



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Nina Gröncke

Konzeptionierung und Konstruktion des Aufbaus zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Nina Gröncke

**Konzeptionierung und Konstruktion des
Aufbaus zur experimentellen
Untersuchung eines Stirlingmotors**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüferin: Prof. Dr.-Ing. Heike Frischgesell
Zweitprüferin: Dipl.-Ing. Elena Nitze

Abgabedatum: 06.03.2017

Zusammenfassung

Nina Gröncke

Thema der Bachelorthesis

Konzeptionierung und Konstruktion des Aufbaus zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors

Stichworte

Stirling, Stirlingmotor, Stirling-Prozess, Versuchsstand, Konzept, Labor, Versuch, Untersuchung, Kreisprozess, Versuchsaufbau, Prüfstand

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Planung eines Versuchsstandes zum Stirlingmotor. Die HAW Hamburg ist im Besitz eines Stirlingmotors, welcher bei Laborversuchen eingesetzt werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept für den Aufbau dieses Versuchsstandes zur experimentellen Untersuchung des Stirlingmotors erstellt. Die Planung des Versuchsstandes beginnt mit einer didaktisch-methodischen Analyse und der Ist-Aufnahme des Versuchsstandes. Ausgehend von dem vorhandenen Stirlingmotor wird zunächst ein Konzept für eine neue Heizung als Wärmequelle erarbeitet. Da dieses technisch nicht realisierbar ist, wird ein weiteres Konzept entworfen. Dieses umfasst die Konzeptionierung eines neuen Stirlingmotors zusammen mit einer passenden Heizung. Darauf basierend werden sinnvolle Messungen und Laborversuche erarbeitet und dargestellt.

Nina Gröncke

Title of the paper

Conception and construction of the structure for the experimental investigation of a Stirling engine

Keywords

Stirling, Stirling engine, Stirling process, test-bed, concept, Laboratory, experiment, investigation, cyclic process, experiment set-up, test-bench

Abstract

This paper encompasses the planning of a test-bed for a Stirling engine. Laboratory experiments are to be carried out at HAW Hamburg, whose operation is in possession of a Stirling engine. In the course of this work, a concept for the construction of a test-bed for the experimental investigation of a Stirling engine is to be created. The planning of this test-bed begins with a didactic-method of analysis and maintaining records of the experimental-states. Beginning with the existing Stirling engine, a concept for a new heater as heat-source is to be developed. As this is technically unfeasible, a further concept will be conceived. This will encompass the conception of a Stirling engine in conjunction with a suitable heater. Based on this, meaningful laboratory experiments and measurements will be developed and outlined.

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn/Frau **Nina Gröncke**

Matrikel-Nummer: 2180223

Thema: Konzeptionierung und Konstruktion des Aufbaus zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors

Schwerpunkte:

Im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen befindet sich ein Stirlingmotor. Der Motor soll bei Laborversuchen eingesetzt werden, die besonders die Wirkungsweise eines Stirlingmotors verdeutlichen sollen. Dazu muss der Stirlingmotor wieder in Betrieb genommen werden, sowie die technischen und rechtlichen Voraussetzungen geschaffen werden, den Stirlingmotor im ZET zu betreiben.

Im Besonderen sind folgende Fragestellungen zu klären:

1. Ist- Aufnahme des Versuchsstands.
2. Konzept für den Laborversuch erstellen. Welche Messungen sind sinnvoll?
3. Konzept für eine Wärmequelle erarbeiten. Welche (rechtlichen) Konsequenzen ergeben sich dabei für den Betrieb des Versuchsstandes?
4. Konstruktive Gestaltung des Versuchsaufbaus
5. Auswahl geeigneter Mess- und Regelungstechnik

Am Ende der Arbeit sind die Ergebnisse kritisch zu bewerten. Die Ergebnisse der Arbeit sind in entsprechender Schriftform darzustellen und zu dokumentieren. Der Fortgang der Arbeit ist in regelmäßigen Abständen mit den Betreuern der Arbeit zu diskutieren.

21.12.2016

Datum

Frischgesell

Erstprüfer/in

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Indizes	vii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen des Stirlingmotors	4
2.1 Geschichtliche Entwicklung	4
2.2 Aufbau und Funktionsprinzip	5
2.2.1 Aufbau	5
2.2.2 Funktionsprinzip und Wirkungsweise	7
2.2.3 Wärmekraft- oder Arbeitsmaschine	9
2.3 Thermodynamische Grundlagen	10
2.3.1 Hauptsätze der Thermodynamik	10
2.3.2 Der Carnot-Prozess	10
2.3.3 Der ideale Stirling-Prozess	11
2.3.4 Der reale Stirling-Prozess	17
2.4 Maschinentypen	21
2.4.1 Zylinderraumzuordnung	22
2.4.2 Maschinenbauart	24
2.5 Anwendungsfelder für Stirlingmaschinen	28
2.5.1 Der Stirlingmotor im Automobil	29
2.5.2 Der Stirlingmotor in der Kraft-Wärme-Kopplung	29
2.5.3 Wärmepumpen mit Stirlingmotor-Antrieb	30
2.5.4 Dish/Stirling-Systeme	30
2.5.5 Unterseeboote mit Stirlingmotor-Antrieb	32
2.5.6 Die Stirlingmaschine in der Kältetechnik	32
3 Planung des Versuchsstandes	33
3.1 Didaktisch-methodische Analyse	33
3.1.1 Curriculum der HAW	33
3.1.2 Didaktisch-methodische Entscheidung	35
3.2 Ist-Aufnahme des Versuchsstandes	37

4	Konzeptvarianten des Versuchsstandes	44
4.1	Konzept I: Vorhandener Stirlingmotor mit neuer Wärmequelle	44
4.1.1	Technische Anforderungen	44
4.1.2	Angebote und Realisierung	45
4.1.3	Versuch der Inbetriebnahme	48
4.1.4	Ergebnis	50
4.2	Konzept II: Neuer Stirlingmotor inklusive Heizung	50
4.2.1	Stirlingmotor	51
4.2.2	Heizung	53
4.2.3	Generator	54
4.2.4	Weitere Mess- und Steuerungstechnik	56
4.2.5	Kostenanalyse	57
5	Messungen im Versuchsstand	58
5.1	Entwurf des Versuchsaufbaus	58
5.2	Mögliche Laborversuche	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	63
	Abbildungsverzeichnis	66
	Tabellenverzeichnis	68
	Literaturverzeichnis	69
	Anhang	70
A	Zusammenbauzeichnung des ST 05 G	71
B	Stückliste des ST 05 G	73
C	Konzept I: Angebote und Datenblätter	78
D	Konzept II: Angebote und Datenblätter	86
E	Entwurf des Versuchsaufbaus	97

Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Benennung
α	$^{\circ}$	Kurbelwinkel
Δ	1	Differenz
η	%	Wirkungsgrad
ρ	kg/m^3	Dichte
φ	$^{\circ}$	Phasenverschiebungswinkel
ω	min^{-1}	Winkelgeschwindigkeit
A	m^2	Oberfläche
c	$J/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität
d	mm	Durchmesser
I	A	Strom
l	mm	Länge
L	mm	Pleuellänge
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	Nm	Drehmoment
n	min^{-1}	Drehzahl
p	bar	Druck
P	W	Leistung
Q	J	Wärme
\dot{Q}	W	Wärmeleistung
R	$J/(mol \cdot K)$	allgemeine Gaskonstante
r	mm	Radius
S	J/K	Entropie
s	mm	Hub
T	$^{\circ}C$	Temperatur
U	J	Innere Energie
U	V	Spannung
V	m^3	Volumen
\dot{V}	l/min	Volumenstrom/Durchfluss
W	J	Arbeit

Indizes

Index	Bedeutung
act	actuell
allg	allgemein
aus	Auslass
carnot	Carnot
D	Totraum gesamt
DE	Expansionsotraum
DK	Kompressionstotraum
E	Expansionsraum
ein	Einlass
el	elektrisch
ER	Erhitzerrohr
G	Generator
ges	gesamt
H	Heizung
HE	Expansionshubraum
HK	Kompressionshubraum
ideal	ideal
irr	irreversibel
K	Kompressionsraum
KW	Kühlwasser
m	arithmetisches Mittel
M	Motor
max	maximal
mech	mechanisch
min	minimal
o	obere
p	isobar
pV	p-V-Diagramm
R	Regenerator
real	real
rev	reversibel
rück	Rücklauf
set	setpoint
th	thermisch
u	untere
v	isochor
Welle	Kurbelwelle

1. Einleitung

Im Zeitalter unübersehbarer Umweltschäden, die auf die intensive Nutzung fossiler Energieträger zurückzuführen sind, ist die Suche nach umwelt- und sozialverträglicheren Energieträgern zwingend notwendig. Hier stellen die regenerativen Energien die einzig nachhaltige Alternative dar.

Doch auch bei der weiteren Nutzung fossiler Energieträger in einer Übergangszeit bis zur konsequenten Nutzung regenerativer Energien können Effizienz gesteigert und Emissionen gesenkt werden. Eine wichtige Technologie stellt die Kraft-Wärme-Kopplung dar [1, S.11].

Stirlingmotoren sind Wärmekraftmaschinen, d.h. sie wandeln Wärme hoher Temperatur in mechanische Energie und in Wärme niedriger Temperatur um. Die Wärmezufuhr geschieht von außen auf ein im Motor eingeschlossenes Arbeitsgas. Durch metallische Wände wird Wärme hoher Temperatur in den Motor gebracht (Erhitzer), an einer anderen Stelle (Kühler) wird Abwärme bei niedrigerer Temperatur abgegeben, am Schwungrad wird mechanische Energie frei. Sowohl die Abwärme als auch die mechanische Energie lassen sich vielfältig nutzen [2, S.1]. Der Stirlingmotor ist eine der ältesten Wärmekraftmaschinen und erlebt, nachdem er fast in Vergessenheit geraten war, heute eine Renaissance. Seine besonderen Eigenschaften machen ihn zu einer wichtigen Maschine für die Nutzung regenerativer Energien und für die Realisierung von Kraft-Wärme-Kopplung im Bereich kleiner Leistungseinheiten. Er kann so einen Beitrag zur Sicherung unserer Existenzgrundlagen leisten [1, S.5]. Der Stirlingmotor kann aufgrund der Wärmezufuhr mittels Wärmetauscher solare Wärme wie auch Wärme aus Feuerungen mit Biobrennstoffen nutzen und kann beim Betrieb mit fossilen Energieträgern wie Erdgas eine hohe Effizienz und sehr niedrige Abgasemissionswerte erzielen [1, S.11].

Darüber hinaus geht eine besondere Faszination von der Einfachheit dieser Maschine aus. So kommt die Stirlingmaschine völlig ohne Ventile und dem damit verbundenen aufwendigen Ventiltrieb aus. Bei Freikolbenmotoren (vgl. Kapitel 2.4.2) entfällt sogar der Kurbeltrieb. Die mathematische Beschreibung des realen Stirling-Prozesses ist dennoch äußerst komplex und wird häufig aufgrund des einfachen Aufbaus der Maschine unterschätzt [1, S.5].

Die Vorteile von Stirlingmotoren sind vielfältig. So zeichnet er sich durch seine Vielstofffähigkeit aus. Durch die Art der Wärmezufuhr kann jede Wärmequelle benutzt werden, um den Motor anzutreiben, daher sind alle gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffe, sowie Wärmestrahlung (Sonnenenergie) zum Antrieb geeignet, solange deren Temperatur ausreichend hoch ist. Der Stirlingmotor weist zudem eine Emissionsarmut auf. Bei der Verwendung von Sonnenlicht als Antriebsenergie entstehen keine Abgase. Bei der Verwendung von Brennstoffen können durch die stetige Verbrennung außerhalb des Motors die besten Abgaswerte im Vergleich zu Motoren mit innerer Verbrennung erreicht werden. Da keinerlei explosionsartige Vorgänge im Inneren des Motors ablaufen und auch keine Ventile vorhanden

sind, entstehen nur wenig Lärm und Erschütterungen. Das Getriebeöl wird nicht verbraucht und verschmutzt, daher reicht eine Füllung auf Lebenszeit. Manche Motoren laufen völlig ölfrei. Zudem weist der Motor eine Langlebigkeit auf. Da keine Fremdstoffe in den Motor gelangen und die Einzelteile relativ wenig belastet werden, kann man längere Laufzeiten erwarten als bei Otto- und Dieselmotoren. Sind Stirlingmotoren korrekt konstruiert und gebaut, ist deren Wirkungsgrad (Wellenleistung zu Brennerleistung) gleich oder höher als bei den besten Dieselmotoren. In Zukunft lassen sich Leistung und Wirkungsgrad mit neuen Werkstoffen wie Keramik noch weiter steigern. Stirlingmotoren können auch als kleine Motoren und im Teillastbereich hohe Wirkungsgrade erreichen [2, S.1].

Trotz der vielen Vorteile von Stirlingmotoren hat der zivile Markt, von Spielzeugmotoren und den Mikro-Heizkraftwerken einmal abgesehen, wenig anzubieten. Dafür gibt es zum einen technische Gründe. Wenn man bei kleiner Baugröße und geringem Gewicht hohe Leistungen erzielen will, muss man das Arbeitsgas unter hohem Druck (i.d.R. 50 bar) setzen, Wasserstoff oder Helium als Arbeitsgas verwenden und relativ hohe Drehzahlen erreichen (3000-4000 U/min). Die Schwierigkeiten dabei sind: trocken laufende Lager und Dichtungen, Material für Erhitzer (bis zu 800°C hitze- und druckbeständig) und ein hoher Aufwand für schnelle Leistungsregelung. Zum anderen sind wirtschaftliche Gründe zu nennen. Stirlingmotoren haben überall dort keine Chance zur Markteinführung, wo sie mit Otto- und Dieselmotoren konkurrieren müssen, z.B. als Antrieb für normale PKWs (ohne Hybridantrieb). Ein Stirlingmotor mit vergleichbarem Leistungsgewicht wie ein Ottomotor würde heute noch ca. zwei- bis dreimal teurer sein. Des Weiteren gibt es politische Gründe. Die Preise für fossile und atomare Energieträger sprechen nicht die ökologische Wahrheit, sie werden zu billig angeboten. Daher tun sich alle alternativen Technologien schwer bei der Markteinführung, da sie gegen zwar umweltschädigende, aber vordergründig billigere Technologien konkurrieren müssen. Darüber hinaus hat der Stirlingmotor nur einen geringen Bekanntheitsgrad. Nur wenige können erklären, wie ein Stirlingmotor funktioniert. Die meisten kennen ihn nicht einmal, da er in der Ausbildung, wenn überhaupt, nur am Rande erwähnt wird [2, S.4].

An dieser Stelle setzt die vorliegende Bachelorarbeit an. Da der Stirlingmotor das Potenzial birgt, in der zukünftigen Energiebereitstellung allgemein eine Rolle zu spielen, kann es von Interesse sein, dass die Hochschulen den Stirlingmotor behandeln. In dieser Bachelorarbeit wurde ein Versuchsstand zum Stirlingmotor entwickelt und ausgelegt, um Studierenden das thermodynamische Verhalten und ihre Zusammenhänge nahezubringen.

1.1. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Konzeptes und die Konstruktion des Aufbaus zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors. Es soll ein Versuchsstand und zugehörige Laborversuche entwickelt werden, die besonders die Wirkungsweise des Stirlingmotors verdeutlichen. Optimalerweise soll dafür der im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen bereits vorhandene Stirlingmotor wieder in Betrieb genommen und mit einer Heizung als Wärmequelle betrieben werden.

Insbesondere soll die Wahl eines Moduls getroffen werden, in welcher der Stirlingmotor-Versuchsstand eingebunden werden kann. Es soll eine Ist-Aufnahme des vorhandenen Versuchsstandes erfolgen und die technischen Anforderungen an die Wärmequelle erarbeitet werden. Anschließend wird ein entsprechendes Konzept zur Realisierung des Versuchsstandes vorgelegt und sinnvolle Messungen und Laborversuche präsentiert.

1.2. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen des Stirlingmotors erklärt und vorgestellt.

Kapitel 3 befasst sich mit der Planung des Versuchsstandes. Hierbei erfolgt eine didaktisch-methodische Analyse und eine Ist-Aufnahme des Versuchsstandes.

Kapitel 4 umfasst den konzeptionellen und konstruktiven Anteil der Arbeit. Es werden zwei Konzepte für den Aufbau des Versuchsstandes erarbeitet und eine Auswahl an Anlagenkomponenten getroffen sowie eine Kostenanalyse durchgeführt.

In Kapitel 5 werden auf Basis des zweiten Konzeptes mögliche Messungen und Laborversuche vorgeschlagen und dargestellt.

In Kapitel 6 folgen abschließend ein Fazit und ein Ausblick dieser Arbeit.

2. Grundlagen des Stirlingmotors

Der Begriff Stirlingmotor wird als Sammelbegriff für die vielfältigen Varianten derjenigen Wärmekraftmaschinen bezeichnet, bei denen der Stirling-Prozess (vgl. Kapitel 2.3.4) noch erkennbar ist. Genau genommen gehört die Stirlingmaschine zur Familie der Heißgasmotoren [3, S.6].

Stirlingmotoren arbeiten im Gegensatz zu Explosionsmotoren ohne innere Verbrennung. Mechanische Energie wird durch Gasdruck bereitgestellt. Es können die unterschiedlichsten Wärmequellen genutzt werden, um den Motor anzutreiben, so alle flüssigen, festen und gasförmigen Brennstoffe. Stirlingmaschinen sind wie kein anderer Energiewandler in der Lage, Solarenergie und nachwachsende Rohstoffe emissionsarm und klimaneutral für unsere Zwecke umzuwandeln [4, S.5]. In der theoretischen Berechnung hat der Stirlingmotor nicht nur einen höheren Wirkungsgrad als Dampfmaschinen, sondern auch als Verbrennungsmotoren wie Benzin- oder Dieselmotoren [4, S.11].

2.1. Geschichtliche Entwicklung

Der viele Jahrzehnte vergessene Stirling- oder Heißgasmotor wurde in den letzten Jahren wieder entdeckt. Im ersten Drittel des 18. Jahrhunderts begannen seine Entwicklung und sein praktischer Einsatz. Weit verbreitet und geschätzt war der Stirlingmotor im Kleingewerbe zum Antrieb von Maschinen mit kleinem Leistungsbedarf, bis er vor etwa 60 bis 70 Jahren durch den Otto- und Dieselmotor und die flächendeckende Versorgung mit elektrischem Strom verdrängt wurde [5, S.5].

1816 wurde der erste Stirlingmotor vom schottischen Geistlichen Robert Stirling zum Patent angemeldet und erreichte bereits die Leistung der damals üblichen Dampfmaschinen. Er arbeitet im Gegensatz zu Dampfmaschinen oder heutigen Dieselmotoren mit einem abgeschlossenen Arbeitsgas, das auf beliebige Weise erhitzt werden kann [6, S.1]. Die erste Maschine arbeitete als Wasserpumpe zur Entwässerung eines Steinbruchs in Schottland. Zu dieser Zeit waren Kesselexplosionen bei Dampfmaschinen relativ häufig. Stirling wollte die Arbeit in den Steinbrüchen und Kohlengruben sicherer machen. Neben der wesentlich verbesserten Sicherheit spielte wohl auch der geringere Brennstoffverbrauch der Stirlingmotoren gegenüber den Dampfmaschinen eine Rolle bei der Entwicklung der neuen Technik [2, S.3]. Die ersten Stirlingmaschinen konkurrierten mit der Dampfmaschine. Mit der Erfindung von Motoren mit innerer Verbrennung (Otto-Motor: 1876; Diesel-Motor: 1896) erwuchs der Stirlingmaschine weitere Konkurrenz [7, S.IX].

Am Anfang des 20. Jahrhunderts waren weltweit ca. 250.000 Stirlingmotoren als Tischventilatoren, Wasserpumpen und Antriebe für Kleingeräte wie z.B. Nähmaschinen im Einsatz. Sie versorgten Privat-

haushalte und kleine Handwerksbetriebe mit mechanischer Energie. Als sich Otto-, Diesel- und Elektromotoren immer weiter verbreiteten, wurden die Stirlingmotoren zunehmend vom Markt verdrängt [2, S.3].

1938 wurde die Stirlingmaschine von den niederländischen Philips Gloeilampenfabriken in Eindhoven wieder entdeckt. Philips suchte nach einem Antrieb für einen Stromgenerator für Radios. Die Entwicklung des Philips-Stirlingmotors zum Antrieb kleiner Stromgeneratoren wurde 1946 erfolgreich abgeschlossen. Aufgrund der Erfindung des Transistors kam es jedoch nicht zur Markteinführung.

Von Philips wurde die Entwicklung des Stirlingmotors unter Betrachtung unterschiedlichster Einsatzgebiete weitergeführt. Sie führte zu großen Erfolgen, aber auch zu heftigen Rückschlägen und Niederlagen. Andere Firmen, insbesondere US-amerikanische Autohersteller, begannen sich für den Stirlingmotor zu interessieren und wurden Lizenznehmer der niederländischen Firma. Es gelang jedoch nicht einen Durchbruch in der Entwicklung von Stirling-Automotoren zu erreichen. 1978 stellte die Firma Ford, der damals wichtigste Philips-Lizenznehmer, seine Entwicklungsarbeiten am Stirlingmotor ein, was die Beendigung der diesbezüglichen Forschungsarbeiten des Philips' Konzern nach sich führte. Auch andere namhafte Unternehmen wie z.B. MAN zogen sich aus der Entwicklung der Stirlingmaschinen zurück.

Kommerziellen Erfolg hatte die Stirling-Maschine in anderen Einsatzgebieten. Stirling-Kältemaschinen für die Gasverflüssigung wurden von Philips seit 1955 in Serie hergestellt und verkauft. Von einer aus dem Philips Konzern abgespalteten Firma werden sie auch heute noch produziert und vertrieben. Miniatur-Stirling-Kältemaschinen zur Kühlung von Infrarotsensoren (Einsatz für Militärs und z.B. in der Medizintechnik) werden heutzutage in hohen Stückzahlen produziert und weltweit vermarktet [7, S.IX f.].

Zahlreiche Maschinen haben mittlerweile einen hohen Entwicklungsstand erreicht, verschiedene Modelle sind am Markt verfügbar [1, S.5]. Weltweit arbeiten heute über 100 Firmen, Universitäten und andere Forschungseinrichtungen an der Entwicklung und Verbesserung der Stirlingmaschinen und deren Anwendung [3, S.6].

2.2. Aufbau und Funktionsprinzip

2.2.1. Aufbau

Der Stirlingmotor ist eine Kolben-Wärmekraftmaschine, die aus dem Temperaturgefälle zwischen dem aufgeheizten und dem gekühlten Teil der Maschine mechanische Arbeit erzeugt. Dabei wird eine in der Maschine eingeschlossene Gasmenge, die sich nicht verbraucht, im Takt der Drehzahl des Stirlingmotors aufgeheizt und wieder abgekühlt. Das Arbeitsgas besteht aus Luft, Stickstoff, Helium oder Wasserstoff. Die Wärmezufuhr und -übertragung erfolgt von außen; bei einfachen Motoren durch die Zylinderwand des heißen Zylinders, bei leistungsfähigen Motoren in der Regel durch die Wand des Erhitzers. Die durch das Aufheizen und Abkühlen im Arbeitsgas entstehenden Druckänderungen werden

von einem Kolben, der in der Regel über einen Pleuel eine Kurbelwelle antreibt, in mechanische Arbeit umgewandelt.

Um das zum Betrieb des Stirlingmotors nötige Temperaturgefälle zu erzeugen, muss der Motor neben dem Erhitzer einen Kühler besitzen. Der Wirkungsgrad des Stirlingmotors steigt mit zunehmendem Temperaturgefälle zwischen Erhitzer und Kühler. Der Kühler führt den Teil der zugeführten Wärme, die nicht in mechanische Energie umgewandelt und nicht im Regenerator zwischengespeichert wurde, mit dem Kühlwasser ab. Diese Wärme kann als Heizenergie durch den Kühlkreislauf ausgekoppelt werden.

Der Regenerator ist ein Kurzzeitwärmespeicher. Er ist dem Kühler vorgeschaltet und entzieht dem Arbeitsgas Wärme, bevor es in den Kühler strömt. Auf dem Weg vom Kühler zurück zum Erhitzer wird das Arbeitsgas vom Regenerator vorgewärmt. Der Regenerator ist eines der wichtigsten Bauteile des Stirlingmotors [5, S.83].

Es gibt verschiedene Bauarten des Stirlingmotors (vgl. Kapitel 2.4). Abbildung 2.2.1 zeigt den Aufbau eines schematischen Stirlingmotors, bei dem zwei Kolben, ein Verdrängerkolben und ein Arbeitskolben, in einem Zylinder angebracht sind. Die beiden Kolben bewegen sich mit 90° Phasenverschiebung.

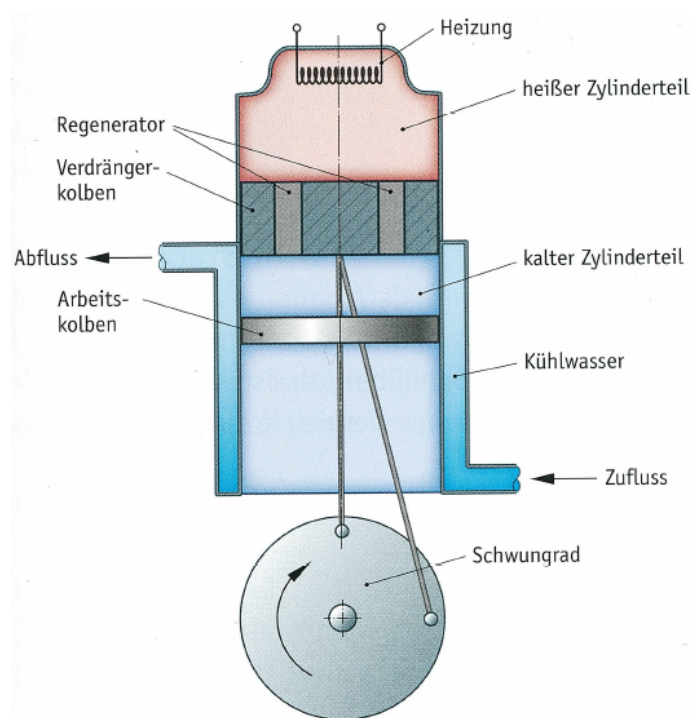


Abbildung 2.2.1. – Schematischer Aufbau eines Stirlingmotors (Schnittdarstellung) [8, S.105]

Der Verdrängerkolben hat die Aufgabe, das Arbeitsgas zwischen dem heißen und dem kalten Zylinderbereich hin- und herzuschieben. Zu diesem Zweck sind in dem Verdrängerkolben Überströmkanäle angebracht, welche mit dem Regenerator gefüllt sind. Der Arbeitskolben wie der Verdrängerkolben sind

über Pleuelstangen mit einem Schwungrad verbunden [8, S.105].

2.2.2. Funktionsprinzip und Wirkungsweise

Die theoretische Erklärung und die Grundlagen der Wirkungsweise basieren auf Druck- und Volumenänderungen in einem fortlaufenden Kreisprozess. Ein Prozess, bei dem ein System seinen Anfangspunkt wieder erreicht, ist ein Kreisprozess [4, S.14].

Der Stirlingmotor in Abbildung 2.2.1 funktioniert, indem das Arbeitsgas durch den Verdrängerkolben zwischen dem heißen und dem kalten Zylinderteil hin- und hergeschoben wird. In dem heißen Zylinderteil expandiert das Gas und verrichtet damit Arbeit an dem Arbeitskolben; im kalten Zylinderteil wird das Gas von dem Arbeitskolben komprimiert. Am Verdränger wird keine Arbeit verrichtet. Da zur Kompression des kalten Gases weniger Arbeit aufzuwenden ist als bei der Expansion des heißen Gases abgegeben wird, gibt der Stirlingmotor Nutzarbeit nach außen ab [8, S.105].

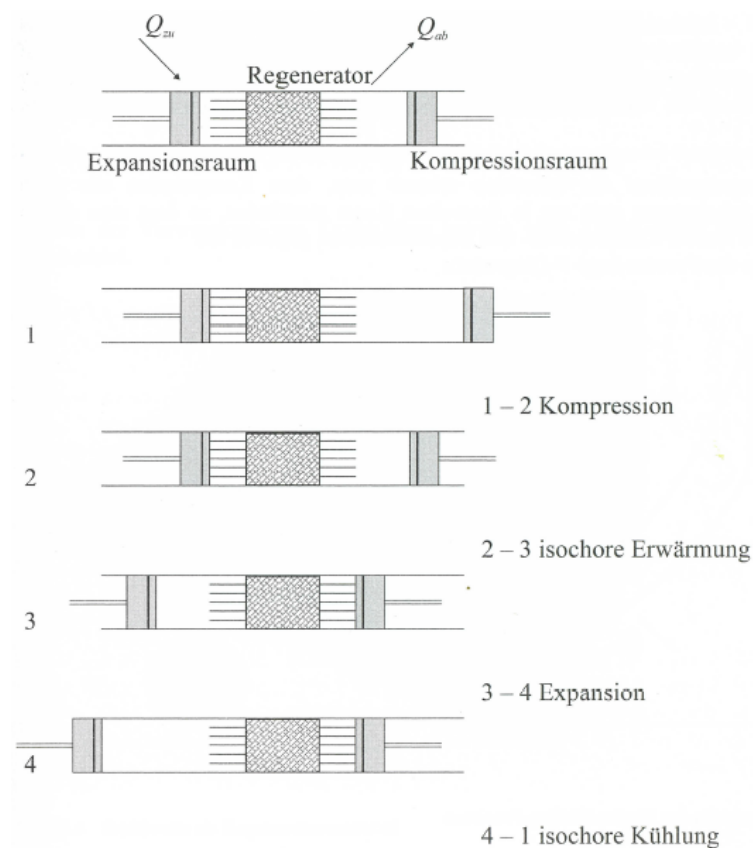


Abbildung 2.2.2. – Funktionsprinzip des Stirling-Prozesses [1, S.17]

Der Stirlingmotor durchläuft den Kreisprozess mit zwei Kolbenhüben; er ist somit ein Zweitaktmotor. Anhand des Bewegungsablaufes in der Maschine erhält man eine anschauliche Vorstellung dieses Prozesses. Abbildung 2.2.2 zeigt den schematischen Aufbau einer Stirlingmaschine mit den Kolben in

vier signifikanten Punkten des Zyklus. Die vier Prozessschritte und das daraus sich ergebende Vergleichsdiagramm (p-V-Diagramm), welches Abbildung 2.2.3 zeigt, sind im Folgenden dargestellt.

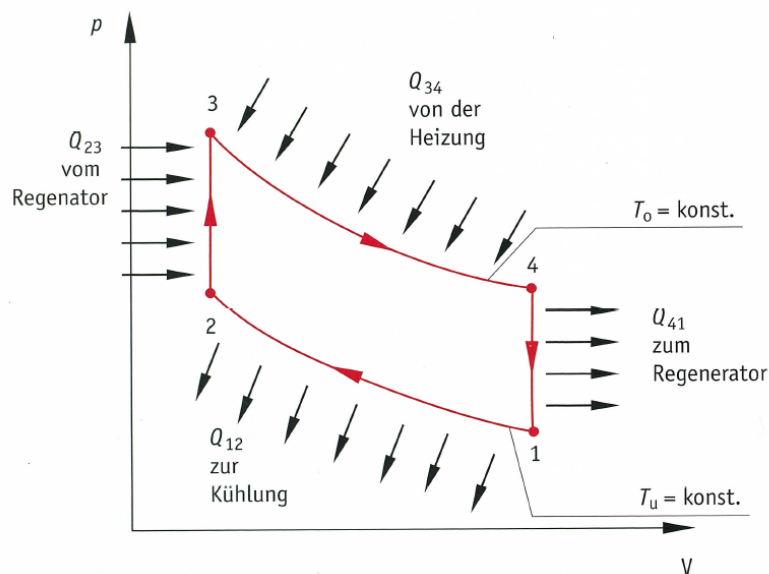


Abbildung 2.2.3. – Vergleichsprozesse des Stirlingmotors [8, S.106]

1. Prozessschritt (1 → 2)

Isotherme Verdichtung

Während der Kolben im Expansionsraum in seiner Position unmittelbar vor dem Regenerator verharrt, schiebt der Kompressionskolben das Arbeitsgas, das sich zu diesem Zeitpunkt vollständig im Kompressionsraum befindet, zusammen. Dadurch wird das kalte Gas komprimiert, was gleichbedeutend mit einer Vergrößerung der Dichte ist. Der Druck des Arbeitsgases nimmt zu. Da das Gas während dieser Kompression in thermischem Kontakt mit der Kühlung steht, erfolgt die Verdichtung bei der unteren Temperatur T_u näherungsweise isotherm; die Wärme Q_{12} wird von dem Arbeitsgas an die Kühlung abgeführt.

2. Prozessschritt (2 → 3)

Isochore Erwärmung

Kompressions- und Expansionskolben bewegen sich synchron in die gleiche Richtung. Das kalte komprimierte Arbeitsgas wird dadurch von dem kalten Zylinderteil (Kompressionsraum) in den heißen Zylinderteil (Expansionsraum) verdrängt. Das Volumen im Expansionsraum vergrößert sich somit in genau dem Maße, in dem das Volumen im Kompressionsraum kleiner wird. In Abbildung 2.2.3 kann man erkennen, dass das Volumen des eingeschlossenen Arbeitsgases während dieses Vorgangs konstant bleibt. Dabei strömt das Gas durch den Regenerator und nimmt von diesem isochor die Wärme Q_{23} auf, wodurch es auf die obere Temperatur T_o gebracht wird. Mit der Wärmeaufnahme geht eine Erhöhung des Drucks des Arbeitsgases einher.

3. Prozessschritt (3 → 4)

Isotherme Expansion

Während der Kompressionskolben im Kompressionsraum in seiner Position verharrt, bewegt sich der Expansionskolben nach links, so dass sich das Volumen des Arbeitsgases vergrößert und seine Dichte verringert. Dabei steht das Gas in thermischem Kontakt mit der Heizung und nimmt von dieser die Wärme Q_{34} auf, so dass die Expansion bei der Temperatur T_o isotherm erfolgt.

4. Prozessschritt (4 → 1)

Isochore Abkühlung

Kompressions- und Expansionskolben bewegen sich synchron nach rechts. Dadurch wird das heiße Arbeitsgas von dem heißen Zylinderteil in den kalten verschoben. Beim Strömen durch den kalten Regenerator gibt das Gas die Wärmemenge Q_{41} isochor an den Regenerator ab, wodurch seine Temperatur auf T_u absinkt. Das Arbeitsgas erreicht somit den Kompressionsraum wieder auf dem tiefen Temperaturniveau, auf dem es ihn beim Überschieben vom Zustandspunkt 2 zu Zustandspunkt 3 verlassen hat. Der Druck im Zustandspunkt 1 liegt niedriger als im Zustandspunkt 2, weil das im Kompressionsraum eingeschlossene Volumen größer ist [8, S.106f.] [7, S.3f.].

Indem das Gas wieder den Zustandspunkt 1 erreicht hat, ist der Kreisprozess geschlossen. Sein Nutzen besteht in der netto erzeugten Arbeit, die dadurch entsteht, dass die vom Arbeitsgas bei der Expansion abgegebene Arbeit größer ist als die dem Arbeitsgas während der Kompression zugeführte Arbeit [7, S.4].

2.2.3. Wärmekraft- oder Arbeitsmaschine

Im Gegensatz zu den Verbrennungsmotoren, die nur in eine energetische Richtung funktionieren, können Stirlingmotoren reversibel betrieben werden. Dadurch kann sowohl ein Temperaturpotenzial in mechanische Energie umgewandelt werden als auch durch mechanische Energie ein Temperaturpotenzial erzeugt werden [4, S.12]. Eine Stirlingmaschine kann somit prinzipiell sowohl als Wärmekraftmaschine wie auch als Kältemaschine bzw. Wärmepumpe benutzt werden. Ob die Maschine nun als Kraft- oder Arbeitsmaschine wirkt, richtet sich danach, ob sie entweder beheizt und gekühlt wird und so als Motor arbeitet oder ob sie extern angetrieben und als Arbeitsmaschine Wärme von der kalten Seite auf die warme Seite überträgt und so als Kältemaschine oder als Wärmepumpe genutzt wird. Wird sie als Arbeitsmaschine betrieben, so behalten Expansions- und Kompressionsraum ihre Funktion bei. Im Expansionsraum wird von außen weiterhin Wärme aufgenommen, im Kompressionsraum wird Wärme nach außen abgeführt. Allerdings ist in diesem Fall der Expansionsraum der kältere, der Kompressionsraum der wärmere Raum [1, S.25].

2.3. Thermodynamische Grundlagen

2.3.1. Hauptsätze der Thermodynamik

Um sich ein Bild von der Thermodynamik des Stirlingmotors machen zu können, ist es notwendig, die Hauptsätze der Thermodynamik zu kennen und zu verstehen.

0. Hauptsatz der Thermodynamik

Zwei geschlossene Systeme sind im thermischen Gleichgewicht miteinander, wenn sie beide die gleiche Temperatur haben [3, S.17].

1. Hauptsatz der Thermodynamik

(*Energiesatz*)

Gesetz der Erhaltung der Energie: Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden, sie kann aber weder erzeugt noch verrichtet werden. Die Änderung der inneren Energie U des thermodynamischen Systems ist gleich der dem System zu- oder abgeführten Wärme Q oder der am System oder vom System geleisteten Arbeit W . In einem abgeschlossenen thermodynamischen System ist daher die innere Energie konstant, da die Änderung der inneren Energie null ist [9, S.332].

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (2.1)$$

2. Hauptsatz der Thermodynamik

(*Entropiesatz*)

Bei einer spontanen Zustandsänderung vergrößert sich die Entropie S .

Aussage über die Richtung der Energieumwandlung: Nach dem 1. Hauptsatz ist jede beliebige Energieumwandlung denkbar. Bei natürlichen Prozessen ist eine vollständige Energieumwandlung niemals möglich. Alle realen Umwandlungen oder Übertragungen von Energie in Maschinen und Apparaten unterliegen dieser Einschränkung und sind somit nicht umkehrbar, sie sind irreversibel [9, S.336f.].

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad (2.2)$$

$$dS > \frac{\delta Q_{irr}}{T} \quad (2.3)$$

2.3.2. Der Carnot-Prozess

Der französische Physiker und Ingenieur Sadi Carnot entdeckte, dass es sich bei der Arbeitsleistung (Dampfmaschine und Stirlingmotor) um einen periodischen Vorgang handelt. Er gab dafür einen ideal gedachten Prozess an, der als *Carnot-Prozess* bezeichnet wird. Der Carnot-Prozess liegt bis heute jeder Konstruktion und Berechnung periodisch arbeitender Wärmekraftmaschinen zugrunde [4, S.15].

Beim Carnot-Prozess wird der größte überhaupt mögliche Anteil der zugeführten Wärme Q in Nutzarbeit W umgewandelt. Daher dient dieser Kreisprozess zur Beurteilung anderer Kreisprozesse. Neben

dem Carnot-Prozess gibt es noch eine Reihe anderer Prozesse mit einem nahezu gleichen theoretischen Wirkungsgrad η .

Abbildung 2.3.1 zeigt das p-V-Diagramm und das T-s-Diagramm des Carnot-Prozesses. Es besteht aus zwei Isothermen ($1 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 4$) und zwei Isentropen ($2 \rightarrow 3, 4 \rightarrow 1$) [3, S.19].

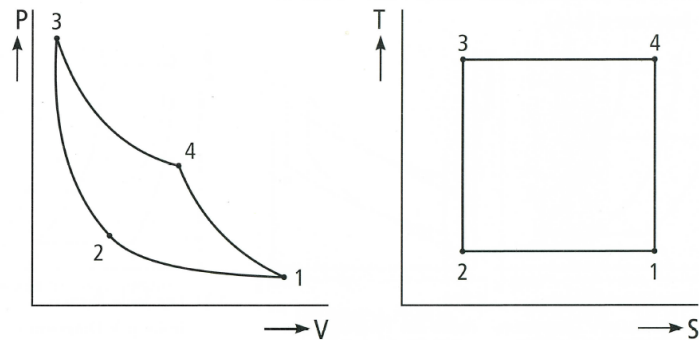


Abbildung 2.3.1. – p-V-Diagramm und T-s-Diagramm des Carnot-Prozesses [3, S.19]

Carnots fundamentaler Ansatz sagt aus, dass überall dort, wo ein Temperaturunterschied existiert, bewegte Kraft erzeugt werden kann, da Wärme stets bestrebt ist, von einem heißen in einen kalten Zustand überzugehen [4, S.15]. Der Carnot-Prozess beschreibt die ideale Umwandlung und liefert folgende Ergebnisse [3, S.19]:

$$W_{carnot} = -\left(1 - \frac{T_1}{T_3}\right) \cdot Q_{34} \quad (2.4)$$

$$\eta_{carnot} = \frac{|W_{carnot}|}{Q_{34}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (2.5)$$

Aus den Hauptsätzen kann gefolgert werden:

$\eta_{carnot} = 1$ ist nicht erreichbar, weil T_1 praktisch nicht auf Null gebracht werden kann.

$\eta_{carnot} = 0$ wenn kein Temperaturunterschied besteht.

Der Wirkungsgrad η ist umso günstiger, je niedriger T_1 und je höher T_3 ist.

2.3.3. Der ideale Stirling-Prozess

Die Stirlingmaschine ist ein mechanisches Gebilde, mit dessen Hilfe ein geschlossener, regenerativer thermodynamischer Kreisprozess realisiert wird, in dessen Verlauf ein Arbeitsmedium auf verschiedenen Temperaturniveaus komprimiert und expandiert wird (vgl. Kapitel 2.2.2). Die Strömung des Arbeitsmediums wird dabei ausschließlich durch Änderungen des inneren Volumens in der Maschine hervorgerufen. Das Ergebnis des thermodynamischen Kreisprozesses ist eine Netto-Umwandlung von

Wärme in Arbeit oder umgekehrt.

Abbildung 2.3.2 zeigt eine Darstellung des idealen Stirling-Prozesses für den Motor im p-V-Diagramm und im T-s-Diagramm.

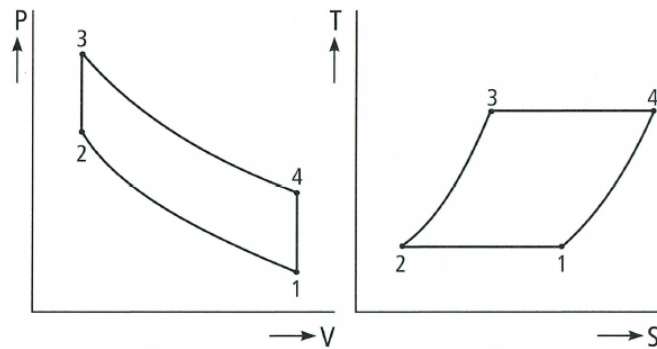


Abbildung 2.3.2. – p-V-Diagramm und T-s-Diagramm des idealen Stirling-Prozesses [3, S.21]

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, besteht der Prozess aus zwei isothermen Zustandsänderungen ($1 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 4$) und zwei isochoren Zustandsänderungen ($2 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 1$) [7, S.1f.].

Im T-s-Diagramm entspricht stets die Fläche unter einer Kurve der ausgetauschten Wärme, und so lässt die Abbildung 2.3.3 erkennen, dass die Wärme Q_{23} und die Wärme Q_{41} betragsgleich sind. Sie lassen sich also im Regenerator zwischenspeichern. Der Prozess tauscht also nur noch auf den Isothermen Wärme mit der Umgebung aus und entspricht damit effektiv dem Carnot-Prozess.

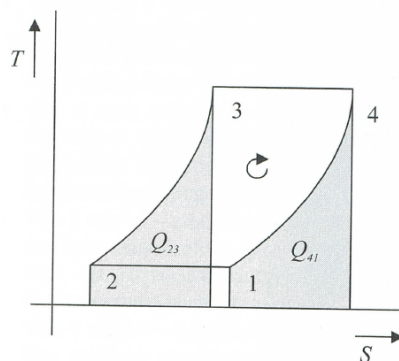


Abbildung 2.3.3. – T-s-Diagramm des idealen Stirling-Prozesses [1, S.20]

Auf den Isochoren ist definitionsgemäß das Volumen konstant, so dass keine Arbeit geleistet werden kann. Aus dem 1. Hauptsatz folgt damit:

$$Q_{23} = m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) \quad \text{für die Erwärmung des Fluides} \quad (2.6)$$

$$Q_{41} = m \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1) \quad \text{für die Abkühlung des Fluides} \quad (2.7)$$

Da die Isochoren wiederum über die Isothermen verbunden sind, gilt für die Temperaturen:

$$T_3 = T_4 \quad \text{und} \quad T_2 = T_1 \quad (2.8)$$

Daraus folgt unmittelbar:

$$Q_{23} = -Q_{41} \quad (2.9)$$

Lässt man die Flächen der Isochoren im T-s-Diagramm wegfallen, da diese Wärme nur intern ausgetauscht wird, kommt man zu Abbildung 2.3.4 links. Da die Positionen der beiden Flächen auf der Abszisse für die Wärmemenge keine Bedeutung haben, lassen sich die Flächen übereinanderschieben (Abbildung 2.3.4 rechts) und man erhält so effektiv den Carnot-Prozess mit seinem idealen Wirkungsgrad.

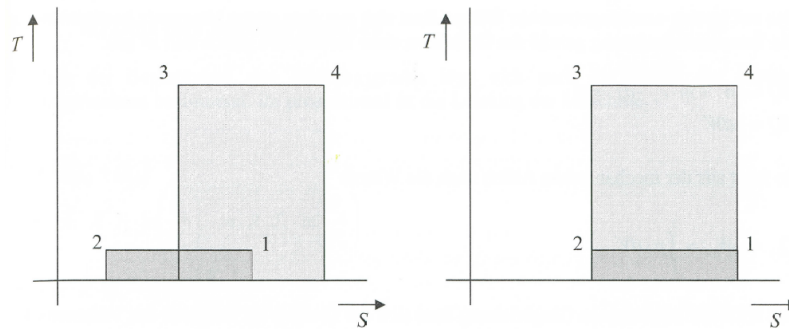


Abbildung 2.3.4. – Wärmeaustausch des Stirling-Prozesses mit der Umgebung [1, S.21]

Man könnte annehmen, dass auch während der isochoren Zustandsänderung ein Wärmeaustausch in Erhitzer und Kühler stattfindet, da diese beiden Wärmeaustauscher gerade dann am intensivsten durchströmt werden. Ein Wärmetausch findet dort jedoch nicht statt, da bei einem idealen Regenerator das Arbeitsgas schon mit der Temperatur in den Erhitzer bzw. Kühler gelangt, die dieser besitzt. Es entsteht also kein Temperaturgefälle zwischen Gas und Wand und somit auch keine Wärmeübertragung [1, S.20f.].

Wirkungsgrad des Idealprozesses

Als thermischer Wirkungsgrad η_{th} eines Kreisprozesses wird das Verhältnis von erzielttem Nutzen zu erforderlichem Aufwand bezeichnet.

Da der ideale Stirling-Prozess nur auf den Isothermen Wärme mit der Umgebung austauscht, sind auch nur diese für die Bestimmung des Wirkungsgrades relevant. Nach der allgemeinen Definition eines Kreisprozesses befindet sich das Arbeitsgas nach einem vollständigen Durchlauf wieder in seinem Ursprungszustand. Die innere Energie U am Ende entspricht damit wieder der ursprünglichen inneren Energie. Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik folgt damit:

$$\oint dQ + \oint dW = \Delta U = 0 \quad (2.10)$$

$$Q_{12} + Q_{34} = -W \quad (2.11)$$

Für den Stirling-Prozess folgt damit:

$$\eta_{th} = \frac{|W|}{Q_{34}} \quad (2.12)$$

$$\eta_{th} = \frac{-W}{Q_{34}} = \frac{Q_{12} + Q_{34}}{Q_{34}} = 1 + \frac{Q_{12}}{Q_{34}} \quad (2.13)$$

Die auf Isothermen ausgetauschte Wärme lässt sich aus dem 1. Hauptsatz bestimmen. Da die Temperaturänderung gemäß der Definition einer Isothermen gleich null ist, gilt:

$$dQ + dW = m \cdot c_v \cdot dT = 0 \quad (2.14)$$

$$dQ = -dW \quad (2.15)$$

So folgt aus der mechanischen Arbeit auch die Wärme

$$Q_{12} = -W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \quad (2.16)$$

Mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung lässt sich der Druck p als Funktion des Volumens V ausdrücken:

$$p(V) = \frac{m \cdot R \cdot T}{V} \quad \text{mit } T = \text{konst.} \quad (2.17)$$

$$Q_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2.18)$$

$$Q_{34} = \int_3^4 p \cdot dV = m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (2.19)$$

Da aus dem Prozessverlauf erkennbar ist, dass

$$V_2 = V_3 \quad \text{und} \quad V_4 = V_1 \quad (2.20)$$

sind, lässt sich die Wärme Q_{34} über V_1 und V_2 ausdrücken.

$$Q_{34} = \int_3^4 p \cdot dV = m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = -m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (2.21)$$

Eingesetzt in die Gleichung 2.13 ergibt sich:

$$\eta_{th} = 1 + \frac{m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}{-m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (2.22)$$

Mit $T_1 = T_2 = T_K$ Kompressionsraumtemperatur
und $T_3 = T_4 = T_E$ Expansionsraumtemperatur folgt:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_K}{T_E} \quad (2.23)$$

Der Wirkungsgrad des Idealprozesses entspricht damit dem des Carnot-Prozesses und ist lediglich eine Funktion der beiden Prozesstemperaturen [7, S.4ff.] [1, S.21f.].

Arbeit des Idealprozesses

Die von einem Kreisprozess geleistete Arbeit lässt sich berechnen als die Summe aller während der einzelnen Zustandsänderungen vom Arbeitsmedium oder am Arbeitsmedium geleisteten Volumenänderungsarbeiten. Da bei den Zustandsänderungen ($2 \rightarrow 3$) und ($4 \rightarrow 1$) keine Volumenänderungen stattfinden, ergibt sich die vom Kreisprozess geleistete Arbeit als die Summe der bei der Verdichtung ($1 \rightarrow 2$) am Arbeitsgas verrichteten Arbeit und bei der Expansion ($3 \rightarrow 4$) geleisteten Arbeit. Ähnlich der Bestimmung des Wirkungsgrades lässt sich somit auch die Arbeit des idealen Stirling-Prozesses bestimmen. Ihr proportional ist die Leistung der Maschine.

$$W = -[Q_{12} + Q_{34}] \quad (2.24)$$

Mit den Gleichungen 2.18 und 2.21 folgt:

$$W = m \cdot R \cdot (T_3 - T_1) \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = -m \cdot R \cdot (T_3 - T_1) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.25)$$

$$|W| = m \cdot R \cdot (T_3 - T_1) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.26)$$

Die vom Kreisprozess geleistete Arbeit entspricht somit der in Abbildung 2.3.2 im p-V-Diagramm eingeschlossenen Fläche [7, S.4 f.] [1, S.23].

Arithmetischer Mitteldruck des Idealprozesses

Die Gleichung 2.26 für die Arbeit des Idealprozesses ist für die Anschauung etwas unübersichtlich, da die Gasmasse m von den Volumina V_1 und V_2 abhängt. Im Folgenden soll diese Gleichung in eine andere Form überführt werden, die den arithmetischen Mitteldruck p_m des Prozesses statt der Gasmasse enthält.

Der arithmetische Mitteldruck des Idealprozesses wird über das Volumen berechnet:

$$p_m = \frac{\int_2^1 p \cdot dV + \int_3^4 p \cdot dV}{2 \cdot \Delta V} \quad (2.27)$$

$$p_m = \frac{m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{2 \cdot (V_1 - V_2)} = \frac{m \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \cdot (T_1 + T_3)}{2 \cdot (V_1 - V_2)} \quad (2.28)$$

Hinweis: Für die isotherme Zustandsänderung ($1 \rightarrow 2$) wird hier nicht von 1 nach 2, sondern von 2 nach 1 integriert, da sonst der Wert des Integrals negativ wäre und nicht zum gewünschten Mitteldruck führt.

Durch Umformung erhält man:

$$\frac{p_m \cdot 2 \cdot (V_1 - V_2)}{(T_1 + T_3)} = m \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (2.29)$$

Eingesetzt in die Gleichung 2.25 für die Arbeit des Idealprozesses ergibt sich:

$$W = -2 \cdot p_m \cdot (V_1 - V_2) \cdot \frac{(T_3 - T_1)}{(T_1 + T_3)} \quad (2.30)$$

Für ein gegebenes veränderliches Volumen $V_1 - V_2$ und gegebenen Mitteldruck p_m ist die Arbeit konstant und damit unabhängig von V_2 [1, S.23f.].

Der ideale Regenerator

Der Regenerator ist das Bauteil einer Stirlingmaschine, durch das dieser Maschinentyp theoretisch den Carnot-Wirkungsgrad erreichen kann. Der Regenerator ist eine thermische Speichermasse, die während der einen Zyklushälfte Wärme vom Arbeitsgas aufnimmt und während der anderen Zyklushälfte Wärme an das Arbeitsgas abgibt. Im Allgemeinen werden als Regenerator mehrere aufeinander gestapelte Lagen eines feinen Drahtgewebes eingesetzt. Besonders gut eignen sich sehr kleine Drahtdurchmesser von $< 0,03$ - $0,2$ mm. Der Vorteil kleiner Drahtdurchmesser liegt in der großen Oberfläche für den Wärmeübergang bei gleichzeitig relativ hohem Lückengrad des Regenerators.

Der ideale Regenerator in Abbildung 2.3.5 hat auf seiner linken Seite die niedrige Temperatur des Kompressionsraums und auf seiner rechten Seite die hohe Temperatur Expansionsraum. Innerhalb des Regenerators verläuft die Temperatur linear von der tiefen Temperatur zur hohen Temperatur. Die Wärmekapazität des Regenerators ist so hoch, dass sich die Temperatur des Regeneratormaterials beim Durchströmen des Arbeitsgases nicht ändert. Der Wärmeübergang von dem Regeneratormaterial auf das Arbeitsgas ist so gut, dass das den Regenerator durchströmende Gas an jeder Stelle des Regenerators exakt die gleiche Temperatur wie das Regeneratormaterial hat. In der idealen Theorie hat der Regenerator kein Volumen, das Durchströmen erfolgt verlustfrei und der thermische Wirkungsgrad des Regenerators ist $\eta_{th} = 1$ [7, S.3, 102ff.].

Abbildung 2.3.5 zeigt das lineare Temperaturprofil des idealen Regenerators.

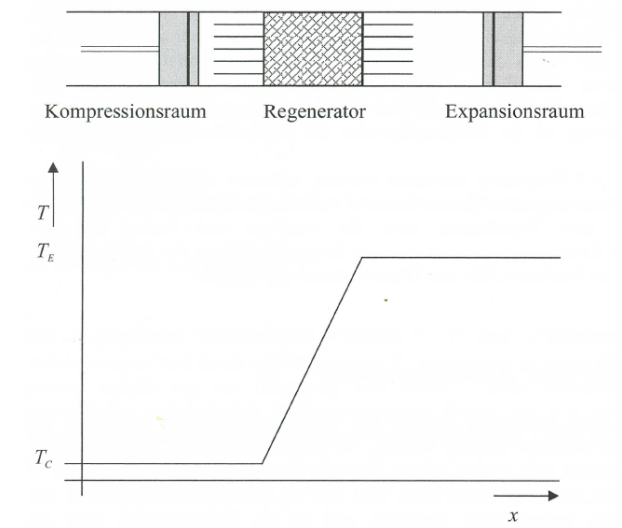


Abbildung 2.3.5. – Ideales Temperaturprofil im Regenerator [1, S.26]

2.3.4. Der reale Stirling-Prozess

Der ideale Stirling-Prozess ist, wie alle anderen idealen Kreisprozesse auch, nicht zu realisieren. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Abweichungen vom Ideal-Prozess genannt werden und gleichzeitig auch eine Einführung in die Problematik des Stirlingmotors erfolgen.

Kolbenbewegung

Der Bewegungsablauf des idealen Stirling-Prozesses ist diskontinuierlich. Die Kolben werden für bestimmte Prozessphasen angehalten. Während der Kompression verharrt der Expansionskolben in Ruhe und während der Expansion bewegt sich der Kompressionskolben nicht. Wenn sich die Kolben bewegen, so erfolgt ihre Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit [7, S.7f.].

Sich einem solchen Bewegungsablauf in der Praxis auch nur anzunähern würde eine komplizierte Kinematik des Kurbeltriebs erfordern und sehr hohe Beschleunigungen und somit auch hohe Kräfte mit sich bringen. Im Allgemeinen werden in der Praxis daher konventionelle Kurbeltriebe verwendet, die eine kontinuierliche, annähernd sinusförmige Bewegung der Kolben erzeugen [1, S.25].

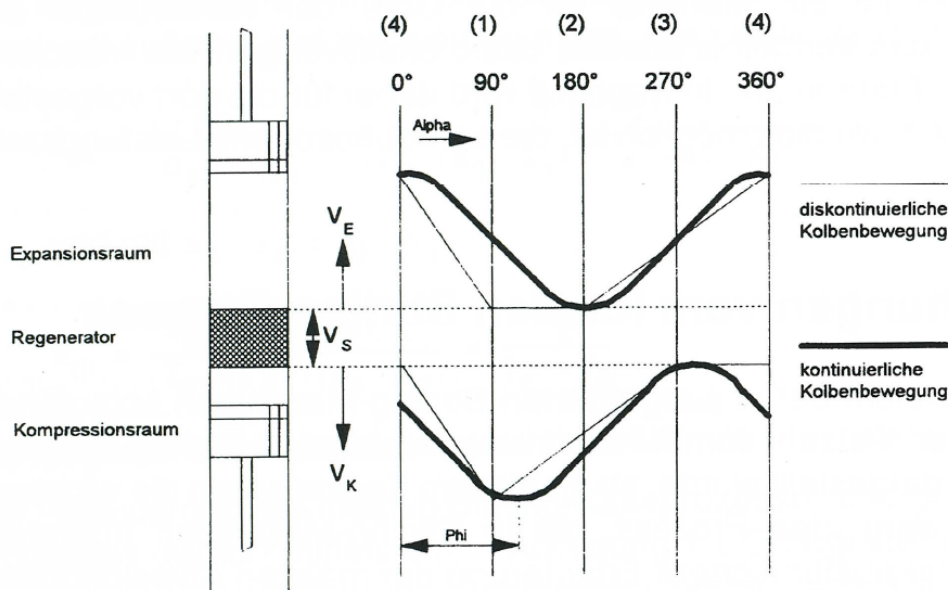


Abbildung 2.3.6. – Vergleich von kontinuierlicher und diskontinuierlicher Kolbenbewegung [7, S.8]

Abbildung 2.3.6 zeigt einen Vergleich von kontinuierlicher und diskontinuierlicher Kolbenbewegung. In dieser Abbildung sind die Volumenänderungen von Expansionsraum und Kompressionsraum in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel α dargestellt. Die Phasenverschiebung zwischen der Bewegung des Expansionskolbens und der Bewegung des Kompressionskolbens liegt üblicherweise im Bereich von 90° . Die Phasenverschiebung kann aber auch ebenso gut, wie in Abbildung 2.3.6 dargestellt, 120° betragen [7, S.9].

Abbildung 2.3.7 zeigt die Auswirkungen der Bewegungsarten auf den Kreisprozess. Da die Ecken im p-V-Diagramm „verrundet“ werden, reduziert sich die Leistung der Maschine.

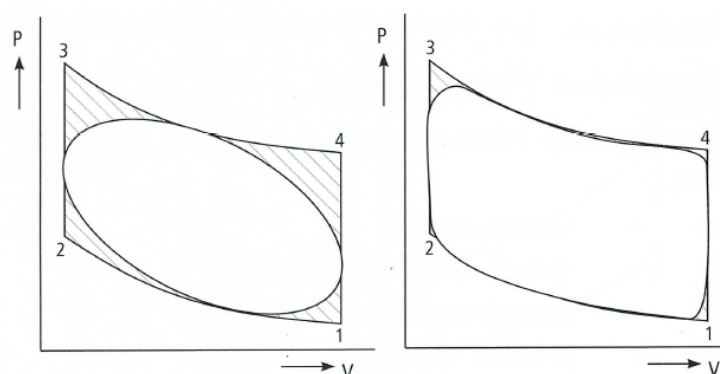


Abbildung 2.3.7. – Auswirkungen der Bewegungsarten auf den Kreisprozess. links: sinusförmige Bewegung; rechts: diskontinuierliche Bewegung [3, S.22]

Die sinusförmige Bewegung (Abbildung 2.3.7 links) bewirkt, dass der Wirkungsgrad der Stirlingmaschine geringer ist. Die Fläche des ovalen Kreises entspricht dem nutzbaren Bereich. Bei der diskontinuierlichen Bewegung (Abbildung 2.3.7 rechts) sind der nutzbare Bereich und damit der Wirkungsgrad (entsprechend der größeren Fläche) hier deutlich größer [4, S.19].

Totraum

In Abbildung 2.3.6 erkennt man noch eine weitere Abweichung realer Stirlingmaschinen; das Vorhandensein von Totraum. Im Idealfall befindet sich das gesamte Arbeitsmedium im Expansions- und Kompressionsraum. In Abbildung 2.3.6 beschränkt sich der Totraum auf das Regeneratorvolumen, das - anders als in der Theorie - nicht gleich null ist. In ausgeführten Maschinen müssen weitere Volumina zu dem Totvolumen des Regenerators hinzuaddiert werden (z.B. Überströmleitungen oder zusätzliche Wärmetauscher). Gemeinsames Merkmal aller Toträume ist, dass sich ihr Volumen während eines Kreisprozesszyklusses in der Maschine nicht ändert. Damit verringert sich das Verhältnis von maximalen zu minimalen Volumen (V_{max}/V_{min}) und damit das Druckverhältnis p_{max}/p_{min} in der Stirlingmaschine. Die Folge davon ist eine Verringerung der Leistungsausbeute im Motor, welches in Abbildung 2.3.8 dargestellt wird [7, S.9].

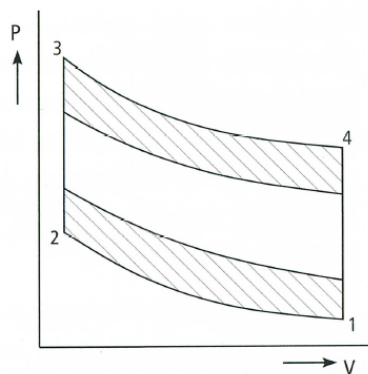


Abbildung 2.3.8. – Auswirkungen des Totraums auf den Kreisprozess im p-V-Diagramm [3, S.23]

Zusätzliche Wärmetauscher

Die meisten Stirlingmaschinen weisen zu beiden Seiten des Regenerators zusätzliche Wärmetauscher auf. Diese werden erforderlich, um am Kompressionsraum die bei der Kompression anfallenden Wärmemengen aus der Maschine herauszubekommen und um am Expansionsraum die bei der Expansion vom Gas aufzunehmende Wärme in die Maschine hineinzubekommen. Bei dem idealen Stirlingprozess erfolgt die Wärmeabgabe bzw. -aufnahme über die Zylinderwände vom Kompressions- bzw. Expansionsraum. Leider sind die dabei für die Wärmeübertragung zur Verfügung stehenden Flächen außerordentlich klein. Stehen für den Wärmeübergang aber nur kleine Flächen zur Verfügung, so sind, um die Übertragung einer bestimmten Wärmemenge zu ermöglichen, große Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Seiten der Wand erforderlich. Große Temperaturdifferenzen bei der Wärmeübertragung führen aber gemäß dem 2. Hauptsatz zu Energieverlusten und damit zu einer Verschlechterung der Leistungszahl. Um dies zu vermeiden, werden bei den meisten Stirlingmaschinen mit den Arbeits-

räumen verbundene Wärmeübertrager eingesetzt.

Obwohl die Wärmetauscher zur Verbesserung der Leistungszahl gedacht sind, führen sie doch unvermeidlicherweise zu einem der bedeutendsten Verluste der Stirlingmaschine: dem adiabaten Verlust. Er resultiert daraus, dass der Wärmeübergang vom Arbeitsgas auf ein Kühlmedium oder von einer Wärmequelle auf das Arbeitsgas im Wesentlichen in den Wärmetauschern abläuft. In den Arbeitsräumen verläuft daher die Kompression bzw. Expansion eher adiabat als isotherm. Somit kommt es in den Arbeitsräumen oft zu erheblichen Temperaturänderungen des Arbeitsgases, die die Leistungszahl der Stirlingmaschine verringern [7, S.9ff.].

Regeneratorverhalten

Der thermische Wirkungsgrad von $\eta_{th} = 1$ ist in real existierenden Regeneratoren nicht erreichbar. Es ist unmöglich, dass der Regenerator das Arbeitsgas aufheizt oder abkühlt, ohne dass sich seine eigene Temperatur ändert. Außerdem ist der Wärmeübergang von dem Regeneratormaterial auf das Arbeitsgas bzw. vom Arbeitsgas auf das Regeneratormaterial stets kleiner als unendlich, so dass sich die Temperatur des Gases und des Regeneratormaterials an jeder Stelle im Regenerator geringfügig unterscheiden. Außerdem tritt im Regenerator in Längsrichtung eine mehr oder weniger ausgeprägte Wärmeleitung auf, durch die sich die Temperaturen an den Regeneratorenden einander annähern. Daher hat das Arbeitsgas beim Eintritt in den Expansionsraum nicht die Expansionsraumtemperatur und beim Eintritt in den Kompressionsraum nicht die Kompressionsraumtemperatur. [7, S.11f.]. Das Arbeitsgas erreicht den Kompressionsraum etwas wärmer und den Expansionsraum etwas kälter, was dazu führt, dass der Kühler eine größere Wärmemenge abführen und der Erhitzer eine größere Wärmemenge zuführen muss [3, S.23].

Wärmeleitung

In der Realität findet entlang der Zylinderwände und entlang der Kolben Wärmeleitung statt, so dass ein Teil der Wärme aus dem warmen Arbeitsraum durch einen Wärmestrom in Richtung des Temperaturgefälles in die kühleren Bereiche der Maschine gelangt [3, S.24].

Shuttle-Verlust

Der Shuttle-Verlust entsteht durch die Bewegung des Verdrängerkolbens entlang der Zylinderwand, die im oberen Bereich eine andere Temperatur als im unteren Bereich hat. Der Verdränger nimmt Wärme dort von der Wand auf, wo die Temperatur höher ist, und gibt diese Wärme an anderer Stelle an die dort kältere Wand wieder ab. Dadurch wird Wärme aus den wärmeren Zonen der Stirlingmaschine in die kälteren Bereiche „eingeschleppt“ [7, S.12].

Dissipation

Beim Stirlingmotor soll die vom expandierten Gas geleistete Arbeit für Antriebs- oder Stromerzeugungszwecke genutzt werden. Wenn das Gas am Kolben vorbeiströmt, anstatt eine Kraft auf ihn auszuüben und damit Arbeit an ihm zu verrichten, verringert sich die erzeugte Arbeit. Die Energie des am Kolben vorbeiströmenden Gases wird unterhalb des Kolbens dissipiert und belastet nutzlos das Kühlsystem.

Dissipation von Druckenergie ergibt sich auch als Folge von Druckverlusten des in der Maschine strömenden Arbeitsgases und von mechanischer Reibung der bewegten Teile einer Stirlingmaschine [7, S.12].

Die Auswirkungen aller genannten Verluste auf den realen Stirling-Prozess sind in Abbildung 2.3.9 dargestellt.

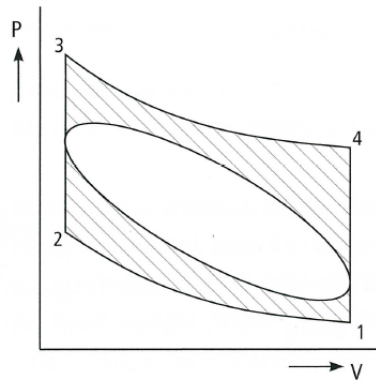


Abbildung 2.3.9. – Tatsächliches und theoretisches p-V-Diagramm des Stirling-Prozesses [3, S.24]

2.4. Maschinentypen

Grundsätzlich gibt es viele Möglichkeiten, Stirlingmaschinen zu realisieren. Tabelle 2.1 zeigt eine mögliche Klassifizierung der Heißgasmotoren. In dem Ordnungssystem sind die Heißgasmaschinen in vier Grundschemas unterteilt.

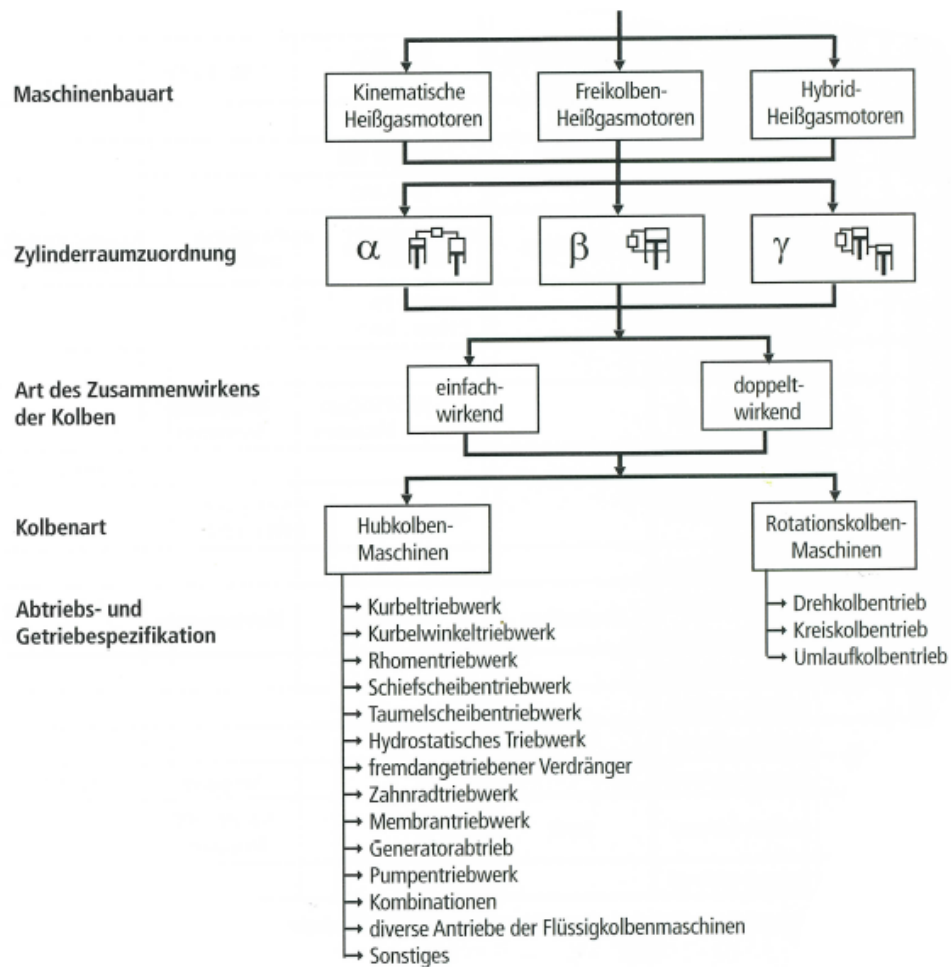


Tabelle 2.1. – Kriterien zur Klassifizierung von Heißgasmaschinen [3, S.109]

Im Folgenden sollen kurz die am meisten verbreiteten Bauarten von Stirlingmaschinen vorgestellt werden [3, S.109f.].

2.4.1. Zylinderraumzuordnung

Die Unterscheidung erfolgt nach der Art der Arbeitsraumkonfiguration. Es gibt Alpha-, Beta- und Gamma-Maschinen.

Alpha-Typ

Stirlingmaschinen ohne Verdränger und mit zwei Arbeitskolben werden im Allgemeinen als Maschine vom α -Typ bezeichnet. Eine solche Maschine ist in Abbildung 2.4.1 schematisch dargestellt.

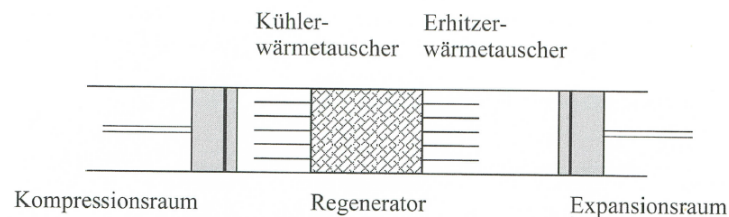


Abbildung 2.4.1. – Schema einer α -Typ Stirlingmaschine [1, S.34]

Bei der α -Maschine tragen die beiden Arbeitskolben die Namen Kompressions- und Expansionskolben. Sie ist sehr übersichtlich und kommt mit konventionellen Kurbeltrieben (vgl. Kapitel 2.4.2) aus. Zweikolben-Maschinen können als einfach oder als doppelt wirkende Maschinen ausgeführt werden. Bei der in Abbildung 2.4.1 dargestellten Maschine handelt es sich um eine einfach wirkende Ausführung. Einfach wirkend bedeutet, dass nur auf einer Seite des Arbeitskolbens auf die Druckschwankungen im Arbeitsraum reagiert. Man spricht allgemein von doppelt wirkenden Maschinen, wenn auf beiden Seiten des Kolbens ein thermodynamischer Prozess abläuft [1, S.34, 37].

Beta-Typ

Maschinen vom β -Typ besitzen einen Arbeitskolben und einen Verdrängerkolben, welche innerhalb eines gemeinsamen Zylinders angeordnet sind. Eine solche Maschine ist in Abbildung 2.4.2 schematisch dargestellt.

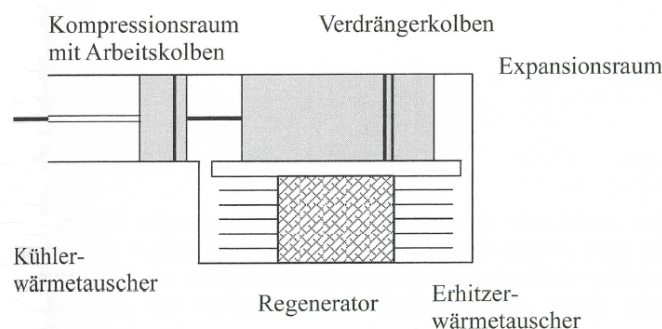


Abbildung 2.4.2. – Schema einer β -Typ Stirlingmaschine [1, S.35]

Der gemeinsame Zylinder ermöglicht es, dass ein Teil des Zylinders sowohl vom Verdränger als auch vom Kolben überstrichen wird. Damit ist das erreichbare Verhältnis von maximalem zu minimalem Volumen in der Maschine größer als in der Maschine vom γ -Typ. Somit kann auch ein größeres Druckverhältnis realisiert werden, was zu einer höheren Leistungsausbeute führt. β -Maschinen haben jedoch den Nachteil, dass sie entweder als zwei gegenüberliegende, miteinander verbundene Kurbeltriebe oder z.B. ein Rhombengetriebe (vgl. Kapitel 2.4.2) benötigen [1, S.35] [7, S.31].

Gamma-Typ

Maschinen vom γ -Typ besitzen einen Arbeitskolben und einen Verdränger, welche in separaten Zylindern untergebracht sind. Die Zylinder sind über ein Rohr miteinander verbunden. Eine solche Maschine ist in Abbildung 2.4.3 schematisch dargestellt.

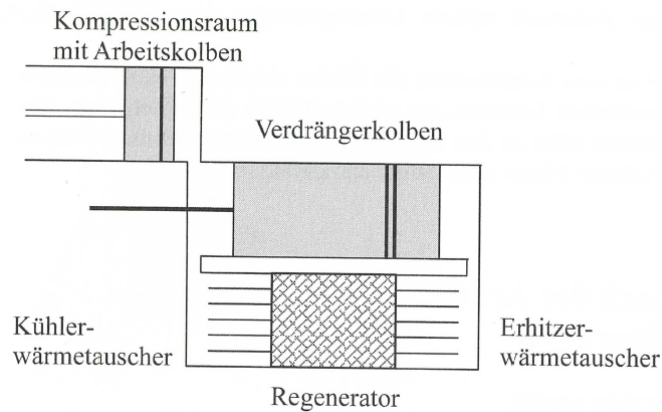


Abbildung 2.4.3. – Schema einer γ -Typ Stirlingmaschine [1, S.34]

Ein Vorteil der Anordnung von Kolben und Verdränger in getrennten Zylindern ist, dass dadurch die Verdrängerstange nicht wie bei Maschinen des β -Typs durch den Kolben geführt werden muss. Wie auch die Maschine vom α -Typ kann die γ -Maschine mit konventionellen Kurbeltrieben arbeiten. Nachteilig ist, dass das Kompressionsvolumen auf zwei verschiedene Zylinder aufgeteilt ist und bei kontinuierlicher Kolbenbewegung niemals zu Null werden kann. Dementsprechend werden das Kompressionsverhältnis und die Leistungsausbeute reduziert [7, S.31f.].

2.4.2. Maschinenbauart

Die Unterscheidung erfolgt nach der Art der Kolbenführung.

Maschinen mit kinematischem Getriebe (*Kurbeltrieb*)

Bei Stirlingmaschinen mit kinematischem Getriebe wird die Art der Bewegung von Kolben und Verdrängern durch eine wie auch immer geartete Verbindung der sich hin- und herbewegenden Elemente mit Stangen, Pleueln, Kurbeln, Schwungrädern und Ähnlichem festgelegt. Durch die Art der mechanischen Kopplung von Kolben und Verdrängern an eine Welle sind der Hub und die Form der Bewegung vorge-schrieben. Lediglich die Drehzahl und damit die Frequenz der Auf- und Abbewegung von Kolben und Verdrängern kann in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen variieren [7, S.35].

Schubkurbelgetriebe

Das auch bei Stirlingmaschinen am häufigsten eingesetzte Getriebe ist das Schubkurbelgetriebe, das häufig auch als Kurbelgetriebe oder Kurbeltriebwerk bezeichnet wird. Ein solches Kurbelgetriebe ist in Abbildung 2.4.4 für zwei in Reihe angeordnete Zylinder dargestellt.

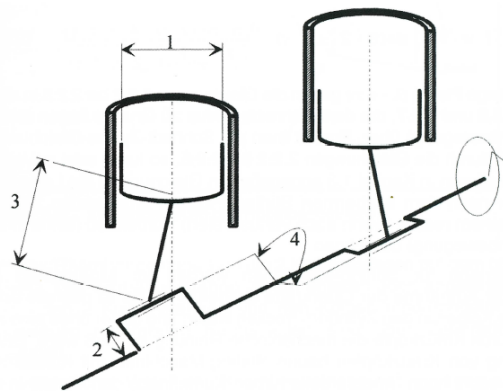


Abbildung 2.4.4. – Schematisiertes Schubkurbelgetriebe [7, S.35]

Ein Schubkurbelgetriebe ist durch den Kurbelradius r (2), der für beide Zylinder gleich lang sein kann, aber nicht gleich lang sein muss, die Pleuellänge L (3) und den Phasenverschiebungswinkel φ (4) gekennzeichnet.

Schubkurbelgetriebe für Stirlingmaschinen werden im Allgemeinen mit Kreuzköpfen zur Aufnahme der Querkräfte ausgeführt, da die Kolben in den Zylindern trocken laufen und daher ohne eine axiale Führung durch Kreuzköpfe die mechanische Reibung zu groß wäre. Durch die Verwendung von Kreuzköpfen bauen Stirlingmaschinen mit Kurbeltriebwerk meistens recht hoch [7, S.35f.].

Rhombengetriebe

Abbildung 2.4.5 zeigt den Aufbau eines Rhombengetriebes. Es wurde 1953 von R.J. Meijer, dem Leiter der Stirlingmotoren-Entwicklung bei Philips, erfunden.

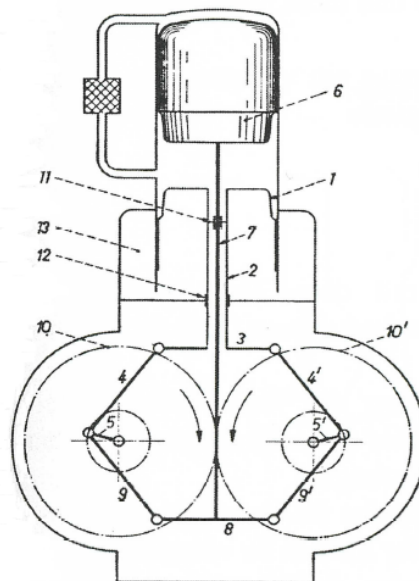


Abbildung 2.4.5. – Schematisiertes Rhombengetriebe [1, S.41]

Bei dem Rhombengetriebe sind die zwei Arbeitskolbenstangen (2) mit dem oberen Joch (3) verbunden. Die Verdrängerstange (7) ist am unteren Joch (8) angelenkt und wird zwischen den zwei Kolbenstangen und den Arbeitskolben (1) hindurchgeführt. Die beiden gegenläufig rotierenden Kurbelwellen (5, 5') sind über Zahnräder (10, 10') miteinander gekoppelt.

Ein wesentlicher Vorteil des Rhombengetriebes ist, dass nur axiale Kräfte auf die Kolben wirken, wodurch sich eine Kreuzkopfführung erübrigt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mit einem Rhombengetriebe ein vollständiger Massenausgleich von Stirlingmaschinen in β -Bauweise möglich ist. Nachteilig ist der hohe Bauaufwand mit zwei Kurbelwellen und vier Pleuelstangen (4, 4', 9, 9'), die eine hohe Anforderung an die Fertigungsgenauigkeit stellen [3, S.44] [7, S.37f.].

Taumelscheibengetriebe

Die Taumelscheibe ist über ein Lager oder eine Kugel mit dem Motor und ebenso mit dem Abtriebsrad exzentrisch verbunden. Am Umfang der Taumelscheibe sind die Pleuel kugelgelagert befestigt. Die Taumelscheibe selbst dreht sich nicht, sondern führt lediglich eine sinusförmige Präzessionsbewegung um die eigene Achse aus. Das Taumelscheibengetriebe unterscheidet sich vom Schiefscheibengetriebe dadurch, dass die Taumelscheibe auf einer gekröpften Welle drehbar gelagert ist und nicht mit der Welle umläuft. Das Funktionsprinzip eines Taumelscheibengetriebes zeigt Abbildung 2.4.6.

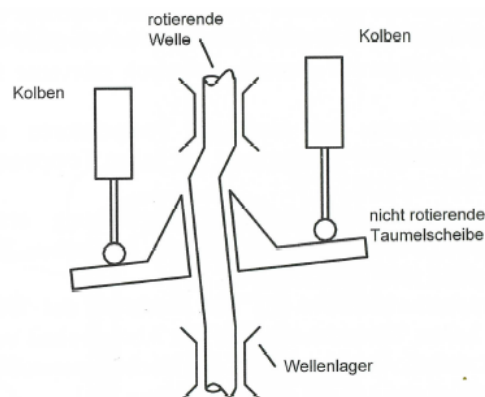


Abbildung 2.4.6. – Schematisiertes Taumelscheibengetriebe [1, S.43]

Vorteile des Taumelscheibengetriebes sind seine Kompaktheit und die mit ihm realisierende sinusförmige Bewegung der Kolben. Es besteht die Möglichkeit mehrere Zylinder über dem Umfang der Taumelscheibe verteilt anzuordnen.

Ein Nachteil des Getriebes ist, dass die auf die Pleuelstangen wirkenden Querkräfte von Kreuzköpfen aufgefangen werden müssen [3, S.42] [7, S.38].

Schiefscheibengetriebe

Das Schiefscheibengetriebe ist eng mit dem Taumelscheibengetriebe verbunden. Das Getriebe besteht im Wesentlichen aus einer gegenüber der Welle schief gestellten Scheibe, die mit der Welle fest ver-

bunden ist und mitrotiert, so dass die Schiefscheibe gleichzeitig als Schwungscheibe dient. Auf der Schiefscheibe gleiten die Gleitstücke, über die die Kolbenstangen in Bewegung versetzt werden. Auch bei dem Schiefscheibengetriebe ist eine Kreuzkopfführung zur Aufnahme der Querkräfte vorzusehen. Abbildung 2.4.7 zeigt das Aufbauschema.

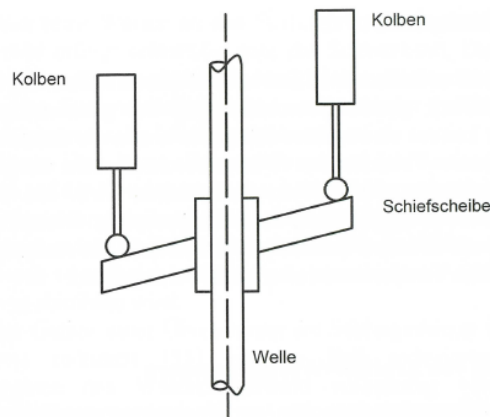


Abbildung 2.4.7. – Schematisiertes Schiefscheibengetriebe [1, S.43]

Bei Stirlingmaschinen mit drei oder mehr Zylindern kann mit einem Schiefscheibengetriebe ein vollständiger Massenausgleich erreicht werden. Ein besonderer Vorteil des Getriebes besteht darin, dass durch eine Verstellung der Schiefscheibe eine Variation des Hubs erreicht werden kann [1, S.42] [7, S.39].

Freikolbenmaschine

Lässt man in Stirlingmaschinen den Kurbeltrieb weg und führt die Kolben einzig über Federn bzw. als Feder wirksame Gasvolumina, spricht man von so genannten Freikolbenmaschinen. Bei Freikolbenmaschinen werden die Auf- und Abbewegungen von Kolben und gegebenenfalls Verdrängern ausschließlich durch das Zusammenspiel von Druckkräften, Massenkräften, Reibungskräften sowie eventuell Federkräften hervorgerufen. Damit ist eine starke wechselseitige Kopplung zwischen den Bewegungen von Kolben und Verdrängern und der Thermodynamik der Stirlingmaschine gegeben. Kolbenhub, Frequenz und die Phasenbeziehung zueinander stellen sich frei ein. Einerseits werden die Druckänderungen in der Maschine durch die Bewegung von Kolben und Verdrängern hervorgerufen und andererseits sind es eben diese Druckänderungen, durch die die Bewegung von Kolben und Verdrängern verursacht werden.

Freikolbenmaschinen haben eine Reihe von Vorteilen gegenüber Stirlingmaschinen mit kinematischem Getriebe. Ihre Arbeitsfrequenz ist, unabhängig von ihrer Belastung, immer mehr oder weniger konstant. Mit unterschiedlicher Belastung ändert sich die Amplitude (Hub) der sich auf und ab bewegenden Elemente von Freikolbenmaschinen. Somit können diese Maschinen als (in gewissen Grenzen) selbst regelnd bezeichnet werden. Ein sehr wichtiger Vorteil ist, dass auf Kolben und Verdränger keine Querkräfte wirken. Dadurch wird die seitliche Führung von Kolben und Verdrängern außerordentlich

erleichtert. Im Allgemeinen reicht zur Führung von Kolben und Verdrängern eine „Gaslagerung“ aus. Der größte Nachteil von Freikolbenmaschinen ist das Fehlen einer Welle, über die mechanische Leistung übertragen werden kann. Die Energie wird mit Hilfe eines Linearregenerators ausgekoppelt, welcher eine teure Sonderanfertigung ist [1, S.51] [7, S.40, 44f.].

Hybrid-Maschine

Kann auf eine rotierende Welle zur Leistungsübertragung nicht verzichtet werden, so bietet sich als Kompromiss die Hybrid-Maschine an. Diese wird nach seinem Erfinder Ossian Ringbom auch als *Ringbom-Maschine* bezeichnet. Bei ihr wird der Arbeitskolben kinematisch angetrieben und ist daher mit einer rotierenden Welle verbunden, während der Verdränger in Freikolbenbauweise ausgeführt ist [7, S.45].

2.5. Anwendungsfelder für Stirlingmaschinen

Die Heißgas- und Stirlingmotoren finden heute in vielen Bereichen beispielhafte Anwendung. Im Prinzip können die meisten Verbrennungsmotoren unter 300 kW pro Zylinder durch Heißgasmaschinen ersetzt werden. Doch hier spielen wirtschaftliche und anwendungsspezifische Überlegungen eine große Rolle. Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten liegen derzeit in den USA, Japan, Europa und Neuseeland. Die Arbeiten werden von zahlreichen kleinen privaten Firmen, öffentlichen Forschungseinrichtungen, dem Militär und Großkonzernen getragen. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über den Entwicklungsstand und die Anwendungsbereiche [3, S.65].

Anwendungsbereiche		Entwicklungsstand				
		Studien	theoretische Forschung	praktische Forschung	Prototypen, Pilotprojekte	Vorserienmodelle
Pkw-, Lkw-Antrieb				X		
Schiffsantriebe,	bis 250 kW	X				
Unterseefahrzeuge	Über 250 kW			X		
Lokomotiven						X
Raumfahrt	bis 5 kW	X				
	über 5 kW					X
Bergbau				X		
Generatorantrieb	bis 1 kW	X				
	bis 15 kW	X				
	über 15 kW	X				
Vuilleumiermaschinen		X				
Einfachmotoren für Entwicklungsländer		X				
künstliches Herz				X		
Kältemaschinen		X				
Modell- und Lehrmotoren	bis 200 W	X				

Tabelle 2.2. – Anwendungsbereiche und Entwicklungsstand der Stirlingmotoren (Stand 2013) [3, S.65]

2.5.1. Der Stirlingmotor im Automobil

Bisher wurden die Hoffnungen, die in den Stirlingmotor als alternativen Automobylantrieb gesetzt wurden, nicht erfüllt. Zwar zeigten in technischer Hinsicht erfolgreiche Entwicklungsprogramme wie das *Automotive Stirling Engine Development Program*¹, dass der Stirlingmotor grundsätzlich mit gebräuchlichen Automobilantrieben wie dem Diesel- oder Ottomotor konkurrieren kann, es fehlen ihm jedoch entscheidende Vorteile gegenüber eingeführten Technologien, die das Risiko einer Markteinführung der in vielen Punkten technisch unkonventionellen Stirlingmotoren rechtfertigen würde. Der einzig klare Vorteil der Stirling-Technik im Vergleich zu Motoren mit innerer Verbrennung, die deutlich niedrigeren Schadstoffemissionen, wird so lange nicht zur Geltung kommen, wie geltende Abgasbestimmungen auch mit herkömmlichen Motoren erfüllt werden können.

Bei PKWs wird es aus heutiger Sicht voraussichtlich zur Entwicklung von reinen Elektrofahrzeugen für den Stadtverkehr kommen. Sofern von europäischen Herstellern bisher Prototypen von Hybridautos vorgestellt wurden, handelte es sich dabei um Fahrzeuge, bei denen Elektroantrieb mit Diesel- oder Ottomotoren kombiniert wurden. Erhebliche Schadstoffreduktionen verspricht man sich hier vor allem von der Substitution von Dieselkraftstoff oder Benzin durch Erdgas bzw. in fernerer Zukunft durch Wasserstoff. Da diese Energieträger auch in Motoren mit innerer Verbrennung genutzt werden können, ist kein dringender Grund für die intensive Auseinandersetzung mit der Stirlingmotor-Technologie gegeben [7, S.197].

2.5.2. Der Stirlingmotor in der Kraft-Wärme-Kopplung

Stirlingmotoren sind für den Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung geeignet. Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung kombinieren die Erzeugung von Strom mit der gleichzeitigen Nutzung der entstehenden Abwärme und erhöhen somit die Brennstoffausnutzung im Vergleich zur getrennten Wärmeerzeugung mittels Heizwerk und zur reinen Stromerzeugung mittels Kraftwerk [10, S.551].

Der ökologische Nutzen von Blockheizkraftwerken (BHKW) ist heute in der Wissenschaft weitgehend unumstritten. Für BHKW kleinerer Leistungsgrößen sind Motoren mit innerer Verbrennung weniger gut geeignet, da diese in Bezug auf ihre erreichbaren Betriebsstunden eingeschränkt sind und relativ hohe Schadstoffemissionen aufweisen. Es herrscht daher in der Fachwelt weitgehende Einigkeit darüber, dass Stirlingmotoren „dem Einsatz kleiner BHKW unter 50 kW_{el} neue Impulse“ verleihen kann [7, S.199].

Insgesamt zeichnet sich ein Trend zu kleinen Stirlingmaschinen im Bereich von ca. 1 bis 3 kW elektrischer Leistung ab, die in der Lage sind, Strom und Wärme im Grundlastbereich für Ein- und Mehrfamilienhäuser bereitzustellen. Die derzeitigen Entwicklungen und Serienfertigungen reichen dabei von ein- und mehrzylindrigen kinematischen Maschinen bis hin zu Freikolbenmaschinen. Die kommerzielle

¹US-Amerikanisches Programm, welches zwischen 1978 und 1989 zur Entwicklung eines beinahe serienreifen Stirling-Automotors führte. Beteiligt waren das Department of Energy, die NASA und die Firma Mechanical Technology Incorporated.

Nutzung der Freikolbenmaschine als Antriebsaggregat für Kraft-Wärme-Kopplung steht dabei erst am Anfang. Neben erdgasbetriebenen Stirling-BHKW sind bereits erste Mikro-BHKW für den Betrieb mit Biomasse auf dem Markt [7, S.265].

2.5.3. Wärmepumpen mit Stirlingmotor-Antrieb

Neben dem Stirling-Prozess gibt es viele weitere Prozesse, die Wärme „pumpen“ können. Zu den wichtigsten zählen der Clausius-Rankine- oder Kompressionswärmepumpen-Prozess und der Absorptionswärmepumpen-Prozess. Beide Prozesse arbeiten im Prinzip ähnlich. Erwähnenswert sind diese Wärmepumpen-Prozesse, weil der Verdichter der Kompressionswärmepumpe auf irgendeine Weise angetrieben werden muss. Für die Stirlingmaschine ergeben sich damit drei verschiedene Möglichkeiten, in ein Wärmepumpensystem eingebunden zu sein. Sie kann als Antriebsmotor den Verdichter antreiben, sie kann von einer Arbeitsmaschine als Wärmepumpe angetrieben werden und sie kann als Stirlingmotor eine Stirling-Wärmepumpe antreiben. Die beiden letztgenannten Möglichkeiten besitzen also einen Stirling-Wärmepumpenanteil, was thermodynamisch bedeutet, dass der Stirling-Prozess links herum durchlaufen wird und damit als Kältemaschine arbeitet (vgl. Kapitel 2.5.6).

Besonders in Japan kann in diesem Gebiet auf eine beachtliche Entwicklung zurückgeblickt werden. In Japan werden nicht überwiegend Klimaanlageanlagen, sondern einfache sogenannte Luftkonditionierer benutzt, welche einen akzeptablen Raumluftzustand herstellen können. Gasbefeuerte Absorptionsanlagen werden in großen Gebäuden und gasbetriebene Kompressionswärmepumpen in mittleren und kleinen Gebäuden eingesetzt. Durch kleine mit gasbefeuertem Stirlingmotor betriebene Wärmepumpen, die einen hohen Wirkungsgrad haben, hofft man in Japan, einen Markt für stirlingmotorbetriebene Luftkonditionierer zu schaffen [7, S.270f.]. In Deutschland gibt es keine erwähnenswerten Aktivitäten in dem Bereich Wärmepumpenantrieb mittels Stirlingmaschinen [7, S.291].

2.5.4. Dish/Stirling-Systeme

Eines der aussichtsreichsten Anwendungsgebiete für Stirlingmotoren ist der Einsatz in einem solaren Dish/Stirling-System. Mit diesem System ist der Stirlingmotor in einen Technikbereich vorgedrungen, dem durch die erhöhten Anforderungen an „saubere“ Energiewandlungssysteme gute Entwicklungsmöglichkeiten vorausgesagt werden. Unter den bekannten Verfahren zur Erzeugung von elektrischer Energie aus Sonnenenergie weisen die Dish/Stirling-Systeme bisher die besten gemessenen Ergebnisse für den Umwandlungsgrad auf. Aufgrund der relativ hohen Kosten für einzelne Anlagen gab es bisher vorwiegend staatlich geförderte Testanlagen, die allerdings die in sie gesteckten Erwartungen voll erfüllen. Der große Schritt in Richtung Serienfertigung soll in nächster Zeit durch verbilligte Fertigung der Systemkomponenten erreicht werden.

Bei Anlagen mit Dish²/Stirling-System werden parabolische Teller genutzt, um das in den Teller einfallende Sonnenlicht auf einen Empfänger im Brennpunkt des Tellers zu fokussieren. Ein Führungssystem dreht den Sonnenkollektor über zwei Achsen immer so, dass er senkrecht zu den einfallenden

²Dish: konkaver, parabolischer Sonnenkollektor

Sonnenstrahlen steht. Der Empfänger absorbiert die konzentrierte Sonnenenergie und leitet sie an den Erhitzerkopf des Stirlingmotors weiter, welcher mit einem Generator gekoppelt ist. Der Vorteil bei der Verwendung eines Stirlingmotors liegt in der Möglichkeit, die Sonnenstrahlen mehr oder weniger direkt zur Beheizung des Erhitzers zu nutzen. Die Leistungsklasse von Dish/Stirling-Systemen liegt im Bereich von 5 bis 50 kW_{el}.

Abbildung 2.5.1 zeigt ein Dish/Stirling-System in Almería, Spanien.

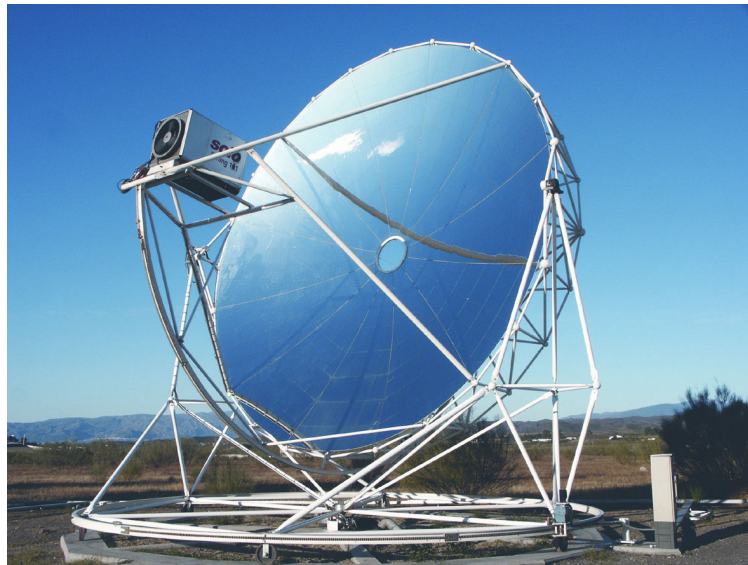


Abbildung 2.5.1. – EuroDish-Prototyp auf der Plataforma Solar de Almería, Spanien [11]

Aufgrund der Leistungsklasse werden die Einsatzgebiete für diese Anlagen jedoch zunächst auf einige spezielle Anwendungen beschränkt bleiben. Dies sind z.B. die Bereitstellung elektrischer Energie für abgelegene Bauernhöfe/Dörfer in Sonnengebieten, Wasserpumpensysteme und Ersatzanlagen für Kleingeneratoren, die heute mit Dieselmotoren betrieben werden. Aber auch Kleinkraftwerke im Leistungsbereich von mehreren Megawatt sind bereits in Planung. Hierzu werden Dish/Stirling-Anlagen in einem Anlagenpark zusammengefasst, welche von einer zentralen Station aus gesteuert wird.

Ein wichtiger Schritt, um einen kommerziellen Erfolg von dezentralen Dish/Stirling-Systemen zu erreichen, ist die Weiterentwicklung der Anlagen dahingehend, dass sie neben der Sonnenenergie auch mit fossilen Brennstoffen betrieben werden können. Diese sogenannte Hybridisierung hat den Vorteil, dass die Stromversorgung ohne Batterien auch dann aufrecht erhalten werden kann, wenn die Sonne nicht scheint [7, S.293ff.].

Ob die Dish/Stirling-Technologie ihren festen Platz zur Stromerzeugung aus solarer Energie auf dem Weltmarkt einnehmen wird, hängt sicher noch von vielen Faktoren ab. Ein wesentlicher Vorteil der Dish/Stirling-Technologie gegenüber den meisten Konkurrenztechnologien liegt in der Kompaktheit des Systems und im relativ hohen Systemwirkungsgrad, vorausgesetzt natürlich, sie wird im sogenannten Sonnengürtel der Erde eingesetzt [7, S.342].

2.5.5. Unterseeboote mit Stirlingmotor-Antrieb

Ein weit weniger bekanntes und auch weniger großes Einsatzgebiet für den Stirlingmotor liegt im Antrieb von Unterseebooten während der Tauchfahrt. Doch gerade hier hat der Stirlingmotor das Ziel der Marktreife erlangt und wird weltweit verkauft. Der Erfolg in diesem Technikbereich beruht vor allen Dingen darauf, dass der Stirlingmotor ein sehr ruhiges, geräuscharmes Laufverhalten aufweist und die dem Erhitzer zugeführte Wärme nicht unbedingt aus der Verbrennung mit Luft erzeugt werden muss. Vor allem der zweite Grund ist für dieses Anwendungsgebiet besonders wichtig, da die Verwendung des Stirlingmotors zu erheblich längeren Tauchzeiten des U-Bootes und damit zu geringerer Entdeckungsfahr führt [7, S.345].

2.5.6. Die Stirlingmaschine in der Kältetechnik

Bei der Kühlung von Infrarotsensoren, wie sie beispielsweise in Nachtsichtgeräten oder Lenk-Waffen-Steuerungen eingesetzt werden, hat sich die Stirling-Kältemaschine inzwischen bewährt. Miniatur-Stirling-Kryokühler³ haben heutzutage eine dominierende Stellung auf dem Gebiet der Kühlung von Infrarotsensoren erlangt. Auf diesem Gebiet konkurriert sie mit Kältemaschinen, die nach dem Linde-Hampson-Prozess arbeiten. Neue Märkte entwickeln sich gegenwärtig im Bereich der Elektronik Kühlung.

Bei der Luftverflüssigung und Luftzerlegung können Stirlingmaschinen (Stirling-Kryokühler) mit gutem Erfolg eingesetzt werden. Die erste Stirling-Kältemaschine zur Luftverflüssigung wurde von Philips 1955 auf den Markt gebracht. Stirling-Kältemaschinen zur Luftzerlegung werden auch heute noch von einer aus dem Philips Konzern abgespaltenen Firma produziert und vertrieben.

Für den Bereich der „traditionellen Kältetechnik“⁴ bei Temperaturen über ca. -80°C werden bisher keine in Serie hergestellten Stirling-Kältemaschinen angeboten. Mit dem Verbot von FCKW-Kältemitteln sind die Marktchancen in der Kältetechnik bei „umgebungsnahen Temperaturen“ inzwischen besser geworden. Grundsätzlich muss für den Einsatz von Stirling-Kältemaschinen für die Kälteerzeugung bei umgebungsnahen Temperaturen noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden [7, S.372, 417ff.].

³Kryotechnik, zu der alle Anwendungen bei Temperaturen unterhalb von ca. -80°C zu zählen sind.

⁴„Umgebungsnahe Kältetechnik“, die den Temperaturbereich von ca. -80°C bis ca. $+100^{\circ}\text{C}$ umfasst.

3. Planung des Versuchsstandes

Im Zentrum für Energietechnik (ZET) des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg befindet sich ein Stirlingmotor, welcher seit Jahren nicht mehr in Betrieb ist. Der Motor soll wieder in Betrieb genommen und bei Laborversuchen eingesetzt werden.

3.1. Didaktisch-methodische Analyse

In diesem Kapitel erfolgt eine didaktische Einordnung des Themas „Stirlingmotor“ in das Curriculum der HAW und eine didaktisch-methodische Begründung für den Einsatz eines Labors.

3.1.1. Curriculum der HAW

Der Stirlingmotor als eigenständiges Thema wird in keinem Modul der HAW als Schwerpunkt behandelt und dennoch kommt er in verschiedenen Vorlesungen zur Anwendung und könnte innerhalb eines Labors eingesetzt werden.¹ Dabei werden sicherlich jeweils andere Aspekte des Motors zum Tragen kommen und im Labor betrachtet.

Modul: Technische Thermodynamik 1

Die Lerninhalte befassen sich mit den allgemeinen Grundlagen und der Aufgabe der Thermodynamik. Insbesondere werden die Hauptsätze der Thermodynamik vermittelt, Energiebilanzen und Energiebilanzgleichungen für geschlossene und offene Systeme betrachtet und erarbeitet. Unter anderem werden die Themen innere Energie, kalorische Zustandsgleichungen, Arbeit, Wärme, Volumenänderungsarbeit, Wärmestrom und Wärmedurchgang sowie Enthalpie und Entropie behandelt. Und vor allem werden auch die Inhalte beschränkte Umwandelbarkeit der Energie, Wärmekraftmaschinen, Kreisprozesse und Zustandsänderungen gelehrt [12]. An dieser Stelle könnte der Stirlingmotor zur Anwendung kommen und als praktisches Anwendungsbeispiel dienen.

Modul: Technische Thermodynamik 2

Dieses Modul ist eine Vertiefung und Weiterführung der eben genannten Lehrveranstaltung. Es wird thematisch dort angesetzt, wo das andere Modul aufgehört hat. Die Lerninhalte befassen sich mit thermischen Zustandsgrößen, Zustandsgleichungen und Zustandsdiagrammen (z.B. p-V-Diagramm und T-s-Diagramm). Es werden unter anderem die Berechnung von Enthalpie und Entropie, Zustandsänderungen eines strömenden Fluids und Arbeitsprozesse behandelt. Kreisprozesse und Wärmekraftma-

¹Anmerkung: Es werden nur diejenigen Themeninhalte der entsprechenden Module genannt, die für den Stirlingmotor von Relevanz sind.

schinen sowie die Wärmepumpe und die Kältemaschine werden erneut aufgegriffen und vertieft. Das Thema Verbrennungsprozesse und Energetik der Verbrennung werden gelehrt [13]. Da der Stirlingmotor durch alle flüssigen, festen und gasförmigen Brennstoffe als Wärmequelle angetrieben werden kann, ist hier sicherlich auch ein interessanter Aspekt gegeben, den Stirlingmotor als Labor in das Modul mit einzubinden.

Die Studierenden wären durch die erworbenen Kenntnisse aus den Modulen Technische Thermodynamik 1 und/oder 2 in der Lage, thermodynamische Beziehungen bei der Berechnung und dem Betrieb des Stirlingmotors anzuwenden und den thermodynamischen Prozess berechnen zu können. Dabei könnten sie die Bedeutung und Wertigkeit des Motors verstehen und sich Kenntnisse über thermodynamische Eigenschaften des eingesetzten Arbeitsfluids aneignen. Dadurch können diese Lehrveranstaltungen in Kombination mit einem Labor zum Thema Stirlingmotor sowohl Fachkompetenz als auch Methodenkompetenz vermitteln. Die zuvor von praxisnahen Beispielen erarbeiteten Methoden der Berechnung würden mit dem Labor vertieft und ergänzt werden.

Modul: Kolbenmaschinen

Dieses Modul befasst sich mit den Grundlagen und gemeinsamen Eigenschaften der Kolbenmaschinen, deren Einteilung, Arten und Wirkungsweise, den Arbeitsverfahren von Kinematik und Dynamik des Kurbeltriebs sowie mit Kolbenpumpen und Kolbenverdichtern. Unter anderem werden die Themen Kenngrößen, Kennfelder und Last, Wirkungs- und Gütegrade sowie die Grundlagen der motorischen Arbeitsprozesse (idealisierte Prozesse, Vergleichsprozesse, reale Prozesse) vermittelt. Das Hauptaugenmerk liegt auf den Verbrennungsmotoren und deren Thermodynamik, aber auch der Stirlingmotor ist Teil dieser Lehrveranstaltung und wird gelehrt [14]. Daher ist die Berechtigung eines Labors zum Stirlingmotor zweifelsfrei gegeben und gerade als Abgrenzung zu Motoren mit innerer Verbrennung als ein gutes, anschauliches und praktisches Anwendungsbeispiel anzusehen.

Die Studierenden wären durch die erworbenen Kenntnisse des Moduls in der Lage, die Arbeitsweise, die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten und die Problematik der Stirlingmaschine zu verstehen und zu beurteilen. Durch das Modul sind die Studenten mit den wesentlichen thermodynamisch und mechanisch ablaufenden Prozessen sowie mit den Kennfeldern und Kenngrößen von Kolbenmaschinen vertraut. Innerhalb eines Labors könnten sie diese für die Auslegung und Berechnung des Stirlingmotors anwenden und vertiefen. Die Lehrveranstaltung würde somit sowohl Fachkompetenz als auch Methodenkompetenz vermitteln unter Einbeziehung eines praktischen Anwendungsbeispiels.

Modul: Solare Energiebereitstellung

Die Lerninhalte befassen sich mit den Grundlagen der solaren Energiebereitstellung. Dazu gehören die Globalstrahlung, die Direktstrahlung, diffuse Strahlung, Strahlungsgesetze und Strahlungsverluste sowie das Sonnenbahndiagramm. Zu den behandelten Themen gehören auch solarthermische Systeme wie etwa Solarkraftwerke. Es wird explizit das Dish/Stirling-System betrachtet und erarbeitet. Dabei werden der Aufbau und die Wirkungsweise der Kollektoren, Energiebilanzen und Wirkungsgrade sowie Aufbau der Anlagen gelehrt und vermittelt [15]. An dieser Stelle könnte der Stirlingmotor zur An-

wendung kommen und als praktisches Anwendungsbeispiel dienen. Stirlingmaschinen sind wie kein anderer Energiewandler in der Lage, Solarenergie und auch nachwachsende Rohstoffe emissionsarm und klimaneutral umzuwandeln. Gerade solare Dish/Stirling-Anlagen sind eines der aussichtsreichsten Anwendungsgebiete für Stirlingmotoren (vgl. Kapitel 2.5.4). Daher ist die Einbindung eines Labors zum Thema Stirlingmotor in diesem Modul geradezu qualifiziert.

Die Studierenden wären durch die erworbenen Kenntnisse des Moduls in der Lage, grundlegende Gleichungen und Beziehungen der solaren Energiebereitstellung bei der Berechnung und dem Betrieb des Stirlingmotors anzuwenden. Sie könnten mit dem Labor die Bedeutung der verschiedenen Arten der Bereitstellung von solarer Energie vertiefen und festigen und Probleme der solaren Energiebereitstellung grundsätzlich verstehen und lösen. Die Lehrveranstaltung kann in Kombination mit einem Labor zum Thema Stirlingmotor sowohl Fachkompetenz als auch Methodenkompetenz vermitteln. Anhand praxisnaher Beispiele während des Moduls werden Methoden der Berechnung erarbeitet und könnten mit dem Labor ergänzt und gefestigt werden. Für die Übertragung von Kenntnissen auf dem Gebiet der solaren Energiebereitstellung und der Thermodynamik in die Anwendungsfächer und in die Berufstätigkeit wird der Sinn für das Wesentliche geschärft.

3.1.2. Didaktisch-methodische Entscheidung

In der Ausbildung zu technischen und naturwissenschaftlichen Berufen gibt es eine Unterrichtsform, welche in anderen Bereichen nicht zu finden ist: das Labor, auch Übungslabor oder Praktika genannt. Hier wird der Lernende mit der realen Welt seines späteren Berufs in Kontakt gebracht, mit Geräten und Maschinen, Verfahren und Methoden. Labor/Praktikum ist der Bereich von Seminar und Fallstudien in Technik und Naturwissenschaft [16, S.15].

In der klassischen Vorlesung wird die Information von den Studierenden durch das Ohr aufgenommen. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass nur 20% der Information, die allein über das Ohr aufgenommen wurde, auch (im Langzeitspeicher) behalten bleibt. Wird dieselbe Information zusätzlich über das Auge aufgenommen, werden über den visuellen Kanal zusätzlich 30% sicher behalten. Was mit Ohr und Auge übertragen wird, bleibt somit zu 50% im Langzeitspeicher. Die genannten Untersuchungen zeigen aber auch, dass nahezu 100% der Informationen behalten werden, die über Ohr, Auge und die Erfahrung aufgenommen wurde. Als Erfahrung wird hier die technische Realisierung der zu lernenden Zusammenhänge verstanden, das Experiment. Dies ist ein sehr theoretischer Zusammenhang, dessen Zahlenwerte nur Anhaltspunkte sein können. Andererseits ist dies Anlass genug, darüber nachzudenken, wie die Vorlesung mit ihrer vorwiegend auditiven und ggf. auch visuellen Übertragung durch Erfahrung, also durch Labor, ergänzt werden kann [16, S.56].

Labor war ursprünglich darauf konzipiert, das in der Vorlesung Gehörte dadurch zu vertiefen, dass es selbst „erfahren“ werden konnte. Heute ist Labor eine Unterrichtsform mit ungeahnter didaktischer Bandbreite. Folgend sind die wesentlichen Begründungsebenen für Labor aufgelistet [16, S.64f.]:

1. *Lernpsychologische Begründung*

Hier sind vor allem die psychologisch günstigen Auswirkungen von Labor zu sehen, wie Motivation, Individualisierung, Erfolgserlebnisse, möglicher Abbau von Leistungsdruck und Erfahrung. Man merkt sich am besten, was man selber *getan* hat.

2. *Medien-theoretische Begründung*

Das Labor wird als ein Medium, als ein unterrichtstechnologisches Hilfsmittel betrachtet.

3. *Wissenschaftstheoretische Begründung*

Technik und Naturwissenschaft arbeiten experimentell: Das Experiment begründet die Theorie, experimentieren folgt der wissenschaftlichen Tradition. Also gehört zu jeder Vorlesung auch ein Labor.

4. *Bildungstheoretische Begründung*

Dies ist die übliche und didaktisch zentrale Begründung. Die Arbeit im Labor fördert die Persönlichkeit der Studierenden. Problemlöseverhalten, Sachkompetenz, Handlungs-, Entscheidungs- und Kommunikationsfähigkeit werden geübt und erlernt.

5. *Praxis/Nützlichkeits-orientierte Begründung*

Laborarbeit vermittelt notwendige und nützliche, z.T. betont motorische Fähigkeiten: Umgang mit Geräten und Anlagen und deren Beurteilung; Fehler suchen und finden; Messungen durchführen und protokollieren.

6. *Industrie-soziologische Begründung*

Labor fördert das Denken in Systemen und Modellen und das Verstehen komplexer Zusammenhänge. Interdisziplinäres Arbeiten kann mit Labor gefördert werden. Diese Begründungsebene findet im Zeitalter der Digitalisierung immer mehr an Bedeutung.

Häufiger Kontakt zwischen Studierenden und Dozenten innerhalb und außerhalb der Lehrveranstaltung ist der wichtigste Faktor für die Motivation und das Engagement der Studierenden. Wenn Studierende einige Mitglieder des Lehrkörpers näher kennen lernen, dann hilft dies auch durch schwierige Zeiten des Studiums und vermittelt ihnen einen Eindruck von den Werten und der Lehr-, Lern- und Forschungskultur im Studienfach. Das Lernen wird erheblich erleichtert, wenn es ein gemeinsames Unterfangen ist und keine Solonummer. Wie im Arbeitsleben auch ist effektives Lernen kollaborativ und sozial. Wenn Studierende miteinander arbeiten, fördert dies ihren eigenen Lernprozess. Gemeinsam Gedanken zu entwickeln und auf Ideen anderer zu reagieren, fördert die Denkfähigkeit und vertieft das Verständnis des Gelernten. Wenn Studierende in einer Veranstaltung sitzen und die meiste Zeit nur zuhören müssen, um danach das Gelernte in Prüfungen detailgetreu wiederzugeben, dann lernen sie daraus wenig. Sie müssen darüber reden, schreiben, es an ihre Erfahrungen anknüpfen können und auf ihr tägliches Leben oder reale Situationen beziehen. Mit dem Einsatz eines Labors wird den Studierenden die Gelegenheit gegeben, das Gelernte zu überprüfen, zu diskutieren, in Projektgruppen zu arbeiten und sich der Kritik ihrer Kommilitonen zu stellen [17, S.170f.].

In ihrem Engagement für erfolgreiches Lehren und Lernen sollten Universitäten und Hochschulen nicht zuletzt darauf setzen, die Begeisterung der Studierenden für technische Phänomene zu wecken und weiter zu fördern. Das gemeinsame Arbeiten an kleinen Aufgaben und Projekten und das forschende Erkunden von Zusammenhängen sind dabei Faktoren, die Studierende zum Lernen motivieren und aus denen Studienerfolg wächst. Laborpraktika sind Veranstaltungen, in denen sich dies besonders gut umsetzen lässt. Gerade auch in ihnen wird die Faszination für die Studienfächer einer technischen Universität lebendig und greifbar. Denn für die Studierenden ist das Laborpraktikum die Gelegenheit, relevante theoretische Phänomene auch mithilfe von praktischen Erfahrungen zu verstehen. Die Labore ergänzen und erweitern damit die Lernmöglichkeiten, die durch die klassischen Lehrformate geboten werden. Doch gerade auch praktische Tätigkeiten müssen mit Bedacht in Lernprozesse integriert und mit theoretischer Reflexion eingerahmt werden [18, S.3].

Laborpraktika eröffnen durch die Kleingruppenarbeit und einen guten Betreuungsschlüssel die Möglichkeit, individueller als in anderen Veranstaltungen auf Studierende einzugehen. Sie geben außerdem die Gelegenheit, Arbeiten eines Ingenieurs bzw. einer Ingenieurin zu üben, berufstypische Arbeitsabläufe zu erleben und, nicht zuletzt, das vielbeschworene kritische Denken zu fördern. Kritisches Denken kann auch im Rahmen der Gestaltung ingenieurwissenschaftlicher Lernprozesse definiert werden als die Untersuchung einer Frage oder eines Problems mit Blick auf die Bildung einer Hypothese oder einer Schlussfolgerung. Dabei können bzw. sollen im Untersuchungsprozess alle Annahmen aktiv hinterfragt werden. Kritisches Denken ist somit Voraussetzung und Nährboden jeglicher wissenschaftlichen Arbeit. Als grundlegender Bestandteil von Forschung und Lehre gehört es zu den Hauptzielen von Universitäten und Hochschulen, die Fähigkeit der Studierenden zu kritischem Denken zu fördern. Dies vollzieht sich nicht automatisch, sondern erfordert kontinuierliche Übung und die Unterstützung durch Lehrmethoden, die konkrete Probleme und deren Diskussion fokussieren.

Von der Förderung kritischen Denkens ist es kein weiter Weg zur Gestaltung der Laborarbeit als Forschungsprozess. Denn im Laborpraktikum können Studierende forschend lernen, indem sie allein oder in der Gruppe Schritte eines Forschungsprozesses selbstständig erfahren. Laborpraktika geben einen passenden Rahmen, Studierende früh an Fragen, Themen und Methoden von Forschung und Entwicklung des jeweiligen Fachs heranzuführen. Vor allem geht es darum, dass Studierende selbst forschend agieren und Prozessschritte immer selbstständiger durchlaufen, begonnen bei der Identifikation eines Forschungsproblems bis hin zur Präsentation und Diskussion von Ergebnissen [18, S.6ff.].

3.2. Ist-Aufnahme des Versuchsstandes

Im ZET steht der Experimental-Stirlingmotor **ST 05 G** mit einer Leistung von 300 – 500 *W*. Es handelt sich hierbei um eine Gamma-Typ Maschine mit Kurbeltriebwerk. Der Motor wurde 1992 von Dieter Viebach als Demonstrationsmaschine für die Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse entwickelt.

An der HAW wurde der ST 05 G vor Jahren², bestehend aus 13 Alugussteilen nach dem Zeichnungs-

²Eine genaue Jahresangabe liegt nicht vor.

satz 3. Ausgabe vom November 1999 von Dieter Viebach zusammengebaut. Die Abbildungen 3.2.1 und 3.2.2 zeigen den Zusammenbau des Stirlingmotors im Quer- und Längsschnitt. Eine Zusammenbauzeichnung mit Positionsnummern und zugehöriger Stückliste ist im Anhang A und B zu finden.

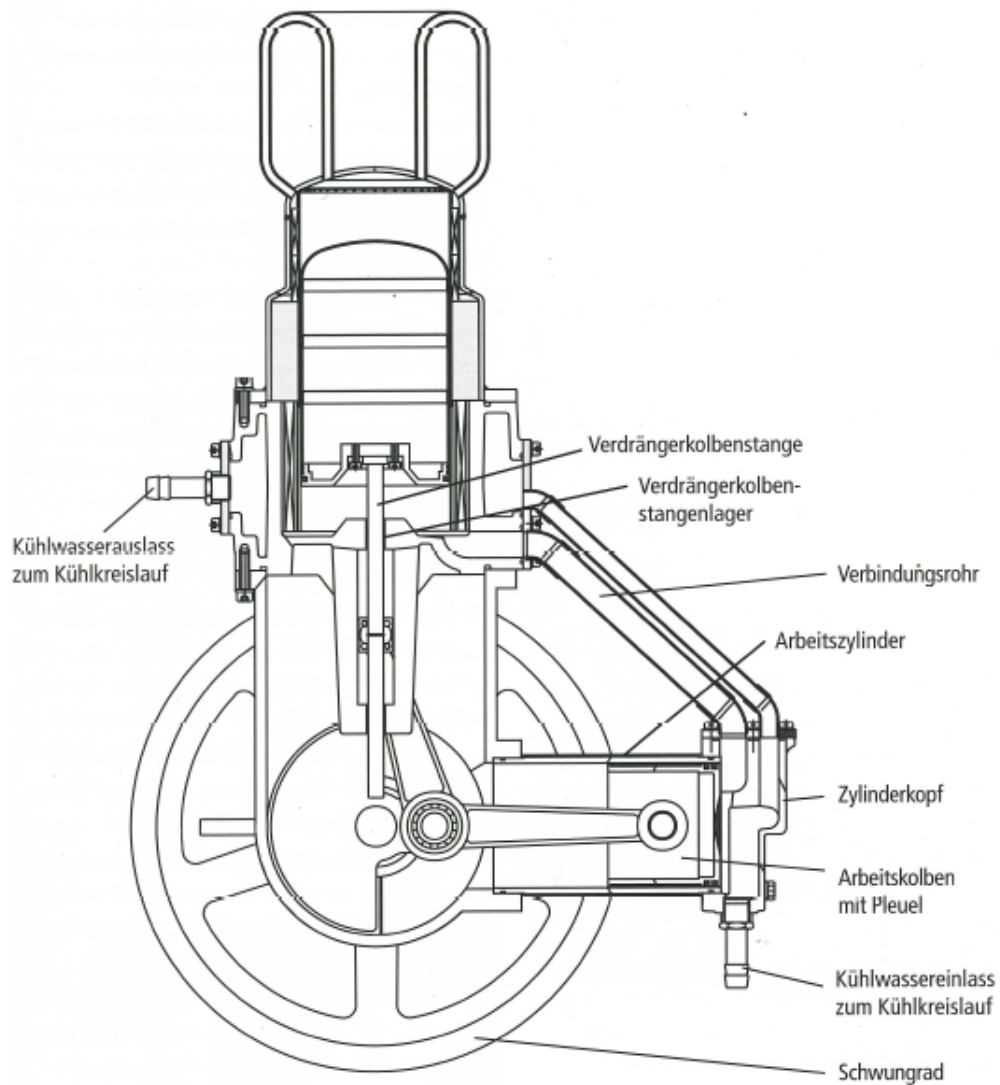


Abbildung 3.2.1. – ST 05 G im Querschnitt [5, S. 78]

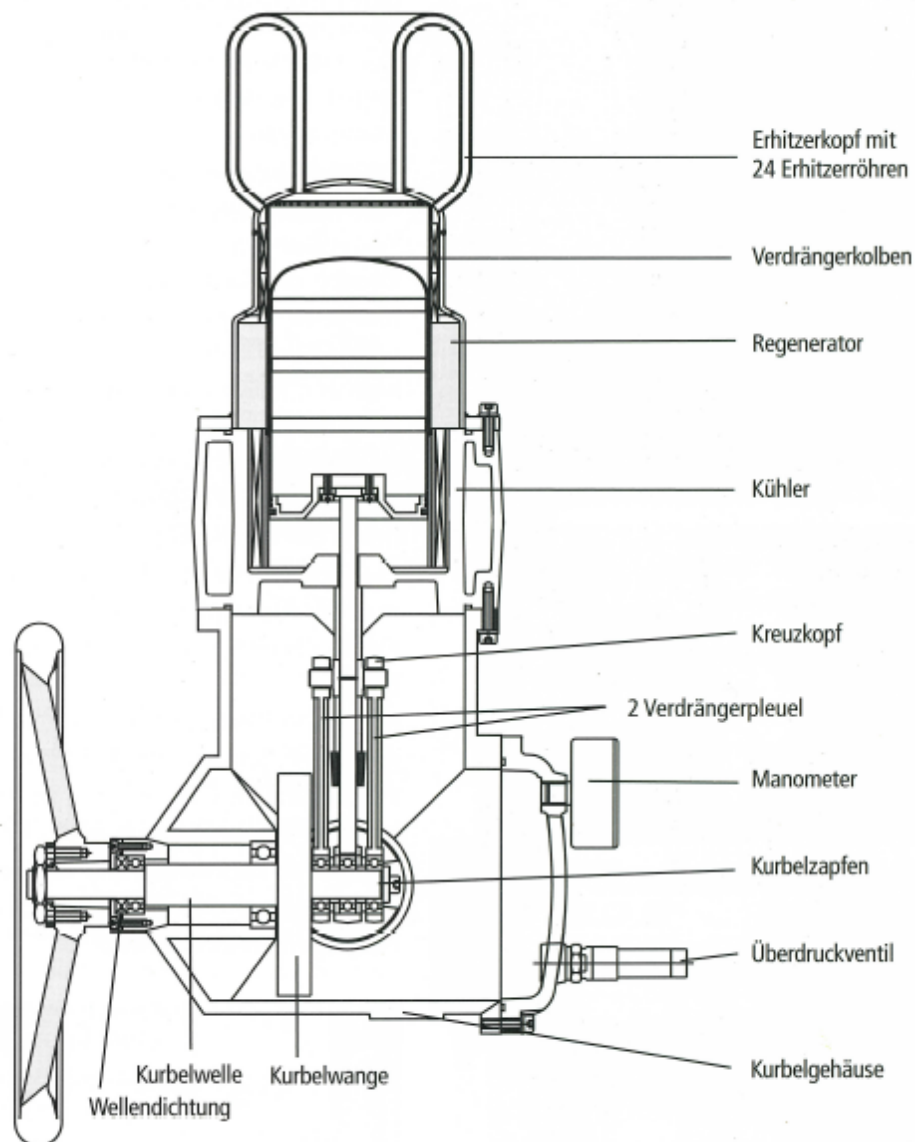


Abbildung 3.2.2. – ST 05 G im Längsschnitt [5, S. 79]

Als Arbeitsgas wird Luft verwendet, welches unter einem Druck p von maximal 10 bar steht. Bei einer Drehzahl n von 600 min^{-1} wird eine Motorleistung P_M von ca. 300 W abgegeben, maximal können etwa 500 W erreicht werden. Der Verdränger hat einen Durchmesser d von 96 mm, der Arbeitskolbendurchmesser beträgt 85 mm. Der Hub s wird mit 75 mm angegeben. Die erforderliche Prozesstemperatur am Erhitzerkopf liegt für 500 W Leistungsabgabe bei ca. 650°C . Der Maschinenwirkungsgrad (ohne Brenner) η_M liegt bei 22 %. Der Kühler ist ein Wassermantel, in den ca. 320 Kupferlamellen eingelegt werden, um die Wärmeübertragungsfläche zu vergrößern. Der Regenerator besteht aus einem Edelstahl-Drahtgeflecht, in dem einzelne Drähte einen Durchmesser von 0,06 mm besitzen [7, S.229]. In Tabelle 3.1 sind die technischen Daten zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Wert
Abmessungen	mm	300x350x600
Gewicht ohne Schwungrad	kg	20
Masse Schwungrad	kg	7,5
Durchmesser Schwungrad	mm	280
Bohrung Arbeitszylinder	mm	85
Bohrung Verdrängerzylinder	mm	96
Hub	mm	75
Betriebsdruck	bar	max. 10
Arbeitsgas		trockne Luft, Helium oder Stickstoff
Wirkungsgrad	%	22
mechanische Leistung	W	500
max. Erhitzertemperatur	°C	650
Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹	800
Drehmoment	Nm	8
Wärmequelle		beliebig, idealerweise feste Biomasse
Kühlung		Wasser

Tabelle 3.1. – Technische Daten des ST 05 G [19]

Der Erhitzer des Stirlingmotors im ZET entspricht nicht der Abbildung 3.2.1. Er scheint die Ausführung der Bauart Uwe Moch zu sein. Eine Zeichnung mit Maßen liegt nicht vor. Unter Beibehaltung der Gesamtkonstruktion sind von Uwe Moch der Verdrängerkolben, der Kühler und der Erhitzerkopf entsprechend seiner Fertigungsmöglichkeiten modifiziert worden. Der als Schweißteil ausgeführte Erhitzerkopf ist in der Art wie der als Edelstahlfeingussteil gegossene Kopf aufgebaut. Die Erhitzerrohre münden bei dieser Ausführung unmittelbar in den Regenerator [20]. Der Erhitzer besitzt 24 Erhitzerrohrbögen, wovon 12 die Abmessungen ca. $8 \times 410 \text{ mm}$ und die anderen 12 die Abmessungen ca. $8 \times 390 \text{ mm}$ haben.³ Der kleinste Abstand zwischen den Erhitzerrohren beträgt ca. 7 mm . Abbildung 3.2.3 zeigt den Erhitzerkopf des ST 05 G im ZET.

³Gemessen vom Regenerator bis zur Mündung in die Erhitzerhaube.



Abbildung 3.2.3. – Erhitzerkopf des ST 05 G im ZET

Die Abbildungen 3.2.4 und 3.2.5 zeigen den aktuellen Versuchsstand im ZET. Der Motor wurde gasbeheizt gefahren.

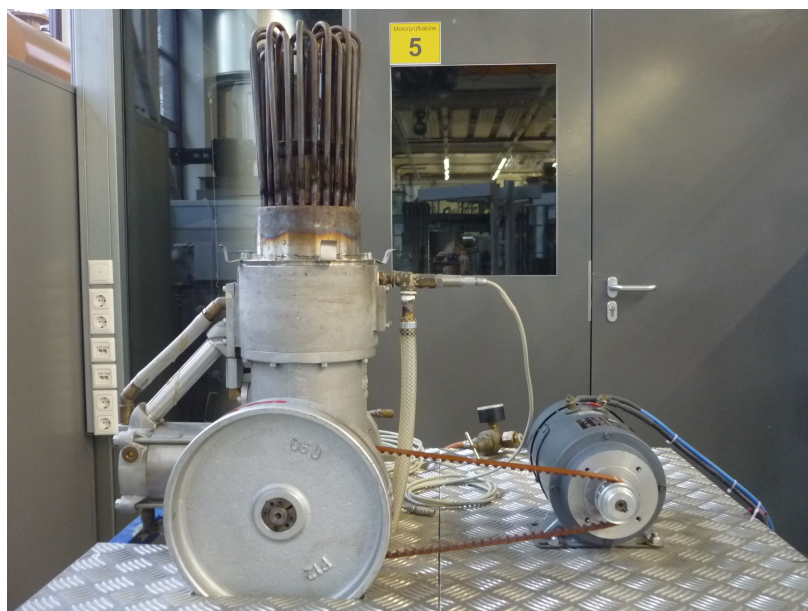


Abbildung 3.2.4. – Aktueller Experimentalmotor ST 05 G im ZET

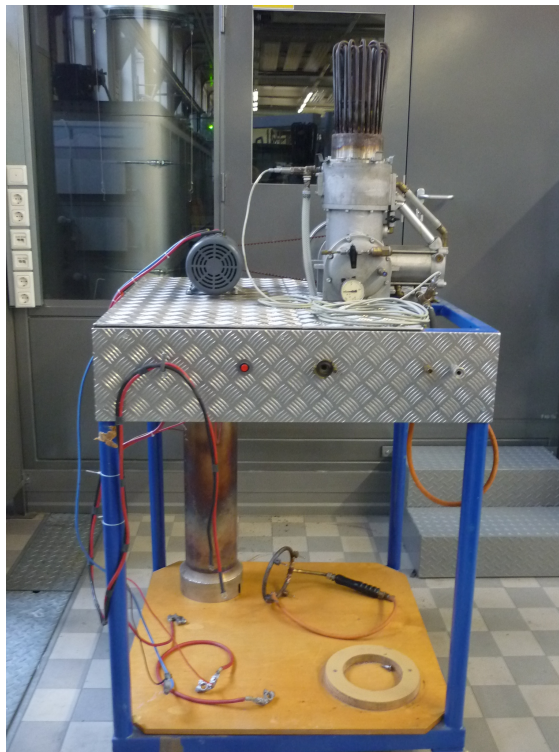


Abbildung 3.2.5. – Aktueller Versuchsstand im ZET

Der Stirlingmotor ist auf einer Aluminiumplatte befestigt. Die Platte ist mit einem Rolltisch verschraubt. Der Versuchsstand ist daher mobil bewegbar. Das Schwungrad des Motors ist über einen Keilriemen mit einem Gleichstromgenerator der Firma Perma-Drive (L56/167-242, $P = 550 \text{ W}$, $n = 2400 \text{ min}^{-1}$, $I = 30 \text{ A}$, $U = 24 \text{ V DC}$, Motor-Nr. 599394) verbunden. Dieser ist ebenfalls mit der Platte verschraubt. Unterhalb der Tischplatte befindet sich ein Relais, welches mit dem Generator und mit zwei Autobatterien verbunden werden kann. An der Seite des Tisches befindet sich ein roter Knopf. Mit entsprechender Verkabelung des Relais' kann hierüber der Stirlingmotor gestartet werden. An dem Kühlwassereinlass und -auslass sind je ein Thermoelement vorhanden und ein Schlauch angebracht, welche mit dem Tisch verbunden sind. Die Kühlschläuche werden daher über den Tisch mit dem Stirlingmotor verbunden. Für die Gasbefeuern bzw. die Gasflasche ist ein Manometer am Tisch angebracht und ein Ringbrenner vorhanden. Dieser kann über den Erhitzerkopf geführt werden. Zum Schutz und zur gezielten Wärmeübertragung ist eine zylinderartige Haube verfügbar, welche ebenfalls über den Erhitzer samt Ringbrenner gesetzt werden kann. Abbildung 3.2.6 zeigt diesen Aufbau. Im unteren Bereich des Rolltisches befindet sich ein weiterer Boden. Hier ist ein einfacher Platzhalter (Kreisring aus Holz) für die Gasflasche angebracht.



Abbildung 3.2.6. – ST 05 G mit Ringbrenner und Haube

4. Konzeptvarianten des Versuchsstandes

4.1. Konzept I: Vorhandener Stirlingmotor mit neuer Wärmequelle

Als Wärmequelle für den Stirlingmotor im ZET wurde ein Gasbrenner eingesetzt. Aus rechtlichen Gründen ist dieser Einsatz nicht mehr möglich. Daher soll eine Elektroheizung als Wärmequelle verwendet werden. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist die bessere Regulierbarkeit der Temperatur am Erhitzer. Im Folgenden wird der Versuch beschrieben, eine passende Heizung zu realisieren. Parallel dazu wurde mit einfachen Mitteln erprobt, ob der ST 05 G generell zum Laufen zu bringen ist.

4.1.1. Technische Anforderungen

Der Stirlingmotor ST 05 G ist für eine Leistung P_M von 300 – 500 W ausgelegt. Um die maximale Leistung von 500 W zu erlangen, muss am Erhitzerkopf eine Prozesstemperatur von 650°C vorliegen. Der Motorwirkungsgrad η_M ist mit 22 % angegeben. Dieser wurde jedoch mit Gasbefeuerung nie erreicht. Laut dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. Jurijs Tjunikovs¹ wurde ein Wirkungsgrad von 1 – 2 % erzielt. Angenommen wird daher ein Wirkungsgrad von $\eta_M = 5 \%$. Als benötigte Leistung der Heizung P_H ergibt sich:

$$P_H = \frac{P_M}{\eta_M} \quad (4.1)$$

$$P_{H,min} = \frac{300 \text{ W}}{0,05} = 6000 \text{ W} = 6 \text{ kW}$$

$$P_{H,max} = \frac{500 \text{ W}}{0,05} = 10000 \text{ W} = 10 \text{ kW}$$

Als Übertragungsfläche für die Wärme von der Heizung auf den Erhitzer des Stirlingmotors stehen 24 Erhitzerrohre zur Verfügung. Die gemessenen Maße und berechneten Werte der Erhitzerrohrbögen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

¹Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Kolbenmaschinen am Department Maschinenbau und Produktion der Fakultät Technik und Informatik, HAW Hamburg

Parameter	Einheit	Erhitzerrohr A	Erhitzerrohr B
Durchmesser	mm	8	8
Länge	mm	410	390
Umfang	mm	25,13	25,13
Anzahl		12	12
Fläche	m ²	0,1237	0,1176

Tabelle 4.1. – Maße der Erhitzerrohrbögen

Daraus resultiert eine vorhandene maximale Gesamtfläche für die Wärmeübertragung am Erhitzer von:

$$A_{ges} = A_{ErhitzerrohrA} + A_{ErhitzerrohrB} \quad (4.2)$$
$$A_{ges} = 0,1237 \text{ m}^2 + 0,1176 \text{ m}^2 = 0,2413 \text{ m}^2$$

4.1.2. Angebote und Realisierung

Als mögliche Wärmequelle kommt eine Begleitheizung in Frage. Eine Begleitheizung ist eine Vorrichtung, mit deren Hilfe man ein Rohr von außen beheizen kann. Sie wird mit Strom betrieben und wandelt Elektrizität in Wärme um.

Das Heizelement besteht aus einem speziellen Kunststoff mit eingebetteten Kohlenstoffteilchen, die zwischen den beiden parallelen Kupferleitern die Strompfade bilden. Steigt die Temperatur, so dehnt sich der Kunststoff aus, die Kohlenstoffpartikel entfernen sich mehr und mehr voneinander. Dadurch werden die Strompfade unterbrochen und die Heizleitung wärmt nicht mehr. Kühlt die Heizleitung ab, so ziehen sich die Kunststoffteilchen wieder zusammen und die Strompfade werden wiederhergestellt (die Heizleitung produziert Wärme). Durch diese Selbstlimitierung reagiert die Heizleitung auf Temperaturschwankungen an jedem beliebigen Punkt des Leitungssystems [21].

Bei den in Tabelle 4.2 aufgelisteten Firmen wurden folgenden Begleitheizungen inklusive Zubehör angefragt:

Begleitheizungen

- (MI-)² Heizkabel
- (MI-) Heizleitungen
- Heizbänder
- Heizmanschetten
- Mikanit/Keramik-Heizelemente

²MI: mineralisiert

4.1 Konzept I: Vorhandener Stirlingmotor mit neuer Wärmequelle

Firma	Angebot	Preis [€]
ve//ingenieure GmbH	Standard-Heizhaube für den Erhitzerkopf des Stirlingmotors ST05G-CNC, Schaltschrank zum Betrieb der Heizhaube	16.875
Pro Therm GmbH	Absage	-
eltherm GmbH	Absage	-
FLEXELEC Dept, OMERIN GmbH	Absage	-
Pentair	keine Antwort	-
Hillesheim GmbH	Absage	-
PSG Petro Service GmbH & Co.KG	Absage	-
MiL Heating Systems GmbH	Heizleiter MIL-HC-INC gewickelt als Spirale, Digitaler Industrieregler Serie MIL-RD 1011-24 A	1.059
Watlow GmbH	keine Antwort	-
Eugen Mickenhagen GmbH & Co.KG	Absage	-

Tabelle 4.2. – Übersicht Anfragen und Angebote für Begleitheizung

Die Angebote und Datenblätter der Heizungen sind im Anhang C zu finden.

Das Angebot der Firma MiL Heating Systems GmbH ist für den Erhitzer unbrauchbar. Bei dem Angebot handelt es sich um einen Heizleiter gewickelt als Spirale. Weder die Geometrie ist passend noch ist die Heizleistung von 5510 W ausreichend.

Das Angebot der Firma ve//ingenieure GmbH scheint auf den ersten Blick passend. Das Unternehmen hat den ST 05 G Zeichnungssatz von Dieter Viebach überarbeitet und bietet den Experimental-Stirlingmotor in der Version ST05G-CNC an. Passend für den Erhitzerkopf des ST05G-CNC wurde die elektrische Heizhaube EHH70 entwickelt. Die Heizhaube EHH70 beheizt den Stirlingmotor ST05G-CNC unter reproduzierbaren Bedingungen. Sie verfügt über 3-phasige elektrische Mantel-Heizelemente mit einer Leistung von ca. 7 kW , einen Temperatursensor sowie elektromechanisch angetriebene Lüfter für das Heißgas und für die Kühlung der Oberflächen. Gegenüber der Umwelt ist die Heizhaube thermisch isoliert. Die Heizhaube ist für Temperaturen innerhalb bis max. 800°C ausgelegt. Die Heizhaube müsste für den Stirlingmotor der HAW angepasst werden, da der Erhitzer in Abbildung 4.1.1 der Serienausführung 2013 des ST05G-CNC entspricht und somit nicht mit den Maßen des Erhitzers der Bauart Uwe Moch übereinstimmt.

4.1 Konzept I: Vorhandener Stirlingmotor mit neuer Wärmequelle

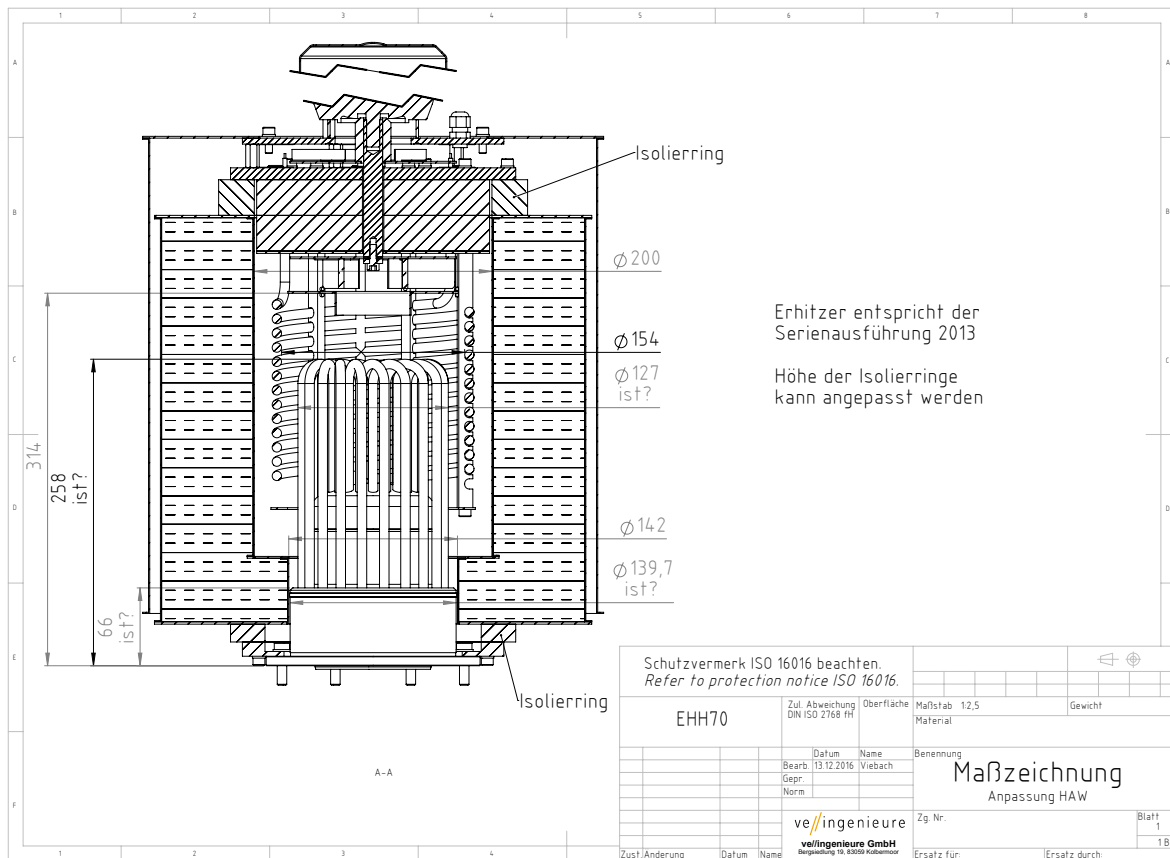


Abbildung 4.1.1. – Schnittansicht der Heizhaube EHH70

Ein Vergleich beider Erhitzer ergibt, dass der aktuelle Erhitzerkopf der Stirlingmotors im ZET mit einem maximalen Durchmesser von 155 mm zu groß für die Heizhaube EHH70 ist. Auch der Durchmesser des Regenerators mit 145 mm ist nicht für die Heizhaube passend und die maximale Höhe des Erhitzers mit 308 mm ist grenzwertig. Abbildung 4.1.2 zeigt den aktuellen Erhitzerkopf mit Bemaßung.

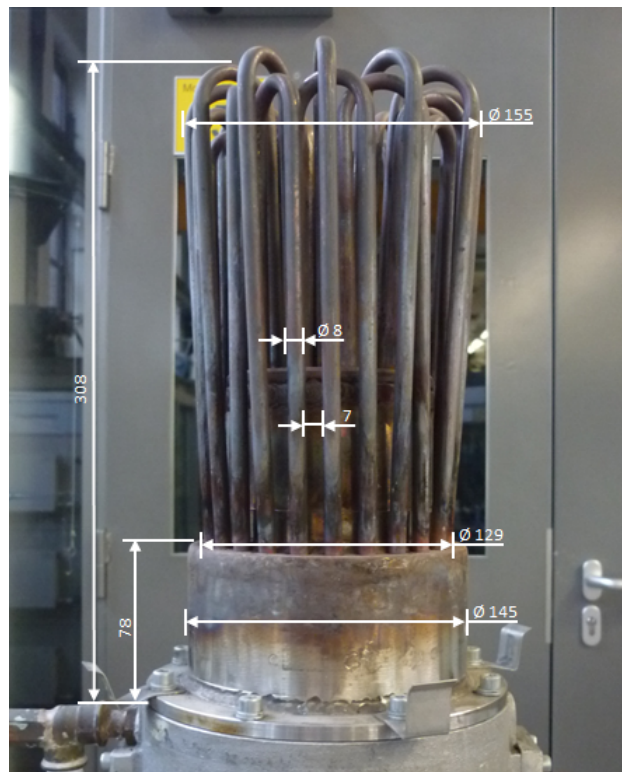


Abbildung 4.1.2. – Erhitzerkopf Bauart Uwe Moch mit Bemaßung

Hinzu kommt der sehr hohe Preis der Heizhaube von 9.975 €. Somit ist auch dieses Angebot nicht brauchbar.

Alle anderen angefragten Firmen konnten kein Angebot unterbreiten. Als Begründung nannten sie keine passenden Mittel. Sie gaben an, dass die zur Verfügung stehende Wärmeübertragungsfläche des Erhitzers für den Leistungsbedarf viel zu klein ist. Hinzu kommt der kleine Radius der Erhitzerrohre von 4 mm und der Abstand von 7 mm zwischen ihnen. Die Heizkabel dürften somit nur einen maximalen Durchmesser von $< 3,5\text{ mm}$ mit einem Biegeradius von 4 mm besitzen. Diese Anforderungen samt der gewünschten Leistung von $6 - 10\text{ kW}$ und der Prozesstemperatur von 650°C sind nicht realisierbar.

4.1.3. Versuch der Inbetriebnahme

Zeitgleich zu dem in Kapitel 4.1.2 dargestellten Bestreben wurde getestet, ob der Stirlingmotor überhaupt zum Laufen zu bringen ist. Dafür wurde das in Abbildung 4.1.3 dargestellte Ersatzschaltbild realisiert.

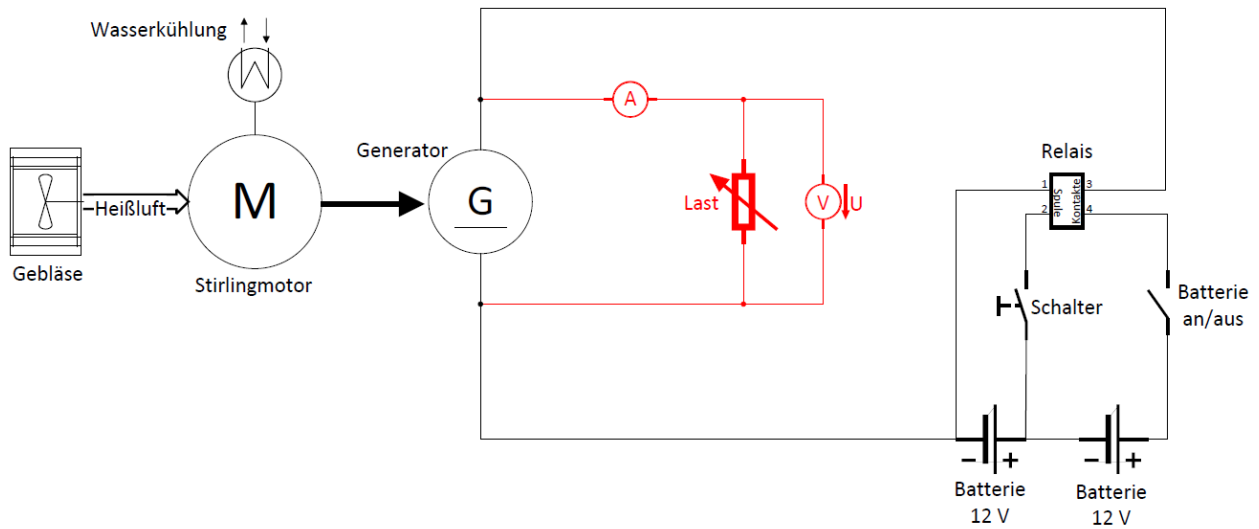


Abbildung 4.1.3. – Darstellung des Versuchsaufbaus

Im ZET steht ein Gebläseprüfstand für die Messung eines Rußsensors mit direkt regelbaren Temperatur- und Strömungsbedingungen (Motorbox Nr. 3). Das Gebläse arbeitet mit der umgebenden reinen Luft. Ein Radialgebläse beschleunigt die reine Luft bei einer maximalen Drehzahl von 1500 min^{-1} durch eine nachgeschaltete Düse. Die Frequenz des Gebläses ist über ein Bedienpult bis maximal $1,5 \text{ kW}$ steuerbar, damit kann der Luftmassenstrom stufenlos gewählt werden. Zur Erwärmung des Luftmassenstromes durchläuft die Luft einen Luftherhitzer mit einer Leistung von 17 kW vor Austritt aus der Düse. Ein Thermoelement nimmt die Ablufttemperatur auf und gibt diese an die dSpaceBox. Mit einem Regler wird die Temperatur des Luftmassenstromes an einem konstanten Sollwert gehalten. Die Luft kann maximal auf 650°C erhitzt werden. Ein Luftmengenmessgerät am Eingangsrohr des Gebläses ermöglicht die Messung des Luftmassenstroms [22, S.29].

Die Abgasrohrsegmente des Prüfstandes wurden so zusammengesetzt und aus der Motorbox herausgeführt, dass der Ausgang des Gebläses auf den Erhitzerkopf des Stirlingmotors zeigt. Der Erhitzer wurde unmittelbar durch die Gebläseabluft bei definiertem Massenstrom und geregelter Temperatur von 600°C angeströmt. Zur gezielteren Wärmeübertragung wurde aus Aluminiumblech ein Zylinder geformt und über den Erhitzer gesetzt.

Der Motor wurde mit Luft mit einem Betriebsdruck von 8 bar aufgeladen. Zwei Kühlschläuche wurden am Versuchsstand angebracht und mit dem Wasseranschluss der Motorbox verbunden.

Der Stirlingmotor wird über den Generator elektrisch angelassen. Dafür werden über ein Relais zwei 12 V Batterien mit dem Generator verschaltet (vgl. Abbildung 4.1.3). Über den roten Knopf ("Schalter") am Rolltisch des Versuchsstands wird der Motor gestartet.

Die rot gezeichnete Schaltung wurde nicht realisiert. Sie zeigt einen möglichen Versuchsaufbau zur Messung der Leistung des Generators und folglich des Stirlingmotors als auch eine Regulierbarkeit der Drehzahl des Stirlingmotors durch eine regelbare Last.

Es wurde mehrere Male versucht, so den Motor zu starten. Nach der Schaltkreisunterbrechung durch den roten Knopf ist es nicht ein einziges Mal gelungen, den Stirlingmotor auch nur ansatzweise zum Laufen zu bringen. Es kann also nicht sichergestellt werden, dass der Motor überhaupt noch funktionsfähig ist.

4.1.4. Ergebnis

Ein passendes Angebot für eine elektrische Heizung kann nicht erbracht werden und die Realisierung einer neuen Wärmequelle für den vorhandenen Stirlingmotor ST 05 G wird daher nicht weiter verfolgt. Da es außerdem nicht gelungen ist, den Motor generell zu starten, wurde an dieser Stelle entschieden, dass die Konzeptionierung und Konstruktion des Aufbaus zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors mit dem vorhanden Experimentalmotor des ZETs nicht weiter in Betracht gezogen wird.

Um die Funktionstüchtigkeit des Stirlingmotors zu garantieren, wurde beschlossen, Angebote für einen komplett neuen Experimentalmotor zusammen mit passender Heizung auszuarbeiten.

4.2. Konzept II: Neuer Stirlingmotor inklusive Heizung

Es ist leider nicht möglich, mindestens drei passende Angebote auszuarbeiten und an dieser Stelle zu präsentieren. Die Schwierigkeiten liegen darin, dass es nur wenige bzw. keine Anbieter für Experimentalmotoren in der Größenordnung wie des vorliegenden ST 05 G gibt. Stirlingmotoren als kleine „Tischvarianten“ gibt es zahlreich, bei größeren Motorleistungsklassen inklusive Wärmequelle ist die Auswahl gering. Es kann daher nur ein Angebot der Firma ve//ingenieure GmbH vorgelegt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass ve//ingenieure GmbH seinen Experimental-Stirlingmotor derzeit überarbeitet. Daher sind die Datenblätter der Positionen 1 und 4 des Angebots als vorläufig gekennzeichnet.³ Tabelle 4.3 zeigt die angefragten Komponenten und Preise der Leistungen. Die Angebote und die zugehörigen Datenblätter⁴ sind im Anhang D zu finden.

³Die angegebenen Leistungsdaten stammen von der Vorläufermaschine.

⁴Für den Messgenerator STD20 (vgl. Tabelle 4.3 Pos. 4b) ist kein Datenblatt vorhanden. Die Daten wurden erfragt.

Pos.	Komponente	Menge	Preis [€]
1	Stirlingmotor ST05G-CNC-II, Standard-Ausführung	1	23.650
1a	zusätzliches Thermoelement Typ "K", im Motor fertig montiert	1	150
1b	zusätzlicher Standard-Drucksensor, im Motor fertig montiert	1	435
2	Standard-Heizhaube EHH70 für den Erhitzerkopf des Stirlingmotors ST05G-CNC-II	1	9.175
3	Schaltschrank zum Betrieb der Heizhaube (Pos.2)	1	6.700
4a	Asynchron Generator / Motor AGM-10	1	6.800
4b	Messgenerator STD20	1	22.050

Tabelle 4.3. – Übersicht Komponenten und Netto-Preise des Angebots der Firma ve//ingenieure GmbH

4.2.1. Stirlingmotor

Der **ST05G-CNC-II** (vgl. Abbildung 4.2.1) ist ein Labor-Stirlingmotor in Gamma-Bauweise mit einer maximalen Leistung P_M von ca. 500 W bei einer Drehzahl n von ca. 600 – 700 min^{-1} und ca. 600°C Gastemperatur im Erhitzerkopf. Als Arbeitsgas wird Stickstoff verwendet, welcher unter einem Druck p von maximal 10 bar steht. Der Verdränger und der Arbeitskolben haben einen Durchmesser d von 96 mm. Der Hub s wird mit 64 mm angegeben. Der Maschinenwirkungsgrad η_M liegt bei 20 %. Der ST05G-CNC-II ist für den motorischen Betrieb als Wärmekraftmaschine optimiert, kann jedoch in 4-Quadranten, also auch als Kältemaschine bzw. Wärmepumpe betrieben werden. Er ist mit einem Expansionswärmetauscher (Erhitzerkopf) für die Verwendung in staubarmer, schwefelfreier Brennraumatmosfera unter Sauerstoffüberschuss ausgerüstet, kann aber auch optional elektrisch mit der Heizhaube EHH70 beheizt werden. Der mechanische Ab- bzw. Antrieb erfolgt schwungradseitig durch einen Riementrieb oder direkt über den Wellenstummel. Neben der grundlegenden Ausrüstung, wie Manometer zur Fülldruckkontrolle, Sicherheitsventil und Befüllarmaturen für das Arbeitsgas, ist der Motor mit zahlreichen Zugängen für Temperatur- und Drucksensoren ausgestattet.

Standard-Sensorik

- 1 Zylinderdrucksensor Arbeitszylinder
- 2 Thermoelemente Typ "K" für Kühlmitteltemperatur
- 1 Thermoelement Typ "K" für Erhitzerrohr-Temperatur

Sensorzugänge

- 21 wahlweise für Thermoelemente oder Drucksensoren
- 4 weitere ausschließlich für Drucksensoren
- 7 weitere ausschließlich für Thermoelemente

4.2 Konzept II: Neuer Stirlingmotor inklusive Heizung

In Tabelle 4.4 sind die technischen Daten zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Wert
Abmessungen	mm	420x440x625
Gewicht ohne Schwungrad	kg	45
Masse Schwungrad	kg	ca. 10-15
Durchmesser Schwungrad	mm	315
Bohrung Arbeitszylinder	mm	96
Bohrung Verdrängerzylinder	mm	96
Hub	mm	64
Betriebsdruck	bar	max. 10
Arbeitsgas		trockener Stickstoff, eingeschränkt (kurzzeitig) trockene Luft
max. Motorwirkungsgrad	%	20
max. Leistung	W	500
max. Arbeitsgastemperatur im Erhitzerkopf	°C	600
max. Erhitzerrohr-Temperatur	°C	700
Drehzahlbereich	min ⁻¹	300-800
mittleres Drehmoment	Nm	max. 10
Kühlung		Motorkühlmittel auf Wasser-Glykolbasis, $\dot{V} = 2-5 \text{ l/min}$, $T_{rück} = 5-60^\circ\text{C}$, $p_{max} = 1 \text{ bar}$

Tabelle 4.4. – Technische Daten des ST05G-CNC-II (vorläufig)

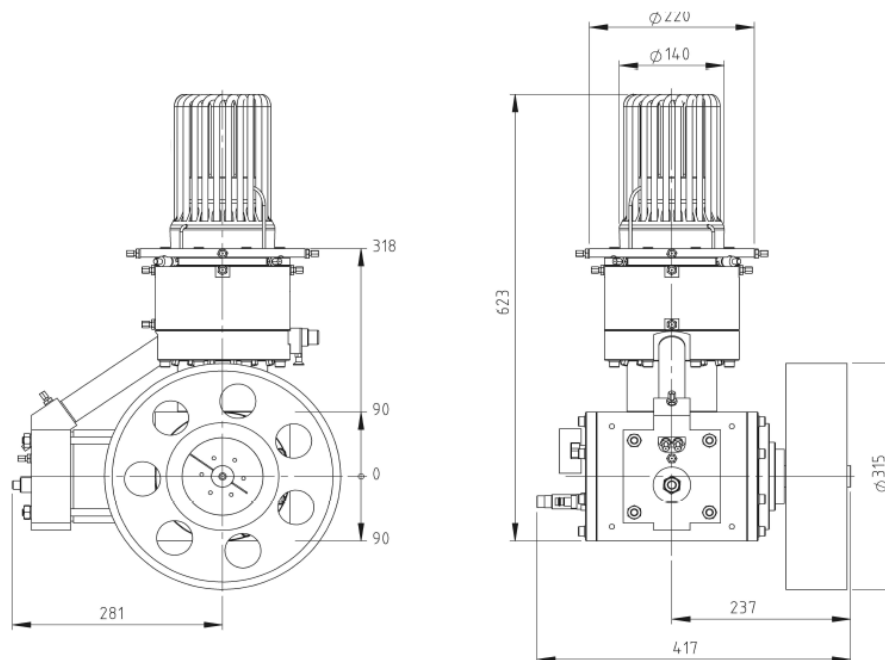


Abbildung 4.2.1. – ST05G-CNC-II im Längs- und Querschnitt (vorläufig)

Vor der Inbetriebnahme muss der Stirlingmotor in einem ausreichend dimensionierten, standsicheren Rahmen montiert werden. Am Motor befinden sich außerdem nicht abgedeckte, bewegte Bauteile und heiße Oberflächen. Vor der Inbetriebnahme muss sichergestellt werden, dass eine Gefährdung von Personen und Sachgütern ausgeschlossen ist. Zusätzlich muss der Stirlingmotor vor der Inbetriebnahme mit einer Notstopp-Einrichtung ausgerüstet werden. Ein Unterbrechen der Energiezufuhr allein ist wegen der im Motor gespeicherten thermischen Energie nicht ausreichend.

4.2.2. Heizung

Die elektrische Heizhaube **EHH70** (vgl. Abbildung 4.2.2) ist die gleiche, welche bereits in Kapitel 4.1.2 dargestellt wurde. Sie verfügt über elektrische Mantel-Heizelemente mit einer Leistung von ca. 7 kW und ist für Temperaturen innerhalb der Heizhaube bis max. 800°C ausgelegt. Die Heizhaube ist mit einem Temperatursensor, ausgeführt als Mantelthermoelement vom Typ "K" (NiCr-Ni), sowie einem elektromechanisch angetriebenen Lüfter für das Heißgas innerhalb der Heizhaube und für die Kühlung der Oberflächen der Heizhaube ausgestattet. Gegenüber der Umwelt ist die Heizhaube thermisch isoliert. Die Heizhaube hat einen maximalen Durchmesser von ca. 390 mm und die Höhe der Heizhaube über dem Anschlussflansch zum ST05G-CNC-II beträgt ca. 590 mm . Die Heizhaube wiegt ca. 40 kg .

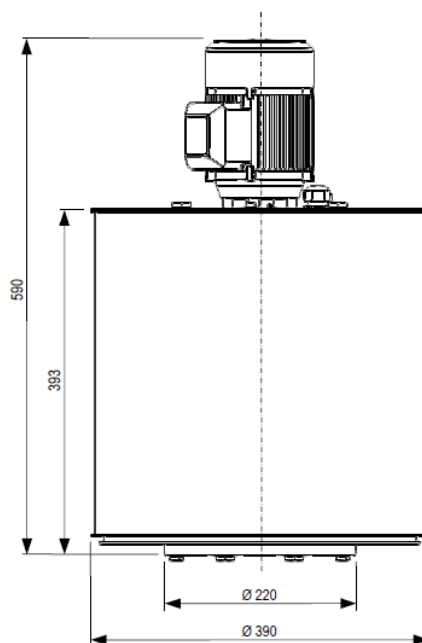


Abbildung 4.2.2. – Heizhaube EHH70

Der elektrische Anschluss der Heizhaube kann direkt am Schaltschrank (vgl. Tabelle 4.3 Pos. 2) erfolgen. Zum korrekten und bestimmungsgemäßen Betrieb der Heizhaube steuert ein Temperaturregler innerhalb des Schaltschranks über eine 3-phasige Leistungsendstufe die Heizelemente der Heizhaube an und hält über einen geschlossenen Regelkreis die Hauben-Temperatur nahe einem einstellbaren Sollwert. Dieser Sollwert kann manuell mit Hilfe einiger Tasten, optional auch über Ethernet per Mod-

Bus/TCP vorgegeben werden. Soll- und Ist-Temperaturen werden auf einem Display angezeigt.

Falls die Heizhaube ohne Schaltschrank betrieben wird, kann mit Hilfe eines digitalen Temperaturreglers zum direkten Anschluss eines Thermoelements Typ "K" sichergestellt werden, dass sich die Heizelemente immer unter ihrer Maximaltemperatur von 800°C befinden.

Zwar ist die Heizhaube thermisch isoliert, dennoch besteht die Gefahr, dass sich Oberflächen erhitzen können. Es muss daher beim Prüfstand darauf geachtet werden, dass weder Personen noch umgebendes Material durch die abgegebene Hitze gefährdet oder entzündet werden können und dass eine ausreichende Belüftung gewährleistet ist.

4.2.3. Generator

Zum Starten und Belasten kann der 4-polige **Asynchron Generator / Motor AGM-10** verwendet werden. Des Weiteren kann der AGM-10 zum Schleppen des Stirlingmotors für Kältemaschinen- und Wärmepumpenversuche eingesetzt werden. Der IE3 Drehstrom-Asynchrongenerator/-motor wird über einen Keilrippenriemen von der Kurbelwelle des Stirlingmotors angetrieben. Der Achsabstand ist einstellbar und die Riemen nachspannbar. Der Riemetrieb und das Schwungrad sind durch ein Schutzgehäuse abgedeckt. Die Spannungsversorgung der Asynchronmaschine kann wahlweise mit Festdrehzahl direkt am 3-phasigen 230 V/ 400 V Netz oder drehzahlvariabel über einen Frequenzumrichter erfolgen. In Tabelle 4.5 sind die technischen Daten zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Wert
Nennspannung	V	230 / 400
Nenndrehzahl bei 50 Hz	min^{-1}	1500
Wirkungsgradklasse		IE3
Nennleistung	W	1100
Nenndrehzahl Stirlingmotor anpassbar	min^{-1}	400-800
Masse	kg	ca. 35
Antrieb		Riemetrieb mit geräuscharmen Keilrippenriemen und wechselbaren Riemenscheiben

Tabelle 4.5. – Technische Daten des Asynchron Generator / Motor AGM-10

Die vom Generator abgegebene elektrische Leistung $P_{G,el}$ ist das Produkt aus Strom I und Spannung U an den Abgangsklemmen. Eine Bestimmung der mechanischen Leistung des Stirlingmotors $P_{M,mech}$ ist auf indirektem Weg nach der Ermittlung des Leistungs-/ Wirkungsgrad Kennfeldes der Riemetrieb-/ Generator-Kombination möglich.

$$P_{G,el} = U \cdot I \quad (4.3)$$

$$P_{M,mech} = P_{Welle} = \frac{P_{G,el}}{\eta_G} \quad (4.4)$$

Eine drehwinkelgenaue Bestimmung von Drehmomentverlauf und Verlauf der Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle ist mit diesem Versuchsaufbau nicht möglich. Hierfür ist ein Messgenerator mit Drehmomentmesswelle nötig, welches mit dem **Messgenerator STD20** realisiert werden kann. Der Messgenerator STD20 umfasst einen Drehstrom-Asynchrongenerator/-motor mit Kurzschlussläufer in Verbindung mit einem 3-phasigen Frequenzumrichter und einem Bremswiderstand. Ein 4-Quadranten-Betrieb wird unterstützt, sodass der Stirlingmotor sowohl mit einem Drehmoment belastet und ebenso angelassen werden kann als auch den Betrieb als Wärmepumpe bzw. Kältemaschine erlaubt. Die Asynchronmaschine ist mit einem Rotorlagegeber (Encoder) ausgerüstet, dessen Signale an den Frequenzumrichter geleitet werden. Durch diese Drehzahlrückführung wird die Drehzahl der Asynchronmaschine über einen im Umrichter implementierten geschlossenen Regelkreis nahe an der gewünschten Soll-Drehzahl gehalten. Die Asynchronmaschine und der Umrichter sind für Drehzahlen bis 1500 min^{-1} sowie einer Nennleistung von ca. $2,2 \text{ kW}$ ausgelegt. Das Nenndrehmoment liegt bei ca. 13 Nm .

Die generatorisch erzeugte elektrische Energie wird über den am Brems-Chopper angeschlossenen Bremswiderstand in thermische Energie umwandelt. Im normalen Betrieb setzt eine elektromagnetisch gelüftete Scheibenbremse federbetätigt ein, wodurch der Motor sowie alle rotierenden Massen des Leistungs-Stranges mit ca. 40 Nm abgebremst werden. Auch im Falle eines Stromausfalles wird die Scheibenbremse den Versuchsstand in einen möglichst ungefährlichen Zustand bringen.

Das Drehmoment an der Kurbelwelle wird über eine schleifringlose Drehmomentmesswelle erfasst. Zusätzlich zum Drehmoment werden über einen Inkrementalgeber und einen induktiven Initiator auch der Drehwinkel und die Momentangeschwindigkeit der Kurbelwelle aufgezeichnet. In Tabelle 4.6 sind die technischen Daten zusammengefasst.

Parameter	Einheit	Wert
Nennspannung	V	400
Drehzahlbereich	min^{-1}	+/- 1500
Drehmoment	Nm	max. 50
Nenndrehmoment	Nm	13
Nenndrehmoment Scheibenbremse	Nm	40
mech. Nennleistung	W	2200
Messbereich Drehmomentmesswelle	Nm	+/- 50

Tabelle 4.6. – Technische Daten des Messgenerator STD20

Da eine volle Umdrehung einem Kurbelwinkel $\alpha = 2\pi$ entspricht, steht die Winkelgeschwindigkeit ω zur Drehzahl n in Beziehung über

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (4.5)$$

Die Leistung auf der Kurbelwelle bzw. des Stirlingmotors ist abhängig von der Drehzahl n vom Generator und vom Drehmoment M , welches auf die Welle aufgebracht wird.

$$P_{M,mech} = P_{Welle} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (4.6)$$

Der Stirlingmotor, die Drehmomentmesswelle mit dem inkrementalen Winkelgeber sowie die Asynchronmaschine sind über Wellenkupplungen miteinander verbunden. Der Messgenerator mit Drehmomentmesswelle ist auf einer Schwingplatte montiert, welche auch zur Montage des Stirlingmotors ST05G-CNC-II mit der Heizhaube EHH70 dient. Es ist darauf zu achten, dass die Schwingplatte vor Inbetriebnahme auf ein ausreichend dimensioniertes Fundament mit min. 500 kg Tragfähigkeit montiert wird. Des Weiteren befinden sich am Generator nicht abgedeckte, bewegte Bauteile und heiße Oberflächen. Vor der Inbetriebnahme muss sichergestellt werden, dass eine Gefährdung von Personen und Sachgütern ausgeschlossen ist. Zusätzlich muss der Generator vor der Inbetriebnahme mit einer Notstopp-Einrichtung ausgerüstet werden. Ein Unterbrechen der Energiezufuhr allein ist wegen der im Stirlingmotor gespeicherten thermischen Energie nicht ausreichend.

4.2.4. Weitere Mess- und Steuerungstechnik

Je nach Anzahl der zu messenden Temperaturen im Stirlingmotor sind weitere Thermoelemente Typ "K" notwendig. Von der Firma ve//ingenieure GmbH werden diese pro Stück für 150 € als fertig im Motor montiert angeboten (vgl. Tabelle 4.3 Pos. 1a). Sie weisen eine druckdichte Verschraubung und eine Anschlussleitung mit einem Thermoelement-Steckverbinder auf. Folgende Temperaturmessstellen wären für den Versuchsaufbau von Interesse:

Temperatur

- Kühlwassereinlass $T_{KW, ein}$ / -auslass $T_{KW, aus}$ (Standard-Sensorik)
- Erhitzerrohr T_{ER} (Standard-Sensorik)
- Heizhaube T_H (Standard-Sensorik)
- Gas im Kompressionsraum T_K
- Gas im Expansionsraum T_E

Ebenfalls im Angebot der Firma ve//ingenieure GmbH enthalten ist ein zusätzlicher fertig im Motor montierter Standard-Drucksensor (vgl. Tabelle 4.3 Pos. 1b). Dieser ist für den Versuchsaufbau nicht zwingend nötig, da als Standard-Sensorik ein Zylinderdrucksensor im Arbeitszylinder des Stirlingmotors bereits enthalten ist. Daher wird auf diese Position verzichtet.

Tabelle 4.7 enthält die Komponenten, die noch angefragt werden müssen. Es wurde recherchiert, mit welchen Preisen bei den jeweiligen Komponenten zu rechnen ist.

Anlagenteil	Komponente	Menge	Preis ca. [€]
Kühlung	Durchflussmesser/-regler digital	1	200
Heizung	Temperaturregler digital	1	350
Heizung	Leistungsmesser digital	1	400

Tabelle 4.7. – Komponenten, welche noch angefragt werden müssen

4.2.5. Kostenanalyse

In Tabelle 4.3 wurden primär die Komponenten angefragt, welche teuer und daher für die Kostenanalyse am wichtigsten sind. Mit den Preisen aus den Angeboten und den geschätzten Preisen für die noch nicht angefragten Komponenten, soll ein ungefährender Gesamtpreis für die Anlage ermittelt werden.

Anlagenteil	Komponente	Menge	Gesamtpreis [€]
Angebot vorliegend			
Motor	Stirlingmotor ST05G-CNC-II	1	23.650
Motor	Thermoelement Typ "K"	2	300
Heizung	Standard-Heizhaube EHH70	1	9.175
Generator	Messgenerator STD20	1	22.050
ohne Angebot			
Kühlung	Durchflussmesser/-regler digital	1	200
Heizung	Temperaturregler digital	1	350
Heizung	Leistungsmesser digital	1	400
Summe			56.125

Tabelle 4.8. – Kostenanalyse für Konzept II

Die Summe für die Kosten aus Tabelle 4.8 liegen bei ca. 56.125 € Netto. Da die Signalverarbeitung und Signalführung sowie die Anbindung an den Steuer-PC und auch alle weiteren konstruktiven Maßnahmen für den Aufbau des Versuchsstandes nicht Bestandteil dieser Arbeit sind, und ein Puffer für Änderungen und unvorhergesehene Kosten zur Verfügung stehen soll, werden 10 % auf den ermittelten Gesamtpreis aufgeschlagen. Somit muss für die hier geplante Anlage mit **Gesamtkosten** von ca. **62.800 € Netto** gerechnet werden.

5. Messungen im Versuchsstand

Basierend auf dem Konzept II (vgl. Kapitel 4.2) und den in der Kostenanalyse ausgewählten Anlagenteilen und zugehörigen Komponenten (vgl. Tabelle 4.8) sind die folgenden Ideen für mögliche Messungen und Laborversuche entstanden.

5.1. Entwurf des Versuchsaufbaus

Die Hauptfunktion des Versuchsstandes ist es, die Temperatur der Heizung und die Drehzahl der Kurbelwelle des Stirlingmotors auf einen gewünschten Wert einzustellen. Dabei wird ein Drehmoment auf den Prüfling ausgeübt. Währenddessen werden eine Vielzahl an Messungen vorgenommen und die Ergebnisse von einem PC mit entsprechender Software erfasst.

Erfasste Signale

- Absolutdruck im Arbeitszylinder (Kompressionsraum) p_K des Stirlingmotors
1 x analoges Signal vom Drucksensor
- mittleres Drehmoment M an der Kurbelwelle
1 x analoges Signal von der Drehmomentmesswelle
- Momentangeschwindigkeit n und Drehwinkel α der Kurbelwelle
1 x digitales Zähler-Signal vom Inkrementalgeber. Hieraus wird der Kurbelwinkel sowie die Momentangeschwindigkeit der Kurbelwelle berechnet.
1 x Referenz-Signal für 0° Kurbelwinkel, um den Zähler für die Inkrementalgeber-Signale zurückzusetzen
- Temperatur innerhalb der Heizhaube T_H
1 x Ist-Temperatur Heizhaube aus Temperaturregler über Ethernet (ModBus/TCP), wird vom PC aus dem Temperaturregler ausgelesen
- Temperaturen des Stirlingmotors:
Kühlmitteltemperatur $T_{KW, \text{ein}}$ und $T_{KW, \text{aus}}$
Erhitzerrohr-Temperatur T_{ER}
Temperatur im Verdrängerzylinder (Expansionsraum) T_E und Arbeitszylinder T_K
5 x analoge Signale von Temperatursensoren
- Kühlmitteldurchfluss \dot{V}
1 x analoges Signal vom Durchflusssensor

- Leistung der Heizhaube P_H

1 x Ist-Leistung Heizhaube aus Leistungsmesser über Ethernet (ModBus/TCP), wird vom PC aus dem Leistungsmesser ausgelesen.

Mit dem Stirlingmotor ST05G-CNC-II sind weitaus mehr Signalerfassungen und Messungen möglich (vgl. Kapitel 4.2.1). Hierbei handelt es sich um eine Auswahl, welche auf die möglichen Laborversuche in Kapitel 5.2 abgestimmt sind und daher so getroffen wurden.

Abbildung 5.1.1 veranschaulicht die Funktionsstruktur des Versuchszustandes und die Positionen der Messstellen. In Anhang E ist der Entwurf DIN A4-Format zu finden.

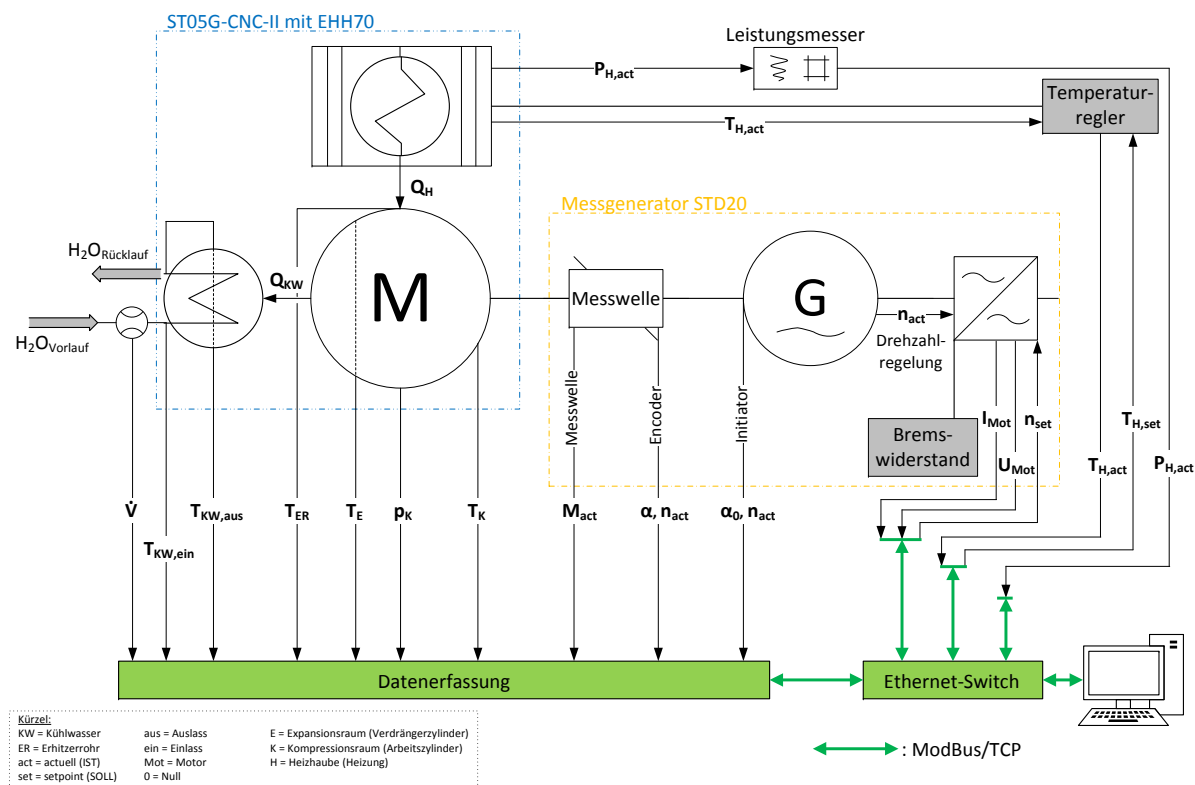


Abbildung 5.1.1. – Darstellung der Funktionsstruktur des Versuchsaufbaus und der Messstellen

Die Erfassung von sämtlichen beschriebenen analogen und digitalen Signalen erfolgt über ein System, das einseitig über einen A/D-Wandler (Analog-Digital-Umsetzer) mit programmierbaren Vorverstärkern verfügt. Ausgangsseitig kommuniziert das Datenerfassungssystem über ein Ethernet-Interface. Sowohl der Frequenzumrichter als auch der Temperaturregler und der Leistungsmesser verfügen ebenfalls über Ethernet-Schnittstellen, sodass auch die Signale Wirkstrom und Motorspannung des Umrichters sowie die aktuelle Ist-Temperatur und Ist-Leistung der Heizhaube abgefragt werden können.

5.2. Mögliche Laborversuche

Mit dem Versuchsstand können die folgenden primären Messaufgaben bewältigt werden:

- Messung und Darstellung von Druck und Drehmoment über den Kurbelwinkel (oder die Zeit) an einem vorgegebenen und stabilen Arbeitspunkt (Temperaturen und Drehzahl sind konstant)
- Erzeugung eines p-V-Diagramms mit bekannter Kinematik und Geometrie des Stirlingmotors
- Messung und Darstellung von mittlerem Druck, mittlerem Drehmoment und mittlerer Wellenleistung über die Drehzahl bei sonst konstanten Arbeitsbedingungen

Die möglichen Laborversuche bzw. Fragen/Aufgaben des Versuchsstandes sind im Folgenden dargestellt.

1. Wie groß ist die abgeführte Wärmeleistung während der isothermen Verdichtung?

Mit den erfassten Signalen zum Kühlmittel und Angaben zur Dichte ρ und spezifischen Wärmekapazität c lässt sich die Kühlleistung \dot{Q}_{KW} und somit die abgeführte Wärmeleistung bestimmen.

$$\dot{Q}_{KW} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{KW,aus} - T_{KW,ein}) \quad (5.1)$$

2. Welchen realen Wirkungsgrad hat der Stirlingmotor?

Der reale Wirkungsgrad η_{real} des Stirlingmotors spiegelt die Qualität des gesamten Systems wider. Er gibt an, wie effizient die zugeführte Wärmeenergie der Heizung in mechanische Energie umgewandelt wird. Mit dem Drehmoment M und der Drehgeschwindigkeit n wird die mechanische Leistung des Stirlingmotors gemäß Gleichung 4.6 berechnet.

$$P_{M,mech} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

Die berechnete Leistung $P_{M,mech}$ wird mit der Leistung der Heizhaube P_H , welche vom Leistungsmesser erfasst wird, ins Verhältnis gesetzt:

$$\eta_{real} = \frac{P_{M,mech}}{P_H} \quad (5.2)$$

3. Was ändert sich bei Variation der Drehzahl ($T_H = konst.$)?

Hier soll eine qualitative Beziehung zwischen den Größen Drehmoment M , Leistung des Stirlingmotors P_M und der Heizung P_H sowie dem realen Wirkungsgrad η_{real} hergestellt werden und der optimale Betriebspunkt des Motors ermittelt werden. Dazu werden die zugehörigen Motor-kennlinien $P = f(n)$ und $M = f(n)$ sowie $\eta = f(P)$ erzeugt und die Ergebnisse interpretiert.

4. Wie groß ist der mechanische Wirkungsgrad?

Die einzelnen Schritte der Energieumwandlung können weiter untersucht werden:

- I. Der real ablaufende Kreisprozess ist nicht ideal, d.h. hier geht Energie verloren.
- II. Reibungsverluste im Motor führen zu weiteren Energieverlusten.

An dieser Stelle wird untersucht, welcher Anteil der vom realen Kreisprozess gelieferten Energie vom Stirlingmotor letztendlich in Form von mechanischer Energie nach außen abgegeben wird. Mit bekannter Kinematik und Geometrie des Stirlingmotors kann das p-V-Diagramm erzeugt werden.

Der Absolutdruck p_K im Arbeitszylinder wird über den Kurbelwinkel α gemessen und dargestellt. Die Kolbenkinematik für Gamma-Maschinen kann näherungsweise mit der SCHMIDT-Methode wie folgt berechnet werden [1, S.94ff.]:

Der Kurbelwinkel α sei Null, wenn der Expansionskolben (Verdrängerkolben) im oberen Totpunkt steht.

Expansionsvolumen

$$V_E = \frac{V_{EH}}{2} \cdot [1 - \cos \alpha] \quad (5.3)$$

Kompressionsvolumen

$$V_K = \frac{V_{EH}}{2} \cdot [1 + \cos \alpha] + \frac{V_{HC}}{2} \cdot [1 - \cos(\alpha - \varphi)] \quad (5.4)$$

Hier ist das Vorzeichen zu beachten. Das Volumen im Arbeitszylinder eilt dem Expansionsvolumen um dem Winkel φ nach. In den Gleichungen enthalten sind:

Expansionshubvolumen = Verdrängerhubvolumen

$$V_{HE} = s_E \cdot A_E \quad (5.5)$$

$$V_{HE} = 64 \text{ mm} \cdot 96 \text{ mm} = 0,006144 \text{ m}^2$$

Kompressionshubvolumen = Arbeitshubvolumen

$$V_{HK} = s_K \cdot A_K \quad (5.6)$$

$$V_{HK} = 64 \text{ mm} \cdot 96 \text{ mm} = 0,006144 \text{ m}^2$$

Phasenverschiebungswinkel

$$\varphi = 90^\circ$$

Das gesamte Totraumvolumen V_D setzt sich aus dem Kompressionstotvolumen V_{DK} , dem Expansionstotvolumen V_{DE} und dem Regeneratorgasvolumen V_R zusammen.¹

$$V_D = V_{DE} + V_R + V_{DK} \quad (5.7)$$

¹Genaue Maßangaben können an dieser Stelle nicht gemacht werden, da keine Einzelzeichnungen des Stirlingmotors vorliegen.

Das gesamte Gasvolumen V_{ges} in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel α ist die Summe der Einzelvolumina:

$$V_{ges} = V_E + V_K + V_D \quad (5.8)$$

Die vom Kreisprozess geleistete Arbeit W entspricht der im p-V-Diagramm eingeschlossenen Fläche. Aus dem erzeugten p-V-Diagramm wird die indizierte Fläche durch numerische Integration ermittelt. Die Leistung erfolgt durch Multiplikation mit der Drehzahl:

$$P_{pV} = W_{pV} \cdot n \quad (5.9)$$

Zur Berechnung des mechanischen Wirkungsgrades η_{mech} wird die berechnete Leistung P_{pV} mit der mechanischen Leistung $P_{M,mech}$ ins Verhältnis gesetzt:

$$\eta_{mech} = \frac{P_{M,mech}}{P_{pV}} \quad (5.10)$$

5. Wie groß ist der stirlingsche (ideale) Wirkungsgrad?

Der Stirling-Prozess ist, ebenso wie der Carnot-Prozess, ein *idealer* Kreisprozess. Der sogenannte stirlingsche Wirkungsgrad gibt also den theoretischen Maximalwert an, der auch unter optimalen Bedingungen niemals übertroffen werden kann. Der real erreichte Wirkungsgrad ist deutlich kleiner. Mit den erfassten Temperaturen im Verdränger- und im Arbeitszylinder lässt sich der ideale Wirkungsgrad η_{ideal} gemäß Gleichung 2.23 berechnen.

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{T_K}{T_E}$$

6. Zusammenfassung und Ausblick

Seit einigen Jahren ist die Stirlingmaschine wieder verstärkt ins öffentliche Interesse gerückt. Die Potenzial der Stirlingmaschine gewinnt im Zuge zunehmender Bemühungen um den Umweltschutz und um die Reduzierung des Energieverbrauchs zur umweltfreundlichen und energiesparenden Erzeugung von mechanischer und elektrischer Energie sowie von Kälte und Wärme an Bedeutung. Marktpotenzial ist für den Einsatz in kleinen dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen vorhanden. Mit der Stirlingmaschine steht jetzt bereits eine marktreife Technologie zur Verfügung. Wesentliche Vorteile sind: Variabel in Bezug auf die Brennstoffauswahl, hohe Lebensdauer, bereits ausreichende Betriebserfahrung sowie Umweltverträglichkeit durch die Möglichkeit schadstoffarmer Verbrennungsverfahren bzw. erneuerbare Energiequellen zu nutzen. Das größte Potenzial und aussichtsreichste Anwendungsgebiet liegt aber in dem Einsatz von Stirlingmotoren in solaren Dish/Stirling-Systemen.

Im ZET des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen befindet sich ein Stirlingmotor, welcher bei Laborversuchen eingesetzt werden soll, die besonders die Wirkungsweise des Motors verdeutlichen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für den Aufbau eines Versuchsstandes zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors erstellt. Dafür wurden im ersten Teil dieser Arbeit die allgemeinen theoretischen Grundlagen des Stirlingmotors herausgearbeitet und dargestellt. Der Aufbau und das Funktionsprinzip sowie die Wirkungsweise wurden erläutert, ebenso wurden die thermodynamischen Grundlagen erklärt. Die verschiedenen Maschinentypen wurden gegenübergestellt und Anwendungsfelder für Stirlingmaschinen vorgestellt.

Für die Planung des Versuchsstandes erfolgte zunächst eine didaktisch-methodische Analyse mit einer Einordnung des Themas „Stirlingmotor“ in das Curriculum der HAW und eine Begründung für den Einsatz eines Labors im Allgemeinen. Die HAW Hamburg bietet das Modul „Solare Energiebereitstellung“ (SEB) im Bachelorstudiengang an. Mit dem in dieser Arbeit entworfenen Stirlingmotor-Versuchsstand besteht die Möglichkeit, das Modul um einen Praxisteil zu erweitern.

Nach der Aufnahme des Ist-Zustandes des Stirlingmotors erfolgte der Entwurf von zwei Konzeptvarianten für den Versuchsstand. Im ersten Konzept wurde eine neue Wärmequelle für den vorhandenen Stirlingmotor erarbeitet. Vorgesehen war eine elektrische Begleitheizung, welche sich aber technisch nicht realisieren ließ. Ebenso wurde der Versuch der Inbetriebnahme des Stirlingmotors mit vorhandenen Mitteln im ZET beschrieben und erläutert. Da beides zu keinem Erfolg führte, wurde ein weiteres Konzept für den Versuchsstand ausgearbeitet und vorgestellt. Um die Funktionstüchtigkeit zu garantieren, wurde ein Angebot für einen neuen Experimentalmotor zusammen mit passender Heizung eingeholt und präsentiert.

Der Versuchsaufbau beinhaltet einen Stirlingmotor, eine Heizung als Wärmequelle und einen Messgenerator mit Drehmomentmesswelle. Der Messgenerator umfasst einen Asynchrongenerator/-motor in Verbindung mit einem Frequenzumrichter. Die Asynchronmaschine ist mit einem Rotorlagegeber ausgerüstet, dessen Signale an den Frequenzumrichter geleitet werden. Die Erfassung von sämtlichen Signalen erfolgt über ein System, welches über ein Ethernet-Interface kommuniziert. Soll- und Ist-Werte können über Ethernet per ModBus/TCP vorgegeben bzw. abgefragt werden. Eine grobe Kostenanalyse ergab einen Gesamtpreis von ca. 62.800 € Netto für den Versuchsstand.

Basierend auf den Ergebnissen des zweiten Konzeptes sind Ideen für mögliche Messungen und Laborversuche entstanden, welche abschließend vorgeschlagen und dargestellt wurden. Ein Entwurf des Versuchsaufbaus, welcher die Funktionsstruktur und die Position der Messstellen darstellt, wurde erarbeitet und komplementiert diese Arbeit.

Anknüpfend an diese Arbeit sollten folgende Schritte zur praktischen Realisierung erfolgen:

- Auslegung und Anfrage der Komponenten aus Tabelle 4.7
- Entwurf und Realisierung der Signalverarbeitung, Signalführung und des Steuerungsprogramms (LabView)
- Kauf, Montage und Inbetriebnahme der Anlage

Es muss sich aber zunächst die grundlegende Frage gestellt und beantwortet werden, ob dieses Labor überhaupt realisiert werden sollte. Zwei wesentliche Aspekte spielen hierbei eine Rolle: zum einen der sehr hohe Anschaffungspreis und zum anderen der wahre Nutzen dieses Labors.

Der in der Kostenanalyse ermittelte Gesamtpreis des Versuchsstandes steht in keinem Verhältnis zu anderen bereits vorhandenen Prüfständen der HAW. Selbst wenn nur der Stirlingmotor und die Heizhaube angeschafft werden würden, da dieses die beiden Schlüsselkomponenten des Versuchsstandes sind, ergibt sich hierfür immer noch ein Nettopreis von fast 33.000 €.

Dem gegenüber steht der Sinn und der Nutzen eines Labors zur Untersuchung eines Stirlingmotors. Aufgabe war es, mit dem Laborversuch besonders die Wirkungsweise des Motors zu verdeutlichen. Dieses ist aber gar nicht möglich. Ein Großteil der Messungen und formulierten Versuche zielen auf die optimale Auslegung des Betriebspunktes des Motors ab. Das Funktionsprinzip und die Wirkungsweise des Stirlingmotors müssen bereits im Vorfeld manifestiert sein, um das Labor überhaupt verstehen zu können. Anders wäre dies, wenn man das Zusammenspiel der Kolben, des Arbeitsgases und der Wärmequelle *sehen* könnte. Dazu müsste der Motor aus einem durchsichtigen Material bestehen und das Arbeitsgas entsprechend der Temperatur gefärbt sein, was aber so nicht möglich ist.

Ein weiterer Punkt, welcher beachtet werden muss, ist die Einbindung in ein passendes Modul der HAW. Das Modul SEB bietet sich an, da hier explizit das solare Dish/Stirling-System betrachtet und erarbeitet wird, welches das aussichtsreichste Anwendungsgebiet für Stirlingmotoren ist. Daher ist es wichtig, das

zukünftige Fachpersonal entsprechend darauf zu schulen. Das Labor macht hier eindeutig Sinn. Aber letztendlich wird nicht ein Labor zum Dish/Stirling-System durchgeführt, sondern nur die Motorkomponente betrachtet. Um den Stirlingmotor zu betreiben und Energie zu gewinnen, wird Energie aus der Steckdose über die Heizhaube verheizt. Mit erneuerbaren Energien und energieeffizienten Anlagen hat dies nicht viel gemein und daher ist der Sinn und der Nutzen dieses Labors zu hinterfragen.

Abbildungsverzeichnis

2.2.1	Schematischer Aufbau eines Stirlingmotors (Schnittdarstellung) [8, S.105]	6
2.2.2	Funktionsprinzip des Stirling-Prozesses [1, S.17]	7
2.2.3	Vergleichsprozesse des Stirlingmotors [8, S.106]	8
2.3.1	p-V-Diagramm und T-s-Diagramm des Carnot-Prozesses [3, S.19]	11
2.3.2	p-V-Diagramm und T-s-Diagramm des idealen Stirling-Prozesses [3, S.21]	12
2.3.3	T-s-Diagramm des idealen Stirling-Prozesses [1, S.20]	12
2.3.4	Wärmeaustausch des Stirling-Prozesses mit der Umgebung [1, S.21]	13
2.3.5	Ideales Temperaturprofil im Regenerator [1, S.26]	17
2.3.6	Vergleich von kontinuierlicher und diskontinuierlicher Kolbenbewegung [7, S.8]	18
2.3.7	Auswirkungen der Bewegungsarten auf den Kreisprozess. links: sinusförmige Bewegung; rechts: diskontinuierliche Bewegung [3, S.22]	18
2.3.8	Auswirkungen des Totraums auf den Kreisprozess im p-V-Diagramm [3, S.23]	19
2.3.9	Tatsächliches und theoretisches p-V-Diagramm des Stirling-Prozesses [3, S.24]	21
2.4.1	Schema einer α -Typ Stirlingmaschine [1, S.34]	23
2.4.2	Schema einer β -Typ Stirlingmaschine [1, S.35]	23
2.4.3	Schema einer γ -Typ Stirlingmaschine [1, S.34]	24
2.4.4	Schematisiertes Schubkurbelgetriebe [7, S.35]	25
2.4.5	Schematisiertes Rhombengetriebe [1, S.41]	25
2.4.6	Schematisiertes Taumelscheibengetriebe [1, S.43]	26
2.4.7	Schematisiertes Schiefscheibengetriebe [1, S.43]	27
2.5.1	EuroDish-Prototyp auf der Plataforma Solar de Almería, Spanien [11]	31
3.2.1	ST 05 G im Querschnitt [5, S. 78]	38
3.2.2	ST 05 G im Längsschnitt [5, S. 79]	39
3.2.3	Erhitzerkopf des ST 05 G im ZET	41
3.2.4	Aktueller Experimentalmotor ST 05 G im ZET	41
3.2.5	Aktueller Versuchsstand im ZET	42
3.2.6	ST 05 G mit Ringbrenner und Haube	43
4.1.1	Schnittansicht der Heizhaube EHH70	47
4.1.2	Erhitzerkopf Bauart Uwe Moch mit Bemaßung	48
4.1.3	Darstellung des Versuchsaufbaus	49
4.2.1	ST05G-CNC-II im Längs- und Querschnitt (vorläufig)	52
4.2.2	Heizhaube EHH70	53

5.1.1	Darstellung der Funktionsstruktur des Versuchsaufbaus und der Messstellen	59
A.0.1	Zusammenbauzeichnung des ST 05 G [23]	72
C.0.1	Schnittansicht der Heizhaube EHH70	83
E.0.1	Darstellung der Funktionsstruktur des Versuchsaufbaus und der Messstellen (DIN A4) .	98

Tabellenverzeichnis

2.1	Kriterien zur Klassifizierung von Heißgasmaschinen [3, S.109]	22
2.2	Anwendungsbereiche und Entwicklungsstand der Stirlingmotoren (Stand 2013) [3, S.65]	28
3.1	Technische Daten des ST 05 G [19]	40
4.1	Maße der Erhitzerrohrbögen	45
4.2	Übersicht Anfragen und Angebote für Begleitheizung	46
4.3	Übersicht Komponenten und Netto-Preise des Angebots der Firma ve//ingenieure GmbH	51
4.4	Technische Daten des ST05G-CNC-II (vorläufig)	52
4.5	Technische Daten des Asynchron Generator / Motor AGM-10	54
4.6	Technische Daten des Messgenerator STD20	55
4.7	Komponenten, welche noch angefragt werden müssen	57
4.8	Kostenanalyse für Konzept II	57
B.1	Stückliste Blatt 1 des ST 05 G [24, S. 11]	74
B.2	Stückliste Blatt 2 des ST 05 G [24, S. 12]	75
B.3	Stückliste Blatt 3 des ST 05 G [24, S. 13]	76
B.4	Stückliste Blatt 4 des ST 05 G [24, S. 14]	77

Literaturverzeichnis

- [1] Schleder, Frank: *Stirlingmotoren: Thermodynamische Grundlagen, Kreisprozessrechnung, Niedertemperatur- und Freikolbenmotoren*. 4. Auflage. Würzburg: Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2011
- [2] Wesinger, Walter ; AK Stirlingmotor München (Hrsg.): *Basisinfo Stirlingmotoren*. <https://www.stirlingmotor.org/wp-content/uploads/2014/12/Basisinfo-AK-Stirlingmotor.pdf>. Version:2004. – zuletzt aufgerufen am 11.01.2017
- [3] Werdich, Martin ; Kübler, Kuno: *Stirling-Maschinen: Grundlagen, Technik, Anwendungen*. 13. Auflage. Staufen b. Freiburg: Ökobuch Verlag, 2013
- [4] Stempel, Ulrich E.: *Experimente mit dem Stirlingmotor*. 1. Auflage. Haar b. München: Franzis Verlag GmbH, 2014
- [5] Viebach, Dieter: *Der Stirlingmotor: einfach erklärt und leicht gebaut*. 7. Auflage. Staufen b. Freiburg: Ökobuch Verlag, 2008
- [6] Müller, Alexander ; Splettstößer, Philipp ; Fandrich, Jörg: *Der Stirlingmotor-ein Motor, der mit Luft läuft?* <http://www.physik.fu-berlin.de/studium/physlab/labor/img/Stirlingmotor1.pdf>. Version:Juli 2004. – zuletzt aufgerufen am 11.01.2017
- [7] Steimle, Fitz ; Lamprichs, Jürgen ; Beck, Peter: *Stirling-Maschinen-Technik: Grundlagen, Konzepte, Entwicklungen, Anwendungen*. 2. Auflage. Heidelberg: C.F. Müller Verlag, 2007
- [8] Schuberth, Reinhard: *Technologie Energie: Thermodynamik, Energietechnik, Umwelt, erneuerbare Energien, Energiebilanz*. 5. Auflage. Hamburg: Verlag Handwerk und Technik GmbH, 2013
- [9] Mortimer, Charles E. ; Müller, Ulrich: *Chemie: Das Basiswissen der Chemie*. 7. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2001
- [10] Kaltschmitt, Martin (Hrsg.) ; Hartmann, Hans (Hrsg.) ; Hoffbauer, Hermann (Hrsg.): *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [11] BINE Informationsdienst ; FIZ Karlsruhe (Hrsg.): *Dish-Stirling-Systeme*. <http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/solare-waerme/publikation/solarthermische-kraftwerke/dish-stirling-systeme/>. Version:2003. – zuletzt aufgerufen am 22.01.2017

- [12] HAW Hamburg (Hrsg.): *Modul 12016 Technische Thermodynamik 1*. https://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-MP/Studium/Bachelor/Kernstudium/3._Semester/Ba_Technische_Thermodynamik_1.pdf. Version: Juni 2012. – zuletzt aufgerufen am 04.02.2017
- [13] HAW Hamburg (Hrsg.): *Modul 12601 Technische Thermodynamik 2*. https://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-MP/Studium/Bachelor/Energie-_und_Anlagensysteme/4._Semester/Ba_Technische_Thermodynamik_2.pdf. Version: Juni 2012. – zuletzt aufgerufen am 04.02.2017
- [14] HAW Hamburg (Hrsg.): *Modul 12613 Kolbenmaschinen*. https://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-MP/Studium/Bachelor/Energie-_und_Anlagensysteme/5._6._Semester/Ba_Kolbenmaschinen.pdf. Version: Juni 2012. – zuletzt aufgerufen am 04.02.2017
- [15] HAW Hamburg (Hrsg.): *Modul 12616 Solare Energiebereitstellung*. https://www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/TI-MP/Studium/Bachelor/Energie-_und_Anlagensysteme/5._6._Semester/Ba_Solare_Energiebereitstellung.pdf. Version: Juni 2012. – zuletzt aufgerufen am 04.02.2017
- [16] Bruchmüller, Hans-Georg ; Haug, Albert: *Labordidaktik für Hochschulen: Eine Einführung zum Praxisorientierten Projekt-Labor*. Schriftenreihe report - Bd. 40. Alsbach: Leuchtturm-Verlag, 2001
- [17] Winterler, Adi: *Professionell lehren und lernen: Ein Praxibuch*. 4. Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2011
- [18] ZLL, TU Hamburg-Harburg (Hrsg.): Die Spannung steigern: Laborpraktika didaktisch gestalten. In: *Schriften zur Didaktik der Ingenieurwissenschaften* Nr. 3 (2015)
- [19] ve//ingenieure GmbH: *Der Stirlingmotor ST05G*. http://www.ve-ingenieure.de/projekt_st05g_cnc.html. – zuletzt aufgerufen am 06.02.2017
- [20] Viebach, Dieter: *Ringinfo Nr. 7*. <http://www.ve-ingenieure.de/viebachstirling/>. Version: Juni 2001. – zuletzt aufgerufen am 06.02.2017
- [21] Brumme, Doreen ; energie-experten.org (Hrsg.): *Einsatz von Begleitheizungen als Frostschutz und zur Temperaturhaltung*. <http://www.energie-experten.org/heizung/elektroheizung/begleitheizung.html>. Version: 2016. – zuletzt aufgerufen am 08.02.2017
- [22] Gong, Xi: *Analyse der Quereinfluss Parameter des Rußsensors*, HAW Hamburg, Diplomarbeit, Oktober 2009
- [23] Viebach, Dieter ; ve//ingenieure GmbH (Hrsg.): *Stirlingmotor ST 05 G: Zusammenstellung*. http://www.ve-ingenieure.de/Downloads/ST05G_general%20view_A3_CC.pdf. Version: September 1999. – zuletzt aufgerufen am 05.12.2016
- [24] Viebach, Dieter: *Stirlingmotor ST 05 G: Zeichnungssatz*. 3. Ausgabe. Kolbermoor, 1999

A. Zusammenbauzeichnung des ST 05 G

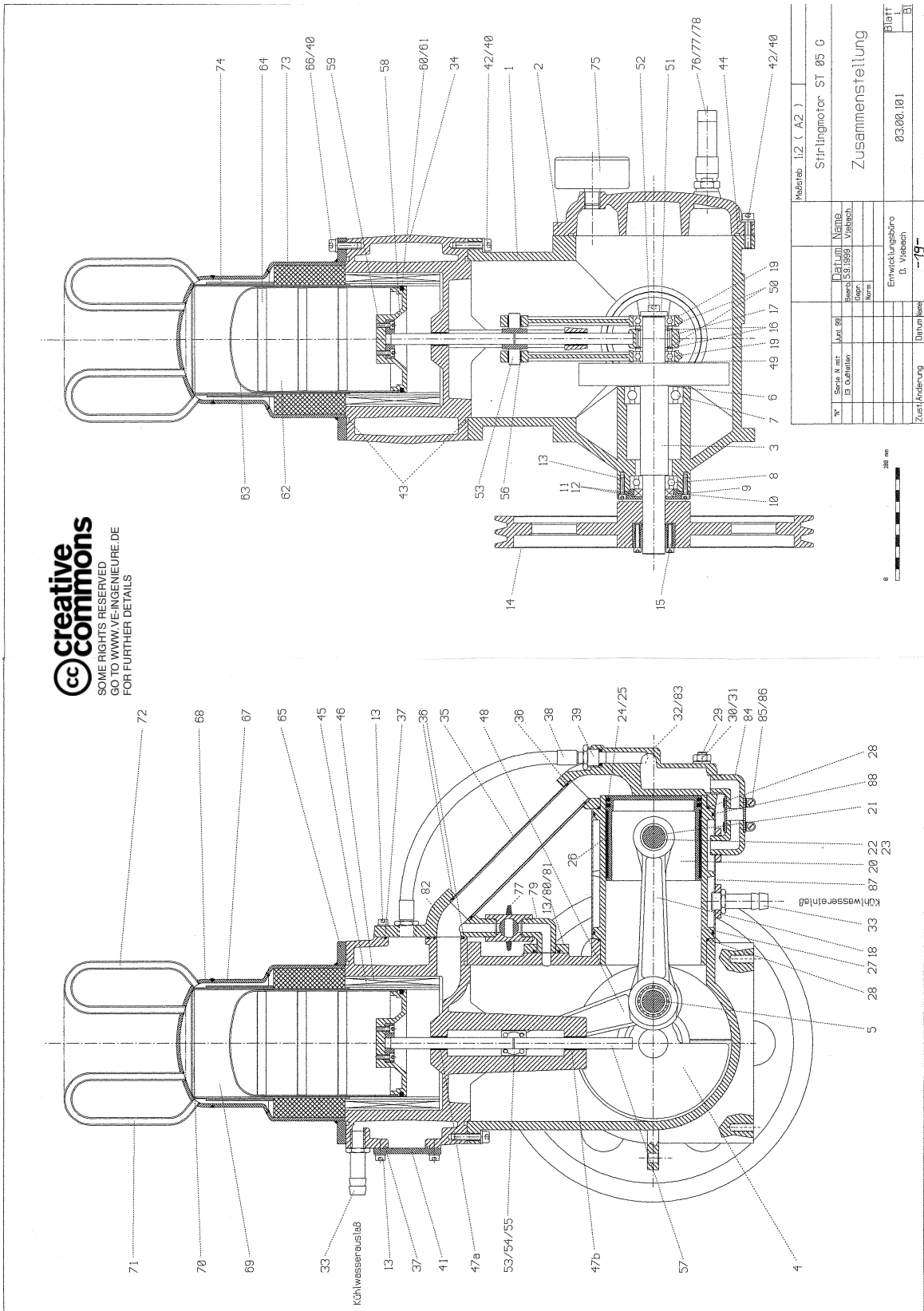


Abbildung A.0.1. – Zusammenbauzeichnung des ST 05 G [23]

B. Stückliste des ST 05 G

1	2	3	4		5
Pos.	Menge	Benennung	Sachnummer		Bemerkung
1	1	Kurbelgehäuse	03.01.110	A3 Gußteil 3.01	n.Z. S.20
2	1	Gehäusedeckel	03.02.110	A4 Gußteil 3.02	n.Z. S.21
3	1	Welle	03.08.111	A4	n.Z. S.23
4	1	Kurbelwange	03.08.113	A4	n.Z. S.24
5	1	Kurbelzapfen	03.08.112	A4	n.Z. S.23
6	1	Distanzscheibe	03.08.115	A4	n.Z. S.26
7	1	Kugellager	6205 RSR 25x52x15		Normteil
8	1	Kugellager	6004 RSR 20x42x12		Normteil
9	1	Dichtringaufnahme	03.15.120	A4 Gußteil 3.15	n.Z. S.27
10	1	Wellendichtung	B2PT 20-35-7 Simrit PTFE 561/10 Fa. Freudenberg		Kaufteil
11	1	O Ring 35 φ x 2	NBR 70		Normteil
12	1	O Ring 42 φ x 2	NBR 70		Normteil
13	18	Schraube M5x16 8.8	DIN 912		Normteil
14	1	Schwungrad bearbeitet (Keilriemenscheibe DIN	03.16.110	A4 n.Z. S.28	Kaufteil
15	1	Spannsatz BAR 20mm	2211 dw 280 φ 2 Rillen Art.Nr.615 420		Fa.Lütgert Fa.Mädler
16	2	Deckscheibe	03.16.115	A4	n.Z. S.29
17	1	Nadellager	NKJ 20/16A 20x32x16		Normteil
18	1	Pleuel f.Kolben	03.05.110	A4 Gußteil 3.05	n.Z. S.30
19	2	Kugellager	6904 LLB 20x37x9		Normteil
20	1	Kolben	03.06.110	A4 Gußteil 3.06	n.Z. S.31
21	1	Kolbenbolzen	03.06.112	A4	n.Z. S.33
22	1	Sinterbronze Buchse 20x24x25	Fa. Glacier IHG		Kaufteil
23	2	Sicherungsringe φ 20	für Bohrung DIN 472		Normteil
24	2	Kolbenring 85 φ	03.06.113	A4	n.Z. S.34
			Stirlingmotor ST 05 G		
			Stückliste		
			Entwicklungsbüro D. Viebach		Blatt 1
			03.00.101		Bl 1
Zust.	Anderung	Datum	Name		-11-

GZ.x1

Tabelle B.1. – Stückliste Blatt 1 des ST 05 G [24, S. 11]

1	2	3	4	5
Pos.	Menge	Benennung	Sachnummer	Bemerkung
25	2	Spiralfeder bearbeitet	03.06.114 A4 Fa.Wilesco	n.Z. S.35
26	2	Gleitbelag	03.06.115 A4	n.Z. S.36
27	1	Arbeitszylinder	03.10.110 A4 Gußteil 3.10	n.Z. S.37
28	2	O Ring 95φ x 2,5	NBR-70	Normteil
29	4	Stehbolzen	03.10.111 A4	n.Z. S.38
30	4	Scheibe 8,4 x 15	DIN 125	Normteil
31	4	Mutter M8 -8	DIN 970	Normteil
32	1	Zylinderkopf	03.07.110 A3 Gußteil 3.07	n.Z. S.39
33	2	Schlauchtülle G3/8"	(Druckluft-Fachhandel)	Kaufteil
34	1	Kühler	03.03.115 A3 Gußteil 3.03	n.Z. S.40
35	1	Verbindungsrohr	03.14.110 A4	n.Z. S.42
36	3	O Ring 22φ x 2	NBR 70	Normteil
37	2	O Ring 36φ x 2	NBR 70	Normteil
38	1	Kühlwasserschlauch φ10 x 300lang, 10mm, 3/8"		Sanitärbed.
39	1	Klemmnippel mit Dichtung 3/8" (1/2 Doppelnippel)		Sanitärbed.
40	24	Scheibe 6,4 x 12,5	DIN 125	Normteil
41	1	Verschlußplatte	03.17.110 A4 Gußteil 3.14	n.Z. S.43
42	16	Schraube M6 x 30-8.8	DIN 912	Normteil
43	2	O Ring 140φ x 3	NBR 70	Normteil
44	1	O Ring 144,5φ x 3	NBR 70	Normteil
45	1	Verdrängerlaufbuchse	03.03.012 A4	n.Z. S.45
46	225	Kühlflammele	03.03.011 A4	n.Z. S.46
47a	1	WSM-1012-20 Gleitlager	(iglidur W300) Fa. Igus	Kaufteil
47b	1	WSM-1012-15 Gleitlager	(iglidur W300) Fa. Igus	Kaufteil
48	2	Pleuel für Verdränger	03.04.110 A4 Gußteil 3.04	n.Z. S.48
			Stirlingmotor ST 05 G	
			Stückliste	
			03.00.101	
			Blatt 2	
			BI	
Zust. Änderung		Datum Name	- 12 -	

g.Z.x1

Tabelle B.2. – Stückliste Blatt 2 des ST 05 G [24, S. 12]

1	2	3	4	5
Pos.	Menge	Benennung	Sachnummer	Bemerkung
49	1	Distanzscheibe	03.08.116 A4	n.Z. S.26
50	2	Distanzscheibe	03.08.117 A4	n.Z. S.26
51	1	Deckscheibe	03.08.118 A4	n.Z. S.26
52	1	Schraube M6 x 16-8.8	DIN 912	Normteil
53	1	Kreuzkopf	03.09.010 A4	n.Z. S.49
54	4	Schraube M4 x 12-8.8	DIN 912	Normteil
55	1	Federdrahtsprengring	10φ x 0,8 DIN 7993-A10	Normteil
56	2	Sinterbronze Buchse 101	1610 BP25 Fa.Glacier IHG	Kaufteil
57	1	Verdrängerstange	03.13.014 A4	n.Z. S.51
58	1	Verdrängerboden	03.13.111 A4 Gußteil 3.13	n.Z. S.53
59	4	Schrauben M4 x 16-8.8	DIN 912	Normteil
60	1	Kolbenring 96 φ	03.13.016 A4	n.Z. S.54
61	1	Spiralfeder bearbeitet	03.13.118 A4 Fa.Wilesco	n.Z. S.55
62	1	Verdrängermantel	03.13.008 A4	n.Z. S.56
63	1	Verdrängerhaube	03.13.009 A4	n.Z. S.57
64	3	Verdrängerzwischenbod.	03.13.013 A4	n.Z. S.58
65	1	Erhitzerflansch	03.12.015 A4	n.Z. S.61
66	8	Schraube M6 x 25-8.8	DIN 912	Normteil
67	1	Erhitzeraußenrohr	03.30.007 A4	n.Z. S.62
68	1	Erhitzerhaube	03.12.111 A4	n.Z. S.65
69	1	Erhitzerinnenrohr	03.12.109 A4	n.Z. S.66
70	1	Zentrierring	03.12.013 A4	n.Z. S.67
71	12	Erhitzerrohrbogen	03.12.120 N A4	n.Z. S.68
72	12	Erhitzerrohrbogen	03.12.121 N A4	n.Z. S.68
			Stirlingmotor ST 05 G	
			Stückliste	
			Entwicklungsbüro	
			D. Viebach	
			03.00.101	
			Blatt 3	
			EL	
Zust. Änderung		Datum Name		- 13 -

GZ.x1

Tabelle B.3. – Stückliste Blatt 3 des ST 05 G [24, S. 13]

1	2	3	4	5
Pos.	Menge	Benennung	Sachnummer	Bemerkung
73	1	Regenerator	03.18.110 A4 Seite 70	Kaufteil
74	2	Spalteinlage	03.19.110 A4	n.Z. S.71
75	1	Manometer 0-16bar R1/4" Anschluß axial Sicherheitsventil R3/8" (Druckluft-Fachhandel)		Kaufteil
76	1	Abblasdruck 11 bar		Kaufteil
77	2	Kugelhahn R3/8" 2xI.Gew.(Druckluft-Fachhandel)		Kaufteil
78	1	Doppelgewindenippel 2xR3/8" (Fachhandel)		Kaufteil
79	1	Winkel 2xR3/8"Auß.Gew. (Heizung-Sanitärhandel)		Kaufteil
80	1	Gewindeflansch R3/8"	03.01.120	n.Z. S.72
81	1	O Ring 18φ x 2	NBR 70	Normteil
82	1	Krümmertplatte	03.03.120 Gußtei 3.14	n.Z. S.73
83	2	Verschlußstopfen R3/8" (Heizung-Sanitärhandel)		Kaufteil
84	2	Winkel 2xR3/8"Auß.Gew. bearbeitet(*) (Sanitärhandel)		Kaufteil
85	2	Schlauchbinder 20mm φ (Fachhandel)		Normteil
86	1	Druckschlauch 1/2" ca. 40 mm lang (Fachhandel)		Kaufteil
87	1	Kühlwassermantel	03.17.115 A4	n.Z. S.74
88	2	O Ring 100φ x 3	NBR 70	Normteil
Pos. 84 bis 88 kann bei einem Vorführrmotor, der nicht ständig läuft weggelassen werden. Der Kühlwassereinlaß ist dann am Zylinderkopf.				
(*) Pos 84. Von einem Schenkel des Winkels 2xR3/8" mit Außengewinde das Gewinde auf φ 13,5 mm, 12 mm lang, abdrehen.				
			Stirlingmotor ST 05 G	
			Stückliste	
Entwicklungsbüro D. Viebach			03.00.101	
Zust./Änderung Datum Name			Blatt 4 B1	
			-14-	

gZ.xl

Tabelle B.4. – Stückliste Blatt 4 des ST 05 G [24, S. 14]

C. Konzept I: Angebote und Datenblätter

HAW Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Berliner Tor 21

20999 Hamburg

Kolbermoor, 9.12.2016

Angebot 2016/010

Sehr geehrter Frau Gröncke,

gerne möchten wir Ihnen folgende Artikel zur Ergänzung des bestehenden ST05G-Stirlingmotor-Versuchsstand anbieten:

Pos.	Leistung	Menge[h/Stück%]	Preis [€]	Gesamt[€]
1	Standard-Heizhaube für den Erhitzerkopf des Stirlingmotors ST05G-CNC <ul style="list-style-type: none"> • inkl. Anpassung an HAW-Stirlingmotor ST05G • für Temperaturen innerhalb der Heizhaube bis max. 800°C • mit einem Temperatursensor, ausgeführt als Mantelthermoelement vom Typ "K" (NiCrNi) mit 1 Meter Anschlussleitung • mit 3-phasigen elektrische Mantel-Heizelementen mit einer Leistung von ca. 7kW. Schaltung im Stern. Nennspannung 3x 230V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz. Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden. • mit thermischer Isolierung gegenüber der Umwelt • mit elektromechanisch angetriebene Lüfter für das Heißgas innerhalb der Heizhaube, sowie für die Kühlung der Oberflächen der Heizhaube. Der Lüftermotor ist 3-phasig und wird im Dreieck geschaltet. Nennspannung 3x 400V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz, ca. 1Ampere. Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden 	1	9.975,00	9.975,00
2	Schaltschrank zum Betrieb der Heizhaube (Pos.1) <ul style="list-style-type: none"> • Stahl-Schaltschrank, hellgrau, • mit Hauptschalter • mit Notaus-Schutz, sowie Notaus-Pilzdrucktaster • mit interner Stromversorgung 24V • mit Temperaturregler Fabrikat WATLOW PM6 zum direkten Anschluss eines Thermolements Typ "K" (NiCr-Ni) • mit 3 phasigem, nullspannungs-schaltenden SolidState-Relais zur Ansteuerung der Mantelheizelemente innerhalb der Heizhaube • Mit Reihenklemmen <ul style="list-style-type: none"> ○ zum Fest-Anschluss der bauseitigen Netzzuleitung ○ zum Anschluss der Heizelemente der Heizhaube ○ zum Anschluss des Lüftermotors der Heizhaube 	1	6.900,00	6.900,00
3	Setpreis: Preisreduktion bei Kauf von Pos. 1 und Pos. 2	1	-1.275,00	-1.275,00
Optionen				
O1	Support Stundensatz Telefon- und email- Support, pro angefangene Stunde. Abrechnung monatlich, sofern Support geleistet wurde.	0	80,00	0,00
	Summe			15.600,00
	Mehrwertsteuer	19		2.964,00
	Summe			18.564,00

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

WICHTIGE HINWEISE**Heizhaube (Pos. 1)**

- Prüfung und Freigabe der Einbaumaße für den bestehenden Stirlingmotor gem. beigefügter Maßzeichnung durch HAW
- die Heizhaube ist thermisch isoliert. Dennoch besteht die Gefahr, dass sich Oberflächen erhitzen können. Der Betreiber bzw. Bediener des Prüfstandes muss darauf achten, dass
 - weder Personen, noch umgebendes Material durch die abgegebene Hitze gefährdet oder entzündet werden können. Die feuerschutzrechtlichen Vorschriften sind einzuhalten
 - ausreichende Belüftung gewährleistet ist
- falls die Heizhaube (Pos. 1) ohne Schaltschrank (Pos. 2) betrieben wird ist mit Hilfe eines geeigneten Temperaturreglers sicherzustellen, dass sich die Heizelemente immer unter ihrer Maximaltemperatur von 800°C befinden! Anderenfalls besteht die Gefahr der Zerstörung der Heizhaube, mit möglichen Gefahren für Mensch und Material!
- der Lüftermotor muss beim Betrieb der Heizhaube dauernd laufen. Auch nach dem Abschalten der Heizleistung muss der Lüfter solange weiterlaufen, bis die Heizelemente der Heizhaube unter 50°C abgekühlt sind! Anderenfalls besteht die Gefahr der Zerstörung der Heizhaube, mit möglichen Gefahren für Mensch und Material!

Schaltschrank (Pos. 2)

- Bauseitige Anschlussdaten, die der Kunde vorhalten muss:
 - 400V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz, 16 A
 - mit zugeordnetem 3-phasigen Leitungsschutzschalter, Auslösecharakteristik B
 - vorzugsweise mit 30mA Fehlerstromschutzschalter, Nennstrom 40 A
 - Klemmdose für Festinstallation

Weitere Hinweise

Die Liefergegenstände dürfen nur von qualifiziertem und geschultem Personal in Betrieb genommen, bedient und gewartet werden, die sich der Gefahren ihrer Tätigkeit bewusst sind und verantwortungsvoll handeln. Der Verkauf oder die Weitergabe der Liefergegenstände an Dritte bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung durch ve//ingenieure GmbH. Die Rechtsinhaberschaft an sämtlichen, auch bereits im Vorfeld geleisteten, Arbeits- und Entwicklungsergebnissen verbleibt bei ve//ingenieure GmbH.

Verpackung, Transport und Support

Im Gesamtpreis inbegriffen ist Verpackung und versicherter Transport frei Bordsteinkante nach:
Berliner Tor 21
20999 Hamburg

Die Entsorgung der Verpackung obliegt dem Kunden. Der Gefahrenübergang erfolgt an der Bordsteinkante. Ebenfalls im Gesamtpreis inbegriffen sind zwei Stunden Telefon- und E-Mail-Support. Darüber hinausgehende Supportstunden werden bei Inanspruchnahme wie oben unter Position O1 angeboten berechnet.

Zahlung

30% Anzahlung bei Auftragserteilung
70% 14 Tage nach Lieferung

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
2 von 3

USt.-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

Lieferzeit

Die Lieferzeit beträgt ca. 12 Wochen nach Auftragseingang, Klärung sämtlicher technischer Details und Eingang der Anzahlung auf unser Konto. Obwohl unwahrscheinlich, kann sich die Lieferzeit aufgrund von Lieferengpässen unserer Zulieferer verzögern. Das genaue Lieferdatum wird zeitnah nach der Fertigstellung der Liefergegenstände zwischen dem Kunden und uns vereinbart.

Angebotsgültigkeit

Das Angebot ist gültig bis 31.3.2017

Gewährleistung

Die Gewährleistungsfrist beträgt 6 Monate

Im Übrigen gelten ausschließlich unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, welche als Anlage diesem Angebot beigelegt sind.

Wir würden uns freuen, Ihren geschätzten Auftrag zu erhalten, und verbleiben mit freundlichen Grüßen



ve//ingenieure GmbH,
Stefan Viebach

Anlagen

- Allgemeine Geschäftsbedingungen der ve//ingenieure GmbH, Ausgabe November 2014
- Maßzeichnung Einbaumaße

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
3 von 3

USt.-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

Elektrische Heizhaube EHH70

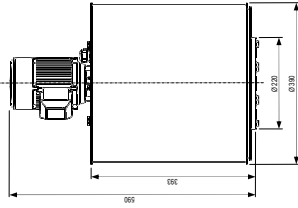
Die Elektrische Heizhaube EHH70 wurde speziell für die Montage auf den Entzuckerkopf des bekannten Experimentier-Strömungsmotors entwickelt. Die Heizhaube ist einbaufähig und wird in der Forschung, Entwicklung und Lehre der kontrollierten und reproduzierbaren Betätigung dieses Strömungsmotor-Puffings, um unter Laborbedingungen Messungen am Prüfling vornehmen zu können.

Die Heizhaube verfügt über 3-phasige elektrische Mantel-Heizelemente mit einer Leistung von ca. 7kW, einen Temperatursensor sowie elektronisch angesteuerte Lüfter für die Schiebhaube, die mechanisch angetrieben werden. Gegenüber der Umwelt ist die Heizhaube thermisch isoliert.

Der elektrische Anschluss der Heizhaube kann direkt an Schiebhaube des Prüfapparates ST020 erfolgen. Alternativ kann die Heizhaube auch über einen nachfolgend beschriebenen dedizierten Schaltschrank von ve//ingenieure, oder auch durch eine kundenspezifische Regel-Elektronik versorgt werden.

Technische Daten Heizhaube

- 3-phasige elektrische Mantel-Heizelemente mit einer Leistung von ca. 7kW, Systemspannung 3x 230V ±5% 3-phasig (3L+N+PE; TN-S System), 50 Hz
- Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden
- Für Temperaturen innerhalb der Heizhaube bis max. 80°C
- Mit einem Temperatursensor, ausgeführt als Pt1000
- Mit einem NTC-Thermistoren vom Typ K (NIC-Ni) mit 1 Meter Anschlussleitung
- Mit thermischer Isolierung gegenüber der Umwelt
- Mit elektromechanisch angetriebene Lüfter für die Heißgas-Heizhaube, die mechanisch angetrieben werden. Die Heißgas-Heizhaube wird im Dreieck geschaltet. Nennspannung 3x400V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE; TN-S System), 50 Hz, ca. 1Ampere. Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden
- Maximaler Durchmesser der Heizhaube: ca. 390mm; Höhe der Heizhaube über Anschlussflansch zum ST06G-CNC: ca. 590mm
- Masse: ca. 40 kg

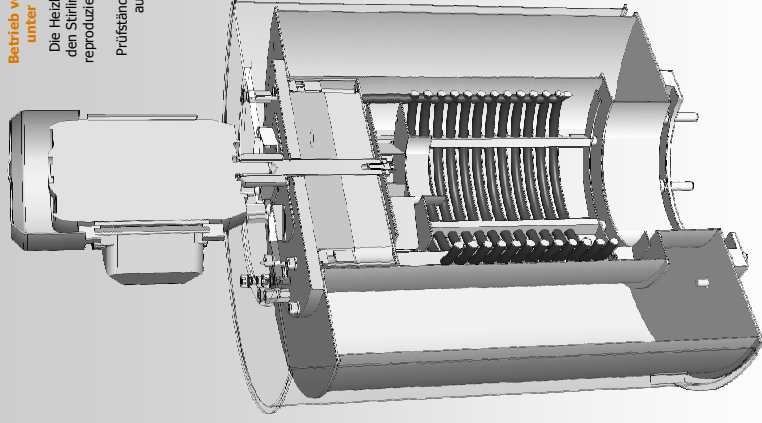


Irntimer und technische Änderungen vorbehalten!

ve//ingenieure GmbH • Bergsiedlung 19 • D-83059 Kolbermoor • Germany • www.ve-ingenieure.de
 Telefon: +49 (0) 8031-8871332-0 • Telefax: +49 (0) 8031-8871332-9 • E-Mail: buero@ve-ingenieure.de

Betrieb von Stirlingmotoren unter Laborbedingungen

Die Heizhaube EHH70 beheizt den Stirlingmotor ST05G unter reproduzierbaren Bedingungen. Sie wird in unseren Prüfständen eingesetzt und ist auch separat erhältlich.



Elektrische Heizhaube EHH70

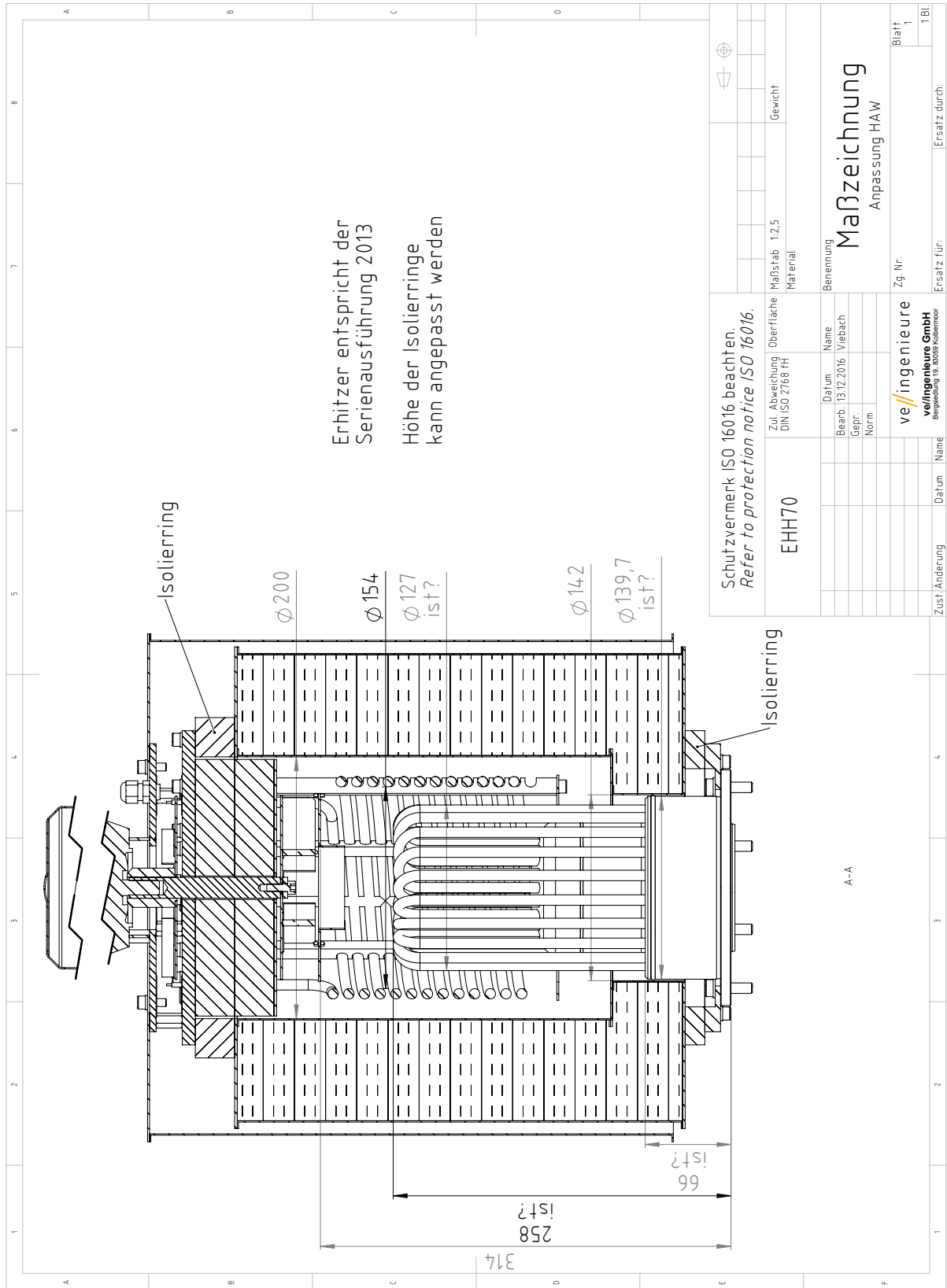
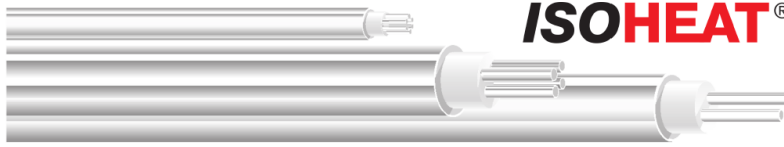


Abbildung C.0.1. – Schnittansicht der Heizhaube EHH70



**INDUSTRIELLE ELEKTRISCHE
BEHEIZUNGSTECHNIK**
**INDUSTRIAL ELECTRICAL
HEATING SYSTEMS**

MIL Heating Systems GmbH · Großer Sand 4 · D-76698 Ubstadt-Weiher

HAW Hamburg
Nina Gröncke
Hamburg

Ubstadt-Weiher, 16.12.2016

Ihre Anfrage Projekt Stirlingmotor

Angebot 16-16901

Sehr geehrte Frau Gröncke,
vielen Dank für Ihre o. g. Anfrage. Gerne bieten wir Ihnen, auf Basis unserer AGB, wie folgt freibleibend an:

Pos. 01

Heizleiter MIL-HC-INC gewickelt als Spirale

Abmessung : ID=145 x 600 mm
Heizleiter : MIL-HC-INC
Mantelmaterial : 2.4816
Maximale Heizleitertemp. : 1000 °C
Heizkreis : 5510 W
Heizkreislänge : 24,0 m
Nennspannung : 230 V AC
Kaltendenlänge starr : 2 x 0,5 m
Verschraubung :



Sonderverschraubung Messing Übergang auf flexible Anschlussleitung

Flexible Anschlußleitung : 2 m Silikonleitung
Stecker : **ohne**
Temperaturfühler : Ni-CrNi (Typ K) mit 1 m Ausgleichsleitung grün

Menge : 1 St.

Preis : 710,- € / St. netto

Pos. 02

Digitaler Industrieregler Serie MIL-RD 1011-24A

Artikelnummer : 61011011
Gehäuse : Kunststoffgehäuse mit Klarsichtdeckel
Regelbereich : 0-1200°C frei einstellbar
Regelverhalten : PID

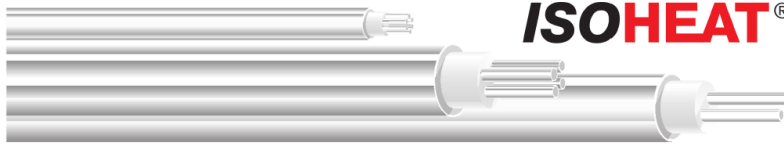
Fühleringang : Pt100 oder Thermoelement (konfigurierbar)
Volksbank Bruchsal Kto. 60 953 007 : BLZ 663 912 00 IBAN DE08 6039 1200 0000 5301 67 BIC-Code: GENODE61BTT
Volksbank VS-Villingen Kto. 4 720 725 : BLZ 694 900 00 IBAN DE46 6949 0000 0004 7207 25 BIC-Code: GENODE61VS1

Amtsgericht Mannheim

HRB-Nr. 725867

USt-IdNr.: DE 212 573 484

Geschäftsführer: Manfred Böhnke Emil Schmidt

**ISOHEAT®****INDUSTRIELLE ELEKTRISCHE
BEHEIZUNGSTECHNIK****INDUSTRIAL ELECTRICAL
HEATING SYSTEMS**

Schaltleistung : 5520 VA
Schaltstrom : Schütz, max.24 A ohmsche Last
Nennspannung : 230 V AC
Schutzart : IP 65
Schutzklasse : I
Regelung : elektronischer Reglereinsatz 48 x 48 mm
Anzeige : Soll / IST - Wert
Hauptschalter : 2-polig
Absicherung : 1 A flink, von außen austauschbar
Abmessung : 165 x 160 x 135 mm (B x H x T)
Ausgang Heizung und Fühler : Verschraubungen

Menge : **1 St.**

Preis : **349,- € / St. netto**



Lieferzeit : ca. 2 Wochen nach AE
Zahlungskonditionen : 10 Tage 2%, 30 Tage netto
Preisstellung : netto, zzgl. gesetzl. MwSt.
Versand : ab Werk, ausschließlich Verpackung
Angebotslaufzeit : 60 Tage

Wir würden uns freuen, wenn Ihnen unser Angebot zusagt. Bei Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

i.V. Ralf Trautwein
Technischer Vertrieb

MIL Heating Systems GmbH
Großer Sand 4 · D-76698 Ubstadt-Weiher
Tel. +49 (0) 72 51 – 9 32 47-19
Fax +49 (0) 72 51 – 9 32 47-29
ralf.trautwein@isoheat.de
www.isoheat.de

Volksbank Bruchsal
Volksbank VS-Villingen

Kto. 60 953 007
Kto. 4 720 725

BLZ 663 912 00
BLZ 694 900 00

IBAN DE08 6639 1200 0060 9530 07
IBAN DE46 6949 0000 0004 7207 25

BIC-Code: GENODE61BTT
BIC-Code: GENODE61VS1

Amtsgericht Mannheim

HRB-Nr. 725867

USt-IdNr.: DE 212 573 484

Geschäftsführer: Manfred Böhnke Emil Schmidt

D. Konzept II: Angebote und Datenblätter

HAW Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Berliner Tor 21

20999 Hamburg

Kolbermoor, 11.01.2017

Angebot 2017/001

Sehr geehrter Frau Gröncke,

gerne möchten wir Ihnen folgende Artikel zur Ergänzung des bestehenden ST05G-Stirlingmotor-Versuchsstand anbieten:

Pos.	Leistung	Menge[h/Stück%]	Preis [€]	Gesamt[€]
1	Stirlingmotor ST05G-CNC-II, Standard-Ausführung <ul style="list-style-type: none"> • Nennleistung 500W • Erhitzerkopf für staubarme, schwefelfreie Brennraumatmosphäre mit Luftüberschuß • Max. Erhitzerrohrtemperatur 700°C • Arbeitsgas Stickstoff, Arbeitsdruck 10 bar • Kühlung durch Motorkühlmittel auf Wasser-Glykol-Basis • Sensorzugänge: <ul style="list-style-type: none"> 21 wahlweise für Thermoelemente oder Drucksensoren 4 weitere ausschließlich für Drucksensoren 7 weitere ausschließlich für Thermoelemente • Standard-Sensorik <ul style="list-style-type: none"> 1 Zylinderdrucksensor Arbeitszylinder 2 Thermoelemente Typ K für Kühlmitteltemperatur 1 Thermoelement Typ K für Erhitzerrohr-Temperatur 	1	23650,00	23650,00
1a	Optional: zusätzliches Thermoelement Typ K <ul style="list-style-type: none"> • Druckdichte Verschraubung • Anschlussleitung mit Thermoelement-Steckverbinder • im Motor fertig montiert 	1	150,00	
1b	Optional zusätzlicher Standard-Drucksensor <ul style="list-style-type: none"> • Anschlussleitung • im Motor fertig montiert 	1	435,00	

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
1 von 4

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

Pos.	Leistung	Menge [h/Stück/ %]	Preis [€]	Gesamt[€]
2	Standard-Heizhaube für den Erhitzerkopf des Stirlingmotors ST05G-CNC-II <ul style="list-style-type: none"> • für Temperaturen innerhalb der Heizhaube bis max. 800°C • mit einem Temperatursensor, ausgeführt als Mantelthermoelement vom Typ "K" (NiCrNi) mit 1 Meter Anschlussleitung • mit 3-phasigen elektrische Mantel-Heizelementen mit einer Leistung von ca. 7kW. Schaltung im Stern. Nennspannung 3x 230V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz. Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden. • mit thermischer Isolierung gegenüber der Umwelt • mit elektromechanisch angetriebene Lüfter für das Heißgas innerhalb der Heizhaube, sowie für die Kühlung der Oberflächen der Heizhaube. Der Lüftermotor ist 3-phasig und wird im Dreieck geschaltet. Nennspannung 3x 400V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz, ca. 1Ampere. Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden 	1	9.175,00	9.175,00
3	Schaltsschrank zum Betrieb der Heizhaube (Pos.2) <ul style="list-style-type: none"> • Stahl-Schaltsschrank, hellgrau, • mit Hauptschalter • mit Notaus-Schütz, sowie Notaus-Pilzdrucktaster • mit interner Stromversorgung 24V • mit Temperaturregler Fabrikat WATLOW PM6 zum direkten Anschluss eines Thermoelements Typ "K" (NiCr-Ni) • mit 3 phasigem, nullspannungs-schaltenden SolidState-Relais zur Ansteuerung der Mantelheizelemente innerhalb der Heizhaube • Mit Reihenklemmen <ul style="list-style-type: none"> ◦ zum Fest-Anschluss der bauseitigen Netzzuleitung ◦ zum Anschluss der Heizelemente der Heizhaube ◦ zum Anschluss des Lüftermotors der Heizhaube 	1	6.700,00	6.700,00
4	Asynchron Generator / Motor AGS-10 <ul style="list-style-type: none"> • Drehstrom-Asynchron Maschine, 4-polig • Nennspannung 230 V / 400 V - 50 Hz • Wirkungsgradklasse IE3 • Nennleistung 1,1 kW • Riemenantrieb • Schutzgehäuse 	1	6.800,00	6800,00
5	Setpreis: Preisreduktion bei Kauf von Pos. 1 bis Pos. 4	1	-2550,00	-2.550,00
6	Fracht und Verpackung	1	500,00	500,00
Optionen				
O1	Support Stundensatz Telefon- und email- Support, pro angefangene Stunde. Abrechnung monatlich, sofern Support geleistet wurde.	0	80,00	
	Summe			44275,00
	Mehrwertsteuer	19		8.412,25
	Summe			52.687,25

ve//ingenieure GmbH
 Bergsiedlung 19
 83059 Kolbermoor
 Germany
Geschäftsführer:
 Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
 2 von 4

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

WICHTIGE HINWEISE

Stirlingmotor (Pos. 1)

- Die Lieferung des Stirlingmotors erfolgt ohne Montagerahmen. Vor der Inbetriebnahme muss der Stirlingmotor in einem ausreichend dimensionierten, standsicheren Rahmen montiert werden. Bei Bedarf können wir Ihnen einen, für Ihre Anwendung passenden Rahmen anbieten.
- Der Motor darf niemals ohne ausreichende Kühlmittelversorgung in Betrieb genommen werden.
- Am Motor befinden sich nicht abgedeckte, bewegte Bauteile und heiße Oberflächen. Vor der Inbetriebnahme muss sichergestellt werden, dass eine Gefährdung von Personen und Sachgütern ausgeschlossen ist.
- Der Motor muss vor der Inbetriebnahme mit einer Notstopp-Einrichtung ausgerüstet werden. Ein Unterbrechen der Energiezufuhr allein ist wegen der im Motor gespeicherten thermischen Energie nicht ausreichend.

Heizhaube (Pos. 2)

- die Heizhaube ist thermisch isoliert. Dennoch besteht die Gefahr, dass sich Oberflächen erhitzen können. Der Betreiber bzw. Bediener des Prüfstandes muss darauf achten, dass
 - weder Personen, noch umgebendes Material durch die abgegebene Hitze gefährdet oder entzündet werden können. Die feuerschutzrechtlichen Vorschriften sind einzuhalten
 - ausreichende Belüftung gewährleistet ist
- falls die Heizhaube (Pos. 1) ohne Schaltschrank (Pos. 2) betrieben wird ist mit Hilfe eines geeigneten Temperaturreglers sicherzustellen, dass sich die Heizelemente immer unter ihrer Maximaltemperatur von 800°C befinden! Anderenfalls besteht die Gefahr der Zerstörung der Heizhaube, mit möglichen Gefahren für Mensch und Material!
- der Lüftermotor muss beim Betrieb der Heizhaube dauernd laufen. Auch nach dem Abschalten der Heizleistung muss der Lüfter solange weiterlaufen, bis die Heizelemente der Heizhaube unter 50°C abgekühlt sind! Anderenfalls besteht die Gefahr der Zerstörung der Heizhaube, mit möglichen Gefahren für Mensch und Material!

Schaltschrank (Pos. 3)

- Bauseitige Anschlussdaten, die der Kunde vorhalten muss:
 - 400V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz, 16 A
 - mit zugeordnetem 3-phasigen Leitungsschutzschalter, Auslösecharakteristik B
 - vorzugsweise mit 30mA Fehlerstromschutzschalter, Nennstrom 40 A
 - Klemmdose für Festinstallation

Generator (Pos. 4)

- Der Generator wird ohne elektrische Versorgung ausgeliefert, die elektrische Versorgung ist vom Kunden zu erstellen.
- Es ist vom Kunden sicher zu stellen, dass bei der elektrischen Versorgung alle notwendigen Maßnahmen zum Personen- und Geräteschutz eingehalten werden.

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
3 von 4

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

Weitere Hinweise

Die Liefergegenstände dürfen nur von qualifiziertem und geschultem Personal in Betrieb genommen, bedient und gewartet werden, die sich der Gefahren ihrer Tätigkeit bewusst sind und verantwortungsvoll handeln. Der Verkauf oder die Weitergabe der Liefergegenstände an Dritte bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung durch ve//ingenieure GmbH. Die Rechtsinhaberschaft an sämtlichen, auch bereits im Vorfeld geleisteten, Arbeits- und Entwicklungsergebnissen verbleibt bei ve//ingenieure GmbH.

Verpackung, Transport und Support

Im Gesamtpreis inbegriffen ist Verpackung und versicherter Transport frei Bordsteinkante nach:

Berliner Tor 21
20999 Hamburg

Die Entsorgung der Verpackung obliegt dem Kunden. Der Gefahrenübergang erfolgt an der Bordsteinkante. Ebenfalls im Gesamtpreis inbegriffen sind zwei Stunden Telefon- und E-Mail-Support. Darüber hinausgehende Supportstunden werden bei Inanspruchnahme wie oben unter Position O1 angeboten berechnet.

Zahlung

30% Anzahlung bei Auftragserteilung
70% 14 Tage nach Lieferung ohne Abzüge

Lieferzeit

Die Lieferzeit beträgt ca. 24 Wochen nach Auftragseingang, Klärung sämtlicher technischer Details und Eingang der Anzahlung auf unser Konto. Obwohl unwahrscheinlich, kann sich die Lieferzeit aufgrund von Lieferengpässen unserer Zulieferer verzögern. Das genaue Lieferdatum wird zeitnah nach der Fertigstellung der Liefergegenstände zwischen dem Kunden und uns vereinbart.

Angebotsgültigkeit

Das Angebot ist gültig bis 31.3.2017

Gewährleistung

Die Gewährleistungsfrist beträgt 6 Monate

Im Übrigen gelten ausschließlich unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, welche als Anlage diesem Angebot beigelegt sind.

Wir würden uns freuen, Ihren geschätzten Auftrag zu erhalten, und verbleiben mit freundlichen Grüßen



ve//ingenieure GmbH,
Stefan Viebach

Anlagen

- Allgemeine Geschäftsbedingungen der ve//ingenieure GmbH, Ausgabe November 2014
- Datenblätter

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
4 von 4

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

HAW Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Berliner Tor 21

20999 Hamburg

Kolbermoor, 14.02.2017

Angebot 2017/004

Sehr geehrter Frau Gröncke,

gerne möchten wir Ihnen folgende Artikel zur Ergänzung des Angebots 2017/001 für den Stirlingmotor-Versuchsstand anbieten:

Pos.	Leistung	Menge[h/Stück%]	Preis [€]	Gesamt[€]
1	Messgenerator STD20 <ul style="list-style-type: none"> • fremdbelüftete Asynchronmaschinen Nennleistung 2,2 kW, Nenndrehzahl 1000 1/min, max. Drehmoment ca. 50 Nm, Scheibenbremse, Encoder, • Drehmomentmesswelle Messbereich +/- 50 Nm, 0,1% mit Encoder und Schutzrohr • Sensor für 0° Kurbelwinkel • Wellenkupplungen • montiert auf Schwingplatte, incl. Schwingelemente • Frequenzumrichter, Bremswiderstand • Anschlussleitungen für Asynchronmaschine, Bremse, Encoder, Sensorik 	1	22050,00	22050,00
2	Fracht und Verpackung (entfällt bei Bestellung mit Angebot 2017/001 vom 11.1.2017)	1	500,00	500,00
	Optionen			
O1	Support Stundensatz Telefon- und email- Support, pro angefangene Stunde. Abrechnung monatlich, sofern Support geleistet wurde.	0	80,00	
	Summe			22550,00
	Mehrwertsteuer	19		4.284,50
	Summe			26.834,50

WICHTIGE HINWEISE

- Die Schwingplatte dient auch zur Montage des Stirlingmotors ST05G-CNC-II mit der Heizhaube EHH70.
- Die Schwingplatte muss vor Inbetriebnahme auf ein ausreichend dimensioniertes Fundament mit min. 500 kg Tragfähigkeit montiert werden
- Frequenzumrichter und Bremswiderstand liegen originalverpackt bei. Planung, Installation und Inbetriebnahme der elektrischen Anlage erfolgen durch den Kunden.

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
1 von 3

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

- Bauseitige Anschlussdaten, die der Kunde vorhalten muss:
 - 400V $\pm 5\%$ / 3-phasig (3L+N+PE: TN-S System), 50 Hz, 16 A
 - mit zugeordnetem 3-phasigen Leitungsschutzschalter, Auslösecharakteristik (C,D oder K)
 - Vorzugsweise ohne Fehlerstromschutzschalter. Falls auf einen Fehlerstromschutzschalter nicht verzichtet werden kann, so muss bauseits ein allstromsensitiver, umrichtefester Schutzschalter mit einem Auslöse-Fehlerstrom ≥ 300 mA sowie einem Nennstrom von 40 A zum Einsatz kommen. Keinesfalls darf ein Fehlerstromschutzschalter von Typ A oder AC verwendet werden!
 - Klemmdose für Festinstallation
- Es ist vom Kunden sicher zu stellen, dass bei der elektrischen Versorgung alle notwendigen Maßnahmen zum Personen- und Geräteschutz eingehalten werden.
- Stromversorgung und Auswertung der Sensorik ist durch den Kunden zu erstellen.
- Der Generator darf niemals ohne ausreichende Kühlluftversorgung in Betrieb genommen werden.
- Am Generator befinden sich nicht abgedeckte, bewegte Bauteile und heiße Oberflächen. Vor der Inbetriebnahme muss sichergestellt werden, dass eine Gefährdung von Personen und Sachgütern ausgeschlossen ist.
- Der Generator muss vor der Inbetriebnahme mit einer Notstopp-Einrichtung ausgerüstet werden. Ein Unterbrechen der Energiezufuhr allein ist wegen der im Stirlingmotor gespeicherten thermischen Energie nicht ausreichend.

Weitere Hinweise

Die Liefergegenstände dürfen nur von qualifiziertem und geschultem Personal in Betrieb genommen, bedient und gewartet werden, die sich der Gefahren ihrer Tätigkeit bewusst sind und verantwortungsvoll handeln. Der Verkauf oder die Weitergabe der Liefergegenstände an Dritte bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung durch ve//ingenieure GmbH. Die Rechtsinhaberschaft an sämtlichen, auch bereits im Vorfeld geleisteten, Arbeits- und Entwicklungsergebnissen verbleibt bei ve//ingenieure GmbH.

Verpackung, Transport und Support

Im Gesamtpreis inbegriffen ist Verpackung und versicherter Transport frei Bordsteinkante nach:

Berliner Tor 21
20999 Hamburg

Die Entsorgung der Verpackung obliegt dem Kunden. Der Gefahrenübergang erfolgt an der Bordsteinkante. Ebenfalls im Gesamtpreis inbegriffen sind zwei Stunden Telefon- und E-Mail-Support. Darüber hinausgehende Supportstunden werden bei Inanspruchnahme wie oben unter Position O1 angeboten berechnet.

Zahlung

30% Anzahlung bei Auftragserteilung
70% 14 Tage nach Lieferung ohne Abzüge

Lieferzeit

Die Lieferzeit beträgt ca. 24 Wochen nach Auftragsingang, Klärung sämtlicher technischer Details und Eingang der Anzahlung auf unser Konto. Obwohl unwahrscheinlich, kann sich die Lieferzeit aufgrund von Lieferengpässen unserer Zulieferer verzögern. Das genaue Lieferdatum wird zeitnah nach der Fertigstellung der Liefergegenstände zwischen dem Kunden und uns vereinbart.

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
2 von 3

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

Angebotsgültigkeit

Das Angebot ist gültig bis 31.3.2017

Gewährleistung

Die Gewährleistungsfrist beträgt 6 Monate

Im Übrigen gelten ausschließlich unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, welche als Anlage diesem Angebot beigelegt sind.

Wir würden uns freuen, Ihren geschätzten Auftrag zu erhalten, und verbleiben mit freundlichen Grüßen



ve//ingenieure GmbH,
Stefan Viebach

Anlagen

- Allgemeine Geschäftsbedingungen der ve//ingenieure GmbH, Ausgabe November 2014

ve//ingenieure GmbH
Bergsiedlung 19
83059 Kolbermoor
Germany
Geschäftsführer:
Stefan Viebach, Hubert Eckl

Tel: +49 (0) 8031/8871332-0
Fax: +49 (0) 8031/8871332-9
Mail: buero@ve-ingenieure.de
FTP: <ftp://ve-ingenieure.de>
Web: www.ve-ingenieure.de
Register: Amtsgericht Traunstein HRB 20802
3 von 3

USt-IdNr.: DE275787274
Bank: VR Bank Rosenheim-Chiemsee eG
BLZ: 711 600 00
Konto-Nr.: 7285485
SWIFT/BIC: GENODEF1VRR
IBAN: DE51 7116 0000 0007 2854 85

Labor-Stirlingmotor ST05G-CNC-II

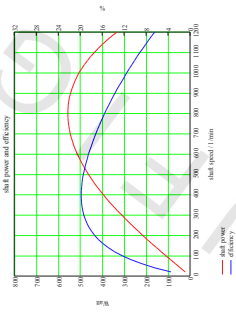
Der ST05G-CNC-II ist ein Labor-Stirlingmotor in V-Bauweise, der speziell für die mechanische Leistungsübertragung in der Forschung und Entwicklung der Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Er ist mechanisch robust und einfach anbaubar, um das Verhalten in der Leertaste zu fördern und in Forschung und Entwicklung die Modifizierbarkeit zu erleichtern.

Der ST05G-CNC-II ist für den motorischen Betrieb als Wärmekraftmaschine bzw. Wärmepumpe betrieben werden, also auch als Kaltemaschine bzw. Wärmepumpe betrieben werden. Er ist mit einem Expansionswärmetauscher (Erhitzerkopf) für die Verwindung in staubarmen, schwefelreicher Brennumatmosphäre unter Sauerstoffüberschussbedingungen, kann aber auch optional elektrisch betrieben werden.

Der mechanische Ab- bzw. Antrieb erfolgt schwungradtätig durch einen Pleiertrieb oder direkt über den Wellensummel. Neben der grundlegenden Ausstattung wie Manometer zur Fülldruckkontrolle, Sicherheitsventil und Bediellamturen für das Anheizen, ist der Motor in mehreren Zugängen für Temperatur- und Drucksensoren ausgestattet.

Technische Daten

- Drehzahlbereich: ca. 300 - 600 1/min
- Mittleres Drehmoment: maximal ca. 10 Nm
- Max. Leistung: ca. 500 W bei ca. 600-700 1/min und 20% Motorwirkungsgrad
- Max. Motorwirkungsgrad ca. 20 %
- Arbeitsgas: trockener Stickstoff (kurzzeitig) trockene Luft, Betriebsdruck: max. 10 bar
- Max. Arbeitsgastemperatur im Erhitzerkopf: 600 °C; max. Erhitzerortemperatur: 700 °C; tiefe Arbeitsgastemperatur im Erhitzerkopf: ca. 100 °C
- Kühlmittel: Motorabkühlmittel auf Wasser-Glykolbasis mit geringsten Korrosionsschutzinhibitoren, Durchfluss ca. 2,5 l/min; Zulässige Temperatur am Rücklauf: 5 °C - 60 °C; zulässiger Druck: 1 bar max.
- Verdänger: Bohrung 96 mm, Hub 64 mm
- Pleiertrieb: Bohrung 96 mm, Hub 64 mm
- Hauptabmessungen ca. 420mm x 440mm x 625mm
- Masse ohne Schwinggrau: 4,5 kg; Schwinggrau: ca. 10-15 kg
- Wartungsintervalle: spätestens nach 500 h

Typische Kennlinie:**Sensork**

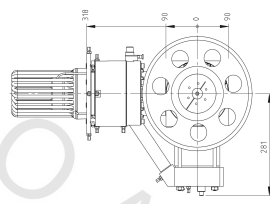
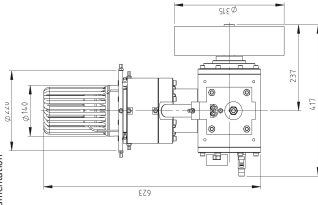
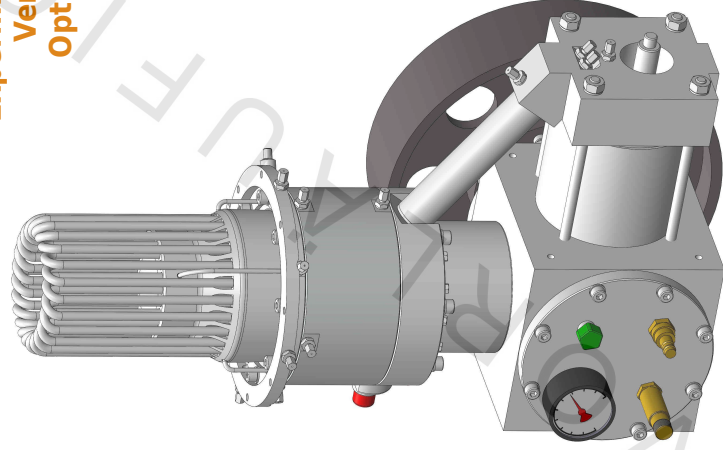
- Standardausstattung: ein Zylinderdrucksensor Arbeitszylinder, ein Thermoelement für die Erhitzerort-Temperatur, zwei Thermoelemente für die Kältemitteltemperaturen.
- Zusätzliche Ausstattung: ein Thermoelement für die Pleiertrieb-Temperatur, zwei Thermoelemente oder Drucksensoren
- 4 weitere Zugänge ausschließlich für Drucksensoren
- 7 weitere Zugänge ausschließlich für Thermoelemente
- Drehmoment- und Drehwinkel über Messgenerator STD-20

Optionales Zubehör

- Elektrische Hezhaube EHH70
- Temperaturregler BHH-70
- Generatorset AGS-10
- Messgenerator STD-20
- Maschinengestell und Schaltbrücke STD-20
- Kundenspezifische Motorkomponenten

Lieferform

Komplett montierte und getestete Baugruppe inkl. umfangreicher Dokumentation

**Experimentieren
Verstehen
Optimieren****Labor-Stirlingmotor
ST05G-CNC-II**

interne und technische Änderungen vorbehalten!
ve//ingenieure GmbH • Bergsiedlung 19 • D-83059 Kolbermoor • Germany • www.ve-ingenieure.de
 Telefon: +49 (0) 8031-8871332-0 • Telefax: +49 (0) 8031-8871332-9 • E-Mail: buer@ve-ingenieure.de

Elektrische Heizhaube EHH70

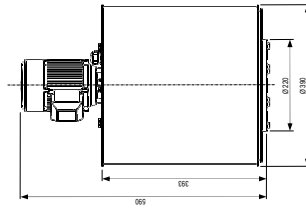
Die Elektrische Heizhaube EHH70 wurde speziell für die Montage auf den Heizkörper des bekannten Experiment-Stirlingmotors entwickelt. Die Heizhaube ist einbaufähig und wird in der Forschung, Entwicklung und Lehre der kontrollierten und reproduzierbaren Betreibung dieses Stirlingmotor-Prototyps, um unter Laborbedingungen Messungen am Prüfling vornehmen zu können.

Die Heizhaube verfügt über 3-phasige elektrische Mantel-Heizelemente mit einer Leistung von ca. 7kW, einen Temperatursensor sowie elektronisch angesteuerte Lüfter für die Schabhaube, die mechanisch angetrieben werden. Gegenüber der Umwelt ist die Heizhaube thermisch isoliert.

Der elektrische Anschluss der Heizhaube kann direkt an Schabhaube des Prototypes STD20 erfolgen. Alternativ kann die Heizhaube auch über einen nachfolgend beschriebenen dedizierten Schaltschrank von ve//ingenieure, oder auch durch eine kundenspezifische Regel-Elektronik versorgt werden.

Technische Daten Heizhaube

- 3-phasige elektrische Mantel-Heizelemente mit einer Leistung von ca. 7kW, System Spannungspegel 3x 230V ±5% 3-phasig (3L+N+PE; TN-S System), 50 Hz
- Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden
- Für Temperaturen innerhalb der Heizhaube bis max. 800°C
- Mit einem Temperatursensor, ausgeführt als Pt1000, Typ K (NiCr-Ni) mit 1 Meter Anschlussleitung
- Mit thermischer Isolierung gegenüber der Umwelt
- Mit elektromechanisch angetriebene Lüfter für die Heißgas-Entsorgung innerhalb der Heizhaube, sowie für die Kühlung der Schabhaube. Die Lüfter sind einphasig und wird im Dreieck geschaltet. Nennspannung 3x400V ±5% / 3-phasig (3L+N+PE; TN-S System), 50 Hz, ca. 1Ampere. Flexible Anschlussleitung ca. 2 Meter mit offenen Kabelenden
- Maximaler Durchmesser der Heizhaube: ca. 390mm; Höhe der Heizhaube über Anschlussflansch zum STD6G-CNC: ca. 590mm
- Masse: ca. 40 kg

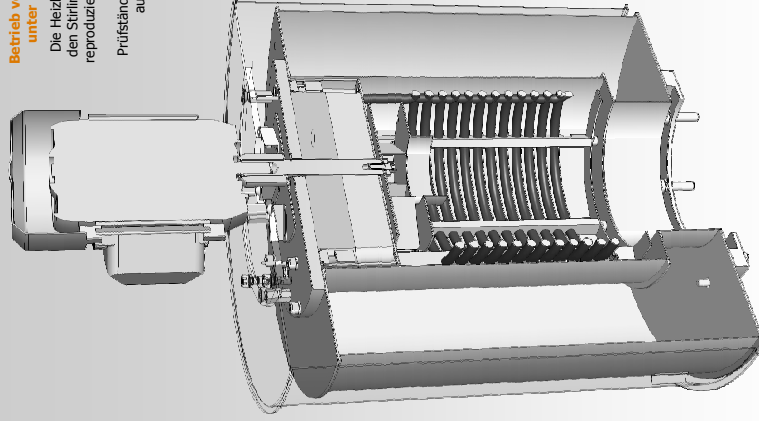


Irntimer und technische Änderungen vorbehalten!

ve//ingenieure GmbH • Bergsiedlung 19 • D-83059 Kolbermoor • Germany • www.ve-ingenieure.de
 Telefon: +49 (0) 8031-8871332-0 • Telefax: +49 (0) 8031-8871332-9 • E-Mail: buero@ve-ingenieure.de

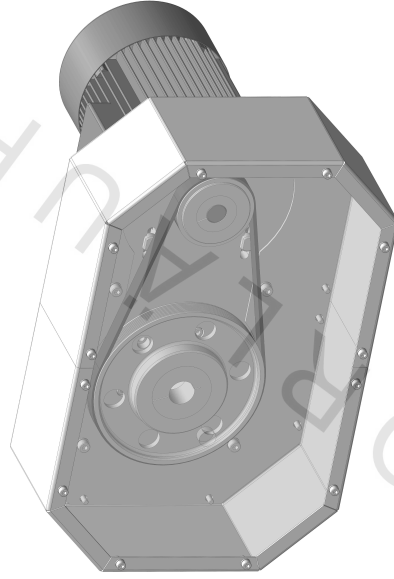
Betrieb von Stirlingmotoren unter Laborbedingungen

Die Heizhaube EHH70 beheizt den Stirlingmotor STD6G unter reproduzierbaren Bedingungen. Sie wird in unseren Prüfständen eingesetzt und ist auch separat erhältlich.



Elektrische Heizhaube EHH70

Starten Belasten Einspeisen



Asynchron Generator / Motor AGM-10

Asynchron Generator / Motor Set AGM-10

Der AGM-10 ist eine einfache und robuste Lösung, um den Stirlingmotor für die Erzeugung von Strom in autarken, ungespeisten Laborsystemen, z.B. aus dem Bereich der micro-Kohle-Wärme-Kopplung vorzusehen.

Das weitere kann der AGM-10 zum Schleppen des Stirlingmotors für Kältemaschinen- und Wärmepumpenversetze eingesetzt werden. Der verwendete E3 Dreistrom-Asynchrongenerator / -motor wird über ein Riemenscheiben- und Riemenantriebssystem mit der Drehwelle der Asynchronmaschine angetrieben. Die Spannungsversorgung der Asynchronmaschine kann wahlweise mit Festdrehzahl direkt am 3-phasigen 230V/400V Netz oder drehzahlvariabel über einen Frequenz-

Der Riementrieb erlaubt es im Festdrehzahlbetrieb, durch Ausweichen der Riemenscheiben, den Betriebspunkt des ST05G-CNC-II in weiten Bereichen an die Anforderungen der jeweiligen Anwendung anzupassen. Die Drehzahl des Motors kann über ein Riemenantriebssystem mit zusätzlich eine optimale Abstimmung der Konföder von Stirlingmotor und Asynchronmaschine erfolgen.

Eine Bestimmung der mechanischen Leistung des Stirlingmotors ist auf indirektem Weg, nach der Ermittlung des Leistungs- / Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Betriebspunkten, möglich. Durch den Verlauf der Wikkelschwindigkeit der Kupferwelle gewünscht, ist der Messgenerator mit Drehmomentmesswelle des Prüfstandes STD-20 die bessere Wahl. Dieser Messgenerator mit Drehmomentmesswelle ist montiert auf eine Schwingplatte, optional auch separat lieferbar.

Technische Daten

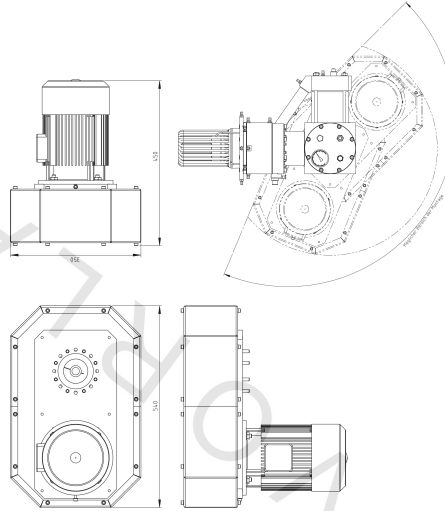
- 4-poliger Dreistrom-Asynchronmotor / Generator
- Nennspannung 230 V / 400 V
- Nennfrequenz 1500 1/min bei 50 Hz
- Wirkungsgradklasse IE3
- Nennleistung 1,1 kW
- Nennleistung Stirlingmotor einstellbar: ca. 400 - 800 1/min
- Nennleistung Asynchronmotor einstellbar: ca. 100 - 200 1/min
- weichen Riemenantriebssystem
- Ak-Abstand einstellbar und Riemen nachspannbar
- Riementrieb und Schwinggrad durch Schutzgehäuse abgedeckt
- Masse: ca. 35 kg
- Wartungsintervalle: spätestens nach 500 h

Optionales Zubehör

- Temperaturfühler
- Ausführung mit Bremse
- Drehgeber
- Zusätzliche Riemenscheiben, passende Riemen

Lieferform

Komplett montierte und getestete Baugruppe inkl. umfangreicher Dokumentation



E. Entwurf des Versuchsaufbaus

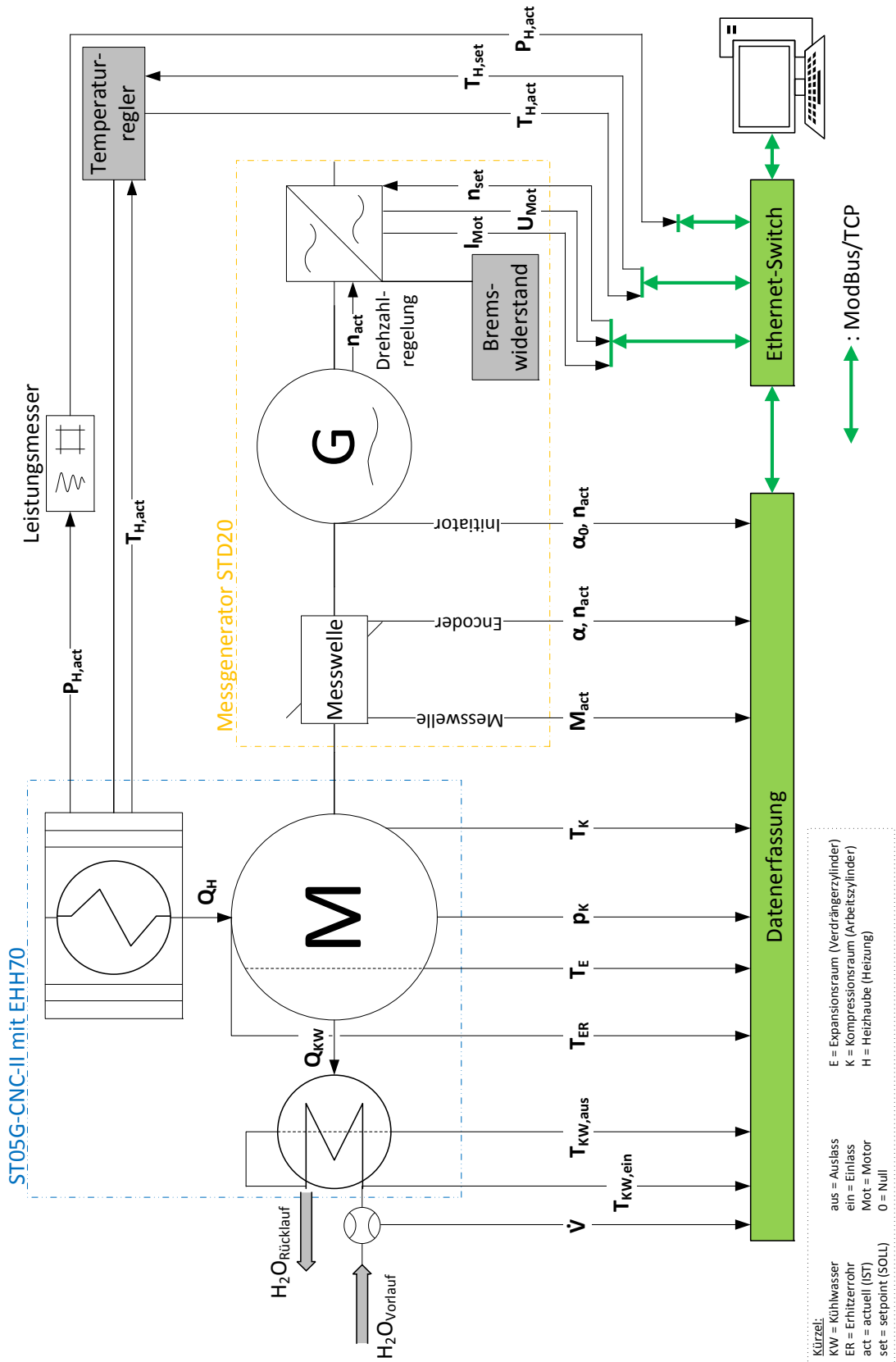


Abbildung E.0.1. – Darstellung der Funktionsstruktur des Versuchsaufbaus und der Messstellen (DIN A4)



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Gröncke

Vorname: Nina

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konzeptionierung und Konstruktion des Ausbaus zur experimentellen Untersuchung eines Stirlingmotors

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

06.03.2017

Datum

Unterschrift im Original