

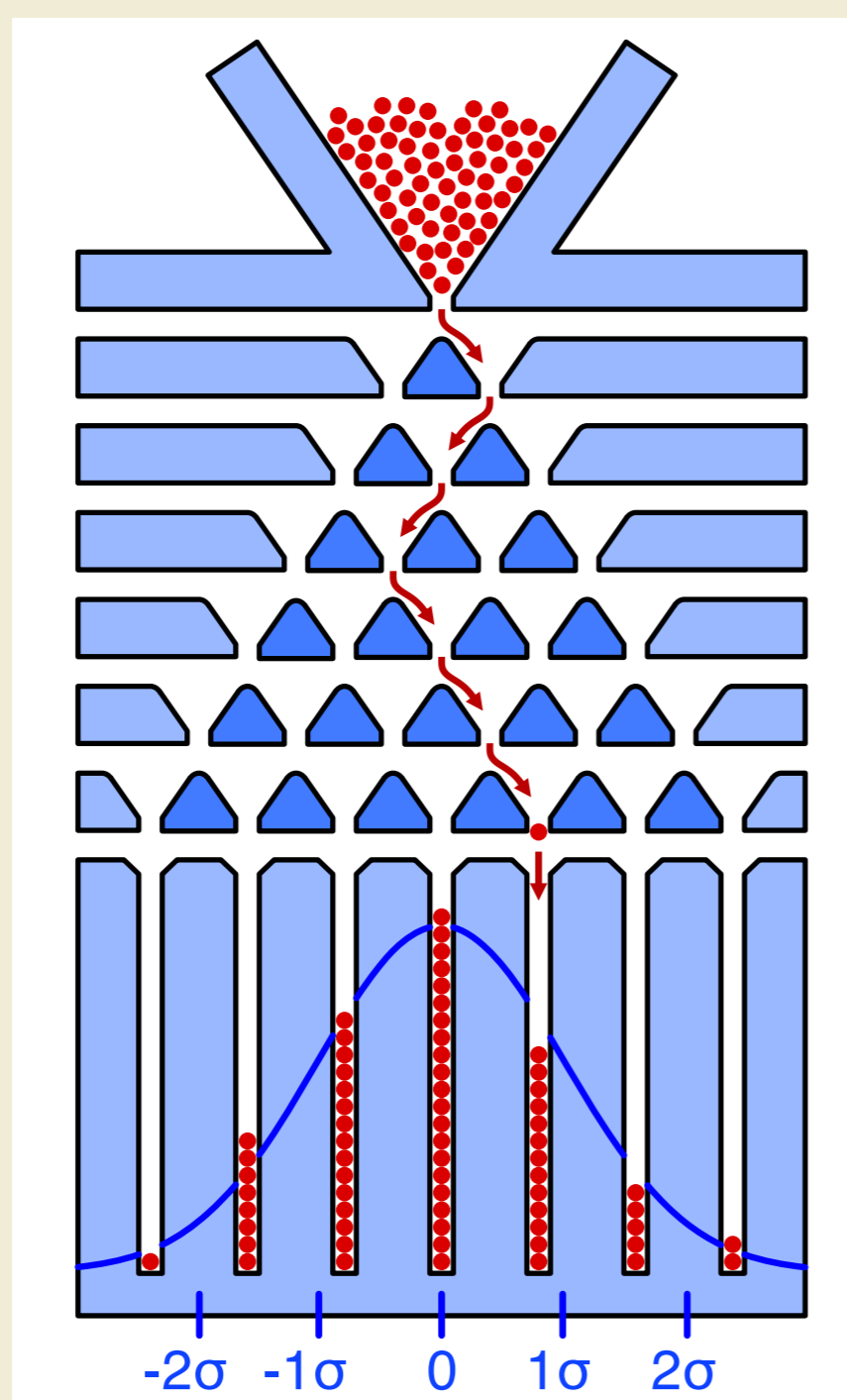
# Das Galton-Brett

## Zufallsbewegung von Kugeln im klassischen Galton-Brett

Das von Francis Galton 1874 erfundene Zufallsbrett besteht aus mehreren Reihen gegeneinander versetzter Hindernisse, die die vertikale Bewegung von herabfallenden Kugeln beeinflussen. Am unteren Ende sammeln sich die Kugeln in mehreren Behältern, sodass sichtbar wird, an welchen Stellen viele und an welchen wenigen Kugeln landen.

An jedem Hindernis rollt die Kugel entweder nach links oder nach rechts – im idealen Fall mit gleicher Wahrscheinlichkeit und unabhängig von den vorherigen Abzweigungen. Dieses Prinzip entspricht einem sogenannten *Random Walk*, der etwa auch das Hin- und Herborkeln einer betrunkenen Person beschreibt. Für eine einzelne Kugel ist der genaue Weg nicht vorhersagbar.

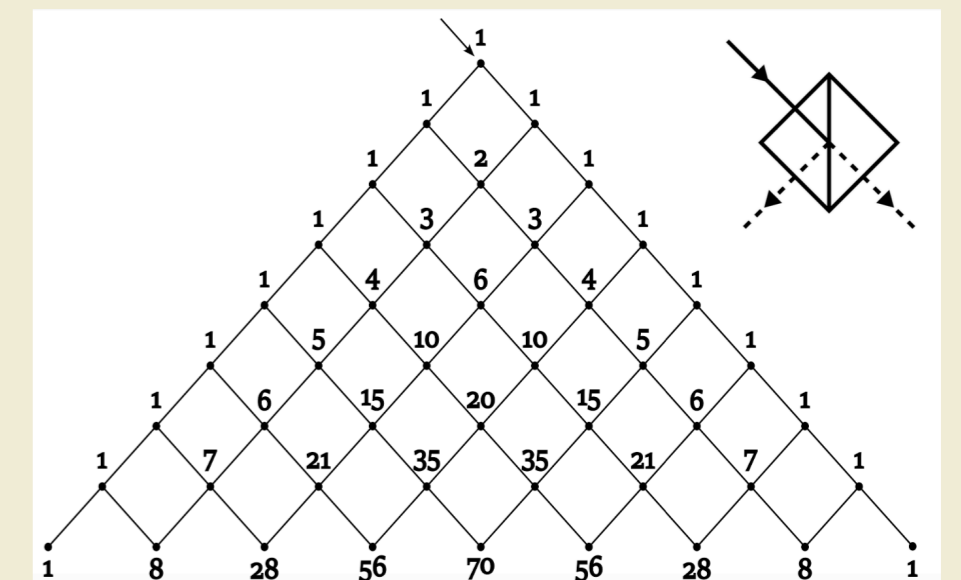
Lässt man jedoch viele Kugeln durch das Galton-Brett laufen, ergibt sich eine wohldefinierte Häufigkeitsverteilung der Kugeln in den Behältern: eine Binomialverteilung. Die meisten Kugeln landen in der Mitte, nur wenige an den Rändern. Im Grenzfall unendlich vieler Reihen geht diese Verteilung in eine Normalverteilung über – eine zentrale Grundform vieler statistischer Phänomene. Bereits bei genügend vielen Reihen lässt sich dieser Verlauf deutlich erkennen.



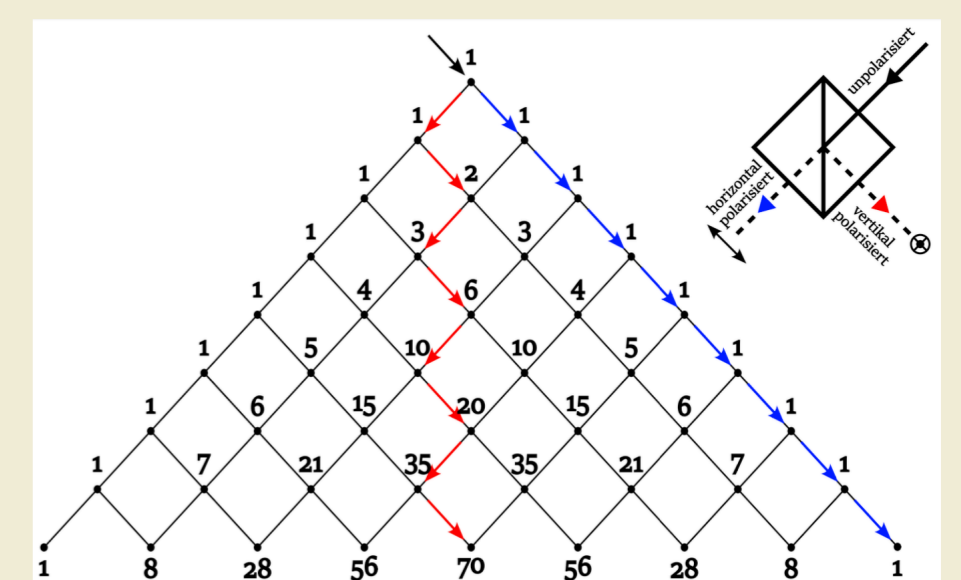
## Verhalten von Licht in optischen Galton-Brettern

Anstelle von Kugeln kann man auch untersuchen, wie sich Licht in einem optischen Galton-Brett verhält. Dieses lässt sich mithilfe von Strahlteilern realisieren; anstelle der Behälter verwendet man Schirme oder Photodetektoren, um die Lichtintensität an den verschiedenen Ausgängen zu messen.

An nicht-polarisierenden 50:50-Strahlteilern wird Licht in zwei gleiche Teilstrahlen zerlegt. Werden mehrere solcher Strahlteiler in einer Galton-Brett-Anordnung hintereinandergeschaltet, teilt sich das Licht an jedem Teiler erneut. Auf den inneren Pfaden gibt es, genau wie beim klassischen Zufallsbrett, mehrere (und unterschiedlich viele) Teilstrahlen, die sich überlagern und dadurch die Intensität des Lichts an den Ausgängen beeinflussen.



Besteht das optische Galton-Brett dagegen aus polarisierenden Strahlteilern (derselben Polarisationsbasis), verändert sich das Ergebnis grundlegend. Der erste Strahlteiler trennt das Licht in zwei orthogonale Polarisationsrichtungen, zum Beispiel horizontal (h) transmittiert und vertikal (v) reflektiert. An den folgenden Strahlteilern trifft dann jeweils entweder horizontal oder vertikal polarisiertes Licht auf, das entsprechend vollständig transmittiert oder reflektiert wird.

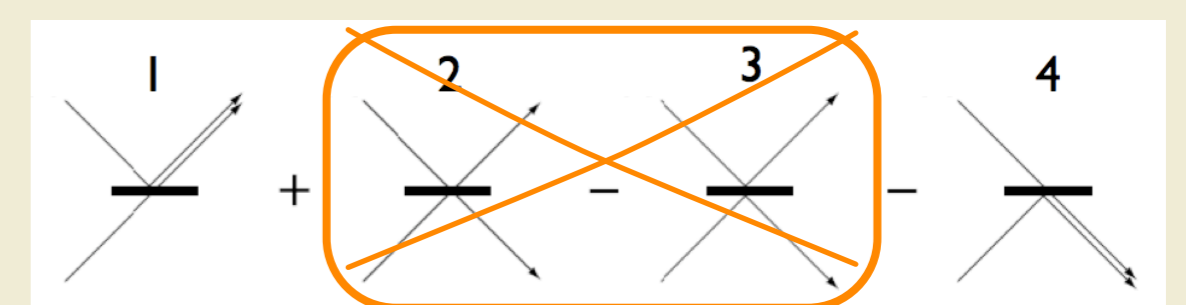


Dieses Experiment zeigt, dass die Polarisation eine Eigenschaft von Licht ist und sich nicht zufällig verhält – im Gegensatz zur Rechts-Links-Entscheidung beim klassischen Galton-Brett. Dies ist wiederum auch bei einzelnen Lichtteilchen (Photonen) der Fall, weshalb man diese beispielsweise zum sicheren Schlüsselaustausch verwenden kann (siehe Quantenkryptographie).

## Hong-Ou-Mandel-Effekt

Ein besonders interessantes Phänomen bei Einzelphotonen an Strahlteilern ist der Hong-Ou-Mandel-Effekt. Treffen zwei identische Photonen gleichzeitig von entgegengesetzten Seiten auf einen (nicht-polarisierenden) 50:50-Strahlteiler, so verlassen beide den Teiler gemeinsam auf derselben – jedoch zufälligen – Seite. Es tritt nie der Fall ein, dass sich die Photonen auf die beiden Ausgänge aufteilen.

Der Effekt wurde 1987 von Chung Ki Hong, Zheyu Jeff Ou und Leonard Mandel erstmals beobachtet. Er dient als empfindlicher Test für die Ununterscheidbarkeit von Quantenobjekten: Nur wenn die Photonen vollkommen identisch und gleichzeitig sind, tritt der Effekt auf; bei unterscheidbaren oder zeitlich versetzten Photonen verschwindet er.



QuantumCyclops at English Wikipedia, „Hong Ou Mandel effect“, Markierung hinzugefügt von Q-Bus, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

