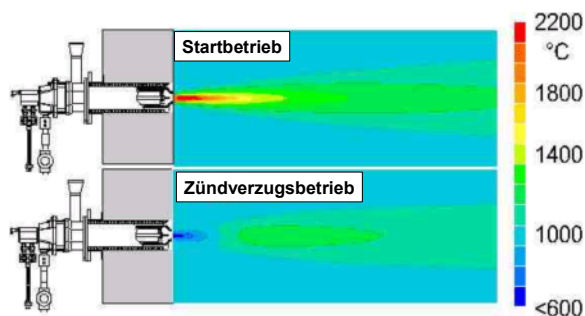
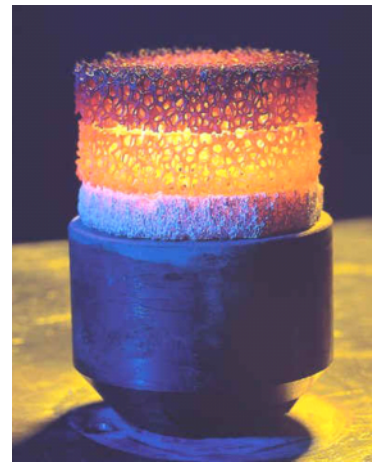
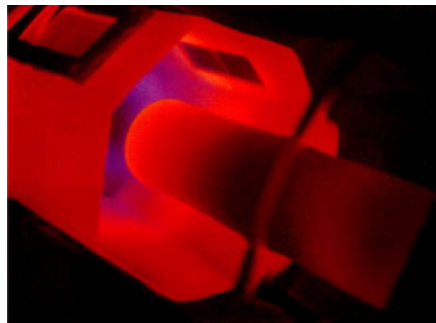


# Projekt Sticore: Schlussbericht BfE

## Brennerentwicklung Öl & Gas

Stand Ende 2005



Andreas Schlegel

Zürich, 28. Feb. 2006

## Impressum

Auftraggeber Bundesamt für Energie, BfE  
Dr. A. Hintermann  
3003 Bern

Projekt:  
TP 6322  
Konto Nr.: 60100900  
Projekt Nr.: 101299  
Verfügung Nr.: 151554  
ID-Nr.: 003756364

Auftragnehmer awtec AG  
Leutschenbachstr. 48  
CH-8050 Zürich

Tel. 044 307 40 60  
Fax 044 307 40 61  
Email: [info@awtec.ch](mailto:info@awtec.ch)

Verfasser A. Schlegel

Verteiler

- Stirling Systems AG
- BfE, Hr. Hintermann

Weitere Berichte desselben  
Projektes

Versionen Version 1: 28. Feb. 2006  
Version 2:

Korreferat Jochen Ganz

Datum Visum  
28. Feb. 2006



P-04-14c\_StC-Brenner/  
Schlussbericht BfE\_Brennerentwicklung Oel&Gas, Stand Ende 2005.doc

## Zusammenfassung

Dieser Bericht fasst den aktuellen Stand Ende 2005 im Sticore-Teilprojekt "Brennerentwicklung Öl&Gas" zusammen. Die Vorgabe aus dem Gesamtprojekt ist, eine Stirling-Maschine für den Betrieb mit Erdgas **und** Heizöl zu entwickeln.

**Aktueller Stand  
Ende 2005**

In einer ersten Phase wurde eine breite Suche nach möglichen Brenner-Technologien, welche die sehr spezifischen Anforderungen für den Einsatz bei Stirling-Motoren erfüllen können, durchgeführt. Die möglichen Kandidaten wurden anschliessend einem "Grob-Screening" unterzogen, und es resultierten drei potentiell interessante Brennersysteme:

**Screening ergibt  
drei potentielle  
Brennersysteme**

- Der FLOX-Brenner (WS-Wärmeprozessstechnik; dieser Brenner wird bereits auf der Take5-Feldtestmaschine eingesetzt)
- Der Porenbrenner (LSTM Erlangen)
- Der Vorverdampfungsbrenner (OWI Aachen)

Diese Brennersysteme wurden einer detaillierten Konzeptstudie in Zusammenarbeit mit dem OWI unterzogen. Dabei hat der Vorverdampfungsbrenner die beste Bewertung erhalten, dicht gefolgt vom Porenbrenner.

**Konzeptstudie  
mit Favorit:  
VVD-Brenner**

Aufgrund dieser Resultate wurden zwei Entwicklungsprojekte gestartet (Vorverdampfungsbrenner und Porenbrenner). Der FLOX-Brenner hat am schlechtesten abgeschnitten und wird deshalb nicht mehr weiterverfolgt.

**Zwei parallele  
Entwicklungs-  
projekte ...**

Die awtec-internen Arbeiten umfassten unter anderem auch die Entwicklung eines detaillierten Excel-Tools zur Berechnung der Thermodynamik des Brenners und des Systems Brenner/Stirling. Dieses Tool gibt wichtige Hinweise für die Dimensionierung und die Konstruktion des Brenners.

**... sowie  
umfangreiche  
interne Arbeiten**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen: Brenner für Stirling-Maschinen .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchung verschiedener Brennerkonzepte .....</b>	<b>8</b>
2.1	Bewertungskriterien .....	8
2.2	"Screening" Brenner-Systeme.....	9
2.2.1	FLOX-Brenner (auf SIG-Prototyp).....	9
2.2.2	Porenbrenner, LSTM Erlangen .....	11
2.2.3	Vorverdampfungsbrenner, OWI .....	12
2.2.4	Rotrixbrenner, ALSTOM/Viessmann .....	14
2.2.5	Weitere Technologien .....	15
2.3	Vertiefte Konzeptstudie OWI .....	17
2.3.1	Zusammenfassung (aus [9]).....	17
2.3.2	Kommentar awtec .....	18
2.4	Folgerung und weiteres Vorgehen .....	19
<b>3</b>	<b>Entwicklungsprojekt Vorverdampfungsbrenner .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Entwicklungsprojekt Porenbrenner .....</b>	<b>21</b>

## Anhang

<b>A1. Thermodynamik des Brenners .....</b>	<b>22</b>
A1.1. Betrachtetes System .....	22
A1.2. Gleichungen zur Verbrennungsrechnung.....	23
A1.3. Behandlung der Wärmeverluste an die Umgebung .....	25
A1.3.1 Wärmeabgabe eines warmen Zylinders.....	25
A1.4. Berechnungsbeispiele (Excel-Tool).....	26
A1.4.1 Rekuperator.....	26
A1.4.2 Wärmeverluste an die Umgebung.....	28
<b>A2. Nomenklatur .....</b>	<b>30</b>
<b>A3. Bestätigung Projektstand OWI .....</b>	<b>31</b>
<b>A4. Bibliographie .....</b>	<b>32</b>

# 1 Grundlagen: Brenner für Stirling-Maschinen

Stirling-Maschinen sind Wärme-Kraft-Maschinen, welche Wärme (aus einer beliebigen Quelle) in mechanische Arbeit bzw. Strom umwandeln (Blockheizkraftwerk = BHKW, bei gleichzeitiger Nutzung der Abwärme). Der maximal erreichbare Wirkungsgrad ist dabei begrenzt durch den Carnot-Wirkungsgrad, d.h. durch das obere und untere Temperaturniveau des Prozesses. Aus materialtechnischen Gründen ist das obere Temperaturniveau im Stirling-Prozess auf ca. 700°C begrenzt.

**BHKW mit ca.  
700°C Prozess-  
temperatur**

Für den Fall, dass die Wärmeenergie für den Stirling von einem Verbrennungsprozess geliefert werden soll, muss der Wärmeübergang Gas-Stirling oberhalb der Stirling-Prozesstemperatur stattfinden, d.h. die Brennraumtemperatur muss sich deutlich oberhalb von 700°C befinden (700 - 1100°C) und entsprechend haben die Abgase nach dem Wärmeentzug noch eine Temperatur von mindestens 700°C.

**Hohe  
Restenergie im  
Abgas**

Um einen hohen elektrischen Wirkungsgrad (elektrische Nutzenergie / Brennstoffenergie) zu erreichen, muss die Restenergie im Abgas möglichst vollständig in einem Rekuperator zurückgewonnen und an die Zuluft des Brenners übertragen werden. Abgasverluste, welche nicht in den Brennprozess zurückgeführt werden, reduzieren den elektrischen Wirkungsgrad massiv (vgl. Kap. A1.4.1)<sup>1</sup>.

**Rekuperator ist  
zwingend für  
hohen W'grad**

Die möglichst vollständige Rekuperation von Abgasenergie stellt jedoch eine große Herausforderung bei der Auswahl einer geeigneten Brennertechnologie dar. Folgende Punkte müssen dabei berücksichtigt werden:

**Hohe Anforder-  
ungen an das  
Brennersystem!**

- Der Brenner muss mit hoher Verbrennungslufttemperatur zu betreiben sein, ohne dass es dabei zu einem deutlichen Anstieg der thermischen Stickoxid-Emission ( $\text{NO}_x$ ) infolge von Temperaturspitzen über 1500°C in der Flamme kommt. Als Zielgrößen gelten die für stationäre Verbrennung geltenden Grenzwerte (LRV in der Schweiz, Blauer Engel in Europa).
- Speziell bei Oelbrennern stellt sich zusätzlich das Problem, dass bei hohen Lufttemperaturen die Gemischaufbereitung sehr schnell erfolgen muss, da es ansonsten zu unerwünschter Rückzündung (flash-back) und/oder zu sehr hohen  $\text{NO}_x$ -Emissionen kommt.
- Der Stirling-Brenner muss auch kaltstart-fähig sein, d.h. er muss auch mit Null-Luftvorwärmung zuverlässig zünden und rasch in

---

<sup>1</sup> Die Resteenergie ist dann zwar nicht einfach verloren, sondern wird über einen Abgaswärmetauscher im Wasserkreislauf der Stirling-Maschine genutzt. Dies erhöht aber nur den Gesamt-Wirkungsgrad (bzw. den thermischen Wirkungsgrad), nicht aber den elektrischen Wirkungsgrad, um den es in erster Linie geht.

einen stationären Betriebspunkt gelangen (die zu beherrschenden Flammgeschwindigkeiten variieren sehr stark mit der Lufttemperatur). Die Kaltstart-Fähigkeit ist insbesondere für den Betrieb mit Oel eine grosse Herausforderung.

Zusätzlich zu den Anforderung bezüglich Rekuperator muss ein Brenner für den Einsatz auf einem Stirling-BHKW die folgenden, wesentlichen Bedingungen erfüllen:

**Weitere Bedingungen**

- Äusserst gute Isolation gegen aussen (vgl. Kap. A1.4.2). Wärmeverluste vom Brenner in das Stirling-Gehäuse können nur begrenzt über die Frischluft, die aus dem Gehäuse bezogen wird, zurückgewonnen werden.<sup>2</sup>
- Die Wärmeübertragung vom Brennraum in den Stirling-Prozess muss möglichst "optimal" erfolgen, d.h. mit möglichst wenig Wärmetauschervolumen auf Seiten des Stirling-Prozessgases (Totvolumen) und möglichst tiefen Abgastemperaturen beim Verlassen des Brennraums. Dabei ist immer zu beachten, dass die Materialtemperaturen des Stirling-Wärmetauschers (Erhitzerkopf) auf maximal 700°C begrenzt sind (Innendruck ca. 30bar Helium).

**Maximale Wärme-dämmung**

**"optimaler" Wärmeübergang mit tiefen Abgas-temperaturen**

Die Abgastemperatur beim Verlassen der Brennkammer sollte aus zwei Gründen möglichst tief sein (im theoretischen Idealfall gleich der Stirling-Prozesstemperatur):

**Tiefe Abgas-temperaturen ...**

- Je tiefer die Abgastemperatur, desto kleiner kann der Rekuperator dimensioniert werden (notwendige Wärmeübertragungsfläche für maximale Luftvorwärmung) und desto günstigere Materialien können eingesetzt werden (Preise von Hochtemperaturmaterialien!).
- Bei Verwendung von Oel als Brennstoff ist die maximale Luftvorwärmtemperatur für die Gemischaufbereitung auf ca. 650°C beschränkt.<sup>3</sup> Ist die Abgastemperatur wesentlich höher, muss der Rekuperator verkleinert werden (reduzierte Wärmerückgewinnung), was auf Kosten des elektrischen Wirkungsgrades geht.

**... kleinerer und billigerer Rekuperator ...**

**... keine W'grad-verluste beim Oelbrenner**

<sup>2</sup> Die Gehäuse-Innentemperatur sollte aus verschiedenen Gründen möglichst niedrig gehalten werden: Die Effizienz und Lebensdauer des Gebläses nehmen mit steigender Temperatur ab und die Wärmeverluste über die Gehäuse-Oberfläche nehmen zu.

<sup>3</sup> Vgl. oben: Die Selbstzündzeiten von Oel-Luftgemischen steigen exponentiell mit der Temperatur und werden oberhalb 650° so kurz, dass eine Zündung erfolgt, bevor ein homogenes Gemisch erreicht wird. Dies führt zu flash back (Rückzündung) und Zerstörung der Gemischeinrichtung sowie sehr hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen.

## 2 Untersuchung verschiedener Brennerkonzepte

In einer ersten Phase des Projektes wurde eine breit gefasste Suche ("Screening") nach potentiell interessanten Brenner-Technologien für den speziellen Einsatz in einem Stirling-BHKW durchgeführt. Aus diesen wurden die drei besten, ausgesucht und in einer detaillierten Konzeptstudie in Zusammenarbeit mit dem Oel-Wärme-Institut in Aachen (OWI) untersucht und bewertet [9].

**Grob-Screening  
und vertiefte  
Konzeptstudie**

### 2.1 Bewertungskriterien

Auf Grundlage des Pflichtenheftes wurde eine Bewertungsmatrix mit den relevanten Kriterien erarbeitet und diese jeweils mit einer Gewichtung (1 - 3) versehen.

**Bewertungs-  
matrix**

	Kriterium	Gewichtung	Wertebereich
1	Kosten	2	< 350 € (10000 Stk./a)
2	Steuerungsaufwand	1	1-3
3	Startzeit	3	< 15 min
4	Elektrische Leistung Start	2	< 650 W
5	Elektrische Leistung Betrieb	3	< 250 W
6	Lebensdauer	3	> 50.000 h
7	Wartungsintervall	3	> 5.000 h
8	Modulierbarkeit	2	> 1:2,5
10	Komplexität	2	1-3
11	Entwicklungsrisiko	3	1-3
12	Aufwand Umrüstung Erdgas/HEL	2	1-3
13	Thermischer Wirkungsgrad gasseitig siehe *)	2	> 0,7
14	Wärmeübergang an Stirling	3	1-3
15	Baugröße	2	1-3
16	Emissionen (Start)	2	< LRV
17	Emissionen (Stationär)	3	< LRV
*) $\eta = (Q(\text{Brennstoff}) - Q(\text{Abwärme})) / Q(\text{Brennstoff})$			

Tab. 1: Bewertungsmatrix zur Bewertung der Brennertechnologien für den Einsatz in einem Stirling-BHKW

Wichtig dabei ist, dass alle drei Technologien für den Betrieb mit Öl bewertet werden sollen, wobei als spezielles Kriterium die Eignung bzw. der Aufwand für den Betrieb mit Erdgas berücksichtigt wird (s. Tab. 1: "Aufwand Umrüstung Erdgas/HEL"). Eine Bewertung für den Betrieb mit Gas allein würde vermutlich eine andere Bewertung ergeben und unter

**Bewertung für  
den Betrieb mit  
Öl**



Umständen sogar die Rangfolge umstellen. awtec beurteilt aber die Entwicklung eines Ölbrenners für den speziellen Einsatz für Stirlingmotoren als wesentlich schwieriger als die Entwicklung eines Gasbrenners. Oder anders formuliert: "Wenn die Ölverbrennung funktioniert, kann auch Gas verbrannt werden".

Die Anforderungen des Gesamtprojektes verlangen den Betrieb des Stirling-Motors mit Gas **und** Öl; insofern muss bei der Bewertung der Betrieb mit beiden Brennstoffen bewertet werden. Die Entwicklung von zwei grundsätzlich verschiedenen Brennern sollte unbedingt verhindert werden, da dies nicht nur doppelte Entwicklungskosten verursacht, sondern auch in der Serieproduktion die Kosten erhöht.

**Projektvorgabe:**  
Betrieb mit Gas  
und Öl!

Details und Erläuterungen zur Bewertungsmatrix sind in der OWI-Konzeptstudie [9] zu finden. Patentrechtliche Kriterien sind in der Bewertungsmatrix nicht enthalten.

**Details sind in**  
der Konzept-  
studie zu finden

## 2.2 "Screening" Brenner-Systeme

Die folgenden Brenner-Technologien wurden einem ersten Screening unterzogen:

**Breite Suche**  
und Grob-  
Screening

- FLOX-Brenner, Firma WS Technik (der aktuelle SIG-Prototyp ist mit einem FLOX-Brenner HTC 20 ausgerüstet)
- Porenbrenner, LSTM Erlangen
- Vorverdampferbrenner, OWI Aachen
- Rotrixbrenner, ALSTOM/Vissmann
- Kalte-Flamme-Verdampfer
- Aerosolverdampfer, Tejatec/Schilling
- Öl-Rotationsverdampfer, Toby

### 2.2.1 FLOX-Brenner (auf SIG-Prototyp)

Der aktuelle Stirling-Prototyp, wie er von der SIG entwickelt wurde, ist mit einem FLOX-Brenner (Typ "HTC 20") der Firma WS-Wärmeprozessstechnik ausgerüstet. Die FLOX-Technologie ist in verschiedenen Publikationen hinreichend beschrieben ([1], [14], [15]). Sie ist durch mehrere Patente [2] geschützt und der Name "FLOX" ist eingetragenes Markenzeichen (WS-Wärmeprozessstechnik GmbH, [www.wsgmbh.de](http://www.wsgmbh.de), [www.flox.com](http://www.flox.com)).

**SIG-Prototyp mit**  
FLOX-Brenner

Das wesentliche Merkmal der FLOX-Brenner-Technologie ist die sehr hohe, interne Rezirkulation im Brennraum ( $r = 2 - 10$ ). Dadurch wird erreicht, dass die Verbrennung (Oxidation) nicht mehr in einer schmalen

**Rezirkulations-**  
**raten zwischen**  
 **$r = 2 - 10$**

Flammzone mit ausgeprägten Temperaturspitzen abläuft, sondern in einem ausgedehnten Volumen mit sehr homogener Temperaturverteilung. Bei gleichzeitigem Wärmeentzug aus der Brennkammer (Stirling-Erhitzerkopf) ergeben sich so sehr tiefe Brennraumtemperaturen zwischen 850 bis 1100°C und trotzdem stabile und vollständige Verbrennung. Die thermische NO<sub>x</sub>-Bildung ist bei diesen Temperaturen weitgehend unterbunden.

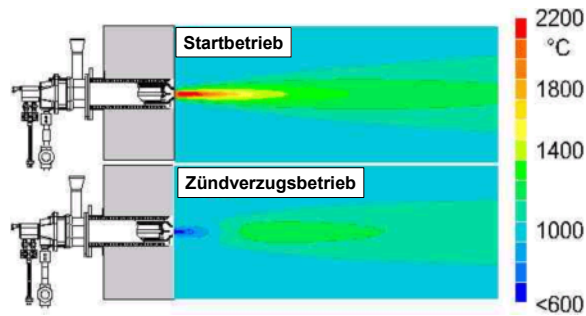


Abb. 1: Grafische Darstellung (CFD-Simulation) des Flox-Brenners im Start- und FLOX-Betrieb (Zündverzugsbetrieb). Wesentliches Merkmal ist die sehr flache Temperaturverteilung im FLOX-Betrieb, welche zu sehr tiefen NO<sub>x</sub>-Emissionen führt.

Bis zum Einsatz in den Feldtestmaschinen mussten einige technische Verbesserungen durchgeführt werden. Der Brenner funktioniert heute relativ zuverlässig; eine Aussage über die Langzeit-Stabilität kann aber noch nicht gemacht werden. Der Brenner ist insbesondere in Bezug auf den Rekuperator-Wirkungsgrad und die Wärmedämmung schon sehr weit optimiert; zudem ist bereits eine zusätzliche Abgaskühlung mit Heizwasser integriert.

**Heute mit  
hohem Ent-  
wicklungsstand**

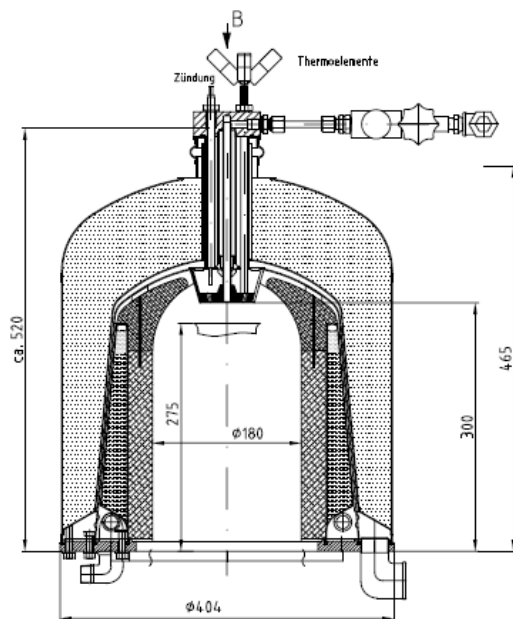


Abb. 2: Schnittzeichnung des FLOX-Brenners für die SIG-Feldtestmaschinen. Rekuperator und anschließende Abgaskühlung über den Heizkreislauf sind bereits integriert.

## Grobbewertung:

Der FLOX-Brenner weist im stationären Gas-Betrieb sehr tiefe Schadstoff-Emissionen auf (deutlich tiefer als die gesetzlichen Grenzwerte) und erfüllt die wesentlichen Kriterien gemäss Pflichtenheft. Die Start-Emissionen sind jedoch systembedingt hoch und es braucht sehr viel Zeit bis zum Erreichen des FLOX-Betriebes.

**Im Stationär-  
betrieb sehr  
tiefe Emissionen**

Das Gleichgewicht von Wärmeentzug und Rezirkulationsrate ist relativ empfindlich auf Störungen; das "Tuning" der Strömungsverhältnisse im Brennraum ist entsprechend aufwändig.

**Empfindlich auf  
Störungen**

Der FLOX-Brenner kann im aktuellen Design nicht mit Öl betrieben werden; es braucht dazu ein zusätzliches Öl-Verdampfer-Modul (welches noch zu entwickeln ist).

**Zusatzmodul für  
Ölbetrieb**

→ Die FLOX-Technologie wird der vertieften Konzeptstudie unterzogen (vgl. Kap. 2.3).

→ **Vertiefung!**

## 2.2.2 Porenbrenner, LSTM Erlangen

Die Porenbrenner-Technologie wurde vor ca. 15 Jahren erstmals untersucht und seither in verschiedensten Publikationen diskutiert (zum Beispiel [11], [12], [13]). Sie wurde immer wieder im Hinblick auf den Einsatz für Stirling-Motoren diskutiert; bisher wurden jedoch keine konkreten Entwicklungsprojekte gestartet. Die Porenbrenner-Technologie steht für den Einsatz in Strahlungsbrennern erstmals kurz vor der Markteinführung (Firma Gogas, [www.gogas.de](http://www.gogas.de)). Sie ist patentrechtlich von der Firma Promeos sehr gut geschützt ([www.promeos.com](http://www.promeos.com)).

**Porenbrenner  
ist eine relativ  
neue  
Technologie**

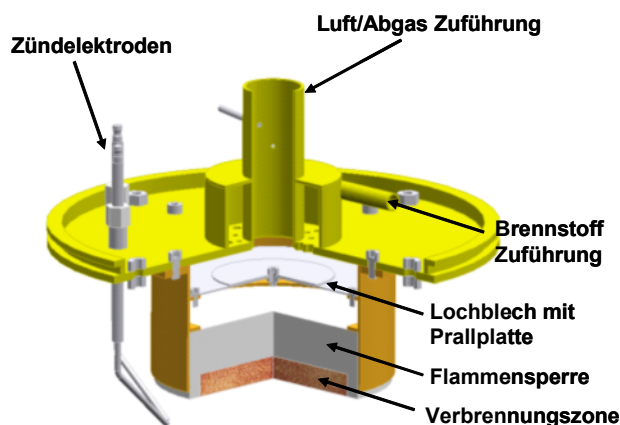


Abb. 3: Konstruktionszeichnung des Porenbrenners für den Einsatz auf der Stirling-Maschine. Rechts: Der Porenbrenner in Betrieb.

## Grobbewertung:

Der Porenbrenner bietet in Bezug auf den Einsatz im Stirling-Motor einige interessante Eigenschaften:

**Porenbrenner:  
Vorteile ...**

- Sehr tiefe Schadstoffemissionen (deutlich unter den Grenzwerten LRV und blauer Engel).
- Sehr hohe Leistungsdichte und damit kompakte Bauweise (kleiner Platzbedarf und geringere Wärmeverluste).
- Energieauskopplung mit hohem Strahlungsanteil direkt auf den Stirling-Erhitzerkopf.
- Sehr kurze Start-Zeiten bis zum stationären Betrieb, geringe Start-Emissionen.

Daneben bestehen auch Nachteile und es sind noch einige Fragen für den Einsatz im Stirling-Motor ungeklärt:

**... und Nachteile**

- Die interne Rauchgas-Rezirkulation ist nicht möglich, d.h. sie muss extern gemacht werden, wobei unter Umständen ein Wirkungsgradverlust in Kauf genommen werden muss.
- Der Betrieb mit hoher Luftvorwärmung (vgl. Kap. 1) ist noch nicht hinreichend untersucht worden.
- Es werden keramische Materialien im Flambereich eingesetzt; die Preise sind heute noch relativ hoch und die Standzeiten (v.a. die Anzahl Starts) noch wenig bekannt, bzw. ungenügend.
- Der Betrieb mit Öl verlangt zwingend den Einsatz eines zusätzlichen Ölverdampfer-Moduls (welches noch zu entwickeln ist).

→ Aufgrund der noch offenen Fragen wurde vom LSTM im Auftrag von awtec eine Konzeptstudie durchgeführt [10] (mit Teil-Finanzierung durch DVGW und SVGW). Zudem wurde die Porenbrenner-Technologie als eine von drei Technologien in der vertieften Konzeptstudie in Zusammenarbeit mit dem OWI weiter untersucht (vgl. Kap. 2.3).

**Entwicklungs-  
projekt gestartet  
→ Vertiefung**

### 2.2.3 Vorverdampfungsbrenner, OWI

Der Technologie des Vorverdampfungsbrenners (VVD) wurde speziell für den Einsatz mit Öl an der Universität RWTH Aachen und am Öl-Wärme-Institut entwickelt. Er wurde bereits an einem Stirling-BHKW der Firma SOLO ([www.stirling-engine.de](http://www.stirling-engine.de)) erfolgreich getestet ([3], [4]). Die Entwicklung wurde aber aus strategischen Gründen von der Firma SOLO nicht weiterverfolgt.

**Ölbrenner für  
den Einsatz an  
Stirling-Motoren**

Die Vorverdampfer-Technologie galt bis vor kurzem als öffentlich, d.h. patentrechtlich nicht geschützt. In der Zwischenzeit hat sich dieser Sachverhalt verändert: Es ist ein (deutsches) Patent aufgetaucht, welches

**Exklusivrecht  
zur Nutzung für  
SSA**

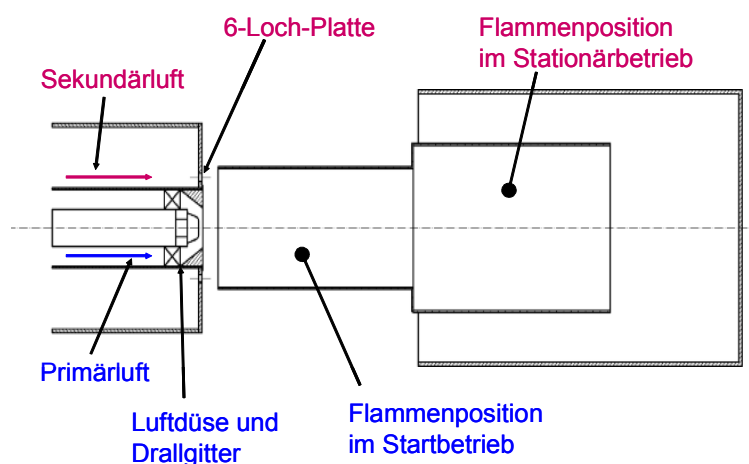
eine Teillösung der Lufteindüsung im VVD-Brenner abdeckt. Die Rechte an diesem Patent (mit exklusiver Nutzung für den Einsatz bei Stirling-Motoren) sind mittlerweile an die Stirling-Systems AG übertragen worden. Damit kann die Stirling-Systems AG die VVD-Technologie als einzige Firma für den Einsatz im Stirling-Motor ohne Kostenfolgen verwenden.

Das wesentliche Merkmal der VVD-Technologie ist die räumliche Trennung von Verdampfungs- und Oxidationszone im stationären Betrieb. Dadurch wird eine vollständige Verdampfung und Gemischbildung des Öls erreicht, bevor das Gemisch oxidiert wird (Verhinderung von Tröpfchenverbrennung). Zur Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Emissionen wird mit interner Rezirkulation gearbeitet ( $r = 1 - 1.5$ )<sup>4</sup>, welche durch den Impuls an einer Mehrlochdüse aufrechterhalten wird.

**Räumliche  
Trennung von  
Verdampfung  
und Oxidation**

Für den Kaltstart wird ein integrierter Drallbrenner heutiger Technologie verwendet. Dieser ermöglicht zuverlässiges Zünden sowie stabiles und rasches Aufheizen des Brennraumes auf stationäre Betriebsbedingungen, wobei die Schadstoff-Emissionen in einem akzeptablen Bereich zu liegen kommen. Der Startbetrieb wird über einen separaten Luftweg ("Primärluft") geführt, während der Stationär-Betrieb mit "Sekundär-Luft" über die Mehrlochdüse läuft.

**Kaltstart mit  
bewährtem  
Drallbrenner**



#### **Startbetrieb:**

- Nur Primärluft
- Geringe Rezirkulation
- Flamme im Brennerrohr

#### **Stationärbetrieb:**

- Nur Sekundärluft
- Hohe Rezirkulation
- Flamme im Umkehrtopf

Abb. 4: Prinzipschema des Vorverdampferbrenners mit Primärluft für das Zünden und Aufheizen (Startbetrieb) sowie der Sekundärluft für den Stationärbetrieb.

#### **Grobbewertung:**

Der Vorverdampferbrenner ermöglicht den Betrieb mit Öl, wobei das technisch heikle Verdampfen ohne spezielles Verdampfermodul (wie beispielsweise beim FLOX- oder Porenbrenner) bereits integriert ist. Er ist technisch sehr einfach aufgebaut (keine speziellen Materialien, nur Blechteile) und verspricht deshalb günstige Serieproduktion.

**Verdampfer ist  
integriert**

<sup>4</sup> Die Rezirkulationsrate ist mit  $r = 1 - 1.5$  deutlich tiefer als beim FLOX-Brenner (vgl. Kap. 2.2.1); sie liegt damit ausserhalb des patentrechtlich geschützten Bereichs des FLOX-Brenners ( $r = 2 - 10$ ).

Die VVD-Technologie ist patentrechtlich teilweise geschützt, wobei der Stirling-Systems AG eine kostenlose Exklusivnutzung für den Einsatz bei Stirling-Motoren gewährt wurde. Als Projektpartner ist das OWI (heute EVT) als privater Dienstleister sehr gut positioniert. Zudem wurde am selben Institut die Technologie bereits entwickelt und an einem Stirling-Motor getestet ([3], [4]).

**Patentsituation positiv;  
OWI als guter Projektpartner**

Der Brenner kann mit geringsten Anpassungen auch für Gas verwendet werden (Auswechseln der Öl-Lanze mit einer Gasdüse). Dies hätte im Hinblick auf Entwicklung und Serieproduktion sehr viele Vorteile.

**Gasbetrieb praktisch geschenkt!**

Nachteilig am VVD-Brenner ist, dass der Luftstrom über zwei Pfade in den Brenner eingeführt werden muss, und deshalb ein Ventil oder eine Klappe im Luftweg eingebaut werden muss (Kosten Steuerung und Hardware). Ein weiterer Nachteil ist der relativ grosse Platzbedarf des Brenners (v.a auch im Hinblick auf Wärmeverluste gegen aussen).

**Nachteile:  
Luftklappe und grosses Volumen**

→ Die VVD-Technologie wird in der vertieften Konzeptstudie detailliert untersucht.

**→ Vertiefung!**

## 2.2.4 Rotrixbrenner, ALSTOM/Viessmann

Der Rotrix-Brenner ist eine Weiterentwicklung des "Vortex-Brenners" für die ALSTOM-Gasturbinen GT24/26. Er wurde in Zusammenarbeit mit Viessmann für Öl-Heizungen im Leistungsbereich von ca. 22 kW entwickelt und auf den Markt gebracht (inzwischen wurde er aber wieder aus dem Sortiment genommen).

**Rotrixbrenner = Vortexbrenner**

Der Rotrix-Brenner basiert auf einer hoch-turbulenten Drallströmung zur Verdampfung und Gemischbildung mit anschliessendem Vortex-Breakdown zur Flammenstabilisierung. Diese Technologie ermöglicht im Vergleich zu konventionellen Öl-Brennern sehr tiefe Schadstoffemissionen.

**Verdampfung/ Mischen und Stabilisieren mit Drall**

### Grobbeurteilung:

Die tiefen Schadstoff-Emissionen für die Verbrennung von Öl und die bereits erfolgte Industrialisierung durch Viessmann sind grosse Pluspunkte.

**Sehr gute NO<sub>x</sub>-Werte!**

Eine Grobstudie von ALSTOM [6] hat jedoch grosse Unsicherheiten beim Scale-Down auf den Stirling-Leistungsbereich (ca. 6 kW) aufgezeigt; es ist fraglich, ob das notwendige Strömungsfeld bei so kleinen Leistungen geometrisch überhaupt noch erzeugt werden kann. Als grundsätzliche Nachteile werden zudem die verhältnismässig grosse Gebläseleistung zur Aufrechterhaltung der Drallströmung (zusätzlicher Stromverbrauch, der den elektrischen Wirkungsgrad reduziert) sowie die eher hohen Fertigungskosten (aufwändige 3D-Schweissskonstruktion) gesehen.

**Aber scale-down unsicher, hoher Energieverbrauch und hohe HK ...**

→ für awtec sind die Risiken zu hoch und die Chancen nicht viel versprechend genug, um weitere Schritte zu unternehmen.

**→ Stop!**



## 2.2.5 Weitere Technologien

### a) Kalte-Flamme-Verdampfer

Kalte Flammen ermöglichen die rückstandsfreie Verdampfung flüssiger Brenn- und Kraftstoffe, wie Heizöl EL, Diesel und biogener Energieträger in einem weiten Leistungsbereich für stationäre und instationäre Prozesse. Das Phänomen der Kalten Flammen tritt in einem Temperaturbereich zwischen 300°C und 500°C auf und ist ein exothermer Prozess. Somit ist die Realisierung eines autothermen Verdampfungs- und Gemischbildungsprozesses für flüssige Brenn- und Kraftstoffe möglich.

**Verdampfung flüssiger Brennstoffe ohne Fremdenergie**

Mit dem Kalte-Flamme-Verdampfer ist eine Entkopplung von Verbrennung und Gemischbildung durchführbar, so dass er beispielsweise als unabhängiges Verdampfermodul für den FLOX- oder den Porenbrenner eingesetzt werden könnte.

**... als unabhängiges Verdampfermodul**

Die Kalte-Flamme-Technologie ist durch das OWI patentrechtlich geschützt.

**Patentrechtlich geschützt**

#### Grobbewertung:

Der grosse Vorteil dieser Verdampfertechnologie ist der unabhängige Betrieb vom eigentlichen Brenner; es wird ein vollständig verdampftes (fettes) Brennstoff-Luft geliefert, welches sehr einfach und modular vor einen Gasbrenner geschaltet werden kann (bspw. FLOX- oder Porenbrenner). Ein vollständig verdampftes und gemischtes Öl-Luftgemisch lässt sich dann mit sehr tiefen Schadstoffemissionen verbrennen.

**Vorteil: unabhängig ...**

Der wesentliche Nachteil ist, dass der Kalte-Flamme-Verdampfer einen eigenständigen Brenner darstellt, der eine eigene, komplette Brennersteuerung mit allen Sicherheitseinrichtungen und Sensoren braucht (sowie eine eigene Zertifizierung). Darüber hinaus ist der Startprozess mit zwei aneinander gekoppelten Brennern sehr anspruchsvoll, und für einen Stirling möglicherweise gar nicht beherrschbar.

**... aber auch ein Nachteil**

Der Kalte-Flamme-Verdampfer liegt erst als Forschungs-Brenner vor; er ist noch weit weg von einer Industrialisierung.

**Noch keine Industrialisierung**

→ Der Kalte-Flamme-Verdampfer ist zwar eine interessante Technologie, aber für das aktuelle Stirling-Projekt nicht einsetzbar.

**→ Stop!**

### b) Aerosolverdampfer, Schilling

Diese Technologie wurde bereits einmal vom Oekozentrum Langenbruck für den Betrieb des FLOX-Brenners untersucht [7].

**Schon einmal untersucht**

Der Aerosolverdampfer besteht im Wesentlichen aus zwei ineinander liegenden Edelmetall-Sinterkörpern mit grosser poröser Oberfläche, welche mit dem zu verdampfenden Öl benetzt wird. Die (für den Start elektrisch) vorgeheizte Verbrennungsluft wird zum einen Teil durch den Sinterkörper

**Verdampfung auf porösen Oberflächen**

gepresst und der Rest (Sekundärluft) umströmt diesen, wobei die Luft das zu verdampfende Öl aufnimmt.

Der Aerosolverdampfer scheint technisch zu funktionieren, er ist jedoch steuerungstechnisch sehr anspruchsvoll (Mischungsverhältnis Luft-Brennstoff) und die wärmetechnische Integration in den Stirling ist eine Knacknuss (die Wärmeenergie für das Verdampfen sollte im Stationärbetrieb nicht elektrisch zugeführt werden, sondern aus der Abgasenergie). Die elektrische Energie, die beim Kaltstart zugeführt werden muss ist relativ gross und verschlechtert den elektrischen Wirkungsgrad massiv. Zudem muss bei dieser Technologie ein relativ hoher Gebläsedruck erzeugt werden.

**Anspruchsvolle Integration in die Brennkammer**

Für den Einsatz des Aerosolverdampfers in der Stirling-Maschine müsste noch sehr viel Entwicklungsarbeit geleistet werden. Es ist fraglich, ob der Verdampfer bis zur Nullserie-Maschine zur Verfügung stehen könnte.

**... noch viel Entwicklungs-aufwand**

→ Für awtec sind die Risiken und Nebenwirkungen zu gross, die Aerosol-Verdampfertechnologie wird vorerst nicht weiterverfolgt. Immerhin läuft aber mit finanzieller Unterstützung der Erdölvereinigung ein Projekt "Katalytisch unterstützter Ölvergaser für 3-15 kW" welches mit dem Aerosolverdampfer arbeitet. Die Erkenntnisse werden von awtec ausgewertet.

**→ Stop!**

### **c) Ölbrenner mit Rotationszerstäuber, Toby (Windhager)**

Der Ölbrenner mit Rotationszerstäuber ist eine neue Technologie, welche von den Firmen Windhager und Toby (ursprünglich) gemeinsam entwickelt wurde. Sie erlaubt erstmals, einen Ölbrenner mit sehr kleinen Leistungen (bis 4 kW) und modulierend zu betreiben. Die Technologie steht unmittelbar vor der Markteinführung durch Toby.

**Ölbrenner mit kleinen Leistungen**

Das wesentliche Merkmal dieser Technologie ist die drucklose Zerstäubung an einer rotierenden Scheibe, an der die (vorgewärmte) Zuluft vorbeiströmt und den Brennstoff aufnimmt. Da die Scheibe mit relativ hoher Geschwindigkeit rotiert, entstehen sehr feine Tröpfchen, welche in der Zuluft sehr rasch und vollständig verdampfen und entsprechend ein Öl-Luft-Gemisch mit sehr hoher Mischqualität entsteht.

**Drucklose Zerstäubung mit hoher Qualität**

### **Grobbewertung:**

Der wesentliche Vorteil (in Bezug auf den Stirling-Einsatz) ist die drucklose Ölverdampfung. Bei allen anderen Technologien wird das Öl mit hohem Druck über eine Öldüse zerstäubt, wobei der Druck über eine Ölpumpe und einen Ölvorwärmer (Viskosität!) erzeugt werden muss. Diese beiden Komponenten brauchen elektrische Energie, was den elektrischen Wirkungsgrad empfindlich reduziert. Hier könnte der Rotationszerstäuber eine wesentlich bessere Energiebilanz erbringen.

**... mit weniger Energieaufwand als normale Ölzerstäubung**



Nachteilig ist allerdings, dass die rotierende Scheibe bei einem Kaltstart elektrisch vorbeheizt werden muss.<sup>5</sup> Dies verschlechtert die Gesamt-Energiebilanz enorm.

**... Kaltstart ist ungünstig!**

Ein weiterer, potentieller Nachteil ist, dass mit dieser Technologie keine interne Rezirkulation möglich ist. Es ist insofern (noch) nicht bekannt, wie sich diese Technologie für sehr hohe Verbrennungslufttemperaturen eignet (NO<sub>x</sub>-Emissionen). Unter Umständen muss (wie beim Porenbrenner) eine externe Rezirkulation mit den entsprechenden Nachteilen vorgesehen werden.

**Rezirkulation nicht intern?!**

→ Die Rotationszerstäuber-Technologie braucht enorm viel Know-How in Bezug auf die strömungstechnische Auslegung. Eine Partnerschaft mit der Firma Toby wurde auch bereits andiskutiert, aber noch nicht gestartet (Kapazitätsprobleme bei Toby). Ein mögliches Ziel ist, den Rotationszerstäuber in einer späteren Projektphase in den VVD-Brenner zu integrieren, und die spezifischen Vorteile dieser Technologie zu nutzen. Die Abklärung der Machbarkeit ist für nächstes Jahr geplant.

**→ Zusammenarbeit mit Toby geplant**

## 2.3 Vertiefte Konzeptstudie OWI

Beim Grob-Screening liessen sich drei verschiedene Brenner-Technologien definieren, welche einer vertieften Untersuchung und Potentialabschätzung unterzogen werden sollen. Es sind dies der FLOX-, der VVD- und der Porenbrenner. Die Studie wurde in Zusammenarbeit mit dem OWI in Aachen durchgeführt. Die detaillierten Untersuchungen sowie die Ergebnisse sind in einem eigenen Bericht [9] zu finden; es wird hier lediglich die Zusammenfassung wiedergegeben.

**FLOX, VVD und Porenbrenner  
→ Konzeptstudie**

### 2.3.1 Zusammenfassung (aus [9])

Im Folgenden wird die Zusammenfassung der Ergebnisse der vertieften Konzeptstudie des OWI in Zusammenarbeit mit awtec wiedergegeben. In die Studie wurden die drei Brennertechnologien FLOX-, Poren- und Vorverdampfungsbrenner einbezogen. Die detaillierte Bewertungsmatrix für diese drei Technologien ist in [9] zu finden.

**Zusammenfassung der Ergebnisse**

Das Konzept des Vorverdampfungsbrenners erfüllt in der Summe der Eigenschaften am besten die Anforderungen an das Verbrennungssystem für einen Stirling-Motor für Öl und Gas. Die Kombination aus Verdampfer und Porenbrenner zeigt Vorteile im Bereich des Wärmeüberganges, der Baugröße und Modulierbarkeit. Nachteilig sind jedoch die höhere

**VVD schneidet am besten ab!**

<sup>5</sup> Dies ist für einen Brenner mit grossem Modulationsbereich an sich kein grosses Problem. Beim Einsatz auf einer Stirling-Maschine mit engem Betriebspunkt (d.h. er läuft im on/off-Betrieb mit häufigen Brennerstarts) sehr negativ für den elektrischen Wirkungsgrad (im Zeitmittel).

Leistungsaufnahme in Start und Betrieb und das höhere Entwicklungsrisiko.

Das Konzept des Verdampfers mit FLOX-Brenner ist nach der Bewertung am wenigsten geeignet, um die Anforderungen zu erfüllen. Es zeigt gegenüber dem Vorverdampfungsbrenner lediglich Vorteile in den Emissionen während des Betriebs<sup>6</sup>. Insgesamt überwiegen in diesem Fall die Nachteile der langen Startzeit, hohen Emissionen im Start und der elektrischen Leistungsaufnahme während des Startvorganges.

**FLOX hat die meisten Nachteile!**

### 2.3.2 Kommentar awtec

Gemäss der Konzeptstudie des OWI schneidet der VVD-Brenner am besten ab, wenn auch nur mit wenig Unterschied zum zweitbesten Porenbrenner.

**VVD besser, aber nicht viel besser!**

#### **Zusätzliche Kriterien:**

Es sind aber noch weitere Kriterien, welche nicht in der Bewertungsmatrix enthalten sind, für die Auswahl der am besten geeigneten Technologie massgebend:

**Es gibt aber noch weitere Kriterien:**

- Der aktuelle Entwicklungsstand aller Komponenten: Der Zeitrahmen im Gesamtprojekt Sticore ist sehr eng; bereits 2007 muss eine Nullserie-Maschine inkl. Brenner für Gas **und** Öl vorliegen. Allzu umfangreiche Neuentwicklungen können in diesem Zeitrahmen nicht durchgeführt werden.
- Die Patentsituation: Für zukünftige Investoren ist die Patentsituation sehr wichtig. Im Idealfall besitzt das Projekt alle wesentlichen Patente selber oder hat kostenlose Exklusiv-Nutzungsrechte. Ist dies nicht möglich, ist eine nicht-geschützte, d.h. öffentliche Technologie besser positioniert, da keine Abhängigkeit von den Patentbesitzern besteht (Lizenzverhandlungen).
- Entwicklungspartner: Im Projekt Sticore ist die Stirling-Maschine der Kern der Entwicklung, und der Brenner ist nur eine Zusatzkomponente. Entsprechend wird die Entwicklung mit externen Partnern durchgeführt. Die Eignung dieser externen Partner für eine gemeinsame Entwicklung ist deshalb sehr wichtig. awtec muss die verschiedenen Partner diesbezüglich ebenfalls bewerten.

**- Entwicklungsstand**

**- Patentsituation**

**- Entwicklungspartner**

#### **Bewertung nach den zusätzlichen Kriterien:**

Bisher gibt es noch kein zuverlässiges Öl-Verdampfer-Modul, das für den Ölbetrieb bei Poren- und FLOX-Brenner eingesetzt werden könnte. Es gibt zwar interessante Lösungsansätze (z.Bsp. vom LSTM), diese sind aber

**Es gibt noch kein Ölverdampfer-Modul!**

<sup>6</sup> Die Emissionsgrenzwerte gemäss LRV und blauer Engel werden aber bei allen drei Technologien sowohl für Öl als auch Gas grundsätzlich als erfüllbar betrachtet.

noch weit von einer technischen Umsetzung entfernt. Für das aktuelle Stirling-Projekt, das bereits 2007 eine Nullserie-Maschine inkl. Brenner für Öl und Gas vorschreibt, würde diese Technik kaum rechtzeitig zur Verfügung stehen. Insofern können die beiden Technologien FLOX- und Porenbrenner nicht für das laufende Projekt ausgewählt werden.

Die Frage, ob allenfalls zwei verschiedene Brenner für Öl und Gas entwickelt werden sollen, kann mit dem heutigen Wissenstand noch nicht abschliessend beantwortet werden. Der Porenbrenner und der FLOX-Brenner haben bei reinem Gas-Betrieb durchaus Vorteile vorzuweisen. Da aber noch nicht abschliessend bekannt ist, ob es gravierende Nachteile beim VVD-Brenner mit Gas-Betrieb gibt, muss diese Frage noch offen bleiben.

**Zwei verschiedene Brenner für Öl und Gas?**

Sowohl der FLOX- als auch der Porenbrenner sind patentrechtlich sehr gut geschützt. Auch in diesem Punkt hat der VVD-Brenner einen Vorteil, da die Stirling-Systems AG ein exklusives Nutzungsrecht für den Einsatz im Stirlingbereich hält. Es ist anzustreben, dass bei der weiteren Entwicklung Zusatzpatente entstehen, welche in den Besitz der Stirling-Systems AG eingehen.

**Patentsituation spricht für VVD**

Bei jeder Technologie drängt sich ein spezifischer Entwicklungspartner auf: Porenbrenner mit LSTM, FLOX-Brenner mit WS-Wärmeprozessstechnik und VVD mit dem OWI. Das OWI ist als privater Dienstleister eindeutig am besten geeignet, an diesem Entwicklungsprojekt mitzuarbeiten. Das LSTM ist dagegen sehr stark eine universitäre Forschungsabteilung mit wenig Erfahrung in der Industrialisierung von Produkten. Die WS-Wärmeprozessstechnik hat kein Interesse mehr an einer weiteren Zusammenarbeit gezeigt.

**Wahl des Entwicklungspartners**

## 2.4 Folgerung und weiteres Vorgehen

Die breite Suche nach möglichen Brenner-Technologien für den Einsatz in einem Stirling-BHKW und die anschliessende vertiefte Konzeptstudie hat gezeigt, dass die Vorverdampfer-Technologie in der Gesamtbewertung am besten abschneidet, dicht gefolgt vom Porenbrenner.

awtec hat deshalb zwei Entwicklungsprojekte gestartet, je eines mit dem OWI (Vorverdampferbrenner, Öl und Gas) und eines mit dem LSTM (Porenbrenner, vorerst nur Gas).

### 3 Entwicklungsprojekt Vorverdampfungsbrenner

awtec hat mit dem OWI ein Entwicklungsprojekt zum Vorverdampfungsbrenner mit folgenden Zielen gestartet:

**Entwicklungs-  
projekt für Öl  
und Gas**

- Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme eines Gasbrenners auf der Basis der Vorverdampfertechnologie (bis September 05)
- Anschliessend Bau eines Ölbrenners bis Ende 2005
- Inbetriebnahme dieses Brenners am OWI, Optimierung und schlussendlich Inbetriebnahme auf der Stirling-Maschine bei awtec (bis April 06)

Das Projekt ist per dato im Zeitplan und die Ziele erfüllt. Aus den Erfahrungen mit dem ersten Gasbrenner wurde eine (ursprünglich nicht geplante) Zwischenphase definiert:

**Zusatzphase  
definiert**

- Der geplante Oelbrenner wird wärmetechnisch noch deutlich optimiert (Redesign) und zuerst wieder als Gasbrenner in Betrieb genommen. Ende Januar 06 wird er an awtec für die Weiterentwicklung ausgeliefert.
- Anschliessend wird der baugleiche Brenner auch als Ölbrenner in Betrieb genommen und bis Ende Mai 06 an awtec ausgeliefert.

Damit können nach heutigem Stand alle Meilensteine des Stirling-Projektes erfüllt werden.

**Alle Meilensteine  
sind erfüllbar!**

Das OWI hat zu jedem Entwicklungsschritt jeweils einen Zwischenbericht zuhanded von awtec verfasst:

**Bericht zu  
jedem  
Entwicklungs-  
schritt**

- OWI\_Bericht1\_05-24\_M2: "Funktionsprüfung und Parameter-variation Brenner mit Erdgas am Prüfflammrohr", 26.Aug. 2005.
- OWI\_Ergebnisse\_05-24\_050902: " Ergebnisse: Betrieb mit Erhitzerkopfmodell", 2. Sept. 2005.
- OWI\_Bericht2\_05-24\_M3: "Test Funktionsmuster und Parameter-variation STICORE-Brenner mit Erdgas", 10.Nov. 2005.
- OWI\_Kurzbericht-05\_E24\_051222: " Stand der Arbeiten zu Entwurf und Fertigung des Erdgasbrenners mit Rekuperator (FM 2)", 22. Dez. 2005.

## 4 Entwicklungsprojekt Porenbrenner

awtec hat mit dem LSTM Erlangen ein Entwicklungsprojekt zum Thema Porenbrenner gestartet. Bei diesem Projekt geht es in erster Linie um den Beweis der prinzipiellen Eignung der Porenbrennertechnologie für den Einsatz in einem Stirling-BHKW. Der Umfang ist vorerst auf den Brennstoff Gas beschränkt. Das Projekt wird finanziell vom DVGW und dem SVGW unterstützt.

**Entwicklungs-  
projekt für Gas**

Der Projektplan sieht die folgenden Arbeiten vor:

- Konzeptstudie (thermodynamische Auslegung)
- Konstruktion und Bau eines Funktionsmusters
- Inbetriebnahme und Optimierung im Labor beim LSTM
- Funktionstests auf einer realen Stirling-Maschine bei awtec

Die Arbeiten sind bis auf den letzten Punkt (Funktionstests bei awtec) erfolgreich abgeschlossen worden. Es sind folgende Berichte vom LSTM angefertigt worden:

**Fortschritt  
gemäss  
Projektplan**

- LSTM\_Studie\_PB\_Stirling: "Studie zum Einsatz eines Porenbrenners zur Beheizung eines Stirlingmotors", 30.05.2005.
- LSTM\_Stirling\_07\_12\_05: (Statusbericht) "Besprechung awtec und LSTM am 07.12.2005 in Erlangen".

Die Funktionstests auf der realen Maschine sollen im Frühjahr 06 bei awtec stattfinden.

**Funktionstest  
geplant**

## A1. Thermodynamik des Brenners

awtec hat zur Untersuchung der Thermodynamik des Brenners ein umfangreiches Excel-Tool entwickelt. Es erlaubt, den Brenner im System mit dem Stirling-Motor zu bilanzieren und die wesentlichen Einflüsse des Brennersystems auf den elektrischen Wirkungsgrad zu definieren.

**Umfangreiches  
Excel-Tool  
entwickelt**

### A1.1. Betrachtetes System

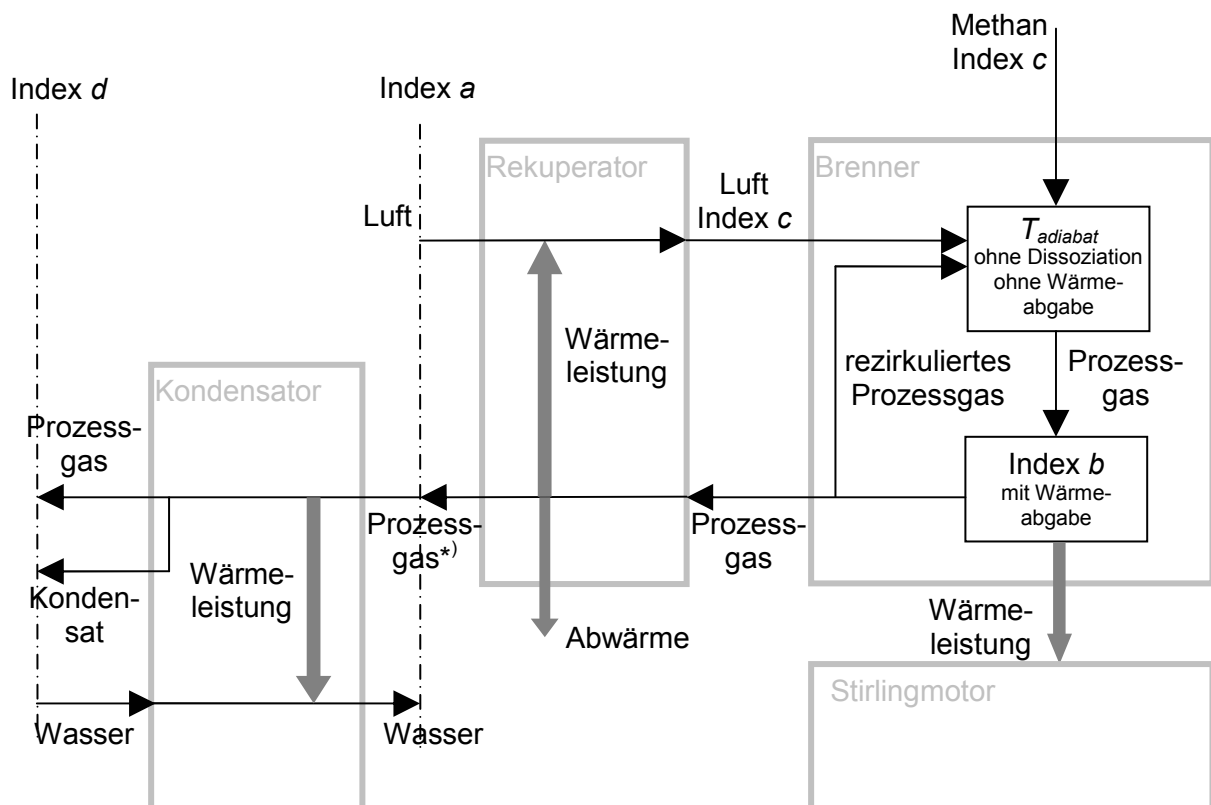


Abb. 5: Übersicht des Systems "Stirling-Brenner". (Prozessgas\*): Die verwendeten Modelle für die Kondensation sind nur gültig, wenn das Prozessgas an dieser Stelle noch nicht kondensiert hat).

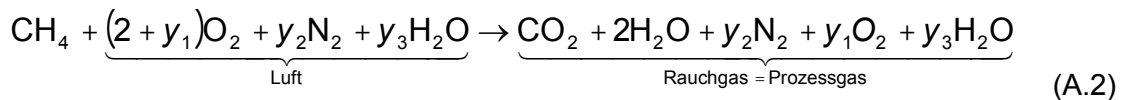
## A1.2. Gleichungen zur Verbrennungsrechnung

Annahmen: Reines Methan (anstelle von Erdgas)

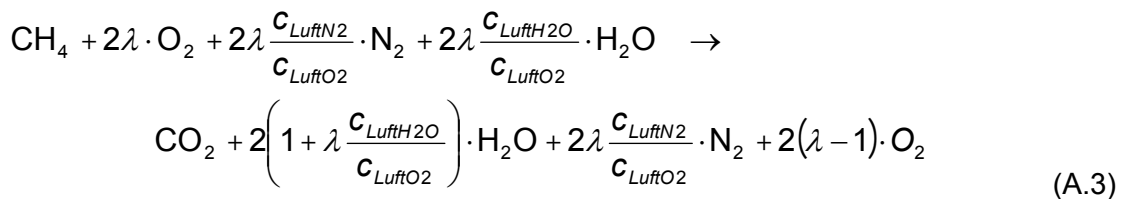
Reaktionsgleichung:



Einbezug der überschüssigen Luft (Luftüberschuss  $\lambda$ ), des Stickstoffs und der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit:



Drückt man die Variablen  $y_1$ ,  $y_2$  und  $y_3$  der Reaktionsgleichung (A.2) durch die Luftzahl  $\lambda$  und die volumetrischen Konzentrationen von Stickstoff  $c_{\text{LuftN}_2}$ , Sauerstoff  $c_{\text{LuftO}_2}$  und Wasser  $c_{\text{LuftH}_2\text{O}}$  in Luft aus, so ergibt sich



Die volumetrischen Konzentrationen  $c_{\text{PgCO}_2}$ ,  $c_{\text{PgH}_2\text{O}}$ ,  $c_{\text{PgN}_2}$  und  $c_{\text{PgO}_2}$  der verschiedenen Bestandteile im Rauchgas berechnen sich folglich gemäss

$$c_{\text{PgCO}_2} = \frac{1}{1 + 2\lambda \cdot \left( 1 + \frac{c_{\text{LuftN}_2}}{c_{\text{LuftO}_2}} + \frac{c_{\text{LuftH}_2\text{O}}}{c_{\text{LuftO}_2}} \right)} \quad (\text{A.4})$$

$$c_{\text{PgH}_2\text{O}} = \frac{2 \left( 1 + \lambda \frac{c_{\text{LuftH}_2\text{O}}}{c_{\text{LuftO}_2}} \right)}{1 + 2\lambda \cdot \left( 1 + \frac{c_{\text{LuftN}_2}}{c_{\text{LuftO}_2}} + \frac{c_{\text{LuftH}_2\text{O}}}{c_{\text{LuftO}_2}} \right)} \quad (\text{A.5})$$

$$c_{\text{PgN}_2} = \frac{2\lambda \frac{c_{\text{LuftN}_2}}{c_{\text{LuftO}_2}}}{1 + 2\lambda \cdot \left( 1 + \frac{c_{\text{LuftN}_2}}{c_{\text{LuftO}_2}} + \frac{c_{\text{LuftH}_2\text{O}}}{c_{\text{LuftO}_2}} \right)} \quad (\text{A.6})$$

$$c_{\text{PgO}_2} = \frac{2(\lambda - 1)}{1 + 2\lambda \cdot \left( 1 + \frac{c_{\text{LuftN}_2}}{c_{\text{LuftO}_2}} + \frac{c_{\text{LuftH}_2\text{O}}}{c_{\text{LuftO}_2}} \right)} \quad (\text{A.7})$$

Die volumetrischen Anteile  $c_i$  (gleich der molaren Anteile) können in Massenanteile  $\varphi_i$  umgerechnet werden mit

$$\varphi_{PgCO_2} = \frac{M_{CO_2} c_{PgCO_2}}{M_{CO_2} c_{PgCO_2} + M_{H_2O} c_{PgH_2O} + M_{N_2} c_{PgN_2} + M_{O_2} c_{PgO_2}} \quad (A.8)$$

$$\varphi_{PgH_2O} = \frac{M_{H_2O} c_{PgH_2O}}{M_{CO_2} c_{PgCO_2} + M_{H_2O} c_{PgH_2O} + M_{N_2} c_{PgN_2} + M_{O_2} c_{PgO_2}} \quad (A.9)$$

$$\varphi_{PgN_2} = \frac{M_{N_2} c_{PgN_2}}{M_{CO_2} c_{PgCO_2} + M_{H_2O} c_{PgH_2O} + M_{N_2} c_{PgN_2} + M_{O_2} c_{PgO_2}} \quad (A.10)$$

$$\varphi_{PgO_2} = \frac{M_{O_2} c_{PgO_2}}{M_{CO_2} c_{PgCO_2} + M_{H_2O} c_{PgH_2O} + M_{N_2} c_{PgN_2} + M_{O_2} c_{PgO_2}} \quad (A.11)$$

Luft:

$$\varphi_{LuftO_2} = \frac{M_{O_2} c_{LuftO_2}}{M_{O_2} c_{LuftO_2} + M_{N_2} c_{LuftN_2} + M_{H_2O} c_{LuftH_2O}} \quad (A.12)$$

$$\varphi_{LuftN_2} = \frac{M_{N_2} c_{LuftN_2}}{M_{O_2} c_{LuftO_2} + M_{N_2} c_{LuftN_2} + M_{H_2O} c_{LuftH_2O}} \quad (A.13)$$

$$\varphi_{LuftH_2O} = \frac{M_{H_2O} c_{LuftH_2O}}{M_{O_2} c_{LuftO_2} + M_{N_2} c_{LuftN_2} + M_{H_2O} c_{LuftH_2O}} \quad (A.14)$$

Der Sättigungsdruck  $p_{satt}(T)$  von Wasser und umgekehrt die Sättigungstemperatur  $T_{satt}(p)$  von Wasser lässt sich näherungsweise nach den Antoine Gleichung für Wasser gemäss [16] berechnen.

$$p_{satt}(T) = 100\text{Pa} \cdot 10^{\frac{8.305 - \frac{1789.4\text{K}}{T + 237.99\text{K} - 273.15\text{K}}}{}} \quad (A.15)$$

$$T_{satt}(p) = \frac{1789.4\text{K}}{8.305 - \lg\left(\frac{p}{100\text{Pa}}\right)} - 237.99\text{K} + 273.15\text{K} \quad (A.16)$$

Ein Vergleich mit Werten des Programms „WinSteam“ (detaillierte Berechnung) zeigt, dass diese Näherung nach (A.15) und (A.16) für Drücke bis 1 bar und Temperaturen bis 100°C gut übereinstimmt.



### A1.3. Behandlung der Wärmeverluste an die Umgebung

Der Wärmeverlust des Brenners an die Umgebung muss mit zusätzlichem Brennstoff gedeckt werden und verschlechtert daher den elektrischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Die exakte Modellierung der Wärmeverluste an die Umgebung ist kaum möglich. Es wird deshalb ein sehr vereinfachtes Modell verwendet, das immerhin eine vernünftige Abschätzung erlaubt (vgl. Kap. A1.3.1). Dieses Modell wird in das bestehende Excel-Tool integriert.

**Wärmeverluste mit Brennstoff kompensieren!**

Der Wärmeverlust des Brenners ist Wärme, die von der zugeführten Luft zwischen Index a und Index c verloren geht (vergleiche Abb. 5). Bei der Berechnung des Brenners werden die Temperaturen der Verbrennungsluft  $T_{Lufta}$  und  $T_{Luftc}$  als Inputwerte (aus Messdaten) vorgegeben, sodass diese durch die Wärmeverluste nicht beeinflusst sind. Die Wärme, welche die Luft nach aussen abgibt, kommt ursprünglich vom Prozessgas, wird an die Luft abgegeben und von dieser wiederum an die Umwelt. Rechnerisch erscheint diese Wärme also in der Luft nicht. Somit wird diese Abwärme als Verlustwärmestrom aus dem Prozessgas betrachtet.

**Modellannahme: Verlust beim Prozessgas**

#### A1.3.1 Wärmeabgabe eines warmen Zylinders

Die folgenden Betrachtungen dienen dazu, die Wärmeabgabe der äusseren Hülle des Brenners mit der Temperatur  $T_0$  an die Umwelt mit der Temperatur  $T_\infty$  abzuschätzen. Die äussere Form des Brenners wird stark vereinfacht als ein Zylinder mit der Höhe  $h_{zyl}$  und dem Durchmesser  $d_{zyl}$  angenommen.

**Brenner als Zylinder mit Deckel betrachtet**

Die Grashofzahl ist eine Kennzahl für den Stoffaustausch aufgrund von Dichteunterschieden und wird berechnet mit

$$Gr(\ell) = \frac{g \cdot \ell^3}{\nu^2} \cdot \frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty} \quad (A.17)^7$$

wobei die für ideale Gase zulässige Annäherung für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten benützt wurde.

Die Mantelfläche des Zylinders wird als vertikale Fläche behandelt. Die Nusseltzahl  $Nu_{Mantel}$  berechnet sich zu

$$Nu_{Mantel} = \left\{ 0.825 + 0.387 \cdot \left[ Gr(h_{zyl}) \cdot 0.241 \right]^{\frac{1}{6}} \right\}^2 + 0.87 \cdot \frac{h_{zyl}}{d_{zyl}} \quad (A.18)^8$$

<sup>7</sup> [VDI \(2002\)](#) aus Gleichungen (7) und (6) auf Seite Fa1 und Gleichung (9) auf Seite Fa2.

<sup>8</sup> [VDI \(2002\)](#) aus Gleichungen (4), (12) und (13) auf Seiten Fa1 und Fa2.

Der Deckel des Zylinders wird als horizontale Fläche behandelt. Die Nusseltzahl  $Nu_{Deckel}$  berechnet sich zu

$$\begin{aligned}
 Nu_{Deckel} &= 0.766 \cdot \left( Gr \left( \frac{d_{zyl}}{4} \right) \cdot 0.287 \right)^{\frac{1}{5}} \quad \text{für } Gr \left( \frac{d_{zyl}}{4} \right) \cdot 0.287 \leq 7 \cdot 10^4 \\
 &= 0.150 \cdot \left( Gr \left( \frac{d_{zyl}}{4} \right) \cdot 0.287 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{für } Gr \left( \frac{d_{zyl}}{4} \right) \cdot 0.287 \geq 7 \cdot 10^4
 \end{aligned}
 \tag{A.19}^9$$

Die abgegebene Wärme  $\dot{Q}$  berechnet sich schliesslich aus der Nusseltzahl  $Nu$  gemäss

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot (T_0 - T_\infty) = A \cdot \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell} \cdot (T_0 - T_\infty)
 \tag{A.20}$$

wobei die Anströmlänge  $\ell$  im Fall des Mantels die äussere Höhe  $h_{zyl}$  des Brenners und im Fall des Deckels ein Viertel des Durchmessers ( $d_{zyl}/4$ ) beträgt.

#### A1.4. Berechnungsbeispiele (Excel-Tool)

Mit dem von awtec entwickelten Excel-Tool können die einzelnen Brenner-Komponenten untersucht, und deren Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems Brenner/Stirling-Motor definiert werden.

**Excel-Tool für thermodynamische Untersuchungen**

##### A1.4.1 Rekuperator

Als Rekuperator bezeichnet man den Abgas/Luft-Wärmetauscher zur Rückgewinnung der Abgasenergie in die Verbrennungsluft. Als Beispiel für die folgenden Betrachtungen werden Temperaturmessungen des FLOX-Brenners auf der Take5-Maschine verwendet:

**Rekuperator = Abgas-Wärmerückgewinnung**

- Input-Werte:  $T_{Luft,ein} = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{Luft,aus} = 817^\circ\text{C}$ ,  $T_{Abgas,ein} = 970^\circ\text{C}$
- Berechnete Austrittstemperatur des Abgases =  $324^\circ\text{C}$

Abb. 6 zeigt grafisch den Temperaturverlauf im Rekuperator mit der berechneten Austrittstemperatur des Abgases von  $324^\circ\text{C}$ . Die Energie, die damit noch im Abgas steckt, geht für den Stirling-Prozess (elektrischer W'grad) verloren.<sup>10</sup>

**Rest-Abgasenergie ist verloren**

<sup>9</sup> [VDI \(2002\)](#) aus Gleichungen (4), (18), (19) und (20) auf Seiten Fa1 und Fa4.

<sup>10</sup> Die Restenergie wird im anschliessenden Abgaskondensator in das Heizwasser übertragen und erhöht damit den thermischen Wirkungsgrad des BHKWs.

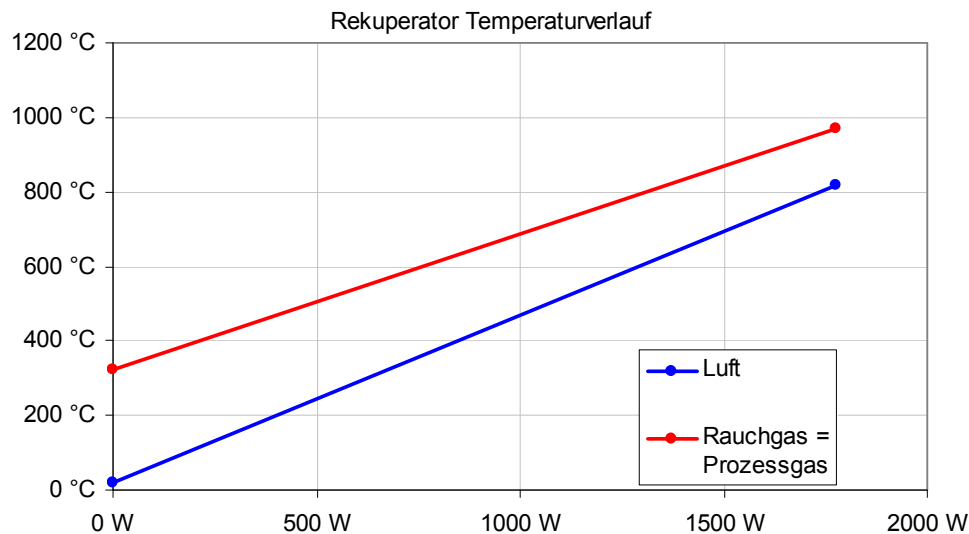


Abb. 6: Berechneter Temperaturverlauf im Abgasrekuperator (Gegenstrom) von Verbrennungsluft (blau) und Rauchgas (rot). Inputdaten aus Messwerten des FLOX-Brenners (Take5), Berechnung ohne Wärmeverluste.

Die Qualität des Rekuperators lässt sich mit Gleichung

$$\varepsilon = \frac{T_{Luft,aus} - T_{Luft,ein}}{T_{Abgas,ein} - T_{Luft,ein}} \quad (A.21)$$

berechnen. Der maximale Wirkungsgrad beträgt 1, für den idealen Fall, dass die Luft bis zur Eintrittstemperatur des Rauchgases vorgeheizt werden kann (unendlich grosse Wärmetauscherfläche). Damit ist ersichtlich, dass auch mit einem "idealen" Rekuperator nicht die ganze Abgasenergie zurück gewonnen werden kann (Abgas hat eine höhere Wärmekapazität als Luft).

**Der Wirkungs-  
grad des Reku-  
perators ...**

Für den Rekuperator auf dem FLOX-Brenner (WS-Wärmeprozessstechnik) ergibt sich rechnerisch mit den oben erwähnten Input-Daten

$$\varepsilon \cong 0.84$$

was bereits einem relativ hohen Wirkungsgrad entspricht.

In Abb. 7 ist der Einfluss der Rekuperator-Qualität auf den elektrischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems Brenner/Stirling aufgezeichnet. Pro 100°C höhere Luftvorwärmtemperatur steigt der elektrische Wirkungsgrad um ca. 1%. Entsprechend lohnt es sich, den Rekuperator-Wirkungsgrad zu optimieren.

**... mit grossem  
Einfluss auf den  
el. W'grad!**

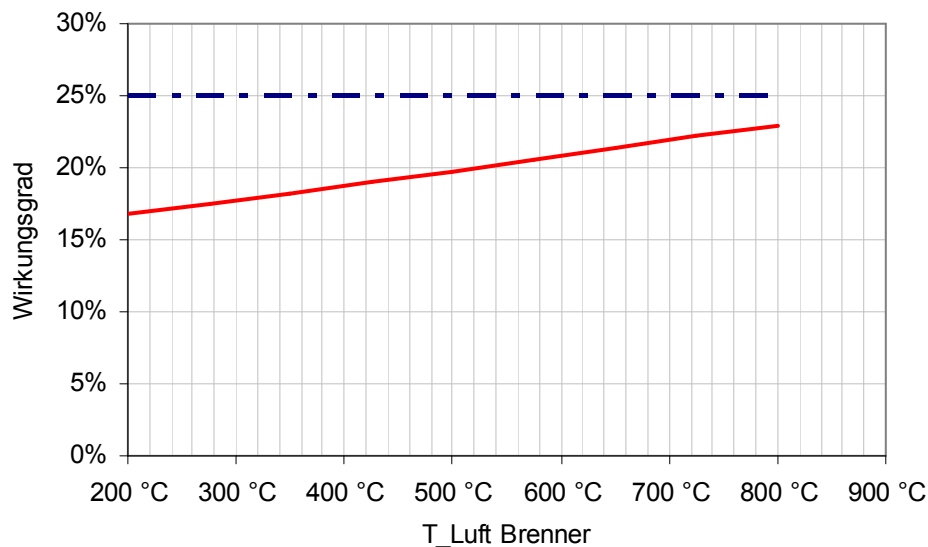


Abb. 7: Einfluss des Rekuperators auf den elektrischen Wirkungsgrad (absolut) des Gesamtsystems Brenner/Stirling (unter der Annahme, dass der Stirling einen inneren Wirkungsgrad von 25% hat).

#### A1.4.2 Wärmeverluste an die Umgebung

Eine Abschätzung der Wärmeverluste vom Brenner-Mantel an die Umgebung (s. Kap. A1.3) ermöglicht es, den Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems Brenner/Stirling abzuschätzen. Abb. 8 zeigt, dass dieser relativ stark mit zunehmender Temperatur des Brennermantels abnimmt. Bereits 100°C Manteltemperatur "kosten" bereits über 1% (absoluten) Wirkungsgrad. Eine massive Brennerisolation ist deshalb von grosser Wichtigkeit.

**Abschätzung  
der Wärmever-  
luste zeigt ...**

Aus diesen Abschätzungen lässt sich schliessen, dass die Konstruktion des Brenners und die Verbindung zur Stirling-Maschine grosse Beachtung im Hinblick auf Wärmeverluste finden muss.

**... den grosse  
Effekt auf den  
el. W'grad**

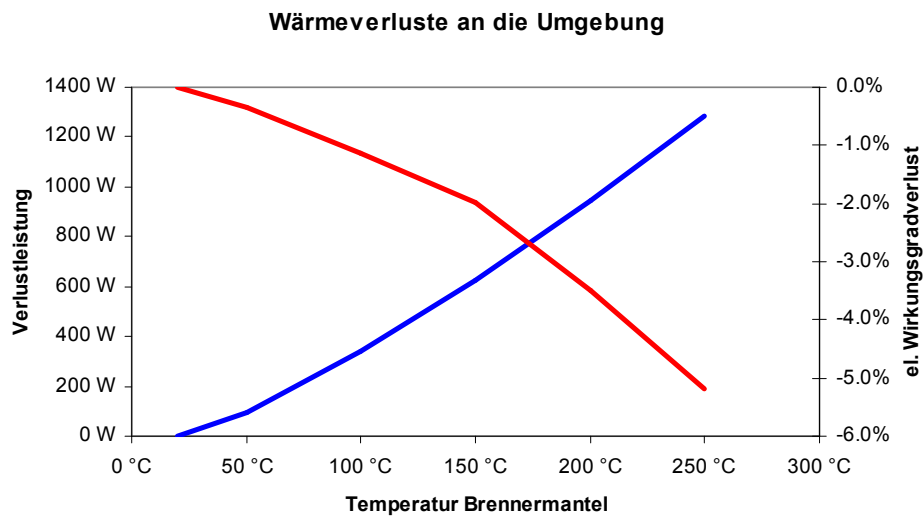


Abb. 8: Abschätzung der Wärmeverluste über den Brennermantel (blau) und resultierender Verlust beim elektrischen Wirkungsgrad (absolut) des Systems Brenner/Stirling (Inputdaten aus Kap. A1.4.1, Brennerzylinder mit  $D = 400 \text{ mm}$ ,  $H = 450$ , FLOX-Brenner Take5).

## A2. Nomenklatur

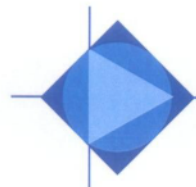
Wenn nicht anders erwähnt, werden Variablen strikt mit SI Einheiten und deren Kombinationen benutzt.

$A$	$m^2$	Fläche
$c$	–	Volumetrische Konzentration = Molarer Anteil
$C_p$	$J/(kmol\ K)$	Molare Wärmekapazität bei konstantem Druck
$c_p$	$J/(kg\ K)$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$d$	$m$	Durchmesser
$H$	$J/(kmol\ K)$	Molare Enthalpie
$h$	$J/(kg\ K)$	Spezifische Enthalpie
$h_{Zyl}$	$m$	Zylinderhöhe
$i$	–	Nummer der Komponente eines Gemisches
$\ell$	$m$	Anströmlänge
$M$	$kg/kmol$	Molmasse
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$Nu$	–	Nusseltzahl
$p$	$Pa$	Druck
$Pr$	–	Prandtlzahl
$\dot{Q}$	$W$	Wärmestrom
$r$	–	Rezirkulationsgrad
$r$	$m$	Radius
$R_s$	$J/(kg\ K)$	spezifische Gaskonstante
$T$	$K$	Temperatur
$t$	$s$	Zeit
$u$	$m/s$	Geschwindigkeit
$x$	$m$	Position
$y$	$m$	Variable in der Verbrennungsgleichung
$\alpha$	$W/(K\ m^2)$	Wärmeübergangskoeffizient
$\Delta T$	$K$	Temperaturdifferenz
$\eta$	$Pa\cdot s$	dynamische Viskosität
$\nu$	$m^2/s$	kinematische Viskosität
$\kappa$	–	Isentropenexponent (Ratio of specific heats)
$\lambda$	$W/(m\cdot K)$	Wärmeleitkoeffizient
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\varphi_i$	–	Massenanteil der Komponente $i$ in einem Gemisch.

### Indizes

$a$	Aussen am Wärmetauscher
$b$	Rauchgas im Brenner
$c$	Methan und Luft beim Eintritt in den Brenner
$Pg$	Prozessgas
$w$	Wand des Wärmetauschers

### A3. Bestätigung Projektstand OWI



#### EVT Energieverfahrenstechnik GmbH

EVT Energieverfahrenstechnik GmbH  
52134 Herzogenrath, Kaiserstraße 100

awtec AG für Technologie und  
Innovation  
Herrn Andreas Schlegel  
Leutschenbachstr. 48

EVT GmbH  
Kaiserstraße 100  
52134 Herzogenrath  
Tel.: 0 24 07 / 95 18 100  
Fax: 0 24 07 / 95 18 118  
eMail: info@evt-herzogenrath.de

22. Dezember 2005

#### Bestätigung Projektstand Projekt 05-E07 / 05-E24

Sehr geehrter Herr Schlegel,

hiermit bestätigen wir, dass ein Brenner gemäß unseres Angebotes 05-E24 bis Ende des Jahres 2005 entwickelt und gefertigt wird. Gemäß dem Zusatzangebot 05-E07 erfolgt die Inbetriebnahme mit Erdgas in den KW 1 und 2 2006. Der Brenner in der Erdgas - Variante ist weitestgehend baugleich zu der HEL - Variante.

Mit freundlichen Grüßen

Dr.-Ing. Klaus Lucka

Dr.-Ing. Stephan Köhne

## A4. Bibliographie

Angaben in eckigen Klammern [ ] verweisen auf die Nummer, unter der das Dokument in der Bibliothek von awtec abgelegt wurde.

- [1] *Wünning, J.G. (1995) "Flammlose Oxidation von Brennstoff", Dissertation, Aachen, 19. Dezember 1995* [AWT140]
- [2] *Wünning, J.G. und Wünning, J.A. (2003) "Combustion Chamber with Flameless Oxidation", Patent WO 03/091626 A1, 6. November 2003* [AWT146]
- [3] *Munko, A.; Steinbach, N.; Köhne, H. (2000) "Öl-Vorverdampfungs-brenner mit Luftvorwärmung zum Antrieb eines Stirling-Blockheizkraftwerkes", 3. Aachener Kolloquium ""Heizwärme aus Ölverbrennung"", September 2000, pp. 101-106* [AWT199]
- [4] *Munko, A.; Steinbach, N.; Köhne, H. (2000) "Weiterentwicklung eines emissionsarmen Heizöl-Brenners für den Antrieb eines Stirling-Blockheizkraftwerkes", RWTH Aachen, pp. 1-8* [AWT234]
- [5] *Köhne Heinrich, Jäger Frank, Munko Andreas (2005) "Verfahren und Vorrichtung zur Optimierung der Verbrennungsführung von Brennern", Deutsches Patent- und Markenamt, 3. Februar 2005, pp. 1-6* [AWT233]
- [6] *Hans Peter Knöpfl (2005) "5 - 10 kW Brenner mit passiver Rauchgasrezirkulation", Interner Bericht (nicht veröffentlicht), ALSTOM Technology Center, 5. April 2005* [AWT259]
- [7] *Gaegauf, C; Märki, F.; Zumsteg, Hp. (1999), "Stirling-Energiemodul - Entwicklung eines Ölbrenners", Ökozentrum Langenbruck, Dezember 1999* [AWT188]
- [8] *Zumsteg, Hp., Gaegauf, C. (ca. 2000), "Ölbefeuertes FLOX-Prozessbrenner für Stirling-Motoren", Ökozentrum Langenbruck, ca. 2000, pp. 107-112* [AWT185]
- [9] *Klein, R., vom Schloss, J. (2005), "Entwurf von Konzepten zur Entwicklung eines Verbrennungssystems für Heizöl EL zur Nutzung in einem Stirling-Prozess (Sticore)" Oel-Wärme-Institut gGmbH, Herzogenrath, 16. Juni 2005* [AWT260]
- [10] *Diezinger, S., et. al. (2005), "Studie zum Einsatz eines Porenbrenners zur Beheizung eines Stirlingmotors" LSTM Erlangen, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 30. Mai 2005* [AWT261]
- [11] *Babkin, V.S., Korzhavin, A.A., Bunev, V.A. (1991), "Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media" Combustion and Flame, Vol. 87 (1991), 1991, pp. 182-190* [AWT262]



- [12] *Durst, F., Kesting, A., Mössbauer, S., Pickenäcker, K., Pickenäcker, O., Trimis, D. (1997), "Der Porenbrenner - Konzept, Technik und Anwendungsgebiete" Gaswärme International 46 (1997), Heft 6, 1997, pp. 300-307* [AWT263]
  
- [13] *Pickenäcker, K. (2001), "Emissionsarme kompakte Gasheizsysteme auf der Basis stabilisierter Verbrennung in porösen Medien" Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6, Nr. 445, VDI-Verlag Düsseldorf, 2001* [AWT264]
  
- [14] *Flamme, M. (1989) "Minimierung der Stickstoffoxidbildung bei der Verbrennung von Erdgas mit starker Luftvorwärmung in Hochtemperaturprozessen" Dissertation, Bochum, 21. Juni 1989* [AWT141]
  
- [15] *Wünning, J.A. (1992) "Brenner für die flammlose Oxidation mit geringer NO-Bildung auch bei höchster Luftvorwärmung" Gaswärme International 41 (1992), Heft 10, Oktober 1992, pp. 438-444* [AWT160]
  
- [16] R002 (internes awtec Projekt), H<sub>2</sub>O-Motor (2003) "Illien, M., "Dampfprozess mit innerer Verbrennung", 2. Oktober, 2003 [AWTP-03-02]