



# Seminararbeit

Thema: Lichtmühle und Lichtdruck

Verfasser/in: Anja Müllner

Leitfach: Mathe-Physik-W-Seminar

Seminarkürzel: 2MPH\_W

Lehrkraft: Hr. Dr Grillenbeck

Abgabe der schriftlichen Arbeit am:

[Datumsstempel Sekretariat]

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:

\_\_\_\_.\_\_\_\_. 20 \_\_\_\_

<i>Bewertung:</i>	<i>Note</i>	<i>in Worten</i>	<i>Punkte</i>		<i>Punkte</i>
<i>Schriftliche Arbeit:</i>				x 3 =	
<i>Präsentation:</i>				x 1 =	
				<i>Gesamtpunktzahl =</i>	
				<i>Gesamtpunktzahl : 2 =</i>	
<i>Gesamtleistung:</i>				<i>Gesamtpunktzahl : 4 =</i>	

\_\_\_\_\_  
Unterschrift der Lehrkraft

# Inhaltsverzeichnis

1	Lichtmühle	
1.1	Einleitung	1
1.2	Aufbau	1
1.3	Geschichte	2
1.4	Experimente	4
1.4.1	Reaktion der Lichtmühle auf Wärme	4
1.4.2	Reaktion der Lichtmühle auf Kälte	5
1.4.3	Verschiedene Lichtquellen	6
1.4.4	Verschiedene Abstände zur Lichtquelle	7
1.4.5	Variieren des Vakuums	9
1.5	Funktionsweise	10
1.6	Berechnung des Lichtdrucks	12
1.7	Schlussfolgerung	16
2	Anhang	17
3	Literaturverzeichnis	17

# 1 Lichtmühle

## 1.1 Einleitung

Die Lichtmühle (auch Lichtrad, Sonnenmühle oder Radiometer genannt) ist eine beliebte Dekoration für die Fensterbank, eine kleine Glaskugel in der sich ein meist vierarmiges Flügelrad befindet, welches sich im Sonnenschein beginnt zu drehen.

Jedoch kennen nur die Wenigsten die physikalische Funktionsweise einer Lichtmühle. Ich selbst besitze bereits seit einiger Zeit eine Lichtmühle ohne zu wissen, wie genau die Drehung des Rades zustande kommt.

Mit diesem Teil der Arbeit soll durch einige Experimente das Verhalten der Lichtmühle unter verschiedenen Umständen erforscht und ein physikalischer Einblick in die Funktionsweise einer Lichtmühle geboten werden.

## 1.2 Aufbau

Die Lichtmühle besteht aus einer Glaskugel, in der sich vier Flügel befinden, die in der Mitte der Kugel auf einer Nadelspitze gelagert sind. Dadurch ist das Flügelrad sehr leicht drehbar und es reichen schon geringe Kräfte, um eine Drehung zu erzeugen. Auf der Nadel befindet sich zudem ein Glashütchen, welches von einem Glasrohr umgeben ist, um zu verhindern, dass es herunterfällt, wenn die Lichtmühle gekippt oder auf den Kopf gestellt wird.



Die einzelnen Flügel bestehen aus einer meist durch Ruß geschwärzten Seite und einer durch spiegelnde Folie Licht reflektierenden Seite.

Abb. 1 Lichtmühle

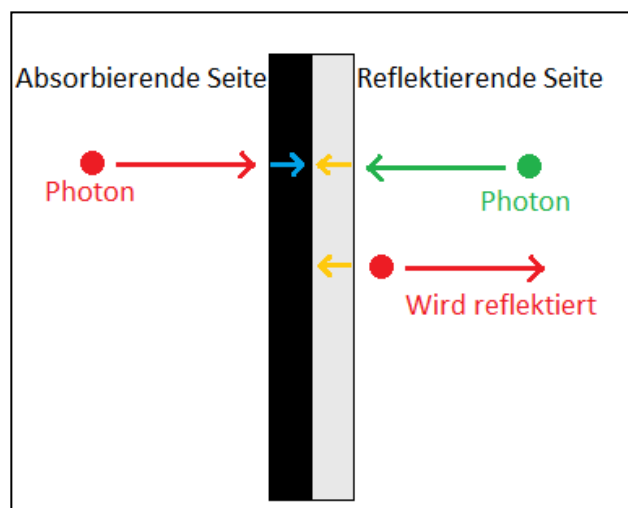
In der Glaskugel selbst befindet sich ein Vakuum von meist zwischen 5 und 50 Pascal – also zwischen 0.005% und 0.05% des Normaldrucks.

### 1.3 Geschichte

Die Lichtmühle wurde im Jahr 1873 von dem britischen Physiker und Chemiker William Crookes erfunden. Ursprünglich nannte Crookes seine Erfindung Radiometer, da es den Strahlungsdruck nachweisen und messen sollte. Sobald Photonen auf die schwarze Seite der Flügel treffen, wird die Strahlung absorbiert, bei der hellen Seite wird sie reflektiert. Dadurch wird ein einfacher Impuls auf die schwarze Seite übertragen und zwei jeweils entgegengesetzte Impulse auf der reflektierenden Seite, wodurch sich die Lichtmühle anfangen würde zu drehen. Diese intuitive Erklärung wurde zunächst akzeptiert, auch wenn einige Physiker, wie James Clark Maxwell, äußerten, dass sie eigentlich den Lichtdruck für zu gering hielten, um alleine eine solch schnelle Drehung verursachen zu können.

Schon kurze Zeit später wurde jedoch klar, dass alles andere als der Rückstoß der einzelnen Photonen für die Drehung verantwortlich sein kann.

Wenn man davon ausgeht, dass durchschnittlich gleich viele Photonen die dunkle, wie auch die spiegelnde Seite treffen, würde, wie in der Abbildung dargestellt, eine Kraft in Richtung der reflektierenden Seite herrschen:



Durch das Aufprallen der Photonen an der absorbierenden Seite entsteht eine Kraft nach rechts (blau), durch das Aufprallen an der reflektierenden Seite eine gleichgroße, entgegengesetzte Kraft nach links (orange).

Diese Kräfte gleichen sich aus, somit bleibt noch die Kraft, die durch das Reflektieren des Photons an der spiegelnden Seite entsteht, welche nach links zeigt. Somit sollte sich die Lichtmühle also in die Richtung der dunkleren Seite drehen.

Allerdings hat man erst einige Zeit später bemerkt, dass das gar nicht der Fall ist: Stellt man eine Lichtmühle in die Sonne, dreht sie sich in die Richtung der spiegelnden Seite.

Somit kann der Strahlungsdruck nicht nur nicht verantwortlich für die Drehung sein, sondern es muss eine andere Kraft existieren, die noch deutlich stärker ist als die des Strahlungsdruckes, um diese auszugleichen und zusätzlich die Lichtmühle in die Richtung der spiegelnden Seite zu drehen.

Nach der Entdeckung, dass, je größer der Anteil an Infrarotstrahlung ist, die Drehbewegung umso schneller wird, suchte unter anderem der britische Physiker Osborne Reynolds nach einer neuen Erklärung. Er hatte zuvor einen Effekt entdeckt, welcher bei porösen Festkörpern auftritt: Herrschen auf den beiden Seiten des porösen Körpers unterschiedliche Temperaturen, so strömt Gas (bzw. Luft) durch den Körper in Richtung der wärmeren Seite. Das gleiche könnte bei der Lichtmühle der Fall sein: Die dunkle Seite absorbiert die Photonen und wird dadurch aufgewärmt, die reflektierende Seite jedoch bleibt kühl. Da bei der Lichtmühle die Flügel nicht durchlässig sind, strömt die Luft immer noch von der kälteren zur wärmeren Seite, nur diesmal um die Kanten der Flügel herum. Die Strömung würde die Flügel in die Richtung der reflektierenden Seite anschieben, passend zu der Beobachtung. Allerdings befindet sich in der Lichtmühle ein relativ hohes Vakuum, um die Reibung an der Luft zu reduzieren, sodass sich die Flügel leichter drehen können. Dadurch ist jedoch auch nicht genug Luft vorhanden, als dass sich ein solcher Strömungseffekt ausbilden könnte. Somit war die Frage nach der Ursache der Drehung der Lichtmühle immer noch nicht beantwortet.

## 1.4 Experimente

Klar ist, dass die Ursache der Drehung nicht mit dem Strahlungsdruck zusammenhängen kann, da die Drehrichtung ansonsten umgekehrt wäre. Das Vakuum innerhalb der Lichtmühle ist zu stark, als dass Strömungseffekte entstehen könnten, die die Flügelblätter in Bewegung versetzen könnten.

Trotzdem scheint es, als ob die Drehung mit Wärme in Verbindung stehen könnte: Bekanntlich erhitzen sich dunkle Oberflächen (wie die rußige Seite der Flügelblätter) schneller als reflektierende, bzw. helle Oberflächen, da sie das meiste Licht nicht reflektieren sondern absorbieren und dessen Energie zu Wärme umwandeln.

Daher wäre es naheliegend, dass der Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten der Flügelblätter für eine Drehung verantwortlich ist.

Die nachfolgenden Experimente werden zum einen diese Theorie beweisen und zum anderen darlegen, wie die Lichtmühle auf verschiedene Lichtquellen, wie LED-Lampen reagiert, den Zusammenhang zwischen Entfernung bzw. Intensität der Lichtquelle und der Geschwindigkeit der Drehung demonstrieren, sowie die Wichtigkeit des extrem starken Vakuums innerhalb der Lichtmühle zeigen.

### 1.4.1 Reaktion der Lichtmühle auf Wärme

In diesem Experiment (Film [1]) soll herausgefunden werden, ob überhaupt Licht für das Drehen einer Lichtmühle notwendig ist. Dazu wurde in einem abgedunkelten Raum (sodass die Lichtmühle in Ruhe ist) ein Föhn auf der höchsten Hitzestufe und mit der langsamsten Luftgeschwindigkeit nah an die Lichtmühle herangehalten, um sie zu erwärmen. Obwohl keine Lichtquelle im Raum ist, fängt die Lichtmühle zunächst langsam, dann zunehmend schneller an, sich mit der spiegelnden Seite voran zu drehen. Nach einiger Zeit wird die Drehung wieder langsamer, bis die Lichtmühle nach etwa 1,5 Minuten wieder zum Stehen kommt.

Anschließend wird der Föhn abgeschaltet, sodass die Lichtmühle wieder abkühlt. Dabei fängt sie an, sich in die umgekehrte Richtung zu drehen, also mit der rußigen Seite voran. Nach etwa 3 Minuten halten die Flügelblätter wieder an.

In dem Raum, in dem das Experiment durchgeführt wurde, gab es keine Lichtquelle, durch die die Lichtmühle in Bewegung hätte gesetzt werden können. Das Licht, welches im Video zu sehen ist, wurde durch eine schwache Taschenlampe erzeugt, die alleine nicht in der Lage gewesen wäre die Lichtmühle zu drehen.

Das Experiment wurde auch ohne die Lampe durchgeführt, wodurch eine Videoaufnahme jedoch unmöglich wurde, mit dem gleichen Ergebnis.

Daher ist bewiesen, dass die Drehung der Lichtmühle nichts mit dem Licht an sich zu tun haben kann.

Stattdessen muss die Ursache der Bewegung durch Thermik zu erklären sein, da allein durch die wärmere Luft aus dem Föhn eine Drehung der Flügelblätter zu beobachten ist.

#### 1.4.2 Reaktion der Lichtmühle auf Kälte

Nachdem das Verhalten der Lichtmühle bei sich erhöhender Temperatur untersucht wurde, wäre es nun interessant herauszufinden, ob es auch eine Reaktion auf eine fallende Temperatur gibt. Dazu wurde eine Lichtmühle in einen Kühlschrank gestellt, wodurch die Temperatur innerhalb des Glaskolbens anfang zu sinken (Film [2]). Nach kurzer Zeit begannen die Flügelblätter sich zu drehen, jedoch mit der dunklen Seite voran.



Abb. 3 Föhn bringt Lichtmühle zum Drehen

Es erscheint zunächst merkwürdig, dass scheinbar nicht nur Hitze, sondern auch Kälte zu einer Drehung der Lichtmühle führen kann.

Nach einigen Minuten im Kühlschrank kamen die Flügel wieder zum Stehen. Als die Lichtmühle dann wieder aus dem Kühlschrank herausgenommen wurde, sie also anfang sich wieder aufzuwärmen, drehte sie sich wieder mit der spiegelnden Seite voran (Film [3]).

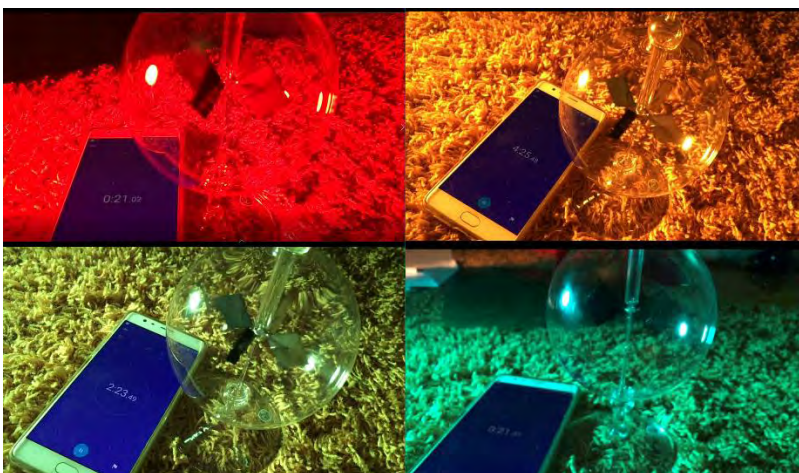
#### 1.4.3 Verschiedene Lichtquellen

Durch die vorherigen Experimente wurde bereits gezeigt, dass die Lichtmühle durch Thermik funktioniert. Ändert sich die Umgebungstemperatur, fangen die Flügelblätter an, sich zu drehen.

Normalerweise dreht man seine Lichtmühle aber nicht, indem man sie in einen Kühlschrank stellt, sondern mit einer Lichtquelle wie z.B. der Sonne. (Sonnen-) Licht enthält neben sichtbarem Licht auch Photonen mit einer Wellenlänge im Infrarotbereich ( $>750\text{nm}$ ). Diese sind in der Lage, Oberflächen zu erwärmen, indem das Material sie absorbiert und ihre Energie in Wärme umgewandelt wird.

Nachdem durch die vorherigen Experimente bewiesen ist, dass die Lichtmühle aufgrund von Temperaturunterschieden in Bewegung gesetzt wird, liegt es nahe, dass die Infrarotstrahlung verantwortlich für die Drehung der Flügel ist, da sie diese aufheizen könnte.

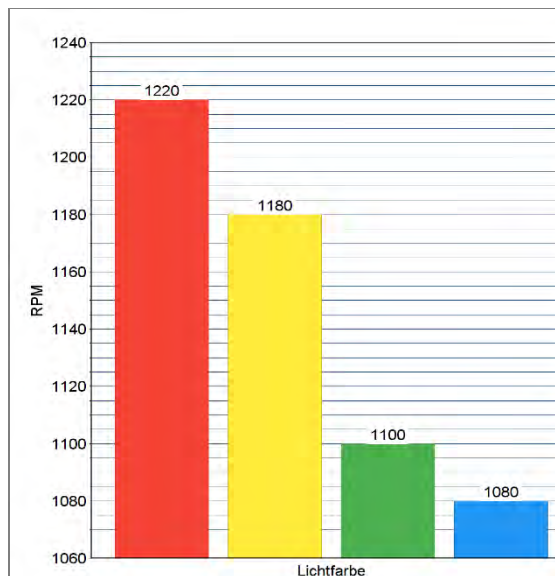
Um dies zu testen wird in diesem Experiment eine Lichtmühle mit Licht von unterschiedlichen Wellenlängen bestrahlt. Dabei beleuchtet eine starke 500 Watt Glühlampe durch verschiedene Farbfilter eine Lichtmühle, in einer Entfernung von einem halben Meter.



*Abb. 4 Farbfilter*



Dadurch fangen die Flügel an sich sehr schnell zu drehen, was die Ergebnisse genauer macht. Mithilfe einer Slow Motion Kamera war es möglich, einige Sekunden dieser Drehung aufzunehmen und im Anschluss mithilfe der Stoppuhr am Handy die genauen Umdrehungen pro Minute abzuzählen. In dem Diagramm sind die Umdrehungen pro Minute (RPM) gezeigt, für den jeweiligen Farbfilter Rot, Gelb, Grün und Blau.



Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bei rotem Licht die Lichtmühle etwa 11% schneller dreht als bei blauem Licht. Das stimmt mit der Vermutung, dass Infrarotstrahlung die Hauptursache der Drehung ist, überein: Das rote und gelbe Licht besitzen einen höheren Infrarotanteil als das grüne oder blaue Licht, entsprechend schneller ist die Drehung der Lichtmühle.

Abb. 5 Umdrehungsgeschwindigkeit nach Farbe des Lichts

Wenn die Infrarotstrahlung für die Drehbewegung verantwortlich ist, so müsste durch Licht von einer LED-Lampe, die so gut wie ausschließlich Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich ausstrahlt, keine schnelle Drehung, trotz sehr hellem Licht, zustande kommen. Dies ist wie man in [4] erkennen kann auch der Fall: Mit LED-Lampen dreht sich eine Lichtmühle nur sehr langsam oder gar nicht.

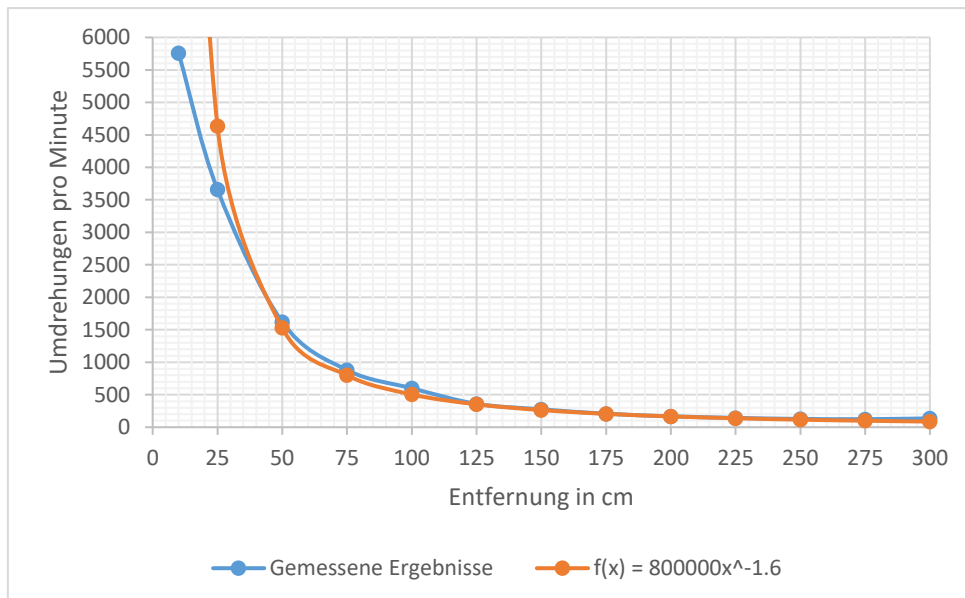
#### 1.4.4 Verschiedene Abstände zur Lichtquelle

Nachdem gezeigt wurde, dass die Lichtmühle durch die von Infrarotstrahlung erzeugte Wärme in Bewegung gesetzt wird, soll in diesem Experiment gezeigt werden, wie die Drehgeschwindigkeit der Lichtmühle von der Menge an Infrarotstrahlung (bzw. dem Abstand zur Lichtquelle), die auf sie trifft, abhängt. Dazu wurde eine sehr helle 500-Watt Glühlampe benutzt, die auf dem Boden eines Raumes fixiert wurde.

Mithilfe eines Maßbandes wurde eine Lichtmühle in verschiedenen Abständen zur Lichtquelle gestellt. Um Einwirkungen von anderem Licht zu vermeiden, wurde der Raum abgedunkelt. Nach dem Einschalten der Glühlampe fängt die Lichtmühle an zu beschleunigen und erreicht nach einiger Zeit ihre maximale Geschwindigkeit. Daher wurde erst nach fünf Minuten die Drehgeschwindigkeit der Lichtmühle gemessen, wieder mithilfe einer Slow Motion Kamera.

Da auf jedes der Flügelblätter viermal so viel Licht fällt, wenn der Abstand zur Lichtquelle halbiert wird, ist ein quadratischer Anstieg der Drehgeschwindigkeit zu erwarten.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Ergebnisse der Messungen tabellarisch und als Graph dargestellt.



Abstand	RPM
300cm	136
275cm	124
250cm	128
225cm	144
200cm	168
175cm	208
150cm	276
125cm	360
100cm	600
75cm	880
50cm	1620
25cm	3660
10cm	5760

Tatsächlich ist der Zusammenhang zwischen Entfernung und Drehgeschwindigkeit nicht quadratisch, aber nicht weit davon entfernt. Eine zu den Werten passende Funktion ist  $f(x) = 800000x^{-1.6}$  (also wenn die Entfernung zur Lichtquelle halbiert wird, dreht sich die Lichtmühle etwa 1,6-mal so schnell).

Dies lässt sich vor allem dadurch begründen, dass, je wärmer eine Fläche (in diesem Fall die Flügelblätter der Lichtmühle) bereits ist, desto mehr Energie auch benötigt wird, um sie noch weiter aufzuheizen.

Außerdem nimmt die wirkende Reibungskraft der sich drehenden Nadel, auf der die Flügel angebracht sind, mit zunehmender Geschwindigkeit ebenfalls zu.

Bei diesem Experiment ist außerdem zu beachten, dass die Lichtmühle auch auf von anderen Gegenständen reflektiertes Licht reagiert: Der Raum, in dem das Experiment durchgeführt wurde, war etwa drei Meter breit, daher befand sich die Lichtmühle bei der ersten Messung direkt vor einer weiß angestrichenen Wand. Wie man aus der Wertetabelle entnehmen kann, drehte sich die Lichtmühle in drei Metern Entfernung schneller als im Abstand von 2,75m zur Lichtquelle gesetzt wurde. Nach weiteren Versuchen stellte sich heraus, dass ein Teil des Lichts, welches die Wand getroffen hatte, reflektiert wurde und die Lichtmühle dann von hinten traf, wodurch die Drehung etwas verstärkt wurde.

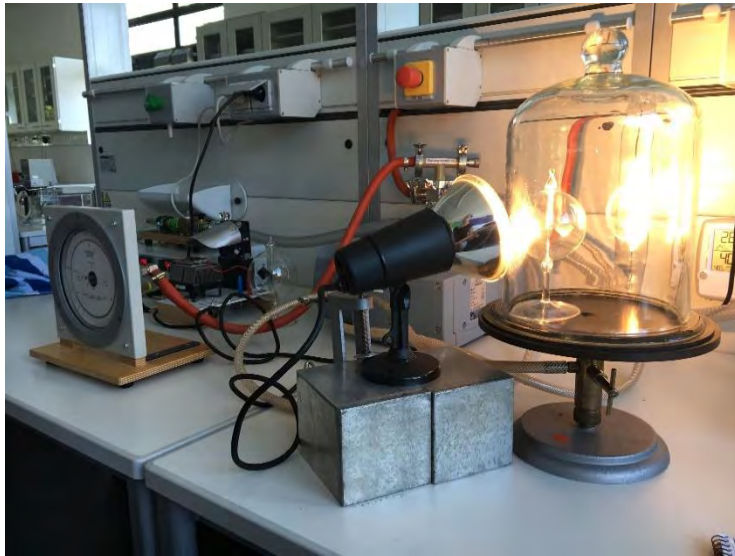
#### 1.4.5 Variieren des Vakuums

Wie bereits im Aufbau der Lichtmühle beschrieben wurde, herrscht innerhalb der Glaskugel ein hohes Vakuum von etwa 5 bis 50 Pascal, was etwa 0.005% bis 0.05% des normalen Luftdrucks entspricht. Dies ist notwendig, da die wirkenden Kräfte auf die Flügelblätter so gering sind, dass selbst geringe Reibungskräfte an der Luft die Drehbewegung verhindern würden.

In diesem Experiment soll gezeigt werden, wie wichtig ein sehr niedriger Luftdruck in der Lichtmühle ist und ab welchem Druck eine Drehung überhaupt möglich wird. Um den Luftdruck innerhalb der Lichtmühle verändern zu können, wurde ein kleines Loch in die Glaskuppel gesägt, sodass der Luftdruck innerhalb der Lichtmühle sich dem Umgebungsdruck angleichen konnte.

Ursprünglich war geplant, das Vakuum zu variieren und so festzustellen, bei welchem Luftdruck sich die Lichtmühle am schnellsten dreht. Hierzu wurde die Lichtmühle in einer Käseglocke an die Vakuumpumpe von Hr. Rolf-Dieter Klein [5] angeschlossen. Leider wurde schnell klar, dass eine herkömmliche Vakuumpumpe bei weitem nicht genügt, um überhaupt eine Drehung bewirken zu können, da bei etwa 700 Pascal die Pumpe ihre Leistungsgrenze erreicht hatte.

Eine stärkere Vakuumpumpe konnte an der FH Rosenheim benutzt werden [6]. Mit ihr war es möglich, ein Vakuum von 300 Pascal zu erreichen, bei



dem sich die Lichtmühle sehr langsam angefangen hat zu drehen. Leider war auch hier die Grenze der Pumpe erreicht. Trotzdem wurde durch dieses Experiment gezeigt, wie minimal die wirkenden Kräfte sind, sodass auch schon bei nur etwas mehr Luftdruck eine

*Abb. 6 Lichtmühle in Vakuumlöcke mit angeschlossenem Druckmessgerät*

Drehung unmöglich ist. Auch wenn leider der optimale Druck mit den zur Verfügung stehenden Pumpen nicht herausgefunden werden konnte, wurde trotzdem deutlich, wie wichtig es ist, dass sich so gut wie keine Luft innerhalb der Glaskugel befindet und dass die wirkenden Kräfte bei etwa 300 Pascal (0.3% des normalen Luftdrucks) ausreichend sind, um die Flügelblätter in Bewegung zu setzen.

## 1.5 Funktionsweise

Nach diesen aufschlussreichen Experimenten wird im folgenden Abschnitt erklärt, wie eine Lichtmühle funktioniert. Wie bereits erwähnt, ging man früher noch davon aus, dass der Lichtdruck für die Drehung der Flügelblätter verantwortlich ist. Wie jedoch durch die Experimente 1.4.1 und 1.4.2 eindeutig gezeigt wurde, dreht sich eine Lichtmühle auch bei einem bloßen Temperaturunterschied zwischen der sie umgebenden Luft und der Luft innerhalb der Glaskugel. Außerdem zeigt Experiment 1.4.3, dass Photonen mit längeren Wellenlängen (die also weniger Energie besitzen) einen stärkeren Effekt auf die Lichtmühle haben als kurzwellige, energiereiche Photonen.

Somit ist die Theorie, dass der Rückstoßimpuls von Photonen, die auf die reflektierende Seite der Flügel treffen, für die Drehbewegung verantwortlich ist, mehrfach widerlegt.

Stattdessen funktioniert die Lichtmühle durch einen Temperaturunterschied zwischen der Licht reflektierenden und Licht absorbierenden Seite der einzelnen Flügelblätter. Wird Licht (bzw. vor allem langwelliges Infrarot-Licht) auf die Lichtmühle gestrahlt, absorbiert die eine Seite der Flügel die Photonen und wandelt sie in Wärme um. Die reflektierende Seite jedoch bleibt kühl, da sie die Photonen reflektiert und daher diese nicht in Wärme umwandelt.

Innerhalb der Glaskugel herrscht ein sehr geringer Druck von nur 5 bis 50 Pascal. Dadurch werden Reibungskräfte an der Luft so gut wie aufgehoben. Trotzdem ist es wichtig, dass zumindest ein wenig Luft noch in der Glaskugel bleibt, denn die verbleibenden Luftmoleküle haben eine entscheidende Rolle beim Drehen der Flügelblätter:

Die Drehung kommt nun dadurch zustande, dass wenn Luftmoleküle an eine der beiden Seiten der Flügelblätter stoßen, sie mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zurückgestoßen werden. Wärme bedeutet, dass die Moleküle der warmen Fläche in schneller Bewegung sind. Stößt ein Luftmolekül an die wärmere, dunkle Seite der Flügel, erwärmt sich das Molekül etwas und dafür wird der Flügel etwas kälter. Wenn kurz darauf das Molekül wieder weg fliegt, wirkt dadurch ein etwas größerer Impuls auf diese Seite des Flügels als bei einem kalten Luftmolekül.

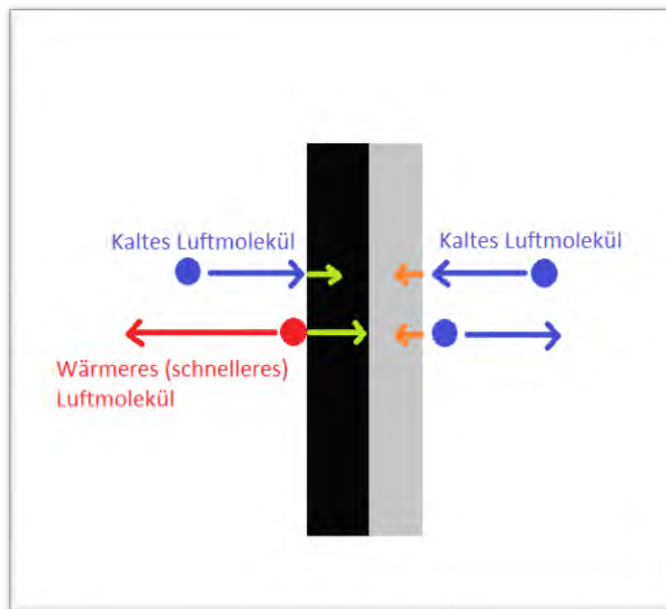


Abb. 7 Funktionsweise der Lichtmühle

Das Gleiche passiert auch auf der reflektierenden Seite, jedoch ist diese kühler als die Licht absorbierende Seite, wodurch Luftmoleküle langsamer zurückgeworfen werden und daher auch einen geringeren Impuls auf die hellere Flügelseite übertragen.

Da man davon ausgehen kann, dass in etwa gleich viele Moleküle die reflektierende als auch die absorbierende Seite treffen, wird klar wie die Drehung der Flügelblätter zu Stande kommt: Immer wenn ein Luftmolekül die dunklere Seite trifft, entsteht ein größerer Impuls, als wenn die reflektierende Seite getroffen wurde. Somit sind die wirkenden Kräfte im Ungleichgewicht und die Lichtmühle beginnt sich mit der reflektierenden Seite voran zu drehen.

Auch wenn der Impuls von einem zurückgestoßenen Luftmolekül winzig ist und auch der Unterschied zwischen einem durch die Wärme der dunklen Seite etwas beschleunigten Molekül im Gegensatz zur kühleren hellen Seite minimal ist, summieren sich viele kleine Impulse zu einer deutlich sichtbaren Drehung der Flügelblätter, da die Reibung an der Luft so gut wie nicht existiert und auch durch die Drehung der Nadel kaum Energie durch Reibung verloren geht.

## 1.6 Berechnung des Lichtdrucks

Nachdem nun beschrieben wurde, wie eine Lichtmühle funktioniert, soll im folgenden Abschnitt noch einmal das Thema des Lichtdrucks angesprochen werden. Ursprünglich nahm man an, dass diese Kraft für das Drehen der Flügel verantwortlich ist, indem Photonen von der spiegelnden Seite reflektiert werden und daher wie bei einem Stoß ein kleiner Impuls wirkt.

Auch wenn, wie bereits im Rest dieser Arbeit erklärt, diese Kraft so minimal ist, dass sie im Vergleich zu der viel stärkeren Kraft durch die Kollision mit Luftmolekülen vernachlässigbar wird, ist das Prinzip hinter dem Lichtdruck trotzdem interessant und von Bedeutung, da er vor allem in der Raumfahrt wichtige Verwendungszwecke finden kann.

Wirft man einen Gummiball, besitzt er einen Impuls  $\vec{p} = m * \vec{v}$ , wobei m seine Masse und v seine Geschwindigkeit ist. Trifft er auf einen Körper, wird ein Teil des Impulses auf diesen übertragen und der Gummiball prallt wieder ab, mit dem noch übrig gebliebenen Impuls. Da sich seine Masse nicht verändert hat, hat sich seine Geschwindigkeit also entsprechend reduziert. Somit ist der Impuls- und Energieerhaltungssatz eingehalten.

Würde man nun ein Auto mit einem Gummiball bewerfen, wäre der Effekt minimal sein. Trotzdem würde auf das Auto eine winzige Kraft wirken und es würde ein wenig beschleunigt werden. Wenn man aber jede Sekunde Hunderte Gummibälle gleichzeitig werfen würde, würde das Auto mit der Zeit sichtbar schneller werden. Das gleiche Prinzip gilt auch für den Lichtdruck.

Ein Photon ist ein Elementarteilchen, welches weder ein Volumen, noch eine Masse besitzt. Man könnte daher annehmen, dass ein Photon auch keinen Impuls hat, was aber nicht stimmt: Jedes Photon besitzt abhängig von seiner Wellenlänge  $\gamma$  eine Energie und einen Impuls.

Trifft ein Photon nun auf eine spiegelnde Oberfläche, wird es wie ein Gummiball an einer Wand reflektiert.

Dabei wird ein Bruchteil des Impulses des Photons auf den Spiegel übertragen, wodurch auf den spiegelnden Körper eine kleine Kraft wirkt und er etwas beschleunigt wird. Wie bei dem Gummiball auch, muss nach dem Energieerhaltungssatz dieser Schub am Spiegel dem Photon auf irgendeine Weise fehlen. Während beim Gummiball dies durch eine Verminderung seiner Geschwindigkeit passiert, kann sich die Geschwindigkeit eines Photons nicht ändern: Photonen sind immer  $c = 299792458 \frac{m}{s}$  schnell. Daher verliert das Photon an Energie, indem dessen Wellenlänge etwas größer wird.

Um zu veranschaulichen, wie wenig Energie ein einzelnes Photon mit sich trägt, wird nun ausgerechnet, wie groß der Impuls eines durchschnittlichen, sichtbaren Photons ist.

Es gilt nach der speziellen Relativitätstheorie der Zusammenhang zwischen Masse und Energie:

$$E = mc^2$$

mit der Energie E, der Masse m und der Lichtgeschwindigkeit c.

Formt man nach  $m$  um, erhält man für die Masse:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Setzt man dies in  $p = m * v$  ein, erhält man als Impuls eines Photons die Gleichung:

$$p = \frac{E}{c^2} * v = \frac{E}{c} \text{ (weil } v = c \text{)}$$

Die Energie eines Photons lässt sich mit dessen Wellenlänge berechnen:

$$E_{\text{photon}} = h * f = \frac{hc}{\gamma}$$

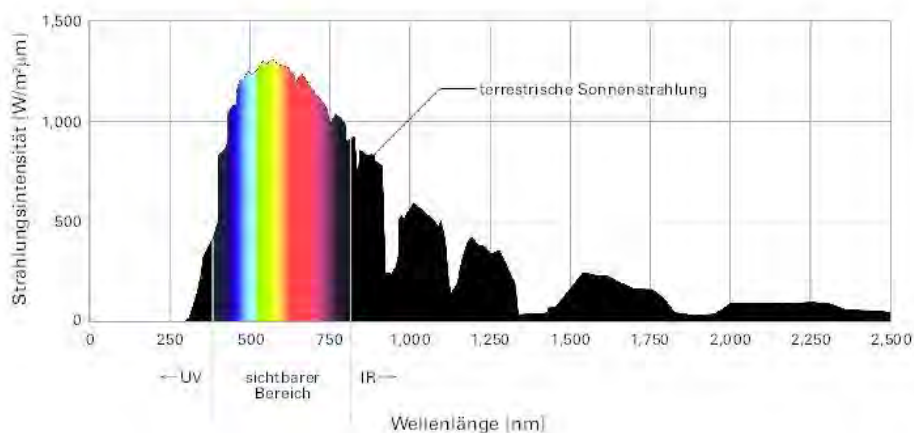
mit dem planckschen Wirkungsquantum  $h$ , der Frequenz  $f$ , der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , und der Wellenlänge  $\gamma$ .

Setzt man dies in die oben bestimmte Formel für den Impuls eines Photons ein, erhält man:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{c\gamma} = \frac{h}{\gamma}$$

Somit lässt sich nun ausrechnen, wie hoch der Impuls eines einzelnen, von der Sonne kommenden Photons ist.

Betrachtet man das Spektrum der Sonne, erkennt man, dass der Großteil ihrer Strahlung im sichtbaren Bereich zwischen 400 und 800nm liegt.



**Abb. 8 Sonnenspektrum**



Somit liegt der Impuls eines durchschnittlichen, sichtbaren Photons mit einer Wellenlänge von  $\gamma = 600nm$  bei:

$$p = \frac{h}{\gamma} = \frac{6,626 * 10^{-34}Js}{600 * 10^{-9}m}$$

$$\frac{6,626 * 10^{-34}kgm^2s}{6 * 10^{-7}ms^2}$$

$$\frac{6,626 * 10^{-34}kgm}{6 * 10^{-7}s}$$

$$1,1043 * 10^{-27}Ns$$

Ein Photon hat also nur einen sehr geringen Impuls. Man bräuchte etwa  $9 * 10^{26}$  Photonen um einen Impuls von  $1Ns$  zu erzeugen, der gleiche Impuls, den ein einzelner Gummiball mit einem Gewicht von 100g bei einer Geschwindigkeit von nur 36 km/h aufbringen könnte.

Damit sollte klar werden, wieso der Lichtdruck nicht ausreicht, um eine Lichtmühle in Bewegung zu setzen. Jedoch findet der Lichtdruck trotzdem Anwendung, z.B. in der Raumfahrt in Form eines Sonnensegels.

Ein Sonnensegel ist eine dünne, spiegelnde Folie, die an Raumsonden befestigt und in Richtung der Sonne ausgerichtet wird. Aufgrund des Lichtdrucks wirkt dann eine konstante (wenn auch geringe) Beschleunigung auf die Folie, wodurch die Raumsonde langsam schneller wird.

Auf langen Missionen können auf diesem Weg mehrere Jahre an Flugzeit und Tonnen an Treibstoff gespart werden, da das Sonnensegel in der Lage ist, nach und nach die Sonde immer weiter zu beschleunigen. Allerdings wird diese Technologie bisher noch wenig verbreitet benutzt, vor allem weil das Sonnensegel im Weltall durch komplizierte Mechanismen entfaltet werden muss, da es ansonsten zu leicht beschädigt werden könnte. Trotzdem könnte das Sonnensegel in der Zukunft von großer Bedeutung in der Raumfahrt sein.

## 1.7 Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Lichtmühle, nicht wie vom Erfinder angenommen wurde mit Strahlungsdruck, sondern mit Thermik funktioniert. Da die dunkle Seite der Flügelblätter bei Lichteinstrahlung sich im Gegensatz zur reflektierenden Seite erwärmt, werden Luftmoleküle die auf die wärmere Seite stoßen beschleunigt, wodurch ein höherer Rückstoßimpuls wirkt.

Dadurch zeigt sich, wie gering die Kraft des Lichtdrucks ist: Diese ist, wie in 1.3 beschrieben, der Drehrichtung der Lichtmühle entgegengesetzt, dennoch kommt eine Drehbewegung zu Stande.

Auch wenn der Lichtdruck minimal ist und bei der Lichtmühle keine Rolle spielt, gibt es trotzdem Möglichkeiten diesen zu nutzen, z.B. mit einem Sonnensegel.

## 2 Anhang

[1] <https://youtu.be/Bw7et7RlFQ>

[2] <https://youtu.be/qmtXi3XDVbY>

[3] <https://youtu.be/H5mQdzLCj7Y>

[4] <https://youtu.be/-81cRT9Rho0>

## 3 Literaturverzeichnis

1 Abb. 8 Aug 2018

URL: [http://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Tageslicht\\_modellieren\\_Verglasungen\\_fuer\\_unterschiedliche\\_Anforderungen\\_3237141.html](http://www.dbz.de/artikel/dbz_Tageslicht_modellieren_Verglasungen_fuer_unterschiedliche_Anforderungen_3237141.html)

2 Lichtmühle Aug 2018

URL: <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/kinetische-gastheorie/ausblick/lichtmuehle>

3 Lichtmühle Aug 2018

URL: <https://www.spektrum.de/news/frischer-wind-fuer-sonnensegel/1390766>

4 Abb. 1 Sep 2018

URL: <https://www.biber.com/artikel/1/201233/radiometer-lichtmuehle-aus-glas>

5 Lichtmühle Aug 2018

URL: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/lichtmuehle>

6 Lichtmühle Aug 2018

URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1533>

7 Lichtmühle Aug 2018

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=DkzMIBWGOLM>

**Danksagung:**

**[5] Es wird Hr. Rolf-Dieter Klein für die Bereitstellung seiner Vakuumpumpe gedankt.**

**[6] Es wird Fr. Prof. Dr Claudia Schäfle für die Bereitstellung der Geräte an der FH Rosenheim und ihre Hilfe bei deren Benutzung gedankt.**



---

# Seminararbeit

## **Erklärung der eigenständigen Erstellung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift des Verfassers/der Verfasserin