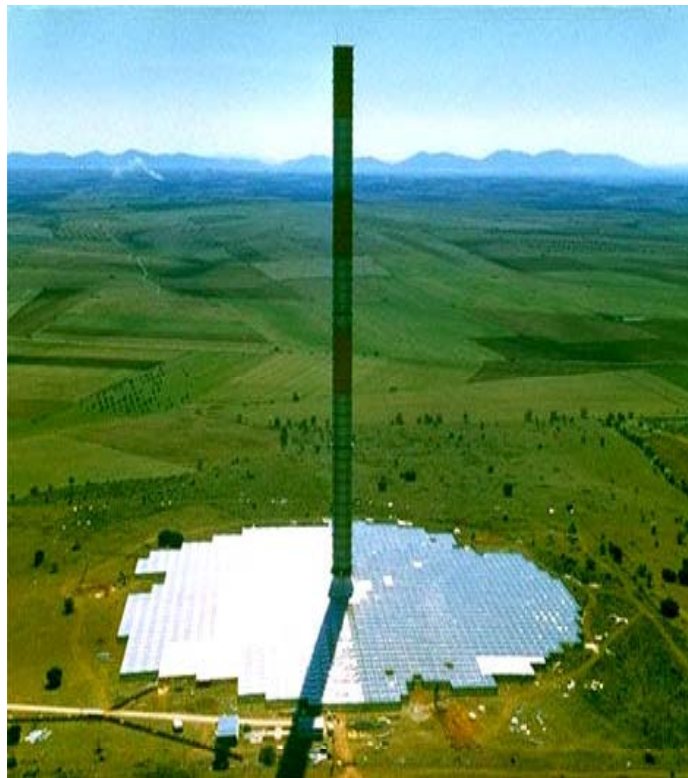


Das Aufwindkraftwerk

**Konstruktion eines Modells und Untersuchung
dessen Leistung**



Mark Schneider, Klasse 6D

Maturaarbeit 2002 / 2003

Kantonsschule Zug

Leitung: Markus Schmidiger

Inhaltsverzeichnis

Seite

Vorwort	2
1 Einleitung	2
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung.....	2
2 Allgemeines zum Aufwindkraftwerk	3
2.1 Die Problematik.....	3
2.2 Was ist ein Aufwindkraftwerk?.....	3
2.3 Worauf kommt es an?.....	3
2.4 Wie ist ein solches Aufwindkraftwerk aufgebaut?.....	4
2.5 Wie funktioniert ein solches Kraftwerk?.....	5
2.6 Effektivität eines Aufwindkraftwerks und seine Energieverluste.....	6
2.7 Vorteile eines Aufwindkraftwerks.....	6
3 Die Entwicklungsphase meines Aufwindkraftwerks	7
3.1 Das Startmodell.....	7
3.2 Eine weitere Idee.....	8
3.3 Die Papierskizze.....	8
3.4 Das selbstgebaute Modell.....	9
4 Theoretische Grundlagen	12
5 Messprogramm mit Resultaten	14
5.1 Welches Ziel wird angestrebt?.....	14
5.2 Welche Größen sind wichtig und wie werden sie bestimmt?.....	14
5.3 Bestimmung der solaren Strahlungsleistung G	16
5.4 Tabelle mit den Messwerten (Strahlungsleistung).....	19
5.5 Auswertung der Messungen.....	20
5.6 Parallel gelaufene Luxmessungen.....	22
5.7 Umrechnung der Strahlungsleistung G in die Beleuchtungsstärke.....	24
5.8 Wie kann ein bestimmtes G auf mein Modell umgerechnet werden?.....	24
5.9 Tabelle mit den Messwerten (Beleuchtungsstärke).....	26
5.10 Auswertung der Beleuchtungsstärke-Messreihe $H = 20$ cm.....	26
5.11 Temperatur- und Kamingsgeschwindigkeitsmessungen am Modell.....	27
5.12 Tabelle mit den Geschwindigkeits- und Temperaturmesswerten.....	29
6 Schlussfolgerungen	31
6.1 Die Lux - und G – Korrelation.....	31
6.2 Die beiden Konstanten α und β	33
6.3 Bestimmung der mechanischen Leistung.....	35
6.4 Was wäre die Leistung des Kraftwerkes unter Sonneneinstrahlung?.....	37
7 Zusammenfassung	38
Quellenverzeichnis	39
1 Literaturverzeichnis.....	39
2 Abbildungsverzeichnis.....	39

Vorwort

In der Zeitschrift „Facts (9/2002)“ habe ich einen Artikel über ein Aufwindkraftwerk gelesen, welches in Australien errichtet werden soll. Der Erfinder ist Prof. Dr. Jörg Schlaich. Das Aufwindkraftwerk wird als die Stromquelle der Zukunft bezeichnet, da es weder teuer zu betreiben ist, noch irgendwelche Abgase produziert.

Diese Idee hat mich ziemlich fasziniert. Als Maturaarbeit möchte ich versuchen ein kleines Modell zu konstruieren, um die Funktionstüchtigkeit des Aufwindkraftwerkes zu prüfen.

Mit Unterstützung des Physiklehrers Markus Schmidiger der Kantonsschule Zug, habe ich die Arbeit in Angriff genommen. Wenn ich nun so auf die ziemlich lange Arbeitszeit zurück blicke, muss ich sagen, dass sie mir viel Spass bereitet hat. Es war eine tolle, lehrreiche Erfahrung.

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben, vorab bei Herrn Markus Schmidiger, der mich während der ganzen Zeit beraten hat. Ebenfalls möchte ich mich beim Physikassistenten Herrn Erich Wegmann bedanken, der mir immer die nötigen Hilfsmittel zur Verfügung stellte. Ein Dankeschön richte ich auch an Herrn Wolfgang Schiel, einen Mitarbeiter des Ingenieurbüros „Schlaich Bergermann und Partner“, welcher mir die benötigten theoretisch-physikalischen Grundlagen zu kommen liess.

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Es stellt sich die Frage, wie ich am Besten ein kleines Modellaufwindkraftwerk baue. Ich muss herausfinden, welche Materialien sich dazu eignen und welche Grösse das Modell annehmen soll. Wird schlussendlich ein messbarer Strom produziert werden? Falls ja, was kann mit dieser Leistung betrieben werden, und welche Messgeräte werden benötigt um diesen Strom feststellen zu können? Wie man sieht gibt es sehr viele Fragen, die im Verlaufe dieser Arbeit geklärt werden müssen.

1.2 Zielsetzung

In einem ersten Schritt möchte ich mich über das physikalische Prinzip des Aufwindkraftwerks beziehungsweise des Kamineffekts informieren und mich damit auseinandersetzen. Basierend auf diesen Grundlagen werde ich versuchen, ein stark verkleinertes Modell davon nach zu bauen. Ich hoffe, damit einen meßbaren Strom erzeugen zu können, um die Funktionstüchtigkeit messtechnisch zu beweisen.

2. Allgemeines zum Aufwindkraftwerk

2.1 Die Problematik

Die heutige Energieerzeugung aus Kohle und Öl ist erstens umweltschädlich und zweitens erschöpflich. Zudem können sich manche Entwicklungsländer dies nicht leisten. Unsere Zukunft wird daher massgebend davon abhängen, ob es uns gelingt, Mensch und Natur mit Hilfe der Technik in Einklang zu bringen. Eine allen Menschen in ausreichender Menge verfügbare, saubere und sichere Energiequelle ist die Sonne. Daher könnte die Nutzung der Sonnenenergie einen grossen Beitrag zur Lösung dieses Problem leisten. Eine, zwar heute noch in der Entwicklungsphase stehende, allfällige Lösung dieser Problematik, könnte in Zukunft das Aufwindkraftwerk darstellen. [1]

2.2 Was ist ein Aufwindkraftwerk?

Ein Aufwindkraftwerk ist ein, von der Sonneneinstrahlung betriebenes, solares Kraftwerk. Vor allem in den sonnenreichen Gegenden der Erde könnte seine Anwendung von Bedeutung sein. Es dient einer, fast ohne Ressourcen brauchenden, Erzeugung von elektrischer Energie. Es stellt also einen umweltfreundlichen Alternativweg zur heutigen Energiegewinnung dar.

2.3 Worauf kommt es an?

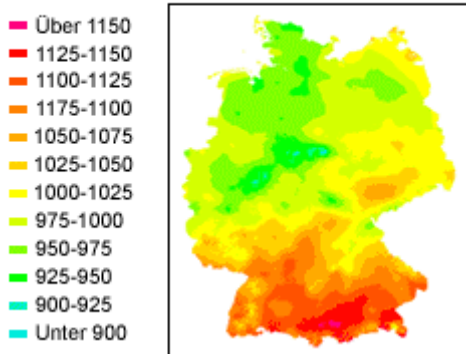
Die wahrscheinlich wichtigste Komponente des ganzen Systems stellt die Sonne selber dar. Denn ohne Sonneneinstrahlung würde ein solches Kraftwerk gar nicht erst funktionieren.

Was ist überhaupt Sonneneinstrahlung?

Die Sonneneinstrahlung setzt sich vor allem aus der Strahlung, welche direkt von der Sonne her kommt und aus einigen anderen, indirekten Anteilen zusammen. Zu diesen indirekten Anteilen wird hauptsächlich die Reflexionsstrahlung der Umgebung gezählt. Ein gutes Beispiel dafür wäre eine grosse, mit Schnee bedeckte Fläche, welche die Sonneneinstrahlung stark reflektiert. Um die Energie, die auf eine bestimmte Fläche auftritt, berechnen zu können, ist der Winkel zwischen dem Sonnenstrahl selbst und der Eintrittsfläche von grosser Bedeutung. So zum Beispiel wird die Sonneneinstrahlung früh morgens ganz andere Messdaten liefern als am Mittag, wenn die Sonne praktisch senkrecht scheint. [2]

Sonneneinstrahlung ist genügend vorhanden, da die Sonne non-stop Energie in Form von Strahlung ins Weltall sendet. Die Sonnenenergie, die auf der Erde ankommt, übersteigt den täglichen Verbrauch der Menschheit um das etwa 10'000-15'000fache. Somit würde einem Aufwindkraftwerk sicherlich nie der sogenannte „Treibstoff“ ausgehen. (solange wir leben jedenfalls nicht) [3]

Globalstrahlung 1981-2000
Mittlere Jahressummen in kWh/m²



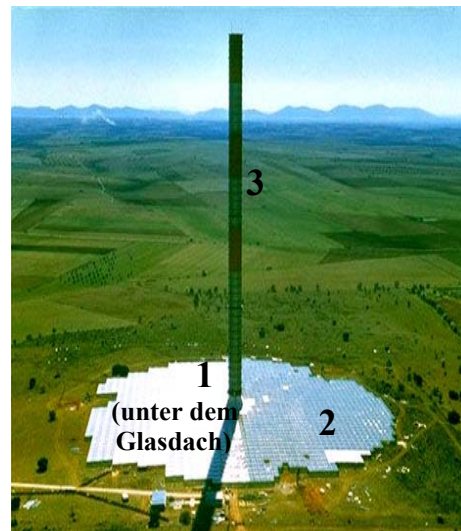
Wie man dieser Darstellung der Sonneneinstrahlung Deutschlands entnehmen kann, ist diese Einstrahlung von Region zu Region unterschiedlich. So zum Beispiel ist am Äquator die Sonneneinstrahlung um einiges intensiver als diejenige bei uns in der Schweiz. Aus diesem Grunde würde ein Aufwindkraftwerk nahe des Äquators mehr Sinn machen als hier bei uns.

(Abb. 1)

2.4 Wie ist ein solches Aufwindkraftwerk aufgebaut?

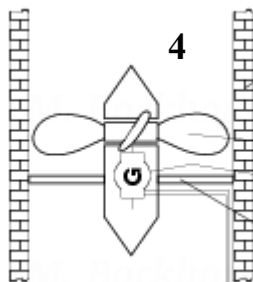
Wie ist ein solches Kraftwerk aufgebaut, und was haben die einzelnen Bestandteile für Funktionen im ganzen System.

- 1) **Grundbodenfläche**
(Funktion: Erwärmen der Luft nach Absorption der Sonneneinstrahlung)
- 2) **Leicht gewölbte Glasoberfläche**
(Funktion: Möglichst kein Licht reflektieren + warme Luftmasse unter der Glasfläche sammeln und in Richtung Kamin schleusen)
- 3) **Kamin**
(Funktion: einzig möglicher Ausgang der erwärmten Luftmasse. Dient als Luftkanal in dem Luft beschleunigt wird)



(Abb. 2)

4) Turbine



(Funktion: Umwandlung von Windenergie in verwendbare elektrische Energie)

Die Turbine ist normalerweise ganz unten im Kamin angebracht, also ein wenig oberhalb von der Stelle, wo die Luft in den Kamin eintritt.

(Abb. 3)

2.5 Wie funktioniert ein solches Kraftwerk?

Das Aufwindkraftwerk beruht auf dem Prinzip des Kamineffektes und dem Prinzip des Treibhauseffektes. Es wird vor allem die Eigenschaft ausgenutzt, dass warme Luft steigt. Dies geschieht auf Grund eines Dichteunterschieds. Die eingestrahlte Lichtenergie wird dann indirekt in mechanische beziehungsweise elektrische Energie umgewandelt.

Wie funktioniert der ganze Ablauf

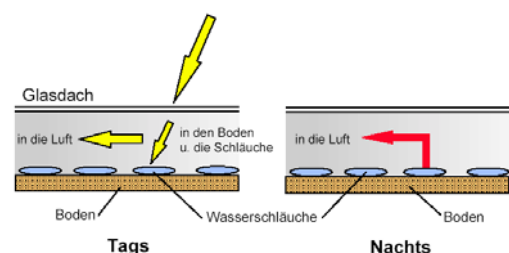
- 1) Bei einem Aufwindkraftwerk wird die Luft unter einer Oberfläche erhitzt. Diese Oberfläche besteht meistens aus Glas oder aus einem andern durchsichtigen Material. Am Boden dient meistens eine dunkle Grundfläche dazu, dass möglichst viel Sonnenenergie in Wärme umgewandelt wird. Optimal wäre diese Oberfläche fast schwarz, da so am wenigsten der Sonneneinstrahlung reflektiert wird und somit effektiv in Wärme umgewandelt werden kann. Die Luft gelangt nun in den offenen Hohlraum zwischen Glasoberfläche und Bodenfläche.
- 2) Dort wird, durch das immer heisser werden der Grundbodenplatten, die somit erzeugte Wärme auf die Luft übertragen. Dieses Verhalten der Atmosphäre, die kurzwelligeren (solaren) Strahlungen nahezu ungehindert passieren zu lassen, jedoch die aus ihr am Boden entstehenden langwelligen Strahlung zu absorbieren, wird als Treibhauseffekt oder Glashauswirkung bezeichnet.
- 3) Die nun relativ heisse Luft beginnt in die Höhe zu steigen. Meistens ist die Glasoberfläche unter einem relativ kleinen Winkel gewölbt, so dass die warmen Luftmassen schön Richtung Kamin getrichert werden können. Darauf hin entsteht eine Art Sogwirkung, da nun die heisse Luft nach oben entweicht, muss unten neue, zuerst noch relativ kühle, nachrücken. Diese wird dann ebenfalls erhitzt. Je wärmer die Bodenplatten mit der Zeit werden, desto schneller geschieht dieses Aufwärmen, so dass ein geschlossener Wärmekreislauf entsteht.
- 4) Die heissen Luftmassen strömen nun mit einer ziemlich beträchtlichen Geschwindigkeit den Kamin hinauf. Am Eintrittsort des Kamins befindet sich eine Turbine. Die nach oben steigende Luft treibt auf ihrem Weg durch den Kamin diese Turbine an. Es wird Windenergie in elektrische Energie umgewandelt.

Dieser Kreislauf läuft normalerweise ohne eine Unterbrechung ab. Ein kontinuierlicher 24 Stundenbetrieb könnte durch geschlossene Wasserschläuche, unter dem Dach, zur Wärmespeicherung garantiert werden.

Wie funktioniert dieser Wasserschlauchbetrieb?

Während des Tages erhitzt sich das in den Schläuchen zirkulierende Wasser und nachts wird dann diese Wärme wieder abgegeben. Es wird also tagsüber genügend Wärme gespeichert, so dass die Energieproduktion problemlos auch nachtsüber gesichert ist. [1]

(Abb. 4)



2.6 Effektivität eines Aufwindkraftwerks und seine Energieverluste [4]

Die Gesamtumwandlung von Solarenergie in Elektrizität beträgt nur etwa 2-3 %. Aber wohin fließen dann die restlichen gut 97% Prozent der von der Sonne gelieferten Solarenergie?

1) Je höher ein Turm gebaut wird, desto mehr Energie muss aufgewendet werden um die enormen, warmen Luftmassen vom Boden des Gebildes bis zum Kaminausgang zu treiben. Man verliert auf diese Weise eine Menge an Energie. Es handelt sich dabei, um den sogenannten „**gravitational energy lost**“. Als Faustregel ist anzunehmen, dass pro 1000 Meter Höhendifferenz zwischen Boden und Turmausgang eine Temperaturabnahme von etwa 10°C erfolgt.

2) Die Luftmassen, die sich im Kollektor befinden, werden durch die Sonneneinstrahlung stark erwärmt. Dies hat zur Folge, dass sich die Luft ausdehnt, was zu einem Druckanstieg führt. Der Grossteil des Solarinputs geht in dieser einfachen Ausdehnung verloren, bevor die Luft überhaupt die Turbine erreichen kann.

Wie viel Energie kann produziert werden?

Zu Beginn der 80er Jahre wurde in Manzanares (Spanien) eine 45000 Quadratmeter grosse Prototypanlage gebaut, die über einen 190 Meter hohen Kamin verfügte. Dieses Kraftwerk lieferte drei Jahre lang zuverlässig Strom bis dann der Kamin schlussendlich in sich zusammen stürzte. Die erzielte Leistung von 50 KW war jedoch noch bescheiden.

Ein einzelnes Aufwindkraftwerk heute könnte mit entsprechend grosser Glasdachfläche und einem hohen Kamin zwischen 100 bis 200 MW produzieren. So können schon wenige Aufwindkraftwerke zusammen ein Kernkraftwerk ersetzen.

2.7 Vorteile eines Aufwindkraftwerks [1]

- Es würde eine Abnahme der Umweltzerstörung durch Ressourcenschonung eintreten.
- Es gibt eine Erhöhung des Lebensstandards in den Drittweltländern durch eine unerschöpfliche Energiequelle. Dadurch würde die Armut und die Chancen auf eine Bevölkerungsexplosion in diesen Ländern sinken.
- Es werden neue Arbeitsplätze in globaler Partnerschaft geschaffen.
- Da die Sonnenstrahlung nicht konzentriert wird, kann auch die diffuse Strahlung zur Lufterwärmung genutzt werden. Dadurch kann das Kraftwerk auch bei bedecktem Himmel betrieben werden, was vor allem in den tropischen Gebieten der Erde von grossem Vorteil sein kann.
- Der Wasserspeicher dient als billiger Energiespeicher, so kann das Aufwindkraftwerk 24 Stunden auf nur solarer Basis betrieben werden, also ohne fossile Zufeuerung.

- Zum Bau eines solchen Kraftwerks werden keine speziellen Ressourcen gebraucht. Es besteht fast ausschliesslich aus Beton und Glas. Das bedeutet, es könnte in der Wüste selbst aus Sand produziert werden.

Der wahrscheinlich grösste Nachteil des ganzen Systems ist, dass der Strom aus Aufwindkraftwerken, im Vergleich mit dem aus Kohle produziertem Strom, doch noch einiges teurer ist.

3. Die Entwicklungsphase meines Aufwindkraftwerks

Wie bin ich auf mein Modell gekommen und welche Vormodelle und Überlegungen stecken dahinter?

3.1 Das Startmodell

Zuerst wollte ich nur einmal testen, ob diese Idee auch wirklich funktioniert und realisierbar ist. Dazu habe ich ein sehr einfaches Modell gebaut. Dabei handelt es sich jedoch um ein sehr Ungenaues, welches auf keinen Fall mit der Realität zu vergleichen ist. Es ging nur darum zu zeigen, dass die erwärmte Luft steigt und durch einen Kamin abgeführt werden kann.

Wie war dieses Modell aufgebaut?

Auf vier Stützen wurde ein Backblech gelegt. Dieses Blech wurde dann mit einem Bunsenbrenner stark erhitzt. Über dem Backblech wurde, aus dem Boden eines Blumentopfuntersatzes, eine Art Trichter gebastelt. Nun wurde die auf der Blechoberseite entstehende, heisse Luft in Richtung Kamin geschleust und dort abgeführt. Der Kamin wurde aus einer Packpapierrolle gemacht. Schlussendlich konnte ich mit Hilfe einer Rauchbombe feststellen, dass es die Luft wirklich Richtung Kamin zog und sie dort durch den Kamin abgeführt wurde. Somit war klar, dass der Effekt funktionieren würde.



Wie gross war dieses Startmodell?

Das Backblech entsprach dem Mass von 30.5 cm × 30.5 cm und der Blumenuntersatztrichter hatte einen Durchmesser von 32.5 cm. Der Kamindurchmesser war 2.5 cm und die Höhe des Kamins betrug 70 cm.

Was sind die Nachteile dieses Modells?

Dieses Modell war jedoch mit einigen Nachteilen behaftet. Einer dieser Nachteile ist, dass dieses Modell sehr realitätsfremd ist. Das Backblech wurde auf enorme Temperaturen erhitzt, die mit Hilfe von Sonneneinstrahlung allein nie zu Stande kämen. Aufgrund dieser extrem hohen Temperaturen schmolz dann schlussendlich auch noch der Trichter und es war von da an nicht mehr möglich mit diesem Modell zu arbeiten. Ein anderer Nachteil war, dass man den Bunsenbrenner genau in der Mitte plazieren musste. Dadurch wurde nicht das ganze

Backblech gleichmässig erhitzt. Man weiss nun nicht, ob der Effekt nur darum funktionierte, weil sich der Kamin direkt oberhalb des Bunsenbrenners befand.

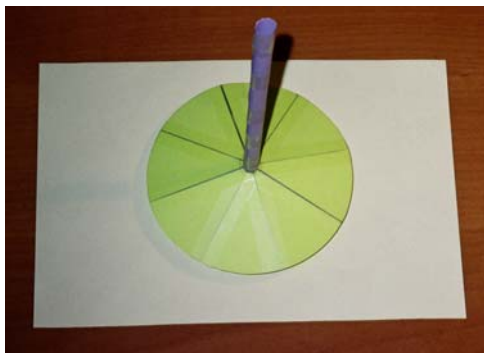
Ich hatte jedoch das Gefühl, dass sich dieses Startmodell für den Beginn recht gut eignete, da das Prinzip, dass wärmere Luft auf Grund eines Dichtenunterschieds steigt, ziemlich gut klar gemacht werden konnte.

3.2 Eine weitere Idee

Nun wollte ich versuchen, die Erwärmung der Luft auf einen grösseren Bereich zu verteilen. Dies war mir zuvor mit dem Bunsenbrenner nicht möglich gewesen, da dieser nur eine bestimmte, recht kleine Fläche erhitzte. Das einzige was ich machen konnte, war den Brenner ein wenig zu verschieben, und dann schauen ob sich etwas änderte.

Dieses Problem hätte man mit einem elektrischen Heizdraht, wie er zum Beispiel in einem Haarföhn zu finden ist, lösen können. Mit einem solchen Draht hätte man eine Art Geflecht entwickelt, welches sich schön in sich immer gleichen, wiederholenden Abständen über eine grössere Fläche ausdehnen würde. Dieses Drahtgeflecht hätte man dann zwischen das Backblech und den Trichter gespannt, so dass die Luft überall gleich stark und regelmässig hätte erhitzt werden können. Ich wollte dies auch versuchen zu verwirklichen. Schlussendlich war es mir jedoch nicht möglich dies zu tun, da es sich dabei um ein recht **schwieriges** sowie **gefährliches Unternehmen** handelte. Es war gefährlich da in meinem Fall ein offener, unisolierter Strom geflossen wäre. Das weit aus grössere Problem stellte jedoch dar, dass man sehr viel hätte beachten müssen und dies, für ein Vormodell, einfach viel zu lange gedauert hätte.

3.3 Die Papierskizze



Zuerst machte ich ein Modell aus Papier, das als eine Art Skizze dienen sollte. Dieses Modell war genau im Massstab 1:10 zum Geplanten erstellt worden. Es enthielt alle wesentlichen Einheiten, wie der Kamin, der Kollektor und die Grundfläche am Boden. Der Kollektor wurde aus 8 gleichen Teilchen zusammengesetzt und mit Hilfe von Schrauben in die richtige Höhe gebracht. Der Kollektor weist eine geringe Wölbung auf.

Der Kollektordurchmesser in diesem Papiermodell beträgt 15 cm. Der Kamin steht in einer Höhe von 20 cm und weist einen Durchmesser von 1cm auf.

Nun wollte ich das Modell genau nach Plan anfertigen. Ich war mir jedoch noch nicht ganz im Klaren, wie ich dies machen sollte und welche Materialien sich am Besten dazu eignen würden. Zu Beginn dachte ich, dass sich Plexiglas sehr gut dafür eignen würde. Da ich auch wusste, dass Plexiglas sehr schwer zu bearbeiten ist, dachte ich darüber nach, ob es vielleicht nicht am Besten wäre, wenn ich dies von einem Spezialisten machen liesse. Aus Kostengründen scheiterte dann diese Idee.

Heute bin ich froh darüber, dass ich das Modell selber baute und nicht machen liess. Ich habe sehr viel daraus gelernt und ich konnte sehr viele Teile immer wieder anpassen. So zum Beispiel konnte ich die Wölbung des Kollektors mehrmals ändern bis sie schlussendlich die richtige Neigung hatte. Dieser Vorteil bestand noch für diverse andere Bestandteile des Kraftwerks.

3.4 Das selbstgebaute Modell

Da das aus Kostengründen gescheiterte Modell aus Plexiglas nicht zu stande kam, begann nun die Materialschlacht. Welches Material eignet sich am Besten für welchen Teil des Aufwindkraftwerkes.

Dies war teilweise eine rechte Herausforderung zwischen all diesen verschiedenen Materialien das Passende auszuwählen. Ein entsprechendes Material für das Kollektordach zu finden, stellte bei weitem das grösste Problem dar, denn dieses musste den meisten vorgegebenen Eigenschaften gerecht werden. So zum Beispiel musste es durchsichtig und gut biegsam sein, durfte nicht zu viel Licht reflektieren und sollte relativ einfach zu bearbeiten sein. Nach langer Suche fand ich dann ein Material, das sich PET-Folie nennt. Es eignete sich fast perfekt für mein Modell. Dieses Materialproblem stellte sich praktisch für alle Teile des Kraftwerkes und nahm einige Zeit in Anspruch gelöst zu werden.

Die Masse des Aufwindkraftwerkmodells

Durch die Papierskizze, welche schon einige Zeit zuvor angefertigt worden war, wären die Masse des wirklichen Modells eigentlich schon gegeben gewesen. Es liegen jedoch minime Änderung vor, die nicht genau mit dem 1:10 Verhältnis gegenüber des Papiermodells übereinstimmen.

	Nach Papierskizze ($\times 10$)	Wirklichkeit
Kollektordurchmesser	150 cm	123 cm
Kamindurchmesser	10 cm	7cm
Kaminhöhe	200 cm	219.5 cm

Ein anderer Unterschied zwischen der Papierskizze und dem eigentlichen Modell ist, dass das PET-Folien-Kollektordach nur aus einem grossen Stück besteht und nicht aus 8 verschiedenen, wie in der Skizze.

Wie sieht das Aufwindkraftwerk aus?

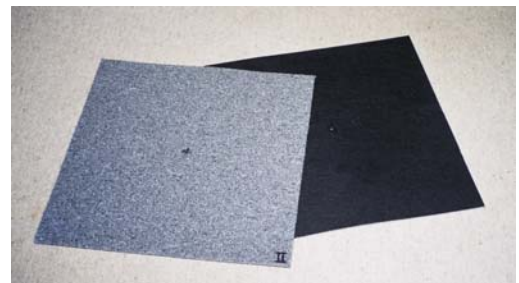


- 1) Grundfläche
- 2) Schrauben mit Gewinden
- 3) Kollektorstützen aus Karton
- 4) Kollektordach
- 5) Kamin (zweiteilig)
- 6) Raucheinspritzloch
- 7) Lampenring mit 6 Glühbirnen

* Bei dem auf der rechten Seite zu sehenden Gerät handelt es sich um ein Temperaturmessgerät

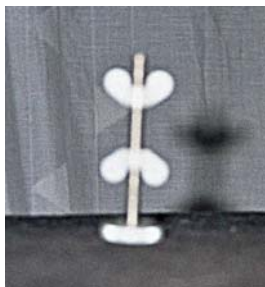
Was sind die einzelnen Bestandteile und wie wurden sie konstruiert?

1) Die **Grundfläche** ist aus 9 gleichen Teppichplatten zusammengesetzt. Eine Teppichplatte ist 30×30 cm gross, somit nehmen alle diese neun Platten eine Grundfläche von 2.25 m^2 ein. Jede dieser Teppichplatten hat zwei verschieden farbige Seiten. Die eine Seite ist schwarz und die andere grau. Dies wurde extra so gewählt. Man kann nun den Unterschied in Bezug auf die produzierte Energie zwischen der schwarzen und der grauen Fläche bestimmen.



Die Grundfläche kann also variabel verändert werden.

2) In jeder Platte, mit Ausnahme der mittleren, wurde ein Loch gebohrt. Diese Löcher sind jeweils symmetrisch so angeordnet, dass sie für beide Seiten der Teppichplatten genau am gleichen Ort sind. Durch alle 8 Löcher wurde jeweils eine grosse **Schraube** hindurchgesteckt. Mit Hilfe von 2 **Gewinden** pro Schraube kann nun das Kollektordach in einer beliebigen Höhe angebracht werden. Will man den Zwischenraum zwischen der Grundfläche und dem Kollektordach etwas vergrössern, so dreht man das untere Gewinde einfach ein wenig nach oben, und fixiert das PET-Foliendach dann mit dem zweiten, oberen Gewinde.



Somit ist auch der Abstand des Kollektordaches vom Boden her variabel.

3) Die **Kollektorstützen** sind lange Balken aus Karton. Insgesamt sind es 7 solche Kartonbalken, die dazu dienen das Kollektordach zu stützen. Alle diese Balken erheben sich unter einem kleinen Winkel Richtung Kamin. Somit kann die leichte Wölbung gut erhalten bleiben.



4) Das **Kollektordach** wurde aus einer durchsichtigen PET-Folie gemacht. PET-Folie ist ein sehr gut bearbeitbares Material und somit war es mir möglich dieses Kollektordach nur mit Hilfe einer Schere zu machen. Es besitzt einen Durchmesser von 123 cm. Dementsprechend deckt es eine Fläche von 1.19 m² ab. Es ist leicht gewölbt, das heißt es weist eine leichte Trichterform auf. Die Wölbung wurde dadurch erzeugt, dass man das runde Dach auf einer Seite bis zur Mitte einschneidet und dann die beiden Enden leicht miteinander überlappt.



Die Wölbung ist davon abhängig wie stark die beiden Enden überlappt werden, das heißt das auch die Wölbung variabel verstellbar ist.

5) Der **Kamin** besteht aus zwei Teilen, die mit Hilfe einer Muffe in einander gesteckt werden können. Der eine graue Teil ist ein Abflussrohr mit einer Höhe von 101 cm, der andere durchsichtige Teil ist ein selbst gemachtes Rohr bestehend aus PET-Folie. Es hat eine Höhe von 126 cm. Zusammen erreichen sie eine Höhe von 221.5 cm. Je nach Bedarf kann man aber auch nur ein Rohr verwenden. Die Verkürzung des Kamins hätte in diesem Fall eine direkte Auswirkung auf die produzierte Leistung des Kraftwerks. Welches der beiden Rohre oben oder unten ist, ist jedoch willkürlich wählbar.



Eine weitere variabel verstellbare Komponente stellt der Kamin dar.

6) Das **Raucheinspritzloch** ist ganz unten im Kamin und wurde mit einer Ale gemacht. Es findet seinen Nutzen bei der Luftgeschwindigkeitsmessung, welche mit Hilfe von Rauch durchgeführt wird. Durch das Raucheinspritzloch kann mit einer Spritze Rauch ins System gebracht werden. Wenn das Loch gerade nicht gebraucht wird, wird es mit einem Klebband verschlossen.



7) Hierbei handelt es sich um einen Holzring der sechs 150 Watt Glühlampen trägt. Die Glühbirnen sind symmetrisch angeordnet. Mit Kabeln sind alle diese Lampenbirnen mit einander verbunden worden, so dass nur noch ein Stecker eingesteckt werden muss, um das Ganze in Betrieb zu setzen. Mit einer Schnur, die am **Lampenring** an drei verschiedenen Stellen befestigt wurde kann das Ganze aufgehängt werden.

Die Höhe in welcher man diese künstliche Strahlungsquelle anbringt ist frei wählbar, somit ist indirekt auch die Strahlungsleistung willkürlich verstellbar.

4. Theoretische Grundlagen [5]

Wenn sich der Gesamtwirkungsgrad η_s aus dem Produkt der einzelnen Komponenteneffizienzen η_k , η_t , η_{wt} zusammensetzt, gilt für η_s : $\eta_s = \eta_k \cdot \eta_t \cdot \eta_{wt}$

η_k = Kollektorwirkungsgrad

η_t = Turmwirkungsgrad

η_{wt} = Windturbogeneratorwirkungsgrad

Ziel ist es zu bestimmen wieviel Leistung mein selbst gebautes Aufwindkraftwerk schlussendlich produzieren kann. Aus der Formelsammlung, die ich von der Firma „Schlaich Bergermann und Partner GbR“ erhalten habe, kann eine Endgleichung, um die Gesamtleistung zu berechnen, entnommen werden.

$$P_{mech} = \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{c_p \cdot T_0} \cdot H \cdot A_k \cdot G \cdot \left(\alpha - \beta \cdot \frac{\Delta T}{G} \right)$$

Aus dieser Gleichung kann die mechanische Leistung berechnet werden, die von der Turbine aufgenommen wird. In dieser Formel ist also der Windturbogeneratorwirkungsgrad η_{wt} noch nicht enthalten.

Wie man der Gleichung gut entnehmen kann, liegt bei $H \cdot A_k$ eine gewisse Proportionalität in Bezug auf die elektrische Leistung vor. Es handelt sich dabei um das Volumen, das von der Kollektorfläche zusammen mit der Turmhöhe aufgespannt wird. Somit lässt sich mit unterschiedlichen Kollektorflächen und Turmhöhen dieselbe elektrische Leistung erzeugen. Das heisst es gibt kein physikalisches Optimum.

Wie bestimme ich nun die mechanische Leistung?

Man sieht der obigen Formel an, dass sie sehr viele konstante Faktoren enthält. So zum Beispiel sind g , c_p , H und A_k bereits bekannte, konstante Faktoren.

Bei T_0 , ΔT und G handelt es sich um Messgrößen, die zuerst anhand von Experimenten und Messungen bestimmt werden müssen.

Das α (effektiver Absorptionskoeffizient des Kollektors) und β (Emissions- und Konvektionsverlustwert) sind 2 Konstanten die ebenfalls zuerst bestimmt werden müssen.

Wie bestimme ich α und β ?

Über den Kollektorwirkungsgrad lässt sich eine Gleichung bestimmen, die es uns mit Hilfe einiger Messungen ermöglicht diese zwei Konstanten zu bestimmen.

1)
$$\eta_k = \frac{Q}{A_k \cdot G} \quad Q \text{ ist die Wärmeleistung (als erwärmte Luft abgegeben)}$$

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{wobei} \quad m = \rho_t \cdot v_t \cdot A_t$$

mit c_p : spezifische Wärmekapazität der Luft
 ρ_t : spezifische Dichte von Luft bei der Temperatur T am Kollektorausritt.
 v_t : Luftgeschwindigkeit am Kollektorausritt/Turmeinritt
 A_k : Kollektorfläche
 A_t : Turmquerschnittsfläche
 G : solare Strahlungsleistung

Nach einsetzen erhält man:
$$\eta_k = \frac{\rho_t \cdot v_t \cdot A_t \cdot c_p \cdot \Delta T}{A_k \cdot G}$$

2) Zudem gilt für die Wärmebilanz am Kollektor:
$$Q = \alpha \cdot A_k \cdot G - \beta \cdot A_k \cdot \Delta T$$

Nach einsetzen bei 1) erhält man:
$$\eta_k = \alpha - \frac{\beta \cdot \Delta T}{G}$$

3) Wenn man diese zwei Gleichungen gleichsetzt und vereinfacht, kommen wir auf folgende Gleichung.

$$v_t = \frac{\alpha \cdot A_k \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_k}{\rho_t \cdot A_t \cdot c_p \cdot \Delta T}$$

Mit Hilfe einiger Messungen und dieser Gleichung kann nun α und β bestimmt werden.

5. Messprogramm mit Resultaten

5.1 Welches Ziel wird angestrebt?

Mein Ziel ist es aufgrund dieser Messungen aus der Gleichung

$$v_t = \frac{\alpha \cdot A_k \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_k}{\rho_t \cdot A_t \cdot c_p \cdot \Delta T}$$

die beiden Werte von α und β zu bestimmen. Das α stellt hier den sogenannten „effektiven Absorptionskoeffizienten des Kollektors“ dar. Das β hingegen ist ein Verlustwert, der die Emissions- und Konvektionsverluste beinhaltet (β wird als Konstante verwendet, was nur für kleine ΔT und gegebenes T_0 korrekt ist, da vor allem der Emissionsanteil an den Verlusten temperaturabhängig ist).

Laut „Schlaich Bergermann und Partner GbR“ liegen typische Werte für α bei 0.75 - 0.8. Bei kleinen Werten für ΔT nimmt β die Grössenordnung zwischen 5 und 6 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$] an.

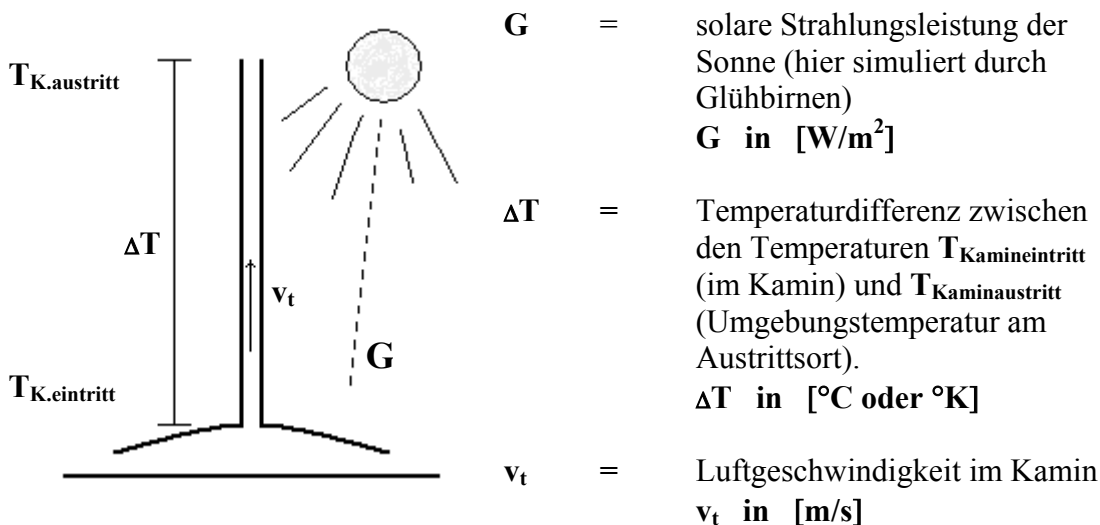
Diese Werte sind jedoch stark Material abhängig. Deshalb möchte ich diese beiden Werte für mein eigenes Modell ermitteln.

Um dies herleiten zu können, müssen erstmals einige Messungen durchgeführt werden, um so noch unbekannte Komponenten festlegen zu können.

5.2 Welche Grössen sind wichtig und wie werden sie bestimmt?

Wie aus der obigen Gleichung leicht zu entnehmen ist, gilt es 3 noch unbekannte Grössen zu bestimmen.

Dabei handelt es sich um:



Alle andern Grössen wie die Kollektorfläche A_k (mit $r = 0.615\text{m}$) und die Turmquerschnittsfläche A_t (mit $r = 0.035\text{m}$), sowohl als auch ρ_t (spezifische Dichte von Luft bei der Temperatur $T_{\text{Kamineintritt}}$ am Kollektoraustritt) und c_p (spezifische Wärmekapazität der Luft) sind bereits bekannt.

Die Kollektorfläche A_k und die Turmquerschnittsfläche A_t sind durch die Konstruktion des Modells festgelegt.

- $A_k = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0.615\text{m})^2 = 1.188\text{m}^2$
- $A_t = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0.035\text{m})^2 = 0.00385\text{m}^2$

Bei den Werten ρ_t und c_p handelt es sich um konstante Werte, welche einfach einer Formelsammlung zu entnehmen sind.

$$\rho_t = 1.205 \text{ kg/m}^3 \qquad c_p = 1005 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \qquad (\text{Werte: gelten für trockene Luft bei } 20^\circ\text{C})$$

Welche Messungen müssen durchgeführt werden?

- 1) Zuerst muss man mit Hilfe eines Solarimeters und eines Luxmeters die solare Strahlungsleistung G der Glühbirnen, in den verschiedenen Entfernungen zum Kollektor, bestimmen.

→ **Strahlungsleistungs- und Beleuchtungsstärkemessung**

- 2) Wenn das G einmal ermittelt ist, kann man die direkt daraus folgende Temperaturdifferenz ΔT zwischen Kamineintritt und Kaminaustritt messen.

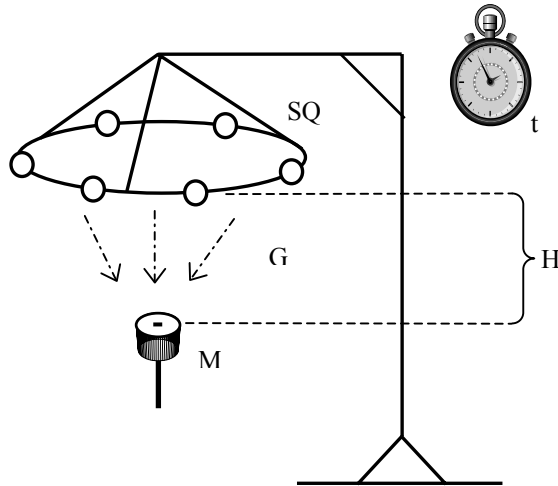
→ **Temperaturmessung**

- 3) Zuletzt kann man dann noch, mit Hilfe einer Stoppuhr, die im Kamin auftretende Geschwindigkeit v_t ermitteln.

→ **Zeitmessung**

5.3 Bestimmung der solaren Strahlungsleistung G

Der Versuchsaufbau



H	=	Entfernung der Glühlampen vom Messgerät M.
SQ	=	Strahlungsquelle (Holzring mit 6×150 Watt Glühlampen)
G_{Birnen}	=	Strahlungsleistung der Glühlampen
M	=	Messgerät (Solarimeter)
t	=	Zeit (Die Zeit spielt eine grundlegende Rolle)

Das benötigte Messgerät, das Solarimeter

Es handelt sich dabei um einen gut isolierten Aluminiumblock mit einer matten, schwarzen Oberfläche. Dieser Metallblock absorbiert die Strahlungsleistung G der vorliegenden Strahlungsquelle und wandelt sie somit in Wärmeenergie um. Wenn der Alu-Block mit einer Lichtquelle bestrahlt wird, kann durch das integrierte Temperaturmessgerät, der strahlungsbedingte Temperaturanstieg sofort ermittelt werden.



Masse des Alu-Blockes:	Gewicht:	56.1g
	Länge/Breite/Tiefe:	50.0 / 50.0 / 8.0 mm
	Dichte (Al):	2.7 g/cm^3

Wie funktioniert der Versuch?

Voraussetzung: Der Versuch sollte in einem möglichst dunkeln Raum stattfinden, so dass keine Fremdstrahlungen die Messungen beeinflussen können.

Benötigte Messgeräte: Alle Messgeräte die dazu benötigt werden, sind ein mit dem Alu-Block verbundenes Temperaturmessgerät und eine Stoppuhr.

1) Der Holzring mit den 6×150 Watt Glühlampen wird mit Hilfe eines Stativs in einer bestimmten Höhe H über dem Messgerät befestigt. Das Solarimeter wird genau in die Mitte

gestellt, so dass die von der Strahlungsquelle herkommende Strahlungsleistung von allen Richtungen her etwa gleich ist. (So können Verfälschungen verhindert werden, die zum Beispiel dann auftreten, wenn sich das Messgerät etwas näher bei der einen Glühbirne befindet und somit viel mehr Strahlungsleistung (eventuell auch Wärmestrahlung im Infrarot-Bereich) dieser einen Glühbirne empfängt. In diesem Falle sind auch die Einstrahlungswinkel nicht alle gleich, was ebenfalls zu einer gewissen Verfälschung führen würde.)

2) Wenn die richtige Höhe **H** eingestellt ist, kann der eigentliche Messversuch beginnen. Nun werden die 6 Glühbirnen in Betrieb gesetzt. Von nun an wird sich die Temperatur des Aluminiumblockes ständig etwas erhöhen bis er dann schlussendlich einen Grenzwert erreicht hat. (Das Erreichen eines solchen Grenzwertes dauert meist sehr lange.) Diese Erwärmung geschieht aufgrund der zugeführten Strahlungsleistung die an der schwarzen, matten Aluminiumblockoberfläche absorbiert und somit in Wärmeenergie umgewandelt wird. Dieser Verlauf kann mit dem direkt mit dem Aluminiumblock verbundenen Temperaturmessgerät genauestens verfolgt werden.



3) Nun notiert man mit Hilfe der Stoppuhr, vom Zeitpunkt **t = 0** bis zum **Versuchsende**, fortlaufend die aktuellen Temperaturen des Metallblockes. Dies geschieht unter einem Zeitintervall von $\Delta T = 20 \text{ sec}$.

Aus dieser zeitlich erfassten Temperaturveränderung des Alu-Blocks und den Materialeigenschaften dieses Blockes, kann man nun auf die zugeführte Energie schliessen. Schlussendlich lässt sich daraus dann das gesuchte **G** bestimmen.

Wie wurden die Messungen durchgeführt?

Diese Messungen wurden für 5 verschiedene Höhen **H** durchgeführt.
H = 20cm / 40cm / 60cm / 85cm / 100cm

Wobei zu erwähnen ist, dass es aus Platzgründen nicht möglich war, bei der **H = 100cm** Messreihe das Solarimeter genau in der Mitte, unter den Glühbirnen, zu plazieren. Da die Entfernung zum Messgerät doch recht gross ist, wird aus diesem Grunde wahrscheinlich nur ein minimaler Fehler auftreten. Somit spielt es in dieser Entfernung keine all zu grosse Rolle, ob sich das Solarimeter genau in der Mitte befindet oder einwenig davon entfernt. Deshalb ist hier der kleine Fehler zu vernachlässigen.

Die Messungen wurden mit einem Zeitintervall von $\Delta T = 20 \text{ sec}$ durchgeführt

Ebenfalls zu beachten ist, dass nicht bei allen Messreihen gleich lang gemessen wurde. Da aber bei allen Messreihen der gewünschte Effekt schon nach relativ kurzer Zeit eintrat, ist hier auch der Zeitunterschied dieser Messungen vernachlässigbar. (Beim gewünschten Effekt geht es darum, dass die **Temperatur-Zeit-Kurve** schon nach kurzer Zeit ab zu flachen beginnt,

somit sich also einem hier noch nicht erkennbaren Grenzwert annähert. (siehe Seite 21 / Graphik))

Entfernung der Messung:	Dauer der Messung:
20cm	25min 40 sec
40cm	21 min 00 sec
60cm	21 min 00 sec
85cm	21 min 00 sec
100cm (nicht ganz Mitte)	17 min 00 sec

5.4 Tabelle mit den Messwerten (Strahlungsleistung)

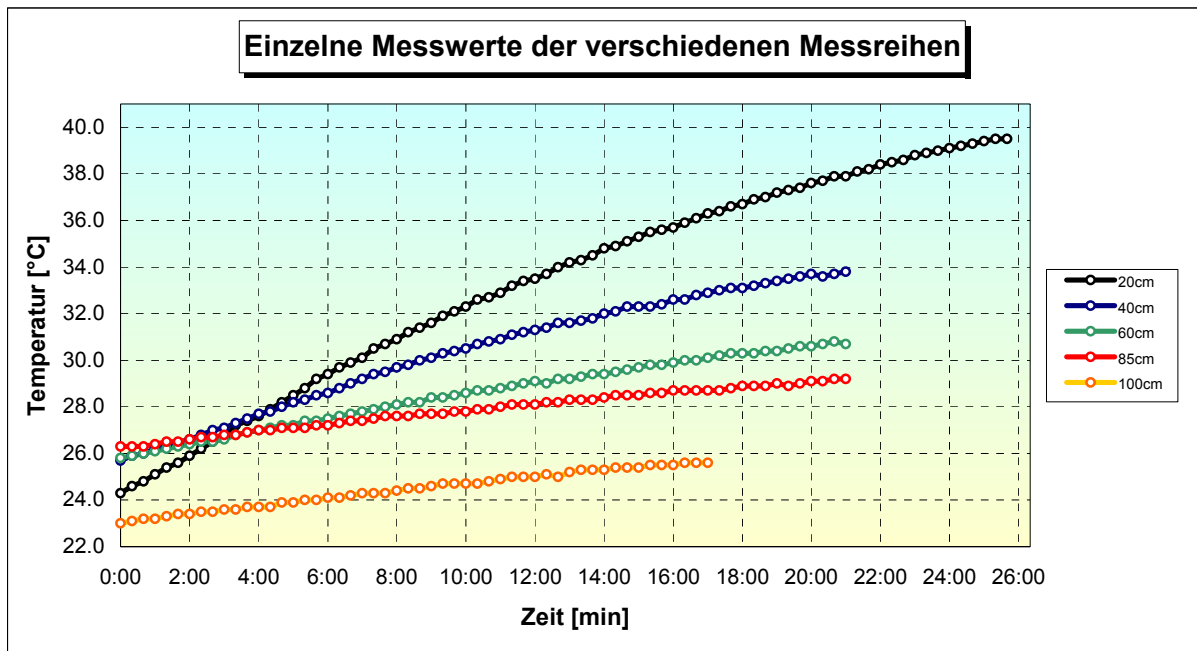
Fortsetzung

Zeit t	20cm	40cm	60cm	85cm	100cm	Zeit t	20cm
0:00	24.3	25.7	25.8	26.3	23.0	24:00	39.1
0:20	24.6	25.9	25.9	26.3	23.1	24:20	39.2
0:40	24.8	26.0	26.0	26.3	23.2	24:40	39.3
1:00	25.1	26.2	26.1	26.4	23.2	25:00	39.4
1:20	25.4	26.3	26.2	26.5	23.3	25:20	39.5
1:40	25.6	26.4	26.3	26.5	23.4	25:40	39.5
2:00	25.9	26.6	26.4	26.6	23.4		
2:20	26.2	26.8	26.5	26.7	23.5		
2:40	26.5	27.0	26.5	26.7	23.5		
3:00	26.7	27.1	26.6	26.8	23.6		
3:20	27.2	27.3	26.8	26.8	23.6		
3:40	27.4	27.5	26.9	26.9	23.7		
4:00	27.6	27.7	27.0	27.0	23.7		
4:20	27.9	27.8	27.1	27.0	23.7		
4:40	28.2	28.0	27.2	27.1	23.9		
5:00	28.5	28.2	27.2	27.1	23.9		
5:20	28.8	28.3	27.4	27.1	24.0		
5:40	29.2	28.5	27.4	27.2	24.0		
6:00	29.4	28.6	27.5	27.2	24.1		
6:20	29.7	28.8	27.6	27.3	24.1		
6:40	29.9	29.0	27.7	27.4	24.2		
7:00	30.1	29.2	27.8	27.4	24.3		
7:20	30.5	29.4	27.9	27.5	24.3		
7:40	30.7	29.5	28.0	27.6	24.3		
8:00	30.9	29.7	28.1	27.6	24.4		
8:20	31.2	29.8	28.2	27.6	24.5		
8:40	31.4	30.0	28.2	27.7	24.5		
9:00	31.6	30.1	28.4	27.7	24.6		
9:20	31.9	30.3	28.4	27.7	24.7		
9:40	32.1	30.4	28.5	27.8	24.7		
10:00	32.3	30.5	28.6	27.8	24.7		
10:20	32.6	30.7	28.7	27.9	24.7		
10:40	32.7	30.8	28.7	27.9	24.8		
11:00	32.9	30.9	28.8	28.0	24.9		
11:20	33.2	31.1	28.9	28.1	25.0		
11:40	33.4	31.2	29.0	28.1	25.0		
12:00	33.5	31.3	29.1	28.1	25.0		
12:20	33.7	31.4	29.0	28.2	25.1		
12:40	34.0	31.6	29.2	28.2	25.0		
13:00	34.2	31.6	29.2	28.3	25.2		
13:20	34.3	31.7	29.3	28.3	25.3		
13:40	34.5	31.8	29.4	28.3	25.3		
14:00	34.8	32.0	29.4	28.4	25.3		
14:20	34.9	32.1	29.5	28.5	25.4		
14:40	35.1	32.3	29.6	28.5	25.4		
15:00	35.3	32.3	29.7	28.5	25.4		
15:20	35.5	32.3	29.8	28.6	25.5		
15:40	35.6	32.4	29.8	28.6	25.5		
16:00	35.7	32.6	29.9	28.7	25.5		
16:20	35.9	32.6	30.0	28.7	25.6		
16:40	36.1	32.8	30.0	28.7	25.6		
17:00	36.3	32.9	30.1	28.7	25.6		
17:20	36.4	33.0	30.2	28.7			
17:40	36.6	33.1	30.3	28.8			
18:00	36.7	33.1	30.3	28.9			
18:20	36.9	33.2	30.3	28.9			
18:40	37.0	33.3	30.4	28.9			
19:00	37.2	33.4	30.4	29.0			
19:20	37.3	33.5	30.5	28.9			
19:40	37.4	33.6	30.6	29.0			
20:00	37.6	33.7	30.6	29.1			
20:20	37.7	33.6	30.7	29.1			
20:40	37.9	33.7	30.8	29.2			
21:00	37.9	33.8	30.7	29.2			
21:20	38.1						
21:40	38.2						
22:00	38.4						
22:20	38.5						
22:40	38.6						
23:00	38.8						
23:20	38.9						
23:40	39.0						

5.5 Auswertung der Messung

Aus diesen Messwerten kann man nun auf die Strahlungsleistung G schliessen, welche die Glühlampen in den entsprechenden Abständen vom Messgerät erzeugen.

Um dies herauszufinden, muss man zuerst mal die Temperatur-Zeit-Kurve der einzelnen Messwerten graphisch darstellen. Durch eine Polynominal-Regression zweiter Ordnung lässt sich diese Kurve sehr gut beschreiben.



$$y = -7.7419x^2 + 22.61x + 24.174$$

$$R^2 = 0.9997$$

$$y = -5.2813x^2 + 14.12x + 25.525$$

$$R^2 = 0.9992$$

$$y = -2.1042x^2 + 7.5736x + 25.776$$

$$R^2 = 0.9992$$

$$y = -1.1529x^2 + 4.3503x + 26.246$$

$$R^2 = 0.9978$$

$$y = -1.1847x^2 + 4.5808x + 23.024$$

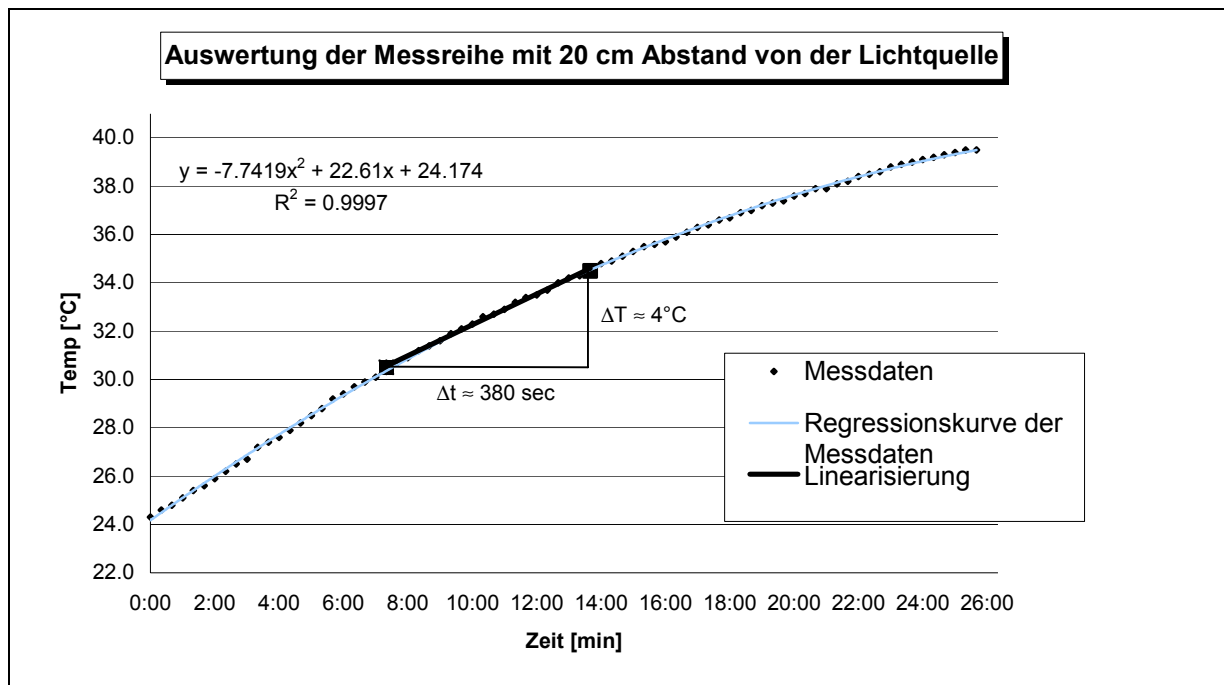
$$R^2 = 0.9967$$

Welches ist der wichtige Teil des Graphen?

Bei der Bestimmung von G ist für uns hier jedoch nur ein kleiner Teil dieses Graphen von Bedeutung. Es handelt sich dabei um den Teil, bei welchem die Temperatur praktisch linear zur Zeit zunimmt. In diesem Bereich nimmt der Alu-Block die Strahlungsleistung recht konstant auf und wandelt sie in Wärmeenergie um.

Die Bereiche vor und nach diesem Stück sind nicht sehr aussagekräftig in Bezug auf die Strahlungsleistung G . Im **vorherigen konkaven Bereich** nimmt der Aluminiumblock recht schnell, recht viel Wärme auf, da er zu Beginn von Raumtemperatur schnell auf eine gewisse Wärme erhitzt wird. Im **konvexen Bereich danach** hingegen hat der Metallblock bereits eine gewisse, schon recht hohe Temperatur erreicht. Deshalb braucht es von dort an immer länger um den Metallblock um eine gewisse Temperatur zu erhitzen. Daraus folglich wird die Kurve immer flacher und schlussendlich wird sie sich einem Grenzwert annähern.

Beispiel eines solchen Abschnitts:



Dieser schon fast lineare Abschnitt des Graphen, der in diesem Beispiel von etwa 6 min –14 min verläuft, kann durch eine Linear-Regression noch genauer angenähert werden.

Nun kann man ziemlich einfach auf die Steigung dieses linearisierten Abschnittes schliessen. Diese Steigung ist für uns besonders wichtig.

Man kann nun sagen, dass in diesem Bereich während einer Zeit von $\Delta t \approx 390 \text{ sec}$, die Temperatur um $\Delta T \approx 4^\circ\text{C}$ zu nimmt.

Aufgrund dieser Feststellungen kann man nun auf die gesuchte Strahlungsleistung G kommen. Dazu werden folgende Gleichungen benötigt.

$$1) \quad Q[J] = m_{AL} \cdot c_{AL} \cdot \Delta T \quad 2) \quad P[W] = \frac{Q}{\Delta t} \quad 3) \quad G = \frac{P}{A_{AL.Block}} \quad (G \text{ in } [W/m^2])$$

c_{AL} ist die spezifische Wärmekapazität von Aluminium

Daraus ergibt sich die Gesamtgleichung:	$G = \frac{m_{AL} \cdot c_{AL} \cdot \Delta T}{\Delta t \cdot A_{AL.Block}} \quad (G \text{ in } [W/m^2])$
---	--

(Formeln wurden aus Hammer / Hammer entnommen)

Beispiel einer solchen Berechnung von G

Uns sind folgende Angaben bereits bekannt:

Gemessene Grössen:

$$m_{AL} = 56.1 \text{ g}$$

$$\Delta T \approx 4^\circ\text{C} \text{ oder } 4^\circ\text{K}$$

$$c_{AL} = 0.896 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$\Delta t \approx 380 \text{ sec}$$

$$A_{AL.Block} = 0.0025 \text{ m}^2$$

Nun setzen wir diese Werte in die Gleichung ein.

$$\Rightarrow G = \frac{56.1 \text{ g} \cdot 0.896 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot 4 \text{ K}}{380 \text{ s} \cdot 0.0025 \text{ m}^2} = 211.65 \text{ W/m}^2$$

Interpretation: Das heisst nun, wenn wir aus einer Entfernung von 20 cm vom Boden mit unseren 6 Glühlampen von je 150 Watt Leistung beleuchten, erzeugen wir am Boden eine Strahlungsleistung von $G \approx 210 \text{ W/m}^2$. (Diese Strahlungsleistung ist jedoch stark von der geometrischen Anordnung der Glühlampen abhängig und gilt deshalb nur für dieses Modell).

Laut „Schlach Bergermann und Partner GbR“ beträgt die Strahlungsleistung der Sonne an einem schönen Sommertag etwa **800 W/m²**. Wenn man nun diese Strahlungsleistung mit der unserigen (Messung mit 20 cm Entfernung vom Solarimeter) vergleicht, stellt man fest, dass diese Leistung etwa 4 mal kleiner ist. Dies ist ziemlich erstaunlich, da 6 Glühlampen an je 150 Watt, im Vergleich zur Sonne, nicht sehr viel Leistung erbringen. Dies hätte ich vor diesem Versuch nicht für möglich gehalten.

5.6 Parallele gelaufene Luxmessungen

Das Luxmeter

Mit diesem Messgerät kann die Beleuchtungsstärke in Lux gemessen werden. Es reagiert bereits auf sehr empfindliche Veränderungen, sowie Schwankungen der Beleuchtungsstärke. Die Messung geschieht jeweils an einem etwa 12.5 cm^2 grossen, weissen, sehr Licht empfindlichen Sensor. Von diesem Sensor werden die Daten dann direkt zu einer digitalen Anzeige übertragen, wo sie dann einfach abgelesen werden können.



Wie wurde die Beleuchtungsstärke gemessen?

Parallel zu der Messung mit dem Solarimeter wurden auch noch Messungen der Beleuchtungsstärke durchgeführt. Diese Messungen wurden mit dem oben beschriebenen Luxmessgerät gemacht. In jeder der verschiedenen Höhen wurde die Beleuchtungsstärke 5 mal gemessen. Dies geschah jeweils nach **2 min, 8 min, 10 min, 12 min und 15 min.** (Diese Zeitpunkte sind willkürlich so ausgewählt worden.) Davon wurde jeweils der Durchschnitt berechnet und in eine Tabelle eingetragen.

Ich habe festgestellt, dass die einzelnen dieser 5 Luxmessungen mit zunehmender Höhe, immer weniger schwankten. Es waren jedoch keine intensiven Schwankungen. Dies könnte eventuell damit zusammenhängen, dass ich ein helles T-Shirt getragen habe und somit die Reflektion dieses Kleidungsstückes mit zunehmender Höhe die Messung immer weniger beeinflusste.

So waren zum Beispiel die Messwerte aus 100 cm noch ziemlich konstant.

Zeit (nach)	2 min	8 min	10 min	12 min	15 min	Øs-Wert
Messungen	1094 lx	1102 lx	1098 lx	1094 lx	1095 lx	1096.6 lx

Die Messungen aus einer Höhe von 20 cm hingegen wiesen grössere Schwankungen auf.

Zeit (nach)	2 min	8 min	10 min	12 min	15 min	Øs-Wert
Messungen	5300 lx	5240 lx	5240 lx	5300 lx	5300 lx	5276 lx

Aus all diesen Werten lässt sich folgende Tabelle erstellen

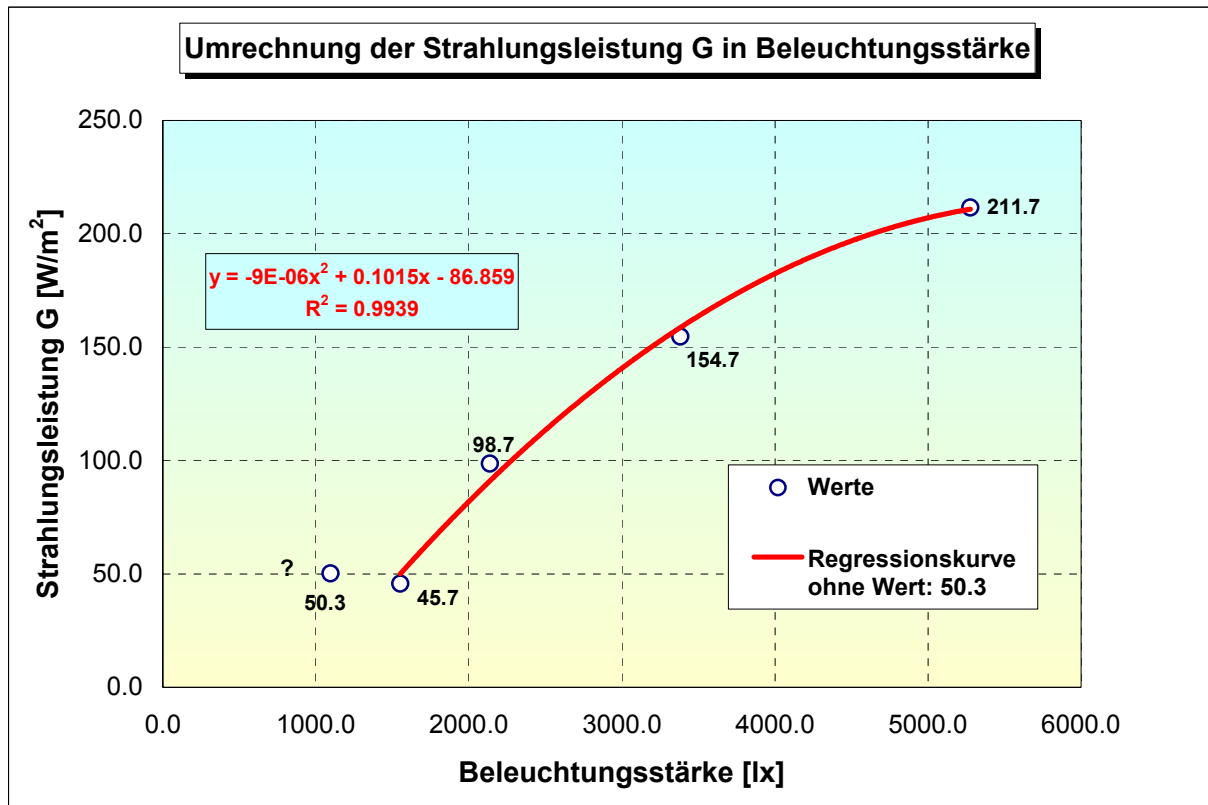
Tabelle mit den Messwerten

Entfernung vom Messgerät	Strahlungsleistung G	Beleuchtungsstärke
20 cm	211.65 W/m ²	5276 lx
40 cm	154.66 W/m ²	3382 lx
60 cm	98.70 W/m ²	2138 lx
85 cm	45.70 W/m ²	1551.6 lx
100 cm	50.27 W/m ²	1096.6 lx

Wie man dieser Tabelle entnehmen kann, ist die Strahlungsleistung mit einer Entfernung von 100cm grösser als diejenige von 85cm. Physikalisch wäre dies gar nicht möglich, deshalb muss es sich hier um eine Messungenauigkeit handeln.

5.7 Umrechnung der Strahlungsleistung G in die Beleuchtungsstärke

Eine Umrechnung von der Strahlungsleistung in die Beleuchtungsstärke ist ohne weiteres machbar. Man muss sich jedoch im klaren sein, dass es sich hier rein physikalisch gesehen um keine saubere Umrechnung handelt. Ein kleiner Fehler wird deshalb immer vorliegen. Da es aber ein nicht allzu schwerwiegender Fehler ist, nehmen wir diesen in Kauf und vernachlässigen ihn.



? Beim Wert, der mit einem Fragezeichen versehenen ist, handelt es sich um eine Messungenauigkeit. Dieser Wert würde aufgrund seiner Ungenauigkeit die Regressionskurve falsch beeinflussen, deshalb wird dieser Wert nicht in die Regressionskurve mit einbezogen. (Wir nehmen an dieser Wert sei falsch, theoretisch könnte es auch der andere (45.7) sein)

Worin besteht der Nutzen dieser Umrechnung?

Aus dieser Grafik kann für jeden Wert der Strahlungsleistung G ein Wert der Beleuchtungsstärke entnommen werden. Später kann mit Hilfe dieser und einer noch anderen, zusätzlichen Darstellung zu jeder Entfernung H das jeweils zutreffende G bestimmt werden. Diese Umrechnung wird uns dann von grossem Nutzen sein.

5.8 Wie kann ein bestimmtes G auf mein Modell umgerechnet werden?

Dieses G hängt stark damit zusammen, wie hoch der Lampenring über dem Modell aufgehängt ist. Bei den vorherigen Messungen habe ich bei konstanter Höhe nebst der Strahlungsstärke G jeweils auch die dazu auftretende Beleuchtungsstärke gemessen. Dazu habe ich eine

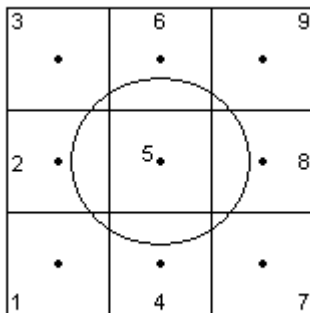
graphische Darstellung gemacht, welche es uns ermöglicht zu jedem G, die dafür eintreffende Beleuchtungsstärke in Lux zu ermitteln.

Nun muss man eine erneute Messung durchführen. Die Resultate dieser Messung werden es uns dann ermöglichen zu jeder beliebigen Höhe, in der die Lampen befestigt werden, über die Beleuchtungsstärke in Lux, das passende G zu bestimmen.

Was und wo wird gemessen?

Da der Kollektor meines Aufwindkraftwerkmodells am Boden eine grosse Fläche einnimmt, werden wir an **9** gleichmässig von einander entfernten Punkten jeweils eine **Beleuchtungsstärkemessung** durchführen. Diese Messungen werden mit Hilfe des Luxmeters gemacht. Danach werden wir jeweils die durchschnittlich eintreffende Beleuchtungsstärke ermitteln um danach mit dieser weiter rechnen zu können.

Skizze der Messorte:



• Ort der einzelnen Messungen

Die Grundfläche besteht aus 9 Teppichplatten. Alle Platten haben die Masse von 30×30 cm. Es wird in der Mitte jeder Platte eine Messung durchgeführt.

(Der Kreis stellt den Lampenring dar)

Jede Messreihe, bestehend aus jeweils diesen 9 Punkten, findet in einer konstanten Höhe statt, die vor jeder Messreihe neu festgehalten wird.

Wenn die ersten 9 Messungen der gleichen Höhe gemacht sind, wird die Entfernung zwischen Lampenring und Kollektorfläche erhöht und es werden 9 neue Messungen durchgeführt. Diese Messungen finden in folgenden Höhen statt:

H = 20 cm; 40 cm; 70 cm; 100 cm; 140 cm

Man muss jedoch beachten, dass die Messungen der hintersten Plattenreihe (Platte 3, 6, 9) durch die weisse Wand im Hintergrund ein wenig beeinflusst worden sind.

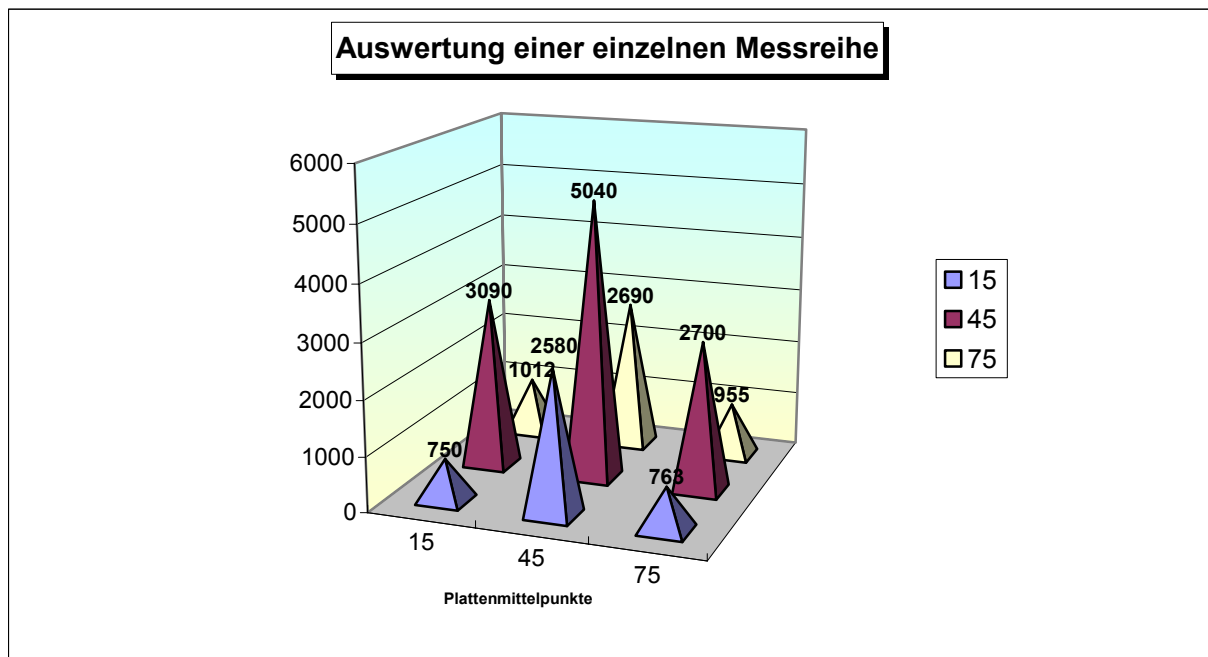
Wie man auch den Messwerten entnehmen kann, sind die Beleuchtungsstärkemessungen in der hintersten Plattenreihe etwas höher ausgefallen als diejenigen in der Vordersten. (Platten 1, 4, 7) Da die Entfernung vom Lampenring in diesen zwei Reihen gleich ist, muss es sich dabei um die Wandreflektion handeln.

5.9 Tabelle mit den Messwerten (Beleuchtungsstärke)

Höhe	20 cm	40 cm	70 cm	100 cm	140 cm
Beleuchtungsstärke Platte 1	750 lx	936 lx	858 lx	700 lx	531 lx
Beleuchtungsstärke Platte 2	3090 lx	2150 lx	1435 lx	940 lx	613 lx
Beleuchtungsstärke Platte 3	1012 lx	1173 lx	1101 lx	821 lx	552 lx
Beleuchtungsstärke Platte 4	2580 lx	2190 lx	1264 lx	890 lx	596 lx
Beleuchtungsstärke Platte 5	5040 lx	3810 lx	1966 lx	1169 lx	690 lx
Beleuchtungsstärke Platte 6	2690 lx	2350 lx	1490 lx	976 lx	613 lx
Beleuchtungsstärke Platte 7	763 lx	1020 lx	908 lx	680 lx	492 lx
Beleuchtungsstärke Platte 8	2700 lx	1960 lx	1280 lx	876 lx	568 lx
Beleuchtungsstärke Platte 9	955 lx	1182 lx	1046 lx	778 lx	515 lx
Durchschnittliche Beleuchtungsstärke	2175.6 lx	1863.4 lx	1260.9 lx	870.0 lx	574.4 lx

5.10 Auswertung der Beleuchtungsstärke-Messreihe H = 20 cm

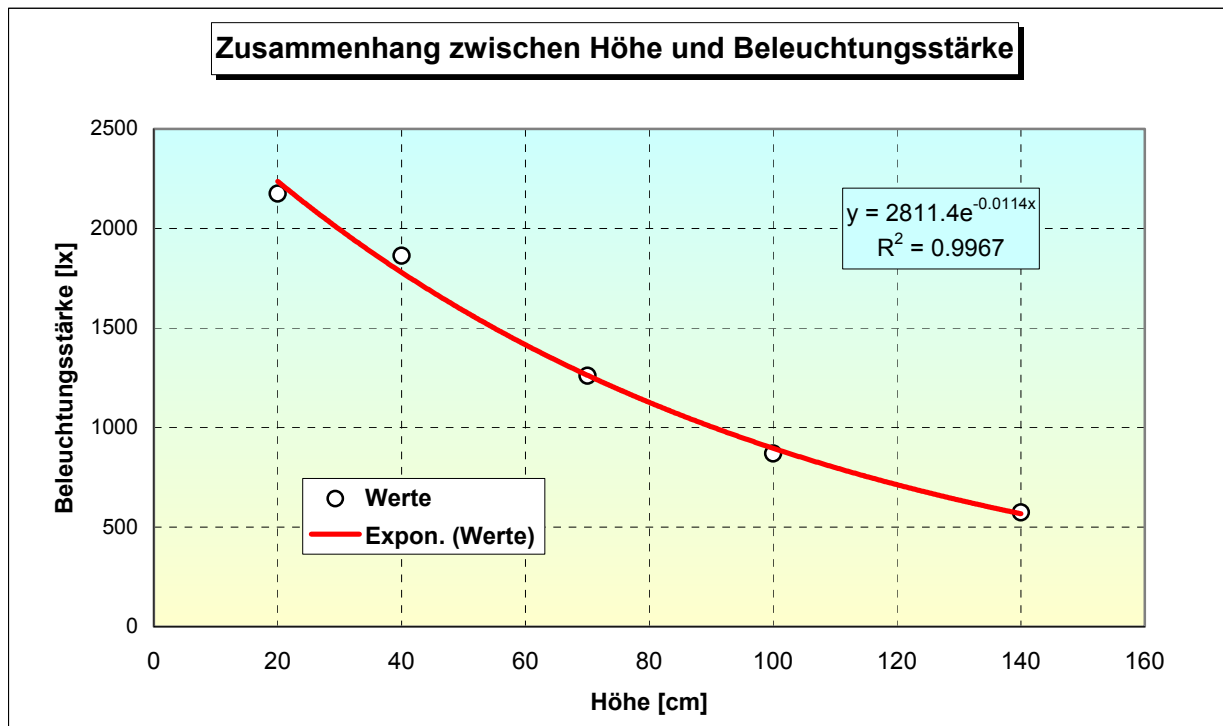
Wie sieht eine einzelne Messreihe aus?



Durchschnittliche Beleuchtungsstärke: **2175.6 lx**

Graphische Darstellung aller Beleuchtungsstärke-Messreihen

Wir bilden nun die Durchschnittswerte aller Luxmessungen. Da wir jeweils auch die, zu diesen Durchschnittswerten, entsprechenden Höhen kennen, können wir dies nun ebenfalls graphisch darstellen.



Aufgrund dieser graphischen Darstellung, können wir nun zu jeder beliebigen Höhe die entsprechende Beleuchtungsstärke G , fürs Modell entnehmen (in Lux)

Mit diesem nun erhaltenen Luxwert, können wir mit Hilfe der Graphik zu den Messungen mit dem Solarimeter auf das passende G schliessen. (siehe Graphik in Kapitel 5.7)

5.11 Temperatur- und Kamingeschwindigkeitsmessungen am Modell

Um nun noch die zwei letzten, fehlenden Komponenten der Ausgangsgleichung zu bestimmen, musste ich nochmals zwei verschiedene Messungen machen. Bei diesen Grössen handelte es sich einerseits um die Temperaturdifferenz ΔT zwischen Kaminein- und Kaminaustritt, andererseits um die Geschwindigkeit der steigenden Luft, die Luftgeschwindigkeit v_t also.

Diese beiden Messungen liefen parallel zu einander ab, weil die Luftgeschwindigkeit sehr stark von der Temperaturdifferenz ΔT abhängt.

Was messe ich um die Luftgeschwindigkeit im Kamin zu bestimmen?

Leider war es mir nicht möglich diese Geschwindigkeit mit einem Geschwindigkeitsmesser zu bestimmen, da die Kamingeschwindigkeit nicht gross genug war, um so ermittelt werden zu können. Deshalb musste ich eine eigene Methode entwickeln, um dieses Problem umgehen zu können. Ich hatte die Idee, dass dies eventuell mit einer Feder machbar wäre. Man würde unten eine Feder in den Kamin geben und dann mit einer Stoppuhr die Zeit messen wie lange sie benötigt um die Strecke von etwa 2.20m Kaminlänge zurück zu legen. Man könnte nun mit der Formel

$$v_t = \frac{s_{K.länge}}{t_{gemessen}}$$

auf die Luftgeschwindigkeit v_t schliessen. Ich habe dies dann versucht und die Feder flog auch wirklich nach oben. Aber ich habe dann schlussendlich eine andere Variante vorgezogen, denn diese Methode hatte zwei Nachteile:

- Die Feder hat ein Eigengewicht, was man auch berücksichtigen müsste, und dies würde alles um einiges komplizierter machen.
- Ein anderes Problem war, dass nur wenige Federn den Weg bis nach oben fanden. Die meisten wurden auf Grund von elektrostatischen Kräften, die sich durch Reibung der warmen Luft mit dem Kaminrand ergaben, angezogen und klebten dann einfach irgendwo am Kamin fest.

Deswegen musste ich mich für eine neue Variante umsehen. Ich habe dann eine gefunden, die auch wirklich funktionierte. Mit Hilfe von Rauch, konnte ich dann genau sehen wie lange es dauert von der Eingabe unten bis zum Austritt oben. Da Rauch über kein grosses Eigengewicht verfügt, konnte man dies dann auch vernachlässigen und ich konnte meine Messungen so gut durchführen. Das einzige Problem, das auftrat, war, wo bekomme ich einen sehr konzentrierten Rauch her, der dann auch wirklich sichtbar ist. Mit Hilfe von Feuerwerkskörpern, sogenannten „Rauchbomben“ konnte ich den benötigten Rauch erzeugen. Das einzige Problem, das ich noch hatte war, wie bringe ich den Rauch nun konzentriert



genug in den Kamin. Zu Beginn versuchte ich es mit Hilfe von Spritzen. Dies funktionierte jedoch nicht, da man damit den Rauch nicht schnell genug ins System bringen konnte, und er deswegen nicht zu sehen war. Mit einer Sporttrinkflasche, der ich das Vorderteil einer Spritze aufsetzte, konnte ich schlussendlich genügend viel Rauch schnell in den Kamin geben, damit man den Rauch dann auch beobachten konnte. Somit war ich nun in der Lage die Zeit von der Raucheingabe bis zum Rauchaustritt am Kaminende zu stoppen.



Nun war es mir möglich mit der bereits oben genannten Formel die Luftgeschwindigkeit v_t auszurechnen.

Beispiel einer solchen Berechnung:

$$\begin{aligned} t_{\text{benötigt}} &= 2.17 \text{ sec} & \text{nach einsetzen in: } v_t &= \frac{s_{K.länge}}{t_{\text{gemessen}}} \\ s_{\text{Kaminlänge}} &= 2.195 \text{ m} & \Rightarrow v_t &= \frac{2.195 \text{ m}}{2.17 \text{ s}} = 1.0115 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(Die Kaminlänge $s_{\text{Kaminlänge}}$ verläuft hier vom Raucheinspritzloch bis zum Kaminaustritt, ansonsten misst die ganze Kaminlänge noch rund 2 cm mehr)

Wie messe ich die Temperaturdifferenz ΔT

Hierbei handelt es sich um die einfachste aller dieser Messungen. Alles was man dazu brauchte, war ein Temperaturmessgerät mit zwei Messsensoren. Man konnte diese zwei Temperatursensoren beide parallel zu einander messen lassen. Dies war von grossem Vorteil, denn so konnte man gleichzeitig zwei Messungen durchführen. Der eine Sensor musste ich beim Kamineintritt in den Kamin hineinstecken, so dass er dort die Temperatur genauestens wahrnehmen konnte. Der andere musste auf der Höhe des Kaminaustritts befestigt werden, um dort Messungen durchzuführen. Praktischerweise konnte das Messgerät gerade den Temperaturunterschied ΔT ausrechnen, so dass einem viel mühsame Arbeit erspart wurde.



Wann messe ich die Temperaturdifferenz und wie wird sie berechnet?

Direkt nach jeder Geschwindigkeitsmessung, wurde jeweils die Temperaturdifferenz notiert.

Der Temperaturunterschied ΔT berechnet sich wie folgt:

$$\Delta T = T_{\text{Kamineintritt}} - T_{\text{Kaminaustritt}}$$

5.12 Tabellen mit den Geschwindigkeits- und Temperaturmesswerten

Von den Zeitmessungen, die zur Geschwindigkeitsermittlung dienten, wurden jeweils 3 oder 4 verschiedene Messungen, mit gleicher Entfernung, gemacht. Die Messung führte man in drei verschiedenen Entfernungen, mit $H = 20\text{cm}$, 40cm und 55cm durch. Der Grund, dass nur wenige Messungen gemacht wurden, ist, dass die Rauchproduktion sehr mühsam war.

Messung mit 20cm Entfernung:

Messung	t_{gemessen}	$v_t = \frac{s_{\text{Ka minlänge}}}{t_{\text{gemessen}}}$	ΔT
1	2.17 s	1.012 m/s	18.4 K
2	2.07 s	1.060 m/s	18.5 K
3	2.08 s	1.055 m/s	18.2 K
Durchschnittswert	2.107 s	1.042 m/s	18.37 K

$$T_0 = T_{\text{austritt}} = 24.1^\circ\text{C}$$

(Dies ist der Fall da das Aufwindkraftwerk nur etwas mehr als 2m hoch ist, deshalb kann die Temperatur am Austrittsort etwa gleich der Raumtemperatur angenommen werden)

Die zurückgelegte Strecke s ist immer konstant gleich lang: $s_{\text{Ka minlänge}} = 2.195\text{m}$

Messung mit 40 cm Entfernung:

Messung	t_{gemessen}	$v_t = \frac{s_{\text{Ka minlänge}}}{t_{\text{gemessen}}}$	ΔT
1	2.80 s	0.784 m/s	13.5 K
2	2.65 s	0.828 m/s	11.4 K
3	2.80 s	0.784 m/s	13.3 K
4	2.61 s	0.841 m/s	14.1 K
Durchschnittswert	2.715 s	0.808 m/s	13.08 K

$$T_0 = T_{\text{austritt}} = 24.2^\circ\text{C}$$

Hier wurden 4 verschiedene Messungen durchgeführt, da das ΔT zwischen den einzelnen Messungen ziemlich stark schwankte. So bekommt man schlussendlich einen genaueren Durchschnittswert.

Messung mit 55 cm Entfernung:

Messung	t_{gemessen}	$v_t = \frac{s_{\text{Ka minlänge}}}{t_{\text{gemessen}}}$	ΔT
1	4.01 s	0.547 m/s	10.0 K
2	3.98 s	0.552 m/s	9.60 K
3	4.06 s	0.541 m/s	10.0 K
Durchschnittswert	4.017 s	0.546 m/s	9.87 K

$$T_0 = T_{\text{austritt}} = 24.2^\circ\text{C}$$

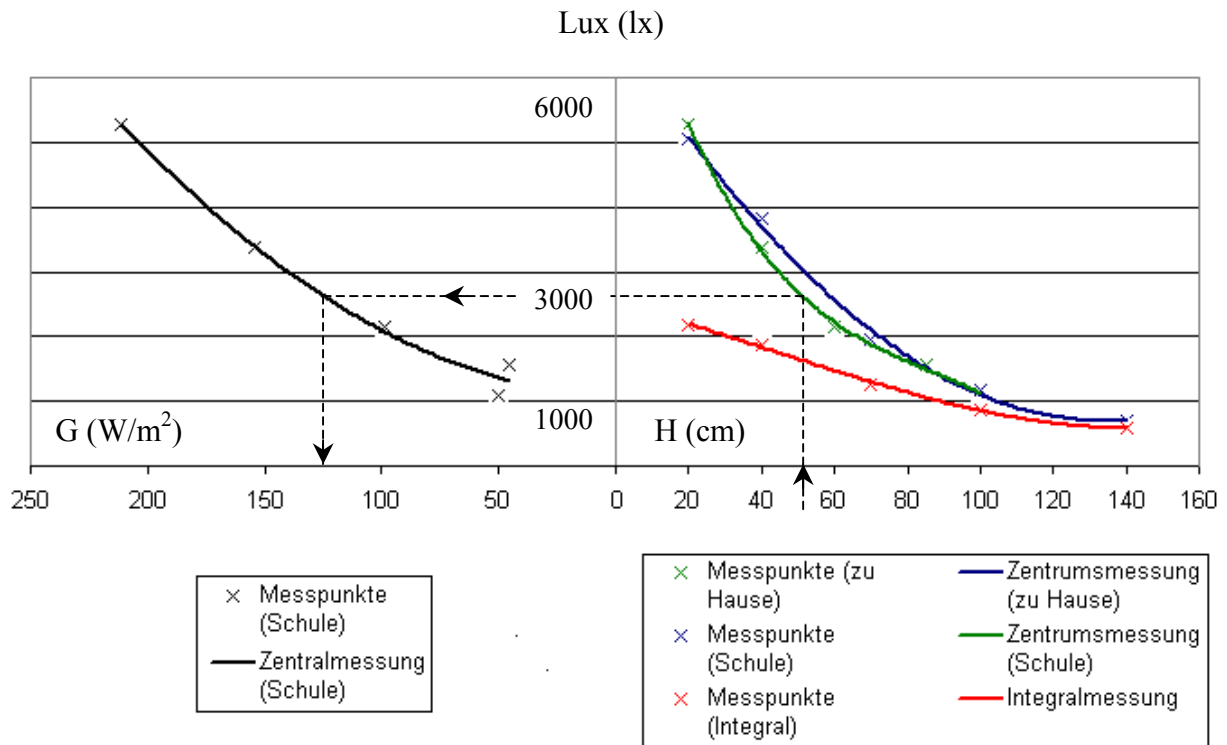
Wie geht es weiter?

Nun haben wir alle unbekanntes Grössen bestimmt. In drei verschiedenen Entfernungen H, kennen wir jetzt die Geschwindigkeit v_t und die Temperaturdifferenz ΔT . Da wir zu jeder beliebigen Entfernung H, die Beleuchtungsstärke G bestimmen können, haben wir nun genügend Information um die beiden Werte von α und β zu bestimmen.

6. Schlussfolgerungen

Bestimmung von α und β , sowie der produzierten mechanischen Leistung des Kraftwerkes

6.1 Die Lux - und G - Korrelation



$$y = -6E-05x^3 + 0.1065x^2 - 0.1472x + 1112.3$$

$$R^2 = 0.9885$$

$$y = 0.0007x^3 - 0.0867x^2 - 14.37x + 2504.2$$

$$R^2 = 0.9985$$

$$y = 6E-05x^3 + 0.3174x^2 - 88.672x + 6729.4$$

$$R^2 = 0.9972$$

$$y = -0.0078x^3 + 2.0259x^2 - 198.14x + 8506.9$$

$$R^2 = 0.9987$$

Kommentar zur Graphik

Auf der **rechten Seite** ist die Höhe-Beleuchtungsstärke-Funktion aufgezeichnet. Dazu hatte ich drei verschiedene Messreihen mit jeweils unterschiedlichen Entfernungen H gemacht.

- 1) Die „Integralmessung“ (rot) ist diejenige, bei welcher in allen Plattenmittelpunkten eine Messung durchgeführt wurde und dann der Durchschnittswert ermittelt wurde.
- 2) Bei der „Zentrumsmessung zu Hause“ (blau) wurde jeweils bei jeder Beleuchtungsstärke-messung nur die mittlere Platte (Platte Nr.5) berücksichtigt. Es handelt sich hierbei also um eine Zentrumsmessung, welche logischerweise höhere Luxwerte liefert als die Integralmessung

- 3) Bei der „Zentrumsmessung Schule“ (grün) wurde jeweils parallel zur Strahlungsleistung G die Beleuchtungsstärke im Zentrum des Lampenrings gemessen. Dies geschah in der Schule.

Wie man den beiden Kurven der Zentrumsmessungen entnehmen kann, liefert die „Zentrumsmessung zu Hause“ leicht höhere Luxwerte als die „Zentrumsmessung Schule“. Dies ist der Fall, da die Messungen zu Hause nahe an einer weissen Wand statt gefunden haben. Daraus folglich hat diese Wand das Licht ein wenig reflektiert, was hier zu höheren Luxwerten führt.

Ebenfalls auffällig ist, je höher die Entfernung zum Kollektor wird, desto mehr nähern sich alle 3 Kurven einem Grenzwert an. Der Grund dafür ist, dass mit zunehmender Höhe das Licht immer stärker streut.

Auf der **linken Seite** wurde die Strahlungsleistungs-Beleuchtungsstärke-Funktion aufgezeichnet. Hier handelt es sich ausschliesslich um Zentrumsmessungen der Strahlungsleistung und der Beleuchtungsstärke.

Was ist wichtig aus dieser Graphik?

Für uns sind eigentlich nur die linke schwarze Kurve und die rechte grüne von Bedeutung. Da die y-Achse für beide Graphen die gleichen Luxwerte liefert, kann nun direkt von einer beliebigen Entfernung H auf die Strahlungsleistung G geschlossen werden. Es hat sich herausgestellt, dass die Zentrumsmessung, in Bezug auf die Bestimmung von α und β , bessere Resultate liefert als die Integralmessung. Dies ist der Fall, da die Beleuchtungsstärke und somit auch die Strahlungsleistung G sehr mittebetont sind. Aus diesem Grund nehmen wir hier nicht die Integralmessung, welche uns mit einem Umweg über die Luxmittelwerte auf die durchschnittliche Strahlungsleistung G führt, sondern die Zentrumsmessung.

Wie mache ich die Umrechnung?

Wie bereits erwähnt kann nun mit Hilfe dieser Graphik von irgendeiner Entfernung H auf die dazu zutreffende Strahlungsleistung G geschlossen werden. Die in der Graphik mit gestrichelten Pfeilen eingezeichneten Linien beschreiben die Umrechnung. Es wird zuerst von einer bestimmten Höhe H die Beleuchtungsstärke in Lux bestimmt, von dieser Beleuchtungsstärke kann man dann direkt die Strahlungsleistung G ermitteln.

Dies soll anhand des in der Graphik eingezeichneten Beispiels veranschaulicht werden.

$$H \approx 52 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad \text{entspricht} \approx 2600 \text{ lx} \quad \Rightarrow \quad G \approx 125 \text{ W/m}^2$$

(Diese Umrechnung kann für jede der drei Kurven durchgeführt werden.)

6.2 Die beiden Konstanten α und β

Dank zahlreicher konstanter Faktoren kann die Formel um einiges vereinfacht werden.

Die Faktoren A_k , A_t , ρ_t und c_p können alle ausgeklammert und zu einem Term zusammen gefasst werden.

$$v_t = \frac{\alpha \cdot A_k \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_k}{\rho_t \cdot A_t \cdot c_p \cdot \Delta T} = \frac{A_k}{A_t \cdot \rho_t \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot G}{\Delta T} - \beta \right) = 0.2548 \text{ K} \cdot \text{m}^3 / \text{W} \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot G}{\Delta T} - \beta \right)$$

Da wir nun zwei Unbekannte haben, müssen wir jeweils mit 2 verschiedenen Messreihen 2 Gleichungssysteme aufstellen.

Wie funktioniert die Berechnung?

Nun brauchen wir nur noch die Werte von v_t , G und ΔT , welche uns bereits durch unsere vorherigen Messungen, aus 3 verschiedenen Entfernungen H , bekannt sind.

Alle Messdurchschnittswerte im Überblick

Entfernung H	20 cm	40 cm	55 cm
v_t	1.042 m/s	0.808 m/s	0.546 m/s
ΔT	18.37 K	13.08 K	9.87 K
G_{Zentrum}	211.65 W/m²	154.66 W/m²	≈ 115 W/m²
G_{Integral}	≈ 100 W/m ²	≈ 85 W/m ²	≈ 70 W/m ²

Alle Werte die mit einem geschweiften Gleichheitszeichen (≈) versehen sind, wurden der vorherigen Graphik entnommen, bei den andern handelt es sich um genau gemessene Werte.

Nun stellen wir mit den Messreihen **H = 20 cm** und **H = 40 cm** zwei Gleichungssystemen auf. Für die Strahlungsleistung verwenden wir jeweils das G_{Zentrum} .

$$H = 20: \quad 1.042 \text{ m/s} = 0.2548 \text{ K} \cdot \text{m}^3 / \text{W} \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot 211.65 \text{ W/m}^2}{18.37 \text{ K}} - \beta \right)$$

$$H = 40: \quad 0.808 \text{ m/s} = 0.2548 \text{ K} \cdot \text{m}^3 / \text{W} \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot 154.66 \text{ W/m}^2}{13.08 \text{ K}} - \beta \right)$$

Wenn man jetzt diese 2 Gleichungssysteme nach α und β auflöst, erhält man folgende Werte:

$$\alpha = -3.0344 \quad \text{und} \quad \beta = -39.050 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Vergleicht man die 2 Werte mit den typischen Werten von der „Schlaich Bergermann und Partner GbR“ so stellt man fest, dass die unserigen doch etwas von den Erwarteten abweichen.

Typische Werte: $\alpha = 0.75 - 0.8$ **und** $\beta = 5 - 6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Was ist der Grund für diesen grossen Unterschied?

Nur um zu vergleichen setzen wir nun mal die typischen Werte ein und schauen was für eine Geschwindigkeit sich daraus ergibt. Wir nehmen an $\alpha = 0.775$ **und** $\beta = 5.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Wir setzen dies nun mal bei $H = 40 \text{ cm}$ ein:

$$v_t = 0.2548 \text{ K} \cdot \text{m}^3 / \text{W} \cdot \text{s} \cdot \left(\frac{0.775 \cdot 154.66 \text{ W/m}^2}{13.08 \cdot \text{K}} - 5.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \right) \Rightarrow v_t = 0.9335 \text{ m/s}$$

Nun rechnen wir diese Geschwindigkeit zurück auf die Zeit, die wir bei den Messungen gestoppt haben.

$$0.9335 \text{ m/s} = \frac{2.195 \text{ m}}{t} \Rightarrow t = 2.351 \text{ s}$$

Wenn wir zu Beginn bei der Geschwindigkeitsmessung mit $H = 40 \text{ cm}$, von der Raucheingabe bis zum Rauchaustritt am oberen Kaminrand, eine Zeit von 2.351s gemessen hätten, hätten wir genau die Werte bekommen, welche uns als typische Werte vorgelegt worden sind.

Hingegen haben wir aus 3 Messungen eine durchschnittliche Zeit von 2.715s gestoppt.

Wie man nun erkennen kann, beträgt der Unterschied zwischen den beiden Zeiten nur etwa 36.4 Hundertstelsekunden. Dabei handelt es sich um eine sehr kurze Zeitdifferenz, die auf jeden Fall im Bereiche der Messungenauigkeit liegt.

Daraus folglich muss man feststellen, dass die Gleichung um α und β zu bestimmen **sehr empfindlich** ist, und dass mit einer kleinen Messungenauigkeit bereits schon eine riesige Abweichung von den erwarteten Werten entsteht.

Um nun unser durchschnittliches α und β zu bestimmen, müssen wir die anderen beiden Kombinationen auch noch berechnen und danach den Durchschnitt bilden.

H = 20 cm / H = 55 cm $\alpha = -14.978$ **und** $\beta = -176.657 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

H = 40 cm / H = 55 cm $\alpha = 5.954$ **und** $\beta = 67.234 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

Wenn man nun den Mittelwert für α und β berechnet, erhält man folgendes

$$\alpha = -4.0193 \quad \text{und} \quad \beta = -49.4909 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

6.3 Bestimmung der mechanischen Leistung

Da wir nun die durchschnittlichen Werte der beiden Konstanten α und β kennen, ist es kein allzu grosses Problem mehr die mechanische Leistung unseres Kraftwerkes zu bestimmen. Diese Leistung hängt direkt von der Strahlungsleistung G ab, das heisst indirekt von der Entfernung des Lampenrings vom Kollektor. Es ist deswegen logisch, dass je weiter der Lampenring vom Kollektor entfernt ist, desto mehr die mechanische Leistung abnimmt. Wir werden deshalb für jede Entfernung H eine unterschiedliche mechanische Leistung bekommen.

Mit unseren jetzigen Kenntnissen ist es nur noch eine Einsetzübung, um nun schlussendlich die mechanische Leistung zu bestimmen.

$$P_{\text{mech}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{c_p \cdot T_0} \cdot H \cdot A_k \cdot G \cdot \left(\alpha - \beta \cdot \frac{\Delta T}{G} \right) \quad (\text{wobei hier mit } H \text{ die Turmhöhe gemeint ist})$$

$$H = 2.215 \text{ m}$$

Tabelle mit den benötigten Werten:

Entfernung H	20 cm	40 cm	55 cm
T_0	297.25 K	297.35 K	297.35 K
ΔT	18.37 K	13.08 K	9.87 K
G_{Zentrum}	211.65 W/m ²	154.66 W/m ²	≈ 115 W/m ²

1) Wir benützen unsere ermittelten Werte für die beiden Konstanten α und β .

$$\alpha = -4.0193 \quad \text{und} \quad \beta = -49.4909 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Daraus ergeben sich folgende mechanischen Leistungen P_{mech} :

$$H = 20 \text{ cm:} \quad P_{\text{mech}} = 0.00337 \text{ W}$$

$$H = 40 \text{ cm:} \quad P_{\text{mech}} = 0.00148 \text{ W}$$

$$H = 55 \text{ cm:} \quad P_{\text{mech}} = 0.00151 \text{ W}$$

2) Nun benützen wir für α und β die Werte von der „Schlauch Bergermann und Partner GbR“

$$\alpha = 0.775 \quad \text{und} \quad \beta = 5.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Daraus ergeben sich folgende mechanischen Leistungen P_{mech} :

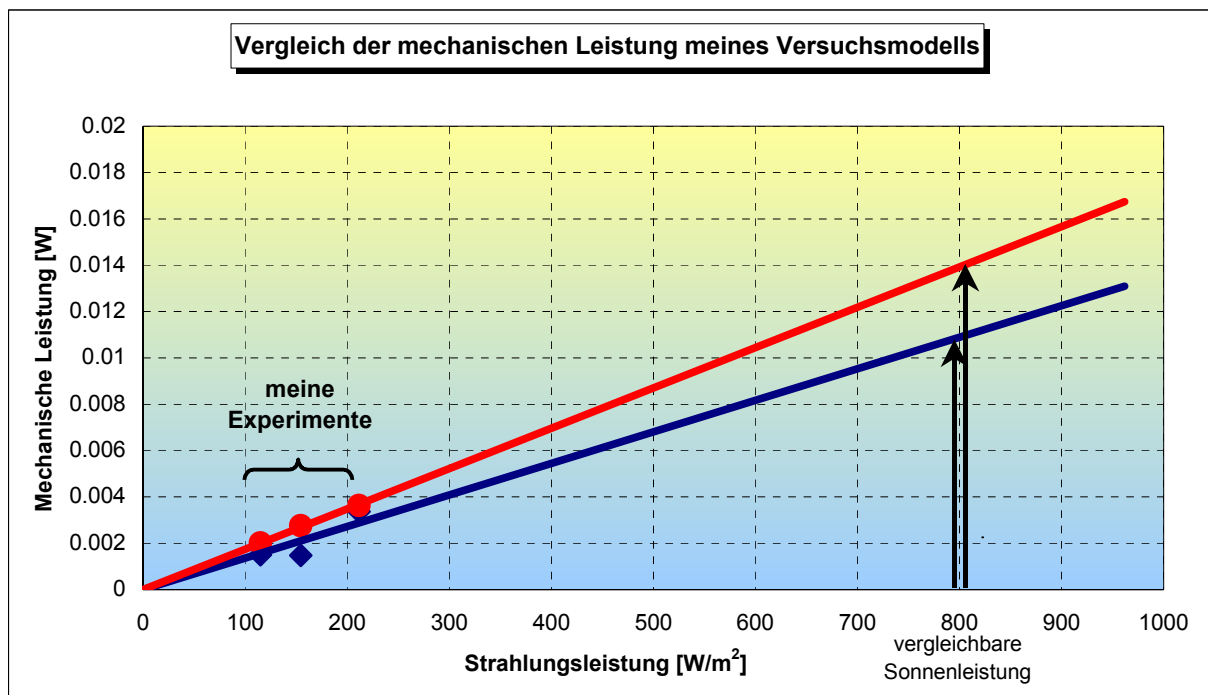
$$H = 20 \text{ cm:} \quad P_{\text{mech}} = 0.00363 \text{ W}$$

$$H = 40 \text{ cm:} \quad P_{\text{mech}} = 0.00276 \text{ W}$$

$$H = 55 \text{ cm:} \quad P_{\text{mech}} = 0.00201 \text{ W}$$

Wenn man nun die Leistungen, mit unseren Konstanten α und β , mit denjenigen von der Firma „Schlaich Bergermann und Partner GbR“ vergleicht, stellt man fest, dass die Abweichung unserer Resultate von den ihrigen nicht sehr gross ist. Vermutlich wurde sie verursacht durch kleine Messungenauigkeiten, die sich stark auf α und β auswirken, jedoch nur geringfügig auf das Endresultat der mechanischen Leistung.

Graphische Darstellung der Leistungsunterschiede



Die blaue Kurve entspricht der mechanischen Leistung des Kraftwerks, unter Verwendung der selbst ermittelten Konstanten α und β . ($\alpha = -4.0193$ und $\beta = -49.4909 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)

Die rote Kurve stellt die Leistung unter Verwendung der Konstanten von der Firma „Schlaich Bergermann und Partner GbR“ dar ($\alpha = 0.775$ und $\beta = 5.5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)

$$y = 1.362E-05x$$

$$R^2 = 0.7299$$

$$y = 1.741E-05x$$

$$R^2 = 0.9942$$

Zwar liefern hier die linearen Regressionskurven, durch die errechneten Leistungspunkte, nicht die kleinste Fehlerquadratsumme, jedoch zeigen sie den Verlauf der mechanischen Leistung, auf ein breites Spektrum gesehen, am Besten auf.

6.4 Was wäre die Leistung des Kraftwerkes unter Sonneneinstrahlung?

Als Strahlungsleistung der Sonne G_{Sonne} nehmen wir 800 W/m^2 an, was einem schönen Sommertag entspricht. Wenn wir nun $x = 800 \text{ W/m}^2$ in die beiden Regressions-Gleichungen einsetzen, bekommen wir die mechanischen Leistungen unseres Kraftwerkes unter diesen Bedingungen.

Für die blaue Kurve erhalten wir folgende Leistung:

$$G_{\text{Sonne}} = 800 \text{ W/m}^2 \quad \Rightarrow \quad P_{\text{mech/Sonne}} = 0.0109 \text{ W}$$

Für die rote Kurve ergibt sich folgende Leistung:

$$P_{\text{mech/Sonne}} = 0.0139 \text{ W}$$

Wenn man nun die mit dem Lampenring produzierte Leistung mit welcher unter Sonneneinstrahlung vergleicht, stellt man fest, dass die mechanische Leistung mit einer Entfernung von 20 cm des Lampenrings vom Kollektor etwa 3.5 mal kleiner ist, als die mit der Sonne produzierte Leistung.

Nachdem wir nun unser Aufwindkraftwerk geprüft haben, wissen wir, dass das Prinzip für unser Kraftwerk funktioniert. Die produzierten Leistungen sind zwar klein, jedoch im Vergleich mit der Theorie stimmen sie ziemlich genau überein.

Was kann mit dieser Leistung angetrieben werden?

Um den Bezug zur Realität herzustellen, möchte ich hier einen kleinen Vergleich machen. Unsere produzierte Leistung, unter Sonneneinstrahlung, von etwa 0.014 Watt genügt gerade mal um eine kleine Leuchtdiode zu betreiben. Eine Leuchtdiode benötigt ungefähr 0.02 Watt um zum Leuchten gebracht zu werden.

7. Zusammenfassung

Das Aufwindkraftwerk kann mit Hilfe der Sonne Energie erzeugen, die absolut sauber und wirtschaftlich vertretbar ist. Diese Idee des Stuttgarter Professors Jörg Schlaich hat mich fasziniert. Deshalb wollte ich die Funktionsfähigkeit dieses Kraftwerktypen verifizieren. Das von mir gebaute, funktionstüchtige Modell wurde anhand der Theorie von Herrn Schlaich entwickelt. Die Sonne wurde dabei mit Glühlampen simuliert und die verschiedenen Messungen am System hatten zum Ziel, einerseits die Funktionstüchtigkeit zu beweisen und andererseits unser Modell mit den Erfahrungswerten von Herrn Schlaich zu bestätigen.

Kurz zusammengefasst zeigt meine Maturaarbeit, dass das System funktioniert. In sonnenbeschienenen Gegenden könnte diese Idee deshalb durchaus Zukunftspotential haben.

Die Arbeit war zeitintensiv, jedoch sehr interessant und lehrreich für mich.

Quellenverzeichnis

1 Literaturverzeichnis

- [1] Schlaich Bergermann und Partner GbR: Das Aufwindkraftwerk;
http://www.sbp.de/de/fla/contact/download/Das_Aufwindkraftwerk.pdf (2.12.2002)
- [2] Sonneneinstrahlung; <http://www.solarserver.de/lexikon/sonneneinstrahlung.html>
(4.12.2002)
- [3] Sonnenenergie; <http://www.solarserver.de/lexikon/sonnenenergie.html>
(4.12.2002)
- [4] The Solar Chimney;
http://www.globalwarmingsolutions.co.uk/the_solar_chimney.htm (3.12.2002)
- [5] Theoretische Grundlagen zum Aufwindkraftwerk; Schlaich Bergermann und Partner GbR, Stuttgart

2 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Sonneneinstrahlung;
<http://www.solarserver.de/lexikon/sonneneinstrahlung.html> (4.12.2002)
- Abb. 2 Solar Chimney – Cooling Tower; <http://ww2.green-trust.org:8383/chimney.htm> (5.12.2002)
- Abb. 3 Aufwindkraftwerk; <http://www.energieinfo.de/eglossar/node6.html>
(4.12.2002)
- Abb. 4 Schlaich Bergermann und Partner GbR: Das Aufwindkraftwerk;
http://www.sbp.de/de/fla/contact/download/Das_Aufwindkraftwerk.pdf
(2.12.2002)

Alle andern Abbildungen, wie Fotos, Skizzen oder Graphiken, sind selbst erstellt worden.