

# 1. Zum Beispiel der Bumerang

Autor(en): **Bürger, Wolfgang**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **105 (1987)**

Heft 51-52

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76780>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

**Literatur**

- [1] Ad-hoc-Studiengruppe für Schadenfälle an Brückenbrüstungen: 1.-4. Zwischenbericht von 1978, 1979, 1982 und 1986, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion ETH Zürich
- [2] Basler, K.: Ausbildungsüberprüfung im Bereich des Hochbaues, Postulat an den Schweizerischen Schulrat vom 2. April 1987
- [3] B 3 Oberflächenschutz von Stahlkonstruktionen, Empfehlungen der TK-SZS, Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau 1982
- [4] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure, Bauverlag GmbH Wiesbaden + Berlin 1977
- [5] Elsener, B., und Böhni, H.: Elektrochemische Untersuchungen der Korrosion von Armierungsstahl in Beton. Schweizer Ingenieur und Architekt Heft 14, 1984, S. 264-269
- [6] Frey, R.: Einwirkung von Streusalzen auf Beton unter gezielt praxisnahen Bedingungen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 384, Berlin 1987
- [7] Hensel, W.: Chemische Reaktionen von Atmosphärien mit zementgebundenen Baustoffen, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 11 1985, S. 714-721
- [8] Lüthi, P.: Ganzheitliches Denken - eine Lösung unserer Probleme? Schweizer Ingenieur und Architekt Heft 14, 1987, S. 119ff.
- [9] Nürnberger, U.: Chloridkorrosion von Stahl in Beton Teil I und II, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 9 und 10, 1984
- [10] Rösli, A., und Mitarbeiter: Frost- und Tausalzbeständigkeit von Beton, Forschungsprojekt 9/78, Eidg. Dep. des Innern, Schlussbericht März 1983
- [11] Schiessl, P.: CEB-Working Guide for Durable Concrete Structures, Part 1, Protection of reinforcement, CEB-Rilem International Workshop, May 1983, Copenhagen
- [12] Schröder, F. et al.: Einfluss von Luftkohlenensäure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 182, Berlin 1967
- [13] Stocker, W.: Entscheidungshilfen bei Beschichtungen, Schweizer Baublatt, Heft Nr. 4 1987
- [14] Weber, J.: Die Karbonatisierung des Betons und deren Einfluss auf die Betonbeständigkeit, Strasse und Verkehr Nr. 4 1987
- [15] Wittmann, F.: Gefüge und Beständigkeit des Betons, Dokumentation des SIA Nr. 72: Beständigkeit des Stahlbetons, Zürich 1984, S. 7-12

keit der Sanierung haben kann. Unter diesem Blickwinkel muss noch abgeklärt werden, ob die Kontrollflächen besser an durchschnittlichen oder an extremen Stellen, ob sie besser zufällig oder geplant angelegt werden sollen. Dabei muss unbedingt die Frage der Garantieleistung berücksichtigt werden.

**Schlussbemerkung**

Die Lage auf dem Betonsanierungsmarkt ist sehr unübersichtlich. Dies kann unter anderem daherrühren, dass zwar viele Beteiligte viel unternehmen, aber meist zu wenig von den Bemühungen anderer wissen. Deshalb stellt dieser Artikel neben der Arbeit einer schon 10 Jahre auf diesem Gebiet tätigen Studiengruppe auch die wichtigsten Aspekte eines Forschungsprojektes vor, obwohl dieses bei weitem noch nicht abgeschlossen ist. Wir hoffen, damit einen kleinen Schritt zur Klärung der Situation zu tun.

Adressen der Verfasser: D. Flückiger, dipl. Ing. ETH, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich, und W. Studer, dipl. Ing. ETH, Vorsitzender der Ad-hoc-Studiengruppe für Schadenfälle an Brückenbrüstungen, c/o EMPA, 8600 Dübendorf.

Die Anordnung der Kontrollflächen ist von zentraler Bedeutung. Ein geschicktes Vorgehen kann einen aktiven Beitrag zur Erhöhung der Qualität der

Ausführung liefern. Andererseits ergeben sich einige Probleme daraus, dass der Beton einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Dauerhaftig-

**Physikalische Spielzeuge stellen Fragen****1. Zum Beispiel der Bumerang**

Von Wolfgang Bürger, Karlsruhe

Prof. Dr. W. Bürger ist seit 1975 Leiter des Instituts für Theoretische Mechanik der Universität Karlsruhe. Sein wissenschaftliches Arbeitsgebiet ist die Mechanik und Thermodynamik der Kontinua und - neuerdings - die Theorie physikalischer Spielzeuge.

**Wer erfand den Bumerang?**

«War einmal ein Bumerang; war ein wenig zu lang. Bumerang flog ein Stück, aber kam nicht mehr zurück. Publikum - noch stundenlang - wartete auf Bumerang», reimte Hans Bötticher, der sich Joachim Ringelnatz nannte.

Doch der Meister irrte: An der Länge kann es nicht gelegen haben. Alle möglichen krummen Hölzer mit tragflächenartigen Armen kehren zum Werfer zurück, wenn sie vorschriftsmässig geworfen werden und der Wind nicht zu heftig mit ihnen spielt. Bei den Ureinwohnern Australiens, den Aborigines, sind allerdings auch Wurfhölzer im Gebrauch, die nicht zurückkommen. Es sind schwere Hölzer für die

Jagd, deren Tragflächen den Zweck haben, den Flugweg bis zu 100 m und mehr zu verlängern.

Entgegen einem verbreiteten Vorurteil ist Australien nicht die einzige Wiege des Bumerangs. Archäologische Funde machen es wahrscheinlich, dass auch die steinzeitlichen Kulturen Europas, Asiens und Nordamerikas fliegende Wurfhölzer kannten.

Die Wissenschaft wurde früh auf die Flugeigenschaften der Bumerangs aufmerksam, die deshalb schon in den Anfängen der Aerodynamik Beachtung fanden.

**Kreuzbumerangs**

Bumerangs sind - etwas drastisch defi-

niert - eine Kreuzung von Hubschrauber und Kreisel. Luftkräfte an den Tragflächen, die den Bumerang aus seiner Lage zu bringen suchen, wecken «Kreiselkräfte», mit denen er sich solchem Zwange widersetzt. Das Wechselspiel beider macht den erstaunlichen Flug des Bumerangs möglich: die Präzession eines Kreisels wird zum Wendemanöver in der Luft. Typische Rückkehrbumerangs, wie die Australier sie aus Hartholz schnitzen, haben zwei ungefähr gleich lange Flügel, die einen stumpfen Winkel einschliessen. Sie fliegen weite Bögen mit über 50 m Durchmesser, die Flugbahnen sind wellig, weil das gekrümmte Flugholz seinen ausserhalb des Körpers liegenden Schwerpunkt umkreist.

Vierflügelige «Kreuzbumerangs» sind die Ausnahme. Das Science Museum in St. Paul, Minnesota, zeigt Bumerangs aus Nordostaustralien, deren gekreuzte Flügel kunstvoll mit Lederschnüren verbunden sind. Was der moderne Mensch leicht mit Klebstoff fertigbringt, zwei Hölzer über Kreuz fest zu verbinden, stellte die Steinzeitmenschen vor eine schwierige Aufgabe.

Kein Wunder, dass Kreuzbumerangs der Aborigines selten sind! Andererseits fliegen ausgerechnet mehrflügelige Bumerangs besonders ruhig, und sie bieten sich dem Theoretiker als Studienobjekte an, da ihre Symmetrie einen einfacheren Zugang zum Verständnis der Bumerangbewegung eröffnet. Wir haben vier- und sechsflügelige Leichtbumerangs aus Balsaholz gebaut, die einen Kreis von nur 5 bis 6 m Durchmesser fliegen und schon in einem grösseren Zimmer geworfen werden können. Der Bahnkreisdurchmesser ist nach der einfachsten möglichen Theorie eine Eigenschaft des Bumerangs und hängt nicht von der Wucht des Abwurfs ab. Das wird durch vielfältige Erfahrung gut bestätigt.

## Der Flug des akademischen Bumerangs

Doch zur Gretchenfrage: Warum kommt der Bumerang zurück? Das bleibe den Wissenschaftlern trotz aller technischen Kenntnisse ein Rätsel, war vor kurzem in einer Zeitung (BNN vom 21.3.1987) zu lesen, das Ganze sei wahrscheinlich eine Frage der Harmonie. Eine Bankrotterklärung der Wissenschaft?

Der Theoretiker geht dem Bumerangflug für einen kreuzflügeligen Bumerang ohne Gewicht nach und setzt die Flügel als schlank, ihre Profile als symmetrisch voraus. Das ist, bitte schön, nicht die berühmte kugelsymmetrische Kuh mit homogener Milchverteilung, die ein Physiker zur Grundlage seiner Theorie der Molkereitechnik gemacht haben soll. Um die Natur zu verstehen, muss der Wissenschaftler analytisch denken und vereinfachte Modelle der komplexen Wirklichkeit entwerfen. Die Symmetrie des Kreuzbumerangs macht die Reaktion der Luft unabhängig von der momentanen Flügelstellung. Die Unterdrückung des Gewichts hebt die Bevorzugung der Vertikalrichtung vor den anderen Raumrichtungen auf und erleichtert nochmals die mathematische Analyse.

Wir können danach, ohne undurchsichtige Rechnungen auf einem Computer, aus den Gesetzen der Physik ableiten, dass die Kräfte der Luft einen vorschriftsmässig abgeworfenen Bumerang auf eine Kreisbahn führen und die Flügelebene so mitdrehen, wie der Mond sich dreht, der bei seinem Umlauf unserer Erde stets dieselbe Seite zuwendet. Gibt es denn so etwas wie «schwerelose» Bumerangs? Sie lassen sich in einem Weltraumlabor auf ballistischer Bahn verwirklichen («im Or-

bit», was oft fälschlich mit der Abwesenheit der Schwerkraft verwechselt wird), näherungsweise auch auf der Erde, wenn die Luftkräfte an den Flügeln so gross sind, dass sie das Gewicht des Bumerangs deutlich übertreffen. Sehr leichte Bumerangs aus Balsaholz können diesem Ideal recht nahe kommen, solange sie «schnell» sind.

Bei der Spielzeugmission der Raumfähre «Discoverer» im April 1985, auf der unter anderem mit Slinkies, Jojos und den deutschen Darda-Autos experimentiert wurde, nahm leider kein Bumerang teil. Dabei hätte gerade ein Bumerangexperiment im Spacelab (wenn der Raum im Innern gereicht hätte) eine echte Erkenntnis bringen können.

## Der Bumerang in Wirklichkeit

Kehren wir auf die Erde zurück, und denken wir uns das Schwerkraftfeld nachträglich wieder eingeschaltet! Die Gleichungen lassen sich nun nicht mehr einfach lösen, wir können die Änderungen aber qualitativ beschreiben. Sein Gewicht zwingt den Bumerang zu fallen, die Flugbahn bleibt kein Kreis.

Der Werfer kann dem Fallen entgegensteuern, indem er den Bumerang unter einem kleinen Winkel nach oben wirft (etwa 20 Grad steil, weniger als einen Ball oder Stein, dem keine Flügel helfen, in der Luft zu bleiben). Neigt der Werfer beim Abwurf noch die Flügelebene des Bumerangs um wenige Winkelgrade, wirkt auch die Auftriebskraft der Flügel der Schwerkraft entgegen und trägt zur Verlängerung des Fluges bei. Für schwere Bumerangs wird der Kreis zur Schleifenbahn, die bei perfektem Abwurf zur Abwurfstelle zurückführt; manchmal so exakt, dass der Werfer in Deckung gehen muss. Und wie genau lässt sich ein Bumerang werfen? - Beliebig genau mit einer Bumerang-Wurfmaschine, die beim Abwurf Richtung, Neigung, Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit einzustellen gestattet.

Damit ist die Geschichte vom Bumerang nicht zu Ende. Warum legt er sich schliesslich flach und erleichtert uns dadurch das Fangen? Über das Flachlegen des Bumerangs ist manches geredet und geschrieben worden, aber keiner der Autoren hat es einfach und schlüssig erklären können. Obwohl er uns uneingeschränkt zur Verfügung steht und seine Beobachtung keine komplizierten Messinstrumente erfordert, verstehen wir noch nicht alles am Bumerang.

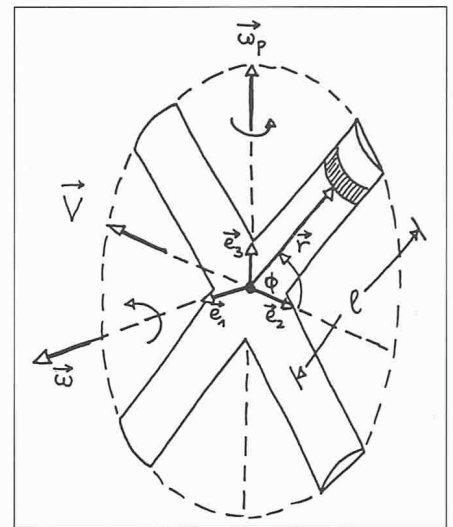


Bild 1. Schematische Darstellung des Kreuzbumerangs

## Zur Theorie des schwerelosen Kreuzbumerangs

In der Darstellung des Kreisfluges eines schwerelosen Kreuzbumerangs folgen wir *Barger & Olsson* (Classical Mechanics, McGraw-Hill, New York, 1973). Die Flügelebene steht vertikal (enthält die  $\vec{e}_3$ -Richtung) und tangential zur Bahngeschwindigkeit  $\vec{V} = -V\vec{e}_2$ . In Abwesenheit von Schwere geben «vertikal» und «horizontal» lediglich die relative Lage zum Werfer und zur Abwurfrichtung an. Die Winkelgeschwindigkeit der Eigendrehung des Bumerangs (seines «Spins») steht senkrecht auf beiden:  $\vec{\omega} = \omega\vec{e}_1$ . Genau besehen, kommt zu  $\vec{\omega}$  die Winkelgeschwindigkeit der Präzession um die Vertikale,  $\vec{\omega}_p = \omega_p\vec{e}_3$ , hinzu, die eine Folge des Drehmoments der Luftkräfte ist. Beim rasch drehenden Bumerang («schnellen Kreis») ist aber  $|\omega_p| \ll |\omega|$ , und  $\vec{\omega}_p$  kann daher gegen  $\vec{\omega}$  vernachlässigt werden.

Die Kräfte der Luft auf ein Element eines schlanken Bumerangflügels im Abstand  $r$  vom Zentrum hängen von der Geschwindigkeit normal zur Anströmfronte

$$v = V \sin \phi + \omega r$$

ab. Bei «guten» Tragflügeln ist der Auftrieb (die Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung) so viel grösser als der (der Bewegung entgegengesetzte) Widerstand, dass man letzteren vernachlässigt. Ein «guter» Tragflügel für einen Bumerang ist nicht zu dünn, hat eine abgerundete Anströmfronte, eine einigermaßen scharfe Hinterkante und sein Dickenmaximum, von vorn gemessen, etwa bei einem Viertel der Breite. Wir setzen hier allerdings das Tragflügelprofil als symmetrisch zur Mitte voraus, damit wir mit demselben Auftrieb rechnen können, gleichviel ob der Flügel lokal von vorn oder von hin-

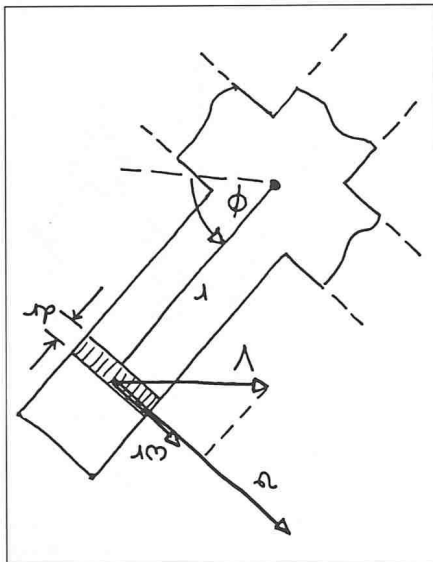
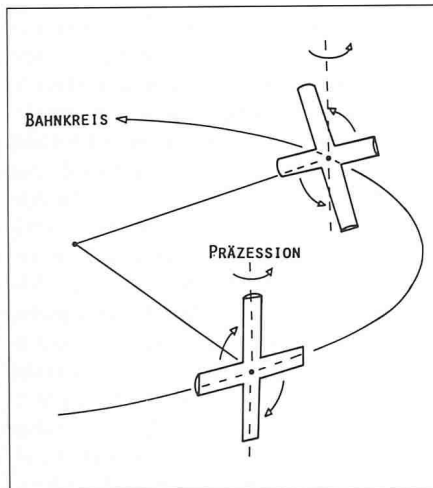


Bild 2. Luftkräfte am Flügelement

Bild 3. Präzession und Bahnkreis des schwerelosen Kreuzbumerangs



ten angeströmt wird (ob  $v > 0$  oder  $v < 0$  ist). Man nimmt an, dass die Auftriebskraft von der Geschwindigkeit quadratisch abhängt und ihr Beitrag pro Längeneinheit des Flügels

$$d\vec{A}/dr = cv^2 \vec{e}_1$$

ist, wobei  $c$  ein für den Flügelquerschnitt (das sog. Profil) charakteristischer Auftriebsbeiwert ist. Integration über die Flügellänge  $l$  und Summierung über die vier Flügel, die im betrachteten Augenblick unter Winkeln  $\varphi, \varphi + \pi/2, \varphi + \pi$  und  $\varphi + 3\pi/2$  stehen, liefert die resultierende Auftriebskraft auf den Bumerang:

$$\vec{A} = 4cl \left( \frac{\omega^2 l^2}{3} + \frac{V^2}{2} \right) \vec{e}_1$$

Sie ist infolge der Symmetrie des Bumerangs vom Winkel  $\varphi$  unabhängig. In entsprechender Weise integriert und summiert man das Drehmoment pro Längeneinheit,  $\vec{r} \times d\vec{A}/dr$ , zum resultierenden Drehmoment auf den Bumerang:

$$\vec{M} = \frac{4}{3} cV\omega l^3 \vec{e}_2$$

Beim Flug mit konstanter Bahngeschwindigkeit  $V$  bewirkt die Auftriebskraft nur eine Zentripetalbeschleunigung senkrecht zum Vektor  $\vec{V}$ , und die Impulsbilanz reduziert sich zu  $m(V^2/R)\vec{e}_1 = \vec{A}$  oder

$$\frac{mV^2}{R} = 4cl \left( \frac{\omega^2 l^2}{3} + \frac{V^2}{2} \right)$$

( $m$  Masse des Bumerangs,  $R$  Krümmungsradius der Bahn). Das Trägheitsmoment eines schlanken Flügels der Länge  $l$  um das Zentrum des Bumerangs als Drehachse ist  $ml^2/12$ , der

Drehimpuls des ganzen Bumerangs daher  $\vec{D} = (ml^2/3)\vec{\omega}$ . Bei stationärer Präzession besteht die Änderung des Drehimpulses nur in der Drehung des Vektors  $\vec{D}$  mit der Winkelgeschwindigkeit  $\vec{\omega}_p$ , die Drehimpulsbilanz reduziert sich daher auf  $\vec{\omega}_p \times \vec{D} = \vec{M}$  oder

$$\omega_p = \frac{4cV}{m}$$

Bei der Formulierung der Gleichungen wurde postuliert, dass der Bumerang einen stationären Kreisflug ausführt. Damit diese A-priori-Annahme erfüllt ist, müssen Impuls- und Drehimpulsbilanz miteinander verträglich sein, das heisst, der Bumerang muss sich so drehen, dass seine Flügelsebene in jedem Augenblick den Bahnkreis berührt oder die Schliessungsbedingung

$$\frac{V}{R} = \omega_p$$

erfüllt ist. Aus der Drehimpulsgleichung folgt damit der Radius der Kreisbahn

$$R = \frac{m}{4cl}$$

Er ist im Rahmen dieser einfachen Theorie eine Eigenschaft des Bumerangs und nicht von der Geschwindigkeit beim Abwurf abhängig. Die Impulsgleichung liefert darüber hinaus die Abwurfbedingung

$$V = (2/3)^{1/2} \omega l$$

Der Vorfaktor unterscheidet sich nur wenig von Eins. Damit der gewichtslose Bumerang einen Kreis fliegt, muss man ihn so abwerfen, als wolle man ihn über den Boden rollen.

## 2. Die Sozialismus-Maschine

Im Kapitalismus beutet der Mensch den Menschen aus, im Sozialismus ist es umgekehrt – schrieb ein Leipziger Schüler in seinem Deutschaufsatz. Der Wunsch, mühelos nach oben zu kommen und auf Kosten anderer zu leben, ist nur allzumenschlich und wird in jedem politischen System angetroffen, Parteigänger hier – Geschäftemacher dort. Der ideale Tummelplatz für Drückeberger ist überall, wo Leistung sich nicht auszahlt. Der Traum der Müssiggänger und Faulpelze – in unserer Maschine ist er verwirklicht. Nehmen Sie Platz und machen Sie sich's bequem!

### Modell des Lastenaufzugs

Wir brauchen nichts als einen einfachen Lastenaufzug: eine Rolle mit Seil. An den beiden Seilenden bringen wir runde Holzscheiben als Sitze an, auf denen Herr Links und Herr Rechts (so möchte ich sie der Kürze halber nennen) sich niederlassen können. Zuerst muss das Gleichgewicht hergestellt werden, damit das Seil sich nicht zur Seite des Schwereren von beiden hin abwickelt. Das geht sehr einfach mit einem Beutel voll Sand. Sollte doch ein

kleiner Gewichtsunterschied zwischen links und rechts geblieben sein – immerhin wiegt ein grosses Sandkorn etwa 10 Milligramm – hält ein bisschen Reibung im Lager der Rolle (die bei der Bewegung überhaupt nicht ins Gewicht fällt) den Ruhezustand aufrecht. Stellen wir uns nun vor, dass die beiden plötzlich auf die Idee kommen, um die Wette am Seil hochzuklettern! Solche Ideen entstehen manchmal aus dem Augenblick, und man weiss nicht, woher sie kommen. Ich habe selbst erlebt, wie eine Gruppe seriöser Professoren, würdige Herren aus Deutschland und Italien, die ein Kongress in Genua zusammenggeführt hatte und die vor dem Abendessen noch ein wenig in den alten Treppenstrassen promenierten, plötzlich, wie auf ein Kommando, als