

Entwicklung eines Auslegungswerkzeuges für Stirlingmotoren zur Umwandlung von Solarenergie in elektrische Energie für strukturschwache Regionen

Bachelorarbeit von Martin Schott

Matrikelnr. 779679

20. April 2015

Betreuerin und Erstgutachterin:
PROF. DR.-ING. SILKE KÖHLER

Zweitgutachter:
PROF. DR.-ING. PAUL KOHLENBACH

Studiengang:
MASCHINENBAU - ERNEUERBARE ENERGIEN
Beuth Hochschule für Technik Berlin



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

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

.....

Datum, Unterschrift

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine Berechnungsmethode zur Auslegung von Niedrigtemperatur-Stirlingmotoren entwickelt. Als Anwendungsbeispiel wird eine Versorgungsaufgabe im Südsudan gewählt, um die Methode zu testen. Es werden vorhandene Methoden aufgegriffen, teilweise angepasst und miteinander kombiniert. Der Fokus liegt dabei auf der Auslegung für eine einfache und robuste Bauform, um die Anwendung in strukturschwachen Regionen zu ermöglichen. Die Ergebnisse werden dargestellt und diskutiert und Ansätze zur Weiterentwicklung der Methode werden aufgezeigt.

Abstract

In this thesis a method of calculation for the design of low temperature stirling engines is being developed. As example of use an supply task in South Sudan is chosen to test the method. Different methods are applied, in parts adapted and combined. The focus is on the design for a simple and rugged type of construction to enable the application in structurally weak areas. The results are presented and discussed and approaches for further development of the method are pointed out.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
Symbolverzeichnis	vii
1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung und Gliederung	2
2. Entwicklung und Stand der Technik	3
2.1. Beschreibung des Wirkprinzips von Stirlingmotoren	3
2.1.1. α -Motoren	6
2.1.2. β -Motoren	7
2.1.3. γ -Motoren	8
2.1.4. Verlustmechanismen	9
2.2. Doppeltwirkende Motoren	13
2.3. Freikolben-Motoren	14
2.4. Flachplatten-Stirlingmotoren	15
2.5. Marktreife und ausgereifte Stirlingmotoren	16
3. Methoden	20
3.1. Definition der Versorgungsaufgabe	20
3.2. Auswahl der Bauform	22
3.2.1. Vorüberlegungen	22
3.2.2. Bewertungsmatrix	27
3.2.3. Gewählte Bauform	29
3.3. Berechnungsschema der Auslegung	31
3.3.1. Vorauslegung	32
3.3.2. Berechnung der Zyklus-Arbeiten nach Schmidt	36
3.3.3. Ermittlung von Drehzahl und Leistung	40
3.3.4. Abschätzung der oberen Prozesstemperatur	40
3.3.5. p-V-Diagramm	42

4. Ergebnisse	44
4.1. Vorauslegung	44
4.2. Berechnung der Zyklus-Arbeiten nach Schmidt	45
4.3. Ermittlung von Drehzahl und Leistung	47
4.4. Abschätzung der oberen Prozesstemperatur	49
4.5. p-V-Diagramm	50
4.6. konstruktive Überlegungen	50
4.7. Schlussfolgerungen	52
5. Zusammenfassung und Ausblick	54
Literatur	56
A. Protokoll des Gesprächs mit Stephen Kovats	59
B. Leistungsaufnahme des BRCK	61
C. Beigelegte CD	62

Abbildungsverzeichnis

1.	Übersicht des Stirling-Prozesses	4
2.	p-V- und T-S-Diagramm des Stirling-Prozesses	5
3.	Beispielhafte Anordnung der α -Bauform	6
4.	Beispielhafte Anordnung der β -Bauform	7
5.	Beispielhafte Anordnung der γ -Bauform	8
6.	Kontinuierliche und diskontinuierliche Kolbenbewegung	10
7.	p-V-Diagramm mit kontinuierlicher Kolbenbewegung .	11
8.	Auswirkungen des Totraums, dargestellt im p-V-Diagramm	11
9.	Der reale und der ideale Stirlingprozess, dargestellt im p-V-Diagramm	13
10.	Schema des doppeltwirkenden Siemens-Stirlingmotors mit vier Zylindern	14
11.	Flachplatten-Motor von Kolin mit diskontinuierlicher Verdrängersteuerung	16
12.	Flachplatten-Stirlingmotor Vieb-4 für den Eigenbau von Dieter Viebach	18
13.	Aufbau des Sunwell 50 von Sunmachine	19
14.	Schema des Flachplatten-Stirlingmotors, auf dessen Basis die Auslegung durchgeführt werden soll	30
15.	Übersicht der Wärmeströme und der Leistung sowie oberer und unterer Prozesstemperatur	31
16.	Auslegungsdiagramm zur Abschätzung des Gesamtvolumens nach Gleichung 3	34
17.	Expansionsraum-, Kompressionsraum- und Gesamtvolumen dargestellt über den Kurbelwinkel	35
18.	Vergleich von errechneter Eingangsleistung $P_{ein,Schmidt}$ und errechnetem zugeführtem Wärmestrom \dot{Q}_{zu}	49
19.	p-V-Diagramm des ermittelten Prozesses	50

Tabellenverzeichnis

1.	Beispielhafte Konfigurationen des Arbeitsplatzes, der betrieben werden soll	21
2.	Bewertungsmatrix verschiedener Stirlingmotor-Bauformen	28

Symbolverzeichnis

α	Kurbelwinkel [<i>rad</i>]
η_{ideal}	theoretischer Wirkungsgrad [1]
η_{real}	realer Wirkungsgrad [1]
A	Aperturfläche [m^2]
C	Faktor zur Drehzahl-Abschätzung [1]
G	Globalstrahlung auf horizontale Fläche [W/m^2]
G_{ein}	nutzbare Globalstrahlung auf horizontale Fläche [W/m^2]
P	nutzbare Leistung [W]
P_E	zugeführte Leistung [W]
P_K	abgeführte Leistung (nicht nutzbar) [W]
p_m	Mitteldruck [bar]
P_{ab}	abgeführte mechanische Leistung [W]
r	Verdichtungsverhältnis [1]
T_E	obere Prozesstemperatur [K]
T_K	untere Prozesstemperatur [K]
V_{HE}	Hubvolumen des Expansionskolbens [dm^3]
V_{HK}	Hubvolumen des Kompressionskolbens [dm^3]
W	nutzbare Arbeit [J]
W_E	zugeführte Arbeit [J]
W_K	abgeführte Arbeit (nicht nutzbar) [J]
ΔT	Differenz zw. oberer und unterer Prozesstemp. [K]
\dot{Q}_{ab}	abgeführter Wärmestrom [W]
\dot{Q}_{zu}	zugeführter Wärmestrom [W]

1. Einleitung

Die Herausforderungen der globalen Energiewende betreffen heute nicht mehr nur Deutschland und andere Industrieländer, sondern sind auch in strukturschwachen Regionen hochaktuell. Ein Beispiel einer solchen Region ist der Südsudan. Die Tatsache, dass in diesem sonnenreichen Land hauptsächlich Dieselaggregate zur dezentralen Stromversorgung zum Einsatz kommen [Kov15], regt in Anbetracht der Knappheit und Umweltunverträglichkeit fossiler Brennstoffe zum Nachdenken über andere Lösungen an. Die Nutzung der frei verfügbaren Sonnenenergie liegt nahe. Wenn neben der Energieversorgung auch die Förderung lokaler Produktion und lokaler Wirtschaftskreisläufe berücksichtigt werden soll, scheint der Gebrauch importierter Photovoltaik-Anlagen jedoch keine ganzheitliche Lösung dieses Problems zu sein.

Eine Möglichkeit, Wärme auch in verhältnismäßig kleinen Mengen in mechanische Energie zu wandeln, stellen Stirlingmotoren dar. Diese rücken wieder in den Fokus, nachdem sie während der Zeit preiswerter fossiler Energieträger hinter Verbrennungsmotoren zurücktreten mussten [SLB07, S. IX]. Zu dem Konzept, Sonnenwärme mittels Stirlingmotoren in mechanische und ggf. in elektrische Energie zu wandeln, gibt es bereits einige Ansätze, die in der vorliegenden Arbeit kurz vorgestellt werden. Diese sind jedoch teils technisch sehr anspruchsvoll und teils sind Informationen schwer erhältlich. Um von Menschen in strukturschwachen Regionen möglichst selbstständig angewandt zu werden, müssen im Sinne der „Hilfe zur Selbsthilfe“ für den solar betriebenen Stirlingmotor Informationen frei verfügbar gemacht werden und die Hürden für den Bau eines solchen möglichst klein gemacht werden.

Die vorliegende Arbeit soll dazu einen Beitrag leisten, indem ein Auslegungswerkzeug für solar betriebene Stirlingmotoren entwickelt wird, welches auf den Bau mit möglichst einfachen Mitteln ausgerichtet ist. Es wird mittels eines Anwendungsbeispiels einer strukturschwachen

Region, der südsudanesischen Hauptstadt Juba, getestet. Alle Werkzeuge, die für die Auslegung verwendet wurden, werden im Internet frei verfügbar gemacht, um zu einer partizipativen Weiterentwicklung zu ermutigen.

1.1. Aufgabenstellung und Gliederung

Als Leitfrage der vorliegenden Arbeit lässt sich folgender Satz formulieren:

Wie lassen sich Teile des Auslegungsprozesses für solarbetriebene Niedrigtemperatur-Stirlingmotoren (im Hinblick auf eine einfache Konstruktion) in einem Berechnungswerkzeug automatisieren?

In Abschnitt 2 werden zunächst die technischen Grundlagen von Stirlingmotoren erklärt und der Stand der Technik wird dargestellt. Die methodische Vorgehensweise wird in Abschnitt 3 erläutert, das umfasst die Definition des Anwendungsbeispiels, die Auswahl einer Bauform und schließlich das Berechnungsschema des Auslegungswerkzeugs. Anschließend wird in Abschnitt 4 eine exemplarische Auslegung durchgeführt. Die Ergebnisse werden diskutiert und konstruktive Überlegungen vorgestellt. Abschnitt 5 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick zur weiteren Entwicklung und Anwendung der vorgestellten Methode.

2. Entwicklung und Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird zunächst das Wirkprinzip von Stirlingmotoren eingeführt. Anschließend wird auf verschiedene Bauformen eingegangen und es werden die verschiedenen Mechanismen erläutert, durch die Verluste auftreten. Außerdem werden einige marktreife bzw. fertig entwickelte Stirlingmotoren vorgestellt.

2.1. Beschreibung des Wirkprinzips von Stirlingmotoren

Die theoretische Betrachtung bzw. Berechnung von Stirlingmotoren basiert auf dem Stirling-Prozess, der von ROBERT STIRLING um das Jahr 1816 entwickelt wurde [WK11, S. 7]. Im Stirlingmotor wird ein Arbeitsgas in einem geschlossenen Prozess verwendet, durch Zu- und Abfuhr von Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus kann diese in mechanische Energie gewandelt werden. Wird der Prozess in einem Diagramm mit Temperatur über Entropie (T-S-Diagramm) oder mit Druck über Volumen (p-V-Diagramm) dargestellt, läuft er rechts herum bzw. in mathematisch negativer Drehrichtung (Diagramme siehe Abbildung 2). Es ist auch möglich, die Drehrichtung des Prozesses (physisch wie auch in den Diagrammen) umzukehren, sodass eingebrachte mechanische Energie in Wärme gewandelt wird. So ist es möglich, den Stirlingmotor als Wärmepumpe oder Kältemaschine zu betreiben.

Der ideale Stirlingprozess durchläuft die folgenden Zustandsänderungen (dargestellt in Abbildung 1):

- **isotherme Kompression (1 nach 2)**

Das Arbeitsgas im Kompressionsraum [a] wird durch einen Kolben, also durch von außen zugeführte mechanische Energie, komprimiert. Die benötigte Arbeit stammt aus einem Schwungrad, das mit der durch Expansion verfügbar gemachten Arbeit (3 nach 4)

angetrieben wird. Damit die Temperatur konstant bleibt, muss Wärme abgeführt werden. Dies erfolgt durch den Kühler im Kompressionsraum.

- **isochore Wärmezufuhr** (2 nach 3)

Das Arbeitsgas wird verschoben, während das Volumen konstant bleibt. Es fließt dabei durch den Regenerator [b], der gespeicherte Wärme aus dem letzten Zyklus an das Arbeitsgas abgibt. Dadurch erhöhen sich Druck und Temperatur desselben. Der Regenerator besteht aus einem durchlässigen Material wie z.B. Stahlwolle.

- **isotherme Expansion** (3 nach 4)

Das Arbeitsgas ist nun im Expansionsraum [c], wo es sich durch Wärmezufuhr von außen ausdehnt. Durch die gleichzeitige Wärmezufuhr und Ausdehnung bleibt die Temperatur konstant. Durch die Ausdehnung wird ein Kolben bewegt und mechanisch nutzbare Arbeit verrichtet.

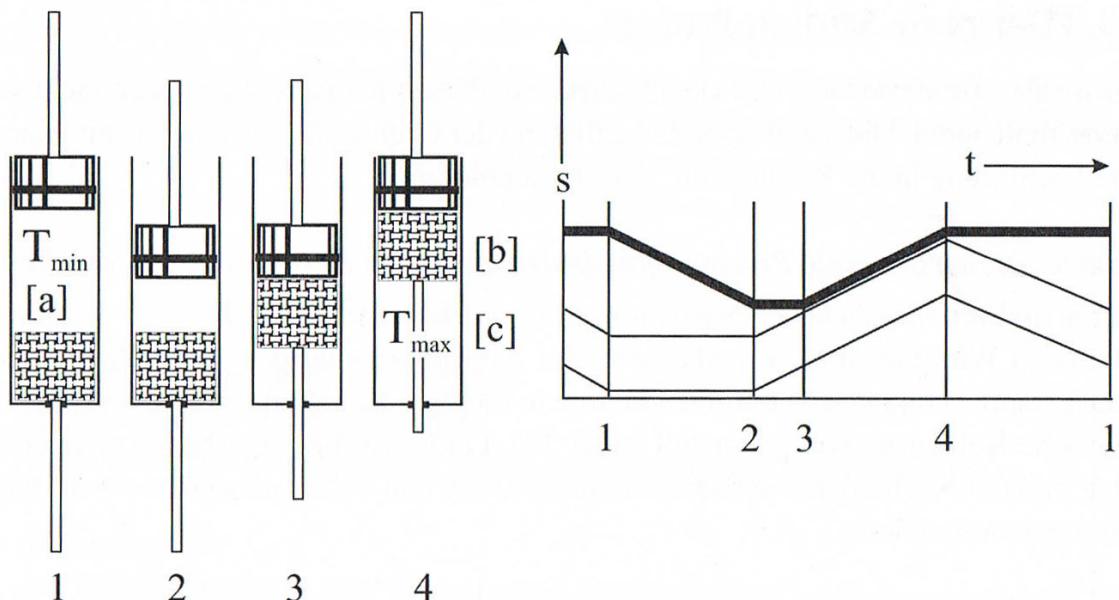


Abbildung 1: Der Stirling-Prozess dargestellt. Links die Kolbenstellungen, rechts das zugehörige Weg-Zeit-Diagramm.

[a] Kompressionsraum, [b] Regenerator, [c] Expansionsraum
[WK11, S. 31]

- **isochore Wärmeabfuhr** (4 nach 1)

Das Arbeitsgas, welches sich auf dem hohen Temperaturniveau befindet, wird nun wieder in den Kompressionsraum verschoben und fließt dabei durch den Regenerator. Es gibt Wärme an diesen ab. Das Volumen bleibt konstant, Temperatur und Druck werden kleiner. Von welchem Kolben das Arbeitsgas verschoben wird, hängt von der Bauform ab. [WK11, S. 31]

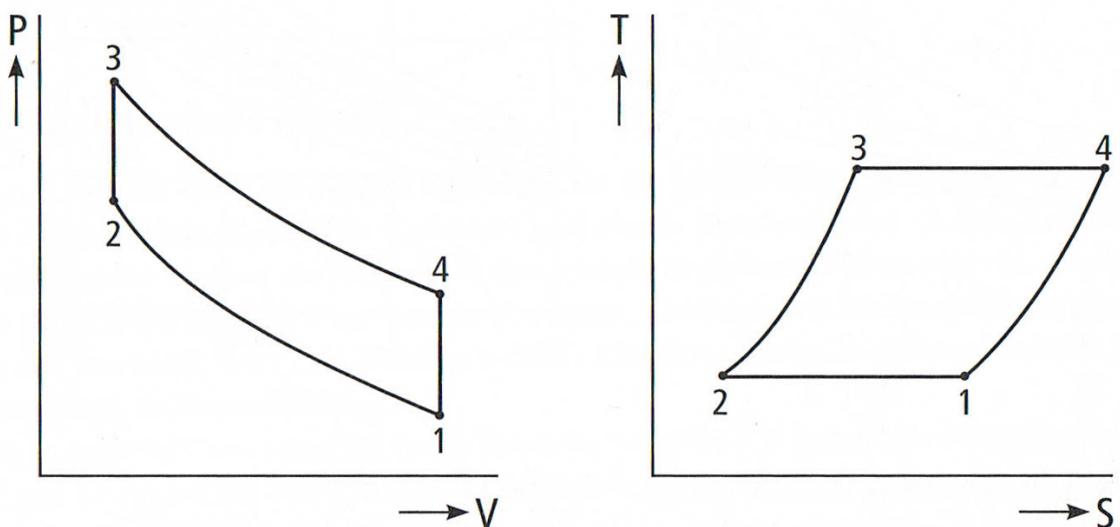


Abbildung 2: p-V- und T-S-Diagramm des Stirling-Prozesses [WK11, S. 30]

Der thermische Wirkungsgrad η_{th} des Stirlingprozesses lässt sich errechnen mit

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (1)$$

wobei T_1 die untere und T_3 die obere Prozesstemperatur darstellt. Der thermische Wirkungsgrad des Stirling-Prozesses nimmt bei gleichen Temperaturen die gleichen Werte an wie der des Carnot-Prozesses [WK11, S. 30]. Die Differenz der Temperaturen ist ausschlaggebend für den maximal erreichbaren Wirkungsgrad und ist damit ein wichtiger Auslegungsparameter. Stirlingmotoren lassen sich nach der oberen

Prozesstemperatur einteilen. Der Niedrigtemperatur-Bereich liegt bei oberen Prozesstemperaturen bis ca. 120 °C, der Mitteltemperatur-Bereich bei Temperaturen zwischen ca. 120 °C bis ca. 300 °C, der Hochtemperaturbereich liegt bei ca. 300 °C aufwärts. [WK11, S. 82]

Stirlingmotoren lassen sich anhand der Anordnung der Kolben in die α -, β - und γ -Bauformen einteilen, die im Folgenden vorgestellt werden.

2.1.1. α -Motoren

α -Stirlingmotoren besitzen zwei Kolben: den Expansionskolben, der den Expansionsraum von der Umgebung abgrenzt, und den Kompressionskolben, der den Kompressionsraum von der Umgebung abgrenzt. Beide sind jeweils in eigenen Zylindern untergebracht (siehe Abbildung 3). Am Expansionskolben wird durch das expandierende Arbeitsgas mechanische Arbeit umgesetzt (Prozessschritt 3 nach 4), er verschiebt auch das Arbeitsgas durch den Regenerator aus dem Expansions- in den Kompressionsraum (4 nach 1). Hier verdichtet der Kompressionskolben das Arbeitsgas (1 nach 2) und verschiebt es durch den Regenerator wieder in den Expansionsraum (2 nach 3). Im Gegensatz zur β - und γ -Bauform wird die Verschiebung des Arbeitsgases nicht über einen Verdrängerkolben (der von beiden Seiten vom Arbeitsgas umschlossen ist) realisiert.

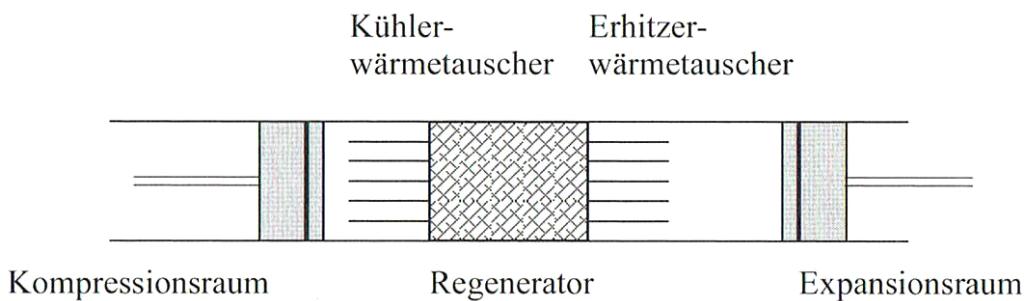


Abbildung 3: Beispielhafte Anordnung der α -Bauform [Sch08, S. 32]

Beide Kolben müssen nach außen abgedichtet werden. Insbesondere im heißen Expansionsraum ist dies eine große Herausforderung aufgrund der hohen Temperaturen verbunden mit den hohen Drücken die in der Maschine herrschen können. Dies kann man bei den anderen Bauformen konstruktiv vermeiden. Insgesamt ergibt sich, verglichen mit den anderen Bauformen, ein größerer Aufwand für die Abdichtung. [WK11, S. 39 f.]

2.1.2. β -Motoren

β -Stirlingmotoren verfügen über einen Arbeits- und einen Verdrängerkolben (siehe Abbildung 4). Der Verdrängerkolben verschiebt das Arbeitsgas vom Kompressions- in den Expansionsraum (2 nach 3) und zurück (4 nach 1), dabei fließt es durch den Regenerator. Dieser kann wie in Abbildung 4 neben dem Verdrängerkolben angebracht sein, er kann aber auch in den Verdrängerkolben selbst eingebaut sein, das Arbeitsgas fließt dann also durch den Kolben hindurch. Der Verdrängerkolben kann auch gänzlich aus dem Regeneratormaterial bestehen (sog. „Regenerativer Verdränger“).

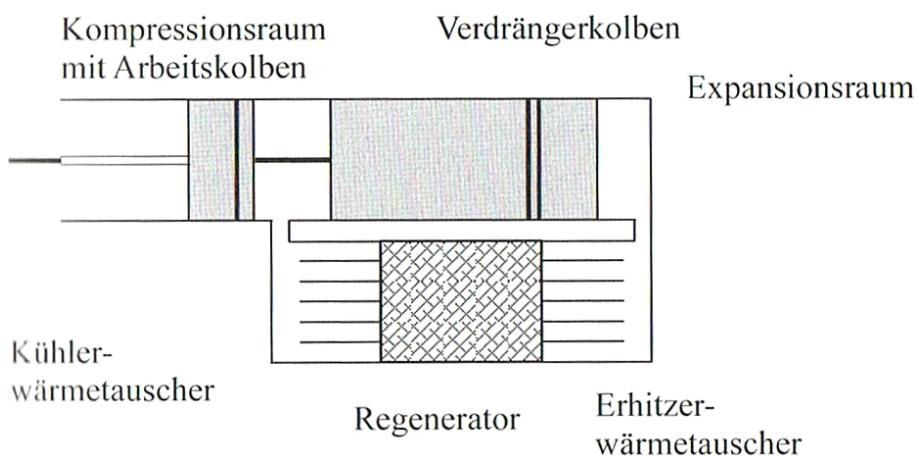


Abbildung 4: Beispielhafte Anordnung der β -Bauform [Sch08, S. 33]

Der Arbeitskolben setzt bei der Expansion des Arbeitsgases mechanische Arbeit um (3 nach 4) und hat zudem die Aufgabe das Arbeitsgas

zu komprimieren (1 nach 2). Beide Kolben laufen koaxial im selben Zylinder. Dadurch ist es möglich, dass das von den Kolben überstrichene Volumen sich überlappt. So sind größere Verdichtungsverhältnisse möglich, was sich positiv auf den Wirkungsgrad auswirkt. Die Abdichtung zur Umgebung erfolgt am Arbeitskolben im Kompressionsraum, hier herrschen geringere Temperaturen als im Expansionsraum. Das entlastet die Dichtung im Vergleich zum α -Stirling. Die Steuerung der Kolben erfordert jedoch einen größeren Aufwand. Möglich sind zwei gegenüberliegende, miteinander verbundene Kurbeltriebe oder ein Rhombengetriebe. [Sch08, S. 33]

2.1.3. γ -Motoren

Der γ -Stirlingmotor verfügt wie der β -Stirlingmotor über einen Arbeits- und einen Verdrängerkolben. Diese sind in eigenen Zylindern untergebracht, es ist also nicht möglich dass der Raum des Verdrängerkolbens vom Arbeitskolben mitbenutzt wird (siehe Abbildung 5). Dies kann sinnvoll sein, wenn das vom Verdrängerkolben überstrichene Volumen viel größer ist als das vom Arbeitskolben überstrichene Volumen und daher Durchmesser bzw. Fläche der Kolben unterschiedlich ist.

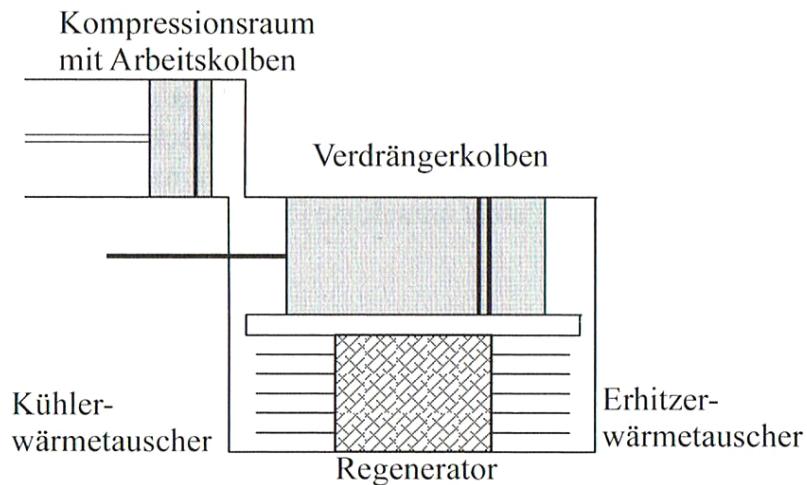


Abbildung 5: Beispielhafte Anordnung der γ -Bauform [Sch08, S. 32]

Wie bei der β -Bauform gibt es für Verdränger und Regenerator zwei verschiedene Bauarten: Entweder sind beide als einzelne Bauteile ausgeführt, oder beide Bauteile sind als „Regenerativer Verdränger“ kombiniert, d.h. der Regenerator ist im Verdränger integriert und verschiebt das Arbeitsgas zwischen Expansions- und Kompressionsraum. Auch bei dieser Bauform ist es möglich, die Dichtungen nur im kalten Bereich der Maschine laufen zu lassen, was diese weniger beansprucht und günstig für die Haltbarkeit ist. Jedoch ist der Totraum im Allgemeinen größer, was zu einer Verminderung des Wirkungsgrades führt. [WK11, S. 41 f.]

Allen Bauformen ist die Verwendung eines Schwungrades gemein, um die während der Expansion verrichtete Arbeit zu speichern und einen Teil davon während der Kompression wieder aufwenden zu können.

2.1.4. Verlustmechanismen

Da sich der ideale Stirlingprozess im Einsatz unter realen Bedingungen nicht realisieren lässt, sollen hier die Mechanismen aufgeführt werden, durch die der reale Prozess vom idealen abweicht. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf Werdich und Kübler [WK11, S. 32 ff.] sowie Steimle, Lamprichs und Beck [SLB07, S. 7 ff.].

- **Regeneratorwirkungsgrad**

Im idealen Prozess wird davon ausgegangen, dass die Wärmeübertragung zwischen Arbeitsgas und Regeneratormaterial ideal ist und damit auch die Temperaturen von Regeneratormaterial und Arbeitsgas gleich sind. Dies tritt jedoch so nicht ein. Das Arbeitsgas strömt etwas zu kalt in den Expansionsraum und etwas zu warm in den Kompressionsraum. Es kann weniger Wärme im Regenerator gespeichert werden als angenommen. Daher muss mehr Wärme im Expansionsraum zugeführt und im Expansionsraum abgeführt werden.

- **Kontinuierliche Kolbensteuerung**

Wie auf Abbildung 6 zu sehen ist, müssten die Kolben im idealen Fall der diskontinuierlichen Kolbenbewegung plötzlich aus der Bewegung zum Stillstand kommen bzw. plötzlich eine bestimmte Geschwindigkeit annehmen. Theoretisch würden dabei unendlich hohe Beschleunigungen und damit Trägheitskräfte auftreten. Aus Gründen der einfachen Realisierbarkeit werden die Kolben deshalb meist sinusförmig bewegt (siehe Abbildung 6). Es gibt auch andere Möglichkeiten der Kolbensteuerung, die sich der theoretisch optimalen Bewegung stärker annähern (z.B. von Kolin, siehe Unterabschnitt 2.4). Dadurch läuft der Prozess effizienter, was anschaulich im p-V-Diagramm sichtbar ist: Die Ecken des Prozesses werden besser ausgefahren, was die Fläche und damit die Nutzarbeit des Prozesses vergrößert (siehe Abbildung 7).

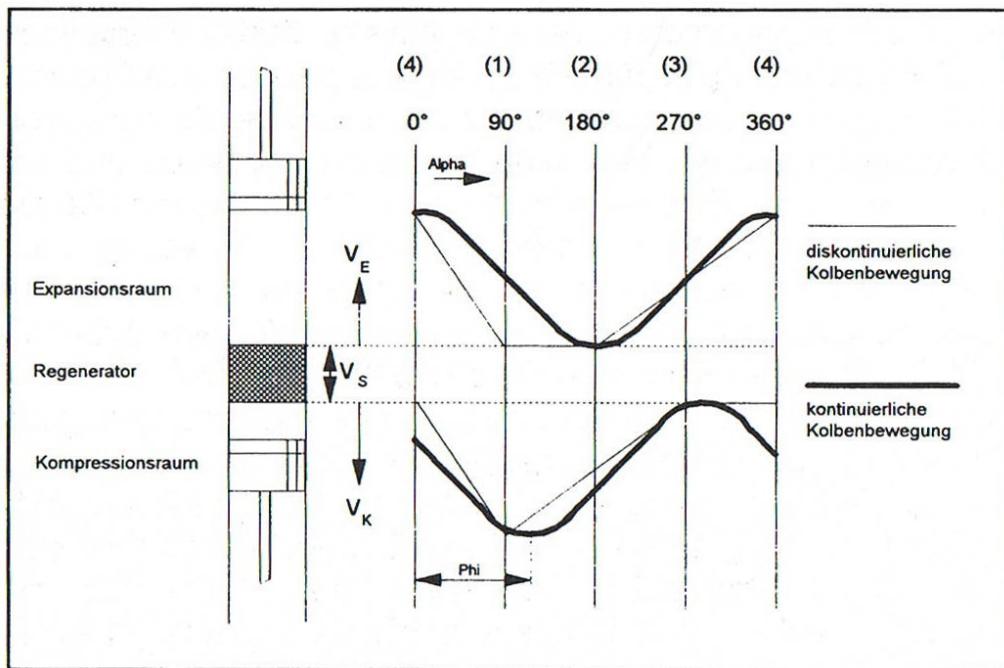


Abbildung 6: Kontinuierliche (reale) und diskontinuierliche (ideale) Kolbenbewegung am Beispiel eines α -Stirlingmotors [SLB07, S. 8]

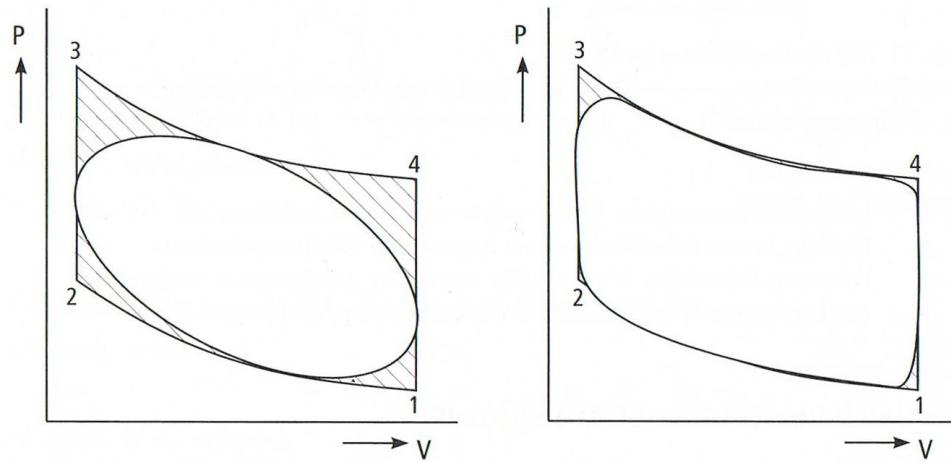


Abbildung 7: p-V-Diagramm mit kontinuierlicher Kolbenbewegung (links sinusförmig, rechts dem Optimum stärker angenähert) [WK11, S. 32]

• Toträume

Theoretisch wird das gesamte Arbeitsgas zwischen Expansions- und Kompressionsraum verschoben, es verbleibt kein Rest in den Räumen. In der realen Konstruktion ist das jedoch nicht möglich, da z.B. Rohre zur Verbindung der Räume benötigt werden oder die Kolben im Totpunkt den Zylinder nicht vollständig

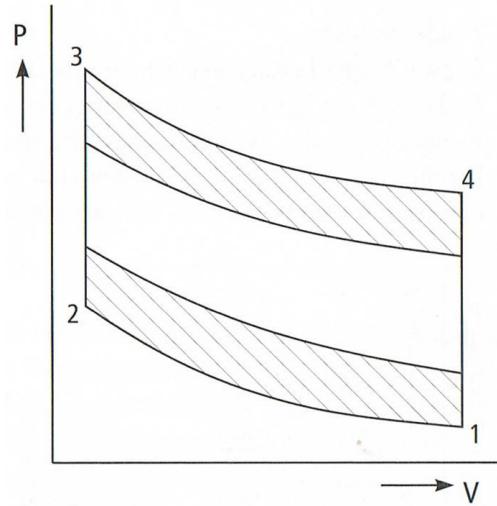


Abbildung 8: Auswirkungen des Totraums, dargestellt im p-V-Diagramm [WK11, S. 33]

ausfüllen können. Außerdem wird das Volumen des Regenerators im Idealprozess nicht berücksichtigt und zählt daher auch als Totraum. Durch die Toträume verringert sich die Differenz zwischen Minimal- und Maximaldruck. Die geringere Nutzarbeit ist im p-V-Diagramm sichtbar (siehe Abbildung 8).

- **Wärmeverluste**

Wärme kann durch verschiedene Mechanismen für den Prozess verloren gehen. Vor allem im Expansionsraum, in dem höhere Temperaturen herrschen, wärmt sich das Gehäuse auf und leitet so Wärme in die Umgebung. Außerdem wird Wärme entlang der Gehäusewand zum kälteren Kompressionsraum geleitet und verringert so die Temperaturdifferenz. Wird ein Verdränger verwendet, wird Wärme entlang des Verdrängers vom Expansions- in den Kompressionsraum geleitet. Läuft der Prozess bei niedrigeren Temperaturen, verringern sich auch die Wärmeverluste. Durch die Wahl von Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit können die Verluste ebenfalls verminder werden.

- **Wärmeübertragung in der isothermen Zustandsänderung**

Bei hohen Drehzahlen wird der Prozess mehrmals pro Sekunde durchlaufen. So wird die Zeit, in der die Wärme während den isothermen Zustandsänderungen zu- bzw. abgeführt werden muss, extrem klein. Dadurch verschlechtert sich die Wärmeübertragung. Der Effekt tritt bei geringen Drehzahlen kaum auf.

- **Verlust von Arbeitsgas und Druck**

An der Dichtung der Kolben zur Umgebung tritt Arbeitsgas aus. Dadurch reduziert sich der Arbeitsdruck in der Maschine und Arbeitsgas muss wieder eingebracht werden. Bei geringeren Drücken verringern sich auch diese Verluste. Eine Möglichkeit diese Verluste stark zu verringern stellen Freikolbenmotoren dar, die mit einem vollständig geschlossenen Gehäuse arbeiten können (siehe Unterabschnitt 2.3).

- **Strömungsverluste und Reibung**

Strömungsverluste treten im Regenerator auf, der für eine gute Wärmeübertragung eine große Oberfläche benötigt. Auch durch die innere Reibung des Arbeitsgases dissipiert Energie. Zudem verringert sich die nutzbare Energie durch mechanische Reibung in Lagern, Dichtungsflächen etc.

Durch die genannten Verluste verändert sich der Prozess erheblich, wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Bei der Verwendung der Sonneneinstrahlung als Energiequelle kommen weitere Verluste beim Aufnehmen der Strahlung dazu, auf die weiter unten eingegangen wird.

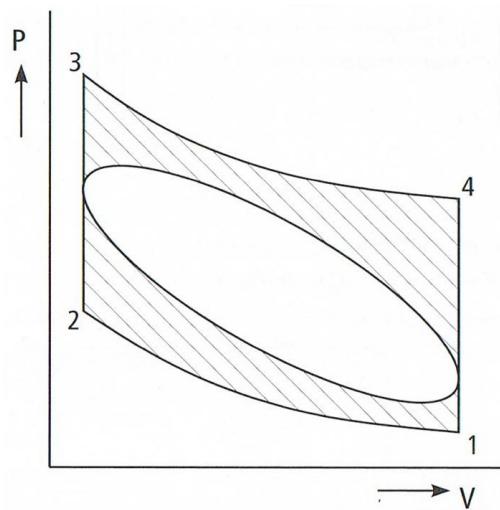


Abbildung 9: Der reale und der ideale Stirlingprozess, dargestellt im p-V-Diagramm [WK11, S. 35]

2.2. Doppeltwirkende Motoren

Als doppeltwirkende Stirlingmotoren bezeichnet man Maschinen, bei denen alle Kolben von Arbeitsgas umschlossen sind. Es wird vom Arbeitsgas also Druck auf beide Seiten der Arbeitskolben ausgeübt. Doppeltwirkende Motoren können als eine Kombination mehrerer α -Motoren betrachtet werden. Diese werden von den Arbeitskolben voneinander abgeteilt. Die eine Seite des Arbeitskolbens wirkt im einen

α -Motor als Kompressionskolben, die andere Seite des gleichen Kolbens wirkt im anderen Motor als Expansionskolben. Mit dieser Bauform können sehr hohe Leistungen erreicht werden [WK11, S. 42 f.]. Abbildung 10 zeigt schematisch den doppeltwirkenden Siemens-Motor mit vier Zylindern.

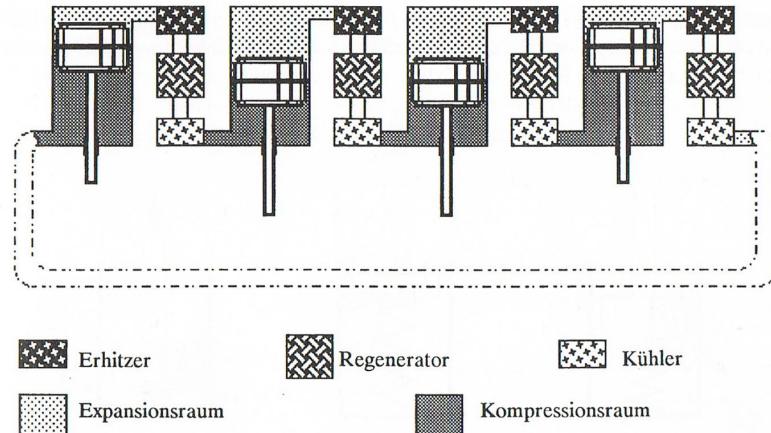


Abbildung 10: Schema des doppeltwirkenden Siemens-Stirlingmotors mit vier Zylindern [WK11, S. 43]

2.3. Freikolben-Motoren

Bei Freikolben-Motoren wird die Mechanik zur Steuerung der Kolben durch ein Masse-Feder-Dämpfungs-System ersetzt. Durch Temperaturunterschiede und dadurch resultierenden Druck im Arbeitsmedium werden die Kolben in Schwingung versetzt. Durch eine Abstimmung der Federkonstante, der Dämpfung und der Prozessparameter wie Temperaturen, Druck, Phasenverschiebung und Volumina ist es möglich, den Stirlingprozess ohne Steuerung von außen ablaufen zu lassen. Der Vorteil besteht darin, dass aufgrund der fehlenden Mechanik keine Teile aus dem Gehäuse geführt werden müssen. Dieses kann deshalb gänzlich geschlossen ausgeführt werden, wodurch Probleme bei der Abdichtung der Kolben zur Umgebung umgangen werden. Die durch die Kolben verrichtete Arbeit wird meist durch einen Lineargenerator¹

¹Generator, der aus einer translatorischen Bewegung elektrische Energie verfügbar machen kann.

aus dem System abgeführt, sie kann auch hydraulisch-mechanisch über eine Membran abgeführt werden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass auf die Kolben aufgrund der fehlenden Steuerungsmechanik (z.B. Kurbeltriebe) keine nennenswerten seitlichen Kräfte wirken. Als Feder wird oft ein Gas verwendet, als Dämpfung reicht meist die Reibung zwischen Kolben und Zylinderwand aus [WK11, S. 43 f.]. Ein Beispiel für einen marktreifen Freikolben-Stirlingmotor ist der Microgen-Stirling, der in Unterabschnitt 2.5 kurz vorgestellt wird.

2.4. Flachplatten-Stirlingmotoren

Stirlingmotoren können mit sehr kleinen Temperaturdifferenzen laufen. Dies unterstreicht ein von DR. SENFT von der Universität Wisconsin entwickelter Motor, der bereits ab 0,5 K Temperaturdifferenz funktioniert [Sch08, S. 117]. Allerdings sinkt mit der Temperaturdifferenz auch der Wirkungsgrad. Flachplatten-Stirlingmotoren sind darauf optimiert, Wärme auf geringen Temperaturniveaus nutzbar zu machen und sind deshalb als Niedertemperatur-Maschinen einzurordnen. Um das zu erreichen, sind Verdränger und die Arbeitsvolumina möglichst flach ausgeführt, um die Fläche zur Wärmeübertragung zu vergrößern [WK11, S. 52 f.]. Sie eignen sich für Anwendungen, in denen die Priorität nicht auf dem Erreichen eines hohen Wirkungsgrades liegt, sondern darauf, die Energie überhaupt verfügbar zu machen.

Um 1985 wurde von PROF. IVO KOLIN von der Universität Zagreb ein Flachplatten-Stirlingmotor entwickelt, der ab einer Temperaturdifferenz von 16 K arbeiten kann [WK11, S. 52 f.]. Über zwei Anschläge ist es möglich, den Verdränger diskontinuierlich zu steuern sowie eine Totzeit bei der Verdrängersteuerung zu realisieren (siehe Abbildung 11). So ist eine Annäherung an den Idealprozess und damit eine bessere Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Wärme möglich [WK11, S. 61].

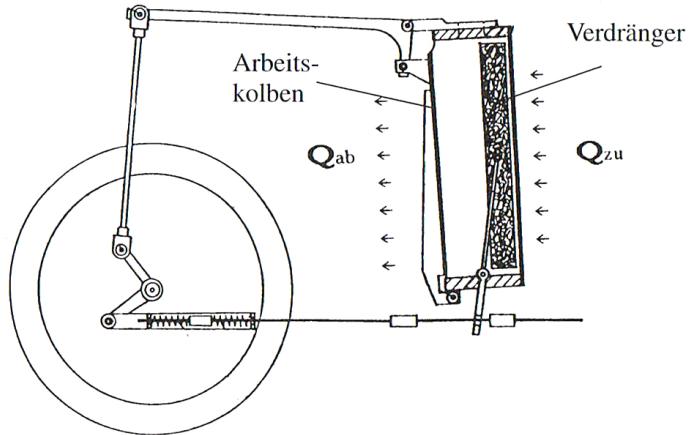


Abbildung 11: Flachplatten-Motor von Kolin mit diskontinuierlicher Verdrängersteuerung [WK11, S. 61]

Ein weiterer Stirlingmotor, der Niedertemperaturwärme nutzt und über flach ausgeführte Arbeitsräume verfügt, ist der Sunwell 50 der Sunmachine GmbH (siehe Abbildung 13). Er nutzt unkonzentrierte Sonneneinstrahlung als Wärmequelle und erreicht so Leistungen von etwa 50 W pro m² Einstrahlfläche. Durch den einfachen Aufbau und die Nutzung von Sonnenenergie ist der Sunwell 50 für den Einsatz in strukturschwache Regionen geeignet [SLB07, S. 68]. Die Sunmachine GmbH musste zwischenzeitlich Insolvenz anmelden. Während eine BHKW²-Stirling-Entwicklung der Sunmachine GmbH am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik untersucht und weiterentwickelt wurde [Mei13, S. 3], waren keine Informationen über Nachbauten oder industrielle Weiterentwicklungen des Sunwell 50 auffindbar.

2.5. Marktreife und ausgereifte Stirlingmotoren

Die Flexibilität des Stirling-Motors bezüglich der Wahl der Energiequelle führt dazu, dass es marktreife Stirlingmotoren in verschiedenen Anwendungsgebieten gibt.

²Blockheizkraftwerk

Eines dieser Anwendungsgebiete sind BHKWs, die für die Anwendung in Ein- bis Zweifamilienhäusern ausgelegt sind. Dabei erzeugt der Stirlingmotor elektrische Energie aus einem Brennstoff, die Abwärme wird gespeichert und kann lokal genutzt werden. Es sind mehrere BHKWs in Deutschland auf dem Markt. Als Beispiel soll der Vitotwin 300-W der Firma Viessmann genannt werden. Er stellt max. 1 kW elektrische und max. 5,3 kW thermische Leistung zur Verfügung. Die Wärme wird aus der Verbrennung von Gas oder Flüssiggas gewonnen, als Arbeitsgas wird Helium verwendet. Der Stirling-Motor ist als Freikolbenmotor mit einem Lineargenerator ausgeführt [Vie14]. Weitere Systeme auf dem Markt mit vergleichbaren Leistungsdaten sind die eVita der Remeha GmbH [Rem13] und der Dachs Stirling SE der SenerTec Kraft-Wärme Energiesysteme GmbH [Sen12].

In diesem Zusammenhang erwähnenswert ist die Pellematic Smart_e der ÖkoFEN Forschungs- und Entwicklungs Ges.mbH. Dieses BHKW liefert 0,6 kW elektrische und bis zu 13 kW thermische Leistung. Als Energiequelle wird auf Holzpellets zurückgegriffen. Es wird ein Freikolben-Stirlingmotor mit Lineargenerator der Microgen Engine Corporation verwendet [Öko]. Im Bearbeitungszeitraum dieser Arbeit wurde die Pellematic Smart_e in Österreich auf den Markt gebracht, die Einführung in Deutschland ist geplant.

Die Firma Cleanergy AB aus Schweden hat mehrere Stirling-Konzepte auf den Markt gebracht. Die Stirling-Maschinen basieren auf dem V 161 (α -Bauform) der SOLO Stirling GmbH, die 2007 Insolvenz anmelden musste, woraufhin Cleanergy die Rechte an den Plänen erwarb. Angeboten werden BHKW-Systeme, die auf Verbrennung von Gasen aus Biogasanlagen, Abfalldeponien und Wasseraufbereitungsanlagen ausgelegt sind. Dabei können max. 9 kW elektrische und max. 26 kW thermische Leistung bereitgestellt werden [Clea] [Cleb]. Basierend auf dem gleichen Motor wird zudem ein System zur Wandlung konzentrierter Sonneneinstrahlung in elektrische Energie angeboten. Es werden bis zu 11 kW elektrische Leistung bereitgestellt, die Sonnenstrahlung

wird durch einen Parabolspiegel konzentriert [Clec].

Die bestehenden solarbetriebenen Niedrigtemperatur-Stirlingmotoren beschränken sich auf Versuchsmotoren, Modelle für Bastler sowie Modelle, die aufgrund von Firmeninsolvenz oder ähnlichen Problemen nicht mehr produziert werden. Die bereits in Unterabschnitt 2.4 erwähnte Sunwell 50 wurde aufgrund der Insolvenz der Sunmachine GmbH nicht weiterentwickelt.

DIETER VIEBACH hat den Flachplatten-Stirlingmotor Vieb-4 entwickelt, der mit unkonzentrierter Sonnenstrahlung arbeitet (siehe Abbildung 12). Der Motor wird hauptsächlich aus Normteilen gebaut, die Bauanleitung und Pläne sind verfügbar [Vie13, S. 114 f.] [Vie]. Er ist eher als Demonstrationsobjekt für den Selbstbau ausgelegt, eine Angabe zur Nutzleistung war nicht auffindbar. Anhand der Einstrahlfläche und der Arbeitsvolumina scheint diese aber nicht groß genug zu sein um mehrere elektronische Geräte wie z.B. Notebooks zu betreiben.



Abbildung 12: Flachplatten-Stirlingmotor Vieb-4 für den Eigenbau von DIETER VIEBACH [Vie]

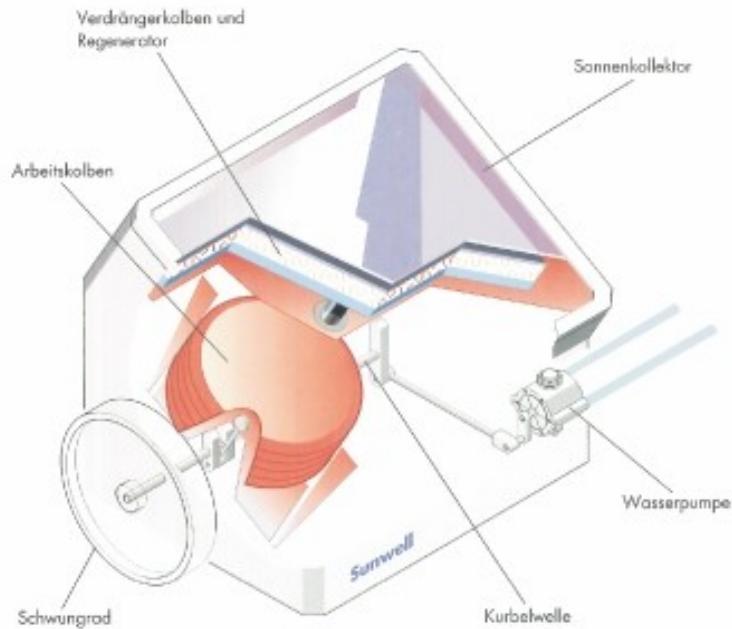


Abbildung 13: Aufbau des Sunwell 50 von Sunmachine [Suna]

Zu erwähnen ist zudem der Sunpulse Electric der Sunvention International GmbH. Dieser Stirlingmotor wird mit durch Sonnenkollektoren aufgefangene Wärme oder mit in Pflanzenöl gespeicherter Wärme betrieben und erreicht so laut Herstellerangabe eine elektrische Nutzleistung von bis zu 1 kW [Sunb]. Der Motor ist in dem Ökodorf „Tamera“ in Portugal in Betrieb, Informationen über Serienfertigung oder Vertrieb waren nicht auffindbar.

3. Methoden

In diesem Abschnitt wird die Versorgungsaufgabe, die erfüllt werden soll, vorgestellt und eine Bauform zur Umsetzung dessen ausgewählt. Anschließend wird auf das Berechnungsschema des Auslegungswerkzeuges eingegangen.

3.1. Definition der Versorgungsaufgabe

Um das Auslegungswerkzeug zu validieren wird eine beispielhafte Auslegung durchgeführt. Als exemplarischer Ort in einer strukturschwachen Region wird Juba, die Hauptstadt des Südsudan, gewählt. Eine verlässliche Versorgung mit elektrischer Energie über ein Verbundnetz ist dort nicht immer gegeben. In der Umgebung von Juba ist kein Verbundnetz vorhanden [Kov15]. Als Anwendungsbeispiel soll daher das Verfügbarmachen elektrischer Leistung gewählt werden, mit dem Ziel, Computer zu betreiben und Zugriff auf das Internet zu ermöglichen.

Zunächst wird die benötigte elektrische Leistung ermittelt. Es müssen Notebooks, ein Router/Modem sowie ggf. Monitore betrieben werden. Da die Leistung für diese Geräte je nach Modell variiert, werden zwei beispielhafte Konfigurationen vorgestellt (siehe Tabelle 1). Für den Internetzugriff wird der sog. BRCK gewählt, dieses Gerät kann auf das 3G-Mobilfunknetz zugreifen und die Datenverbindung per WLAN zur Verfügung stellen. Im Südsudan ist die Mobilfunkabdeckung nach 3G-Standard auch in ländlichen Regionen meist gut [Kov15]. Der BRCK ist für Bedingungen in Sub-Sahara-Afrika ausgelegt und kann mit Gleich- und Wechselstrom mit verschiedenen Spannungen arbeiten. Außerdem verfügt er über einen Akkumulator mit 8 Stunden Laufzeit [BRC].

Die Leistung muss in elektrischer Form bereitgestellt werden. Eine Gleich- bzw. Wechselrichtung sowie Transformation ist ggf. noch durchzuführen. Es wird mit einer bereitzustellenden Leistung von 100 W

<i>Gerät</i>	<i>Leistung in W</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Gesamtleistung in W</i>
Asus Eee PC 1005HA-M (Netbook)	13,4	3	40,2
Benq FP91GX (Monitor)	40,0	1	40,0
BRCK (Router & Modem)	10,0	1	10,0
Σ			90,2

Lenovo Thinkpad T440s (Notebook)	27,4	3	82,2
BRCK (Router & Modem)	10,0	1	10,0
Σ			92,2

Tabelle 1: Beispielhafte Konfigurationen des Arbeitsplatzes, der betrieben werden soll. Leistungsdaten aus [Sol09] [Ben06, S. 32] [Win13] [Ung15].

gerechnet, was etwas über den angegebenen Beispiel-Konfigurationen liegt (siehe Tabelle 1). So ist Raum für die temporäre Benutzung weiterer Geräte und evtl. auftretende kurzzeitige größere Leistungsaufnahmen der betriebenen Geräte. Außerdem können ggf. weitere Verluste bei der Transformation bzw. Umrichtung der elektrischen Leistung auftreten.

Die in Juba herrschenden Umgebungsbedingungen werden im Folgenden aufgeführt. Die Auslegung soll für einen beliebigen Tag im Februar durchgeführt werden, es werden daher gemittelte Werte für diesen Monat verwendet. Die Auslegung wird mit Werten für den Mittag durchgeführt.

Globalstrahlung auf horizontale Fläche $G = 850 \text{ W/m}^2$

Umgebungstemperatur $T_{Umg} = 29,2^\circ\text{C}$

Umgebungsdruck $p_{Umg} = 0,925 \text{ bar}$

Die Daten sind angegeben nach NASA Langley Research Center, Atmospheric Science Data Center [NAS]. Im Südsudan ist der Sandgehalt der Luft zwar generell nicht sehr hoch, er steigt jedoch in der Nähe von nicht geteerten Straßen, was einen Großteil der Straßen betrifft [Kov15]. Es muss also ein erhöhter Sandgehalt in der Luft bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Im Südsudan gibt es Werkstätten für PKWs, Motorräder, Fahrräder und elektrische Gebrauchsgeräte. Dementsprechend können bei Teilen der Bevölkerung Fähigkeiten und Kenntnisse im mechanischen Bereich auf einer grundlegenden Ebene vorausgesetzt werden. Ebenso sind grundlegende Werkzeuge und Bauteile verfügbar, speziell in den genannten Bereichen PKWs, Motorräder, Fahrräder und elektrische Gebrauchsgeräte. Es sind einige Altteile verfügbar, die wiederverwertet werden können. Spezielle Werkzeuge und Bauteile sind jedoch sehr schwer erhältlich und teuer. Auch können Kenntnisse, die vergleichbar mit einem Abschluss in Maschinenbau in Deutschland sind, nicht vorausgesetzt werden [Kov15]. In Anbetracht dieser Bedingungen soll eine möglichst einfache und robuste Konstruktion gewählt werden, die in den Bereichen Bauteile, Werkzeuge, Kenntnisse und Fähigkeiten die Gegebenheiten berücksichtigt. Die Anforderungen in diesen Bereichen gering zu halten ist von höherer Priorität als einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen.

3.2. Auswahl der Bauform

3.2.1. Vorüberlegungen

Der auszulegende Stirlingmotor soll in strukturschwachen Regionen einsetzbar sein, der Fokus liegt darauf, dass er von möglichst vielen Menschen in diesen Regionen gebaut werden kann. Daher gilt es, die zum Bau benötigten Kenntnisse möglichst gering zu halten und möglichst wenige bis keine teuren oder aufwändig herzustellenden

Bauteile zu verwenden. Stattdessen soll auf leicht verfügbare Bauteile zurückgegriffen werden, die möglicherweise sogar aus anderen Maschinen wiederverwertet werden können. Außerdem sollen Werkzeuge und Bearbeitungsverfahren gewählt werden, die in strukturschwachen Regionen verfügbar sind.

Daher werden die Bauformen anhand der Kriterien „benötigte Fachkenntnisse“, „Verfügbarkeit der Bauteile“ und „Verfügbarkeit der Werkzeuge“ bewertet, wobei unter letzteres auch die Bearbeitungsverfahren fallen. Eine schlechte Verfügbarkeit kann durch einen hohen Preis gegeben sein, sie kann aber auch dadurch entstehen, dass das entsprechende Bauteil in der gegebenen Region nicht vertrieben wird. Eine hohe Verfügbarkeit kann sich durch niedrige Preise ergeben, aber auch dadurch, dass das Bauteil in einem anderen Zusammenhang in der Region sehr häufig verwendet wird, oder als Abfall in anderen Prozessen anfällt und recycelt werden kann.

Es ist zu beachten, dass Kenntnisse, Bauteile und Werkzeuge nur teilweise von der Bauform abhängen. Eine Bauform kann mit unterschiedlichem Aufwand umgesetzt werden. Deshalb beziehen sich die Bewertungen auf Umsetzungen der Bauformen, die möglichst einfach und robust sind aber noch effizient genug arbeiten. Der Motor soll einfach zu warten sein, um die Nutzungsdauer zu erhöhen. Im Bereich „Konstruktion“ umfasst dies wenn möglich die Vermeidung von Schmiermitteln und von stoffschlüssigen Verbindungen (z.B. geschraubt statt geschweißt). Durch einen Betrieb des Motors bei Umgebungsdruck ist es unnötig, nach Öffnen des Gehäuses auf Verdichter zurückzugreifen, um den Motor wieder auf Betriebsdruck zu bringen. In den Bereich „Verschleißteile“ fällt nicht nur die großzügige Dimensionierung von Bauelementen um den Austausch zu verzögern, sondern auch wenn möglich die konstruktive Vermeidung von Verschleißteilen.

Der Gesamtwirkungsgrad setzt sich aus verschiedenen Teilwirkungsgraden zusammen. Die „geometrische Ausnutzung der Sonneneinstrahlung“

bezieht sich auf die Art, auf die die Strahlungswärme aufgefangen und in den Stirlingmotor geleitet wird. Sie kann konzentriert werden um die Temperatur zu erhöhen und die Strahlung auf einer größeren Fläche aufzufangen. Außerdem kann das System der Sonne nachgeführt werden, um die Verluste durch nicht senkrechten Strahlungseinfall zu vermeiden. Ein weiterer Einflussfaktor auf den Gesamtwirkungsgrad ist der „ideale Prozesswirkungsgrad“ des Stirlingprozesses. Er steigt mit steigender Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Prozesstemperatur im Motor. Vor allem die obere Prozesstemperatur kann beeinflusst werden, hierfür ist der zu erwartende eingehende Wärmestrom relevant. Auch die untere Prozesstemperatur, also die Effizienz der Wärmeabfuhr des Motors, hat hier Einfluss. Das Kriterium „Verluste“ kann den Gesamtwirkungsgrad auf mehreren Wegen senken. Über Wärmeleitung durch Bauelemente kann Energie aus dem Prozess verloren gehen bzw. unbrauchbar werden. Durch Undichtigkeiten senkt sich die Druckdifferenz im Prozess und damit der Wirkungsgrad. Auch durch Reibung, z.B. an Dichtungen und in den Lagern, dissipiert Energie. Zudem wird durch Strömungsverluste, vor allem im Regenerator, der eine große Oberfläche benötigt, Energie unbrauchbar (Verlustmechanismen siehe Unterunterabschnitt 2.1.4).

Ein weiteres Kriterium ist das Teillastverhalten der Bauform. Das Teillastverhalten von Stirlingmotoren ist generell recht günstig, da der Prozess mit geringeren Temperaturen trotz Verringerung des Wirkungsgrades immer noch laufen kann. Da das Teillastverhalten für alle zur Auswahl stehenden Bauformen als gleich gut eingeschätzt wird, entfällt die Bewertung in dieser Kategorie.

Es muss angemerkt werden, dass ohne eine Auslegung und einen Konstruktionsentwurf zu jeder Bauform die Bewertung nicht rein objektiv erfolgen kann und zum Teil auf einer subjektiven Abschätzung beruht. Die Bewertungen beziehen sich auf einen Einsatz des Stirlingmotors mit Solarenergie als Energiequelle.

Bei der Mehrzahl der konstruktiven Umsetzungen von α -, β - und γ -Stirlingmotoren ist die Ausführung des Expansionskolbens bzw. des Wärmeübertragers zur Zuführung der Wärme in den Expansionskolben vergleichsweise klein, d.h. nicht ausgelegt auf die Aufnahme von unkonzentrierter Sonneneinstrahlung. Es wäre also ein System zur Konzentration der Sonneneinstrahlung und ggf. eine Nachführung dieses Systems oder des Motors erforderlich. Möglichkeiten dafür sind Parabol-Spiegel (z.B. Prototyp von McDonnell Douglas und United Stirling [KF91, S. 15]), Scheffler-Spiegel [Sol], Fresnel-Linsen oder Flachkollektoren, die die Wärme über ein Wärmemedium in den Expansionskolben leiten. Alle diese Möglichkeiten bedeuten einen entscheidenden Mehraufwand und senken die Bewertung in den Kategorien „benötigte Fachkenntnisse“, „Verfügbarkeit der Bauteile“ und „Verfügbarkeit der Werkzeuge“ für die α -, β - und γ -Bauform mit Solarkonzentrator. Zudem können bei den hohen Temperaturen, die durch konzentrierte Solarstrahlung entstehen, bei ungeschultem Personal Sicherheitsrisiken auftreten.

Bei α -, β - und γ -Stirlingmotoren mit Solarkonzentrator ergeben sich mit steigendem Wirkungsgrad steigende Temperaturen und Drücke im Arbeitsgas und im bzw. auf das Gehäuse. Dies wirkt sich erneut negativ auf „benötigte Fachkenntnisse“, „Verfügbarkeit der Bauteile“ und „Verfügbarkeit der Werkzeuge“ aus, da Guss- oder CNC³-Teile benötigt werden und die Kolben-Dichtungen durch höhere Temperaturen und Drücke stärker beansprucht werden, also technisch aufwändiger werden. Durch hohe Drücke, Temperaturen und Drehzahlen sind außerdem hohe Bearbeitungs-Genauigkeiten in den Laufflächen der Innenwände der Kolben nötig. Die Verwendung von Guss- oder CNC-Technik zur Herstellung der Gehäuse wirkt sich negativ auf „Werkzeuge“ und „Kenntnisse“ aus. Der Wirkungsgrad der Anlage steigt jedoch. Durch die höheren Temperaturen ist es zudem möglich, die gewünschte Leistung mit einem kleineren Arbeitsvolumen zu erreichen. Ob dieser Platzgewinn durch das System zur Konzentration der Solarstrahlung

³Computerized Numerical Control. CNC-Technik wird zur Herstellung von Teilen mittels rechnergestützter Bearbeitungsverfahren angewandt.

wieder zunichte gemacht werden würde, wäre im Einzelfall zu prüfen. Da die Bewertungen für α -, β - und γ -Stirlingmotoren mit Solarkonzentrator sich untereinander kaum unterscheiden, werden diese hier zusammengefasst.

Die Bauform von Flachplatten-Stirlingmotoren ist darauf ausgelegt, die Sonnenstrahlung direkt, also ohne Konzentrator, aufzunehmen. Dazu fällt die Sonnenstrahlung durch eine Glasscheibe in den Expansionsraum, der möglichst flach ausgeführt ist, um eine große Einstrahlungsfläche bei gegebenem Volumen zu gewährleisten. Bei dieser Bauform kann auf eine Nachführung verzichtet werden, allerdings sinkt dann die Ausbeute der Sonnenstrahlung. Da die Einstrahlungsfläche an die Abmaße des Expansionskolbens gekoppelt ist, kann sie nicht beliebig vergrößert werden (z.B. um auch geringe Sonneneinstrahlung nutzbar zu machen). Dadurch ist auch die maximal erreichbare obere Prozesstemperatur und damit der theoretische Wirkungsgrad begrenzt. Ob die gegebene Einstrahlung ausreicht um den Motor zu betreiben, muss im Einzelfall geprüft werden.

Bei Flachplatten-Stirlingmotoren stellen sich aufgrund der großen Hubvolumina und der niedrigen Temperaturdifferenzen vergleichsweise kleine Drehzahlen und Drücke ein [SZ05]. Dies entlastet die Lager und die Dichtungen und verbessert so die Bewertungen unter „Verschleißteile“. Auch können so Werkstoffe geringerer Festigkeit verwendet werden, was den Bau vereinfacht. Aufgrund der geringen Drehzahlen und des geringen Gesamtwirkungsgrades ist es nötig, das Schwungrad größer auszulegen. Die Auswirkungen einer Unwucht im Schwungrad oder anderen drehenden Teilen wird jedoch geringer, die Maschine ist also weniger anfällig für Ungenauigkeiten in der Bearbeitung. Für die Eignung zum Bau trotz geringerer Fachkenntnisse spricht die Verfügbarkeit von Anleitungen zum Selbstbau, z.B. für den Kolin-Flachplatten-Motor vom „Arbeitskreis Stirlingmotor“ oder für den Vieb-4 von Dieter Viebach [Vie].

Freikolbenmotoren sind in der Regel wartungsarm. Da auf die Kolben keine Querkräfte durch Pleuelstangen oder Ähnliches wirken, werden die Dichtungen entlastet und haben eine längere Haltbarkeit. So können sie ggf. preiswerter ausgelegt werden. Auch der Verschleiß der Zylinderwände nimmt ab. Die Dichtungen müssen die Arbeitsräume nicht zur Umgebung abdichten, sondern lediglich zu dem Raum in dem sich die Feder (meist als Gasfeder ausgeführt) befindet. Da die Kolbenkräfte nicht über Pleuelstangen oder Ähnliches nach außen übertragen werden, kann die Maschine nach außen komplett geschlossen ausgeführt werden, was die Abdichtung vereinfacht. Zudem kann die Maschine ohne Schmierstoffe auskommen, da Kurbeltriebe oder andere Mechanik zur Steuerung der Kolben entfallen. Dadurch müssen die Arbeitsräume nicht gegen Schmierstoffe abgedichtet werden. Zudem verringert sich die Anzahl der bewegten Teile und damit die Anfälligkeit für Defekte und Verschleiß [Sch08, S. 48].

Bei Freikolbenmotoren müssen die Federkonstanten der die Kolben bewegenden Federn sowie der Arbeitsprozess genau aufeinander abgestimmt sein, da sich durch ein Zusammenspiel dieser die Kolbenbewegung so einstellen muss, dass sie dem gewünschten Arbeitsprozess entspricht. Um dies zu erreichen, sind anspruchsvolle Berechnungen notwendig. Dies wirkt sich negativ in der Kategorie „benötigte Fachkenntnisse“ aus. [Sch08, S. 48 f.]

Doppeltwirkende Stirlingmotoren werden als zu aufwändig angesehen und daher von der Entscheidung ausgeschlossen.

3.2.2. Bewertungsmatrix

Die Bauformen werden in den oben vorgestellten Kategorien mit einer Punktzahl von 1 bis 5 bewertet, 5 Punkte stellen die günstigste Bewertung dar. Die Bewertungspunkte werden zunächst mit der Gewichtung des jeweiligen Kriteriums multipliziert (z.B. 3 Bewertungspunkte, 80% Gewichtung → $3 \cdot 0,8 = 2,4$ Punkte). Diese Punkte werden nun für

jede Bauform aufsummiert und der Rang aller Bauformen wird anhand der Gesamtpunkte ermittelt.

Bewertung der Kriterien, von 1 für ungünstig bis 5 für günstig				
Kriterien	Gewichtung in %	α -, β - oder γ -Bauform mit Solarkonzentator	γ -Flachplatten- Bauform ohne Konzentratoren	α -, β - oder γ -Freikolben-Bauform mit Solarkonzentator
Konstruktive Größen				
Bau				
- benötigte Fachkenntnisse	100	3	4	1
- Verfügbarkeit der Bauteile	100	2	4	1
- Verfügbarkeit der Werkzeuge	100	2	4	1
Wartung				
- Konstruktion	60	3	4	4
- Verschleißteile	60	3	3	4
Prozessgrößen (Thermodynamik, Verluste)				
Gesamt-Wirkungsgrad				
- geometrische Ausnutzung der Sonneneinstrahlung	60	5	3	5
- idealer Prozesswirkungsgrad	60	4	2	4
- Verluste (Wärme-, Druck-, Reibungs-, Strömungsverluste)	60	3	3	4
Σ		17,8	21	15,6
Rang		II	I	III

Tabelle 2: Bewertungsmatrix verschiedener Stirlingmotor-Bauformen

Da der Fokus auf der Realisierbarkeit des Stirlingmotor-Entwurfs liegt, erhalten die Kategorien unter „Bau“ die höchste Gewichtung. Da die Energiequelle Sonnenenergie nicht knapp und zudem kostenlos verfügbar ist, werden die Kategorien unter „Gesamt-Wirkungsgrad“ in der Gewichtung zurückgestellt. Ebenso wird die „Wartung“ schwächer gewichtet. Die Kriterien und die jeweiligen Bewertungen für drei Bauformen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die höchste Punktzahl mit 21 Punkten wurde für die γ -Flachplatten-Bauform ohne Konzentrator erzielt. Die Entwicklung des Auslegungswerkzeuges wird daher für diese Bauform durchgeführt und exemplarisch anhand der Versorgungsaufgabe getestet.

Übliche Arbeitsgase für Stirlingmotoren sind Luft, Helium, Stickstoff und Wasserstoff. Aufgrund der Verfügbarkeit und einfachen sowie gefahrlosen Handhabbarkeit wird für den auszulegenden Motor Luft verwendet. Stickstoff ist weder reaktiv noch korrosiv und daher für Mensch und Maschine nicht gefährlich, er muss jedoch im Gegensatz zu Luft beschafft werden und wird daher verworfen. Gleiches gilt für Helium, welches knapper und daher teurer als Stickstoff ist. Wasserstoff besitzt die höchste spezifische Wärmekapazität der genannten Gase, ermöglicht so eine hohe Leistungsdichte und wird daher für Hochleistungsmotoren eingesetzt. Es ist jedoch leicht brennbar und kommt deshalb aus Sicherheitsgründen für die Verhältnisse in strukturschwachen Regionen nicht in Frage. Außerdem kann es zu Materialversprödung führen. [WK11, S. 93 f.]

3.2.3. Gewählte Bauform

Für die Auslegung wurde die Flachplatten-Bauform gewählt. In Anlehnung an den Vieb-4 von VIEBACH und den Sunwell 50 der Sunmachine GmbH wurde das in Abbildung 14 dargestellte Schema abgeleitet, auf dessen Basis die Auslegung durchgeführt werden soll.

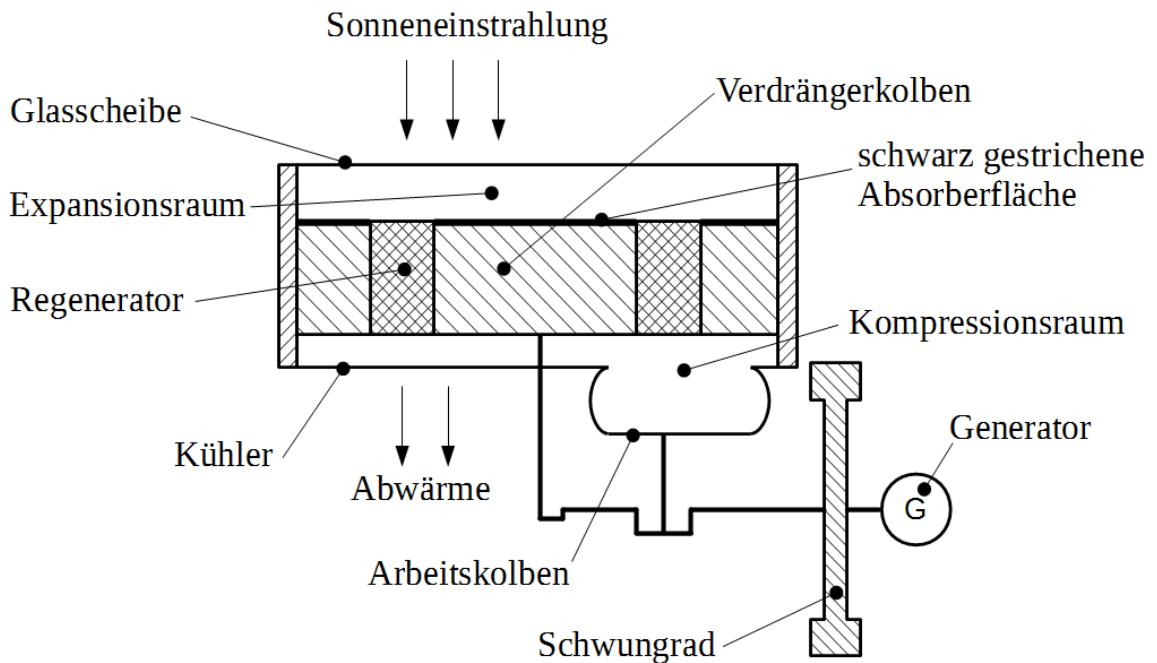


Abbildung 14: Schema des Flachplatten-Stirlingmotors, auf dessen Basis die Auslegung durchgeführt werden soll

Die Sonneneinstrahlung fällt durch eine Glasscheibe auf den Verdrängerkolben. Dieser ist quaderförmig aus einem möglichst leichten Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit ausgeführt. Die Oberfläche ist matt-schwarz gefärbt um die Absorption der Sonneneinstrahlung zu verbessern. Es sind mehrere Bohrungen eingebracht, die das Regeneratormaterial aufnehmen. Die Rückseite des Gehäuses, der Kühler, ist aus einem Material mit guter Wärmeleitfähigkeit gebaut. Der Arbeitskolben ist an der kalten Seite des Motors angebracht. Er ist am Kühler über einen Faltenbalg befestigt und wird, ebenso wie der Verdrängerkolben, über eine Welle mit einer Phasenverschiebung von 90° zum Arbeitskolben gesteuert. An der Welle ist außerdem ein Schwungrad zur Speicherung kinetischer Energie und ein Generator zur Wandlung der mechanischen Leistung in elektrische Nutzleistung angebracht. Auf weitere konstruktive Überlegungen wird in Unterabschnitt 4.6 eingegangen.

3.3. Berechnungsschema der Auslegung

Die Temperatur T_E ist die Temperatur des Arbeitsgases im heißen Zustand, also im Expansionsraum. Die Sonneneinstrahlung durchquert die Glasscheibe und trifft auf die schwarz gefärbte Oberseite des Verdrängers. Die Verdrängeroberfläche und dadurch das Arbeitsgas werden erwärmt. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem einfallenden Wärmestrom \dot{Q}_{zu} , der abgeführten mechanischen Leistung P_{ab} und dem am Kühler des Kompressionsraumes abgeführten Wärmestromes \dot{Q}_{ab} ein (siehe Abbildung 15).

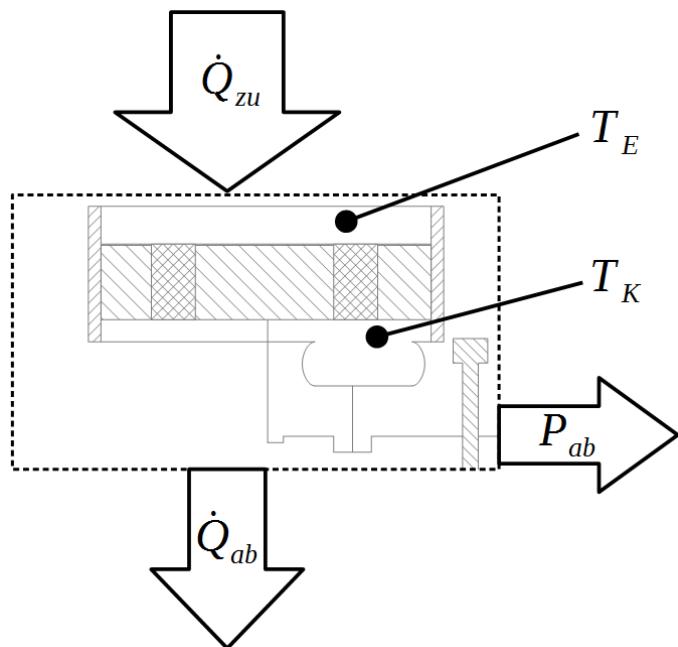


Abbildung 15: Übersicht der Wärmeströme und der Leistung sowie oberer und unterer Prozesstemperatur

Während der Motor in Bewegung ist und Energie umsetzt, durchläuft die Temperatur des Arbeitsgases immer wieder die obere Prozesstemperatur T_E und die untere Prozesstemperatur T_K . Die Höhe der Temperaturen, die sich dabei einstellen, hängt von folgenden Einflussgrößen ab:

- vom zugeführten Wärmestrom \dot{Q}_{zu}

- von der Größe des abgeföhrten Wärmestromes \dot{Q}_{ab} bzw. davon wie gut der Kühler arbeitet
- von der abgeförderten mechanischen Leistung P_{ab} und damit von der Drehzahl sowie dem idealen Prozesswirkungsgrad, der wiederum von oberer und unterer Prozesstemperatur abhängt
- von Wärme- und weiteren Verlusten

Die obere und die untere Prozesstemperatur ist also ein Ergebnis eines Gleichgewichtszustandes zwischen mehreren Einflussgrößen. Zudem verändern sich die Zustände zyklisch mit dem Durchlaufen der Prozessschritte. Da die genannten Einflussgrößen zum Teil ohne ein Versuchsobjekt nicht exakt bestimmt werden können (Wärmeverluste, sich einstellende Drehzahl), können auch die obere und untere Prozesstemperatur zu Beginn der Auslegung nicht exakt bestimmt werden. Sie müssen deshalb abgeschätzt werden.

Zur Berechnung des Stirling-Prozesses wird die Schmidt-Analyse nach Schleider [Sch08] verwendet, mit der sich u.A. die Momentandrücke und die vom Prozess aufgenommenen und abgegebenen Energien berechnen lassen. Auf die Schmidt-Analyse wird in Unterunterabschnitt 3.3.2 eingegangen. Als Kompromiss zwischen rechnerischer Beherrschbarkeit und Genauigkeit soll ein Vergleich von dem durch die Sonneneinstrahlung zugeführten Wärmestrom \dot{Q}_{zu} mit der mithilfe des Schmidt-Prozesses berechneten zugeführten Leistung P_E verwendet werden, um durch Variation der oberen Prozesstemperatur T_E den korrekten Wert für diese zu finden.

3.3.1. Vorauslegung

Zur Vorauslegung wird die Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Prozesstemperatur ΔT (im Folgenden als „Temperaturdifferenz“ bezeichnet) zwingend benötigt. Für die Abschätzung der unteren

Prozesstemperatur im Kompressionsraum T_K werden zur Umgebungstemperatur $10K$ addiert, um die nicht-ideale Wärmeübertragung zwischen Kühler und Umgebungsluft zu berücksichtigen. Die obere Prozesstemperatur T_E , die sich im Expansionsraum unter Einstrahlung der Sonne ergibt, wird zunächst abgeschätzt. Dazu wird auf vorhandene Daten bestehender Stirlingmotoren zurückgegriffen, die ebenfalls über unkonzentrierte Sonneneinstrahlung betrieben werden [SZ05, S. 3].

Die Abschätzung des Gesamtvolumens wird mittels einer empirischen Näherungsformel von KOLIN durchgeführt, die nur für Flachplatten-Stirlingmotoren im Niedertemperaturbereich gilt [WK11, S. 52] (gewünschte Ausgangsleistung P_{ab} in W , maximales Arbeitsvolumen V_{max} in m^3 , Temperaturdifferenz ΔT in K).

$$P_{ab} = \frac{V_{max} \cdot \Delta T^3}{2 \cdot 10^2} \quad (2)$$

Bei Proberechnungen ergaben sich mit dieser Gleichung Werte für das maximale Arbeitsvolumen V_{max} , die zu einer zu kleinen Ausgangsleistung führten. Daher wurde die Gleichung modifiziert, indem der Faktor $2 \cdot 10^2$ auf $3 \cdot 10^2$ erhöht wurde (Gleichung 3).

$$P_{ab} = \frac{V_{max} \cdot \Delta T^3}{3 \cdot 10^2} \quad \Rightarrow \quad V_{max} = \frac{P_{ab} \cdot 3 \cdot 10^2}{\Delta T^3} \quad (3)$$

Durch Umstellen der Gleichung und Einsetzen der gewünschten Leistung P_{ab} und der Temperaturdifferenz ΔT lässt sich das maximale Arbeitsvolumen V_{max} ermitteln. Zur einfacheren Handhabung und Anschaulichkeit wurde aus dieser Gleichung ein Diagramm erstellt, in welchem anhand der erwarteten Temperaturdifferenz und der gewünschten Leistung das benötigte Gesamtvolume abgelesen werden kann (Abbildung 16).

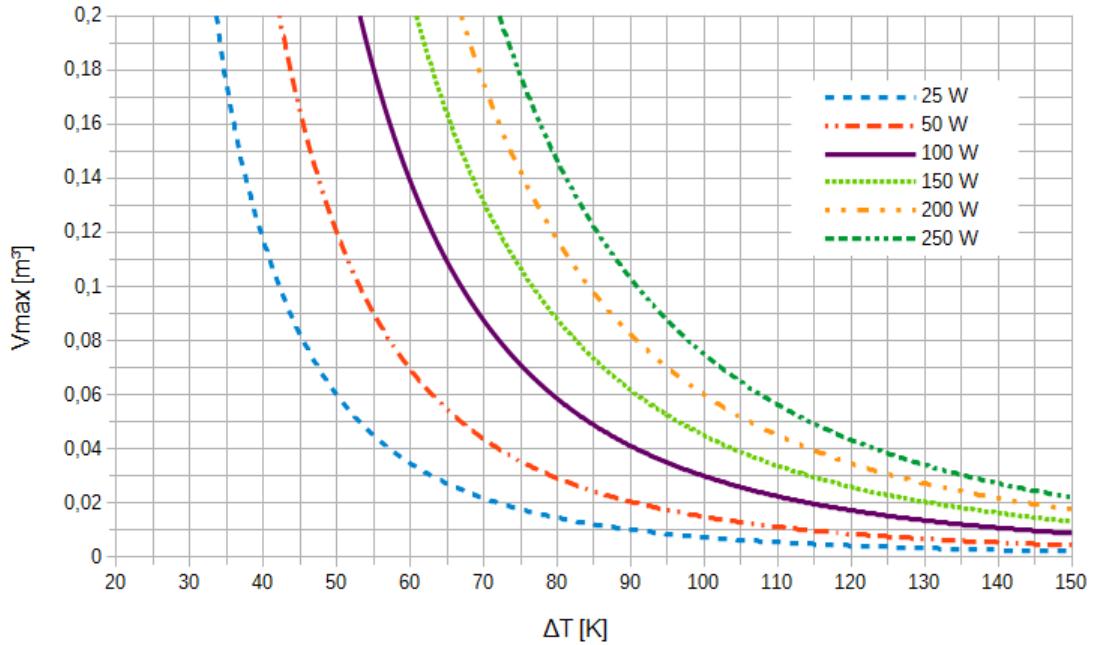


Abbildung 16: Auslegungsdiagramm zur Abschätzung des Gesamtvolumens nach Gleichung 3

Das Hubvolumen des Expansionskolbens, also das vom Verdrängerkolben überstrichene Volumen bzw. das Volumen, um welches sich der Expansionsraum zyklisch ändert, sei V_{HE} . Das Hubvolumen des Kompressionskolbens, also das vom Kompressionskolben überstrichene Volumen, sei V_{HK} . Das Gesamtvolumen ändert sich zyklisch um den Betrag V_{HK} und bewegt sich damit zwischen Minimal- und Maximalvolumen. Dies wird durch den Kompressionskolben verursacht. Der Verdrängerkolben verschiebt das Arbeitsgas zwischen beiden Räumen und trägt so nicht zur Änderung des Gesamtvolumens bei. Daher ist das Minimalvolumen gleich dem Expansionsraum-Hubvolumen V_{HE} . Bei dieser Betrachtung werden die Toträume zunächst vernachlässigt. In Abbildung 17 sind die Volumina über den Kurbelwinkel α unter Berücksichtigung der Toträume qualitativ dargestellt. V_E stellt das momentane Volumen des Expansionsraumes, V_K das momentane Volumen des Kompressionsraumes und V_{ges} das momentane Gesamtvolumen in Abhängigkeit des Kurbelwinkels α dar.

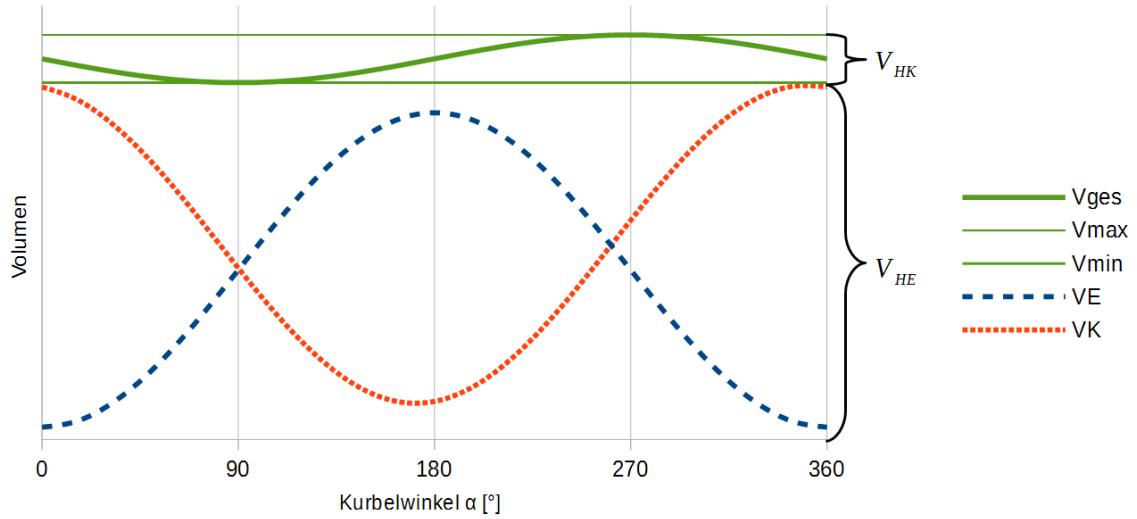


Abbildung 17: Expansionsraumvolumen V_E , Kompressionsraumvolumen V_K und Gesamtvolumen V_{ges} dargestellt über den Kurbelwinkel sowie Angabe von Expansionsraum- und Kompressionsraum-Hubvolumen

Die Auslegung wird für eine Phasenverschiebung φ zwischen der Bewegung des Verdränger- und des Arbeitskolbens von 90° durchgeführt. Dieser Wert wird von Chen [Che03, S. 53] und Tavakolpour et al. [TZG08, S. 83] nach Versuchen bzw. Berechnungen für γ -Stirlingmotoren als dem Optimum sehr nah angegeben.

Das Verdichtungsverhältnis ist das Verhältnis aus maximalem und minimalem Gesamtvolumen.

$$r = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{HE} + V_{HK}}{V_{HE}} = 1 + \frac{V_{HK}}{V_{HE}} \quad (4)$$

Zur Abschätzung des Verdichtungsverhältnisses r wird eine weitere empirische Gleichung von Kolin verwendet (ΔT in K) [Llo09, S. 52]. Auch diese gilt nur für Flachplatten-Stirlingmotoren im Niedertemperaturbereich.

$$r = 1 + \frac{\Delta T}{1100K} \quad (5)$$

Um ein größeres Kompressionsraum-Volumen und damit eine höhere Leistung zu erzielen und gleichzeitig das Verhältnis V_{HE}/V_{HK} den Wert 10 nicht signifikant übersteigen zu lassen (wie angegeben von Schleder [Sch08, S. 120]), wurde auch diese Formel modifiziert. Der Nenner von $1100K$ aus Gleichung 5 wurde auf $800K$ gesenkt (Gleichung 6), um die angegebenen Bedingungen zu erfüllen und die ursprüngliche Gleichung in möglichst geringem Maße abzuändern.

$$r = 1 + \frac{\Delta T}{800K} \quad (6)$$

Durch Umformung von Gleichung 4 ergibt sich Gleichung 7. Maximalvolumen V_{max} und Verdichtungsverhältnis r wurden bereits ermittelt, so kann durch Einsetzen dieser Werte in Gleichung 7 das Expansionsraum-Hubvolumen V_{HE} ermittelt werden. Da die Toträume zunächst vernachlässigt werden, ist das Maximalvolumen V_{max} die Summe von Expansionsraum- und Kompressionsraum-Hubvolumen V_{HE} und V_{HK} (Gleichung 8).

$$V_{HE} = \frac{V_{max}}{r} \quad (7)$$

$$V_{max} = V_{HK} + V_{HE} \quad \Rightarrow \quad V_{HK} = V_{max} - V_{HE} \quad (8)$$

Über Gleichung 8 lässt sich nun das Kompressionsraum-Hubvolumen V_{HK} ermitteln.

3.3.2. Berechnung der Zyklus-Arbeiten nach Schmidt

Die Schmidt-Analyse stellt eine Möglichkeit dar, die Prozesse im Stirlingmotor rechnerisch zu erfassen. Sie wurde 1871 von GUSTAV SCHMIDT entwickelt. Sie berücksichtigt die Toträume sowie die sinusförmige, kontinuierliche Bewegung beider Kolben. Außerdem können Expansions-, Kompressions- und Gesamt-Arbeit eines Zyklus bestimmt werden. In Abhängigkeit des Kurbelwinkels können sowohl Druck als

auch Volumen berechnet werden um damit ein p-V-Diagramm zu erstellen. Die folgenden vereinfachenden Annahmen werden zugrunde gelegt:

- Das Arbeitsgas ist ein ideales Gas.
- Das Arbeitsgas in den einzelnen Räumen ist zu jedem Zeitpunkt ideal homogen durchmischt.
- Expansion und Kompression erfolgen isotherm. In den jeweiligen Arbeitsräumen ist die Temperatur also immer konstant.
- Die Kolben bewegen sich sinusförmig.
- Im Regenerator herrscht in Strömungsrichtung ein lineares Temperaturprofil. Er arbeitet ideal, das Arbeitsgas betritt bzw. verlässt ihn also mit T_E bzw. T_K .
- Es treten keine Druckverluste und keine Strömungsverluste auf, zu einem Zeitpunkt herrscht überall der gleiche Druck [Sch08].
- Es werden Toträume im Expansions- und im Kompressionsraum sowie für den Regenerator berücksichtigt.

Abschätzung der Totvolumina

Die Leistungsverluste aufgrund der Totvolumina sind zu berücksichtigen. Zu den bestehenden Niedrigtemperatur-Stirlingmotoren ähnlicher Leistungsklasse und volumetrischer Größenordnung sind keine Informationen zur Größe der Toträume verfügbar. Daher werden die Toträume zur Berechnung abgeschätzt. Für Verdrängerkolben und Arbeitskolben werden jeweils 4 % der Hubvolumina dieser Kolben als Totraum angenommen. So ergeben sich folgende Gleichungen:

Totvolumen im Expansionsraum:

$$V_{TE} = V_{HE} \cdot 0,04 \quad (9)$$

Totvolumen im Kompressionsraum:

$$V_{TK} = V_{HE} \cdot 0,04 + V_{HK} \cdot 0,04 \quad (10)$$

Für die Abschätzung des Regenerator-Totvolumens wird von 5 % des Expansionsraum-Hubvolumens V_{HE} ausgegangen.

$$V_R = V_{HE} \cdot 0,05 \quad (11)$$

Hilfsvariablen

Um den Druck in Abhängigkeit des Kurbelwinkels und die Arbeit, die während eines Zyklus aufgenommen und abgegeben wird, zu ermitteln, werden Hilfsvariablen eingeführt. SCHLEDER gibt eine Methode zur Berechnung dieser Größen für γ -Stirlingmotoren vor. Die Gleichungen 12 bis 21 wurden aus dieser Methode übernommen [Sch08, S. 76 ff.].

V_T sei das gesamte Totraum-Volumen, T_R die effektive Regenerator-Temperatur und T_T die effektive Totraum-Temperatur.

$$V_T = V_{TE} + V_R + V_{TK} \quad (12)$$

$$T_R = \frac{T_E - T_K}{\ln\left(\frac{T_E}{T_K}\right)} \quad (13)$$

$$T_T = \frac{V_{TE} + V_R + V_{TK}}{\frac{V_{TE}}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{TK}}{T_K}} \quad (14)$$

Folgende Hilfsvariablen werden definiert:

$$\text{Temperaturverhältnis:} \quad t = \frac{T_K}{T_E} \quad (15)$$

Hubvolumenverhältnis: $v = \frac{V_{HK}}{V_{HE}}$ (16)

reduzierter Totraum: $s = \frac{V_T}{V_{HE}} \cdot \frac{T_K}{T_T}$ (17)

Hilfsvariable zur Vereinfachung durch geometrische Addition:

$$\delta = \arctan \left(\frac{v \cdot \sin(\varphi)}{t - 1 + v \cdot \cos \varphi} \right) + \pi \quad (18)$$

weitere Hilfsvariablen, die einige Variablen für die späteren Berechnungen zur Vereinfachung zusammenfassen:

$$A = \sqrt{t^2 - 2 \cdot t + 1 + 2 \cdot (t - 1) \cdot v \cdot \cos \varphi + v^2} \quad (19)$$

$$B = t + v + 2 \cdot s \quad (20)$$

$$c = \frac{A}{B} \quad (21)$$

Zyklus-Arbeiten des Stirlingprozesses

Nun lassen sich die im Expansionsraum zugeführte Arbeit W_E , die im Kompressionsraum abgeführte Arbeit W_K und die nutzbare Arbeit W ermitteln. Dabei ist p_m der Mitteldruck des Kreisprozesses. Für diesen wird der Umgebungsdruck eingesetzt, da dies konstruktiv am einfachsten umsetzbar ist (Gleichungen nach [Sch08, S. 82]).

$$W_E = \frac{p_m \cdot V_{HE} \cdot \pi \cdot c \cdot \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (22)$$

$$W_K = -\frac{p_m \cdot V_{HE} \cdot \pi \cdot c \cdot t \cdot \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (23)$$

$$W = \frac{p_m \cdot V_{HE} \cdot \pi \cdot c \cdot (1 - t) \cdot \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \quad (24)$$

3.3.3. Ermittlung von Drehzahl und Leistung

Zur Ermittlung der Drehzahl wird eine Näherungsformel von Schleder und Zoppke [SZ05] verwendet.

$$n = \frac{C}{60} \cdot T_E^{0,5} \cdot V_{HK}^{-1/3} \cdot R^{0,5} \quad (25)$$

Sie stellt einen Zusammenhang zwischen Drehzahl n in $1/s$, oberer Prozesstemperatur T_E in K , Hubvolumen V_{HK} in m^3 und der spezifischen Gaskonstante des Arbeitsgases R in $m^2/K \cdot s^2$ her. Dazu wird die dimensionslose Konstante C anhand der Daten eines bestehenden Stirlingmotors ermittelt. In dieser Arbeit werden dazu die Daten des Sunwell 50 von Schleder und Zoppke [SZ05, S. 3] verwendet. Weitere Überlegungen dazu im Fallbeispiel in Unterabschnitt 4.3.

Über die nach Schleder abgeschätzte Drehzahl lassen sich nun die im Expansionsraum zugeführte Leistung P_E , die im Kompressionsraum abgeführte Leistung P_K und die nutzbare Leistung P ermitteln, indem die Drehzahl mit dem jeweiligen Wert für die Arbeit multipliziert wird [Sch08, S. 83].

$$P_E = n \cdot W_E \quad (26)$$

$$P_K = n \cdot W_K \quad (27)$$

$$P = n \cdot W \quad (28)$$

3.3.4. Abschätzung der oberen Prozesstemperatur

Der ideale Wirkungsgrad des Stirling-Prozesses ist gleich dem des Carnot-Prozesses und ist damit thermodynamisch sehr günstig. Um die Verluste zu berücksichtigen werden vom idealen Prozesswirkungsgrad η_{ideal} 10 Prozentpunkte abgezogen. Im Falle der Versorgungsaufgabe

reduziert sich der Wirkungsgrad so von 16 % auf 6 %. Es ergibt sich der reale Prozesswirkungsgrad η_{real} .

$$\eta_{real} = \eta_{ideal} - 0,1 = \left(1 - \frac{T_K}{T_E}\right) - 0,1 \quad (29)$$

G sei die einfallende Globalstrahlung auf die horizontale Fläche. Bei der Transmission der Glasscheibe in den Expansionsraum und bei der Absorption der Strahlung von der schwarz gestrichenen Oberfläche des Verdrängerkolbens wird die Globalstrahlung auf den Wert G_{ein} reduziert. Für den Absorptionskoeffizienten der Farbe α_{Farbe} wird der Wert 0,970 für schwarzen Heizkörperlack verwendet [CW10, S. 383]. Für den Transmissionskoeffizienten der Glasscheibe muss ebenfalls ein Wert angenommen werden, es wurde dazu der Wert des Produktes iplus top 1.1 T der Interpane Glas Industrie AG gewählt, der bei 0,81 liegt [Int].

$$G_{ein} = G \cdot 0,81 \cdot 0,97 = G \cdot \tau_{Glas} \cdot \alpha_{Farbe} \quad (30)$$

Nun soll die obere Prozesstemperatur abgeschätzt werden. Die Größen der Arbeitsvolumina, die durch die Auslegung ermittelt wurden, werden festgehalten, während die obere Prozesstemperatur variiert wird. Dadurch variiert der Wirkungsgrad des Prozesses und die durch die Schmidt-Analyse und Drehzahl ermittelte Ausgangsleistung $P_{ab,Schmidt}$. Mittels des realen Wirkungsgrades η_{real} lässt sich auf die tatsächlich in den Prozess eingebrachte Wärmeleistung auf Basis der Berechnung nach Schmidt schließen.

$$P_{ein,Schmidt}(T_E) = \frac{P_{ab,Schmidt}(T_E)}{\eta_{real}(T_E)} \quad (31)$$

Der durch die Sonneneinstrahlung eingebrachte Wärmestrom \dot{Q}_{zu} verändert sich ebenfalls, da sich η_{real} ändert, während die gewünschte Ausgangsleistung $P_{ab,Auslegung}$ konstant bleibt:

$$\dot{Q}_{zu}(T_E) = \frac{P_{ab,Auslegung}}{\eta_{real}(T_E)} \quad (32)$$

Nun wird ermittelt, bei welcher Temperatur T_E der Wärmestrom \dot{Q}_{zu} und $P_{ein,Schmidt}$ gleich werden. Dies ist die gesuchte obere Prozessstemperatur T_E . Es werden also die Prozessparameter ermittelt, bei denen der berechnete Prozess mit der durch die Sonne eingebrachte Wärmeleistung übereinstimmt. In der Auslegung wurde dies mit einem Diagramm durchgeführt (Abbildung 18 in Unterabschnitt 4.4). Nun wird überprüft, ob die berechnete Ausgangsleistung P_{ab} mit der gewünschten Leistung P übereinstimmt. Sollte das nicht der Fall sein, wird V_{max} entsprechend vergrößert bzw. verkleinert und die Schritte erneut durchgeführt.

Über den ermittelten, benötigten Wärmestrom \dot{Q}_{zu} und die nutzbare Globalstrahlung kann die benötigte Aperturfläche A bestimmt werden.

$$\dot{Q}_{zu} = A \cdot G_{ein} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{\dot{Q}_{zu}}{G_{ein}} \quad (33)$$

3.3.5. p-V-Diagramm

Die Schmidt-Analyse ermöglicht die Berechnung von Druck und Temperatur in Abhängigkeit des Kurbelwinkels α . So lässt sich für den gefundenen Prozess ein p-V-Diagramm erstellen, dies wurde für das Fallbeispiel durchgeführt (Abbildung 19 in Unterabschnitt 4.5). Die Gleichungen sind angelehnt an Schleder [Sch08, S. 82 ff.].

Momentanwerte des Expansionsraum-Volumens V_E und des Kompressionsraum-Volumens V_C :

$$V_E(\alpha) = \frac{V_{HE}}{2} \cdot (1 - \cos \alpha) + V_{TE} \quad (34)$$

$$V_C(\alpha) = \frac{V_{HE}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) + \frac{V_{HC}}{2} \cdot (1 - \cos(\alpha - \varphi)) + V_{TC} \quad (35)$$

Der Momentanwert des Druckes berechnet sich folgendermaßen:

$$p(\alpha) = \frac{p_m \cdot \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(\alpha - \delta)} \quad (36)$$

Das p-V-Diagramm für das Fallbeispiel ist im Unterabschnitt 4.5 zu finden (Abbildung 19).

Außerdem lassen sich p_{max} und p_{min} berechnen mit

$$p_{max} = p_m \cdot \sqrt{\frac{1 + c}{1 - c}} \quad (37)$$

$$p_{min} = p_m \cdot \sqrt{\frac{1 - c}{1 + c}} \quad (38)$$

4. Ergebnisse

Es wird nun das in Unterabschnitt 3.3 vorgestellte Auslegungswerzeug auf die Versorgungsaufgabe aus Unterabschnitt 3.1 angewandt. Folgende Werte werden aus der Versorgungsaufgabe übernommen:

Globalstrahlung auf horizontale Fläche $G = 850 \text{ W/m}^2$

Umgebungstemperatur $T_{Umg} = 29,2^\circ\text{C}$

Umgebungsdruck $p_{Umg} = 0,925 \text{ bar}$

Gewünschte Ausgangsleistung $P_{ab} = 100W$

4.1. Vorauslegung

Die untere Prozesstemperatur T_K wird abgeschätzt, indem zur Umgebungstemperatur 10 K addiert werden. So ergibt sich:

$$T_K = 273,15K + 39,2^\circ\text{C} = 312,15 K \quad (39)$$

Für die obere Prozesstemperatur T_E muss ein Wert angenommen werden. In der Literatur werden Temperaturen von solarbetriebenen Stirlingmotoren von $60,4^\circ\text{C}$ bis 113°C angegeben [SZ05, S. 3] [TZG08, S. 86]. Für die weiteren Berechnungen wird ein Wert 100°C von angenommen, so ergibt sich:

$$T_E = 273,15K + 100^\circ\text{C} = 373,15K \quad (40)$$

Damit ergibt sich eine Temperaturdifferenz $\Delta T = T_E - T_K = 60,8K$.

4.2. Berechnung der Zyklus-Arbeiten nach Schmidt

Abschätzung der Totvolumina

Nun kann mittels Gleichung 3 das Maximalvolumen V_{max} berechnet werden. Es handelt sich um eine empirische Abschätzungsformel, das Ergebnis ergibt sich in m^3 . Um für die Werte der Volumina umgänglichere Größenordnungen zu erhalten, werden sie von nun an in dm^3 angegeben.

$$V_{max} = \frac{P_{ab} \cdot 3 \cdot 10^2}{\Delta T^3} = \frac{100W \cdot 3 \cdot 10^2}{(60,8 \text{ K})^3} = 0,1335 \text{ m}^3 = 133,5 \text{ dm}^3 \quad (41)$$

Mittels Gleichung 6 wird das Verdichtungsverhältnis r bestimmt.

$$r = 1 + \frac{\Delta T}{800 \text{ K}} = 1 + \frac{60,8 \text{ K}}{800 \text{ K}} = 1,076 \quad (42)$$

Durch die Gleichungen 7 und 8 lassen sich nun Expansionsraum-Hubvolumen V_{HE} und Kompressionsraum-Hubvolumen V_{HK} errechnen.

$$V_{HE} = \frac{V_{max}}{r} = \frac{133,5 \text{ dm}^3}{1,076} = 124,05 \text{ dm}^3 \quad (43)$$

$$V_{HK} = V_{max} - V_{HE} = 133,5 \text{ dm}^3 - 124 \text{ dm}^3 = 9,45 \text{ dm}^3 \quad (44)$$

Das Totvolumen im Expansionsraum V_{TE} , im Kompressionsraum V_{TK} und das Totvolumen des Regenerators V_R wird mit den Gleichungen 9 bis 11 abgeschätzt.

$$V_{TE} = V_{HE} \cdot 0,04 = 124,05 \text{ dm}^3 \cdot 0,04 = 5,0 \text{ dm}^3 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} V_{TK} &= V_{HE} \cdot 0,04 + V_{HK} \cdot 0,04 \\ &= 5,0 \text{ dm}^3 + 0,4 \text{ dm}^3 = 5,4 \text{ dm}^3 \end{aligned} \quad (46)$$

$$V_R = V_{HE} \cdot 0,05 = 124,05 \text{ dm}^3 \cdot 0,05 = 6,2 \text{ dm}^3 \quad (47)$$

Hilfsvariablen

Das gesamte Totraum-Volumen V_T , die effektive Regenerator-Temperatur T_R und die effektive Totraum-Temperatur T_T anhand der Gleichungen 12 bis 14 berechnet.

$$\begin{aligned} V_T &= V_{TE} + V_R + V_{TK} \\ &= 5,0 \text{ dm}^3 + 5,4 \text{ dm}^3 + 6,2 \text{ dm}^3 = 16,6 \text{ dm}^3 \end{aligned} \quad (48)$$

$$T_R = \frac{T_E - T_K}{\ln\left(\frac{T_E}{T_K}\right)} = \frac{373,15K - 312,35K}{\ln\left(\frac{373,15K}{312,35K}\right)} = 341,8K \quad (49)$$

$$T_T = \frac{V_{TE} + V_R + V_{TK}}{\frac{V_{TE}}{T_E} + \frac{V_R}{T_R} + \frac{V_{TK}}{T_K}} = \frac{5,0 \text{ dm}^3 + 6,2 \text{ dm}^3 + 5,4 \text{ dm}^3}{\frac{5,0 \text{ dm}^3}{373,15K} + \frac{6,2 \text{ dm}^3}{341,8K} + \frac{5,4 \text{ dm}^3}{312,35K}} = 340,0K \quad (50)$$

Es werden nun die für die Schmidt-Analyse benötigten Hilfsvariablen Temperaturverhältnis t , Hubvolumenverhältnis v und reduzierter Totraum s ermittelt (Gleichungen 15 bis 17).

$$t = \frac{T_K}{T_E} = \frac{312,35K}{373,15K} = 0,837 \quad (51)$$

$$v = \frac{V_{HK}}{V_{HE}} = \frac{9,45 \text{ dm}^3}{124,05 \text{ dm}^3} = 0,076 \quad (52)$$

$$s = \frac{V_T}{V_{HE}} \cdot \frac{T_K}{T_T} = \frac{16,6 \text{ dm}^3}{124,05 \text{ dm}^3} \cdot \frac{312,15 K}{340,0K} = 0,123 \quad (53)$$

Hilfsvariable zur Vereinfachung durch geometrische Addition (wie in Unterunterabschnitt 3.3.1 dargestellt wird für den Phasenwinkel $\varphi = 90^\circ$ gewählt):

$$\begin{aligned} \delta &= \arctan\left(\frac{v \cdot \sin\varphi}{t - 1 + v \cdot \cos(\varphi)}\right) + \pi \\ &= \arctan\left(\frac{0,076 \cdot \sin 90^\circ}{0,837 - 1 + 0,076 \cdot \cos 90^\circ}\right) + 3,1415 = 2,71 \end{aligned} \quad (54)$$

$$(55)$$

weitere Hilfsvariablen:

$$\begin{aligned}
 A &= \sqrt{t^2 - 2 \cdot t + 1 + 2 \cdot (t - 1) \cdot v \cdot \cos \varphi + v^2} \\
 &= \sqrt{0,837^2 - 2 \cdot 0,837 + 1 + 2 \cdot (0,837 - 1) \cdot 0,076 \cdot \cos 90^\circ + 0,076^2} \\
 &= 0,180
 \end{aligned} \tag{56}$$

$$B = t + v + 2 \cdot s = 0,837 + 0,076 + 2 \cdot 0,123 = 2,157 \tag{57}$$

$$c = \frac{A}{B} = \frac{0,180}{2,157} = 0,083 \tag{58}$$

Zyklus-Arbeiten des Stirlingprozesses

Nun wird die im Expansionsraum zugeführte Arbeit W_E , die im Kompressionsraum abgeführte Arbeit W_K und die nutzbare Arbeit W errechnet. Für den Mitteldruck des Kreisprozesses p_m wird dabei der Umgebungsdruck p_{umg} eingesetzt (Gleichungen 22 bis 24). Dem System zugeführte Arbeiten haben positive, dem System abgeführte Arbeiten negative Werte.

$$\begin{aligned}
 W_E &= \frac{p_m \cdot V_{HE} \cdot \pi \cdot c \cdot \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \\
 &= \frac{0,925 \text{ bar} \cdot 124,05 \text{ dm}^3 \cdot 3,1415 \cdot 0,083 \cdot \sin 2,71}{1 + \sqrt{1 - 0,083^2}} \\
 &= 636,0 \text{ J}
 \end{aligned} \tag{59}$$

$$W_K = -\frac{p_m \cdot V_{HE} \cdot \pi \cdot c \cdot t \cdot \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = -532,4 \text{ J} \tag{60}$$

$$W = \frac{p_m \cdot V_{HE} \cdot \pi \cdot c \cdot (1 - t) \cdot \sin \delta}{1 + \sqrt{1 - c^2}} = 103,6 \text{ J} \tag{61}$$

4.3. Ermittlung von Drehzahl und Leistung

Zur Ermittlung der Drehzahl wird eine Näherungsformel von Schleder und Zoppke [SZ05] verwendet. Die Werte für den Faktor C wurden

durch Umstellen nach diesem Faktor und Einsetzen der Werte für das Modell Sunwell 50 mit Daten aus Schleder und Zoppke [SZ05, S. 3] errechnet, C nimmt den Wert 0,0383 an. Der Sunwell 50 wurde gewählt, da dessen Hubvolumen eine vergleichbare Größenordnung wie das für die Versorgungsaufgabe ermittelte Hubvolumen hat und als Arbeitsgas auch Luft verwendet wird. Die obere Prozesstemperatur unterscheidet sich allerdings. Es fehlen Daten von Maschinen, die mit den für die Versorgungsaufgabe ermittelten Werten besser übereinstimmen. Durch den Bau eines Versuchsmodells mit den in diesem Fallbeispiel ermittelten Auslegungsgrößen könnte ein Faktor für diese Bauform bestimmt und die Abschätzung der Drehzahl so präzisiert werden.

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{C}{60} \cdot T_E^{0,5} \cdot V_{HK}^{-1/3} \cdot R^{0,5} \\
 &= \frac{0,0383}{60} \cdot (373,15K)^{0,5} \cdot (0,00945 m^3)^{-1/3} \cdot (287 m^2/K \cdot s^2)^{0,5} \\
 &= 0,99 \text{ } 1/s
 \end{aligned} \tag{62}$$

Mit der Drehzahl können nach Gleichungen 26 bis 28 die im Expansionsraum zugeführte Leistung P_E , die im Kompressionsraum abgeführte Leistung P_K und die nutzbare Leistung P ermittelt werden.

$$P_E = n \cdot W_E = 0,99 \text{ } 1/s \cdot 636,0 J = 628,9 W \tag{63}$$

$$P_K = n \cdot W_K = 0,99 \text{ } 1/s \cdot (-532,4 J) = -526,5 W \tag{64}$$

$$P = n \cdot W = 0,99 \text{ } 1/s \cdot 103,6 J = 102,5 W \tag{65}$$

Die nutzbare Leistung P liegt leicht über dem geforderten Wert von 100 W, was als hinnehmbar angesehen wird. Dieser Wert ist noch nicht endgültig, da noch die obere Prozesstemperatur genauer abgeschätzt wird und der Wert sich dadurch geringfügig ändert. P_K gibt die am Kühler abzuführende Wärmeleistung an, dieser Wert kann genutzt werden um die Dimensionierung desselben zu überprüfen.

4.4. Abschätzung der oberen Prozesstemperatur

Die nach Gleichung 31 aus Schmidt-Analyse und Drehzahl errechnete Eingangsleistung $P_{ein,Schmidt}$ und der nach Gleichung 32 errechnete zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_{zu} sind beide abhängig von der oberen Prozesstemperatur T_E . Durch Variation dieser Temperatur wird der Wert für diese gesucht, bei dem $P_{ein,Schmidt}$ und \dot{Q}_{zu} den gleichen Wert annehmen und damit die Schmidt-Analyse mit der äußeren Sonneneinstrahlung übereinstimmt. Dies ist in Abbildung 18 dargestellt.

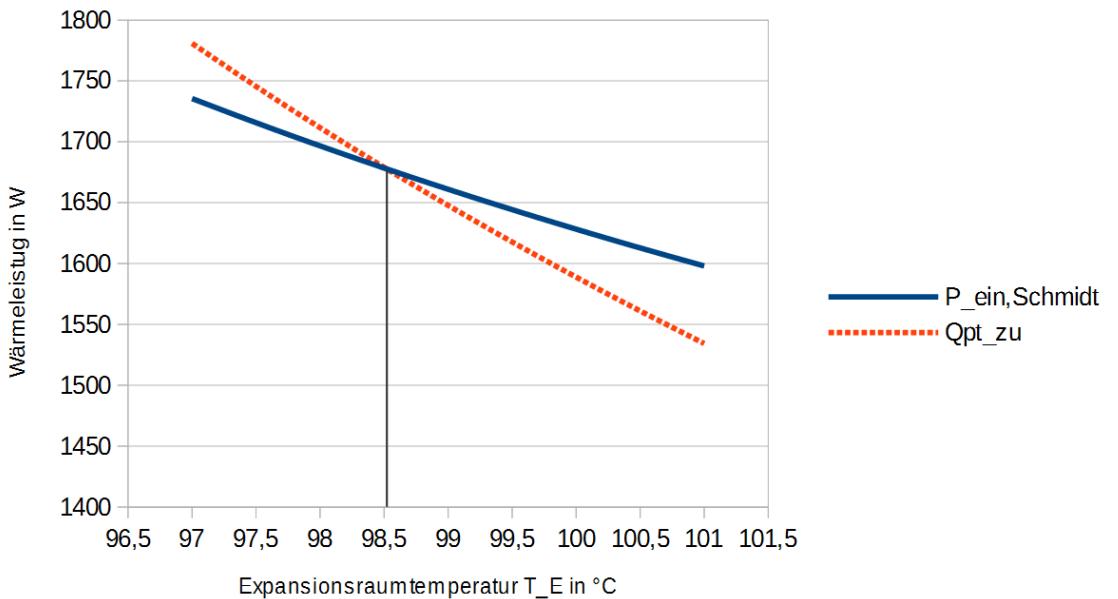


Abbildung 18: Vergleich von errechneter Eingangsleistung $P_{ein,Schmidt}$ und errechnetem zugeführtem Wärmestrom \dot{Q}_{zu}

Für T_E wurde der Wert $98,6 \text{ } ^\circ\text{C} = 371,75 \text{ K}$ gefunden. Die erneute Berechnung über Schmidt-Analyse und Drehzahl ergibt für diese Temperatur eine Ausgangsleistung P von $100,13 \text{ W}$. Diese Abweichung vom gewünschten Wert von $0,13 \%$ wird als akzeptabel angesehen.

Über Gleichung 33 wird die Aperturfläche A bestimmt (G_{ein} aus Gleichung 30):

$$A = \frac{\dot{Q}_{zu}}{G_{ein}} = \frac{1672 \text{ W}}{667,8 \text{ W/m}^2} = 2,50 \text{ m}^2 \quad (66)$$

4.5. p-V-Diagramm

Mit den ermittelten Größen des Prozesses sowie den Gleichungen 34 bis 36 wurde das p-V-Diagramm des Prozesses erstellt (Abbildung 19).

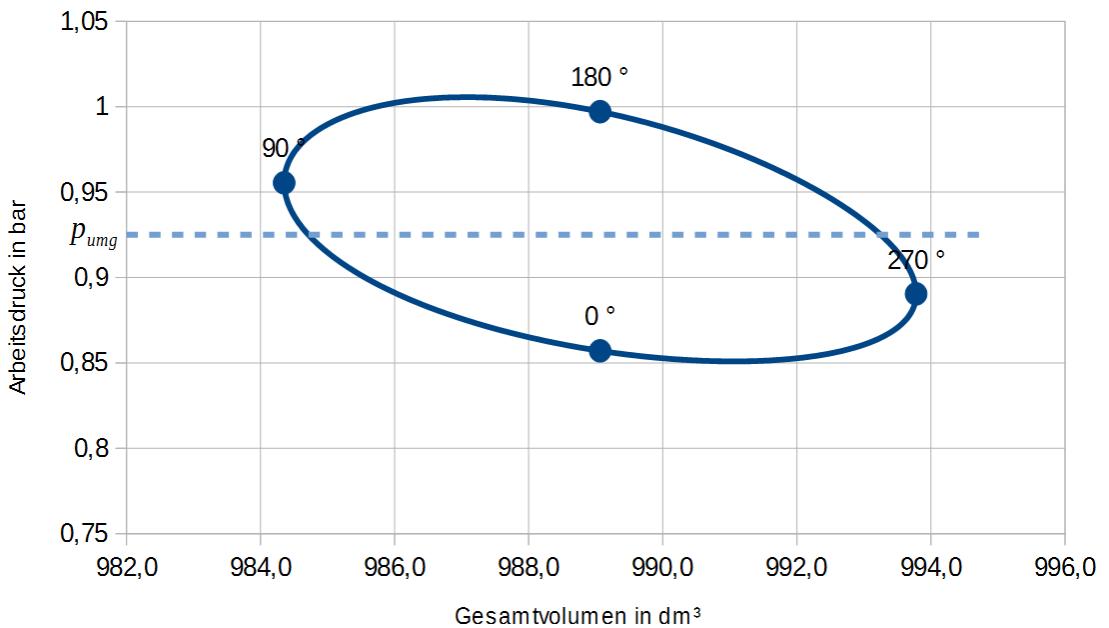


Abbildung 19: p-V-Diagramm des ermittelten Prozesses

4.6. konstruktive Überlegungen

In diesem Abschnitt sollen Überlegungen zur konstruktiven Umsetzung des ausgelegten Stirlingmotors mit möglichst geringen Mitteln im Hinblick auf einen Bau im Südsudan dargestellt werden.

Verdrängerkolben Der Verdränger kann aus Polystyrol hergestellt werden, da dieses eine geringe Wärmeleitfähigkeit bei geringer Dichte hat und teilweise als Rest bzw. Abfall verfügbar ist. Da die Oberfläche des Verdrängerkolbens bis auf kleine konstruktive Abweichungen der Aperturfläche entspricht, wird der Verdrängerkolben sehr flach. Daraus können sich Stabilitätsprobleme ergeben. Ko-

LIN verwendete für seine Flachplattenmodelle Polystyrol [WK11, S. 52].

Gehäuse VIEBACH verwendet für die Seitenwände seines Flachplatten-Solarstirlings Vieb-4 Holz [Vie13, S. 114]. Die Luftundurchlässigkeit scheint also ausreichend zu sein. Der Vorteil dieses Materials ist, dass es eine gute Verfügbarkeit hat, wiederverwertet werden kann, eine geringe Wärmeleitfähigkeit hat und zudem ein nachwachsender Rohstoff ist. Es muss jedoch auf eine dichte Verklebung oder eine andere Abdichtung an den Kanten geachtet werden.

Regenerator Als Regeneratormaterial kann Stahlwolle verwendet werden.

Glasscheibe Aufgrund der großen Fläche und der Drücke ergibt sich eine hohe senkrechte Belastung der Glasscheibe, also in ungünstiger Richtung. Die Glasscheibe müsste ggf. abgestützt werden. Es muss vermieden werden, dass die Drehzahl des Motors mit der Resonanzfrequenz der Glasscheibe übereinstimmt. Hinzu kommt, dass Glas im Südsudan nicht gut verfügbar ist [Kov15], dies gilt insbesondere für Glas welches auf die Transmission des Sonnenlicht-Spektrums optimiert ist.

Kühler VIEBACH verwendet als Kühler ein Blech aus Aluminium [Vie13, S. 114]. Ob ein Blech aus Stahl eine ausreichende Wärmeabfuhr gewährleisten kann, wäre zu untersuchen. Stahlblech ist mit hoher Wahrscheinlichkeit besser verfügbar als Aluminiumblech.

Generator Da die Drehzahl mit $0,99 \text{ } 1/\text{s}$ relativ gering ausfällt, können die Generatoren der im Südsudan verwendeten Dieselaggregate nicht für den Stirlingmotor verwendet werden. Die Drehzahl kann über die Verwendung eines Getriebes erhöht werden oder es wird ein geeigneter Generator beschafft. Die Verwendung eines Generators mit hoher Polzahl wäre eine Möglichkeit, die Frequenz der erzeugten Spannung zu erhöhen. Mit der Anzahl der Pole

wächst allerdings auch der benötigte Durchmesser. Es wäre zu untersuchen ob ein Generator mit hoher Polzahl konstruktiv mit dem Schwungrad kombiniert werden kann, um Platz und Material zu sparen.

Sonneneinfall Durch winklig um die Aperturfläche angebrachte Platten eines spiegelnden Materials könnte die aufgenommene Einstrahlung und damit die obere Prozesstemperatur mit einfachen Mitteln erhöht werden.

4.7. Schlussfolgerungen

Eine von Steimle [SLB07, S. 434] beschriebene Maschine sowie die Sunwell 50 von Sunmachine [Suna] erreichen laut diesen Quellen pro m^2 Einstrahlfläche eine Leistung von etwa 50 W. Für die ausgelegte Maschine ergibt sich eine Leistung von 40 W pro m^2 Einstrahlfläche. Dieser Unterschied kann daran liegen dass die Verluste zu konservativ abgeschätzt wurden, dass die Formel zur Abschätzung der Drehzahl zu kleine Werte liefert oder dass die Angaben der genannten Maschinen für die über einen bestimmten Zeitraum maximale Einstrahlung gelten, während für die Auslegung ein über den Monat gemittelter Wert für die Einstrahlung verwendet wurde.

Für die Auslegung wurden einige Näherungsformeln verwendet. Gleichungen von KOLIN zur Vorauslegung der Volumina wurden modifiziert (Gleichungen 3 und 6). Rechnerisch ergeben sich dadurch Werte, die die Anforderungen gut erfüllen. Es wäre auch möglich, Gleichung 3 so zu modifizieren, dass sich ein kleineres Gesamtvolume V_{max} ergibt und Gleichung 6 so zu modifizieren, dass das Verdichtungsverhältnis r und dadurch auch das Kompressionsraum-Hubvolumen V_{HK} steigen. Durch das geringere Gesamtvolume verkleinert sich allerdings auch der Verdrängerhub, da die Aperturfläche A nicht verändert werden kann. Der Verdrängerhub errechnet sich als Verhältnis von Expansions-

Hubvolumen zu Aperturfläche $\frac{V_{HE}}{A}$ und liegt für die in der Beispielauslegung errechneten Werte bei 50 mm, was in Anbetracht der Aperturfläche von $2,5 \text{ m}^2$ ein sehr kleiner Wert ist. Ob dieser kleine Wert und ggf. eine weitere Verkleinerung des Verdrängerhubes durch die genannte Modifizierung der Formeln konstruktiv sinnvoll umgesetzt werden kann, kann Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Auslegungswerkzeug entwickelt, mit welchem sich geometrische und Prozess-Parameter für solarbetriebene Niedrigtemperatur-Stirlingmotoren in Flachplattenbauweise bestimmen lassen. Dazu wurden einige Annahmen und Abschätzungen getroffen, die rechnerisch und messtechnisch präzisiert und überprüft werden können. Auf die Auslegung eines Generators konnte aufgrund des Umfangs der Auslegung des Stirlingmotors selbst abgesehen von einigen Überlegungen nicht weiter eingegangen werden.

Die Drehzahl, die in die berechneten Leistungen eingeht, wird mit einer Näherungsformel von Schleder [Sch08] abgeschätzt. Um diese Abschätzung zu überprüfen und zu präzisieren, müsste ein Versuchsmo dell mit den ermittelten Daten gebaut und untersucht werden. Mit den Daten eines solchen Versuchsmode lls könnte ein neuer zur Abschätzung benötigter Faktor C gefunden werden, der sich für Stirlingmaschinen der in dieser Arbeit zugrunde gelegten Bauart besser eignet.

In die Näherungsformel gehen die spezifische Gaskonstante des Arbeitsgases, die obere Prozesstemperatur und das Hubvolumen ein. Es wäre zu untersuchen, wie groß der Einfluss weiterer Faktoren auf die sich einstellende Drehzahl ist. Geeignete Größen scheinen aufgrund der Trägheitskräfte die Masse der bewegten Teile, also vor allem der Kolben, und das Gesamtvolumen zu sein. Außerdem beeinflusst die Größe des Lastmomentes die Drehzahl. Der Einfluss konstruktiver Merkmale wie der Kolbendichtung und daraus resultierende Reibung auf die Drehzahl wäre zu untersuchen und zu quantifizieren. Außerdem wäre zu untersuchen, ob die Drehzahl von der Temperaturdifferenz anstatt der oberen Prozesstemperatur abgeleitet werden kann. So könnten Ungenauigkeiten umgangen werden, die sich daraus ergeben, dass die Werte einer Maschine mit relativ niedriger unterer Prozesstemperatur für die Abschätzung bei einer Maschine mit höherer unterer Prozesstemperatur verwendet werden.

In der Beispielauslegung wurde eine Verringerung des Wirkungsgrades von 10 Prozentpunkten angenommen, was den idealen Wirkungsgrad von 16 % auf einen realen Wirkungsgrad von 6 % reduzierte. Diese Abschätzung kann durch eine genauere Betrachtung der Verlustmechanismen sowie durch Untersuchungen an einem Versuchsmodell präzisiert werden. Diese Präzisierung hat allerdings Grenzen, da die Verluste von der konstruktiven Umsetzung abhängen. Bei der Anwendung in strukturschwachen Regionen ergeben sich viele Faktoren, die die Verluste vergrößern können, z.B. die Verwendung von Bauteilen minderer Qualität, konstruktive Mängel wie Undichtigkeiten oder schleifende Teile und weitere Probleme aufgrund mangelnder Fachkenntnis.

Um den Bau eines solarbetriebenen Niedrigtemperatur-Stirlingmotors zu unterstützen, können weitere Ausgabeparameter in das Werkzeug integriert werden. Möglichkeiten hierzu sind der Hub von Verdränger- und Arbeitskolben, die Dimensionierung des Schwungrades und die Dimensionierung des Regenerators. Anhand der zu speichernden Wärme, der Temperaturen und der Wärmekapazität des Materials (z.B. Stahl) kann die benötigte Masse errechnet werden. Außerdem muss eine Entscheidung für die Bauform des Generators getroffen und die nötigen Berechnungen durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das entwickelte Auslegungswerkzeug helfen kann, zu entscheiden, ob sich der Bau eines Flachplatten-Stirlingmotors in einem konkreten Fall lohnt. Es kann einige Parameter bereitstellen, die bei der Konstruktion helfen. Es sollten jedoch noch weitere Parameter bereitgestellt werden. Getroffenen Annahmen müssen bestätigt und Abschätzungen untersucht und ggf. präzisiert werden.

Literatur

- [Ben06] BenQ Corporation. *Handbuch Benq FP91GP/FP91GX*. 2006. URL: ftp://ftp.benq.de/monitor/lcd/manuals/fp91gx/Handbuch_BenQ_FP91GX_und_FP91GP.pdf (besucht am 16.04.2015).
- [BRC] BRCK Inc., Nairobi, Kenia. *BRCK Specifications*. URL: <http://www.brck.com/specifications/> (besucht am 16.04.2015).
- [Che03] Dejin Chen. „Untersuchungen zur Optimierung eines solaren Niedertemperatur-Stirlingmotors“. Diss. Technische Universität Dresden, 2003.
- [Clea] Cleanergy AB. *Gasbox for Biogas - Technical Specification*. URL: http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy_gasbox_biogas_lowres1.pdf (besucht am 12.02.2015).
- [Cleb] Cleanergy AB. *Gasbox for Landfills - Technical Specification*. URL: http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy_gasbox_landfills_lowres1.pdf (besucht am 12.02.2015).
- [Clec] Cleanergy AB. *Sunbox for Solar Parks - Technical Specification*. URL: http://cleanergy.com/wp-content/uploads/2014/06/cleanergy_sunbox_lowres.pdf (besucht am 12.02.2015).
- [CW10] Günter Cerbe und Gernot Wilhelms. *Technische Thermodynamik: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. 16. Aufl. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010.
- [Int] Interpane Glas Industrie AG. *Technische Daten der AGC Interpane Isolierglas-Produkte*. URL: http://www.interpane.com/medien/service/iplus_techdata.pdf (besucht am 18.04.2015).
- [KF91] Ivo Kolin und C. Förster. *Historische Stirlingmotoren: 1815 - 1990*. Schmidt, Oberursel, 1991. 16 S.
- [Kov15] Stephen Kovats, Experte für Open Technologies und Post-Conflict Development bei der r0g agency, Berlin, Deutschland, nach mehreren seiner Besuche im Südsudan. persönliche Kommunikation, siehe Anhang A. Apr. 2015.
- [Llo09] Caleb C. Lloyd. „A Low Temperature Differential Stirling Engine for Power Generation“. Magisterarb. University of Canterbury, 2009.

- [Mei13] Dr. Sven Meier. *Zuverlässiger Alpha-Stirlingmotor (Zumo) - Zwischenbericht*. Fraunhofer IWM. 2013. URL: http://www.iwm.fraunhofer.de/fileadmin/media/xp_zumo/zb1_zumo_cd.pdf (besucht am 17.04.2015).
- [NAS] NASA Langley Research Center, Atmospheric Science Data Center. *NASA Surface meteorology and Solar Energy*. URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?num=212095&lat=4.85&submit=Submit&hgt=100&veg=17&sitelev=&email=skip@larc.nasa.gov&p=grid_id&p=midday_dwn&p=swv_dwn&p=exp_dif&p=avg_dnr&p=srf_dwn0&p=dy_cos_sza&p=declinat&p=mx_horizon&p=hor_ang&p=azi_ang&p=ret_tlt0&p=ret_esh0&p=ret_psh0&p=T10M&p=TSKIN&p=TSKIN_MN&p=PS&step=2&lon=31.6 (besucht am 04.04.2015).
- [Öko] ÖkoFEN Forschungs- und Entwicklungs Ges.m.b.H. *Pellematic Smart-e im Überblick*. URL: <http://www.pelletsheizung.at/de/pellematic-smart-e/#tab3> (besucht am 19.02.2015).
- [Rem13] De Dietrich Remeha GmbH. *Technische Daten Remeha eVita*. Juli 2013. URL: http://www.remeha.de/system/files/1321/original/Technische-Daten_eVita_07_2013_DIN_A4.pdf (besucht am 19.02.2015).
- [Sch08] Frank Schleider. *Stirlingmotoren*. 3. Aufl. Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG, Würzburg, 2008. 151 S.
- [Sen12] SenerTec Kraft-Wärme Energiesysteme GmbH. *Dachs Stirling SE Infoblatt*. Jan. 2012. URL: <http://www.senertec.de/de/derdachs/dachs-stirling.html> (besucht am 11.02.2015).
- [SLB07] Fritz Steimle, Jürgen Lamprichs und Peter Beck. *Stirling-Maschinen-Technik*. 2. Aufl. C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, 2007. 457 S.
- [Sol] Solare Brücke e.V. *Scheffler-Reflektoren*. URL: http://www.solare-bruecke.org/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=2&lang=de (besucht am 26.03.2015).
- [Sol09] Felix Sold. *Test Asus Eee PC 1005HA-M*. 2009. URL: <http://www.notebookcheck.com/Test-Asus-Eee-PC-1005HA-M-Win7-Netbook-22305.0.html> (besucht am 16.04.2015).
- [Suna] Sunmachine GmbH. *Sunwell 50*. URL: <http://old.stirlingmaschine.de/deutsch/pdf/sunwell.pdf> (besucht am 11.04.2015).

- [Sunb] Sunvention International GmbH. *SunPulse Electric*. URL: http://www.bsrsolar.com/sv/produkte3_e.html (besucht am 04.18.2015).
- [SZ05] Frank Schleder und Hartmut Zoppke. „Auslegung von Stirlingmotoren: Eine Frage der Drehzahl“. In: *BWK* 57.6 (2005), S. 1–6.
- [TZG08] Ali Reza Tavakolpour, Ali Zomorodian und Ali Akbar Golneshan. „Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator“. In: *Renewable Energy* 33 (2008), S. 77–87.
- [Ung15] Kurtis Unger, Leiter Elektronik BRCK Inc., Nairobi, Kenia. persönliche Kommunikation, siehe Anhang B. Apr. 2015.
- [Vie] Dieter Viebach. *Ein Flachplatten-Solarstirling-Motormodell*. URL: <http://ve-ingenieure.de/viebachstirling/solarstirlingmodell.pdf> (besucht am 07.04.2015).
- [Vie13] Dieter Viebach. *Der Stirlingmotor - einfach erklärt und leicht gebaut*. 10. Aufl. ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2013. 140 S.
- [Vie14] Viessmann Werke GmbH & Co KG. *VITOTWIN 300-W Datenblatt*. Apr. 2014. URL: http://www.viessmann.de/content/dam/internet-global/pdf_documents/Datenblaetter/DB-5619314.pdf (besucht am 11.02.2015).
- [Win13] Tobias Winkler. *Test Lenovo ThinkPad T440s*. 2013. URL: <http://www.notebookcheck.com/Test-Lenovo-ThinkPad-T440s-20AQ-S00500-Notebook.102607.0.html> (besucht am 16.04.2015).
- [WK11] Martin Werdich und Kuno Kübler. *Stirling-Maschinen*. 12. Aufl. ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2011. 190 S.

A. Protokoll des Gesprächs mit Stephen Kovats

Das Gespräch fand telefonisch am 15.04.2015 zwischen Stephen Kovats und Martin Schott statt.

Martin Schott: Was für Werkstätten gibt es im Südsudan und welche Ausstattung haben sie?

Stephen Kovats: Es gibt viele Werkstätten mit rudimentärer Ausstattung, buchstäblich an jeder Ecke. Es gibt auch einige Werkstätten für Autos, Motorräder und elektrische Geräte, ich bin in diese aber nicht hineingegangen. Es gibt auch Werkstätten für Holzbearbeitung. Die Menschen machen viel selbst aus Holz, z.B. Tische, Stühle usw. Bei einigen Werkzeugen müsste man mit den Menschen die dort leben wahrscheinlich erst mal üben und die Benutzung zeigen. Als der Südsudan noch Teil des Sudan war, wurde versucht die Menschen *nicht* auszubilden, das war Teil der Unterdrückungsstrategie. Es gibt jedoch einige Menschen, die eine militärische Ausbildung bekommen haben, was auch in technische Bereiche geht.

MS: Welche Materialien gibt es im Südsudan, und wie gut sind sie verfügbar? (z.B. Glasscheiben, Schrauben und Profile)

SK: Es wird nicht viel mit Glas gebaut, es ist aber möglich Glasscheiben zu bekommen. Metallteile bekommt man reicht gut, vor allem die Teile die in Autos, Motorrädern und Alltagsgeräten vorkommen. Es gibt auch viel Schrott aus dem man etwas wiederverwerten kann. Die meisten Teile kommen aus Uganda. Manche Leute holen die Teile über das Land aus Uganda oder Kenia. Man kann es sich auch liefern lassen, das ist aber sehr teuer. Im Prinzip ist sehr viel verfügbar, aber je spezieller es ist desto teurer wird es.

MS: Wie kann man eine Internetverbindung herstellen?

SK: Über das 3G-Netz der lokalen Provider kann man eine Internetverbindung bekommen, z.B. über einen Stick. Es gibt vier verschiedene Provider, die miteinander konkurrieren, deshalb ist die Abdeckung auch an abgelegenen Orten meist gut.

MS: Wie gut ist die Stromversorgung über das Netz?

SK: Dort wo es ein Stromnetz gibt, also in den größeren Städten, ist die Versorgung relativ in Ordnung. Es sind allerdings nur wenige Orte an das Stromnetz angeschlossen. Der Rest wird lokal mit Dieselgeneratoren mit Strom versorgt.

MS: Wie groß ist der Sandgehalt in der Luft?

SK: Juba ist eine Stadt mit wenigen geteerten Straßen, deshalb ist dort der Sandgehalt in der Luft eher höher. Auf dem Land ist es besser weil es weniger Straßen gibt, außerdem ist das Land großteils mit Vegetation überzogen.

MS: Vielen Dank für das Gespräch!

B. Leistungsaufnahme des BRCK

Betreff Re: Power consumption of BRCK for Bachelor Thesis
Von Info <info@brck.com>
An <martin.schott@posteo.de>
Datum 15.04.2015 12:41

Kurt replied

Apr 15, 1:40pm

Hi Martin,
Thanks for your interest in the BRCK! Sounds like a very interesting thesis.

Internally the BRCK is based off USB devices which are technically supposed to be limited to about 500mA at 5V

As a rule of thumb the modem draws about 500mA (sometimes a bit more) and the WiFi and the rest of the circuit also draws about 500mA (usually less)

So this is about 5W (5V x 1A) of continuous power. As you pointed out, this is worst case scenario and if the cellular connection is strong or not being used then we can get significantly longer run times.

If you had a 10W stirling engine (5W to run it, 5W to charge the battery) that could be used with the BRCK that would be really cool to see!

Hope that helps!

Kurt

--
Kurt Unger
info@brck.com

martin.schott@posteo.de sent a message

Apr 14, 6:20pm

Dear BRCK Team,

I am currently writing my Bachelor Thesis, it is about the possibility to run Laptops and Routers offgrid with solar powered Stirling Engines (they are easy to build and don't require too much special materials or dangerous liquids etc). For my calculation example I want to cite the power consumption of the BRCK because the device fits perfectly into the scenario (Juba, capital of South Sudan). Unfortunately I didn't find the maximum power consumption in Watts in the specifications. I'm aware that it depends on the usage of Wifi, G3 etc, but I need something I can calculate with. Can you give me an empirical value of the maximum power consumption of the BRCK? That would help me a lot.

Thanks for your inspiring work and best wishes from Berlin,

Martin Schott

C. Beigelegte CD

Auf der CD ist die Bachelorarbeit im pdf-Format, die aus dem Internet stammenden verwendeten Quellen sowie die zur Berechnung verwendete Kalkulationstabelle im ods-Format (erstellt mit LibreOffice Calc) gespeichert.