



Der perfekte Steinwurf

Wie oft ein Stein über die Wasseroberfläche hüpft, lässt sich mithilfe der Physik optimieren.

Denise Müller-Dum und Jens Kube

Eine spiegelglatte Wasseroberfläche und Kieselsteine am Ufer laden viele Menschen ein, Steine hüpfen zu lassen. Ein geeigneter Kieselstein springt – korrekt geworfen – mehrmals über das Wasser, bevor er schließlich abtaucht. Was den meisten ein harmloser Zeitvertreib ist, ist für andere ein Sport: Beim „Skimming“ geht es darum, eine möglichst große Distanz zu überwinden. Hier hält der Brite

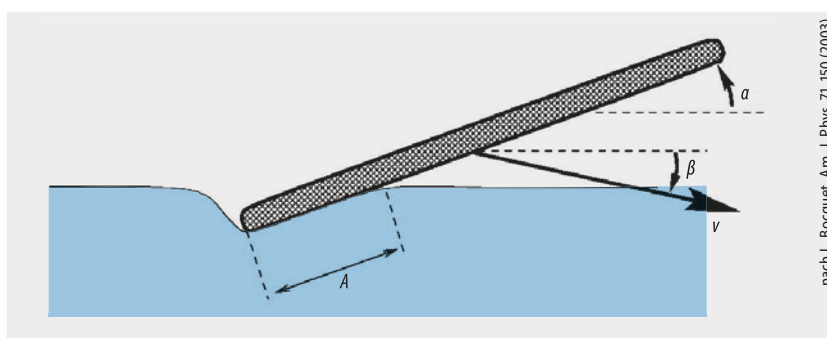
Dougie Isaacs seit 2018 den Weltrekord mit 122 Metern. Beim „Skipping“ zählt dagegen, wie viele Hüpfen vor dem Abtauchen stattfanden: Auf 88 Sprünge kam dabei 2013 der Amerikaner Kurt Steiner.

Die Frage nach den Voraussetzungen für einen idealen Wurf beantworten Profis und Hobbywerfer:innen gleich: Ein glatter, flacher Stein springt am besten, wenn er rotiert und mög-

lichst knapp über der Wasseroberfläche abgeworfen wird. Ein Blick auf die Physik bestätigt die Erfahrungswerte.

Damit der Stein springt, muss seine hintere Kante die Wasseroberfläche treffen. Dann treibt er wie ein Wasserski das Wasser vor sich her und hebt von der aufgetürmten Welle wie von einer Sprungschanze ab. Die Kollision von Stein und Wasseroberfläche lässt sich vereinfacht mit vier Parametern beschreiben: dem Anstellwinkel α des Steins, dem Winkel β zwischen Flugbahn und Wasseroberfläche im Moment des Auftreffens, derjenigen Fläche A des Steins, die in Kontakt mit dem Wasser steht, und mit seiner Geschwindigkeit v (Abb. 1).

Sobald der Stein auf das Wasser trifft, wirkt auf ihn eine Kraft. Diese ergibt sich aus dem Strömungswiderstand, der den Stein bremst, und der Auftriebskraft, die ihn emporhebt. Beide Kräfte sind proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit v und zur Fläche A , die von der Form des



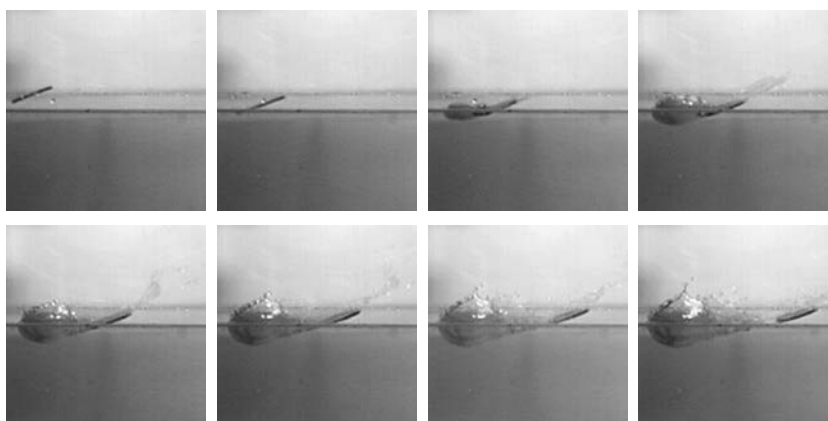
nach L. Bocquet, Am. J. Phys. 71, 150 (2003)

Abb. 1 Wenn der Stein (grau) auf das Wasser (blau) trifft, entscheiden der Anstellwinkel α , der Winkel zwischen Flugbahn und Wasseroberfläche β , die Kontaktfläche mit dem Wasser A und die Geschwindigkeit v darüber, wie seine Bewegung weitergeht.

Steins und seinem Anstellwinkel zur Wasseroberfläche abhängt. Darum ist es möglich, mithilfe der Kräfte die Bewegungsgleichungen zu formulieren. Um sie zu lösen, müssen aber die Form des Steins und sein Anstellwinkel zu jedem Zeitpunkt zumindest annähernd gut bekannt sein.

Aus stark vereinfachenden Annahmen ergibt sich eine minimale Abwurfgeschwindigkeit, damit der Stein springt. In erster Näherung muss die Auftriebskraft größer sein als die Gewichtskraft. Doch das ist nur Teil des Problems, weil der Stein bei jedem Wasserkontakt aufgrund des Strömungswiderstands kinetische Energie verliert. Daraus folgt eine maximale Zahl von Sprüngen in Abhängigkeit von der Wurfgeschwindigkeit. Demzufolge müsste Kurt Steiner den Stein bei seinem Rekord mit einer Geschwindigkeit von 18 m/s bei idealisierten Bedingungen geworfen haben, was durchaus realistisch ist.

Insbesondere die Annahmen über den Anstellwinkel α beeinflussen die Resultate solcher Berechnungen. Experimentell zeigte sich ein idealer Wert von 20° anhand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einer schnell rotierenden Aluminiumscheibe (Abb. 2). Dann bleiben Stein und Wasser am kürzesten in Kontakt, sodass der Energieverlust pro Sprung am geringsten ausfällt, was wiederum die Zahl der Hüpfen maximiert. Außerdem folgte aus einem Anstellwinkel von $\alpha = 20^\circ$ die größte Bandbreite an erfolgreichen Auftreffwinkeln β : Der Winkel zwischen Vorwärtsgeschwin-



aus C. Clanet et al., Nature 427, 29 (2004)

Abb. 2 Die Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigen, wie eine Aluminiumscheibe als Modell eines Steins mit dem Wasser wechselwirkt.

digkeit und Wasseroberfläche durfte sich zwischen 15° und 45° bewegen, dem maximalen untersuchten Bereich. Abweichungen vom optimalen Anstellwinkel reduzierten die Bandbreite. Unabhängig vom Anstellwinkel α führte der Wert $\beta = 20^\circ$ zum besten Sprungverhalten.

Der gyroskopische Effekt stabilisiert den Anstellwinkel während des Flugs und der Kollision: Aufgrund seiner Eigendrehung widersetzt sich der Stein Richtungsänderungen der Drehachse. Je schneller er rotiert, desto weniger reagiert er auf Kippmomente, die beim Aufprall und durch Luftbewegungen auftreten. Aus der Rotation folgt ein weiteres Phänomen: der Magnus-Effekt. Dabei führt eine Rotation im Uhrzeigersinn zu einer Rechtskurve und umgekehrt. Bewegt sich ein rotierender Körper durch ein Gas oder eine Flüssigkeit, ist die Geschwindigkeit auf der Seite, die

sich mit der Anströmung dreht, größer als auf der anderen Seite. Dieses Ungleichgewicht führt ähnlich wie bei einem Flugzeugflügel zu einem dynamischen Auftrieb, der bei dem springenden Stein aber nicht nach oben, sondern nach rechts beziehungsweise links wirkt und ihn nach und nach von der Wurfachse abdriften lässt.

Verschiedene Aspekte des Steinhüpfens haben in der Vergangenheit immer wieder die Wissenschaft interessiert. Dabei ging es aber weniger um ein besseres Verständnis der Freizeitbeschäftigung als vielmehr um Erkenntnisse, die auch für Luft- und Raumfahrt, den Schiffsmaschinenbau und das Militär relevant sind.

Die Autor:innen

Dr. Denise Müller-Dum und **Dr. Jens Kube**,
awk/jk – Agentur für Wissenschaftskommunikation, awkjk.de



Physik Journal

Dossier:
Physik im Alltag

Hier geht's direkt zum Dossier
Physik im Alltag:
... oder über
www.physik-journal.de



Bilder: Adobe Stock