



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 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 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 η_{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_{geo} | geometrische Konzentration | - |
| d_{Ab} | Absorberdurchmesser | m |
| d_{Ap} | Aperturdurchmesser | M |
| f | Brennweite | m |
| k | Umrechnungsfaktor | - |
| m | Masse | kg |
| p | Luftdruck | mbar |
| r | Radius | m |
| r_{Ap} | Aperradius | m |
| r_{Ab} | Absorberradius | m |
| t | Zeit | s |

| | | |
|---------------------|---|--------------|
| α | Korrekturfaktor | [-] |
| ΔT | Temperaturdifferenz | K |
| η_{Gen} | Generatorwirkungsgrad | % bzw. [-] |
| η_{\max} | Maximaler Systemwirkungsgrad | % bzw. [-] |
| η_{\min} | Minimaler Systemwirkungsgrad | % bzw. [-] |
| η_{Mot} | Maschinenwirkungsgrad (Motor) | % bzw. [-] |
| η_{PS} | Wirkungsgrad Parabolspiegel => Albedo-Wert | % bzw. [-] |
| η_{Sys} | Systemwirkungsgrad | % bzw. [-] |
| Θ | Polarwinkel Theta | ° |
| ϑ | Temperatur theta | °C |
| φ | 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 η_{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.

Einleitung

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 |
| climatemp | 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 |
| climatemp | 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° 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.

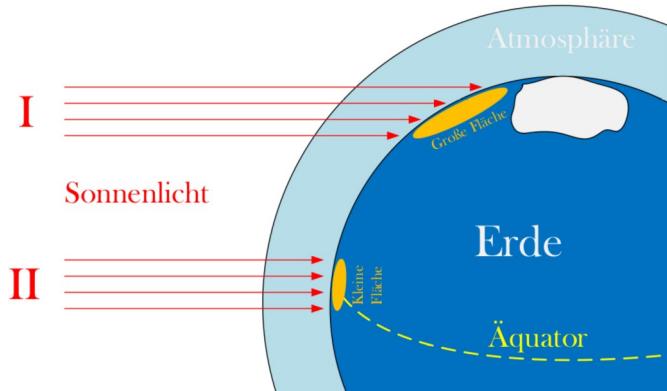


Abbildung 1: Sonneneinstrahlung durch die Atmosphäre auf die Erdoberfläche

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%.

$$E = E_0 * 0,77 \quad (1)$$

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

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.

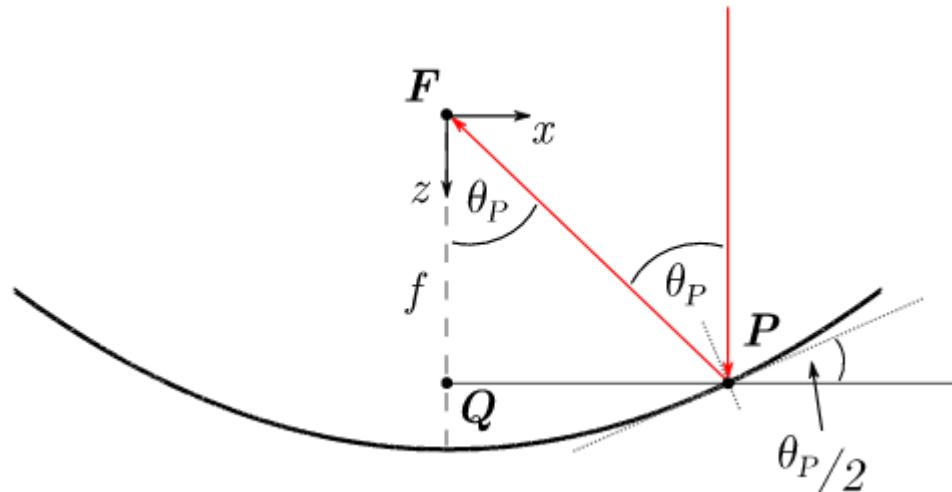


Abbildung 2: Darstellung der Funktionsweise eines Parabolspiegels [Schm16]

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 $\Theta/2$. Θ 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_{geo}

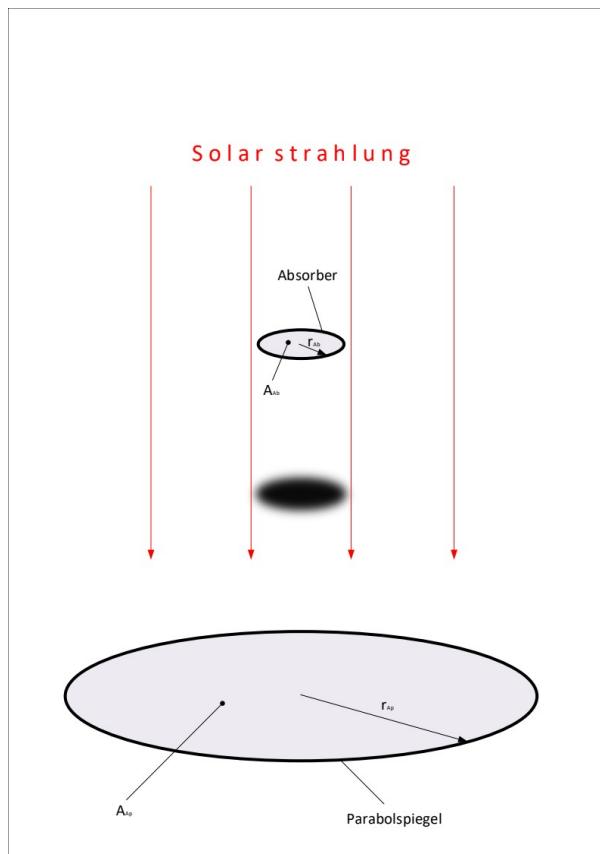


Abbildung 3: geometrische Konzentration

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

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

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

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

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

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

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], [Schl11]). Hier soll das Grundprinzip anhand eines der einfachsten Modelle (Abbildung 4) erklärt werden.

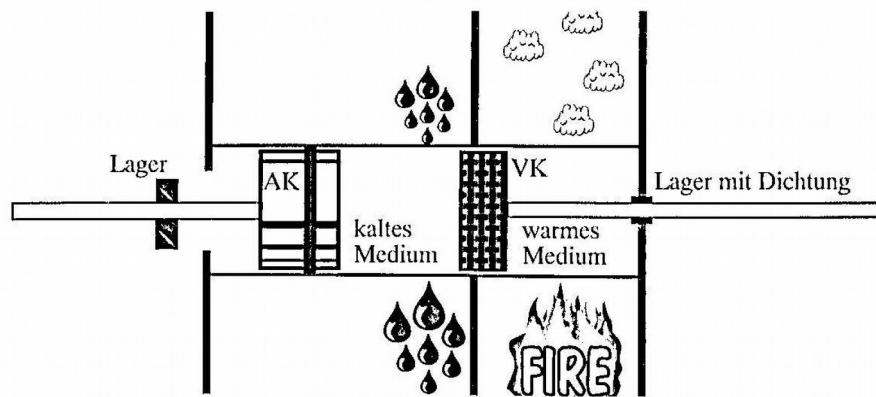


Abbildung 4: Einfaches Modell zur Funktion des Stirling-Motors [WeKü07]

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.

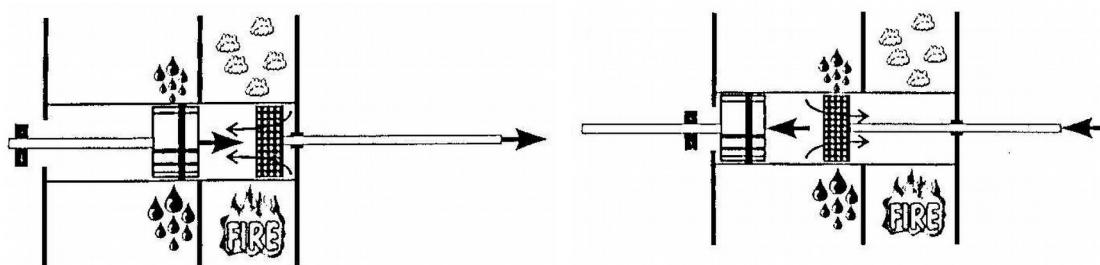


Abbildung 5: Kompressionsphase Abbildung 6: Expansionsphase [WeKü07]

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°) 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° . 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.

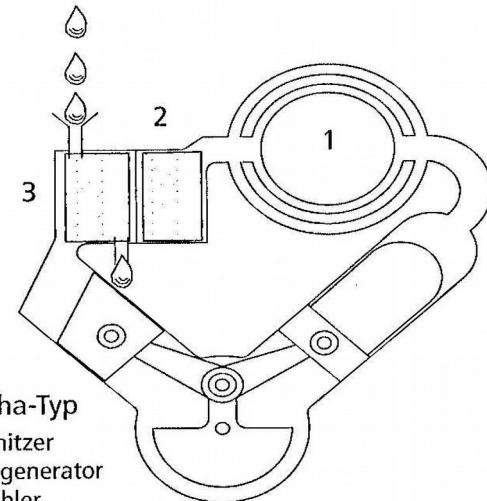


Abbildung 7: Alpha-Stirling [Vieb10]

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° . 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-

Choc und andere. Der Beta-Typ lässt sich mit dem kleinsten Schadraum (Totraum) ausführen, was sich günstig auf die Leistungsdichte des Motors auswirkt. Beta-Typ-Stirlingmotoren wurden von der Firma Philips in Holland gebaut, z.B. der 102 C mit ca. 300 Watt (vgl. [WeKü07]).

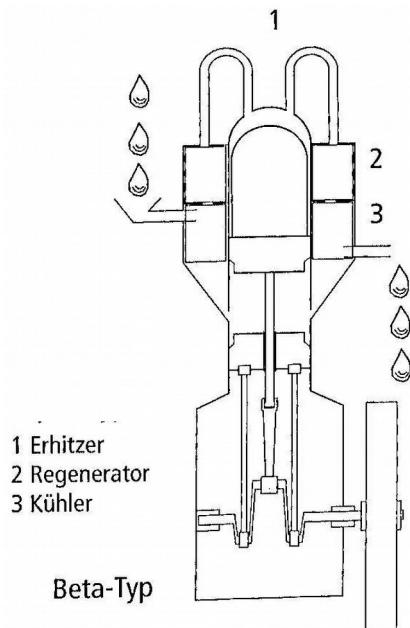


Abbildung 8: Beta-Stirling [Vieb10]

Gamma-Typ

Der Urstirlingmotor von Robert Stirling wurde 1816 als Gamma-Typ (Abbildung 9) gebaut. Er besitzt wie der Alpha-Stirling zwei Zylinder. In der einfachsten Bauform verschiebt der Verdrängerkolben im warmen Zylinder das Arbeitsgas von seiner verschlossenen und beheizten Oberseite – diese Seite entspricht dem Erhitzer – durch einen Ringspalt zwischen Verdrängerkolben und Zylinderwand oder durch Bohrungen im Verdrängerkolben zu seiner gekühlten Unterseite. Im Ringspalt um den Verdrängerkolben oder in den Bohrungen im Verdränger ist ein einfacher Regenerator angeordnet [Vieb10, S.15, 16]. Bei

Stand der Technik

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

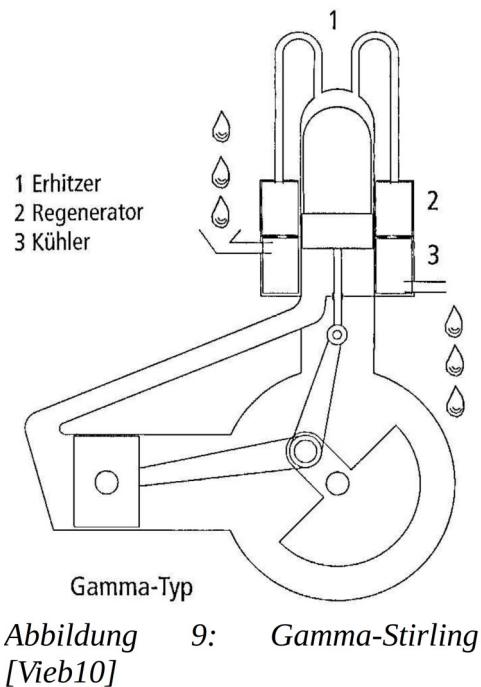
Der gekühlte Raum unter dem Verdrängerkolben - er entspricht dem Kühler bei Leistungsstirlingmotoren – ist über ein Verbindungsrohr mit dem Arbeitszylinder verbunden. Die Bewegungen von Verdrängerkolben und Arbeitskolben haben eine Phasenverschiebung von etwa 90° zueinander. Dieser Winkel kann durch 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.

Beim Alpha-Typ mit drucklosem Kurbelgehäuse ist der Raum unter beiden Kolben mit einem Pufferraum verbunden. Auch beim Beta- und Gamma-Typ ist bei Motoren mit drucklosem Kurbelgehäuse ein Pufferraum unter den Arbeitskolben erforderlich.

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.



Niedertemperatur-Stirlingmotoren (NTS, z. B. „Sunpulse 500“) sind ebenfalls in der Gamma-Form aufgebaut. Diese weisen weitaus geringere Drücke und

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 nachgeföhrter 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 η_{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_{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 CO₂-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_{strahl} im sogenannten Brennpunkt.

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

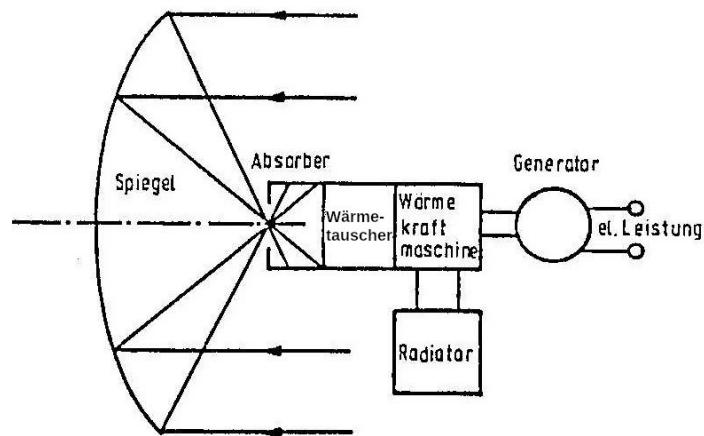


Abbildung 11: Prinzipskizze eines Dish/Stirling-Systems

[WeKü07]

Die wichtigsten Bauelemente eines DSS (siehe Abbildung 11):

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

Stand der Technik

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

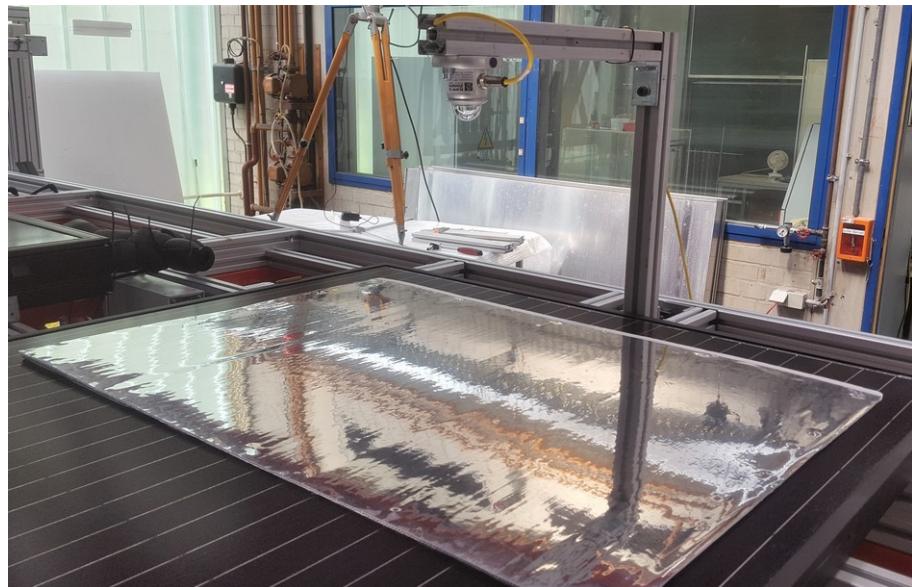


Abbildung 12: Laborversuch Reflexion

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.

Eingeschlagener Realisierungsweg

- 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.

Eingeschlagener Realisierungsweg

Des Weiteren wurde noch eine nahezu weiße Oberfläche¹ gemessen. Dazu diente die Rückseite eines Wahlplakates.

4.1.1 Versuchsaufbau

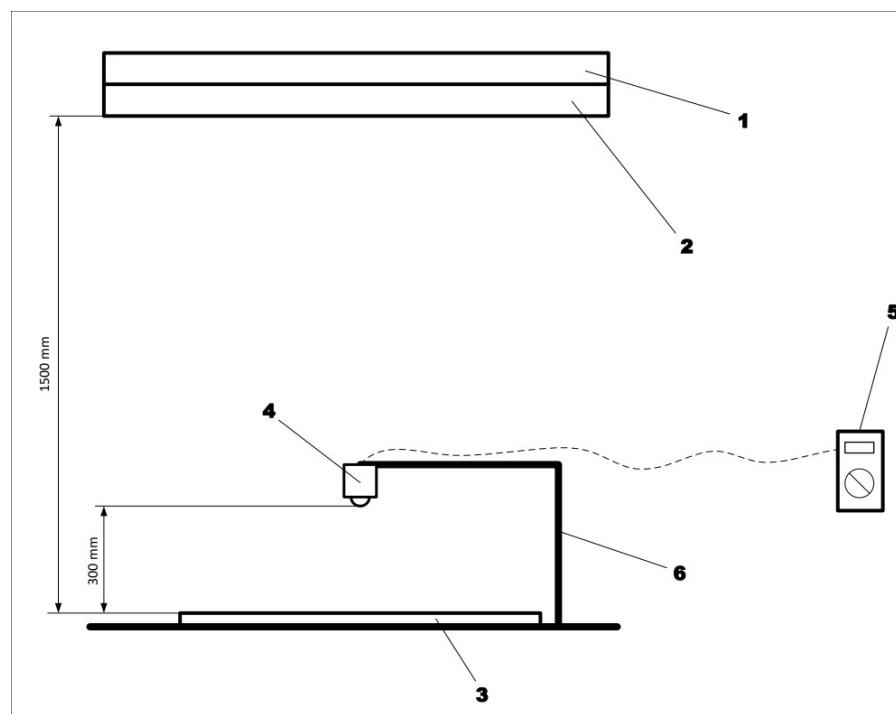


Abbildung 17: Schema Versuchsaufbau

- 1) künstliche Sonne ²
- 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

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

erreicht wurden bei der Einstellung

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

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

| Probenmaterial | Spannung U [mV] | reflektierte Bestrahlungsstärke E_{refl} [W/m ²] | Albedo-Wert [-] |
|------------------------|--------------------|--|--------------------|
| 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 $d_{Ap} = 1 \text{ m}$ definiert und von einem Durchmesser des Absorbers von $d_{Ab} = 0,1 \text{ m}$ ausgegangen (Tabelle 5).

Eingeschlagener Realisierungsweg

| | | | |
|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|---------------|
| Aperturdurchmesser d_{Ap} [m]: | 1,00 | Aperturfläche A_{Ap} [m^2]: | 0,7854 |
| Absorberdurchmesser d_{Ab} [m]: | 0,10 | Absorberfläche A_{Ab} [m^2]: | 0,0079 |
| Bestrahlungsstärke E [W/m^2]: | 1052,59 | Konzentrationsfaktor c_{geo} [-]: | 99,00 |

Leistung auf bestr. Aperturfläche P_{Ap} [W]: **818,44**

| Probenmaterial | Albedo-Wert | Bestrahlungsstärke E_{refl} auf Absorber | erreichbare Leistung |
|------------------------|-----------------|--|----------------------|
| | [--] | [W/m^2] | [W] |
| 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 CD³. 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 α , 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:

³ „Tabellen“ → erreichbare Leistungen

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

| | |
|---|----------------|
| Bestrahlungsstärke E [W/m ²]: | 1000,00 |
| Benötigte Leistung P [W]: | 300,00 |
| Absorberdurchmesser d _{Ab} [m]: | 0,10 |
| Korrekturfaktor α [-]: | 0,72 |

| | Maße für den Selbstbau nach der Anleitung in Kapitel 4.3.2 | | | | | | |
|------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|
| | | | Teil I | | Teil II | | Teil III |
| Beschichtungsart | Albedo-Wert | Durchmesser d _{Ap} | Kettenlänge K ₁ | Sehnenlänge S ₁ | Kettenlänge K ₂ | Sehnenlänge S ₂ | Radius R |
| 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 |
| Getrankedosen | 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_{Ap} 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 maximalen Motorleistung (500 W) und dem Maschinenwirkungsgrad η_{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 $d_{Ap} [m]$: **0,15**
 Korrekturfaktor $\alpha [-]$: **0,80**

| Beschichtungsart | Albedo-Wert [-] | Durchmesser d_{Ap} [m] | Maße für den Selbstbau nach der Anleitung in Kapitel 4.3.2 | | | Radius R [m] |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|--|---------|----------|-----------------|
| | | | Teil I | Teil II | Teil III | |
| spezielle Spiegelfolie | 0,737 | 2,421 | 2,777 | 2,421 | 3,297 | 2,102 |
| Rettungsdecke | 0,640 | 2,598 | 2,980 | 2,598 | 3,537 | 2,255 |
| Isomatte | 0,795 | 2,332 | 2,675 | 2,332 | 3,175 | 2,024 |
| Getränkedosen | 0,433 | 3,156 | 3,620 | 3,156 | 4,297 | 2,740 |

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 η_{Sys}

Zur Berechnung des minimal sowie maximal erreichbaren Systemwirkungsgrades η_{Sys} beim Selbstbau des Parabolspiegels kombiniert mit dem Experimentalmotor Viebach ST 05 G wird die Variante mit den Getränkendosen 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 η_{Mot} mit 22% zusammengefasst.

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

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

Tabelle 8: Systemwirkungsgrad η_{Sys}

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

Mit dem Albedo-Wert 0,795 der Isomatte in Kombination mit einem geregelten Generator mit einem Wirkungsgrad η_{Gen} von 90% dagegen ist ein mehr als doppelt so hoher Systemwirkungsgrad η_{Sys} (in Tabelle 8 η_{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

Eingeschlagener Realisierungsweg



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°C über den Siedepunkt (100°C) zu erhitzen. Dies entspricht einer Temperaturdifferenz ΔT von 90 K.

Berechnung der Wärmeenergie E_{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 $\Delta T = 90 \text{ K}$

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

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ} \quad (7)$$

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

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

$$P = \frac{E}{t} \quad (8)$$

ergibt sich eine durchschnittliche Leistung P dieses vereinfachten Aufbaus von

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

Diese Bauart lässt sich mit Hilfe von Tabelle 6⁵ direkt zum Betrieb eines Stirlingmotors anpassen.

4.3.2 Bau durch Aufschichtung von Holzprofilen

Inspiriert 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

Eingeschlagener Realisierungsweg

Einzelteile nach Abbildung 19 sind mit der Tabelle zu berechnen⁶. 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
- Bretter⁷:
 - sechs Stück, Maße 1,2 D x 0,3 D [m]
 - vier Stück mit den Abmessungen 0,5 D x 0,3 D [m]
- Gitternetz zur Formgebung (Befestigung mit Tacker, Kabelbindern oder Draht)
- verfügbares Material (vgl. 4.1) zur Reflexion der Sonne

⁶ Digitaler Anhang: „Tabellen“ → Parabolspiegel-Dimensionierung

⁷ Abmessungen in Abhängigkeit vom Durchmesser D des Parabolspiegels

Eingeschlagener Realisierungsweg

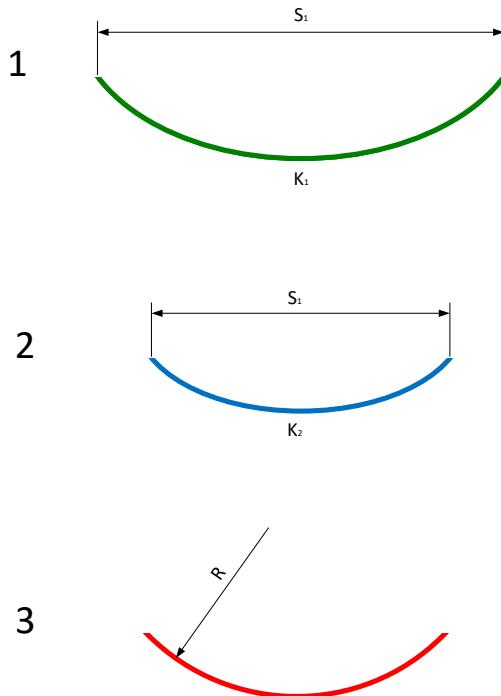


Abbildung 19: relevante Maße für Eigenbau

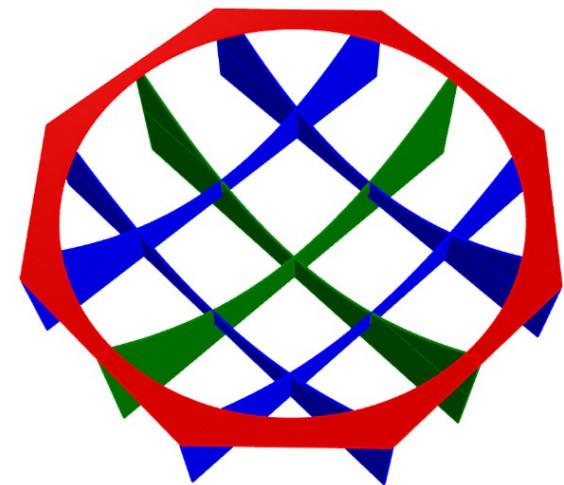


Abbildung 20: Zusammenbauskizze
[Conn19]

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 diente 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_{Strahl} zu Wärmeenergie E_{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?

- Getränkedosen 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

Diskussion

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 existiert⁸(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

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

Diskussion

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



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 vorstellt. 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 aufgebauter Motoren. Weitere Informationen zu diesem Projekt finden Sie auf unserer Webseite www.ve-ingenieure.de in der Rubrik „Projekte“.

Mit freundlichen Grüßen

Viebach & Eckl Ingenieure
Stefan Viebach, Hubert Eckl

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

Mail: büro@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: 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 |
| Gebrauchsduauer | 1.000 h |
| Intensitätssteuerung | 75 – 100 % |
| Maximale Intensität (ohne künstl. Himmel) | 1.200 W/m ² (280 – 3.000 nm) |
| Maximale Intensität (mit künstl. Himmel) | 1.000 W/m ² (280 – 3.000 nm) |
| Größe der Messebene mit 1.200 W/m ² (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 ³ /h |
| Anschlussleistung der Ventilatoren | 2,8 kW |

| Kollektortestplattform | |
|-----------------------------------|--|
| Prüffläche | netto : 2,4 x 3,2 m (\triangleq Scannoberfläche) brutto: 2,5 x 3,3 m |
| max. Belastung | ca. 400 kg flächig |
| max. Kollektorthöhe | 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 | ± 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://opensourcelowtech.org/wifidish.html>. - abgerufen am 2019-04-23
- [Docs18] DOCSLIDE: *Angebot Viebach ST 05 G CNC CAD-Daten*. URL <https://docsslide.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

Literaturverzeichnis

- [StLB07] STEIMLE, FRITZ ; LAMPRICHHS, 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 selbstständig 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