

Spielwiese

# Thermodynamische Entzauberung

H. JOACHIM SCHLICHTING | CHRISTIAN UCKE

*Alle Jahre wieder werden zur Adventszeit die Weihnachtspyramiden entstaubt und im feierlichen Schein der Kerze in gemächliche Drehungen versetzt. Dabei können einem physikalisch motivierte Gedanken kommen.*

In der bevorstehenden Adventszeit drehen sich wieder in vielen Wohnzimmern kunstfertige Weihnachtspyramiden (Abbildung 1). Dieser traditionsreiche Weihnachtsschmuck sorgt jedoch mit seinen geschnitzten Engeln und anderen symbolträchtigen Figuren sowie dem warmen Kerzenlicht nicht nur für ein festliches Ambiente. Auch aus physikalischer Sichtweise hat er durchaus etwas zu bieten.

Die Kerzen verbreiten warmes Licht, wohlige Wärme und besorgen zudem den Antrieb. Man kann daher eine Weihnachtspyramide durchaus als einfache Variante einer Wärmekraftmaschine ansehen. Bei der Pyramide wird Gas durch Erwärmung in Bewegung gesetzt, während in einer Wärmekraftmaschine heißer Dampf eine Turbine durchströmt und sie dadurch antreibt.

Die Form der windmühlenflügelartigen Turbine legt auch einen Vergleich mit einem Windrad nahe. In diesem Fall nimmt man das bewegte Gas als gegeben und zapft daraus Bewegungsenergie für das Windrad ab. Macht man sich jedoch klar, dass auch der Wind letztlich ein Ergebnis von Lufterwärmungen aufgrund der Einstrahlung von Sonnenenergie darstellt, so lässt sich aus einer etwas globale-

ren Perspektive das Windrad sogar als Teil einer Wärmekraftmaschine auffassen.

Eine pfiffige, auf den ersten Blick ungewöhnliche Variante der Weihnachtspyramide zeigt Abbildung 2. Sie basiert auf einer karussellartigen Konstruktion, die jedoch keine himmlischen Heerscharen, sondern lediglich die brennenden Kerzen auf einer Kreisbahn herumführt, die für ihren eigenen Antrieb sorgen (Abbildung 2 links). Obwohl dieses

Karussell völlig ohne Turbine auskommt, nutzt es auch die Energie des durch die Kerzen erzeugten Stroms heißer Luft. Diese strömt gegen ein segelförmiges, schräg zum Luftstrom aufgestelltes Metalldach, das fest mit dem jeweiligen Kerzenhalter verbunden ist (Abbildung 2 rechts).

Der eine oder andere fühlt sich vielleicht an den kleinen Häwelmann von Theodor Storm erinnert, der sich ebenfalls durch einen selbst erzeugten Luftstrom fortbewegt: „Da lag der kleine Häwelmann mit offenen Augen in seinem Rollenbett und hielt das eine Beinchen wie einen Mastbaum in die Höhe. Sein kleines Hemd hatte er ausgezogen und hing es wie ein Segel an seiner kleinen Zehe auf; dann nahm er ein Hemdzipfelchen in jede Hand und fing mit beiden Backen an zu blasen. Und allmählich, leise, leise, fing es an zu rollen...“ [1].

Selbst die Form des als Segel benutzten Hemdes erinnert an die konkav gerundete Metallschürze. Gegen sie strömen die heißen Abgase der Kerze und werden dort seitlich abgelenkt. Dabei muss nach dem Trägheitssatz eine Kraft von der Metallschürze auf den Gasstrom ausgeübt werden, die eine gleich große Gegenkraft hervorruft. Die horizontale Komponente dieser Gegenkraft bewirkt ein Drehmoment auf den drehbar gelagerten Kranz



**Abb. 1** Eine klassische Weihnachtspyramide aus dem Erzgebirge.

des Karussells, auf dem sich die Kerzen befinden und führt zu der beobachteten Drehung.

Während der Luftstrom der Kerze senkrecht zur Bewegungsrichtung der Gondeln erfolgt, bläst der kleine Häwermann in Bewegungsrichtung, so dass man vielleicht an den Baron von Münchhausen erinnert wird, der sich am eigenen Schopfe aus dem Sumpf gezogen haben will. Doch auch Häwermanns Antrieb könnte wenigstens im Prinzip – einen hinreichend kräftigen Luftstrom vorausgesetzt – funktionieren: Zwar wird er beim Blasen einer bestimmten Luftportion gegen sein Segelhemd den Impuls  $-p$  auf sein Gefährt übertragen und damit eine Bewegung in Gegenrichtung bewirken. Durch die Reflexion am Segel wird der Impuls  $p$  der Luftportion jedoch nach  $-p$  umgekehrt, so dass das Gefährt den Vorwärtsimpuls  $+2p$  und damit insgesamt  $-p + 2p = p$  gewinnt und sich vorwärts bewegt. Entscheidend ist nur, dass die reflektierte Luft den Impuls  $p$  wegtransportiert.

Die Größen, welche die Antriebskraft bestimmen, lassen sich leicht abschätzen (Abbildung 3). Der Luftstrom, der auf die schräg angestellte Fläche auftrifft, wird zur Seite abgelenkt. Der Geschwindigkeitsvektor  $v$  des Luftstroms ändert sich dadurch in seiner Richtung um  $\Delta v$ , was einer Beschleunigung  $\Delta v/\Delta t$  entspricht. Während der Zeitspanne  $\Delta t$  wird eine Luftsäule der Länge  $\Delta l = v \cdot \Delta t$  und einer effektiven Querschnittsfläche  $A_{\text{eff}}$  abgelenkt.  $A_{\text{eff}}$  weicht je nach der Form des angeströmten Segels von der geometrischen Querschnittsfläche  $A$  ab. Es ist üblich  $A_{\text{eff}} = 1/2 c_w A$  zu setzen, wobei der Widerstandsbeiwert  $c_w$  eine empirisch zu bestimmende Konstante ist. Im vorliegenden Fall eines leicht konkaven Profils ist  $c_w$  etwas größer als 1. Der Luftsäule entspricht eine Masse  $\Delta m = \rho \cdot A_{\text{eff}} \cdot v \cdot \Delta t$ , die um so größer ist, je schneller sie strömt ( $\rho$  ist die Dichte der heißen Luft). Eine gleich große aber entgegengesetzt gerichtete Kraft wirkt (gemäß *actio = reactio*) auf den Körper zurück und macht sich im erwünschten Auftrieb bemerkbar. Für dessen Betrag gilt

$$F_A = \Delta m \Delta v/\Delta t = \rho A_{\text{eff}} v \Delta v = 1/2 c_w \rho A v^2. \quad (1)$$

Beim letzten Gleichheitszeichen wurde die Proportionalität  $\Delta v \sim v$  ausgenutzt.

Entscheidend sind also die Abhängigkeit des Auftriebs und damit des Antriebs von der effektiven Querschnittsfläche des heißen Luftstroms und vom Quadrat der Geschwindigkeit der Strömung. Letztere ist im Wesentlichen durch die Temperaturdifferenz zwischen Flamme und Umgebung bestimmt.

### Vom Spiel zur technischen Nutzung

Vielleicht hat die Weihnachtspyramide Pate gestanden bei der Entwicklung moderner Aufwindkraftwerke. Jedenfalls werden dort ebenfalls heiße, aufsteigende Luftströme genutzt, um Turbinen in Bewegung zu setzen und damit elektrische Energie zu produzieren. Im Unterschied zur Weihnachtspyramide wird die Luft nicht durch Verbrennung von

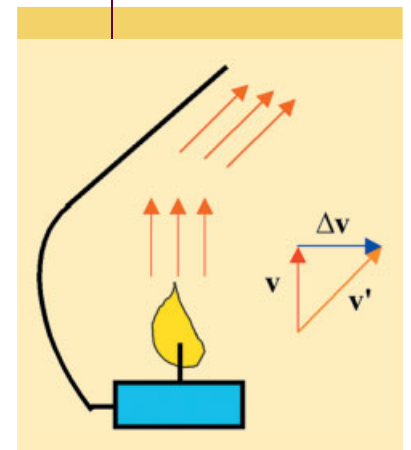


**Abb. 2** Moderne Form einer Weihnachtspyramide. Der tangential zum Radkranz abgelenkte heiße Luftstrom führt zu einer Bewegung in entgegengesetzter Richtung.

Rohstoffen hervorgerufen, sondern – ganz umweltfreundlich – durch eine solare Heizung. Ein Aufwindkraftwerk besteht aus einem großen, kreisförmigen Glasdach, unter dem sich die Luft auf Grund des Treibhauseffektes erwärmt. Die umgebende kalte und daher dichtere Luft wirkt von außen auf die warme Luft und drückt sie in einen Kamin im Zentrum des Glasdaches. Der Kamineffekt verstärkt den Auftrieb zusätzlich. Er wächst mit der Höhe des Kamins. Die sehr schnell aufsteigende Luft treibt eine im unteren Teil des Kamins angebrachte Turbine, die Strom erzeugt (Abbildung 4).

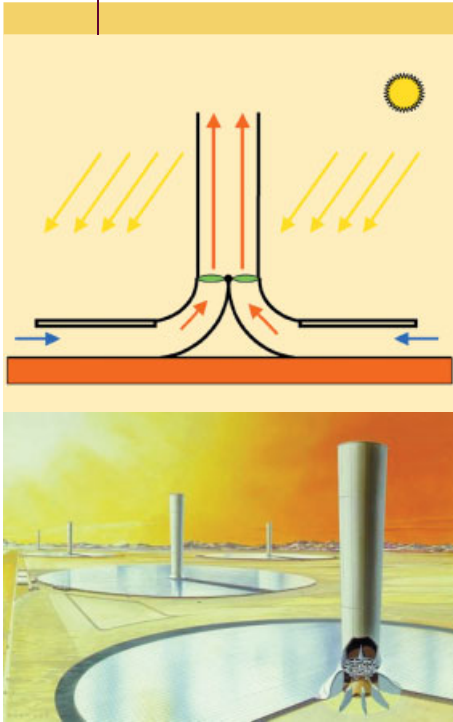
Der deutsche Ingenieur Jörg Schlaich hat zu dieser Art der Kraftwerke entscheidende Beiträge geliefert [2]. Das Aufwindkraftwerk bei Manzanares in Spanien erbrachte von 1982 bis 1988 eine elektrische Leistung von bis zu 50 kW. Im Innern des 195 m hohen Turms mit einem Durchmesser von 5 m befand sich ein vierflügeliges Windrad mit einem Rotordurchmesser von 10 m. Der Aufwind erreichte bei Betrieb eine Geschwindigkeit bis zu 9 m/s, ohne Last bis zu 15 m/s. Das Kraftwerk wurde 1989 demontiert, nachdem ein Sturm den 200 Meter hohen Kamin umgeworfen hatte. In der australischen Wüste soll demnächst das erste kommerzielle Aufwindkraftwerk mit einem Kamin von 1000 m Höhe und einer Leistung von über 100 MW entstehen [3]. Die Windturbinen, durch welche die erwärmte Luft mit bis zu 60 km/h

**ABB. 3 | ANTRIEB**



**Schematische Darstellung des Antriebs. Rechts die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit bei der Ablenkung des Luftstroms.**

**ABB. 4 | AUFWINDKRAFTWERK**



**Schematisierte Darstellung der Beschleunigung der aufsteigenden warmen Luft in einem Aufwindkraftwerk (oben). Studie eines zukünftigen Parks mit Aufwindkraftwerken (Grafik: Schlaich, Bergermann und Partner).**

jagt, soll 1500 GWh an Energie pro Jahr erzeugen, womit 200 000 Menschen versorgt werden könnten. Der Bau stellt eine enorme ingenieurwissenschaftliche Herausforderung dar, insbesondere wenn man an die Standfestigkeit des Kamins gegenüber Belastungen durch den Wind denkt.

Auch wenn die Weihnachtspyramide in der einen oder anderen Form aus physikalischer Sicht nichts weiter als eine Art Aufwindkraftwerk darstellt, sollte man darin keine Entzauberung der festlichen Stimmung sehen. Die Analogie motiviert allenfalls eine physikalische Abschweifung der Gedanken bei der Betrachtung der gemächlich rotierenden Pyramide.

### Zusammenfassung

Weihnachtspyramiden lassen sich aus physikalischer Sicht mit Wärmekraftmaschinen vergleichen, deren Antriebskraft man mit einfachen Mitteln abschätzen kann. In großtechnischem Maßstab lassen sich sogar Parallelen zu modernen Aufwindkraftwerken ziehen.

### Stichwörter

Weihnachtspyramiden, Wärmekraftmaschinen, Aufwindkraftwerke.

### Literatur

- [1] Th. Storm, Der kleine Häwelmann, in: Gesammelte Werke. Gedichte, Märchen und Spukgeschichten, München 1981, S. 199.
- [2] J. Schlaich, Das Aufwindkraftwerk, DVA, Stuttgart 1994.
- [3] [www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/lis/11777/1.html](http://www.heise.de/tp/deutsch/inhalt/lis/11777/1.html)

### Die Autoren

Hans Joachim Schlichting und Christian Ucke schreiben für Physik in unserer Zeit seit vielen Jahren Artikel für die Rubrik Spielwiese.

#### Anschriften

Prof. Dr. Hans Joachim Schlichting, Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster. [schlichting@uni-muenster.de](mailto:schlichting@uni-muenster.de).

Dr. Christian Ucke, TU München, Physikdepartment E20, 85747 München. [cucke@ph.tum.de](mailto:cucke@ph.tum.de).