

# Beuth Hochschule für Technik Berlin

## University of Applied Sciences

Fachbereich VIII

Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik

# Entwicklung und Bau eines solarbetriebenen Stirlingmotors für den Einsatz in Indonesien

von

Michael Weh

Matrikelnummer: 798748

Zur Erlangung des Grades Bachelor of Engineering (B.Eng.)

im

Studiengang Maschinenbau- Erneuerbare Energien

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Förster

2. Gutachter: Dr.-Ing. Andreas Loth

Eingereicht: 8. Juli 2019



Diese Arbeit steht unter einer Creative Commons  
Attribution-ShareAlike 4.0 International Lizenz.

## Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Kombination eines Parabolspiegels und einem Stirlingmotor, ein sogenanntes „Dish/Stirling-System“ zur Energieerzeugung. Ziel ist es, diesen parabolischen Kollektor mit einfachsten Mitteln günstig herzustellen. Dazu wird das Reflexionsverhalten verschiedener als Abfallprodukt verfügbarer Materialien gemessen und Konzepte eines selbst herzustellenden Sonnenkollektors erarbeitet. Basierend auf einem Variantenvergleich erfolgt die Auswahl eines für dieses System geeigneten Stirlingmotors. Diese beiden Hauptkomponenten des geplanten Dish/Stirling-Systems werden aneinander angepasst und auf Basis dieser Komposition entsprechende weiterführende Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sowie die unterschiedlichen Varianten werden abschließend diskutiert und es wird auf die weiteren Schritte bis zur Umsetzung eingegangen.

**Schlagwörter:** Parabolspiegel Stirlingmotor, Variantenvergleich, Reflexionsversuch, Dish/Stirling-System

## Abstract

This thesis is about the combination of a parabolic mirror and a stirling-engine, a so called „dish/stirling-system“ to produce electricity. The parabolic collector should be made of cheapest materials. Therefore a reflection trial with different rubbish materials is made. Concepts of a selfmade suncollector are worked out. Basing on a variant comparison a fitting to this system stirling engine is chosen. These two main components of the planned dish/stirling-system are scaled to work together. For this composition coresponding calculations are done. The results and the different variants are discussed and steps to realize the system are shown.

**Keywords:** parabolic mirror, stirling engine, variant comparison, reflection trial, dish/stirling-system

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	2
Abstract.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
Formelzeichenverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	9
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Vorwort.....	12
1 Einleitung.....	13
2 Stand der Technik.....	15
2.1 Klimabedingungen.....	15
2.2 Der Parabolspiegel.....	18
2.2.1 Reflexion am parabolischen Kollektor.....	18
2.2.2 Geometrische Konzentration $c_{geo}$ .....	19
2.3 Der Stirlingmotor.....	20
2.3.1 Funktionsprinzip.....	20
2.3.2 Bauformen des Stirlingmotors.....	22
2.3.3 Wirkungsgrad.....	27
2.3.4 Der Experimentalmotor „Viebach ST 05 G“.....	29
2.4 Dish/Stirling-Systeme.....	30
2.4.1 Vor- / Nachteile.....	31
2.4.2 Energetische Funktionsweise.....	31
3 Ziel der Arbeit.....	34
4 Eingeschlagener Realisierungsweg.....	35
4.1 Versuchsreihe: Vergleich der Reflexion.....	35
4.1.1 Versuchsaufbau.....	37
4.1.2 Versuchsdurchführung.....	38
4.1.3 Ergebnisse/Auswertung.....	39
4.2 Berechnungen.....	40

4.2.1 Erreichbare Leistungen des Parabolspiegels.....	40
4.2.2 Berechnungstabelle zum Bau eines Parabolspiegels.....	41
4.2.3 Dimensionierung des Parabolspiegels für Viebach ST 05 G.....	42
4.2.4 Systemwirkungsgrad $\eta_{\text{sys}}$ .....	43
4.2.5 Erwarteter Jahresenergieertrag.....	44
4.3 Varianten eines einfachen Parabolspiegels.....	45
4.3.1 Satellitenschüssel.....	45
4.3.2 Bau durch Aufschichtung von Holzprofilen.....	47
5 Diskussion.....	50
5.1 Bauform des Parabolspiegels.....	50
5.2 Beschichtungsarten.....	50
5.3 Auswahl der Bauform sowie eines konkreten Stirlingmotors.....	51
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	54
Anhang A: Angebot der CAD-Daten.....	55
Anhang B: Datenblatt Kollektorprüfstand.....	56
Anhang C: Einstellung der Bestrahlungsstärke.....	58
Literaturverzeichnis.....	60
Erklärung.....	62

## Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$A_{Pr}$	Fläche der Probe	$m^2$
$A_{Ap}$	Apertureintrittsfläche	$m^2$
$A_{Ab}$	Absorberfläche	$m^2$
$A_{Kr}$	Kreisfläche	$m^2$
$E$	Bestrahlungsstärke	$\frac{W}{m^2}$
$E_0$	Solarkonstante	$\frac{W}{m^2}$
$E_{refl}$	reflektierte Bestrahlungsstärke	$\frac{W}{m^2}$
$E_{el}$	elektrische Energie	J
$E_{kin}$	kinetische Energie	J
$E_{mech}$	mechanische Energie	J bzw. Nm
$E_{strahl}$	Strahlungsenergie	J
$E_{therm}$	thermische Energie	J
$K$	Kettenlänge	m
$P$	Leistung	W
$P_{Ap}$	Leistung auf Aperturfläche	W
$P_{el, min}$	Minimale elektrische Leistung	W
$P_{el, max}$	Maximale elektrische Leistung	W
$R$	Radius	m

## Formelzeichenverzeichnis

---

S	Sehnenlänge	m
T	Temperatur	K
U	Spannung	V
a	Abstand Laborsonne - Probe	mm
b	Abstand Pyranometer - Probe	mm
c	Spezifische Wärmekapazität	kJ/kg*K
$c_{\text{geo}}$	geometrische Konzentration	-
$d_{\text{Ab}}$	Absorberdurchmesser	m
$d_{\text{Ap}}$	Aperturdurchmesser	M
f	Brennweite	m
k	Umrechnungsfaktor	-
m	Masse	kg
p	Luftdruck	mbar
r	Radius	m
$r_{\text{Ap}}$	Aperturradius	m
$r_{\text{Ab}}$	Absorberradius	m
t	Zeit	s

---

$\alpha$	Korrekturfaktor	[-]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	K
$\eta_{\text{Gen}}$	Generatorwirkungsgrad	% bzw. [-]
$\eta_{\text{max}}$	Maximaler Systemwirkungsgrad	% bzw. [-]
$\eta_{\text{min}}$	Minimaler Systemwirkungsgrad	% bzw. [-]
$\eta_{\text{Mot}}$	Maschinenwirkungsgrad (Motor)	% bzw. [-]
$\eta_{\text{PS}}$	Wirkungsgrad Parabolspiegel => Albedo-Wert	% bzw. [-]
$\eta_{\text{Sys}}$	Systemwirkungsgrad	% bzw. [-]
$\Theta$	Polarwinkel Theta	°
$\vartheta$	Temperatur theta	°C
$\varphi$	relative Luftfeuchte Phi	%



## Abkürzungsverzeichnis

DSS	Dish/Stirling-System
el	elektrisch
NTS	Niedertemperatur-Stirlingmotor
PVM	Photovoltaikmodul
WKM	Wärmekraftmaschine
WT	Wärmetauscher

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sonneneinstrahlung durch die Atmosphäre auf die Erdoberfläche.....	17
Abbildung 2: Darstellung der Funktionsweise eines Parabolspiegels [Schm16].....	18
Abbildung 3: geometrische Konzentration.....	19
Abbildung 4: Einfaches Modell zur Funktion des Stirling-Motors [WeKü07].....	21
Abbildung 5: Kompressionsphase [WeKü07].....	21
Abbildung 6: Expansionsphase [WeKü07].....	21
Abbildung 7: Alpha-Stirling [Vieb10].....	23
Abbildung 8: Beta-Stirling [Vieb10].....	24
Abbildung 9: Gamma-Stirling [Vieb10].....	26
Abbildung 10: Viebach ST 05 G mit Schwungrad.....	29
Abbildung 11: Prinzipskizze eines Dish/Stirling-Systems.....	32
Abbildung 12: Laborversuch Reflexion.....	35
Abbildung 13: Spiegelfolie.....	36
Abbildung 14: Rettungsdecke.....	36
Abbildung 15: Isomatte.....	36
Abbildung 16: Getränkedosen.....	36
Abbildung 17: Schema Versuchsaufbau.....	37
Abbildung 18: Solarkocher.....	46
Abbildung 19: relevante Maße für Eigenbau.....	49
Abbildung 20: Zusammenbauskizze [Conn19].....	49

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tagesdurchschnittstemperatur.....	16
Tabelle 2: Durchschnittliche Sonnenstunden.....	16
Tabelle 3: Technische Daten Viebach ST 05 G.....	30
Tabelle 4: Versuchsauswertung.....	40
Tabelle 5: Erreichbare Leistungen am Absorber.....	41
Tabelle 6: Parabolspiegel-Dimensionierung.....	42
Tabelle 7: Parabolspiegel-Dimensionierung für Viebach ST 05 G.....	43
Tabelle 8: Systemwirkungsgrad $\eta_{\text{sys}}$ .....	44
Tabelle 9: Erwarteter Jahresenergieertrag.....	45

## Vorwort

Die Motivation dieser Bachelorarbeit bildete sich aus der bestehenden Müllproblematik und des Bedarfs an elektrischer Energie in Indonesien. Was für eine tolle Kombination! Daraus entstand nämlich die Idee, einen Parabolspiegel mit Abfallprodukten und einfachsten Mitteln herzustellen und diesen mit einem Stirlingmotor zu kombinieren.

An erster Stelle gilt mein herzlicher Dank meinem Bachelorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Förster, für seine ruhige, verständnisvolle Art der Betreuung.

Allen Mitarbeitern der Beuth Hochschule, die durch ihre freundliche Verbundenheit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls herzlich danken.

Ein liebes Dankeschön geht auch an Timm Wille und Martin „Moe“ Heuer für ihre Geduld und zeitintensive Unterstützung beim Umgang mit dem mir zuvor nicht allzu vertrauten „Computer“ und den dazugehörigen OpenSource-Programmen.

Abschließend möchte ich mich noch von Herzen bei meinem Freund und Inhaber von 123-Rad (Münster) Michael Franken für die fruchtbaren Diskussionen sowie die kostenlose Bereitstellung von Probenmaterial bedanken.

Hier rauchte nur der Kopf und nicht der Motor...

# 1 Einleitung

„Der viele Jahrzehnte vergessene Stirling- oder Heißluftmotor wurde in den letzten Jahren wiederentdeckt. Seine Entwicklung und sein praktischer Einsatz begann im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts. Im Kleingewerbe zum Antrieb von Maschinen mit geringerem Leistungsbedarf war der Stirlingmotor damals weit verbreitet und geschätzt, bis er vor etwa 60 bis 70 Jahren durch den Otto- und Dieselmotor und die flächendeckende Versorgung mit elektrischem Strom verdrängt wurde. Sein Erfinder, der schottische Pfarrer Robert Stirling, hatte ihn als sichere Alternative zu den anfänglich gefährlichen Dampfmaschinen zur Entwässerung der Kohlebergwerke erdacht und ihn bereits 1816 patentieren lassen.“  
[Vieb10]

Der Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine (WKM), die mit jeder beliebigen Wärmequelle betrieben werden kann, beispielsweise mit Brennstoffen wie Holz, Öl, Biomasse oder Gas. Ebenfalls kann der Stirlingmotor in Zeiten der notwendigen Energiewende wie in unserem Anwendungsfall mit kostenloser, umweltfreundlicher Sonnenenergie versorgt werden. Diese steht im angedachten Einsatzort Jakarta ausreichend zur Verfügung (vgl. Tabelle 2: Durchschnittliche Sonnenstunden).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit grundsätzlichen Überlegungen und dem Vergleich verschiedener Varianten zum Bau eines solarbetriebenen Stirlingmotors. Ein großes Thema sind Vorüberlegungen und ein Laborversuch zum Reflexionsverhalten verfügbarer Abfallmaterialien zum Bau eines kostengünstigen Parabolspiegels. Dieser soll dann variabel ausgelegt werden.

Die Schnittstelle zwischen Kollektorspiegel und Stirlingmotor wird mit Hilfe einer Tabelle berechnet. Die Kombination dieser beiden Hauptkomponenten wird beispielhaft dargestellt.

Für diese Zusammenstellung wird dann noch der zu erwartende Jahresenergieertrag berechnet.

Diese Ergebnisse streben auf die spätere Umsetzung des Dish/Stirling-Systems in Zusammenarbeit mit der Universitas Pancasila (Jakarta Selatan, Indonesien) hin.

## **2 Stand der Technik**

Dieses Kapitel beinhaltet die Klimabedingungen vor Ort als Grundlage für die Berechnungen zum erwarteten Energieertrag. Außerdem wird auf die Geometrie eines Parabolspiegels eingegangen sowie dessen mathematische Grundlagen erläutert. Des Weiteren wird hier zum Verständnis der Stirlingprozess anhand eines einfachen Modells erklärt und ein Experimentalmotor vorgestellt. Im Anschluss wird die Kombination von Parabolspiegel und Stirlingmotor, das sogenannte Dish/Stirling-System (DSS) beschrieben.

### **2.1 Klimabedingungen**

Standort: Jakarta Selatan, Indonesien

Zu den entscheidenden Daten bei der Auslegung eines Stirlingmotors zählt das Temperaturniveau, also die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Temperatur und die angestrebte Leistung. Hier soll vorerst die Umgebungstemperatur für den geplanten Einsatzort erfasst werden (Tabelle 1). Bei diversen Online-Wetteranbietern sind abweichende Klimadaten zu finden. Daher wurde der Durchschnitt aus fünf verschiedenen Quellen ermittelt.

## Tagesdurchschnittstemperatur

in [°C]

Quelle	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
iten-online.ch	29	29	30	31	31	31	31	31	31	31	31	30
klima.org	30	30	31	32	32	32	31	32	33	34	32	32
wetter.com	30	30	31	32	32	32	32	32	33	33	32	32
weather-atlas	29,9	30,3	31,5	32,5	32,5	31,4	32,3	32	33	32,7	31,3	32
climatemps	27	27	28	28	28	28	28	28	28	29	28	28

Durchschnitt	29,2	29,3	30,3	31,1	31,1	30,9	30,9	31,0	31,6	31,9	30,9	30,8
--------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

**Jahresdurchschnitt:**

**30,74 °C**

*Tabelle 1: Tagesdurchschnittstemperatur*

[Clim17, Iten00, Klim19, Weat19, Wett90]

Dasselbe Verfahren wurde hier zur Ermittlung der durchschnittlichen Sonnenstunden pro Tag angewendet (Tabelle 2). Diese bilden die Grundlage zur späteren Ermittlung des zu erwartenden Jahresertrags an elektrischer Energie.

## Sonnenstunden

in [h/d]

Quelle	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
iten-online.ch	6,0	6,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0	10,0	10,0	9,0	8,0	7,0
klima.org	5,0	5,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	8,0	8,0	7,0	6,0	4,0
wetter.com	4,5	5,2	6,1	7,2	7,1	7,3	7,4	7,6	7,5	6,7	6,0	4,8
weather-atlas	6,1	6,4	7,7	8,5	8,4	8,5	9,1	9,5	9,7	9,0	7,7	7,1
climatemps	6,1	6,5	7,7	8,5	8,4	8,5	9,1	9,5	9,7	9,0	7,7	7,1

Durchschnitt	5,5	5,8	7,1	7,6	7,8	7,9	8,3	8,9	9,0	8,1	7,1	6,0
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

**Jahresdurchschnitt:**

**7,43 h/d**

*Tabelle 2: Durchschnittliche Sonnenstunden*

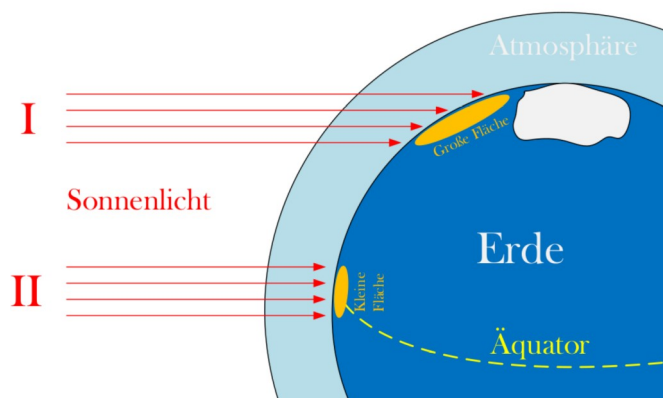
[Clim17, Iten00, Klim19, Weat19, Wett90]



Abbildung 1 zeigt bei

I) einen langen Weg der Strahlung durch die Atmosphäre. Der flache Winkel beim Auftreffen auf die Erdoberfläche führt zu einer Verteilung über ein großes Gebiet. Dies ist in den Polarregionen der Fall. Deshalb macht es wenig Sinn, die Sonnenenergie an diesen Standorten zu nutzen.

II) einen kurzen Weg der Strahlung durch die Atmosphäre. Durch den Einfallswinkel von  $90^\circ$  am Äquator (Jakarta) ergibt sich die Verteilung der Solarstrahlung über ein kleines Gebiet. In diesen Regionen sind ebenfalls die Verluste durch die Atmosphäre sehr gering. Daher ist der geplante Einsatzort ideal geeignet für die Nutzung von Sonnenenergie.



*Abbildung 1: Sonneneinstrahlung durch die Atmosphäre auf die Erdoberfläche*

Die Solarkonstante  $E_0$  beträgt laut [Ener18]  $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ . Davon werden 16% von der Atmosphäre absorbiert sowie 7% reflektiert (1). Das bedeutet bei senkrecht angenommener Strahlung durch die Atmosphäre und der Lage des Standortes am Äquator (vgl. Abbildung 1) eine Reduzierung von 23%.

$$E = E_0 * 0,77 \tag{1}$$

$$E = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,77 = 1052,59 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Somit wird für Jakarta für die Berechnungen bei 4.2 eine Bestrahlungsstärke  $E$  von  $1052,59 \text{ W/m}^2$  festgelegt.

## 2.2 Der Parabolspiegel

### 2.2.1 Reflexion am parabolischen Kollektor

Hier wird kurz die grundlegende Geometrie eines Parabolspiegels erklärt. Die parabolische Form ist die Einzige, die es ermöglicht, Strahlung (in diesem Fall solar) so punktgenau zu konzentrieren, wie es für den angedachten Anwendungsfall erforderlich ist.

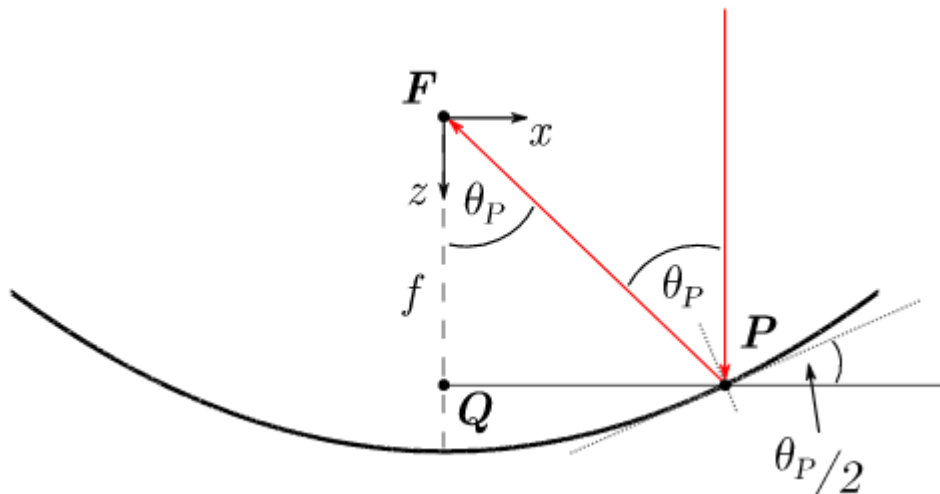


Abbildung 2: Darstellung der Funktionsweise eines Parabolspiegels [Schm16]

Ein parallel zur Mittelachse von oben einfallender Lichtstrahl (rot) wird an jedem Punkt des Parabolspiegels so reflektiert, dass er durch den Brennpunkt  $F$  läuft (Abbildung 2). Der Einfallswinkel zwischen der Oberflächennormalen im

Punkt P und dem Strahl beträgt  $\Theta/2$ .  $\Theta$  ist gleichzeitig der Polarwinkel zwischen dem Ortsvektor von P und der z-Achse. Der Abstand zwischen Brennpunkt und Scheitel der Parabel wird Brennweite f genannt. Die z-Achse wird als optische Achse bezeichnet. Am Auftreffpunkt P des Strahls auf dem Spiegel sind gepunktet die Tangente und die Normale an die Kurve gezeichnet.

### 2.2.2 Geometrische Konzentration $c_{\text{geo}}$

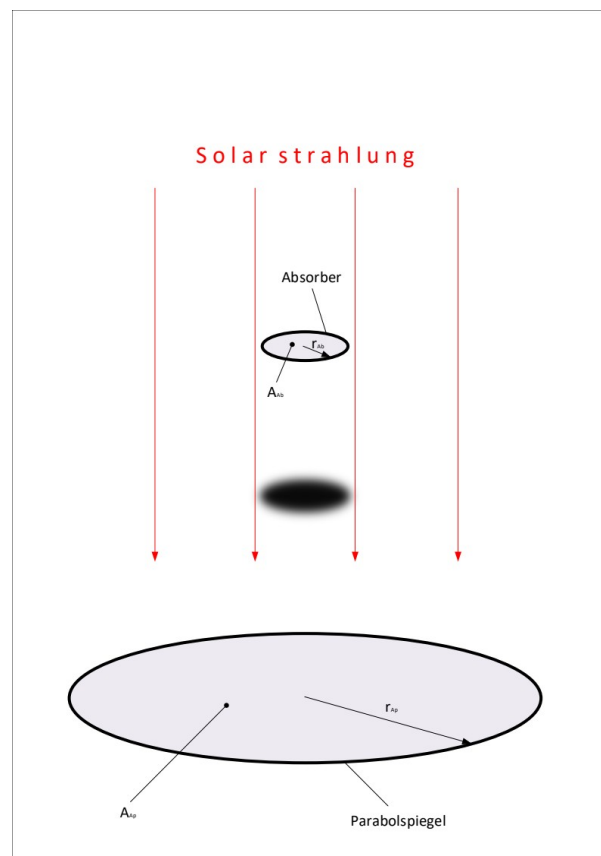


Abbildung 3: geometrische Konzentration

Die Differenz aus der gesamten Apertureintrittsfläche  $A_{\text{Ap}}$  und der Absorberfläche  $A_{\text{Ab}}$  bildet die effektiv bestrahlte Fläche. Der Quotient (2) aus dieser effektiv bestrahlten Fläche und der Absorberfläche wiederum gibt die

geometrische Konzentration  $c_{\text{geo}}$  an. Diese Berechnung gilt für alle Formen eines parabolischen Kollektors und ist unabhängig von dessen Krümmung. Es fließt die Apertureintrittsfläche  $A_{\text{Ap}}$  in die Berechnung ein, nicht aber die gekrümmte Oberfläche.

$$c_{\text{geo}} = \frac{A_{\text{Ap}} - A_{\text{Ab}}}{A_{\text{Ab}}} \quad (2)$$

$$A_{\text{Kr}} = \pi \cdot r^2 \quad (3)$$

Durch die Formel (3) für die Berechnung der Kreisfläche  $A_{\text{kr}}$  ergibt sich (4) für die geometrische Konzentration  $c_{\text{geo}}$

$$c_{\text{geo}} = \frac{r_{\text{Ap}}^2 - r_{\text{Ab}}^2}{r_{\text{Ab}}^2} \quad (4)$$

Auf dieser mathematischen Grundlage sowie der Bestrahlungsstärke werden unter 4.2.1 in Tabelle 5 die erreichbaren Leistungen des Parabolspiegels berechnet.

## 2.3 Der Stirlingmotor

### 2.3.1 Funktionsprinzip

Es gibt etliche verschiedene Prinzipien, den idealen Stirlingprozess und die Funktionsweise eines Stirlingmotors zu beschreiben (vgl. [StLB07], [Sch11]). Hier soll das Grundprinzip anhand eines der einfachsten Modelle (Abbildung 4) erklärt werden.

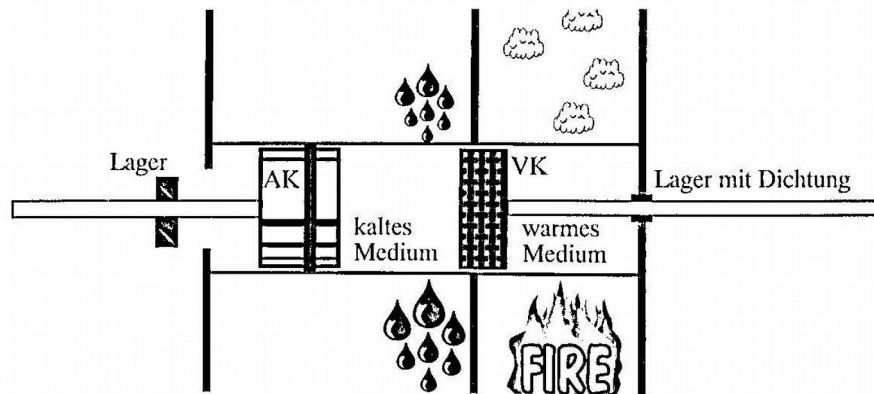


Abbildung 4: Einfaches Modell zur Funktion des Stirling-Motors [WeKü07]

Wenn der Verdrängerkolben nach rechts bewegt wird (Abbildung 5), muss das warme Medium (Arbeitsgas) durch den Regenerator in den kalten Raum. Zunächst wird hierbei vom Medium einiges der Wärme an den Regenerator abgegeben. Anschließend kühlt es sich im (durch Luft oder optimierterweise Kühlflüssigkeit) gekühlten Raum weiter ab. Die Dichte des Mediums steigt durch diese Abkühlung, was zu einem Unterdruck führt und den Arbeitskolben dazu bringt, Arbeit zu verrichten.

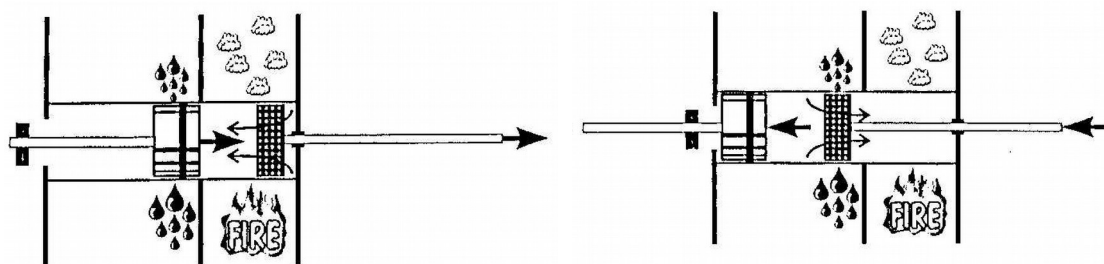


Abbildung 5: Kompressionsphase      Abbildung 6: Expansionsphase [WeKü07]

Durch den abhängig miteinander verbundenen Antrieb der beiden Kolben bewegt sich nun der Verdrängerkolben nach links in den kalten Raum (Abbildung 6). Durch diese Bewegung muss das kalte Medium wieder durch den vorher erhitzten Regenerator zurück in den heißen Raum. Die Wärme des Regenerators wird dabei wieder aufgenommen und anschließend durch die Energiezufuhr weiter aufgeheizt. Dadurch sinkt die Dichte des Arbeitsmediums, der Druck steigt an und somit wird am Arbeitskolben wieder Arbeit verrichtet.

Laut [WeKü07] kann durch die Kopplung im richtigen Phasenwinkel ( $90^\circ$ ) über ein Getriebe oder ein schwingfähiges System der beiden Kolben das gesamte geschlossene System als selbstständige Wärme-Kraft-Maschine arbeiten.

### 2.3.2 Bauformen des Stirlingmotors

Es existieren etliche unterschiedliche Bauformen von Stirlingmotoren. Verglichen werden hier nur die sich prinzipiell voneinander unterscheidenden Bauformen.

Stirlingmotoren werden mit drei unterschiedlichen Zylinderanordnungen gebaut. Nach [Vieb10] wird grundlegend unterschieden in:

#### **Alpha-Typ**

Er ist in der Regel aus zwei Zylindern aufgebaut, einem Warmen und einem Kalten (Abbildung 7). Die Zylinder sind durch den Erhitzer, Regenerator und Kühler verbunden. Die Kolbenbewegung, die das Arbeitsgas in den Zylindern durch den Erhitzer, Regenerator und Kühler hin und zurück verschiebt, besitzt eine Phasenverschiebung von etwa  $90^\circ$ . Diese Phasenverschiebung wird bei einfachen Stirlingmotoren durch die Anordnung der Zylinder mit dem entsprechenden Winkel zueinander und mit einer Kurbelwelle mit nur einem Kurbelzapfen erreicht.

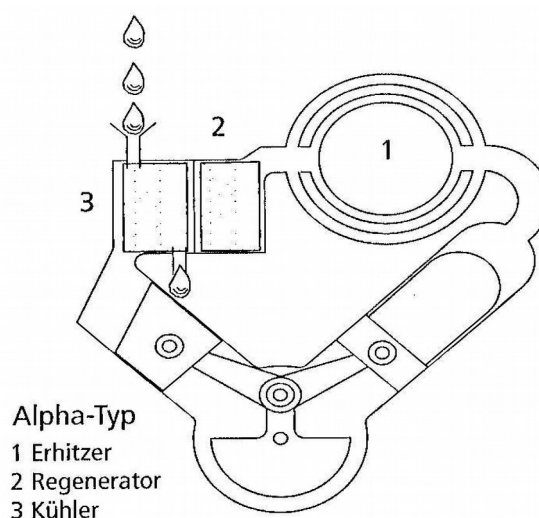
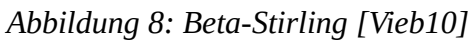


Abbildung 7: Alpha-Stirling [Vieb10]

### Beta-Typ

Bei ihm sind zwei Kolben in einem Zylinder angeordnet (Abbildung 8). Bei einfachen Stirlingmotoren wird die geschlossene Seite des Zylinders erwärmt. Bei Leistungsstirlingmotoren wird die Wärme durch die Wandung eines Erhitzers, der in der Regel aus einer Anzahl parallel geschalteter Röhren besteht und an der heißen Seite des Zylinders angeordnet ist, auf das Arbeitsgas übertragen. Das Arbeitsgas wird beim Beta-Typ durch den warmen Kolben, er ist ein Verdrängerkolben, von seiner Oberseite durch den Erhitzer, Regenerator und Kühler in den Arbeitsraum und zurück verschoben. Der Arbeitsraum wird durch die Unterseite des Verdrängerkolbens und den in der Regel darunter angeordneten Arbeitskolben gebildet. Die Kolbenbewegung erfolgt mit einer Phasenverschiebung von etwa  $90^\circ$ . Diese Phasenverschiebung der Kolben wird in der einfachsten Anordnung mit einer zweifach gekröpften Kurbelwelle erreicht.

Zur Kolbensteuerung sind neben einer Kurbelwelle außerdem noch gebräuchlich: Eine Kurbelwelle mit zusätzlichen Lenkhebeln, das Rhombengetriebe, Ross-





Motoren mit höherer Leistung besteht der Erhitzer aus parallel zueinander angeordneten Röhren. An seiner gekühlten Unterseite ist dieser Zylinder mit einem gasdichten Lager für die Verdrängerkolbenstange verschlossen.

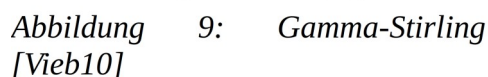
Bei Leistungsstirlingmotoren ist der Regenerator in den Arbeitsgasweg zwischen Erhitzer und Kühler eingebaut.

Der gekühlte Raum unter dem Verdrängerkolben - er entspricht dem Kühler bei Leistungsstirlingmotoren – ist über ein Verbindungsrohr mit dem Arbeitszylinder verbunden. Die Bewegungen von Verdrängerkolben und Arbeitskolben haben eine Phasenverschiebung von etwa  $90^\circ$  zueinander. Dieser Winkel kann durch die rechtwinklige Anordnung der Zylinder zueinander oder bei nebeneinanderliegenden Zylindern durch eine zweifach gekröpfte Kurbelwelle erreicht werden.

Stirlingmotoren mit kleiner bis mittlerer Leistung werden in der Regel mit Arbeitsdruck beaufschlagten Kurbelgehäusen gebaut. Bei ihnen entspricht der Druck im Kurbelgehäuse dem mittleren Druck des Arbeitsgases. Diese Motoren arbeiten ohne Schmieröl im Kurbelgehäuse als Trockenläufer. Das Kurbelgehäuse bildet den Pufferraum für das Arbeitsgas. Das aus dem Kurbelgehäuse ragende Kurbelwellenende zur Abgabe der mechanischen Energie muss zur Vermeidung von Arbeitsgasverlusten mit einer Wellendichtung versehen werden

Stirlingmotoren höherer Leistung arbeiten mit drucklosem Kurbelgehäuse. Die Kurbelwelle mit den Lagern der Pleuel und die erforderlichen Kreuzköpfe laufen im Ölbad. Diese Motoren müssen mit aufwendigen öl- und gasdichten Kolbenstangendichtungen ausgerüstet sein.

Zur schnellen Leistungsregelung wird bei Stirlingmotoren mit größerer Leistung der Arbeitsgasdruck verändert, erhöht zur Leistungssteigerung und abgesenkt, um die Leistung zu reduzieren. Die zugeführte Heizenergie muss dabei in gleichem Maße mit verändert werden. Das Arbeitsgas wird dabei mit einer Pumpe aus dem Arbeitsraum des Motors in einen Vorratsbehälter oder wieder zurück gepumpt.



26 / 62

Drehzahlen auf, was zu einem geringeren Wirkungsgrad führt. Daher sind die umgesetzten Modelle dieser Bauart recht groß oder erbringen wenig Leistung.

### **2.3.3 Wirkungsgrad**

Der Wirkungsgrad eines Stirlingmotors wird definiert als die abgegebene mechanische Leistung geteilt durch die als Wärme aufgenommene Energie [Vieb10]. Der Wirkungsgrad der zur Wärmeerzeugung und Zuführung erforderlichen Maschinenteile ist in dieser Angabe nicht enthalten. Der Wirkungsgrad erreicht bei Niedertemperatur-Stirlingmotoren 2-5%, HighTech Stirlingmotoren erreichen Werte von über 50% und können sich diesbezüglich mit Dieselmotoren messen.

Der Wirkungsgrad von solarbetriebenen Stirlingmotoren setzt sich aus mehreren Einzelwirkungsgraden zusammen, mit Werten folgender Dimensionen:

- Beim Betrieb mit einem Flachkollektor als Strahlungsaufnehmer kann ein Wirkungsgrad von 50% bei direkter Bestrahlung angesetzt werden, ein der Sonne nachgeführter Parabolspiegel erreicht bis zu 90%.
- Der physikalisch bedingte thermodynamische Wirkungsgrad nach Carnot (Carnotscher Kreisprozess), der sich aus dem Temperaturgefälle zwischen warmem und kaltem Arbeitsgas ergibt, liegt bei Niedertemperatur-Stirlingmotoren bei 20%, bei Stirlingmotoren mit einem Temperaturgefälle von 800 K und höher sind es 70%.
- Bedingt durch Wärmeleitungs- und Verluste des Regenerators und Kühlers erreicht der thermische Wirkungsgrad von einfachen Stirlingmotoren 40%, der von HighTech-Maschinen 70% des (maximal möglichen) Carnot- Wirkungsgrades.

- Der mechanische Wirkungsgrad erreicht bei einfachen Stirlingmotoren ca. 70%, bei HighTech-Stirlingmotoren bis zu 95%.
- Am Ende der Kette ist bei der Stromerzeugung auch der Wirkungsgrad der Generators mit zu berücksichtigen: KFZ-Lichtmaschinen, die mittels Keilriemen-Übersetzung an den Drehzahlbereich eines einfachen Stirlingmotors angepasst sind, liefern nicht einmal 50% der eingesetzten Antriebsenergie in Form von elektrischem Strom zurück. Für die Drehzahl optimal ausgelegte, mit hochwertigen Permanentmagneten bestückte Synchrongeneratoren erreichen dagegen einen Wirkungsgrad von 90% und mehr.

Zur Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades müssen die oben erläuterten Einzelwirkungsgrade miteinander multipliziert werden (siehe 4.2.4 Tabelle 8). Die großen Schwankungen der Einzelwirkungsgrade bei den zum Betrieb eines Stirlingmotors erforderlichen Anlagenteilen zeigen, dass zur Erzielung eines guten Gesamtwirkungsgrades alle Teile optimal ausgelegt und gut aufeinander abgestimmt sein müssen.

### 2.3.4 Der Experimentalmotor „Viebach ST 05 G“



*Abbildung 10: Viebach ST 05 G mit Schwungrad*

*[Entw01]*

Bei der 0,5 kW Gamma-Bauform ST 05 G (Tabelle 3) handelt es sich um einen Stirlingmotor mit integriertem Synchrongenerator, der ausschließlich aus käuflichen Normteilen und üblichen Halbzeugen gebaut wird (Abbildung 10). Er wurde 1992 von Dieter Viebach entwickelt und in Form von Bauanleitungen und Gussteilesätzen vertrieben. In der Folgezeit entstanden an Universitäten, Berufsschulen aber auch bei interessierten Laien zahlreiche Motoren dieser

Bauart. Viebach sorgte seit Beginn des Projektes durch Rundbriefe für Austausch und Vernetzung aller Aktiven, so dass der Motor zahlreiche Weiterentwicklungen erfuhr. Jüngster Ableger ist der ST 05 G CNC. Das Angebot zum Erwerb der CAD-Dateien zur Fertigung [Docs18] ist als Anhang A beigefügt. Die Zusammenstellungszeichnung des ST 05 G steht heute unter einer Creative-Commons-Lizenz (CC-BY-NC-SA) zum Download zur Verfügung.

Grundfläche	ca. 350 x 300 mm
Gewicht bei Ausführung in Aluguß	ca. 20 kg
Mit Generator ST 05 G-G	ca. 22 kg
Schwungrad Durchmesser	280 mm
Schwungrad Masse	7,5 kg
Arbeitskolbendurchmesser	85 mm
Verdrängerkolbendurchmesser	96 mm
Hub	75 mm
Arbeitsmedium	Luft oder Stickstoff
Betriebsdruck	bis 10 bar
Maschinenwirkungsgrad $\eta_{\text{Mot}}$	22,00 %
Erforderliche Temperatur am Erhitzerkopf	Betrieb ab 200°C, für 500W max. 650°C
Wärmezufuhr	beliebig (in unserem Fall Solarstrahlung)
Kühlung	Wasserkühlung
Leerlaufdrehzahl	ca. 800 Umdr/ Min
Drehmoment	8 Nm
Leistung P	300 - 500W
bisher gemessen mit 10 bar	505 Watt
Leistung mit Generator $P_{\text{el}}$	450 Watt el.
Spannung	abhängig von der Auslegung der Wicklung

*Tabelle 3: Technische Daten Viebach ST 05 G*

## 2.4 Dish/Stirling-Systeme

Hochtemperatur-Stirlingmotoren, wie sie bei DSS zum Einsatz kommen, weisen einen weitaus höheren Wirkungsgrad und somit auch eine größere Leistungsausbeute auf als Niedertemperatur-Stirlingmotoren. Ein weiters

Argument für ein hohes Temperaturniveau ist die starke und weitestgehend konstante Bestrahlungsstärke am geplanten Einsatzort. Deshalb beschäftigt sich diese Arbeit mit den Grundlagen zum Bau eines DSS. Die Vor- und Nachteile sowie die Funktionsweise eines solchen Systems sollen hier in Kürze dargestellt werden.

### **2.4.1 Vor- / Nachteile**

Ein entscheidender Vorteil von DSS gegenüber anderen Arten der solaren Energiegewinnung liegt laut [WeKü07] im Umwandlungsgrad von Sonnenenergie in elektrische Energie. Dies lässt sich erst durch die höheren Arbeitstemperaturen realisieren. Als derzeitiger Rekordhalter gilt das System „Advanco Vanguard I“ mit einem Wert von 29,4 %.

Bei dieser Art der Energiegewinnung findet keine CO<sub>2</sub>-produzierende Verbrennung statt. Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels hat das DSS deshalb hohes Potential als zukünftiges Energieversorgungssystem und kann durchaus zur Reduzierung des Treibhauseffektes beitragen.

Aufgrund der hohen Fertigungskosten wird dem DSS bisher bei der kommerziellen Nutzung noch wenig Beachtung geschenkt. Dies könnte sich jedoch durch den derzeitigen Wandel der Gesellschaft bald ändern.

Das DSS beschränkt sich außerdem auf die Bereitstellung elektrischer Energie. Durch die Flexibilität bei der Umwandlung in nahezu jede andere beliebige Energieform ist dies jedoch nicht zwangsläufig als Nachteil zu sehen.

### **2.4.2 Energetische Funktionsweise**

Das Prinzip eines DSS lässt sich relativ simpel erklären. Ein parabolischer Kollektor (Dish) bündelt die Sonnenstrahlen  $E_{\text{strahl}}$  im sogenannten Brennpunkt.

In eben diesem Brennpunkt befindet sich der Absorber. Dieser wandelt  $E_{\text{strahl}}$  in thermische Energie  $E_{\text{therm}}$  um und gibt diese an den zu erheizenden Arbeitsraum des Stirlingmotors weiter. Was dann im Stirlingmotor passiert, um  $E_{\text{therm}}$  in mechanische Energie  $E_{\text{mech}}$  (hier kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$ ) umzuwandeln, wurde bereits unter 2.3.1 Funktionsprinzip allgemein erläutert. Anschließend kann  $E_{\text{kin}}$  entweder direkt genutzt werden (z. B. Wasserpumpe) oder wie im hier angedachten zukünftigen Anwendungsfall mittels eines Generators in elektrische Energie  $E_{\text{el}}$  umgewandelt werden.

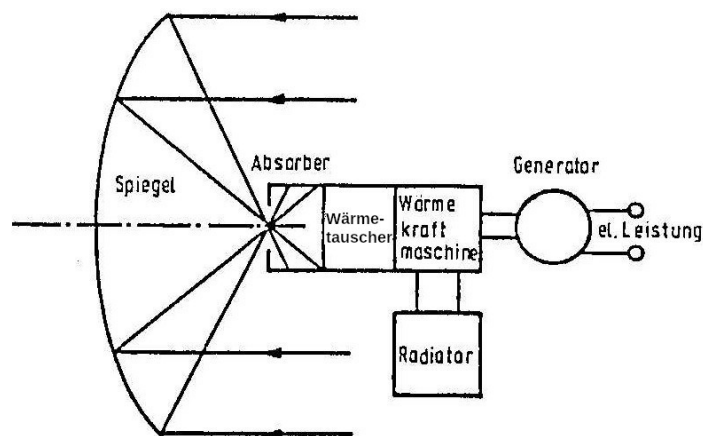


Abbildung 11: Prinzipskizze eines Dish/Stirling-Systems

[WeKü07]

**Die wichtigsten Bauelemente eines DSS (siehe Abbildung 11):**

- Spiegel (Dish): Bündelung von  $E_{\text{strahl}}$
- Absorber (im Brennpunkt):  $E_{\text{strahl}} \rightarrow E_{\text{therm}}$
- Wärmetauscher (WT): Weiterleitung  $E_{\text{therm}}$  an Stirlingmotor
- Wärmekraftmaschine WKM (Stirlingmotor):  $E_{\text{therm}} \rightarrow E_{\text{kin}}$
- Generator:  $E_{\text{kin}} \rightarrow E_{\text{el}}$



Einen weiteren wichtigen Bestandteil eines DSS bildet das Führungssystem mit dem Verstellmechanismus, welches die gesamte Anlage permanent der Sonne nachführt. Dieses kann auf unterschiedliche Arten realisiert werden. Zusätzlich kommen je nach Ausführung der Anlage verschiedene Sicherungssysteme, Trägerkonstruktionen, eine Schaltwarte sowie optional ein Kühlsystem zum Einsatz. Auf diese Komponenten wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen.

### **3        Ziel der Arbeit**

Diese Bachelorarbeit befasst sich im Wesentlichen mit Grundlagen zur Auslegung des parabolischen Kollektors sowie der Anpassung an einen ausgewählten, praxiserprobten Stirlingmotor.

Der Bau des Parabolspiegels soll mit einfachsten Mitteln realisierbar sein, da Material sowie finanzielle Mittel am geplanten Einsatzort Jakarta nur begrenzt zur Verfügung stehen. Dazu wird eine Messreihe unter Laborbedingungen durchgeführt. Auf dieser Basis wird entschieden, ob es sich lohnt, die reflektierende Oberfläche des Kollektors aus Abfallprodukten herzustellen.

Ein weiteres Ziel ist es, das parabolische Grundgerüst für den Kollektor ebenfalls selbst herstellen zu können. Zur Verfügung stehen dazu einfachste Mittel, wie eine Säge, Holzbretter, Maßband und eine Kette. Unter diesen Voraussetzungen sollen Wege zum Eigenbau ausgearbeitet und verglichen werden.

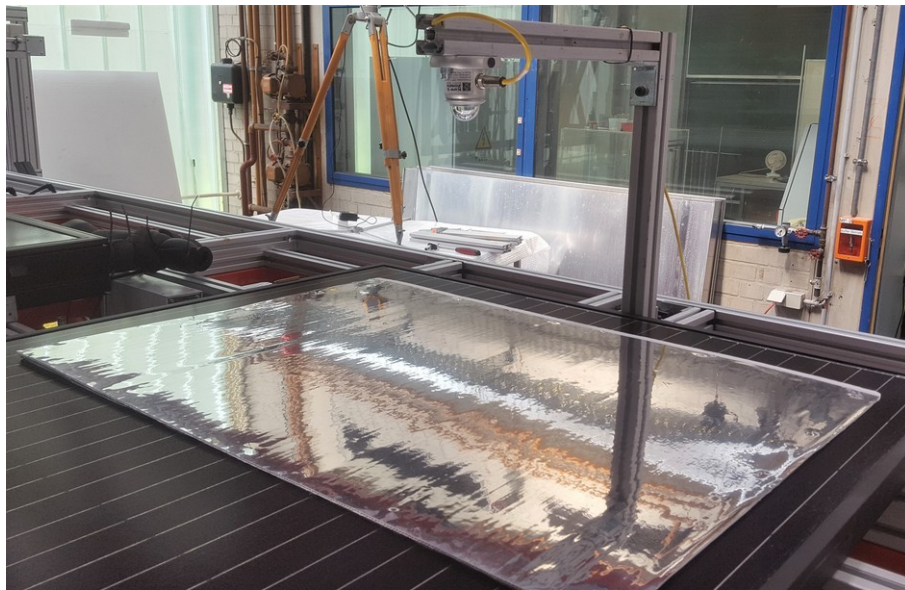
Basierend auf den Versuchsergebnissen sollen die erreichbaren Leistungen der verschiedenen Varianten berechnet werden. Diese Tabellen sollen frei für jede\*n verfügbar sein, so dass die Dimensionierung des benötigten Kollektors für verschiedenste Einsatzzwecke damit durchgeführt werden kann.

Des Weiteren soll ein technisch vereinfachter, relativ leicht zu fertigender Stirlingmotor vorgestellt werden. Aufgrund dessen technischer Daten erfolgt eine Anpassung verschiedener Parabolspiegelvarianten an diesen Motor.

Zusammenfassend soll diese Arbeit die Grundlagen für die Umsetzung der Fertigung einer kleinen solaren Energiegewinnungsanlage in Jakarta schaffen.

## 4 Eingeschlagener Realisierungsweg

### 4.1 Versuchsreihe: Vergleich der Reflexion



*Abbildung 12: Laborversuch Reflexion*

Am 11.06.2019 wurde an der Beuth Hochschule für Technik im Labor für konventionelle und erneuerbare Energien am sogenannten „Kollektorprüfstand“ ein Versuch zur Reflexion des Sonnenlichts an verschiedenen, als Abfallprodukte anfallenden Materialien durchgeführt (siehe Abbildung 12). Ziel dieses Versuchs war die Ermittlung der verschiedenen Albedo-Werte folgender Probeoberflächen:

- Spezielle, selbstklebende Spiegelfolie, relativ günstig als Rolle käuflich (Abbildung 13)
- Die reflektierende, silberne Seite einer Rettungsdecke (Abbildung 14). Diese ist günstig bzw. sogar als Abfallprodukt verfügbar.

- Isomatte mit reflektierender Oberfläche (Abbildung 15). Ebenfalls ein gängiges Müllprodukt.
- Aufgeschnittene, breitflächig aufgebrachte Getränkedosen (Abbildung 16). In Indonesien massenweise frei verfügbar, da kein Dosenpfand.



*Abbildung 13: Spiegelfolie*



*Abbildung 14: Rettungsdecke*



*Abbildung 15: Isomatte*



*Abbildung 16: Getränkedosen*

Zum Vergleich wurde im Anschluss noch die Reflexion eines Photovoltaikmoduls (PVM) gemessen. Da bei einem PVM eine vollständige Absorption der Strahlung angestrebt ist, wird hierbei ein sehr geringer Albedo-Wert erwartet.

Des Weiteren wurde noch eine nahezu weiße Oberfläche<sup>1</sup> gemessen. Dazu diente die Rückseite eines Wahlplakates.

#### 4.1.1 Versuchsaufbau

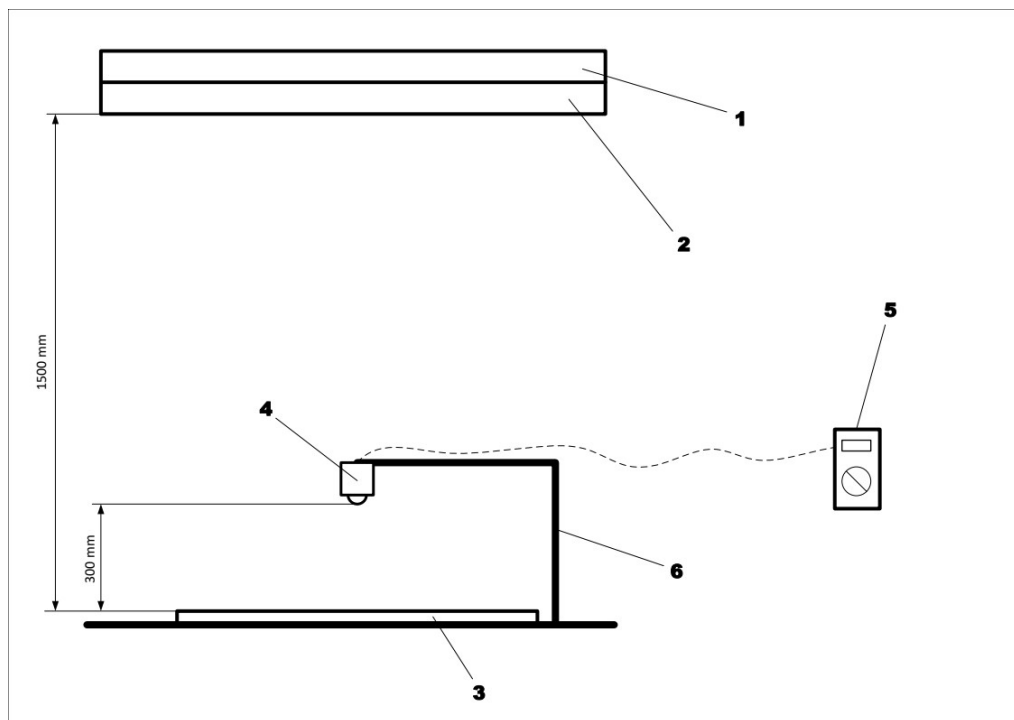


Abbildung 17: Schema Versuchsaufbau

- 1) künstliche Sonne <sup>2</sup>
- 2) künstlicher Himmel, Abstand  $a$  zur Probe:  $a = 1500 \text{ mm}$
- 3) Probe mit einer festgelegten Fläche  $A_{Pr}$  von  
 $A_{Pr} = 0,84 \text{ m} * 0,6 \text{ m} = 0,5 \text{ m}^2$  (Größe der kurz nach der  
Europawahl als Abfallprodukt zu findenden Wahlplakate)
- 4) Pyranometer, Abstand  $b = 300 \text{ mm}$  zur Probe

---

1 Aufgrund von Witterungseinflüssen

2 Datenblatt siehe Anhang B

5) Multimeter

6) dem Versuch angepasste Konsole aus Aluprofilen

#### 4.1.2 Versuchsdurchführung

##### *Randbedingungen*

- Raumtemperatur  $\vartheta = 32,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi = 46,5 \text{ } \%$
- Luftdruck  $p = 1017,5 \text{ mbar}$

Für den Versuch wurden 4 der 8 Strahler benutzt. Zunächst erfolgte eine Einstellung der Bestrahlungsstärke  $E$  auf die Oberfläche  $A$  der Probe auf

$$E = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

erreicht wurden bei der Einstellung

$$E = 1011 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Diese Einstellung wurde tabellarisch dokumentiert (siehe Anhang C). Mit diesem Wert werden unter 4.1.3 die entsprechenden Albedo-Werte bestimmt.

Folgende 4 Proben wurden mit Hilfe des Multimeters nacheinander gemessen:

- spezielle Spiegelfolie
- Rettungsdecke
- Isomatte
- Getränkedosen

Zum Vergleich wurden anschließend noch folgende Oberflächen gemessen:

- PVM (annähernd schwarzer Körper)
- relativ weiße Fläche

Hierbei wurde jeweils die vom Multimeter angezeigte Spannung  $U$  notiert.

### 4.1.3 Ergebnisse/Auswertung

Die Umrechnung zur Ermittlung der Bestrahlungsstärke  $E$  ist auf dem Pyranometer angegeben mit

$$13,32 \frac{\mu V}{W/m^2}$$

$$\rightarrow 1000 \frac{W}{m^2} = 13,32 \text{ mV} = 0,01332 \text{ V}$$

folglich ergibt sich ein Umrechnungsfaktor  $k$  von

$$k = 75,075 \frac{W/m^2}{mV}$$

Aus den gemessenen Spannungen  $U$  der verschiedenen Proben erfolgt hier die Berechnung der reflektierten Bestrahlungsstärke  $E_{\text{refl}}$  mit Hilfe des Umrechnungsfaktors  $k$ . Der Quotient aus der zu Beginn des Versuchs eingestellten Bestrahlungsstärke  $E = 1011 \text{ W/m}^2$  (vgl. Anhang C) und der gemessenen reflektierten Bestrahlungsstärke  $E_{\text{refl}}$  ergibt den jeweiligen Albedo-Wert. Diese Berechnungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Probenmaterial	Spannung U	reflektierte Bestrahlungsstärke $E_{\text{refl}}$	Albedo-Wert
	[mV]	[W/m <sup>2</sup> ]	[-]
spezielle Spiegelfolie	9,93	745,49	0,737
Rettungsdecke	8,62	647,15	0,640
Isomatte	10,71	804,05	0,795
Getränkedosen	5,83	437,69	0,433
PVM	0,44	33,03	0,033
weiße Fläche	5,07	380,63	0,376

Tabelle 4: Versuchsauswertung

Die farbigen Markierungen kennzeichnen die Extrema. Auf diese wird bei der Diskussion unter 5.2 noch genauer eingegangen.

## 4.2 Berechnungen

### 4.2.1 Erreichbare Leistungen des Parabolspiegels

Mit Hilfe der Berechnungsgrundlage aus Kapitel 2.2.2 sowie den Albedo-Werten aus 4.1.3 (Tabelle 4) werden hier die jeweils erreichbaren Leistungen mit den verschiedenen Oberflächenarten aus der Versuchsreihe 4.1 ermittelt. Für die Bestrahlungsstärke  $E$  wurde bei 2.1 ein Wert von  $E = 1052,59 \text{ W/m}^2$  festgelegt. Als Bezugsfläche wird ein Parabolspiegeldurchmesser von  $d_{\text{Ap}} = 1 \text{ m}$  definiert und von einem Durchmesser des Absorbers von  $d_{\text{Ab}} = 0,1 \text{ m}$  ausgegangen (Tabelle 5).



Aperturdurchmesser $d_{Ap}$ [m]:	<b>1,00</b>	Aperturfläche $A_{Ap}$ [m <sup>2</sup> ]:	<b>0,7854</b>
Absorberdurchmesser $d_{Ab}$ [m]:	<b>0,10</b>	Absorberfläche $A_{Ab}$ [m <sup>2</sup> ]:	<b>0,0079</b>
Bestrahlungsstärke $E$ [W/m <sup>2</sup> ]:	<b>1052,59</b>	Konzentrationsfaktor $c_{geo}$ [-]:	<b>99,00</b>
		Leistung auf bestr. Aperturfläche $P_{Ap}$ [W]:	<b>818,44</b>

Probenmaterial	Albedo-Wert	Bestrahlungsstärke $E_{ref}$ auf Absorber	erreichbare Leistung
	<i>[-]</i>	<i>[W/m<sup>2</sup>]</i>	<i>[W]</i>
spezielle Spiegelfolie	0,737	76.840,09	603,50
Rettungsdecke	0,640	66.703,08	523,88
Isomatte	0,795	82.875,87	650,91
Getränkedosen	0,433	45.113,57	354,32

*Tabelle 5: Erreichbare Leistungen am Absorber*

Diese Werte wurden hier zur beispielhaften Darstellung festgelegt. Die Tabelle befindet sich in digitaler Form auf der beigelegten CD<sup>3</sup>. Hier können je nach Bedarf andere Ausgangswerte eingegeben werden.

### 4.2.2 Berechnungstabelle zum Bau eines Parabolspiegels

Die Dimensionierung des Parabolspiegels basiert auf folgenden Werten:

- Am Absorber benötigte Leistung  $P$
- Absorberdurchmesser  $d_{Ab}$
- Korrekturfaktor  $\alpha$ , dieser beinhaltet
  - die Verluste durch die Umwandlung der Strahlungsenergie  $E_{strahl}$  in Wärmeenergie  $E_{therm}$
  - Verluste durch Wind
- Albedo-Werte der unterschiedlichen Materialien aus Versuchsreihe 4.1

Der Aperturdurchmessers  $d_{Ap}$  (5) wird wie folgt berechnet:

---

<sup>3</sup> „Tabellen“ → erreichbare Leistungen

$$d_{Ap} = \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot E \cdot \text{Albedo-Wert}}} + d_A \quad (5)$$

Bestrahlungsstärke E [W/m²]: **1000,00**  
 Benötigte Leistung P [W]: **300,00**  
 Absorberdurchmesser d<sub>Ab</sub> [m]: **0,10**  
 Korrekturfaktor α [-]: **0,72**

Maße für den Selbstbau nach der Anleitung in Kapitel 4.3.2							
	Albedo-Wert	Durchmesser d <sub>Ap</sub>	Teil I		Teil II		Teil III
			Kettenlänge K <sub>1</sub>	Sehnenlänge S <sub>1</sub>	Kettenlänge K <sub>2</sub>	Sehnenlänge S <sub>2</sub>	Radius R
Beschichtungsart	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
spezielle Spiegelfolie	0,737	1,009	1,158	1,009	1,374	0,876	0,505
Rettungsdecke	0,640	1,082	1,241	1,082	1,473	0,939	0,541
Isomatte	0,795	0,973	1,116	0,973	1,324	0,844	0,486
Getränkedosen	0,433	1,312	1,505	1,312	1,787	1,139	0,656

Tabelle 6: Parabolspiegel-Dimensionierung

Tabelle 6 zeigt den für die Auslegung eines Parabolspiegels maßgebenden Aperturdurchmesser d<sub>Ap</sub> sowie die zum Bau mit Holzprofilen nach 4.3.2 entscheidenden Konstruktionsmaße.

Zur Veranschaulichung wurden einfache Eingangswerte angenommen. Diese können im digitalen Anhang („Tabellen“) je nach Bedarf angepasst werden.

### 4.2.3 Dimensionierung des Parabolspiegels für Viebach ST 05 G

Hier werden die vier Varianten des ausgearbeiteten Parabolspiegels an den ausgewählten Stirlingmotor angepasst (Tabelle 7). Die dafür am Absorber benötigte Leistung von P = 2272,73 W ergibt sich aus dem Quotient der maximaler Motorleistung (500 W) und dem Maschinenwirkungsgrad  $\eta_{\text{Mot}}$  von 22% (vgl. technische Daten, Tabelle 3). Für die Bestrahlungsstärke wird hier wieder der bei 2.1 festgelegte Wert E = 1052,59 W/m² verwendet.

Bestrahlungsstärke  $E$  [ $W/m^2$ ]: **1052,59**  
 Benötigte Leistung  $P$  [ $W$ ]: **2272,73**  
 Absorberdurchmesser  $d_{AB}$  [ $m$ ]: **0,15**  
 Korrekturfaktor  $\alpha$  [-]: **0,80**

Maße für den Selbstbau nach der Anleitung in Kapitel 4.3.2							
Beschichtungsart	Albedo-Wert	Durchmesser $d_{AB}$	Teil I		Teil II		Teil III
			Kettenlänge $K_1$	Sehnenlänge $S_1$	Kettenlänge $K_2$	Sehnenlänge $S_2$	Radius $R$
	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
spezielle Spiegelfolie	0,737	2,421	2,777	2,421	3,297	2,102	1,211
Rettungsdecke	0,640	2,598	2,980	2,598	3,537	2,255	1,299
Isomatte	0,795	2,332	2,675	2,332	3,175	2,024	1,166
Getränkedosen	0,433	3,156	3,620	3,156	4,297	2,740	1,578

*Tabelle 7: Parabolspiegel-Dimensionierung für Viebach ST 05 G*

Um die Verluste der Wärmeübertragung vom Absorber zum Medium sowie durch Wind auszugleichen, wurde ein Korrekturfaktor von 0,8 festgelegt.

## 4.2.4 Systemwirkungsgrad $\eta_{sys}$

Zur Berechnung des minimal sowie maximal erreichbaren Systemwirkungsgrades  $\eta_{sys}$  beim Selbstbau des Parabolspiegels kombiniert mit dem Experimentalmotor Viebach ST 05 G wird die Variante mit den Getränkedosen nicht mit aufgenommen. Diese weist für diesen Anwendungszweck mit einem Albedo-Wert von 0,433 einen zu geringen Wirkungsgrad auf. Die Berechnung in Tabelle 8 setzt sich wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben zusammen. Der Carnot-, der thermische sowie der mechanische Wirkungsgrad des Motors sind hierfür bereits im Datenblatt (Tabelle 3) als Maschinenwirkungsgrad  $\eta_{Mot}$  mit 22% zusammengefasst.

	minimal		maximal
Albedo-Wert („Wirkungsgrad“ des Parabolspiegels) $\eta_{PS}$	0,640		0,795
Maschinenwirkungsgrad des Stirlingmotors $\eta_{Mot}$	0,220		0,220
Generator-Wirkungsgrad $\eta_{Gen}$	0,500		0,900

$$\eta_{min} = 0,0704 \quad \eta_{max} = 0,15741$$

*Tabelle 8: Systemwirkungsgrad  $\eta_{Sys}$*

Der minimal erreichbare Wirkungsgrades  $\eta_{min}$  wurde mit dem Albedo-Wert 0,64 der Rettungsdecke und einem Generatorwirkungsgrad  $\eta_{Gen}$  von 50% berechnet. Das Gesamtsystem erreicht in dieser Konstellation einen Wirkungsgrad  $\eta_{Sys}$  von 7,04%.

Mit dem Albedo-Wert 0,795 der Isomatte in Kombination mit einem geregelten Generator mit einem Wirkungsgrad  $\eta_{Gen}$  von 90% dagegen ist ein mehr als doppelt so hoher Systemwirkungsgrad  $\eta_{Sys}$  (in Tabelle 8  $\eta_{max}$ ) von 15,71% erreichbar.

#### 4.2.5 Erwarteter Jahresenergieertrag

Hier wird basierend auf den durchschnittlichen Sonnenstunden aus Tabelle 2 (2.1) und den technischen Daten des ausgewählten Stirlingmotors aus Tabelle 3 (2.3.4) der zu erwartende minimale sowie maximale Jahresenergieertrag (Tabelle 9) berechnet.

Dazu wurde das Produkt aus den durchschnittlichen Sonnenstunden, den Tagen und den entsprechenden abgegebenen elektrischen Leistungen des Motors gebildet.

Minimale elektrische Leistung  $P_{el, min}$ : **270 W**  
 Maximale elektrische Leistung  $P_{el, max}$ : **450 W**

Monat	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Sonnenstunden pro Tag [h/d]	5,5	5,8	7,1	7,6	7,8	7,9	8,3	8,9	9,0	8,1	7,1	6,0
Anzahl der Tage pro Monat [d]	31,0	28,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0
Monatlicher Mindestenergieertrag [kWh]	46,4	44,0	59,4	61,9	65,1	63,7	69,6	74,7	72,7	68,1	57,3	50,2
Maximaler monatlicher Energieertrag [kWh]	77,3	73,3	99,0	103,1	108,5	106,1	116,1	124,4	121,2	113,6	95,6	83,7

erwarteter Jahresenergieertrag:      Minimal: **733,20 kWh**  
 Maximal: **1222,00 kWh**

*Tabelle 9: Erwarteter Jahresenergieertrag*

Voraussetzung für diese Werte ist die passende Auslegung des Parabolspiegels nach Tabelle 7 (4.2.3).

## 4.3 Varianten eines einfachen Parabolspiegels

In diesem Kapitel werden zwei Varianten vorgestellt, wie ein Parabolspiegel mit einfachsten Mitteln hergestellt werden kann.

### 4.3.1 Satellitenschüssel

Eine Satellitenschüssel stellt eine ideale Parabolform dar. Durch die geringe Krümmung erfolgt hierbei jedoch eine starke Abkühlung im Brennpunkt. Deshalb sollte bei einer Umsetzung dieser Bauform unbedingt an einen Windfang gedacht werden, um eine konstante Leistung zu erreichen. Aufgrund der glatten Oberfläche ist die Satellitenschüssel einfach mit allen Arten von Materialien zu beschichten



Abbildung 18: Solarkocher

Zur Veranschaulichung und zu Testzwecken wurde am 4. Juni ein Solarkocher aus einer alten Satellitenschüssel (Durchmesser  $d = 0,65\text{m}$ ) und selbstklebender Spiegelfolie gebaut (Abbildung 18). Zum Bau wurde ausschließlich Müll und die gestiftete Spiegelfolie verwendet. Diese simple Variante schaffte es, innerhalb einer Zeit  $t = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$  eine Wassermenge von  $400 \text{ ml} = 400 \text{ g}^4$  von  $10^\circ\text{C}$  über den Siedepunkt ( $100^\circ\text{C}$ ) zu erhitzen. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz  $\Delta T$  von  $90 \text{ K}$ .

Berechnung der Wärmeenergie  $E_{\text{therm}}$ :

$$E_{\text{therm}} = c * m * \Delta T \quad (6)$$

Gegebene bzw. ermittelte Werte:

---

4 Hier wurde die Dichte des Wassers vereinfacht angenommen:  $1 \text{ ml} = 1 \text{ g}$

- Spezifischer Wärmekoeffizient (Wasser)  $c = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$
- Masse des erhitzten Wassers  $m = 0,4 \text{ kg}$
- Temperaturunterschied  $\Delta T = 90 \text{ K}$

$$E_{therm} = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot K} * 0,4 \text{ kg} * 90 \text{ K} = 150,84 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ} \tag{7}$$

Daraus ergibt sich  $E_{therm} = 41,9 \text{ Wh}$  .

Durch die gemessene Zeit  $t = 1200 \text{ s}$  sowie

$$P = \frac{E}{t} \tag{8}$$

ergibt sich eine durchschnittliche Leistung P dieses vereinfachten Aufbaus von

$$P = \frac{41,9 \text{ Wh} * 3600 \text{ s}}{1200 \text{ s}} = 125,7 \text{ W}$$

Diese Bauart lässt sich mit Hilfe von Tabelle 6 <sup>5</sup> direkt zum Betrieb eines Stirlingmotors anpassen.

### 4.3.2 Bau durch Aufschichtung von Holzprofilen

Inspiziert wurde diese kurze Anleitung von einer Möglichkeit zum Selbstbau einer signalverstärkenden Schüssel („wifidish“ [Conn19]) und wurde für unseren Anwendungsfall flexibel skalierbar gestaltet. Sie beinhaltet die wichtigsten Schritte zum Selbstbau eines parabolischen Kollektors. Die relevanten Maße der

---

5 Digitaler Anhang: „Tabellen“ → Parabolspiegel-Dimensionierung

Einzelteile nach Abbildung 19 sind mit der Tabelle zu berechnen <sup>6</sup>. Diese ist beispielhaft unter 4.2.3 für den ausgewählten Stirlingmotor dargestellt.

Folgende Materialien und Werkzeuge werden zum Bau benötigt:

- feingliedrige Kette (optional Fahrradkette)
- Maßband oder Gliedermaßstab
- beliebiges Farbspray/beliebiger Marker
- Bretter <sup>7</sup>:
  - sechs Stück, Maße  $1,2\text{ D} \times 0,3\text{ D}$  [m]
  - vier Stück mit den Abmessungen  $0,5\text{ D} \times 0,3\text{ D}$  [m]
- Gitternetz zur Formgebung (Befestigung mit Tacker, Kabelbindern oder Draht)
- verfügbares Material (vgl. 4.1) zur Reflexion der Sonne

---

<sup>6</sup> Digitaler Anhang: „Tabellen“ → Parabolspiegel-Dimensionierung

<sup>7</sup> Abmessungen in Abhängigkeit vom Durchmesser D des Parabolspiegels



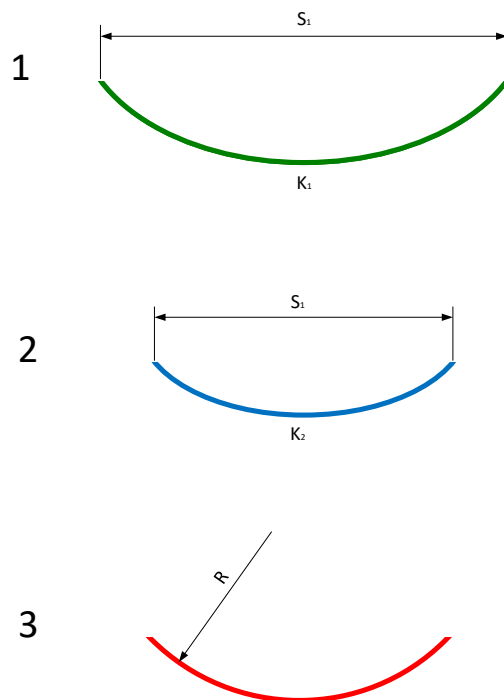


Abbildung 19: relevante Maße für Eigenbau

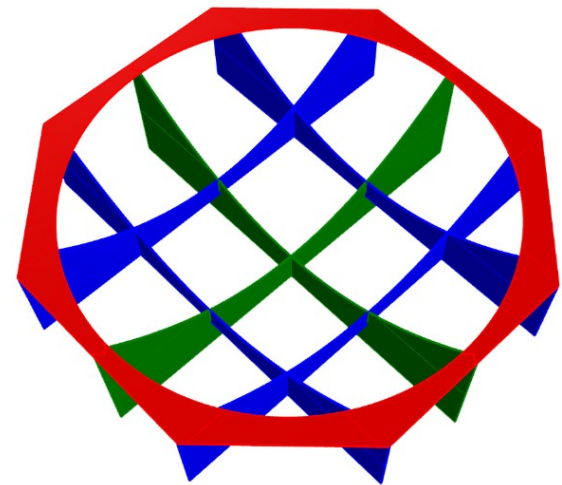


Abbildung 20: Zusammenbauskizze [Conn19]

Die parabolische Kontur der Teile 1 (grün, zweimal) sowie 2 (blau, viermal) wird mit Hilfe einer durchhängenden Kette und des Sprays bzw. Markers oben mittig nach den Maßen aus Tabelle 6 (4.2.2) markiert (siehe Abbildung 19). Dafür wird jeweils die Kettenlänge  $K$  auf die Sehnenlänge  $S$  durchhängen gelassen. Bei Teil 3 (rot, viermal) wird der Radius  $R$  entsprechend angezeichnet. Diese zehn Teile werden anschließend ausgesägt und entsprechend Abbildung 20 miteinander verbunden. Für die parabolische Form wird das Gitternetz auf dem Gerüst angebracht. Dies kann mit Hilfe eines Tackers, Nägeln, Kabelbindern oder Drähten erfolgen. Zur Fertigstellung muss nur noch das reflektierende Material auf dem Gitter aufgebracht werden.

## 5 Diskussion

In diesem Kapitel wird auf die Vor- und Nachteile der vorgestellten Bauformen von Parabolspiegel (4.3) sowie Stirlingmotor (2.3.2) eingegangen. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Beschichtungsarten verglichen.

### 5.1 Bauform des Parabolspiegels

Der Aufbau auf Basis der Satellitenschüssel bei 4.3.1 diene nur zu ersten Testzwecken und kann noch optimiert werden. Beispielsweise durch eine präzisere Ausrichtung des Absorbers (in diesem Fall das Kochgefäß) zum Brennpunkt. Außerdem kann durch eine entsprechende Beschichtung der Absorberfläche die Energieumwandlung von Strahlungsenergie  $E_{\text{Strahl}}$  zu Wärmeenergie  $E_{\text{therm}}$  verbessert werden. Des Weiteren wurde die Abkühlung des Absorbers durch den Wind frei zugelassen. Hinzu kommt auch der Standort Oranienburg, bei dem die Bestrahlungsstärke  $E$  nicht mit der in Jakarta gleichzusetzen ist.

Hierzulande sind Satellitenschüsseln oft als Abfallprodukt verfügbar. Nicht dagegen am geplanten Einsatzort Jakarta, daher wird zur Umsetzung vor Ort die LowTech-Eigenbauversion von 4.3.2 empfohlen. Bei dieser Variante sind außerdem unterschiedliche Krümmungen der Parabolform möglich. Dadurch eignet sie sich auch sehr gut für vergleichende, weiterführende Versuchszwecke.

### 5.2 Beschichtungsarten

Welche der untersuchten Beschichtungsarten ist unter den gegebenen Bedingungen sinnvoll?

- Getränkedosens sind aufgrund des geringen erreichten Albedo-Werts von 0,433 (Tabelle 4, rot markiert) kaum zur Beschichtung eines Parabolspiegels geeignet.
- Das Reflexionsvermögen von Isomatten (Tabelle 4, grün markiert) dagegen lag mit einem Albedo-Wert von 0,795 sogar über dem, der speziell zur Strahlungsreflexion hergestellten Spiegelfolie mit einem Albedo-Wert von 0,737.
- Bei guter Verfügbarkeit von Rettungsdecken können diese ebenfalls zur Herstellung eines parabolischen Kollektors verwendet werden. Durch den erreichten Albedo-Wert von 0.640 muss der Spiegel nur entsprechend größer dimensioniert werden.

Die Berechnung der jeweils erreichbaren Leistungen wurde bei 4.2.1 vorgenommen.

### **5.3 Auswahl der Bauform sowie eines konkreten Stirlingmotors**

Aufgrund des geringen Wirkungsgrades wurde der Niedertemperaturvariante von vornherein keine größere Beachtung geschenkt. Dazu kommt die das ganze Jahr über konstant hohe Bestrahlungsstärke von  $E = 1320 \text{ W/m}^2$  am geplanten Einsatzort. Deshalb fiel die Wahl auf einen Stirlingmotor im Hochtemperaturbereich.

Die Beta-Variante wurde aufgrund ihrer komplexen, schwierig zu fertigenden und im Betrieb anfälligen Bauform ausgeschlossen. Die Kolbenstange des Verdrängerkolbens läuft bei einem Beta-Stirling grundsätzlich durch den

Arbeitskolben. Das stellt sehr hohe Ansprüche an die Präzision bei der Fertigung sowie an die Realisierung der Dichtheit. Mit einer herkömmlichen Kurbelwelle kommt es bei dieser Form in der Praxis oft zu weiteren Komplikationen. Deshalb käme es hierbei noch zu zusätzlichem Fertigungsaufwand, beispielsweise durch die Bewerkstelligung des Zusammenspiels der Zylinder durch ein Rhombengetriebe.

Für die Alpha-Bauweise sind sehr hohe Drücke zum Betrieb notwendig. Die Gamma-Konfiguration dagegen ergibt eine niedrigere Kompressionsrate. Daher wurde ein Gamma-Stirling für dieses Projekt ausgewählt:

### **Der Experimentalmotor Viebach ST 05 G**

Ein Ziel der Arbeit war es, einen technisch vereinfachten, relativ leicht zu fertigenden und dennoch effizienten Stirlingmotor zu finden. Die Wahl fiel auf den „Viebach ST 05 G“, wofür es mehrere Argumente gab. Zum einen ist die Zusammenbauzeichnung dieses Motors unter einer Creative-Commons-Lizenz (CC-BY-NC-SA) frei erhältlich. Deshalb wurden schon mehrere Motoren dieses Typs gebaut und zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt. Zu dem kommt, dass für dieses Modell bereits ein breitgefächertes Netzwerk existiert <sup>8</sup>(z.B. <http://www.oocities.org/viebachstirling/>), in dem vielfältige Erfahrungen ausgetauscht werden. Die Langlebigkeit und Robustheit wurde dabei mehrfach bestätigt. Das resultiert unter anderem daraus, dass bei der erzielbaren Leistung Abstriche gemacht wurden. Dazu hat u. a. die Verwendung von Luft anstelle von Helium oder Wasserstoff als Arbeitsgas sowie ein Arbeitsdruck von gerade mal 10 bar geführt. Hochleistungsstirlingmotoren arbeiten dagegen mit Drücken von bis zu 150 bar. Außerdem wurden durch die maximale Erhitzertemperatur

---

<sup>8</sup> z. B. <http://www.oocities.org/viebachstirling/>

von 550 bis 600 °C weitere Hürden zum Teil umgangen. Dazu zählt z. B. die anspruchsvollere Ausführung von Dichtungen sowie die oft anfälligen Paarungen der Materialien.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Grundlagen zum Bau eines 500 W Dish/Stirling-Systems wurden mit dieser Arbeit geschaffen. Alle in der Arbeit verwendeten Tabellen sind in einem Dokument (digitaler Anhang: „Tabellen“) miteinander verknüpft, wodurch das hier Erarbeitete entsprechend dimensioniert werden kann. Der Parabolspiegel kann somit nach Tabelle 7 ausgelegt werden und je nach Materialverfügbarkeit in einer der bei 4.3 vorgestellten Varianten gebaut werden. Das Angebot der CAD-Dateien zur Fertigung des Stirlingmotors befindet sich im Anhang A. Für die Umsetzung sind noch Entwicklungen durchzuführen hinsichtlich des Gestells sowie einer automatischen Sonnennachführung. Die Witterungsbeständigkeit der untersuchten Materialien unter Einsatzbedingungen ist noch nicht bekannt. Empfehlenswert ist es, dazu noch Langzeittests durchzuführen.

*Kommentar des Autors:*

Sollten die Mittel extrem knapp sein und Bedarf zum Kochen besteht: mit Hilfe der Tabellen und der bei 4.3 vorgestellten Varianten zum Bau eines Parabolspiegels kann optional auch ein Solarkocher gebaut werden.

## Anhang A: Angebot der CAD-Daten

ve//ingenieure

Viebach & Eckl Ingenieure  
Partnersgesellschaft  
Engineering Services

An alle Interessenten des  
Stirlingmotors ST05G-CNC

Kolbermoor, den 12.1.2009

### Zeichnungssatz Stirlingmotor ST05G-CNC

Sehr geehrte Damen und Herren,

vielen Dank für Ihr Interesse am Projekt ST05G-CNC. Mit diesem Projekt möchten wir an die Arbeiten von Dieter Viebach anschließen, der 1992 den Stirlingmotor ST05G vorstellte. Dieser einfach zu fertigende Motor war als Versuchs- und Lehrmodell für Micro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen konzipiert und erreichte eine Leistung von ca. 500 Watt.

Das beständige Interesse an dem Motor hat uns bewogen diesen zu überarbeiten und einen aktualisierten Zeichnungsdatensatz herauszugeben. Dabei haben wir, ohne die ursprüngliche Konzeption zu verändern, die Konstruktion so optimiert, dass alle Komponenten auf modernen CNC-Fertigungsanlagen hergestellt werden können. Der Aufbau der Maschine wird dadurch einfacher und günstiger. Der Zeichnungssatz umfasst ca. 60 Zeichnungsteile, alle weiteren Komponenten sind gängige Normteile oder Normalien.

	Netto €	incl. 19% MwSt. €
Zeichnungsdatensatz ST05G-CNC im .pdf-Format auf CD-ROM:	99,00	117,81
Zeichnungsdatensatz ST05G-CNC im .pdf-Format+2D-CAD-Daten (.dxf-Format) auf CD-ROM:	149,00	177,31
Zeichnungsdatensatz ST05G-CNC im .pdf-Format+3D-CAD-Daten (STEP-Format) auf CD-ROM:	249,00	296,31
Versandkosten Inland	3,05	3,63
Versandkosten Ausland	8,05	9,58
Weiteres Informationsmaterial zum ST05G von Dieter Viebach:		
CD-ROM „Ringinfos“: Hinweise zu Bau und Optimierung des ST05G, Zeichnungen für den Generator im Druckgehäuse, Beschreibung realisierter Anlagen, 12 min. Videoclip: „ST05G im Biomassebetrieb auf dem Teststand“:	20,71	24,65
DVD: Lehrvideo „Der Stirlingmotor ST05G“ Inhalt: Funktionsweise von Stirlingmotoren als Computeranimation, Geschichte, alte und neuere Motoren, der ST05G, seine Einzelteile, der Zusammenbau, Betrieb als BHKW mit Propangas:	34,03	40,50
Buch: „Der Stirlingmotor einfach erklärt und leicht gebaut“, Dieter Viebach, ökobuch Verlag Staufen bei Freiburg, 7. erweiterte Auflage 2008, ISBN 978-3-936896-31-2	im Buchhandel erhältlich	

Auf Anfrage unterstützen wir Sie auch gerne bei der Beschaffung einzelner Bauteile oder vollständig aufgebauten Motoren. Weitere Informationen zu diesem Projekt finden Sie auf unserer Webseite [www.ve-ingenieure.de](http://www.ve-ingenieure.de) in der Rubrik „Projekte“.

Mit freundlichen Grüßen

Viebach & Eckl Ingenieure  
Stefan Viebach, Hubert Eckl

**Viebach & Eckl Ingenieure**  
Partnersgesellschaft  
Bergsiedlung 19  
D-83059 Kolbermoor  
Tel: +49 (0) 8031/8871332-0  
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9

**Mail:** [buero@ve-ingenieure.de](mailto:buero@ve-ingenieure.de)  
**FTP:** <ftp://ve-ingenieure.de>  
**Web:** [www.ve-ingenieure.de](http://www.ve-ingenieure.de)  
**St.-Nr.:** 156/180/05108 FA Rosenheim  
**ID.-Nr.:** DE-256450221  
**Register:** Amtsgericht Traunstein PR 74

**Bank:** VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG  
**BLZ:** 711 601 61  
**Konto-Nr.:** 7271603  
**SWIFT/BIC:** GENODEF1ROR  
**IBAN:** DE66711601610007271603

## Anhang B: Datenblatt Kollektorprüfstand

Fachbereich VIII  
Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik  
Labor für konventionelle und erneuerbare Energien



### Technische Daten „Kollektorprüfstand“

Lampenfeld	
Lampenart	ATLAS MTT „Solar Constant 4000“
Spektrale Qualität	EN12975:2006 ISO 9806-1:1994
Gebrauchsdauer	1.000 h
Intensitätssteuerung	75 – 100 %
Maximale Intensität (ohne künstl. Himmel)	1.200 W/m <sup>2</sup> (280 – 3.000 nm)
Maximale Intensität (mit künstl. Himmel)	1.000 W/m <sup>2</sup> (280 – 3.000 nm)
Größe der Messebene mit 1.200 W/m <sup>2</sup> (ohne künstl. Himmel und ± 10 % Homogenität)	2,0 x 2,4 m
Zeitliche Stabilität der Lichtintensität	± 1 %
Kollimation	Etwa 90 % der emittierten Strahlung liegen in der Richtung, in der der IAM eines Standard Flachkollektors nicht mehr als 2 % variiert.
Anschlussleistung, elektrisch	8 x 7,5 kVA bei 400 V / 50 Hz

künstlicher Himmel	
Glasscheiben	Beidseitig antireflexbeschichtetes gehärtetes Glas
Abmessungen	4 Glaskassetten je 2,0 x 1,3 m
Luftvolumenstrom	ca. 4.000 m <sup>3</sup> /h
Anschlussleistung der Ventilatoren	2,8 kW



Kollektortestplattform	
Prüffläche	netto : 2,4 x 3,2 m ( $\hat{=}$ Scannoberfläche) brutto: 2,5 x 3,3 m
max. Belastung	ca. 400 kg flächig
max. Kollektorhöhe	30 cm
Windgeschwindigkeit	0 – 4 m/s (stufenlos)
Anschlußleistung Querstromgebläse	350 W bei 400 V / 50 Hz
Temperaturspanne Thermostat	10 – 110 °C
Temperaturregelung	$\pm 0,1$ °C
Heizleistung	6.000 W
Kühlleistung	4.000 W
Maximaler Pumpendruck	4 bar
Betriebsmassenstrom	0 – 600 kg/h
Massenstromkonstanz	$\pm 1$ %

# Anhang C: Einstellung der Bestrahlungsstärke

## pyranometer

NX 10  
 NY 6  
 XSTART -819.994  
 YSTART 755.0  
 XEND 620.006  
 YEND 1555.0  
 GRID 160.0  
 AVERAGE 1011.08  
 MINIMUM 938.81  
 MAXIMUM 1058.22

755.0	959.539.422	989.995.562	1.008.776.264	1.016.849.742	1.037.714.448	1.040.856.863	1.047.125.284	1.024.824.768	1.049.414.448	1.043.498.762
915.0	995.509.185	1.030.436.842	1.046.928.380	1.040.848.710	1.048.372.446	1.043.589.061	1.042.210.630	1.011.631.476	1.032.980.289	1.028.795.872
1075.0	1.005.051.290	1.041.004.541	1.058.218.163	1.044.155.212	1.036.532.921	1.031.938.287	1.027.548.710	996.633.230	1.020.796.285	1.025.382.663
1235.0	1.000.587.926	1.035.277.606	1.050.226.729	1.030.264.499	1.013.641.692	1.016.168.731	1.013.346.336	985.425.490	1.012.353.560	1.022.954.076
1395.0	988.461.300	1.013.288.854	1.016.636.429	1.003.475.955	982.553.870	993.646.646	995.033.333	972.519.298	1.001.227.864	1.016.693.808
1555.0	952.483.282	979.222.704	976.638.184	957.045.098	938.805.986	958.653.251	964.175.129	950.432.095	987.632.611	1.008.579.360

## pyrgeometer

NX 10  
 NY 6  
 XSTART -819.994  
 YSTART 755.0  
 XEND 620.006  
 YEND 1555.0  
 GRID 160.0  
 AVERAGE -77.53  
 MINIMUM -80.54  
 MAXIMUM -74.42

755.0	-80.542.596	-78.154.825	-77.420.632	-76.349.085	-76.289.601	-75.952.246	-75.780.283	-75.813.311	-75.786.855	-75.376.789
915.0	-78.128.369	-78.578.120	-78.300.333	-77.949.750	-77.579.368	-76.937.770	-76.388.769	-75.886.106	-75.012.978	-74.417.720
1075.0	-77.830.699	-78.399.501	-78.538.436	-78.055.574	-78.095.258	-77.996.090	-77.883.611	-77.619.052	-77.413.977	-76.977.454
1235.0	-79.715.807	-79.762.063	-79.669.468	-79.411.564	-78.703.827	-77.777.787	-77.704.992	-76.726.123	-76.620.300	-75.786.855
1395.0	-78.287.105	-78.631.032	-79.027.870	-78.730.283	-78.571.464	-78.723.627	-78.141.597	-78.386.273	-77.486.772	-76.428.453
1555.0	-78.115.141	-78.300.333	-78.664.143	-78.220.965	-77.566.140	-77.255.241	-77.189.101	-76.163.894	-75.634.775	-75.171.714

**solarcell**

NX 10  
 NY 6  
 XSTART -819.994  
 YSTART 755.0  
 XEND 620.006  
 YEND 1555.0  
 GRID 160.0  
 AVERAGE 919.32  
 MINIMUM 835.41  
 MAXIMUM 960.98

755.0	899.844.953	918.996.622	935.015.168	950.707.376	960.404.132	960.984.092	953.240.162	943.668.600	943.077.941	927.558.035
915.0	926.416.299	954.675.087	958.917.806	957.452.921	960.525.034	956.318.681	944.049.529	929.836.151	947.575.370	920.780.390
1075.0	929.581.480	955.270.040	955.674.509	944.244.280	947.247.927	943.857.995	933.341.629	919.420.363	940.623.257	918.269.004
1235.0	919.518.802	942.624.240	939.953.419	922.346.931	927.733.526	927.646.851	921.557.241	911.092.180	934.993.769	921.988.466
1395.0	891.603.486	898.773.836	901.452.153	887.543.701	900.300.781	904.013.863	902.944.859	896.859.529	912.863.109	917.487.873
1555.0	846.329.852	859.785.680	847.967.066	835.406.864	854.157.254	863.224.818	864.713.244	869.349.744	896.625.195	900.906.433

**wind**

NX 10  
 NY 6  
 XSTART -819.994  
 YSTART 755.0  
 XEND 620.006  
 YEND 1555.0  
 GRID 160.0  
 AVERAGE 0.03  
 MINIMUM 0.03  
 MAXIMUM 0.18

755.0	0.026065	0.026119	0.026081	0.026140	0.026087	0.026181	0.026259	0.026156	0.026124	0.026045
915.0	0.026147	0.026172	0.026145	0.026131	0.026096	0.026189	0.026175	0.026166	0.026146	0.026119
1075.0	0.026090	0.026226	0.026286	0.026145	0.026453	0.026276	0.026191	0.026202	0.026346	0.026298
1235.0	0.026131	0.026294	0.026214	0.026168	0.026290	0.026455	0.026290	0.026468	0.026170	0.026302
1395.0	0.026265	0.026254	0.026225	0.026247	0.026350	0.026259	0.176818	0.026316	0.026561	0.026407
1555.0	0.026323	0.026382	0.026188	0.026245	0.026249	0.026221	0.026360	0.026329	0.026389	0.026267

## Literaturverzeichnis

- [Clim17] CLIMATEMPS: *Jakarta, Java Climate & Temperature*. URL <http://www.jakarta.climatemps.com/>. - abgerufen am 2019-07-02
- [Conn19] CONNELL, DANIEL: *OpenSourceLowtech wifidish*. URL <http://opensource-lowtech.org/wifidish.html>. - abgerufen am 2019-04-23
- [Docs18] DOCSLIDE: *Angebot Viebach ST 05 G CNC CAD-Daten*. URL <https://docslide.net/download/link/angebot-st05g-cnc>. - abgerufen am 2019-06-23
- [Ener18] ENERGIE-EXPERTEN.ORG: *Solarkonstante: Definition, Herleitung und Berechnung*. URL <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/solarenergie/solarstrahlung/solarkonstante.html>. - abgerufen am 2019-07-07
- [Entw01] ENTWICKLUNGSBÜRO: *Ringinfo Nr. 7*. URL <http://www.oocities.org/viebachstirling/Ringinfo7.html>. - abgerufen am 2019-05-03
- [Iten00] ITEN, KARL: *Klimadiagramme weltweit, Indonesien / Jakarta*. URL <http://www.iten-online.ch/klima/asien/indonesien/jakarta.htm>. - abgerufen am 2019-04-04
- [Klim19] KLIMA.ORG: *Klimatabelle Jakarta*. URL <http://www.klima.org/indonesien/klima-jakarta/>. - abgerufen am 2019-04-04
- [Schl11] SCHLEDER, FRANK: *Stirlingmotoren: thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessrechnung, Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren, Vogel-Fachbuch. 4., überarb. und aktualisierte Aufl.* Würzburg : Vogel, 2011 — ISBN 978-3-8343-3195-3
- [Schm16] SCHMID, TOBIAS: *Kombinierte Betrachtung von Optiken und Solarzellen für die konzentrierende Photovoltaik*. Freiburg im Breisgau, Albert-Ludwigs-Universität, 2016

- [StLB07] STEIMLE, FRITZ ; LAMPRICHS, JÜRGEN ; BECK, PETER: *Stirling-Maschinen-Technik: Grundlagen, Konzepte, Entwicklungen, Anwendungen* : Müller, 2007 — ISBN 978-3-7880-7773-0
- [Vieb10] VIEBACH, DIETER: *Der Stirlingmotor: einfach erklärt und leicht gebaut* : Ökobuch, 2010 — ISBN 978-3-936896-54-1
- [Weat19] WEATHER ATLAS: *Monthly weather forecast and Climate Jakarta, Indonesia.* URL <https://www.weather-atlas.com/en/indonesia/jakarta-climate>. - abgerufen am 2019-07-02
- [WeKü07] WERDICH, MARTIN ; KÜBLER, KUNO: *Stirling-Maschinen: Grundlagen, Technik, Anwendungen* : Ökobuch, 2007 — ISBN 978-3-936896-29-9
- [Wett90] WETTER.COM: *Klimadaten Wetterstation Jakarta.* URL <https://www.wetter.com/reise/klima/klimatabelle/indonesien-jakarta-ID0JK0002.html>. - abgerufen am 2019-04-04

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift