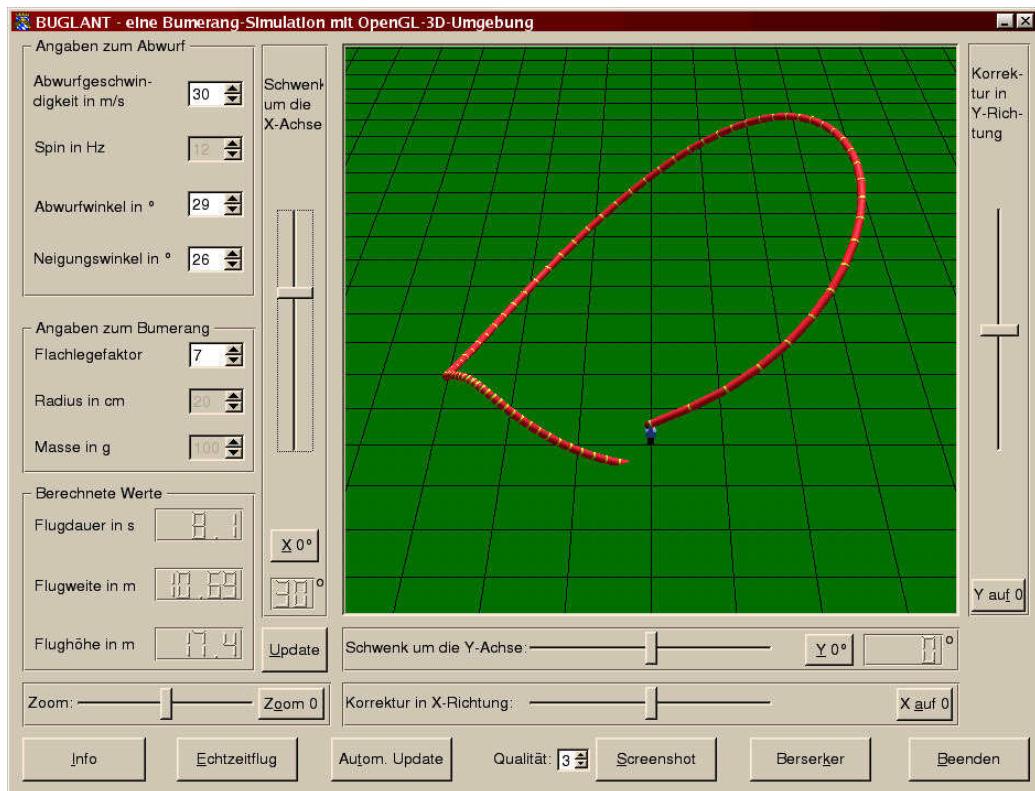


Abbildung 28

Hier wurden für den Flug die gleichen Werte wie in Abb. 27 verwendet, wodurch man sofort erkennt, dass beide Programme auch das gleiche Ergebnis liefern.

In meinem Programm wird die Flugbahn durch eine Aneinanderreihung von Zylindern dargestellt. Die gelben Ringe kennzeichnen die Zeitpunkte für die Berechnung im Abstand von 0,1 Sekunden.

Beide Programme sind als Quellcode im Anhang zu finden. Ausführbare Dateien sind für das Originalprogramm für Linux vorhanden, für mein Programm für Windows und Linux, wobei die Windows-Version beim Screenshot keine Jpeg-Dateien erzeugen kann; außerdem kann die Umgebung nicht per Mausklick und Ziehen gedreht bzw. verschoben werden und der Zoom ist nicht über das Mausrad steuerbar.

3. Versuche am selbstgebauten Modell

a) Bau eines Bumerangs

Zum Bumerangbau kann man prinzipiell alles verwenden, was sich in die Form eines Bumerangs bringen lässt, also jede Art von Holz oder Kunststoff, Aluminium oder Plexiglas (vgl. Veit, 1991, S. 37). Meistens wird aber Sperrholz verwendet, weil es sich nicht so leicht verzieht wie normales Holz und auch sehr stabil ist. Dabei sollte das Holz nicht zu leicht und zwischen drei und zehn Millimetern dick sein. Für den durchschnittlichen Bumerang ist also ein fünf oder sechs Millimeter starkes Birkensperrholz zu empfehlen. Optimal wäre finnisches Birkensperrholz, weil es zwei Schichten pro Millimeter besitzt, also sehr stabil ist; doch leider ist dieses Holz schwer zu bekommen. Hat man kein Birkensperrholz, kann man natürlich jedes andere Sperrholz verarbeiten. In diesem Fall wird sechs Millimeter starkes, neunschichtiges Birkensperrholz verwendet.

Vor dem Bau muss man beachten, dass das Holz möglichst plan ist. Da Sperrholz meistens leicht gebogen ist, legt man die gewölbte Seite nach unten, so dass später die Flügel des Bumerangs später leicht nach oben gebogen sind.

Außerdem sollte man auf die Maserung des Holzes achten, die beim Bumerang quer, d.h. von einer Flügelspitze zur anderen verlaufen sollte, damit er stabiler wird. Denn erfahrungsgemäß befindet sich eine mögliche Bruchstelle am „Ellenbogen“ des Bumerangs, der durch quer verlaufende Maserung gestärkt wird.



Abbildung 29

Danach wird der Bumerang ausgesägt.
Dazu eignet sich eine Laubsäge, oder,
wie hier verwendet, eine Stichsäge.

Nun zeichnet man den Bumerang auf das Holz auf. Dabei kann man auf bereits vorhandene Formen oder Anleitungen zurückgreifen, oder eigene erfinden.

Hier wurde eine eigene Form verwendet.



Abbildung 30



Abbildung 31

Nun wird das spätere Profil vorgezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass der Bumerang „aus zwei [...] gleich profilierten Flügeln“ (Veit, 1991, S. 35) besteht. „Immer fliegt die runde „Stirnkante“ (engl.: leading edge) voraus, die „Schrägkante“ (engl.: trailing edge) hinten nach.“ (Veit, 1991, S. 35)



Abbildung 32

Danach schrägt man mit einer Raspel grob die Flügel an (Abb. 32).



Abbildung 33

Mit einer Feile wird das genaue Profil herausgearbeitet. Sehr hilfreich sind die dunklen Zwischenschichten des Birken-sperrholzes, die als „Höhenlinien“ einen ungeraden Schliff verraten (s Abb. 33) Wie das Profil gestaltet wird, kann man recht frei entscheiden. „„Alles, was so ein wenig gekrümmmt ist und Tragflächenprofil aufweist, scheint zu fliegen.““ (Wilhelm Bretfeld; zitiert nach: Veit, 1991, S. 17)

Das fertige Profil kann etwa so aussehen:



Vollständig glatt bekommt man die Oberfläche durch Anschleifen mit zuerst grobem, dann feinem Schleifpapier.

Nun kann man den Bumerang noch lackieren, damit er vor Nässe geschützt ist, vor der man beim Werfen auf einer Wiese nie sicher ist. Als sehr gut hat sich Parkettlack auf Wasserbasis erwiesen, weil dieser ungiftig ist, schnell trocknet, hart ist, bei Bedarf leicht wieder abgeschliffen werden kann und andere Lacke z.B. auf Lösungsmittelbasis normalerweise nicht abstößt.



Abbildung 34

Fliegt er nach einigen Wurfversuchen wunschgemäß, kann er beliebig lackiert werden:



Abbildung 35

b) Wurf des Bumerangs

Der Bumerang wird am äußersten Ende eines Arms fest in die Hand genommen (s. Abb. 36). Bei kleinen, leichten Bumerangs genügt u. U. der Griff mit zwei Fingern.

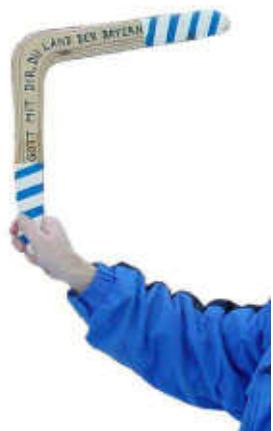


Abbildung 36

Danach schleudert man ihn senkrecht, oder leicht nach rechts geneigt mit hoher Geschwindigkeit und Rotation etwa parallel zum Boden (s. Abb. 37 und 38).



Abbildung 37

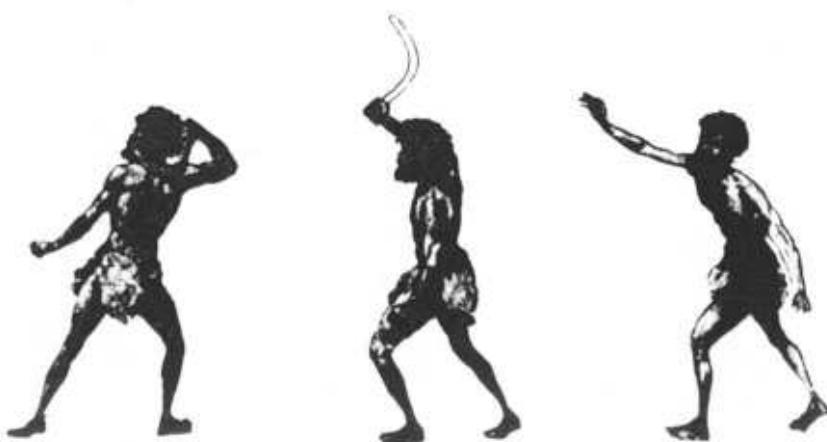


Abbildung 38

c) Bestimmung der Abwurfs- und Rotationsgeschwindigkeit

Um die Abwurfs- bzw. Rotationsgeschwindigkeit bei einem normalen Wurf herauszufinden, bietet es sich an, den Abwurf von der Seite mit einer Kamera zu filmen, wobei auf dem Boden Markierungen für die spätere Abstandsbestimmung angebracht werden müssen.

Hier wurden dafür zwei Holzklötze im Abstand von einem Meter verwendet. Die Kamera machte 25 Bilder pro Sekunde.

In Abbildung 39 wurden zwei Bilder mit einem Bild Abstand genommen.

Also vergehen zwischen den Bildern

$$\frac{2}{25} s = 0,08 s.$$

Die Lage des Mittelpunkts des Bumerangs wurde durch grüne Linien gekennzeichnet, die Distanz von einem Meter durch rote.

Durch Messung ergibt sich für die roten Linien ein Abstand von 1,8 cm,

für die grünen 2,4 cm. Die grünen Linien haben also einen $\frac{2,4\text{cm}}{1,8\text{cm}} \approx 1,33$ mal so großen

Abstand wie die roten, im Absolutwert also 1,33 m.

Für die Geschwindigkeit folgt: $v = \frac{1,33\text{m}}{0,08\text{s}} \approx 17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Dabei wurde der Bumerang nicht etwa besonders stark abgeworfen. Andere Messungen ergaben Werte zwischen 15 und 23 m/s, also 54 und 83 km/h. Es wären aber durchaus auch höhere Geschwindigkeiten möglich, weil leichtere Bumerangs selbstverständlich auch schneller geworfen werden können.

Zur Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit wird eine besser geeignete Aufnahme benutzt (s. Abb. 40).

Wie nämlich zu erkennen ist, befindet sich zuerst Arm 1 praktisch senkrecht zum Boden, beim zweiten Bild Arm 2. Also

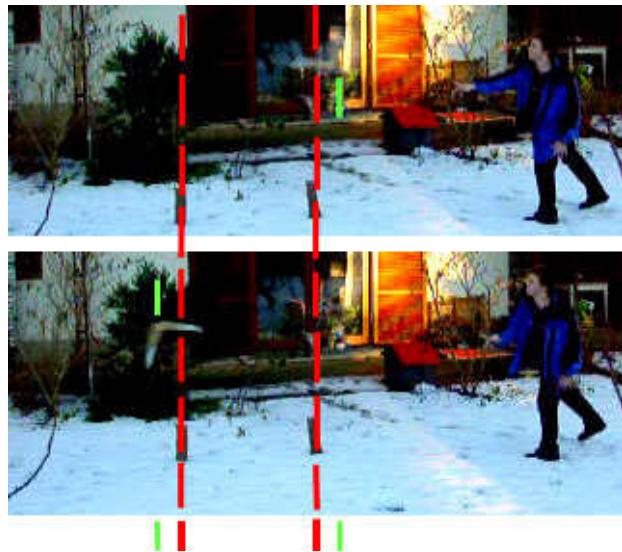


Abbildung 39

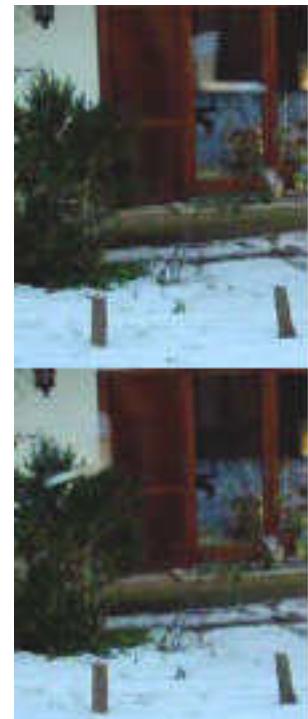


Abbildung 40

rotierte der Bumerang in $\frac{1}{25} s = 0,04s$ um den Winkel, den seine Arme einschließen,

bzw. diesen Winkel plus eine oder mehrere volle Rotationen. Da der Bumerang einen Winkel von ca. 100° einschließt, rotierte er also $\frac{100^\circ}{360^\circ} + n$ mal in $0,04s$. Für $n=0$, also

wenn er sich nur um 100° weitergedreht hat, ergibt sich eine Frequenz von

$\frac{100^\circ}{360^\circ} \div 0,04s \approx 7s^{-1}$. Für $n=1$ würde eine Frequenz von $32 s^{-1}$ folgen, was absolut

unrealistisch ist.

Mit diesen Versuchen kann man also die Abwurfgeschwindigkeit (etwa 20 m/s) und die Rotation des Bumerangs (etwa 10 s^{-1}) abschätzen.

d) Auswirkungen von Änderungen beim Abwurf

a) Probleme bei der Untersuchung der Flugbahn

Leider kann man die Flugbahn nur sehr schwer präzise beschreiben. Denn eine genaue Aufzeichnung eines Fluges ist nicht leicht möglich, weil eine Kamera immer nur ein zweidimensionales Bild macht. Eine Koppelung von drei Kameras wäre möglich, aber nur mit großem Aufwand zu koordinieren. Doch sollte dies gelingen, weiß man immer noch nicht die genauen Daten beim Abwurf, d.h. die Geschwindigkeit des Schwerpunkts (Abwurfgeschwindigkeit), die Rotationsgeschwindigkeit (Spin), den Winkel zwischen der Senkrechten und der Lage des Bumerangs (von hinten gesehen; Neigungswinkel), den Winkel zwischen der Horizontalen und der Abwurfrichtung (Abwurfwinkel) und die herrschende Windgeschwindigkeit bzw. die Wirbel des Windes, die in Bodennähe und wegen Bäumen etc. immer auftreten.

ß) Grundsätzliche Beschreibung der Flugbahn

Allerdings ist es durchaus möglich, prinzipiell die Flugbahn zu beschreiben: Im Optimalfall beschreibt der Bumerang eine Kreisbahn, die zunächst leicht ansteigt, am weitesten entfernten Punkt wieder abwärts fliegt, und sobald er den Werfer erreicht, seine Vorwärtsgeschwindigkeit verliert und langsam rotierend wie ein Ahornsamen zu Boden sinkt. (Fall 1)

Eine Erhöhung der Abwurfgeschwindigkeit führt zu einer schnelleren Ausführung der Bahn, wobei der Bumerang evtl. weiter fliegt als bis zum Werfer und noch einen weiteren, viel kleineren, Kreis beschreibt, der umgekehrt zum großen Kreis liegt. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Bumerang sich mehr als flachlegt (vgl. B. 1. g) α). Dadurch kann eine achtförmige Flugbahn zustande kommen. (Fall 2)

Eine zu niedrige Abwurfgeschwindigkeit lässt den Bumerang vor Vollendung der Flugbahn zu Boden stürzen. (Fall 3)

Bei einem zu niedrigen Spin tritt kaum Präzession auf, weshalb der Bumerang sich wie ein normales Stück Holz verhält, also geradeaus fliegt und zu Boden stürzt. (Fall 4)

Ein höherer Abwurfwinkel wirkt sich auf die Flugbahn so aus, dass der Bumerang zuerst stark nach oben steigt, dann aber ebenso stark wieder sinkt, am Ende der Flugbahn noch einmal steigt und dann zu Boden fällt. (Fall 5)

Ein zu niedriger Abwurfwinkel führt dazu, dass der Bumerang auf den Boden trifft und dabei leicht zerbrechen kann. (Fall 6)

Ein erhöhter Neigungswinkel wirkt sich ähnlich aus wie ein erhöhter Abwurfwinkel (Fall 5). Das heißt also, dass die Flugbahn stark ansteigt, wieder abfällt, der Bumerang dann wieder ansteigt und dann zu Boden fällt. (Fall 7)

Bei einem übermäßig hohen Neigungswinkel (etwa über 45° bis hin zu 90°) steigt der Bumerang ähnlich wie bei Fall 5 und 7 sehr stark nach oben, nur extremer als bei diesen beiden Fällen. Entsprechend stark ist auch wieder der Abstieg, weshalb eine hohe Geschwindigkeit zustande kommt. Trifft dann der Bumerang den Boden oder gar einen Menschen, so kann leicht einer der beiden schweren Schaden davontragen. Trifft er nicht den Boden, so landet er völlig unkontrolliert irgendwo. Im äußersten Fall kann der Bumerang sich an der höchsten Stelle umdrehen, weshalb er keinen Auftrieb mehr hat und sich absolut unberechenbar verhält.

Dieser Wurf wird „Sichelwurf“ genannt und gilt als absolut verboten. (Fall 8)

Ein niedrigerer Neigungswinkel führt zum früheren Eindrehen des Bumerangs, was eine Verkleinerung des Radius' der Flugbahn zur Folge hat. Allerdings steigt der Bumerang kaum mehr hoch, weil ja der Auftrieb weniger nach oben oder gar nach unten gerichtet ist. Im Extremfall fällt seine Flugbahn so stark ab, dass er den Boden berührt, bevor das Flachlegen wieder zu höherem Auftrieb nach oben führt. (Fall 9)

y) Nachweis durch das Computerprogramm

Die in β) beschriebenen Fälle können teilweise auch durch das Computerprogramm belegt werden. Diese Beispiele zeigen, dass das Programm das Grundprinzip – jedenfalls teilweise – richtig erfasst. Der Normalfall sieht wie in Abb. 41 aus; der Bumerang legt sich dabei am Ende des Flugs nicht sehr flach.

Fall 2 wird durch das Programm nicht ausreichend wiedergegeben, weil der Bumerang hier einfach weitere Kreisbahnen, ähnlich wie die erste, beschreibt (wenn auch mit unrealistischer Abwurfschwindigkeit).

Fall 3 lässt sich mit dem Programm leicht nachweisen (s. Abb. 43).

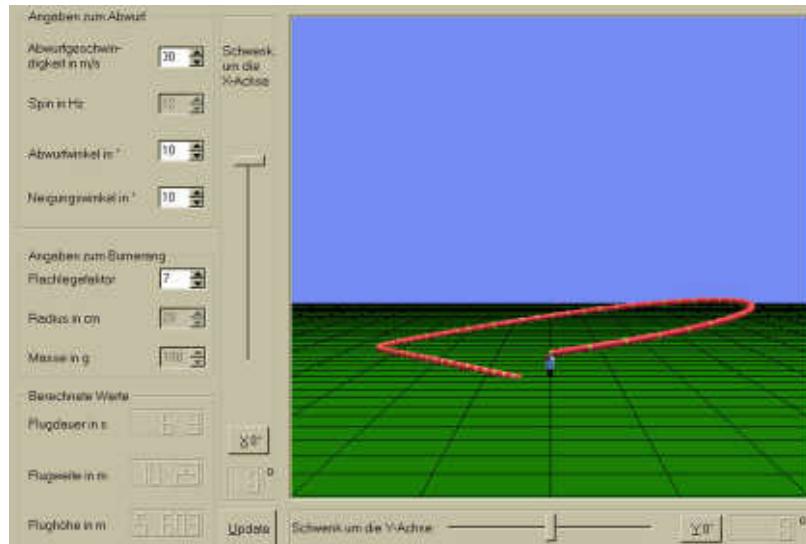


Abbildung 41

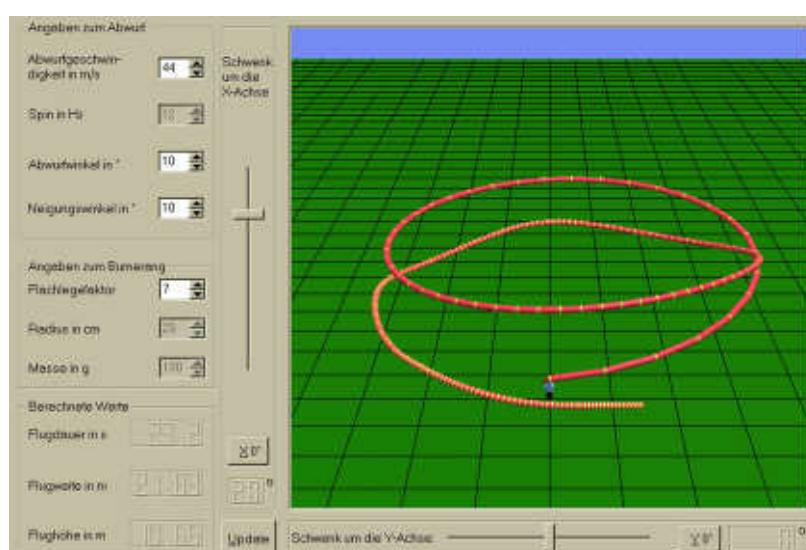


Abbildung 42

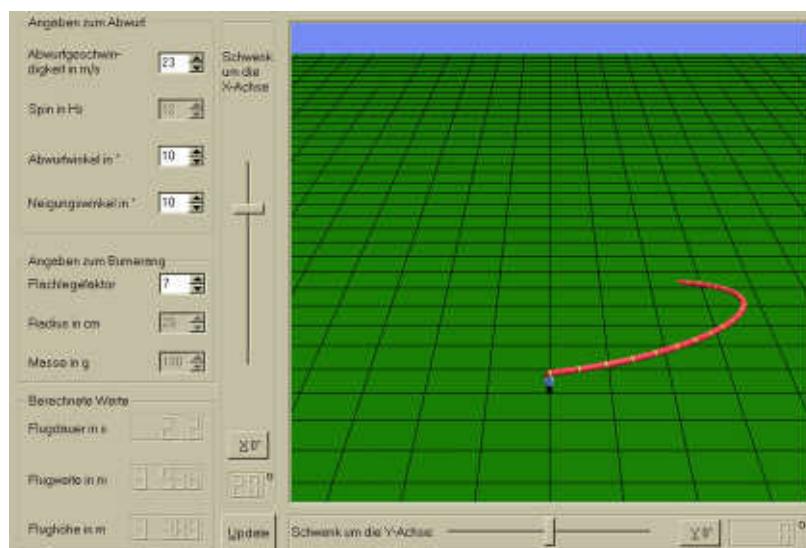


Abbildung 43

Da der Spin im Programm nicht berücksichtigt ist, lässt sich Fall 4 auch nicht belegen.

Fall 5 aber wird gut deutlich (s. Abb. 44).

Fall 6 sieht ähnlich wie Abb. 43 aus und soll daher nicht extra dargestellt werden.

Fall 7 dagegen liefert wieder interessante Ergebnisse. (s. Abb. 45)

Auch Fall 8, der Sichelwurf, kann eindrucksvoll simuliert werden.
Die hohe Geschwindigkeit beim Auftreffen wird durch die weit auseinander liegenden gelben Ringe angedeutet (s. Abb. 46).

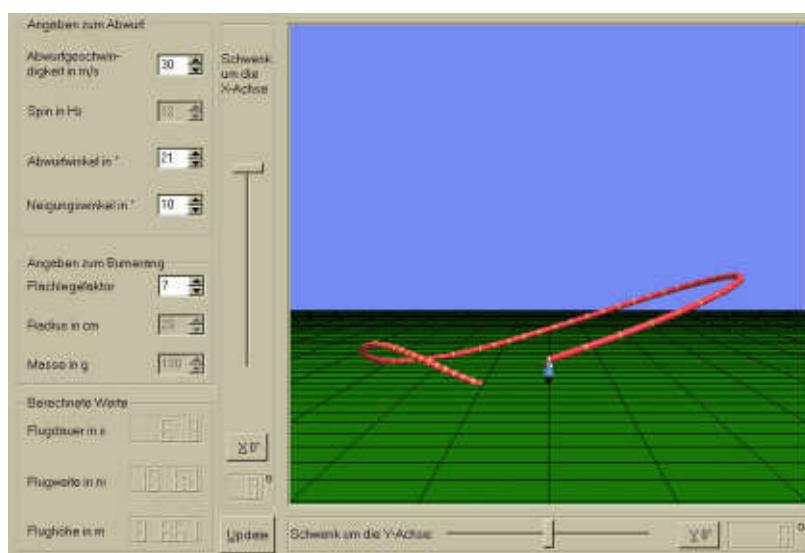


Abbildung 44

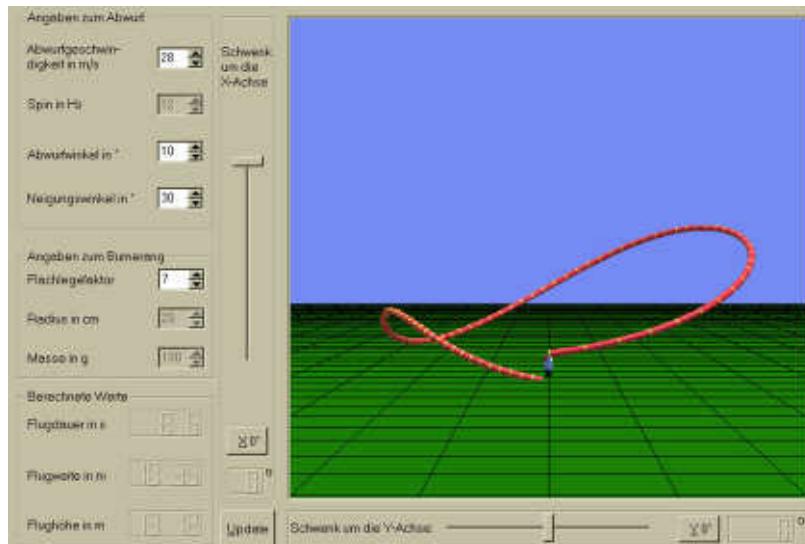


Abbildung 45

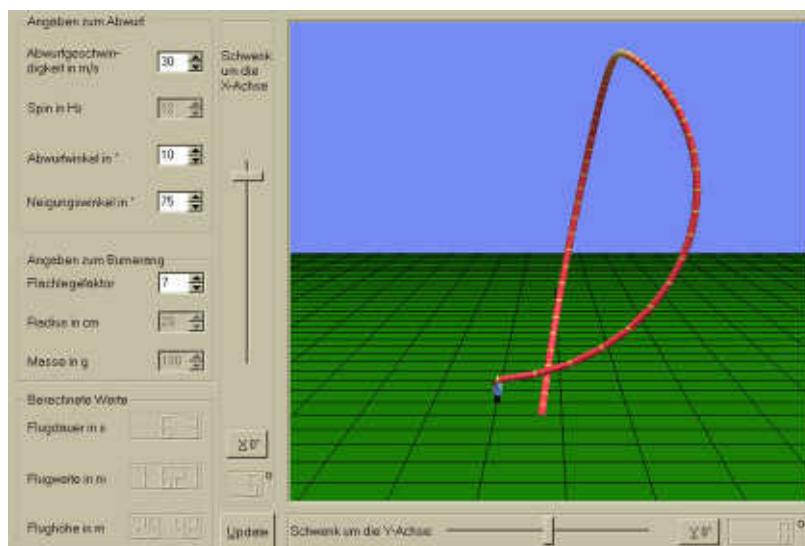


Abbildung 46

Ein Beispiel für Fall 9 soll hier angedeutet werden; um die Rückkehr zu gewährleisten, muss die Abwurfschwindigkeit erhöht werden (s. Abb. 47).

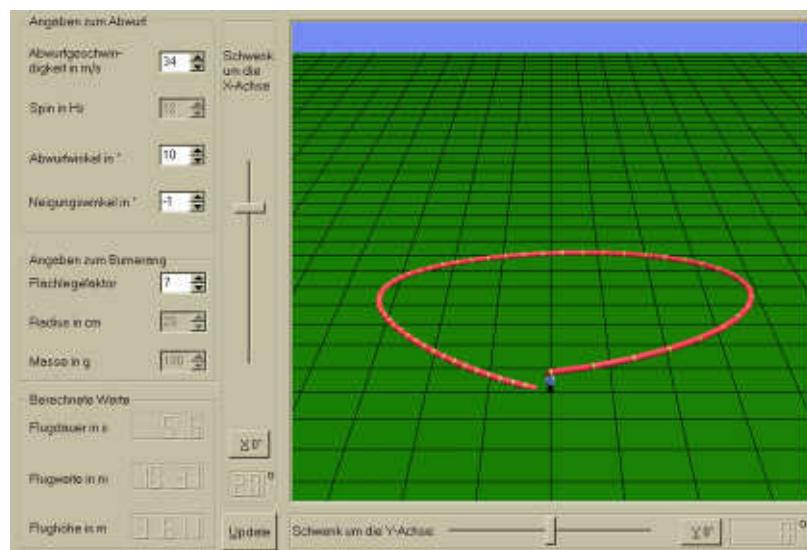


Abbildung 47

Um die Flugbahnen des Computerprogramms in ihrem wirklichen Aussehen erfassen zu können, empfiehlt es sich, die Würfe mit dem Programm nachzuvollziehen und durch Drehungen die Vorteile der 3D-Umgebung zu nutzen, die hier in den Abbildungen nicht zum Tragen kommen kann.

e) Aufnahmen realer Würfe

Um die Flugbahn eines Bumerangs sichtbar zu machen, gibt es mehrere Methoden: Man könnte den Flug mit einer Videokamera aufzeichnen. Die Kamera müsste dabei aber stationär sein, da Schwenks nicht nachvollziehbar wären und die Flugbahn wieder nicht klar wäre. Eine Darstellung eines Filmes in diesem Rahmen ist aber nicht möglich.

Deutlich anschaulicher ist die Langzeitaufnahme des Fluges in **einem** Bild.

Um dabei **nur** die Flugbahn und keine Überbelichtung durch Tageslicht auf dem Photo zu haben, müssen die Aufnahmen in der Nacht an einer dunklen Stelle stattfinden. Der Bumerang muss dabei natürlich während des Fluges ein ausreichend helles Licht aussenden. Ein solches ist auch nach der Landung hilfreich, um den Bumerang wieder zu finden.

Eine elektrische Glühlampe samt Batterie wäre wohl, damit sie ausreichend hell leuchtet, zu schwer, da die Flugbahn des Bumerangs ja deutlich von seiner Masse abhängt.

Anstatt dessen habe ich eine Wunderkerze mit Klebeband auf der Rückseite eines Flügels befestigt (s. Abb. 48).

Das Feuer der Wunderkerze brennt erfahrungsgemäß sehr heiß und kann nicht durch Wind ausgeblasen werden. Dies kann man leicht am Boden durch Schwenken einer brennenden Wunderkerze ausprobieren.

Leider kann es dabei zu Brandstellen am Bumerang kommen (s. Abb. 48).

Durch kurzes Werfen am Tag mit angeklebter Wunderkerze stellt man fest, dass sie sich normalerweise während des Flugs nicht löst und außerdem die Flugbahn nicht dramatisch beeinflusst.

Damit ist also eine geeignete Lichtquelle am Bumerang gefunden.

Nun muss man nur noch einen geeigneten Platz finden: Es sollten keine störenden anderen Lichtquellen vorhanden sein, da diese wegen der Langzeitbelichtung die Flugbahn überstrahlen. Außerdem darf für die Aufnahme möglichst kein Wind wehen, der die Flugbahn verändern würde. Ferner muss die Möglichkeit eines Brandes wegen der Wunderkerze (hier durch die feuchte Wiese) ausgeschlossen werden.

Ist all dies erledigt, kann man zum eigentlichen Versuch schreiten: Der Fotoapparat wird an geeigneter Stelle – auf ein Stativ montiert – aufgestellt, damit keine verwackelten Bilder entstehen.

Da man unmöglich gleichzeitig den Auslöser der Kamera betätigen und den Bumerang in geeignetem Abstand werfen kann, müssen diese Versuche von mindestens zwei Personen durchgeführt werden: dem Fotografen und dem Werfer.



Abbildung 48



Abbildung 49

Maria Hennig, Moritz Eckerskorn, Dr. Karl-Heinz Rein,
Georg Hennig, Benedikt Eckerskorn (v.l.n.r.)

Hier waren fünf Personen mit Fotografieren, Werfen, Anzünden der Wunderkerze und anschließendem Suchen des Bumerangs beschäftigt (Versuchsmannschaft s. Abb. 49). Die Belichtungszeit der Kamera war variabel und wurde durch den Fotografen bestimmt, je nach Flugdauer (ca. 4-6 Sekunden).

Schon die ersten Aufnahmen erwiesen sich als erfolgreich. Probleme treten nur beim Abziehen der Bilder auf: Geschieht dieses nämlich maschinell, so erscheinen die Negative als zu dunkel, weshalb die Bilder nicht abgezogen werden. Hier empfiehlt es sich, als Sonderwunsch die Abzüge der Bilder trotz zu dunkler Negative zu verlangen. Die Helligkeit der Fotos war bei den Versuchen nie ein Problem. Vielmehr waren einige unbrauchbar, weil der Bumerang stark „aus dem Bild“ flog.

Abbildung 50 zeigt eine der sehr schönen Aufnahmen: Leicht nach oben abgeworfen, mit geringem Neigungswinkel, vollführt der Bumerang eine Bahn ähnlich der in Abbildung 45 gezeigten berechneten. Sie endet fast genau beim Werfer.

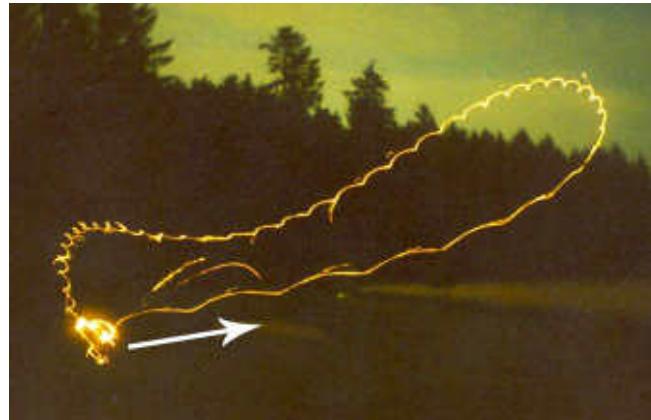


Abbildung 50

Die Abwurfrichtung ist mit einem weißen Pfeil gekennzeichnet.

Der helle Fleck kommt beim Abwurf zustande, weil hier der Bumerang längere Zeit an einer Stelle ruht.

Der Himmel erscheint bei der Aufnahme als hell, weil die lange Belichtungszeit das Streulicht aus Mond und künstlicher Beleuchtung auch registriert.

Die Leuchtspuren außerhalb der Flugbahn entstehen durch von der Wunderkerze wegfliegende glühende Teilchen.

Die „Wellenbahn“ entsteht, weil die Wunderkerze an einem Ende des Bumerangs befestigt war und wegen der Rotation oben eine höhere Geschwindigkeit hat als unten. Diese „Wellenbahn“ setzt sich aus Zykloiden zusammen, die bei Überlagerung einer Rotations- und einer Translationsbewegung entstehen.

Ähnlich gelungen ist der Wurf in Abbildung 51, bei dem der Bumerang am Ende des Flugs nicht mehr aufsteigt, sondern gleich in den Sinkflug steil nach unten übergeht.

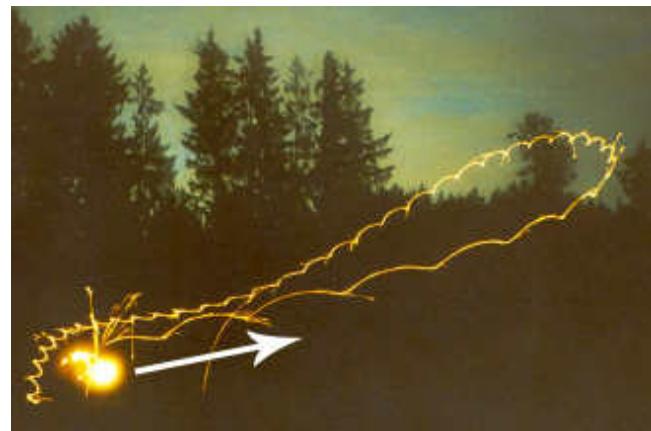


Abbildung 51

Ein weiteres Beispiel ist der Wurf in Abbildung 52, bei dem die Ähnlichkeit mit einer berechneten Flugbahn (Abb. 53) deutlich wird.

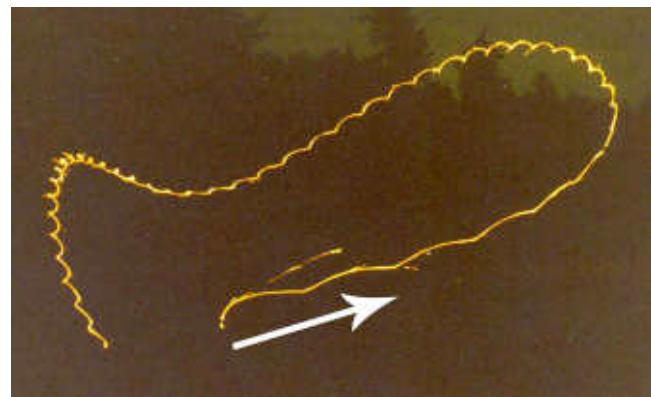


Abbildung 52

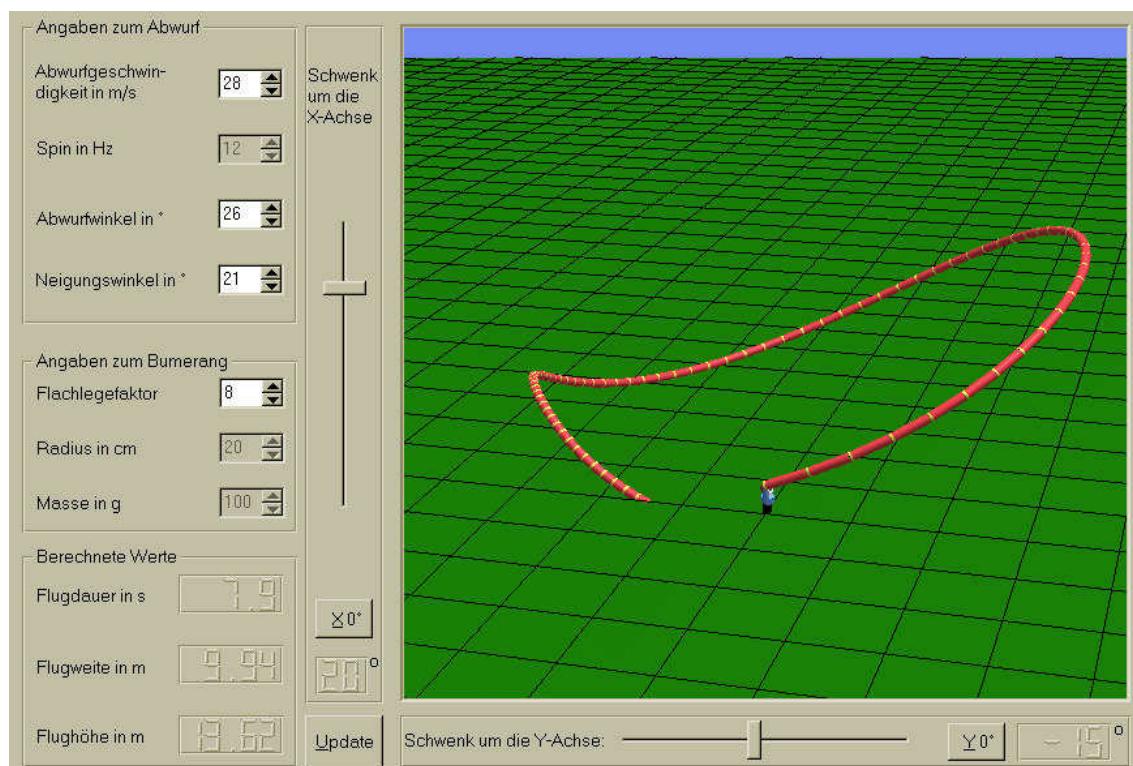


Abbildung 53

Abbildung 54 zeigt einen Wurf, bei dem die Kamera den Flug von rechts hinten verfolgt. Auffallend ist das Eindrehen am Ende des Flugs mit nahezu senkrechtem Absinken des Bumerangs.

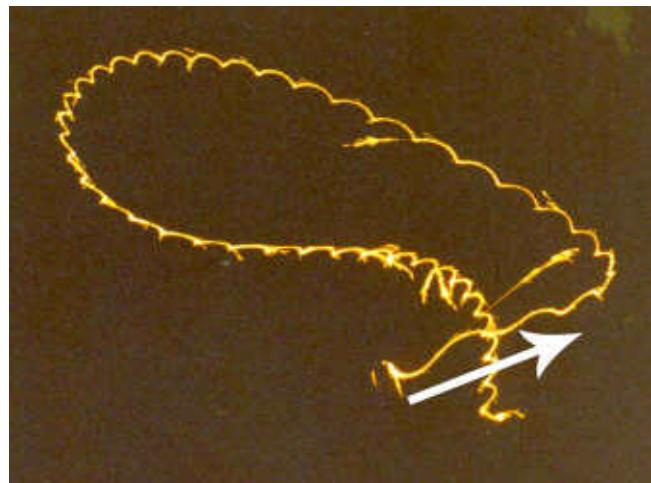


Abbildung 54

Auch in Abbildung 55 ist deutlich der Knick in der Flugbahn gegen Ende des Flugs zu erkennen. Hier ist der Bumerang anfangs recht weit aufgestiegen.

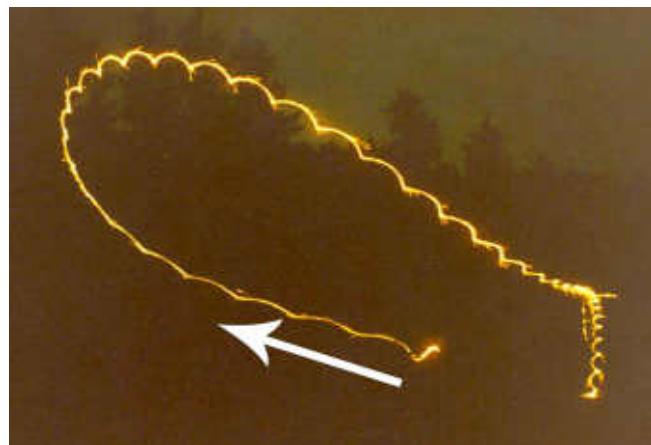


Abbildung 55

Zuletzt wird in Abbildung 56 noch ein Flug gezeigt, bei dem auf die Kamera zu geworfen wird. Ein relativ großer Neigungswinkel lässt den Bumerang weit aufsteigen und dann ebenso schnell wieder absteigen. Trotzdem dreht er am Ende des Flugs ein und fällt mit langsamer Geschwindigkeit zu Boden.

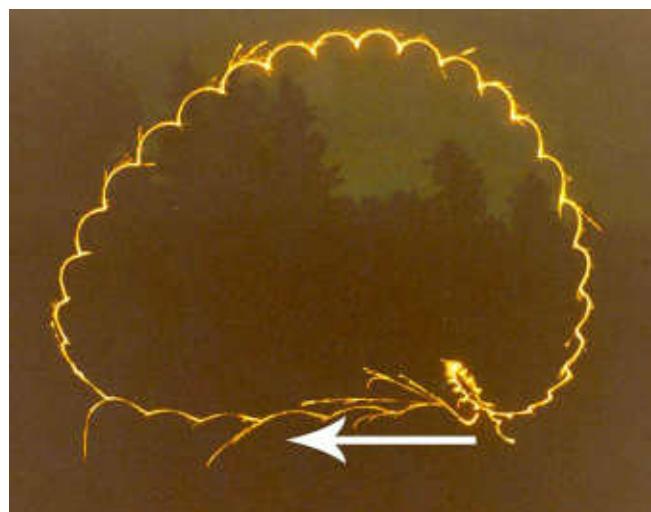


Abbildung 56

C. Ausblicke

Diese kurze Betrachtung des Bumerangs hat versucht, die physikalischen Effekte näher zu betrachten und eine qualitative Erklärung für seine Rückkehr zu finden.

1. Optimierung des Bumerangs

Physikalische Betrachtungen können dazu beitragen, das Tragflächenprofil und damit den Bumerang insgesamt zu optimieren. So könnte – wie beim Golfball – eine rauere Oberfläche der Flügel zu verminderter Auftrieb führen. Tatsächlich waren die Bumerangs der Aborigines nicht glatt geschliffen.

Auch für einen normalen Bumerang könnte das Wissen der aerodynamischen Eigenschaften des Flügelprofils von Bedeutung sein: Durch eine Optimierung der Flügelform wäre es leichter, einen genau zurückkehrenden Bumerang zu bauen, bzw. einen nicht zurückkehrenden Kylie.

Doch ist eine solche Erforschung wenig wahrscheinlich, da die aerodynamische und flugmechanische Berechnung des Bumerangs sehr kompliziert ist und es keine kommerziellen Anwendungen gibt.

Für den Liebhaber ist es also besser, sich auf eigene Erfahrungen zu stützen.

Und es macht auch Spaß, durch wiederholtes Ausprobieren so lange Verbesserungen an einem selbst gebauten Bumerang vorzunehmen, bis er „perfekt“ ist.

2. Sportliche Verwendung

Das Interesse am Bumerang erstreckt sich natürlich schnell nicht mehr nur auf das Werfen zum Spaß, sondern auch auf den Vergleich der Bau- und Wurfkunst im Wettbewerb. So wurden Rekorde im Weit- oder Langzeitwurf oder im „Fast Catch“ aufgestellt. Bei Letzterem geht es darum, einen Bumerang fünfmal hintereinander so schnell wie möglich zu werfen und nach seiner Kreisbahn wieder zu fangen.

Als „Königsdisziplin“ gilt der „Wilhelm Tell-Wurf“, bei dem ein Apfel, der auf dem eigenen Kopf liegt, getroffen werden muss. „Tatsächlich wurde dieser spektakuläre Wurf schon in die Tat umgesetzt, sei es mit einem riesigen Pappmaché-Apfel auf einem Helm oder mit einem richtigen Apfel, aber mit Schutzvorrichtungen für den Körper.“ (Veit, 1991, S. 94)

3. Ästhetischer Aspekt des Bumerangflugs

Der Bumerangflug kann aber auch schlicht als beeindruckend und schön betrachtet werden:

„Ich sehe im Kreisflug des Rückkehrbumerangs einen Vorgang vollendet Harmonie: Je mehr nämlich die vorwärtstreibende Wurfkraft durch den Luftwiderstand und die Einwirkung der Schwerkraft aufgezehrt wird, um so stärker beginnen die Auftriebskräfte mit ihrer Gegenwirkung; denn je flacher der Bumerang in der Luft liegt, desto eindeutiger ist die Kraft des Auftriebs senkrecht nach oben gerichtet und damit um so stärker. Nun kann zwar der Auftrieb die endgültige Landung des Bumerangs nicht verhindern, jedoch in eindrucksvoller Weise verzögern.“ (Wilpert, 1988, S. 170)

Der Bumerang kann genauso den physikalisch Interessierten wie den Uninteressierten leicht in seinen Bann ziehen.

So kann es leicht passieren, dass, wenn man beim Werfen ist, Spaziergänger stehen bleiben und fragen, wie „der Bumerang funktioniert“, und wollen manchmal sogar selbst werfen.

Solche Fragen zeigen deutlich die Faszination, die von diesem „Stück Holz“ ausgeht und den Menschen wohl immer in den Bann ziehen wird.

D. Anhang

E. Literaturverzeichnis und Abbildungsnachweis

Literaturverzeichnis

I. N. **Bronstein**, K. A. Semendjajew, Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt/M., 1969⁵ (Bronstein, 1969)

Wolfgang **Bürger**, Bumerangflüge, Spektrum der Wissenschaft, August 2001 (Bürger, 2001)

Professor Dr. Wolfgang **Demtröder**, Experimentalphysik 1 – Mechanik und Wärme, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998² (Demtröder, 1998)

Fritz **Dubs**, Aerodynamik der reinen Unterschallströmung, Birkhäuser Verlag, Basel/Stuttgart, 1954 (Dubs, 1954)

Dr. Anton **Hammer**, Dr. Hildegard Hammer, Dr. Karl Hammer, Physikalische Formeln und Tabellen, J. Lindauer Verlag, München, 2000⁶ (Hammer, 2000)

Felix **Hess**, Boomerangs, Aerodynamics and Motion, Dissertation, Groningen, 1975 (Hess, 1975)

B. M. **Jaworski**, A. A. Detlaf, Physik griffbereit – Definitionen, Gesetze, Theorien, Verlag Vieweg + Sohn, Braunschweig, 1972 (Jaworski, 1972)

Robert Wichard **Pohl**, Mechanik, Akustik und Wärmelehre, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, New York, 1964¹⁶ (Pohl, 1964)

Joachim **Ringelnatz**, Gedichte, Reclam-Verlag, Stuttgart, 1998 (Ringelnatz, 1998)

Hans Joachim **Schlichting**, Bernd Rodewald, Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 35/5, 18, 1986 (von <http://www.uni-muenster.de/Physik/DP/lit/FreihandSpielzeug/Bumerang.pdf>) (Schlichting, 1986)

Günther **Veit**, Bumerangs: Werfen, Fangen und Selberbauen, Heinrich Hugendubel Verlag, München, 1991⁹ (Veit, 1991)

Clara B. **Wilpert**, Der Flug des Bumerang: 40000 Jahre Australier, Hans Christians Verlag, Hamburg, 1988² (Wilpert, 1988)

Abbildungsnachweis

Titelblatt: oben: Wilpert, 1988, Umschlag vorne; unten: eigenes

Abb. 1, 3: Wilpert, 1988, Umschlag hinten, S. 161

Abb. 2, 6, 14-16, 18, 19, 23, 27-37, 39-56: eigene

Abb. 4, 5, 22, 25, 26, 38: Hess, 1975, S. 33, 44, 93, 106, 122, 345

Abb. 7-13: Dubs, 1954, S. 92f., 99f.

Abb. 17, 20, 21, 24: nach Schlichting, S. 3, 7

F. Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ottobrunn, den 3. 2. 2003