

## Abschlussbericht

für den

**Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz  
badenova AG & Co. KG**

für das Projekt

**Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirlingmotor  
im Erdgasbetrieb, incl. Monitoring  
Projektnummer 2005-07**

Projektleitung  
Martin Barnsteiner



## Inhaltsverzeichnis

---

1	Projektbeschreibung.....	3
1.1	Einführung .....	3
1.2	Zielsetzung.....	3
2	Allgemeine Beschreibung des Stirlingmotors.....	4
2.1	Thermodynamik des Stirling-Kreisprozesses .....	4
2.2	Funktionsweise des Stirlingmotors .....	5
2.3	Vorteile des Stirlingmotors.....	5
3	Beschreibung der Anlagen beim Sportclub Freiburg und der Wachtfelsschule Kolbingen..	6
3.1	Anlagenaufbau beim Sportclub Freiburg .....	6
3.2	Anlagenaufbau in der Wachtfelsschule in Kolbingen .....	10
3.3	Technische Daten der Stirlingmotoren der Fa. Solo Stirling GmbH .....	12
3.4	Regelungsparameter .....	12
4	Betriebsergebnisse .....	14
4.1	Leistung der Motoren .....	14
4.2	Modulation der Leistung .....	15
4.3	Verhalten der Stirlingmotoren beim Ein- und Ausschalten (Takten).....	16
4.4	Undichtigkeiten, Heliumverlust .....	16
4.5	Fernüberwachung und Störungsanalyse.....	16
4.6	Abwärme .....	17
5	Reduzierungspotenzial von Klima schädigenden Stoffen und Luftschadstoffen .....	17
5.1	Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emission .....	17
5.2	Reduzierung der Emission von Luftschadstoffen.....	18
6	Wirtschaftliches Ergebnis .....	19
6.1	Grundlagen der Berechnung .....	19
6.2	Betriebsergebnis .....	21
7	Beispielwirkung.....	23
7.1	Folgeprojekt mit der gleichen Technologie .....	23
7.2	Folgeprojekte mit Stirlingmotoren anderen Hersteller .....	23
7.3	Übertragung der Ergebnisse auf andere Technologien .....	23
8	Öffentlichkeitsarbeit.....	24
8.1	Pressearbeit .....	24
8.2	Präsentation im Internet .....	24
8.3	Führungen und Vorträge.....	25
8.4	Anzeigetafel und Infotafeln.....	27
8.5	Referenzblätter und Flyer .....	28
8.6	Teilnahme an Wettbewerben.....	29
9	Zusammenfassung.....	29

## 1 Projektbeschreibung

### 1.1 Einführung

badenovaWÄRMEPLUS betreibt in ca. 50 der insgesamt über 140 Wärmeerzeugungsanlagen Blockheizkraftwerke zur gleichzeitigen Erzeugung von Wärme und Strom. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Erdgas-Motoren erreicht bis zu 90 %, während bei der reinen Stromerzeugung in thermischen Kraftwerken nur elektrische Wirkungsgrade von ca. 35 % bis maximal 40 % erreicht werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei Anlagen, eine beim Sportclub Freiburg und eine in der Wachtfelsschule in Kolbingen, mit Stirlingmotoren als Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen errichtet. Bei den beiden Projekten waren die technischen Randbedingungen sehr unterschiedlich. Bei badenovaWÄRMEPLUS oder in der Region existierten noch keine derartigen Anlagen. Das Konzept des Stirlingmotors, der bereits Anfang des 19. Jahrhunderts erfunden wurde, wird heute wieder aufgegriffen und weiterentwickelt, da dieser Motor für die dezentrale Energieerzeugung attraktive Eigenschaften aufweist. Die Stirlingmotoren werden in den beiden Projekten neben Erdgaskesseln betrieben und decken die Wärmegrundlast ab.

Die Stirlingmotoren wurden mit umfangreicher Messtechnik und Datenaufzeichnung ausgestattet. Sowohl der Eigentümer, der Anlagenbetreiber als auch die Kunden erhalten mittels Visualisierung Informationen über das Wärmemanagement und speziell über die Stirlingmotoren. Durch ein umfangreiches Monitoring werden die Stirlingmotoren nicht nur ständig überwacht, sondern kontinuierlich werden alle Messdaten der Energieflüsse und Medienzustände erfasst und gespeichert. Anhand der Aufzeichnungen werden Auswertungen vorgenommen und die Betriebsweise der Stirlingmotoren optimiert.

### 1.2 Zielsetzung

Das Ziel des Projektes war es, diese neue Technologie zu testen und Erfahrungen im Betrieb zu sammeln und die Betriebsergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Das allgemeine Interesse an Stirlingmotoren ist sehr hoch und durch die beiden Projekten sollte der Betrieb der Stirlingmotoren in der kommerziellen Anwendungen getestet werden und zum Einsatz bei weitere Anlagen in der Region führen. Auch für badenovaWÄRMEPLUS sollte die Einsatzfähigkeit der Stirlingmotoren für übliche Contractingprojekte untersucht werden.

Der Hersteller der Anlagen, die Solo Stirling GmbH, befand sich noch in einem aktiven Entwicklungsprozess der Erdgas-Stirlingmotor und in der Entwicklung eines Pellets-Stirlingmotors. Diese Entwicklung sollte durch das umfangreiche Erfassen der Daten unterstützt werden.

Neben der Anlagentechnik sollte auch der Betrieb weiter entwickelt werden. Es wurde z. B. das Teillastverhalten geprüft, unterschiedliche Regelungsstrategien entworfen, verschieden Betriebsparameter eingestellt, der Unterschied zwischen einer Einzelanlage in der Wachtfelsschule und einer Anlage mit zwei Motoren beim Sportclub untersucht, etc.

Aus den Daten sollte auch eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung gemacht und untersucht werden, welche Rahmenbedingungen den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben und wie diese verbessert werden können.

## 2 Allgemeine Beschreibung des Stirlingmotors

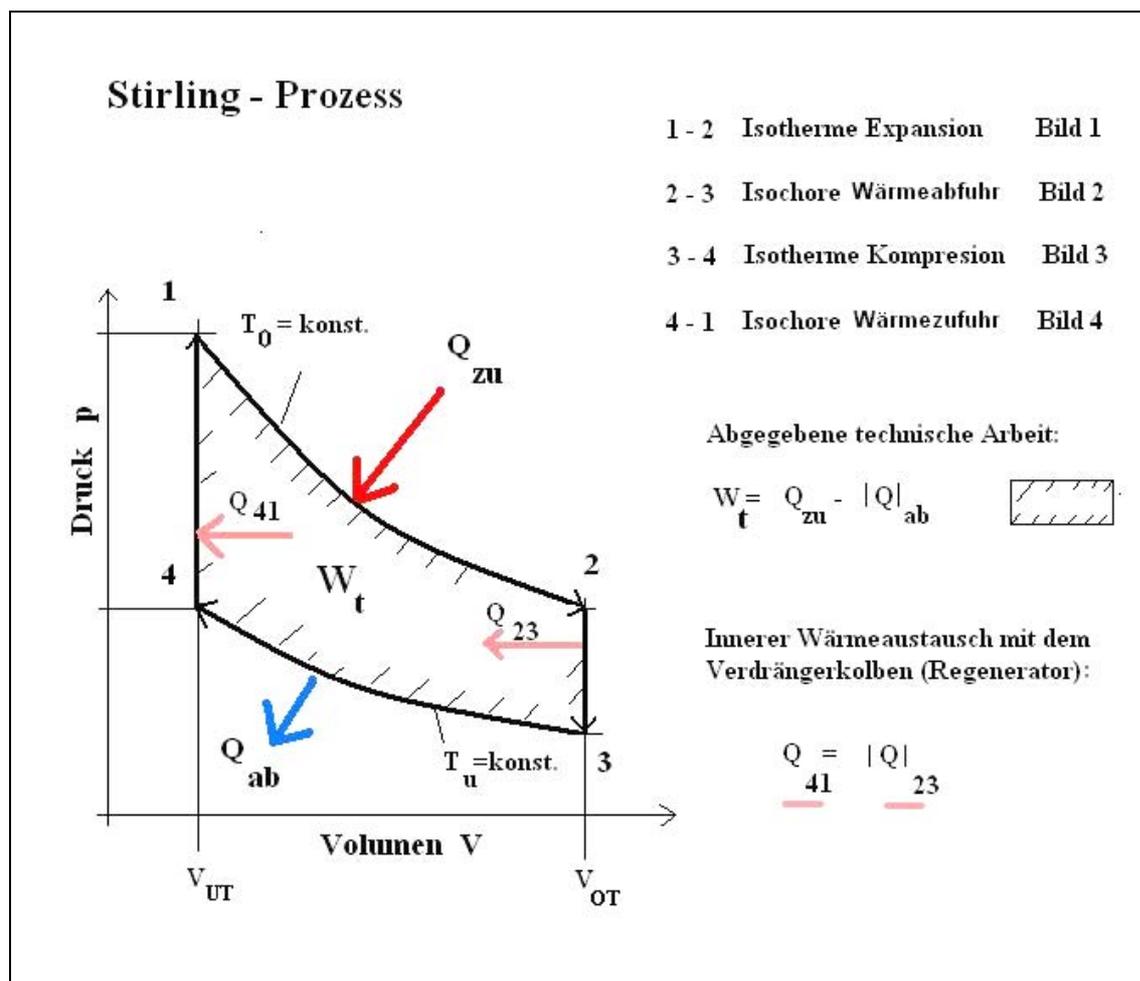
### 2.1 Thermodynamik des Stirling-Kreisprozesses

Der Stirlingmotor ist ein nach dem schottischen Geistlichen Robert Stirling (\*1798 +1878) benannter Heißgasmotor. Robert Stirling erfand den Motor im Jahre 1816, damit ist er nach der Dampfmaschine die älteste Wärmekraftmaschine.

Im Stirlingmotor wird eine eingeschlossene Gasmasse periodisch erwärmt und abgekühlt. Die dadurch hervorgerufenen Druckänderungen werden durch Arbeitskolben in mechanische Arbeit umgesetzt.

Der thermodynamische Kreisprozess besteht idealisiert aus vier Zustandsänderungen:

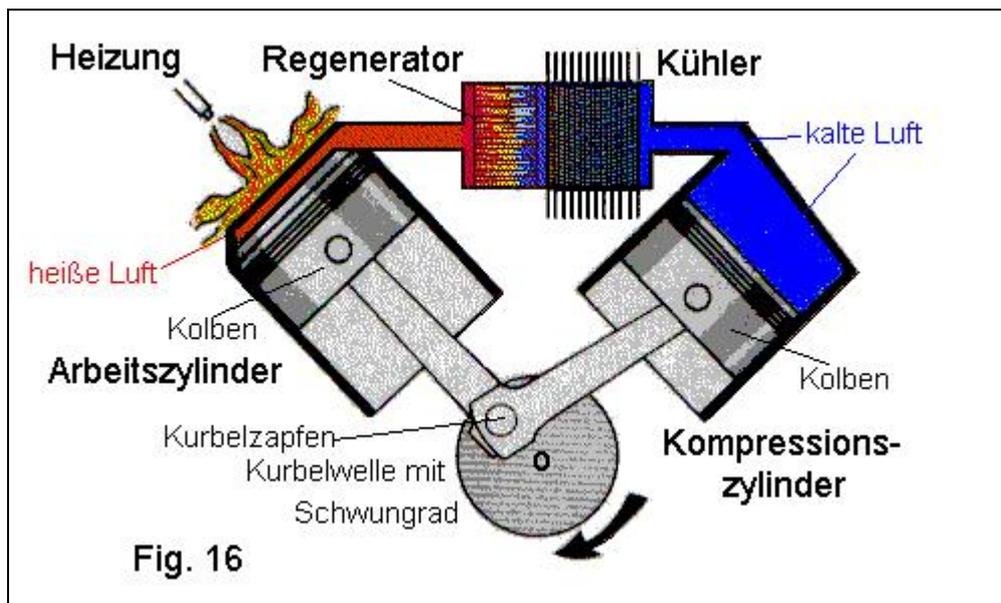
- Expansion bei konstanter Temperatur (Isotherme, 1-2)
- Wärmeabfuhr bei konstantem Volumen (Isochore, 2-3)
- Kompression bei konstanter Temperatur (Isotherme, 3-4)
- Wärmezufuhr bei konstantem Volumen (Isochore, 4-1)



Stirling-Kreisprozess

## 2.2 Funktionsweise des Stirlingmotors

Das Arbeitsgas wird zwischen einem heißen und einem kalten Raum hin und her geschoben. Zwischen diesen Räumen ist zur Verbesserung des Wirkungsgrades ein Regenerator geschaltet, in dem das zur kalten Seite strömende Gas Wärme abgibt und beim Rückströmen zur heißen Seite wieder Wärme aufnimmt. Wegen der Strömungsverluste ist Luft als Arbeitsgas nicht geeignet. Am günstigsten ist Wasserstoff, doch besteht bei Undichtigkeit Explosionsgefahr. Daher wird heute oft Helium oder Stickstoff als Arbeitsgas verwendet.



Die Volumenänderungen des heißen und des kalten Raumes können konstruktiv auf verschiedene Weise verwirklicht werden. Die Stirlingmotoren von der Fa. Solo Stirling Engine beim Sportclub Freiburg und in der Wachtfelsschule Kolbingen sind doppelt wirkende Motoren, bei denen sich die jeweils zusammenarbeitenden heißen und kalten Räume in verschiedenen Zylindern in V-Anordnung befinden. Die Leistungsregelung erfolgt durch Vergrößern oder Verkleinern der Arbeitsgasmasse. Der maximale Heliumdruck im Motor beträgt 150 bar, der minimale 35 bar. Beim Abstellen wird das Helium zurück in den Behälter abgepumpt, in dem der Druck dann auf 250 – 280 bar steigt.

## 2.3 Vorteile des Stirlingmotors

Ein Vorteil des Stirlingmotors gegenüber dem Verbrennungsmotor ist die äußere Verbrennung mit kontinuierlicher Verbrennung und die damit verbundene geringere Schadstoffemission sowie die geringe Geräuschentwicklung. Die Verbrennung erfolgt flammenlos in einem Oxidationsbrenner, einem so genannten Flox-Brenner, bei Temperaturen von 1.200-2.000 °C. Die Brennkammer muss beim Start des Motors erst auf eine Temperatur von ca. 720 °C aufgeheizt werden. Das bedeutet er kann nicht wie ein Otto- oder Dieselmotor schnell gestartet werden.

Durch die externe Wärmezufuhr können im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren auch erneuerbare Energieträger wie Holz und Solarwärme eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil ist laut Hersteller ein geringer Wartungsaufwand, da beispielsweise keine Zündkerzen gewechselt werden müssen, kein Ölwechsel erforderlich ist und der Motor wegen der höheren Laufruhe weniger Verschleiß hat.

Wird der Stirlingmotor als Kraft-Wärme-Kopplungsmodul eingesetzt, so wird die mechanische Energie in einem Generator in elektrischen Strom umgewandelt und die Abwärme des Motors und des Abgases zu Heizzwecken genutzt. In dem Abgaswärmetauscher wird das Abgas wie bei einem Brennwertkessel unter den Taupunkt abgekühlt. Das erhöht die Brennstoffnutzung um etwa 5 bis 10 %.

### 3 Beschreibung der Anlagen beim Sportclub Freiburg und der Wachtfelsschule Kolbingen

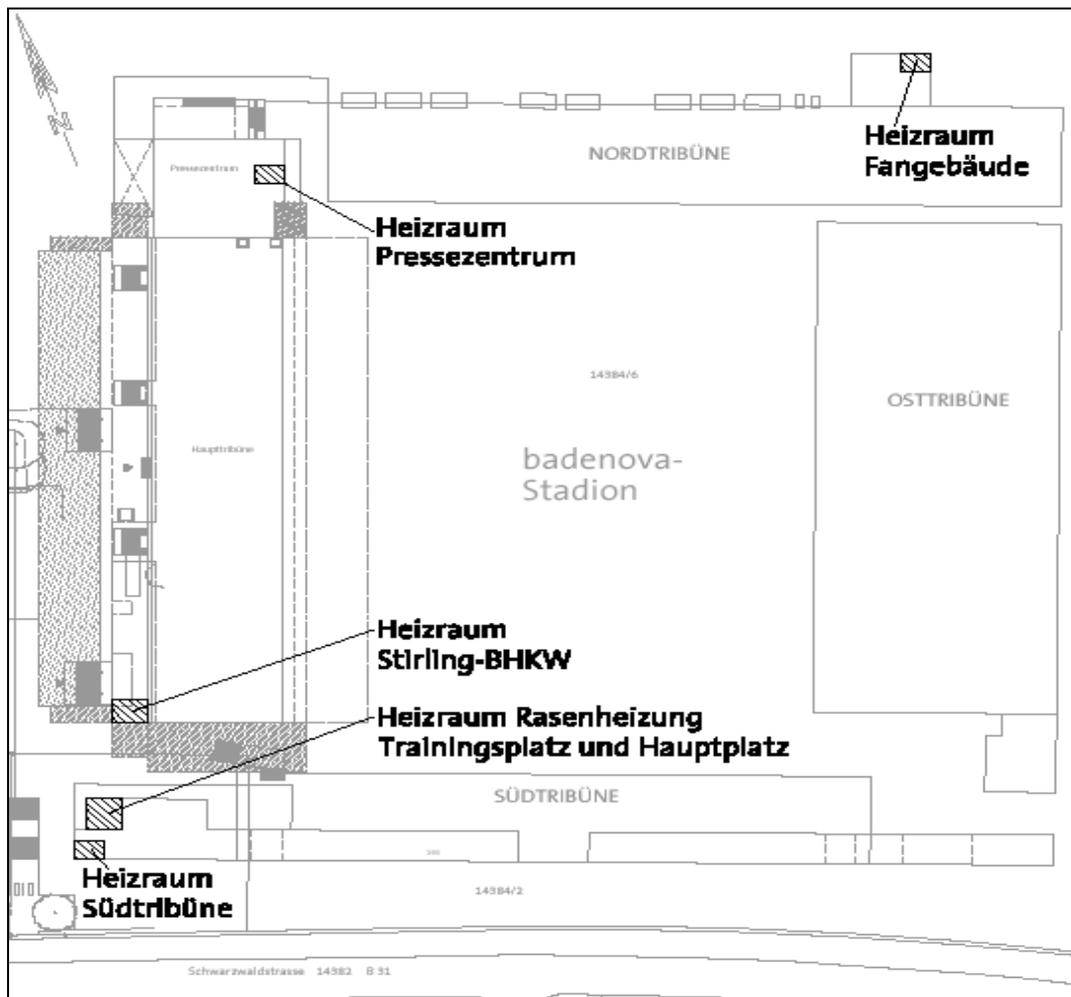
#### 3.1 Anlagenaufbau beim Sportclub Freiburg



Luftbild des badenova-Stadion

Im badenova-Stadion des Sportclub Freiburg gibt es mehrere Heizzentralen mit Erdgaskessel. Aufgrund einer Auflage des DFB wurde für den Hauptplatz eine Rasenheizung installiert und hierfür musste die Kesselanlage erweitert werden. Die gesamte installierte Leistung beträgt  $2.700 \text{ kW}_{\text{th}}$  und der Wärmeverbrauch beträgt ca.  $2.000 \text{ MWh}$  pro Jahr.

Die Einbindung der Stirlingmotoren in das bestehende System des Fußballstadions in Freiburg orientiert sich an mehreren Randbedingungen. Neben den Motoren sind auch eine thermische Solaranlage sowie mehrere Heizkessel in das Wärmenetz eingebunden. Die solarthermische Anlage besitzt dabei eine Vorrangschaltung vor den Motoren. Die Motoren wiederum haben Vorrang vor den Kesseln.



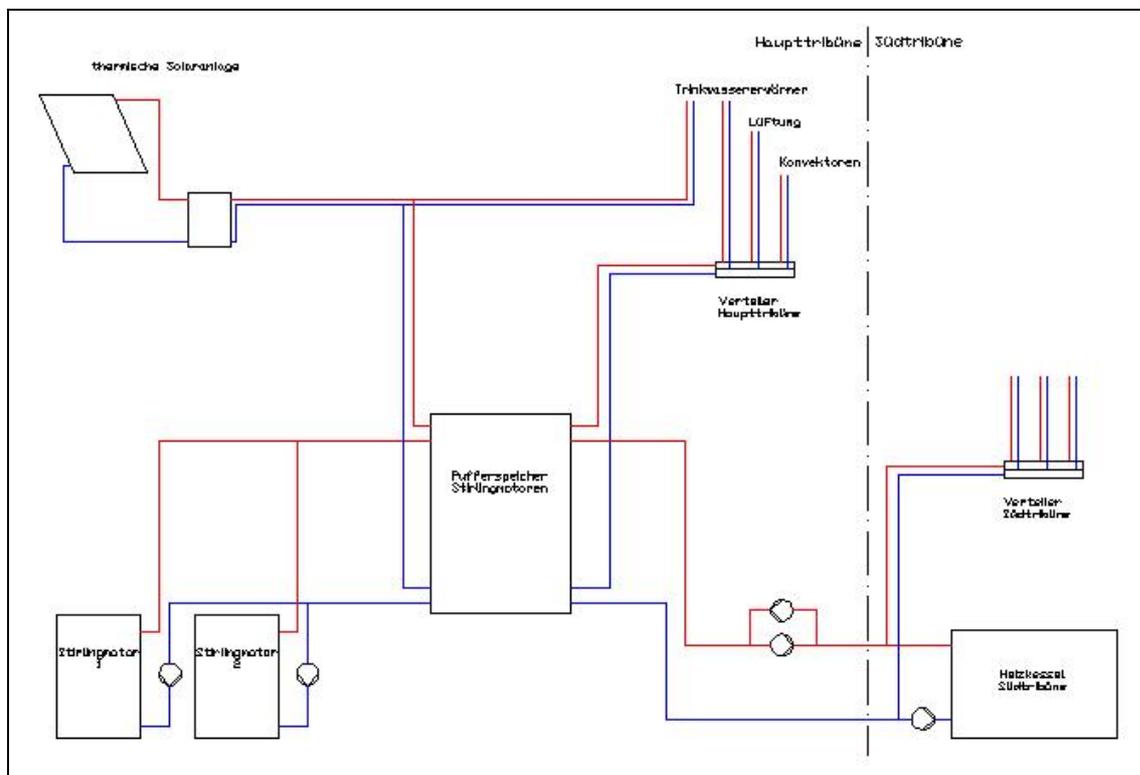
Lageplan der Heizräume im badenova-Stadion



Die beiden Stirlingmotoren im „gläserner“ Heizräume unter der Haupttribüne des badenova-Stadions

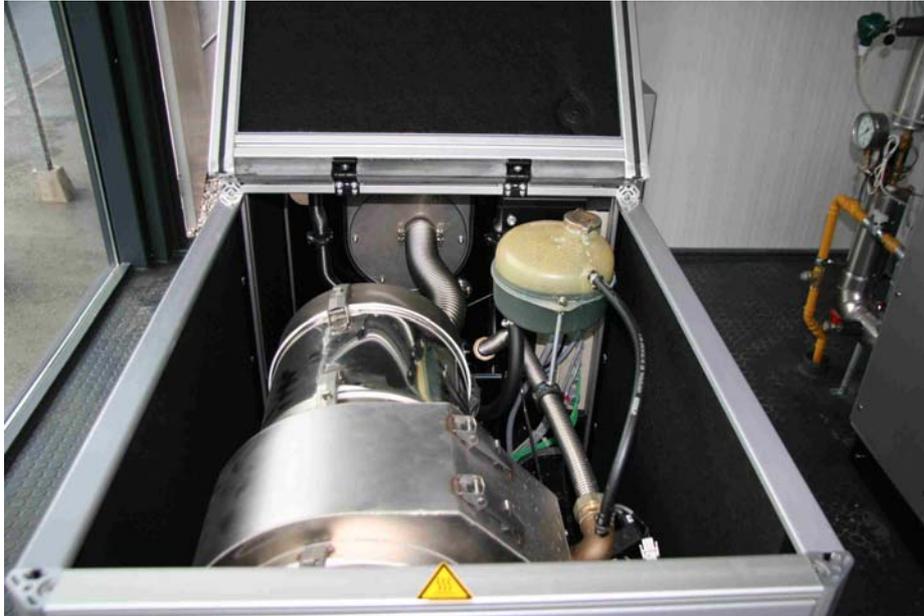
Die Wärmemenge der Solaranlage wird in 4 Pufferspeichern zwischengespeichert. Bei Bedarf werden die Puffer über einen Wärmetauscher in den Warmwasserspeicher mit 1.500 l Inhalt sowie über den Pufferspeicher der Stirlingmotoren auf den Verteiler der Haupttribüne entladen. Wenn auf der Seite der Haupttribüne kein Wärmebedarf mehr besteht, wird die Wärme zur Südtribüne geleitet, in der neben der Geschäftsstelle auch eine Gaststätte vorhanden ist. Das Restaurant erhöht die Grundlast für die Motoren, da auch im Sommer ein Wärmebedarf besteht. Außerdem ist es über diese Strecke auch möglich, Wärme vom Kessel der Südtribüne zum Pufferspeicher der Motoren in der Haupttribüne zu leiten. In der Südtribüne befinden sich noch zwei Kessel für die Rasenheizung, wovon einer bei Bedarf ebenfalls Wärme für die Haupttribüne bereitstellen kann. Der Kessel ist so dimensioniert, dass auch bei einem Ausfall der Stirlingmotoren der komplette Wärmebedarf immer noch abgedeckt wird.

Diese Verbindung zwischen den Heizzentralen Süd- und Haupttribüne wurde im Rahmen des Projektes zur Erhöhung der Grundlast für die Motoren und zur Absicherung der Wärmeversorgung der Haupttribüne gemacht. Ferner ermöglicht diese Verbindung den Transport von Solarwärme von der Haupttribüne zur Südtribüne, was in der Vergangenheit nicht möglich war. Die Nutzung der Solarenergie wurde also ebenfalls optimiert.



Schema der Stirlingmotoren in der Anlage Sportclub Freiburg

Der Pufferspeicher der Stirlingmotoren steht im Mittelpunkt, da er von den Motoren, der solarthermischen Anlage als auch vom Kessel der Südtribüne geladen und über den Heizverteiler der Haupttribüne sowie in Richtung Südtribüne entladen werden kann. Dieser komplexe Aufbau wird aus regelungstechnischer Sicht durch den Einbau von 2 Motoren zusätzlich erschwert.



Stirlingmotor 1 beim Sportclub Freiburg, Brennkammer mit Erhitzer

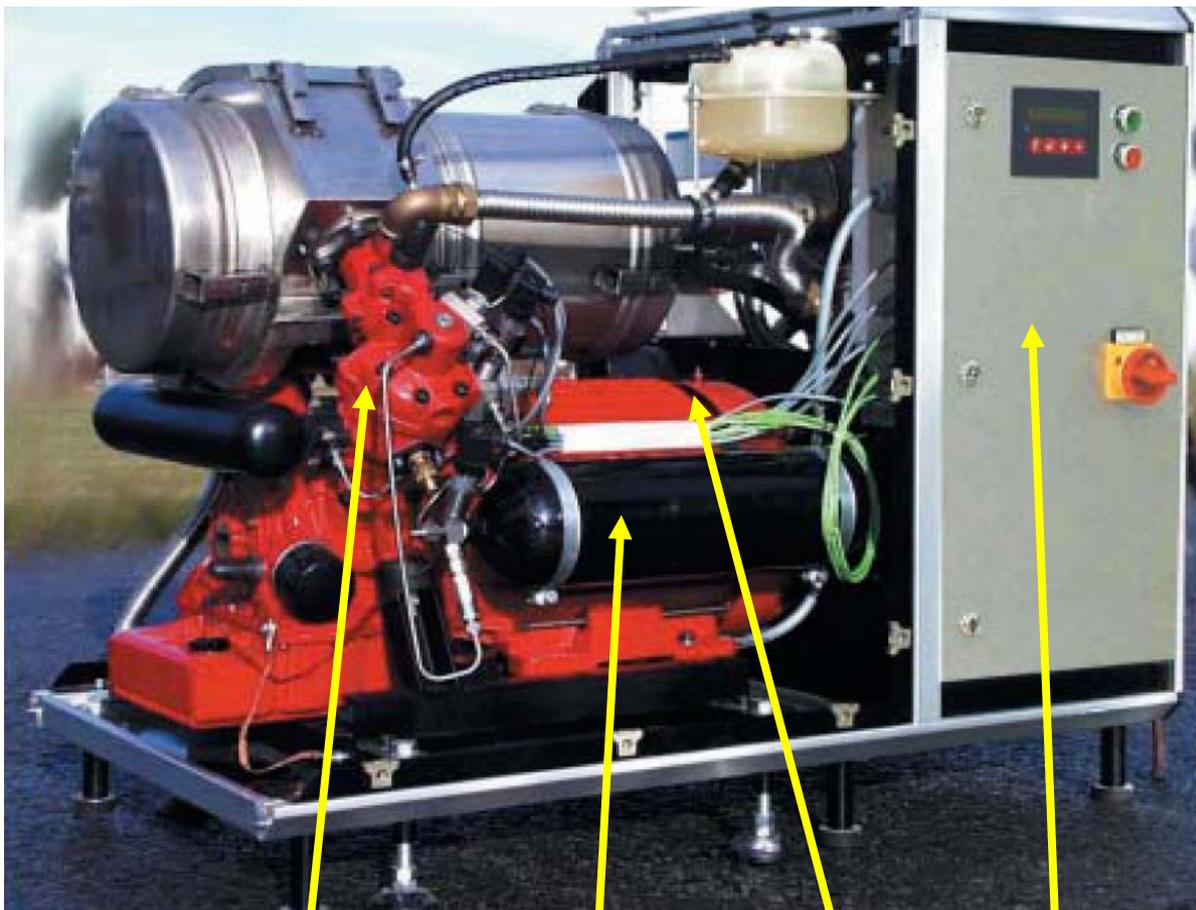


Bild von Fa. Solo: Stirling-V-Motor Heliumdruckbehälter Generator Schaltschrank

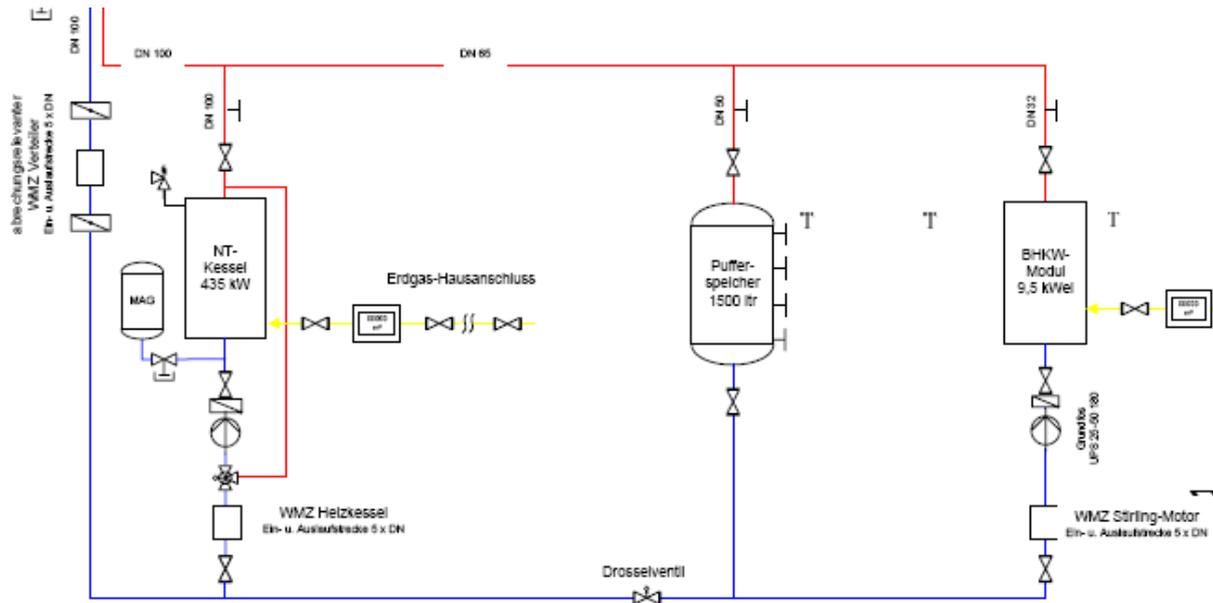
### 3.2 Anlagenaufbau in der Wachtfelsschule in Kolbingen



Außenansicht der Wachtfelsschule

In der Gemeinde Kolbingen befindet sich die Wachtfelsschule als Grund- und Hauptschule mit Turn- und Schwimmhalle sowie eine Mehrzweckhalle als Veranstaltungsort. Beide Gebäudekomplexe werden aus einer Heizzentrale in der Schule mit Wärme versorgt. Die alte Heizölanlage wurde demontiert und im Rahmen eines Energiecontracting von badenovaWÄRMEPLUS durch einen neuen Erdgaskessel (450 kW) ersetzt. Der Wärmeverbrauch beträgt 530 MWh pro Jahr.

Im Zuge dieses Umbaus wurde ein Stirlingmotor mit einem Pufferspeicher zur Kraft-Wärme-Kopplung installiert und die alte Regelung durch eine moderne Gebäudeleittechnik ersetzt. Ferner wurden neue, drehzahlgeregelte Pumpen mit Permanentmagnetkern mit einem sehr geringen Strombedarf eingebaut.



Schema der Wärme- und Stromerzeugungsanlage in der Wachtfelsschule Kolbingen

Der Stirlingmotor lädt den Pufferspeicher und verwendet ausschließlich die Puffertemperaturen als Regelgröße. Der Pufferspeicher ist quasi als zweite Wärmequelle parallel zum Heizkessel eingebunden. Die Absperrklappe im Vorlauf nach dem Heizkessel wurde durch eine motorisch angetriebene Klappe ersetzt und ermöglicht eine stufenlose Drosselung des Volumenstromes durch den Heizkessel, wodurch sich der Volumenstrom durch den Puffer erhöht, da die Pumpen am Heizungsverteiler den konstanten Volumenstrom ziehen. Die Steuerung dieser Klappe erfolgt in Abhängigkeit der Puffertemperatur. Der Puffer wird dadurch immer optimal entladen und für den Stirlingmotor gibt es eine maximale Wärmeabnahme.

Diese Einbindung ist relativ einfach, die Regelung klar und unkompliziert und für den Betrieb des Stirlingmotors ideal.



Heizraum in der Wachtfelsschule Kolbingen

### 3.3 Technische Daten der Stirlingmotoren der Fa. Solo Stirling GmbH

In der folgenden sind die Daten der Stirlingmotoren gemäß dem neuen Datenblatt von Solo zusammengestellt. Gegenüber dem alten Datenblatt hat sich die elektrische Leistung von 9,5 auf 7,5 kW und die thermische Leistung von 26 auf 22 kW reduziert.

<b>Außenabmessungen</b>	
Länge	1280 mm
Breite	700 mm
Höhe	980 mm
Gewicht	450 kg
<b>Leistung und Wirkungsgrad</b>	
Arbeitsgas	Helium
Obere Arbeitsgastemperatur	650 °C
Elektrische Leistung	2-7,5 kW
Elektrischer Wirkungsgrad*	22-24,5 (± 1%) %
Thermische Leistung	22 kW
Thermischer Wirkungsgrad (bez. auf Hu)*	65-75 %
<b>Motordaten</b>	
Bauart	V 2-Zylinder
Hubraum	160 ccm
Mittlerer Arbeitsdruck	70-130 bar
Nenn Drehzahl	1500 U/min
<b>Kühlsystem</b>	
maximale Temperatur im Zulauf	60 °C
Kühlmitteldurchsatz, intern über Pumpe	45 ltr/min
<b>Netzanschluss</b>	
Spannung	400 V
Frequenz	50 Hz
Asynchron-Generator	3 Phasen

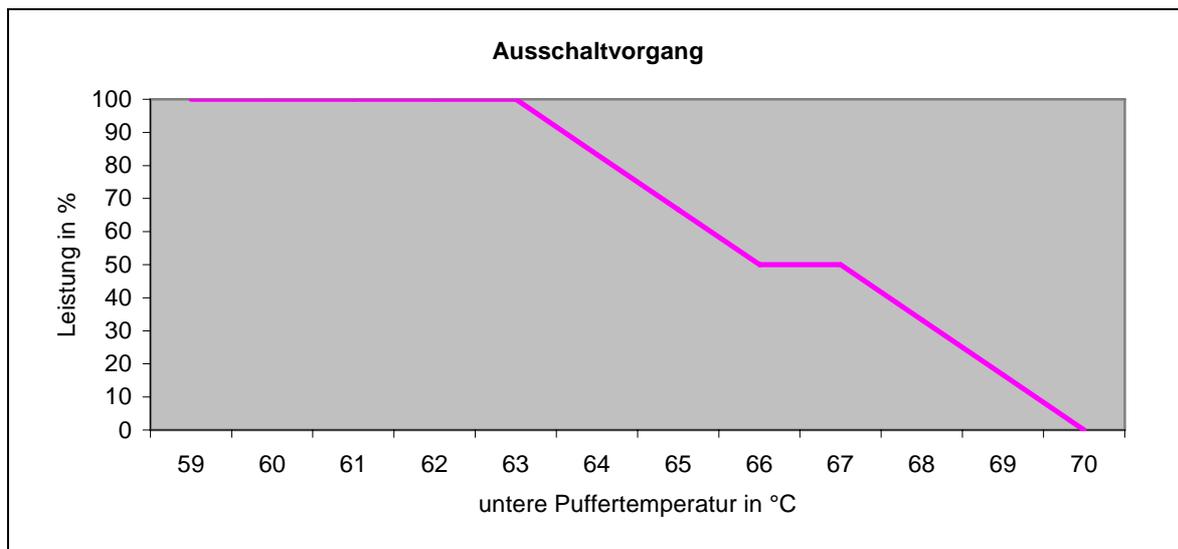
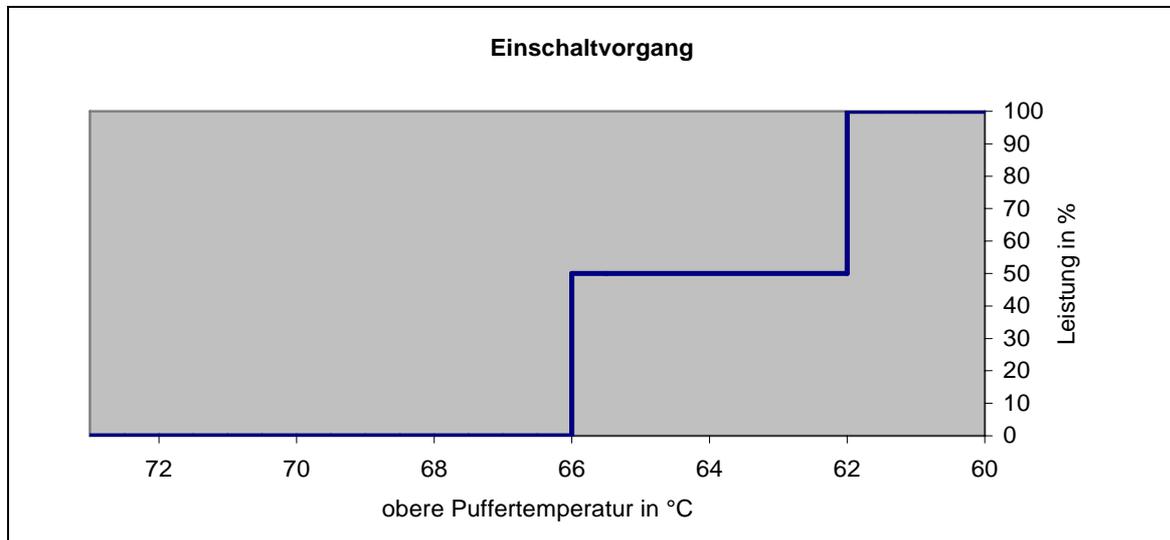
bez. auf Kühlwasserzulauf von 50 °C

### 3.4 Regelungsparameter

Bezeichnung	Einstellbereich	Einstellwert
Führungsmotor EIN, Puffer oben	62 - 75 °C	66 °C
Führungsmotor AUS, Puffer unten	65 - 85 °C	70 °C
Folgemotor EIN	1 - 8 K	4 K
Folgemotor AUS	1 - 8 K	4 K
Entladung Puffer zur Südtribüne	58 - 65 °C	60 °C
Max. Vorlauf Stirling	55 - 85 °C	77 °C
Führungsmotor Teillast	1 - 10 K	3 K
Folgemotor Teillast	1 - 10 K	3 K
EIN Beladung Puffer aus Südtribüne	55 - 85 °C	62 °C
AUS Beladung Puffer aus Südtribüne	55 - 85 °C	68 °C

Regelungsparameter der Stirlingmotoren bei der Anlage Sportclub Freiburg

Der Ausschaltvorgang erfolgt stetig, während der Einschaltvorgang so vorgesehen ist, dass die Maschinen als Kaskaden geregelt werden. Im wöchentlichen Turnus werden die Maschinen in ihrer Funktion als Führungsmaschine bzw. Folgemaschine abgewechselt, um eine möglichst ausgeglichene Betriebszeit für beide Motoren zu erreichen. 50 % bedeuten hier, dass eine Maschine mit Volllast in Betrieb ist. Bei 100 % sind beide Motoren in Betrieb.



Diese Vorgaben durch die Gebäudeleittechnik werden geräteintern durch die Geräterege lung noch weiterverarbeitet. Die Regelung der Betriebsweise kann auf drei Arten erfolgen:

- 1) Ohne Modulation im AN/AUS-Betrieb mit einem festen Sollwert, der jedoch manuell ver stellt werden kann
- 2) Mit einer internen Modulation auf drei Leistungsstufen, orientiert an der Rücklauf tempera tur
- 3) Durch die Gebäudeleittechnik in einer stufenlosen Betriebsweise, nach einer Sollwertvorgabe zwischen 0 und 10 V und einem AN/AUS-Signal.

Die Motoren im badenova-Stadion und in der Wachtfelsschule werden nach dem Regelprinzip von 1) betrieben. Als fester Sollwert wurde ein Maschinendruck von 100 bar eingegeben, was einer thermischen Leistung von ca. 17 kW entspricht. Während der Untersuchung wurde eine

Änderung auf das Prinzip von 3) vorgenommen. Die Regelkurve aus Punkt drei ist in den Abbildungen es Ein- und Ausschaltvorganges dargestellt. Die Motoren folgen dabei stufenlos der Modulationsvorgabe.

In der Wachtfelsschule erfolgt die Leistungsregelung nach dem gleichen Prinzip, es ist dort aber nur ein Motor installiert, ein Kaskadierung zwischen Führungs- und Folgemotor demnach nicht vorhanden.

## 4 Betriebsergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird das Verhalten der Motoren im Betrieb der Anlagen beschrieben und analysiert. Es werden die wesentlichen Probleme und Lösungsversuche kurz erläutert.

### 4.1 Leistung der Motoren

Zu Beginn wurde das Augenmerk auf die Leistung der Motoren gelegt. Durch Änderungen an den Motoren sowie an deren Betrieb haben sich in dem Betrachtungszeitraum andere Leistungen als die angegebenen eingestellt.

Diese Leistung bei Volllastbetrieb hängt in erster Linie vom Maschinendruck ab. Wie bereits beschrieben lässt sich die Leistung des Stirlingmotors über den Heliumdruck in den Zylindern modulieren. Laut Herstellerunterlagen beträgt der maximale Maschinendruck 150 bar. Aus technischen, konstruktiven Gründen konnte dieser Druck aber nie gefahren werden und die Motoren wurden mit einem Druck von etwa 80 bis 120 bar betrieben. Der Zusammenhang zwischen Maschinendruck und Leistung ist nahezu linear. Ein Druck von 100 bar zu 130 bar bedeutet demzufolge auch nur drei Viertel der Leistung, also ca. 5,8 kW<sub>el</sub> anstatt 7,5 kW<sub>el</sub>. Die thermische Leistung reduziert sich von 22 kW<sub>th</sub> auf knapp 17 kW<sub>th</sub>.

Durch den geringen Anschlussdruck des Erdgasanschlusses beim Sportclub Freiburg (24 mbar statt wie vom Hersteller gefordert 45 mbar) reduziert sich die Leistung weiter. Diese Leistungsminderung errechnet sich nach folgender Formel:

$$\dot{Q}_{neu} = \dot{Q}_{alt} \cdot \sqrt{\frac{p_{neu}}{p_{alt}}} = 17kW \cdot \sqrt{\frac{24mbar}{45mbar}} = 12,42kW$$

Eine weitere Leistungsbegrenzung ergibt sich aufgrund der von den Idealwerten abweichenden Systemtemperaturen. Sowohl die Heizungsanlage beim Sportclub als auch die in der Wachtfelsschule fordern hohe Vorlauftemperaturen.

Die Stirlingmotoren sind mit Brennwertnutzung in den Abgaswärmetauschern ausgestattet. Hohe Rücklauftemperaturen reduzieren die kondensierende Wassermenge im Abgas und somit die gewonnene Wärmemenge.

Das Temperaturband, in dem der Generator Strom erzeugt, wird durch die Erhöhung der Systemtemperaturen geschmälert. Dies führt zu einer Minderung der elektrischen Leistung. Die vorliegenden durchschnittlichen Temperaturen bei Volllast sind T<sub>VL</sub>= 70 °C und T<sub>RL</sub>= 60 °C. Daraus ergibt sich eine Spreizung von 10 K statt der vom Hersteller angenommenen 14 K.

Um der Minderung der thermischen Leistung entgegenzuwirken ist der Volumenstrom des Heizungswassers durch die Motoren erhöht worden. Dieser neue Wert lässt sich am Wärmemengenzähler ablesen und beträgt 1,45 m<sup>3</sup>/h bei 60 °C. Durch die von Solo

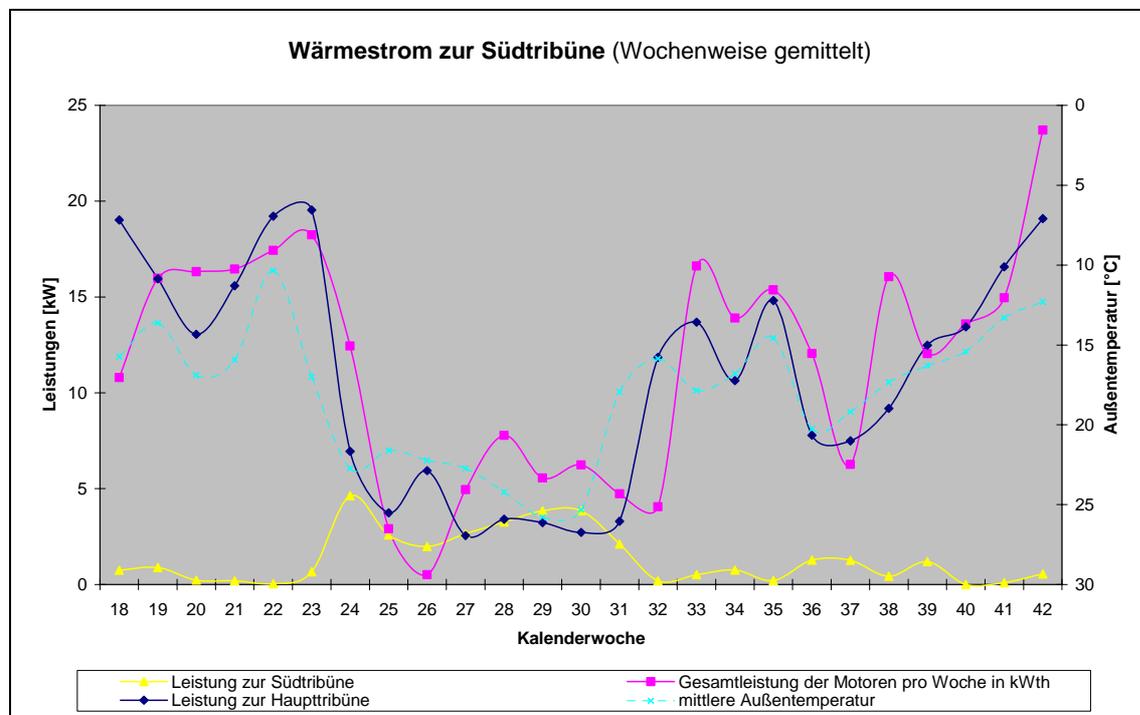
durchgeführte Änderungen wie z. B. der Einbau einer anderen Erdgasregelstrecke erhöht sich die Leistung wiederum etwas.

Die Leistungen einer Maschine lagen somit im Volllastbetrieb in etwa bei  $17 \text{ kW}_{\text{th}}$  und  $6,0 \text{ kW}_{\text{el}}$ .

## 4.2 Modulation der Leistung

Über den Heliumdruck im Motor ist eine stufenlose Leistungsmodulation möglich, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber herkömmlichen Klein-BHKWs ist, die teilweise nur mit konstanter Leistung betrieben werden können.

Im folgenden Diagramm ist der Zusammenhang zwischen Außentemperatur (Hellblau gestrichelt) und Leistungsbedarf Haupttribüne (Dunkelblau, durchgezogen) dargestellt. Je niedriger die Außentemperatur ist, desto höher ist logischerweise der Leistungsbedarf. Anhand der Leistungskurve der Motoren (Magenta durchgezogen) erkennt man die Anpassung der Leistungsproduktion an den Leistungsbedarf.



Der Maschinendruck konnte nicht auf den von der Regelung vorgegebenen Sollwert eingestellt werden. Der Druck stieg von unten kommend über den Sollwert oder viel von oben kommen unter den Sollwert. Die Regelung kam ins Schwingen und die Motoren gingen auf Störung.

Auf den Modulationsbetrieb musste leider verzichtet werden und die Motoren wurden nach zahlreichen Tests mit konstantem Maschinenendruck, also konstanter Leistung betrieben. Die wesentlichen Vorteile der Stirlingmotoren, die stufenlose Leistungsmodulation und die sehr niedrige Teillastleistung von 20 %, gingen damit verloren.

Besonders für den Einsatz in kleineren Mehrfamilienhäusern wäre die unproblematische Leistungsmodulation in den Sommermonaten ein großer Vorteil gegenüber anderen BHKWs, die teilweise nur mit konstanter Leistung laufen oder im Teillastbetrieb deutlich geringere Wirkungsgrade haben.

### 4.3 Verhalten der Stirlingmotoren beim Ein- und Ausschalten (Takten)

Das Ein- und Ausschalten ist bei den Motoren sehr kritisch. Es kam dabei häufig zu Störungen, die den Stillstand eines Motors hervorriefen. Es entstehen beim Einschalten Temperatur- und Druckschwankungen im Motor. Diese Schwankungen verursachen Störungen.

Wenn die Brennkammer die benötigte Temperatur erreicht hat, schaltet der Generator vom Betrieb als Anlasser auf den Betrieb als Generator um. Als Anlasser bringt der Generator Wärme in die Brennkammer. Nach dem Umschalten entzieht er jedoch plötzlich Wärme. Der Brenner schafft es nicht immer, genügend Leistung zu liefern. Die Temperatur im Brennraum nimmt über den erlaubten Bereich ab und eine Störung wird ausgelöst.

Häufig kam die Brennkammer beim Hochheizen auch nicht auf die erforderliche Temperatur und es wurde eine Störung wegen Überschreitung der maximalen Aufheizzeit ausgelöst.

Generell kann gesagt werden, dass ein häufiges Takten den Gesamtwirkungsgrad bei Stirlingmotoren deutlich stärker verschlechtert als dies bei Gas-Ottomotoren der Fall ist. Ein Gas-Ottomotor startet sofort und erreicht die Maximalleistung in wenigen Sekunden. Ein Stirlingmotor startet erst beim Erreichen der erforderlichen Temperatur. Bei den Solo-Motoren war diese ca. 740 °C und der Startvorgang hat oft 5-10 Minuten gedauert. In dieser Zeit arbeitet das Stirlingmotor-BHKW sehr uneffizient, da der Motor beim Beginn des Startvorgangs noch steht und gegen Ende des Startvorgangs vom Generator angetrieben wird und somit Strom verbraucht, anstatt diesen zu produzieren.

### 4.4 Undichtigkeiten, Heliumverlust

Es kam zweimal zu einer Undichtigkeit im Kühlwasserkreis. Besonders der hohe Heliumdruck führte zu Undichtigkeiten im Heliumsystem, die aber relativ gering waren. Bei Stromausfall bleibt der Motor abrupt mit einem hohen Arbeitsgasdruck stehen. Alleine starten kann er aber nur mit einem Arbeitsgasdruck von 15 bis 20 bar. Zum Starten des Motors musste in so einem Fall manuell Helium abgelassen werden, was zu einem hohen Verlust führte.

### 4.5 Fernüberwachung und Störungsanalyse

Beide Anlagen werden von badenovaWÄRMEPLUS über die Verbundleitwarte fernüberwacht, d. h. Störungen wurden sofort gemeldet.

Es gab aber keine Einwahlmöglichkeiten direkt auf die Stirlingmotoren zur Quittierung oder Analyse der Störungen wie das bei anderen BHKWs üblich ist. Der Betrieb konnte nicht überwacht werden und die Störungs\_codes konnten nur vor Ort ausgelesen werden, was die Vorbereitung der Wartung erschwerte.

Beim Sportclub hat die Fa. Solo eine Datenerfassung der internen Motordaten nachgerüstet und überträgt die Daten per GSM-Modem. Über das Internet hat badenova jetzt Zugriff auf die beiden Motoren. In der Wachtfelsschule Kolbingen ist dieser Zugriff über Internet noch nicht realisiert.

Die Analyse und Betriebsüberwachung wurde dadurch wesentlich erleichtert, ein Quittieren der Störungen ist aber weiterhin von der Ferne aus nicht möglich.

Die Motoren gaben für Störungen gewisse Codes raus. Diese Codes konnten zahlreiche Störungsursachen bedeuten und waren zu wenig differenziert. Die Fa. Solo hat daraufhin mehr Störungs\_codes zur genaueren Eingrenzung der Fehler eingerichtet.

## 4.6 Abwärme

Die Stirlingmotoren verfügen über eine ungedämmte Brennkammer und einen luftgekühlten Generator, was zu einer erheblichen Abwärmeleistung im Gehäuse führte. In diesem Gehäuse ist auch der Schaltschrank mit der Regelungselektronik installiert, die bei den hohen Temperaturen Schaden nahm. Durch eine konstruktive Änderung wurde die Durchlüftung und damit Kühlung des Schaltschranks geringfügig verbessert.

Die hohe Abwärme verursachte besonders in dem relativ kleinen Aufstellraum beim Sportclub sehr hohe Raumtemperaturen. In die Außenwand des Raumes wurde ein mechanischer Lüfter nachgerüstet, der über ein Raumthermostat angesteuert wird und für eine bessere Durchlüftung sorgt.

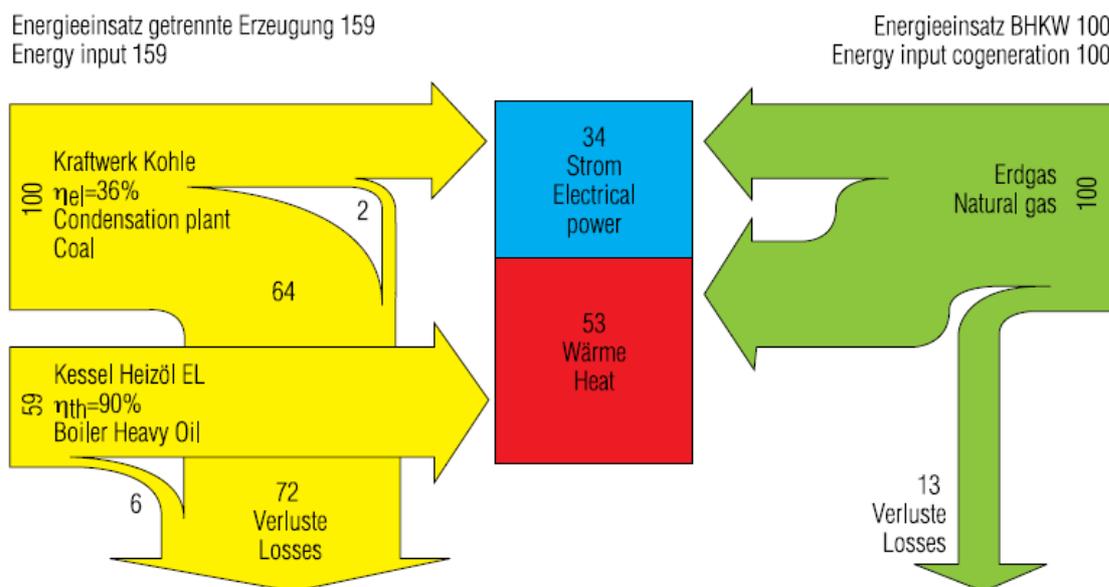
## 5 Reduzierungspotenzial von Klima schädigenden Stoffen und Luftschadstoffen

### 5.1 Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission

Die reine Stromerzeugung in Kraftwerken erreicht Wirkungsgrade von durchschnittlich 36 %. Beim Stromtransport zum Verbraucher entstehen zusätzliche Verluste in Höhe von ca. 2 %, d. h. nur 34 % des eingesetzten Brennstoffes kommen als elektrische Energie beim Endverbraucher an.

Ein Heizkessel arbeitet mit einem Jahresnutzungsgrad von etwa 90 %, d. h. 10 % der Energie gehen ungenutzt verloren, im Wesentlichen über das Abgas.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird die Wärme des Motors während der Stromerzeugung zu Heizzwecken genutzt. Moderne KWK-Anlagen erreichen Nutzungsgrade von 85 bis 90 % (im folgende Diagramm 87%). Die Anlagen stehen dezentral vor Ort, wodurch der Verlust der Stromübertragung entfällt.



Um 34 Einheiten Strom und 53 Einheiten Wärme zu erzeugen müssen in der KWK-Anlage 100 Einheiten Primärenergie eingesetzt werden. Bei der getrennten Strom- und Wärmeproduktion

hingegen sind es 159 Einheiten, wodurch die deutliche Primärenergieeinsparung der KWK ersichtlich wird.

Der hohe Verbrauch an Primärenergie und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emission entsteht bei der Stromerzeugung. Je höher also bei der KWK der elektrische Wirkungsgrad ist, desto höher ist die Primärenergieeinsparung.

Durch die Brennwertnutzung haben die Stirlingmotoren zwar laut Hersteller einen etwas höheren Gesamtwirkungsgrad als herkömmliche BHKWs (92 % anstatt 87 %), durch den geringeren elektrischen Wirkungsgrad der Stirlingmotoren reduziert sich jedoch die gesamte Primärenergieeinsparung etwas (siehe folgendes Schaubild).



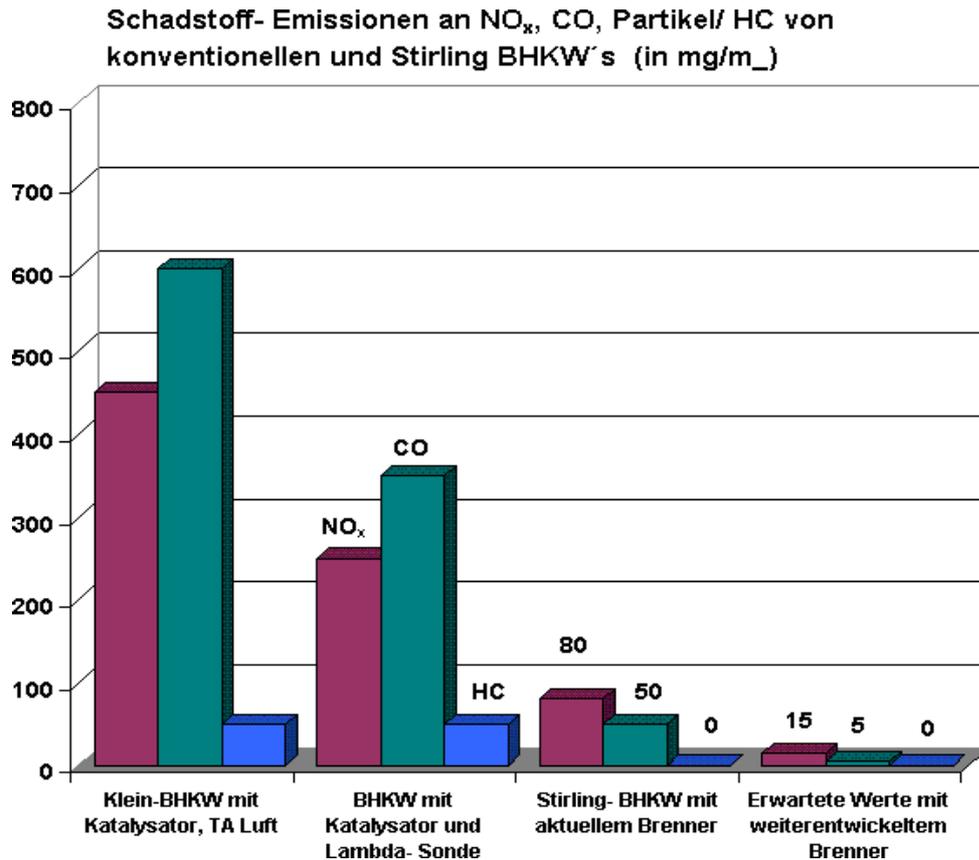
Energieeinsparung durch KWK mit Stirlingmotor

## 5.2 Reduzierung der Emission von Luftschadstoffen

Ein wesentlicher Unterschied des Stirlingmotors zum Otto- und Dieselmotor ist die externe Verbrennung. Bei Otto- und Dieselmotoren findet die Verbrennung explosionsartig im Kolbenraum statt, was eine Kontrolle hinsichtlich optimaler Verbrennung erschwert. Da die kontinuierliche Verbrennung in der Brennkammer des Stirlingmotors wesentlich sauberer realisiert werden kann als dies bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren möglich ist, liegen die Schadstoffemissionen deutlich unter denen vergleichbarer konventioneller KWK-Anlagen.

Bei einem Klein-BHKW liegt die Emission von NO<sub>x</sub> bei ca. 450 mg/m<sup>3</sup> und die von CO bei 590 mg/m<sup>3</sup>, im Vergleich hierzu sind beim Stirling-Motor die NO<sub>x</sub>-Werte bei 80 mg/m<sup>3</sup> und die CO-Werte bei 50 mg/m<sup>3</sup>. Es werden laut SOLO künftig sogar noch niedrigere Emissionswerte erwartet.

Eine Abgasmessung und genau Analyse wurde im Betrieb nicht vorgenommen. Die o. g. Werte sind Herstellerangaben.



## 6 Wirtschaftliches Ergebnis

### 6.1 Grundlagen der Berechnung

Die detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurde nur bei der Anlage beim Sportclub durchgeführt, da dort mehr Messergebnisse vorlagen. In der Wachtfelsschule dürfte das Ergebnis aber ähnlich sein.

Die Berechnung des Ergebnisses erfolgt nach folgender Formel:

$$\text{Ergebnis} = \left( \text{Betriebsaufwand} + \text{Anlagenkosten} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\text{Zinssatz}}{100}\right)^{\text{Abschreibungszeit}} \cdot \frac{\text{Zinssatz}}{100}}{\left(1 + \frac{\text{Zinssatz}}{100}\right)^{\text{Abschreibungszeit}} - 1} \right) \cdot \text{Betrachtungszeitraum [a]} - (\text{Erdgaskosten} - \text{Mineralölsteuer}) \cdot \text{Erdgasverbrauch} \\
 + \text{Stromerzeugung} \cdot \text{Stromvergütung} + \text{Wärmeerzeugung} \cdot \text{Wärmevergütung} \\
 - \text{Wartungskosten/h} \cdot \text{Betriebsstunden}$$

Die Abschreibung erfolgt nach der Annuitätenmethode. Es wurde ein Zinssatz von 6 % sowie eine Abschreibungsdauer von 12 Jahren gewählt. Die Kosten für die Investition enthalten die Motoren (38.800 €), den Pufferspeicher (3.400 €), die Schornsteinanlage (4.500 €), die Heizungs- und Sanitärinstallation (10.400 €), die Elektroinstallation (9.100 €) sowie die Mess-

und Regelungstechnik (5.300 €). Die Planungsleistungen bleiben unberücksichtigt, da sie hier aufgrund der Komplexität der Anlage überdurchschnittlich hoch waren. Beim üblichen Einsatz im Mehrfamilienhaus ist wahrscheinlich für die Motoren kein separater Planer erforderlich. Die Anlage kann vom Heizungsbauer konzipiert werden. In der Summe erhält man somit Investitionskosten in Höhe von 71.500 €.

Die Kosten des gesamten Projektes waren deutlich höher, was aber mit dem gläsernen Aufstellraum, des komplexen Monitoringsystems, der intensiven Betreuung, etc. zusammen hing. Bei üblichen Projekten fallen diese Kosten nicht oder nicht in dieser Höhe an und wurden weggelassen, da sie das Ergebnis verfälschen würden.

Für die Ermittlung der Stromvergütung sind die Werte für eine Anlage kleiner 50 kW und einer Inbetriebnahme nach dem 31.03.2002 zu wählen. Die Stromvergütung setzt sich demnach aus dem KWK-Index bei der EEX (European Energy Exchange) in Höhe von 4,467 Cent/kWh, dem Entgelt für vermiedene Netznutzung in Höhe von 0,25 Cent/kWh sowie dem KWK-Zuschlag in Höhe von 5,11 Cent/kWh zusammen. Die Vergütung beträgt somit 9,827 Cent/kWh.

Die Vergütung der produzierten Wärme erfolgt gemäß dem aktuellen Wärmepreis von badenovaWÄRMEPLUS. Es wird hier nicht zwischen der Wärme aus dem Stirlingmotor und der Wärme aus den Heizkesseln unterschieden. Der Kunde hat demnach durch den Nichtbetrieb der Stirlingmotoren keinen Nachteil, da er zum gleichen Preis die Wärme aus den Heizkesseln beziehen kann. Beide Anlagen sind natürlich redundant ausgeführt, d. h. der erforderliche Wärmeleistungsbedarf kann auch ohne Motoren ausschließlich durch die Kesselanlage gedeckt werden.

Die Wartungskosten von 14 Cent pro Betriebsstunde wurden von der Firma Solo angegeben, ein konkreter Wartungsvertrag wurde aber nie vorgelegt. Der Betriebsaufwand wurde mit 80 h/Jahr angesetzt, was im Moment nicht ausreichend ist, bei einem Betrieb von Klein-BHKWs aber genügen muss.

## 6.2 Betriebsergebnis

Im Folgenden wurde das wirtschaftliche Betriebsergebnis für die Monate Oktober, November und Dezember 2006 ermittelt.

Betriebsergebnis		Oktober	2006
Investitionskosten:	71.500 €		
Abschreibungszeit:	12 Jahre		
Zinssatz:	6,00%		
Stromgewinn:	4.768 kWh <sub>el</sub>	Vergütung Strom:	0,0983 € / kWh <sub>el</sub>
Stromverbrauch:	0 kWh <sub>el</sub>	Stromkosten:	0,0000 € / kWh <sub>el</sub>
Erdgasverbrauch:	24.588 kWh <sub>Ho</sub>	Erdgaskosten:	0,0452 € / kWh <sub>Ho</sub>
erzeugte Wärmemenge:	13.443 kWh <sub>th</sub>	Vergütung Wärme:	0,0499 € / kWh <sub>th</sub>
Wartungskosten pro Betriebsstd.:	0,14 €	Betriebsaufwand:	80 h / a
Rückerstattung Mineralölsteuer:	5,50 € / MWh <sub>Ho</sub>		43,00 € / h
<b>Monatsergebnis:</b>	<b>-975,90 €</b>		
<b>Monatsleistungszahl:</b>	<b>78,10%</b>	el. Leistungszahl:	20,45%
		th. Leistungszahl:	57,65%
<b>Betriebsstunden:</b> Motor 1		731 Std.	
Motor 2		268 Std.	

Betriebsergebnis		November	2006
Investitionskosten:	71.500 €		
Abschreibungszeit:	12 Jahre		
Zinssatz:	6,00%		
Stromgewinn:	5.537 kWh <sub>el</sub>	Vergütung Strom:	0,0983 € / kWh <sub>el</sub>
Stromverbrauch:	0 kWh <sub>el</sub>	Stromkosten:	0,0000 € / kWh <sub>el</sub>
Erdgasverbrauch:	29.987 kWh <sub>Ho</sub>	Erdgaskosten:	0,0452 € / kWh <sub>Ho</sub>
erzeugte Wärmemenge:	16.741 kWh <sub>th</sub>	Vergütung Wärme:	0,0499 € / kWh <sub>th</sub>
Wartungskosten pro Betriebsstd.:	0,14 € / h	Betriebsaufwand:	80 h / a
Rückerstattung Mineralölsteuer:	5,50 € / MWh <sub>Ho</sub>		43,00 € / h
<b>Monatsergebnis:</b>	<b>-979,52 €</b>		
<b>Monatsleistungszahl:</b>	<b>79,81%</b>	el. Leistungszahl:	19,83%
		th. Leistungszahl:	59,97%
<b>Betriebsstunden:</b> Motor 1		676 Std.	
Motor 2		530 Std.	

Betriebsergebnis Dezember 2006			
Investitionskosten:	71.500 €		
Abschreibungszeit:	12 Jahre		
Zinssatz:	6,00%		
Stromgewinn:	7880 kWh <sub>el</sub>	Vergütung Strom:	0,0983 € / kWh <sub>el</sub>
Stromverbrauch:	0 kWh <sub>el</sub>	Strompreis:	0,0000 € / kWh <sub>el</sub>
Erdgasverbrauch:	42050 kWh <sub>Ho</sub>	Erdgaspreis:	0,0452 € / kWh <sub>Ho</sub>
erzeugte Wärmemenge:	23340 kWh <sub>th</sub>	Vergütung Wärme:	0,0499 € / kWh <sub>th</sub>
Wartungskosten pro Betriebsstd.:	0,14 € / h	Betriebsaufwand:	80 h / a
Rückerstattung Mineralölsteuer:	5,50 € / MWh <sub>Ho</sub>		43,00 € / h
<b>Monatsergebnis:</b>	<b>-906,13 €</b>	el. Leistungszahl:	20,75%
<b>Monatsleistungszahl:</b>	<b>82,22%</b>	th. Leistungszahl:	61,47%
<b>Betriebsstunden:</b> Motor 1	650 Std.		
Motor 2	576 Std.		

Eine zu beachtende Randbedingung ist, dass der November nur 30 Tage und somit einen Tag weniger als die beiden anderen Monate hat. Dies hebt schon die Gewichtung der Fixkosten im Monatsergebnis.

Die Summe der Betriebsstunden beider Stirlingmotoren weist mit 1.000 Stunden im Oktober, 1.200 Stunden im November und 1.225 Stunden im Dezember noch nicht auf einen Anstieg des Monatsergebnisses hin. Die Leistungszahl im Dezember ist mit 82 % im Gegensatz zu 78 % im Oktober bzw. 80 % in November besser. Diese Erhöhung rührt von einer niedrigeren Temperaturpaarung her. Die Temperaturspreizung war im Dezember höher, was den höheren Verbrauch und die höhere elektrische Leistungszahl erklärt.

Eine Verschiebung innerhalb der Leistungszahl von der thermischen auf die elektrische Seite wirkt sich positiv auf das Monatsergebnis aus. Das Ergebnis hängt somit, wie bei allen BHKW, stark von der elektrischen Leistungszahl ab. Diese ist maßgeblich für das Erreichen der Wirtschaftlichkeit.

Hier ist anzumerken, dass die im Betrieb ermittelte elektrische Leistungszahl mit 20 % ca. 4 Prozentpunkte unterhalb den Herstellerangaben liegt und im Vergleich zu Verbrennungsmotoren generell bei Stirlingmotoren geringer ist. Ein Verbrennungsmotor dieser Leistungsklasse erreicht eine elektrische Leistungszahl von 25 - 30 %. Große BHKWs erreichen bis zu 40 %, Brennstoffzellen bis zu 55 %.

Um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen, müssen außerdem die Investitionskosten gesenkt werden. Eine Sensitivitätsanalyse hat ergeben, dass der Stirlingmotor bei realen Bedingungen unter einem Anlagenpreis von 18.800 € wirtschaftlich zu betreiben ist. Das Problem der zu hohen Investitionskosten beschränkt sich jedoch keineswegs nur auf Stirlingmotoren sondern betrifft sämtliche Klein-BHKWs. Für große Blockheizkraftwerke liegen die spezifischen Investitionskosten pro kW elektrischer Leistung zwischen 1.000 €/kW<sub>el</sub> und 1.200 €/kW<sub>el</sub>. Im vorliegenden Fall des Stirlingmotors sind diese spezifischen Kosten mit 4.800 €/kWh<sub>el</sub> vier mal so hoch.

## 7 Beispielwirkung

### 7.1 Folgeprojekt mit der gleichen Technologie

badenovaWÄRMEPLUS hat beim Sportclub Freiburg und in der Wachtfelsschule die ersten Stirlingmotoren im südbadischen Raum installiert. Ein weiterer Stirlingmotor wurde in der Richard-Fehrenbach-Gewerbeschule in einem Schulungsraum für innovative Heizungstechnik neben zwei BHKWs mit Gas-Ottomotoren und einem Pellets- und Hackschnitzelkessel installiert.

In einer Schule in Villingendorf wurde ebenfalls ein Stirlingmotor mit finanzieller Unterstützung durch den badenova Innovationsfonds installiert. badenovaWÄRMEPLUS war bei der Konzeption auch beratend tätig.

Es gab ein großes Interesse an den Stirlingmotoren und viele Heizungsbauer und Kunden, die beim Bau ihres Hauses auf der Suche nach innovativer Kraft-Wärme-Kopplung waren, haben sich die Anlagen angeschaut. Es wurden daraufhin mehrere Stirlingmotoren der Fa. Solo Stirling GmbH bei verschiedenen Objekten eingebaut.

### 7.2 Folgeprojekte mit Stirlingmotoren anderen Hersteller

Es gab ein Projekt mit einem Pellet-Stirlingmotor der Fa. Sunmaschine, die jetzt laut Hersteller vor der Markteinführung steht. Die Fa. Sunmaschine bringt künftig auch einen Erdgas-Stirlingmotor auf den Markt.

Ferner steht der Erdgas-Stirlingmotor der Fa. WhisperGen vor der Markteinführung und wird von badenova im Rahmen eines Feldtestes unterstützt.

### 7.3 Übertragung der Ergebnisse auf andere Technologien

badenovaWÄRMEPLUS hat durch die beiden Projekte viel Erfahrung mit Stirlingmotoren gesammelt. Die generellen Erkenntnisse aus dem Projekt, wie z. B. der Einfluss der Vor- und Rücklaufftemperatur, die Probleme beim Takten der Motoren, die Wichtigkeit des elektrischen Wirkungsgrades für die Wirtschaftlichkeit, die Probleme mit der Leistungsmodulation und dem Teillastbetrieb, etc. waren den badenova-Ingenieuren aus dem Betrieb anderer BHKWs bereits bekannt. Die Erfahrungen wurde einmal mehr bestätigt.

Im Rahmen des PeStiS-Projektes haben zahlreiche Hersteller unter der Federführung des Fraunhofer ISE versucht einen Pellet-Stirlingmotor zu entwickeln. Bei dieser Entwicklung hat badenovaWÄRMEPLUS ebenfalls mitgewirkt und würde ein Modul im Feldtest einsetzen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist jedoch kein funktionierendes Modul verfügbar.

## 8 Öffentlichkeitsarbeit

### 8.1 Pressearbeit

Am 24.02.2005 wurde eine Pressekonferenz zum Thema Stirlingmotoren beim Sportclub einberufen. Die Konferenz fand vor der üblichen Sport-Pressekonferenz vor Heimspielen statt, was zur Folge hatte, dass sehr viele Vertreter der Presse anwesend waren.

Es wurde mehrmals in der Badischen Zeitung berichtet. Es folgten Artikel im Südkurier, der Zeitschrift Chilli, im Bundesligamagazin in der badenova-Zeitung EnergieFakt, in der Sportclub-Zeitung Anpfiß, in der fesa-Zeitschrift SolarRegion, ein Lesebrief in der Zeitschrift neue Energie und sogar im Spiegel.



Spiegel, 27.11.2006

### 8.2 Präsentation im Internet

Die halbjährlich erstellten Zwischenberichte für den Innovationsfonds wurde auf der Homepage der badenova veröffentlicht.

In das badenova-Internet-Spiel „K(l)ick Dich ins Stadion“ für Schüler wurden Informationen und Fragen zum Thema Stirlingmotor integriert. Schüler konnten diese Fragen online recherchieren und beantworten und einen Preis gewinnen.

Auf der Homepage der Stadt Freiburg wurde ein Link zur Seite [www.energie-cites.org/cogen-challenge/](http://www.energie-cites.org/cogen-challenge/) eingerichtet, einer Seite der europäischen Informationskampagne für Klein-BHKWs. Wenn unter dem Menü Showcase das Land Deutschland und die BHKW Technik Stirlingmotor gewählt wird, kommt man zur Infoseite der Anlage beim Sportclub Freiburg.



**COGENchallenge**  
Die Europäische Informationskampagne für Klein-BHKWs

Intelligent Energy Europe

[Home](#) [About](#) [Participate](#) [Tools & Support](#) [Showcase](#) [Contact](#) [Sitemap](#)

[Zur Datenbank](#) [Jetzt registrieren!](#) [Login](#)

Bereits 1303 Klein-BHKWs europäischer Städte wurden in die Datenbank integriert. **COGENchallenge**.  
Bitte wählen Sie hier Kriterien aus, um mehr zu erfahren.

Land	<input type="text" value="Deutschland"/>
Gebäudetyp	<input type="text" value="----"/>
BHKW Technik	<input type="text" value="Stirling-Motor"/>
Elektrische Leistung	<input type="text" value="----"/>
Brennstoff	<input type="text" value="----"/>
Contracting	<input type="radio"/> Ja <input type="radio"/> Nein
<input type="button" value="SENDEN"/>	
<input type="button" value="ZURÜCKSETZEN"/>	

Entwicklung der Datenbank © Energie-Cities 2006

Homepage COGENchallenge mit der Präsentation der Stirlingmotoren beim Sportclub Freiburg

### 8.3 Führungen und Vorträge

Es wurden zahlreiche Führungen für Handwerker, interessierte Bauherrn, Schulklassen, Betreiber anderer Fußballstadien, verschiedene Bürgermeister und Gemeinderäte, badenova-Azubis, Ingenieurbüros und für Vertreter der Presse gemacht. Beim Fraunhofer ISE wurde ein Vortrag über die Erfahrungen mit dem Betrieb von Stirlingmotoren gehalten.



Badische Zeitung Ferienaktion 2007, vor den Stirlingmotoren beim Sportclub Freiburg



Ferienpass 2008, Schüler vor den Stirlingmotoren beim Sportclub Freiburg



Herr Andreas Bornemann (ehemaliger Manager des SC Freiburg) bei den Stirlingmotoren

### 8.4 Anzeigetafel und Infotafeln

Bei beiden Anlagen wurde eine elektronische Anzeigetafel installiert, die die aktuelle elektrische und thermische Leistung, sowie die jährliche erzeugte Strom- und Wärmemenge anzeigt. Die Anzeigetafeln erhalten immer die aktuellen Daten von der Gebäudeleittechnik.

In Kolbingen wurde die Tafel in der Aula der Schule und beim Sportclub Freiburg von außen gut sichtbar im Innenraum des gläsernen Heizraumes angebracht.

Beim Sportclub wurden vor dem Heizraum zusätzlich vier Infotafeln mit den technischen Daten des Stirlingmotors, der Erklärung der Kraft-Wärme-Kopplung, der Beschreibung der Vorteile des Stirlingmotors und einem Hinweis auf die Fördergeber Innovationsfonds und Wirtschaftsministerium angebracht.



Anzeigetafel und Infotafeln beim Sportclub Freiburg



Anzeigetafel in der Wachtfelsschule Kolbingen

## 8.5 Referenzblätter und Flyer

Für den Innovationsfonds wurde ein zweiseitiges Referenzblatt von dem Projekt erstellt. Dieses Referenzblatt wird zusammen mit der Innovationsfonds-Broschüre, in der das Projekt auch erwähnt ist, verteilt.

Ferner wurde ein Flyer mit den wesentlichen Daten und Information als Faltblatt erstellt. Der Flyer wird bei Führungen verteilt und liegt im Foyer der badenova-Hauptverwaltung in Freiburg und den Servicestellen in Lörrach, Offenburg, Breisach und Tuttlingen aus.

Auf der letzten Seite ist ein Hinweis auf die beiden Fördergeber Wirtschaftsministerium und Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova enthalten



## 8.6 Teilname an Wettbewerben

Im Wettbewerb „Deutschland – Land der Ideen“, aus Anlass der Fußballweltmeisterschaft im letzten Jahr von Bundespräsident Horst Köhler gestartet, wurde das badenova-Stadion unter 1.500 Bewerbungen zu einem der Siegerorte gekürt. Grund für die Auszeichnung ist das innovative Energiekonzept bestehend aus großen Fotovoltaikanlagen, thermischer Solaranlage und Kraft-Wärme-Kopplung mittels Stirlingmotoren.

Vor wenigen Tagen erst war das solare „Badenova-Stadion“ als „Ort der Ideen“ im gleichnamigen Wettbewerb ausgezeichnet. Sein Energiekonzept sei bundesweit einzigartig und mustergültig, hieß es in der Begründung der Juroren, die nicht nur die Sonnenkollektoren auf dem Dach lobten. Mit dem Einbau von Stirlingmotoren im Stadion wurde eine innovative Konzeption für eine Rasenheizung verwirklicht. Die grünen Kraftwerksanlagen erzeugen mehr Strom als im Stadion verbraucht wird.

Auszug aus Presseartikel: Südkurier 11.04.2007

Im Jahr 2006 wurde das Projekt unter dem Titel „Stirlingmotoren zur Kraft-Wärme-Kopplung in einem Fußballstadion“ beim Innovationspreis der deutschen Gaswirtschaft vorgestellt. Die Jury-Mitglieder besuchten daraufhin die Anlage. Leider ist das Projekt aber nicht unter die Preisträger und Auszeichnungen gekommen.

## 9 Zusammenfassung

Die geplanten Leistungsdaten konnten nicht erreicht werden. Auf die Probleme im Betrieb und bei der Wirtschaftlichkeit wurde bereits ausführlich eingegangen. Eines der Hauptprobleme war die Störanfälligkeit. Ein Dauerbetrieb hat sich leider nie eingestellt und es waren sehr viele Einsätze der Monteure von Solo und badenovaWÄRMEPLUS erforderlich.

Alle Motoren laufen nach wie vor mit einem reduzierten Maschinendruck von 70 bis 100 bar, was einer thermischen Leistung von max. 17 kW und einer elektrischen Leistung von max. 6 kW entspricht.

Der Gesamtwirkungsgrad konnte durch die lange Laufzeit in den Wintermonaten auf 82 % erhöht werden. Der vom Hersteller angegebene Wirkungsgrad von 92 bis 96 % konnte jedoch nicht erreicht werden. Der elektrische Wirkungsgrad lag bei 20 %, der thermische Wirkungsgrad bei 62 %.

Eine Erhöhung der Motorleistung ist im Moment nicht möglich, wäre aber zur Verbesserung des wirtschaftlichen Ergebnisses zwingen erforderlich. Es hat sich gezeigt, dass die Einfachheit der Hydraulik und der Regelung der Anlage in der Wachtfelsschule Kolbingen sich positiv auf den Betrieb der Anlagen ausgewirkt.

Am 19.04.2007 hat die Fa. Solo Stirling GmbH beim Amtsgericht Stuttgart den Insolvenzantrag eingereicht. Die Fa. Stirling Systems GmbH aus Schaffhausen in der Schweiz hat die Fa. Solo Stirling GmbH übernommen und badenovaWÄRMEPLUS ein Wartungsangebot unterbreitet. Die Motoren wurden daraufhin gewartet und konnten wieder in Betrieb genommen werden.

Am 17.10.2007 hat die Fa. Solo Systems GmbH das Wartungsangebot wieder zurück gezogen, da auch diese Firma wirtschaftliche Probleme hat und die Wartung nicht mehr durchführen kann. Die Produktion und Wartung bei Solo Systems GmbH wurde komplett eingestellt.

Es ist gelungen, die Wartung noch mal von einem ehemaligen Monteur der Fa. Solo durchführen zu lassen. Die Kosten mussten aber in voller Höhe von badenovaWÄRMEPLUS getragen werden und auch diese Wartung zeigt nicht die erforderliche Nachhaltigkeit. Im Moment sind bestimmte Ersatzteile nicht mehr verfügbar.

Beim Sportclub Freiburg wurde erneut eine Wartung durchgeführt und es wurden erforderliche Ersatzteile von einem Stirlingmotor aus- und beim anderen eingebaut. Im Moment ist dort noch ein Motor in Betrieb. Der Stirlingmotor in der Wachtfelsschule Kolbingen ist im Moment außer Betrieb.

In der Wachtfelsschule in Kolbingen soll der Stirlingmotor durch ein herkömmliches Klein-BHKW ersetzt werden und es wurde bereits ein Angebot beim örtlichen Heizungsinstallateur angefordert. Beim Sportclub ist ebenfalls der Austausch der Motoren geplant.

Bei badenova sind weiterhin Projekte mit Stirlingmotoren der Fa. WhisperGen und eventuell auch der Fa. Sunmachine, die mit Pellets betrieben werden, geplant.