

Die Lichtmühle

Von Wolfgang Bürger

Auf den ersten Blick ähnelt sie einer aufrecht stehenden Glühbirne, die "Lichtmühle", aber zu leuchten ist nicht ihre Aufgabe. Im Sonnenlicht oder im Schein einer Rotlichtlampe dreht sich in ihrem Innern ein leichtes Flügelrad mit einer gläsernen Pfanne als Lager auf einer Nadelspitze. Die vier Flügel des Rotors sind quadratische Scheiben aus Glimmer oder Aluminium, die auf ihrer Vorderseite - in Laufrichtung - weiß und auf der Rückseite schwarz gefärbt sind. Sie treiben das Rad um so schneller, je heller sie bestrahlt werden: ein Strahlungsmotor. Lässt sich damit die Intensität von Strahlung messen? Im Prinzip ja; die Lichtmühle leitet sich von einem genauen und empfindlichen Strahlungsmesser ab, und dieser Bedeutung verdankt sie ihren zweiten Namen: Radiometer. Aber die Strahlung wirkt durch einen komplizierten Mechanismus, und die Frage nach dieser Wirkungsweise hat mehrere Jahrzehnte lang namhaften Physikern, unter ihnen James Clerk Maxwell und Albert Einstein, Rätsel aufgegeben.

Die Vorgeschichte begann mit dem Physiker und Ingenieur Augustin Jean Fresnel (1788-1827), der in der Öffentlichkeit weniger durch seinen optischen Interferenzversuch zum Nachweis der Wellennatur des Lichts als durch die Erfindung der Zonenlinsen bekannt geworden ist, die seinen Namen tragen. Die großen, flachen Glaslinsen bündeln seit über einem Jahrhundert in aller Welt den Schein der Leuchttürme. Fresnel entdeckte die Radiometerkraft 1825. Mit der Physik seiner Zeit konnte er ihren Grund nicht verstehen, aber durch Versuche bei verschiedenen Drücken einige denkbare Erklärungen ausschließen: Was das Flügelrad zum Drehen bringt, ist weder eine raumerfüllende Gasströmung noch verdampfendes Material aus den beheizten Oberflächen.

Der Erfinder des Spielzeugs ist William Crookes (1832-1919), ein Privatgelehrter und aussergewöhnlich erfolgreicher Experimentator. Er war seit 1863 Fellow der Royal Society of London und ab 1913 ihr Präsident. 1861 hatte er das chemische Element Thallium mit der Ordnungszahl 81 durch seine grüne Linie im Spektrum gefunden. Als er zwölf Jahre später damit beschäftigt war, das Atomgewicht des neuen Elements zu bestimmen und dazu mit einer Vakuum-Waage Substanzproben von höherer als der Temperatur der Umgebung abwog, bemerkte er, dass die Hitze die Gravitationskraft zu vermindern schien. Er hatte die Radiometerkraft wiederentdeckt. Im historischen Teil seiner wissenschaftlichen Arbeit von 1873 bezog er sich auf Fresnel, deutete die Kraft aber als eine rätselhafte Anziehung oder Abstossung durch Wärme.

Ein Effekt des Lichtdrucks? Was verursacht die Radiometerkraft? Ist es der Strahlungsdruck des Lichtes, dessen Existenz Maxwell in einer ebenfalls 1873 veröffentlichten Arbeit aus den Differenzialgleichungen des elektromagnetischen Feldes folgerte? Wenn wir der Einfachheit halber annehmen, dass die hellen Vorderseiten der Radiometerflügel die einfallende Strahlung wie vollkommene Spiegel reflektieren, während die dunklen Rückseiten sie vollständig absorbieren, müsste die Strahlung nach dem Impulserhaltungssatz auf die weißen Seiten einen genau doppelt so großen Druck ausüben wie auf die schwarzen, der Lichtdruck das Flügelrad daher andersherum drehen als in den käuflichen Radiometern. Außerdem ist die Druckkraft der Sonnenstrahlen viel zu klein, um die Reibung im Nadellager zu überwinden. Diese Reibung ist erheblich, wie man leicht nachprüfen kann: Man lässt die ganze Lichtmühle in der Hand horizontal kreisen und stellt fest, dass - nur durch Reibung im Lager vermittelt - das Flügelrad mühelos auf hohe Drehzahlen kommt.

Gleichwohl sind inverse Radiometer, die vom Lichtdruck angetrieben werden, vielfach realisiert worden. Sie laufen aber erst, wenn das Gas aus dem Glaskolben nahezu restlos entfernt ist, bei Hochvakua von höchstens 10^{-7} Millibar Druck. Und ihr Flügelrad wird, statt auf einer Nadelspitze zu liegen, leicht drehbar an einem langen, dünnen Torsionsfaden aufgehängt.

Das Experimentum crucis: Der Strahlungsdruck des Lichtes wirkt als eine Kraft von außen auf die Flügel der Lichtmühle, ähnlich wie der Wind auf die Segel eines Segelschiffs. Würde das Flügelrad vom Lichtdruck angetrieben, sollte es den Glaskolben durch die Reibung im Lager in der gleichen Drehrichtung mitziehen, vorausgesetzt, dieser könnte sich frei bewegen. Erwärmt

das Licht dagegen nur die Flügel, liefert also nur Energie zum Antrieb, ohne selbst mit nennenswerter Kraft auf die Flügel zu drücken, kann das Flügelrad nur in Drehung kommen, wenn es sich vom Gehäuse abstößt. Dann müsste es ein Rückstoßmoment geben, das den Glaskolben in die entgegengesetzte Richtung zu drehen bestrebt ist.

Arthur Schuster, ein Mitarbeiter des bedeutenden Hydrodynamikers Osborne Reynolds (nach dem die Reynolds-Zahl benannt ist) in Manchester, führte 1876 das entscheidende Experiment mit einem frei drehbar aufgehängten Radiometer durch. Flügelrad und Glaskolben drehten sich bei Bestrahlung in verschiedene Richtungen. Also ist es nicht der Lichtdruck, der das Rad antreibt, sondern ein innerer Mechanismus des Radiometers.

Die Molekülströmung: Am einfachsten ist die Theorie, wenn man die mittlere freie Weglänge der Moleküle so groß annimmt, dass man Wechselwirkungen der Luftmoleküle untereinander vernachlässigen kann. Das ist bei einem Druck von höchstens 10^{-3} bis 10^{-2} Millibar der Fall. Die Luftmoleküle prasseln bei ihrer Wärmebewegung von beiden Seiten auf den Flügel. Sie verlassen aber die heißere schwarze Seite im Mittel mit höherer Geschwindigkeit und erteilen ihr dabei eine geringfügig höhere Rückstosskraft. Diese Differenz der Stoßkräfte setzt das Flügelrad in Bewegung, und zwar mit der weissen Seite voraus.

Martin Knudsen (1871-1949), lange Jahre theoretischer Physiker in Kopenhagen, hat aus diesen Überlegungen eine Formel für seinen Strahlungsmesser theoretisch hergeleitet (siehe Kasten auf der nächsten Seite): Die Radiometerkraft pro Flächeneinheit eines Flügels ist dem Gasdruck proportional und hängt außerdem nur vom Verhältnis der Temperaturen von schwarzer Flügelfläche und Umgebung ab. Diese Formel gilt allerdings nur bei niedrigeren Drücken, als sie in käuflichen Lichtmühlen vorliegen.

Erhöht man den Gasdruck im Kolben über die 10^{-2} Millibar hinaus, bei denen noch freie Molekülströmung herrscht, steigt auch die Radiometerkraft zunächst stark an und erreicht ihre grössten Werte bei Drücken, die zehn- bis hundertmal größer sind. Solche Drücke herrschen vermutlich in den käuflichen Lichtmühlen (die Hersteller machen darüber keine Angaben). Der Radiometereffekt wird durch Moleküle verstärkt, die über den Rand der Flügel von der kälteren zur wärmeren Seite wandern ("thermisches Kriechen"). Mehr und mehr wird die Radiometerkraft an den Flügelrändern aufgebracht, was schon Reynolds und Maxwell bemerkten und was Gaskinetiker bis in die jüngste Zeit beschäftigt.

Unter gleich bleibenden äusseren Bedingungen stellt sich auf die Dauer eine konstante Rotationsgeschwindigkeit ein. Offensichtlich ist es die Geschwindigkeit, bei der die Radiometerkraft mit der Reibungskraft im Nadellager im Gleichgewicht ist.

Rückdrehungen werden auch in gängigen Radiometern beobachtet. Offensichtlich kann die Temperatur der schwarzen Flächen unter die Umgebungstemperatur sinken. Ohne die Temperaturen im Innern des Radiometers zu messen, kann man allerdings nur aus den Beschleunigungen des Flügelrads auf die wirkenden Drehmomente und von diesen auf die Temperaturen der Flügel zurück schliessen. Damit sich das Flügelrad wenigstens kurze Zeit im entgegengesetzten Sinn dreht, befördert man das laufende Radiometer an einen schattigen Ort, wo es sich durch Ausstrahlung abkühlen kann, und bringt das Flügelrad zugleich durch vorsichtige Gegenbewegung mit Hilfe der Reibung im Lager zum Stehen. Überraschend setzt es sich aus der Ruhe von selbst wieder in Bewegung und dreht sich einige Sekunden lang in Gegenrichtung. Also muss vorübergehend ein rücktreibendes Drehmoment gewirkt haben. Da sich die dunklen Flächen durch Strahlung rascher erwärmen, kühlen sie sich auch durch Strahlung schneller ab, offenbar bis unter die Umgebungstemperatur. Einige Autoren haben über minutenlange Rückdrehungen von Lichtmühlen im Gefrierfach eines Kühlschranks oder unter der Wirkung von Kältespray berichtet, die ich an meinen Lichtmühlen nicht bestätigen kann.

In Experimentierbüchern für die Jugend findet sich eine Anleitung zum Selbstbau einer "Lichtmühle". Man klebe ein Flügelrad aus Aluminium - Haushaltsfolie zusammen und hänge es an einem dünnen und doch monatelang haltbaren Faden aus festgewordenem UHU - Kleber auf. Im Schein einer Rotlichtlampe dreht es sich bei Atmosphärendruck etwas unvorhersehbar mal in die eine und mal in die andere Richtung. Es bringt wenig, die Flügel einseitig zu

schwärzen. Der Wirkungsgrad lässt sich aber wesentlich verbessern, wenn man die Flügel schräg stellt wie die Flügel einer erzgebirgischen Weihnachtspyramide. Dadurch wird nahe gelegt, dass diese "Lichtmühle" in Wirklichkeit eine thermische Aufwind - Turbine ist, die ihren Antrieb aufsteigender Warmluft verdankt. In der Tat würden echte Radiometer auch bei so genannter "Schwereelosigkeit" in einem "Spacelab" arbeiten, während dieser Typ "Lichtmühle" dort den Dienst verweigert.