



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Schlussbericht** 27. Juli 2012

---

# **Holzbefeuertes Blockheizkraftwerk mit Heissluftturbine im kleineren Leistungsbereich 80 – 100 kWel**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Biomasse und Holz  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Schmid AG, energy solutions  
Hörnlistrasse 12  
CH-8360 Eschlikon  
[www.schmid-energy.ch](http://www.schmid-energy.ch)

**Autoren:**

Dietrich Vogel, Schmid AG energy solutions, [dietrich.vogel@schmid-energy.ch](mailto:dietrich.vogel@schmid-energy.ch)  
Martin Schibli, Schmid AG energy solutions, [martin.schibli@schmid-energy.ch](mailto:martin.schibli@schmid-energy.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Sandra Hermle

**BFE-Programmleiter:** Sandra Hermle

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** SI / 500488

**Installationsstandort** 715151, 257658

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| 1. Einleitung.....                                   | 5  |
| 2. Hintergrund.....                                  | 5  |
| 3. Der Heissluftkreislauf .....                      | 6  |
| 4. Hauptkomponenten.....                             | 8  |
| 4.1.  Feuerung .....                                 | 8  |
| 4.2.  Heissluftwärmetauscher .....                   | 9  |
| 4.3.  Turbine, Kompressor, Generator.....            | 10 |
| 4.4.  Umrichter .....                                | 12 |
| 4.5.  Steuerung.....                                 | 13 |
| 5. Umsetzung, Installation und Inbetriebnahme.....   | 14 |
| 6. Ergebnisse, Wirkungsgradmessung, Optimierung..... | 18 |
| 7. Betrieb und Wartung .....                         | 19 |
| 7.1.  Betrieb .....                                  | 19 |
| 7.2.  Wartung .....                                  | 19 |
| 8. Wirtschaftlichkeit der Anlage.....                | 20 |
| 9. Zukünftige Herausforderungen .....                | 21 |
| 10.  Schlussfolgerungen .....                        | 21 |

## Zusammenfassung

Mit dem Ziel ein holzbefeuertes Blockheizkraftwerk im kleineren Leistungsbereich (80...100 kW) zu entwickeln und einen Prototyp zu realisieren, wurde dieses Projekt basierend auf einer Mikrogasturbine im Jahr 2010 gestartet.

In einem extern befeuerten Gasturbinenkreislauf wird komprimierte Umgebungsluft in einem Wärmetauscher mittels heisser Rauchgase erhitzt und in einer Turbine entspannt, welche einen Generator antreibt. Die Abluft aus der Turbine wird als Verbrennungsluft (teilweise) in die Feuerung geleitet. Die Rauchgase werden in einem Economiser weiter abgekühlt, und in einem Multizyklon-Partikelabscheider und einem Elektro-Filter gereinigt bevor sie über den Kamin entweichen.

Während einer ausführlichen Entwicklungsphase wurden diverse Varianten von möglichen Heissluftkreisläufen kalkuliert und auf ihre Machbarkeit hin bewertet. Es hat sich gezeigt, dass die besten Gesamtwirkungsgrade mit einer in das System integrierten Abgasrezirkulation erreicht werden können. Daraufhin wurde entschieden, solch einen Kreislauf umzusetzen. Die einzelnen Komponenten wurden für diese entsprechende Variante ausgelegt, bzw. konstruiert.

Die Hauptkomponenten der Anlage sind eine Rostfeuerung auf Basis der UTSR – Vorschubrostfeuerung, ein TÜV-geprüfter - Luft – Rauchgas – Wärmetauscher, eine Kompressor – Turbinen – Generator – Einheit und ein entsprechender Umrichter.

Dieser Prototyp wird mit einer Weiterentwicklung der Schmid Steuerung weitestgehend automatisch gestartet und betrieben. Seit der Inbetriebnahme im November 2011 konnten (bis Juni 2012) 3700 Betriebsstunden gefahren werden.

Mit diesem in Eschlikon installierten System werden Wirkungsgrade von ca. 15% elektrisch und 62% thermisch erreicht, bzw. Leistungen zwischen 80 – 95 kW elektrisch und 350 kW thermisch erzeugt.

Erste Wirtschaftlichkeitsberechnungen haben gezeigt, dass sich die Anlage dank kostendeckender Einspeisevergütung in unter zehn Jahren amortisieren lässt. Der grosse Vorteil dieses Heizkraftwerkes liegt in der relativ kleinen Wärmeleistung. Dies ermöglicht an vielen Standorten einen ganzjährigen Betrieb mit Wärmenutzung.

Ein gewisses Optimierungspotential ist vorhanden und wird in einer geplanten Nullserie umgesetzt.

## 1. Einleitung

Zur Stromerzeugung aus Biomasse werden nach wie vor verschiedenste Technologien (weiter-) entwickelt und getestet (Stirlingmotor, Holzvergasung + Gasmotor, Dampfmotor...). Allerdings sind nur die wenigsten Systeme ausgereift bzw. kommerziell erhältlich.

Wirtschaftlich sinnvoll können momentan vor allem Dampfprozesse im Leistungsbereich ab 400 kW elektrisch (ORC), bzw. ab 1000 kW elektrisch (Wasserdampf) betrieben werden.

Im kleineren Leistungsbereich wird nach wie vor nach einem zuverlässigen Prozess zur Stromerzeugung aus Biomasse gesucht. Aus diesem Grund hat die Schmid AG ein Projekt einer von extern gefeuerten Gasturbine (EFGT) umgesetzt.

Die Anlage liefert 80...95 kW elektrische Energie und mit einer entsprechenden Abwärmenutzung sollen 350 kW thermische Energie ausgekoppelt werden können.

Die Schmid AG hat einen Prototyp seit Herbst 2011 im Werk in Eschlikon in Betrieb. Die Heissluftturbine soll diese Lücke im Bereich kleiner Stromerzeuger mit Holz als Brennstoff füllen.

## 2. Hintergrund

In der Vergangenheit wurden schon Heissluftsysteme beschrieben, getestet und verkauft, jedoch ohne die geplante Leistung je erreicht zu haben, geschweige denn die versprochene Lebensdauer.

Das bis vor einigen Jahren existierende System von Talbott's wird nicht mehr produziert, wies einige technische Mängel auf und konnte keinen störungsfreien Betrieb gewährleisten. Zusammen mit dem Konstrukteur dieser ersten Anlagen konnte die Schmid AG auf einem Grundwissen aufbauen. Das ursprüngliche System anderer Heissluftkreisläufe wurde komplett überdacht und neu bewertet. Daraus resultierten ein neuer Systemkreislauf, eine neue Konstruktion sämtlicher Komponenten und ein optimierter Gesamtwirkungsgrad der Anlage. Von Beginn an war klar, dass die Pilotanlage in Eschlikon im Werk der Schmid AG realisiert werden soll, damit die verschiedenen Projektphasen optimal begleitet und nötige Anpassungen sofort vorgenommen werden können.

Zukünftig soll die Heissluftturbine dort zum Einsatz kommen, wo hohe Laufzeiten mit einer kontinuierlichen thermischen Leistung von 300...350 kW benötigt werden. Diese Anforderung ist beispielsweise bei folgenden Kunden gegeben:

- Mittelgrosse Sägereien die auch in den Sommermonaten ihre Trocknungsanlagen in Betrieb haben,
- Fernheizwerke im Leistungsbereich ab 1.2 - 2 MW,
- Fernheizwerke die auch im Sommer Industrieanlagen kontinuierlich mit thermischer Energie versorgen, grosse Industrieanlagen mit kleiner Sommerlast.

### 3. Der Heissluftkreislauf

Das neue Heissluftsystem erfüllt die Anforderungen einer möglichst hohen Ausnutzung der thermischen Energie bei einer minimalen Zuluft- und Abgasmenge. Daraus resultiert ein hoher Gesamtwirkungsgrad.

Um dieses Ziel erreichen zu können wurden verschiedene Kreisläufe betrachtet, berechnet und mit bekannten Systemen verglichen.

Für die Bewertung der verschiedenen Varianten spielten neben den kalkulierten Wirkungsgraden auch die technische Umsetzung und die Wirtschaftlichkeit der Anlage eine Rolle. Aus diesem Grund wurde ein Kreislauf zur Umsetzung freigegeben, der durch seine Einfachheit überzeugt und trotzdem sehr hohe Wirkungsgrade erreicht.

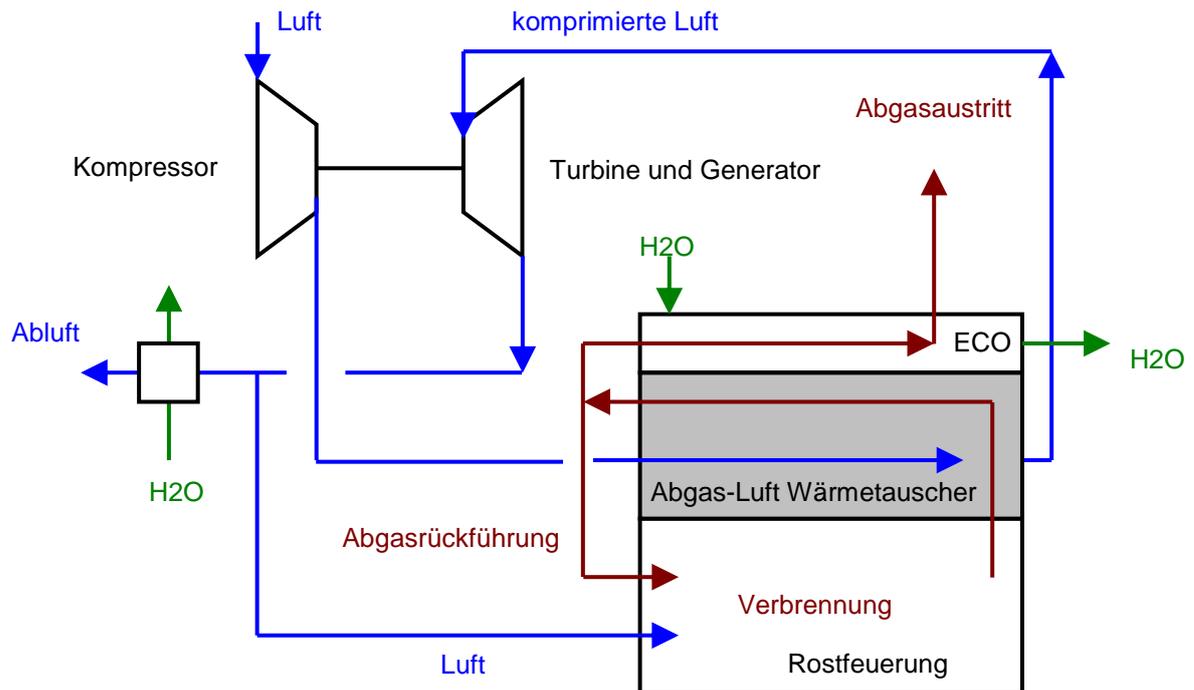


Abbildung 1: Schematische Darstellung des von der Schmid AG umgesetzten Heissluftkreislaufes

Angesaugte Umgebungsluft wird in einem Kompressor verdichtet und anschliessend in einem Heissluftwärmetauscher durch heisses Rauchgas weiter erhitzt (siehe Abbildung 1). In der nachgeschalteten Turbine entspannt sich die Luft und ein Generator erzeugt elektrische Energie.

Die Abluft aus der Turbine wird teilweise als Verbrennungsluft in die Feuerung geführt. Die Rauchgase, die durch die Verbrennung von naturbelassenen Holzhackschnitzeln entstehen, durchströmen den Heissluftwärmetauscher und übertragen einen Teil ihrer Energie an die komprimierte Luft. In einem nachgeschalteten Economiser wird das Rauchgas weiter abgekühlt und gibt thermische Energie an Heizwasser ab.

Um möglichst effizient die Energie der Rauchgase an die komprimierte Luft übertragen zu können, benötigt der Heissluftwärmetauscher ein hohes Volumen auf der Rauchgasseite. Bei den in der Literatur beschriebenen Systemen wird aus diesem Grund die gesamte Turbinenabluft in die Feuerung geblasen. Dadurch erhält man allerdings sehr hohe O<sub>2</sub>-Werte in den Rauchgasen und damit einen hohen Abgasverlust. Das hohe Abgasvolumen wirkt sich negativ auf die Baugrösse von Abgasventilator und Filtersystem aus.

Mit einer Abgasrückführung von Rauchgasen wird das rauchgasseitige Volumen über den Heissluftwärmetauscher hoch gehalten und andererseits das O<sub>2</sub> im Abgas reduziert was wiederum die Abgasverluste senkt und den Gesamtwirkungsgrad anhebt.

Dadurch reicht es aus, dass die Abluft aus der Turbine nur zu einem Anteil in die Feuerung als Verbrennungsluft geblasen wird. Die heisse Turbinenabluft kann teilweise anderweitig

genutzt werden. Vorstellbar sind hier verschiedene Abwärmenutzungssysteme wie z.B. Auskopplung der thermischen Energie als Warmwasser.

Für dieses System wurde ein Gesamtwirkungsgrad zwischen 77 % und 84 % berechnet, je nach genutzter Abwärme aus der Turbinenabluft. In Kapitel 6 werden diese Werte mit den tatsächlich erreichten Wirkungsgraden verglichen und erläutert.

## 4. Hauptkomponenten

### 4.1. Feuerung

Die Feuerung basiert auf einer UTSR1200 Vorschubrostfeuerung, siehe Abbildung 2.



1. Brennstoffzuführung
2. Primärbrennkammer
3. Luftgekühlter Flachbett-Vorschubrost
4. Unterrostentaschung
5. Austragung der Rostasche
6. Zugang Sekundärbrennkammer
7. Strahlungsgewölbe
8. Schamottmasse
9. Sekundärbrennkammer
10. 3-Zug-Wärmetauscher
11. Fronttüre mit automatischer Druckstossabreinigung
12. Multizyklon Partikelabscheider
13. Abgasventilator
14. Rosttüre

Abbildung 2: UTSR Vorschubrostfeuerung

Dabei wurden folgende Veränderungen vorgenommen:

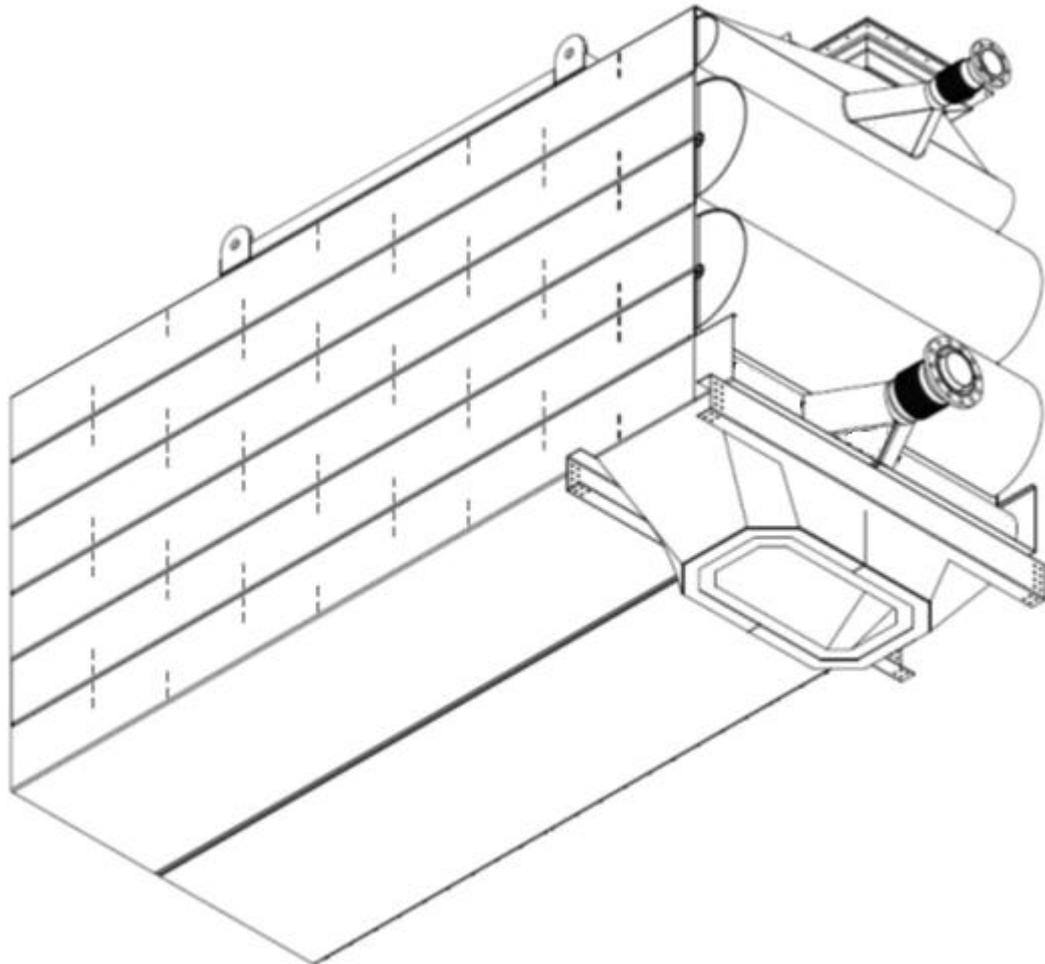
- Kein Warmwasser-Kessel (Pos. 10, 11)
- Spezielle Ausmauerung (Pos. 8)
- Mehr Sekundärluft
- Abgasrezirkulation in Primär- und Sekundärbrennkammer
- Kleinere Feuerungswärmeleistung

Anstatt des Warmwasser-Kessels werden die heißen Abgase im Heissluft-Wärmetauscher genutzt.

## 4.2. Heissluftwärmetauscher

Eine der wichtigsten Auslegungskomponenten in einem EFGT-Kreislauf ist der Heissluftwärmetauscher. Der Wirkungsgrad der Anlage ist stark abhängig von der Grädigkeit und vom Druckverlust im Wärmetauscher sowie von der Turbineneintrittstemperatur bzw. von der Rauchgaseintrittstemperatur in den Wärmetauscher. Damit ergibt sich auch gleich eine weitere Herausforderung: die Materialfrage für den Heissluftwärmetauscher.

Die Temperaturen sind, dank der auf kleinere Eintrittstemperaturen optimierten Turbine, im Vergleich zu anderen Heissluftprojekten relativ niedrig und ermöglicht es, mit bezahlbaren Werkstoffen für den Wärmetauscher zu arbeiten. Dieser Punkt ist nicht nur entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage, sondern auch für die Haltbarkeit der Wärmetauscherrohre (Heissgaskorrosion).



**Abbildung 3: Heissluftwärmetauscher mit Luft- und Rauchgasseitigen Anschlüssen**

Der Wärmetauscher wurde als Behälter der Druckgeräterichtlinie eingestuft. Er wurde nach der EG-Entwurfsprüfbescheinigung eines Druckgerätes nach der Kategorie III nach Modul B1 + F geprüft und zertifiziert. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, konnten in Zusammenarbeit mit dem TÜV-Süd diverse FEM-Berechnungen und Festigkeitsoptimierungen durchgeführt werden.

Der Heissluftwärmetauscher wurde für dieses Projekt neu berechnet, ausgelegt, geprüft, konstruiert und hergestellt. Er ist 4.5m lang, 2.3m hoch, 2m breit und wiegt über elf Tonnen.

Eine manuelle Reinigung des Wärmetauschers ist in periodischen Abständen vorgesehen (Abhängig von Verschmutzungsgrad, d.h. Laufzeit, Brennstoffqualität und Last). Eine automatische Abreinigung wäre für zukünftige Anlagen von Vorteil.

### 4.3. Turbine, Kompressor, Generator

Die Turbine-Generator-Unit (TGU) mit den Hauptbestandteilen Turbine, Kompressor, Generator ermöglicht die Auskoppelung elektrischer Energie und ist damit eine der Hauptkomponenten der Anlage. Die Abbildung 4 zeigt die TGU bestehend aus:

1. Turbine; Eintritt hinten, Austritt links
2. Kompressor; Eintritt hinten, Austritt oben
3. Generator
4. Bypass-Ventil mit Regelventil
5. Klemmenbrett
6. CMM (Condition Monitor Module) Steuerungskasten
7. Öltank
8. Plattenwärmetauscher
9. Ölfilter
10. Kühlwasser-Anschlüsse
11. Grundrahmen

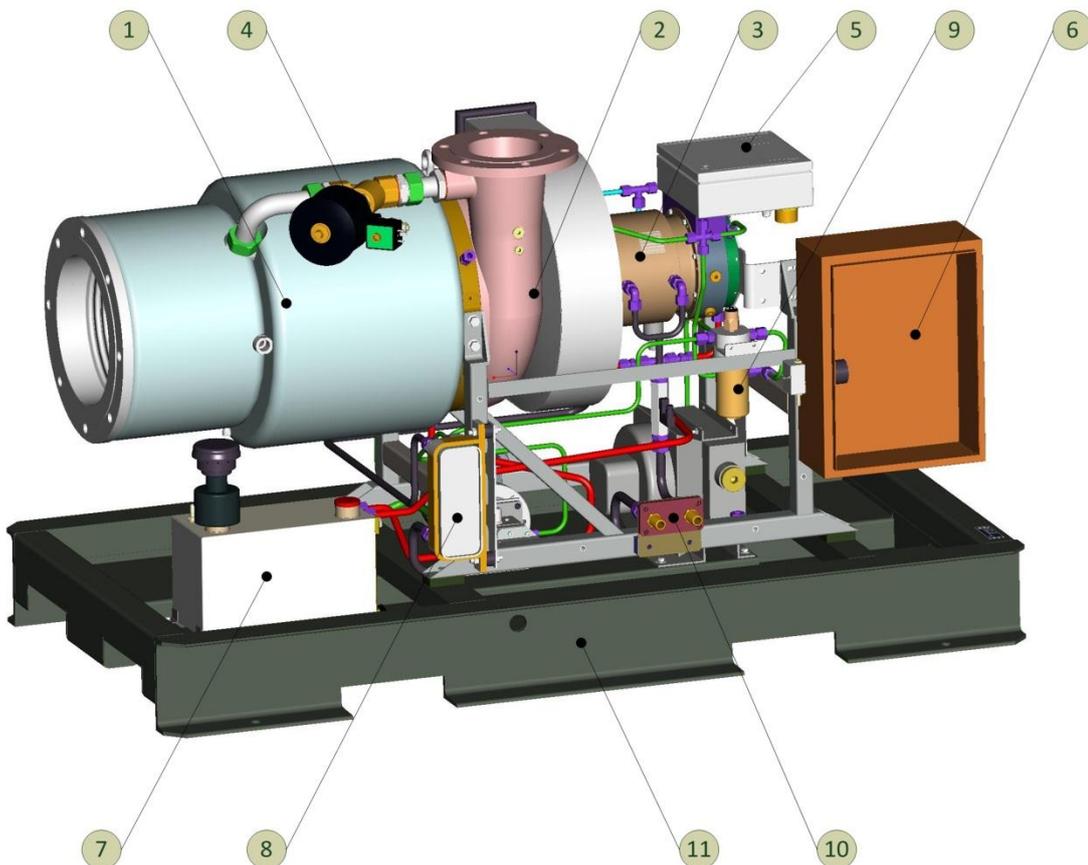


Abbildung 4: Turbine-Generator-Unit

In der Abbildung nicht ersichtlich sind die Ölpumpe und weitere Plattenwärmetauscher. Der Generatormantel ist wassergekühlt. Zudem erfolgt die Kühlung und Schmierung der Lager über den Ölkreislauf und eine Rotorkühlung mittels komprimierter Luft. Ein Ölabscheider gewinnt Öl zurück und vermindert somit den Ölverbrauch. Die Sicherheit wird über das drucklos geöffnete Regelventil des Bypasses gewährleistet. Bei geöffnetem Bypass wird die komprimierte Luft direkt zum Ausgang der Turbine geleitet, wodurch das System abgebremst wird bzw. ausläuft. Zum Starten der Turbine wird Druckluft auf das Kompressor-Rad geblasen.

Die nominale Leistung von 100kW bezieht sich auf Standardbedingungen, d.h. 0 m Höhe, einem Druck von 101'325 Pa, einer Kompressor-Eintrittstemperatur von 15 °C und 60% relative Luftfeuchtigkeit. Die am Betriebsstandort zu erwartende Leistung verringert sich bei tieferem Luftdruck, höheren Temperaturen und kleinerer Luftfeuchtigkeit. Weichen die Parameter stark vom Auslegepunkt ab, muss die Drehzahl angepasst werden, um einen effizienten und sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Gasturbinen gehören zum Stand der Technik und sind bestens erprobt. Speziell an dieser Ausführung ist die Optimierung auf die tiefe Eintrittstemperatur und die eher kleine Baugröße. Weiter musste der Generator auf diese Anwendung angepasst werden.

#### 4.4. Umrichter

Der elektrische Umrichter wandelt den hochfrequenten Strom des Generators um und ermöglicht die Einspeisung des Stroms ins Netz. Verwendet werden zwei 60kW Umrichter, wobei einer als Master und der andere als Slave arbeitet. Beide Umrichter teilen sich jedoch die Leistung immer zu gleichen Teilen. Die Abbildung 5 zeigt das Modell eines Umrichters (Höhe 1800mm, Breite 480mm, Tiefe 400mm, Gewicht 110kg). Die Umrichter Einheit besteht grundsätzlich aus drei Komponenten:

- Bremswiderstand
- Spannungswandler (AC/DC & DC/AC)
- Netz Schnittstelle

An die Umrichter ist zudem ein Kühl-Lüfter mit 6 kW Kühlleistung angeschlossen.

Der Bremswiderstand gewährleistet die Sicherheit bei einem plötzlichen Verlust der Last. Für eine kurze Zeit bis zum Stopp der Turbine kann der Bremswiderstand als Last für die Turbine-Generator-Einheit dienen und verhindert so ein Beschleunigen der Turbine. Ein Lastverlust ist möglich bei einem plötzlichen Netzfehler oder bei einem Fehler im Umrichter. Der Spannungswandler besteht aus einem sechsphasigen Gleichrichter (AC-DC) und drei einphasigen Wechselrichtern (DC-AC). Die Wechselrichter stellen Dreiphasenstrom mit 400V (Phase zu Phase) und 50 Hz, so dass er ins Netz eingespeist werden kann. Die Netz Schnittstelle besteht aus einem EMV-Filter (Elektromagnetische Verträglichkeit), einem Kontaktgeber, einer 24V Spannungsversorgung und den Anzeigeleuchten.

Das Zusammenspiel zwischen Generator und Umrichter ist von entscheidender Bedeutung. Die vom Generator gelieferte Spannung muss im zulässigen Bereich des Umrichters liegen. Auf der anderen Seite kontrolliert der Umrichter über das CMM mittels der anliegenden Last die Drehzahl der Turbinen-Generator-Einheit.

Für diesen Prototyp wurde während der Projektphase der Hersteller des Umrichters gewechselt. Schwierige Zusammenarbeit und steigende Kostenforderungen führten zu diesem Schritt.

Die Evaluation eines anderen Herstellers war dementsprechend wichtig und nahm auch seine Zeit in Anspruch. Sämtliche Schnittstellen mussten neu abgeklärt werden. Im Betrieb hat sich dann gezeigt, dass der gewählte Umrichter sehr gut funktioniert. Das Herunterfahren der Anlage bei Problemen mit dem Stromnetz funktionierte einwandfrei. Es gab ungefähr vier solche Vorfälle.

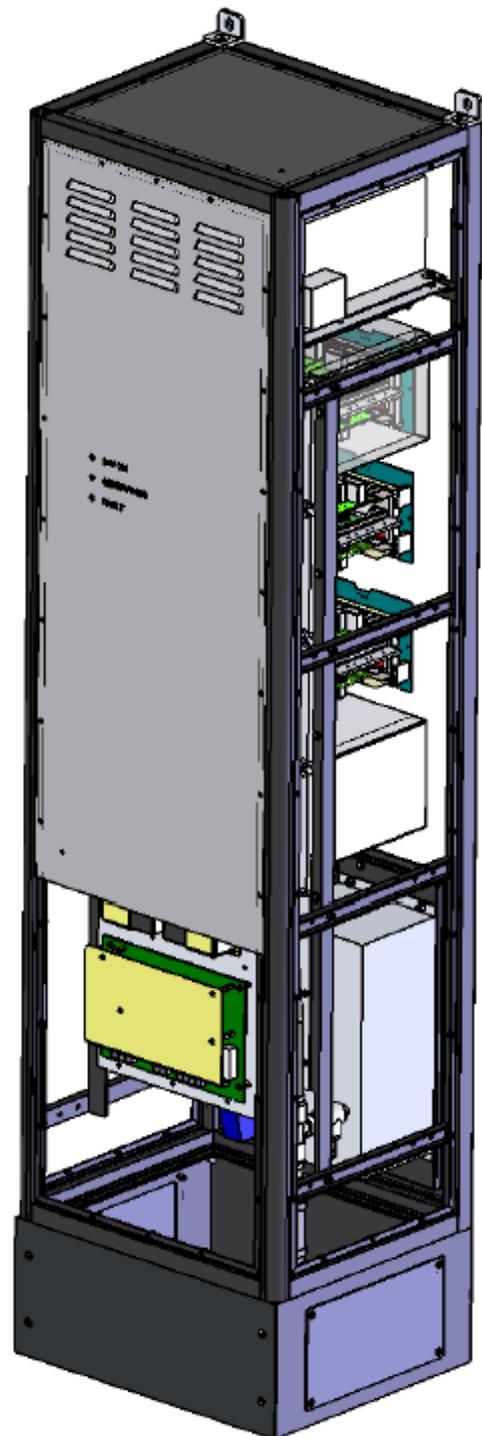


Abbildung 5: Umrichter

#### 4.5. Steuerung

Die Steuerung der Heissluftturbine basiert auf der Standard Steuerung *PersonalTouch* der Schmid AG. Diese besteht aus einem Touch-Bedienpanel und einer SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) mit den dazugehörigen Ein- und Ausgängen. Die Schmid Steuerung bildet die übergeordnete Steuerung der Gesamtanlage mit Brennstoffzufuhr, Feuerung, Ventilatoren, Abgasreinigung, Aschetransport, Turbine-Generator-Einheit, Umrichter, Kühlsysteme usw. Die Steuerung des Umrichters und der Turbinen-Generator-Einheit ist über einen CAN-Bus mit der Hauptsteuerung verbunden. Verglichen mit einer Standard Steuerung der Schmid AG werden einige zusätzliche Funktionen bereitgestellt. Dies sind unter anderem:

- Kommunikation mit dem Umrichter
- Regelung der drei verschiedenen Ventilatoren und deren Zusammenspiel
- Ansteuerung zusätzlicher Klappen und (Bypass-)Ventile
- Aufzeichnung zusätzlicher Messwerte
- Zusätzliche Störungen, Warnungen und Sicherheitsfunktionen
- Regelung der Startluft
- Ansteuerung der Kühl- und Schmiersysteme
- Automatischer Start-Ablauf mit diversen Betriebszuständen (Anfeuern, Vorwärmen, Beschleunigen, Stromproduktion, ... )

Um den Überblick über die Anlage zu haben ist neben dem *PersonalTouch*-Bedienpanel eine Visualisierung auf einem PC eingerichtet. Über eine LAN-Schnittstelle werden die Messdaten an den Visualisierungs-PC weitergeleitet. Verschiedene Ansichten der Anlage und eine Linienschreiber-Funktion ermöglichen so die Auswertung und Beobachtung der Anlagenwerte. Mittels Internet-Zugriff auf den Visualisierungs-PC können Fernwartungen durchgeführt werden.

## 5. Umsetzung, Installation und Inbetriebnahme

Der Prototyp der Heissluftturbine wurde auf dem eigenen Werkareal der Schmid AG in Eschlikon realisiert. Dies hat den Vorteil, dass keine grossen Wege in Kauf genommen werden müssen und die Anlage somit bestens betreut werden konnte. Relativ enge Platzverhältnisse waren jedoch etwas nachteilig. Die Feuerung wurde in der alten Sandstrahlerei platziert. Der Raum musste jedoch abgesenkt werden.

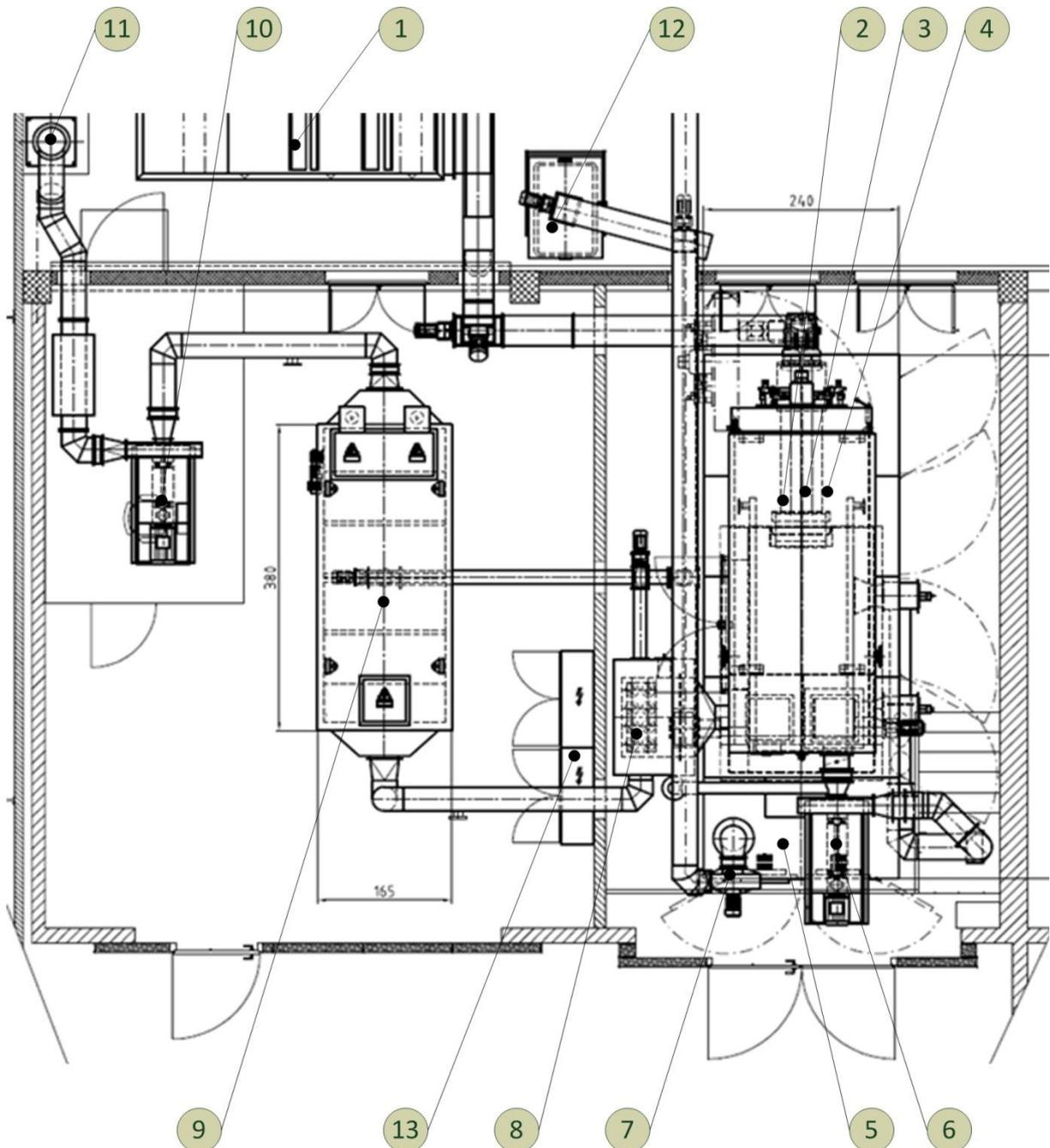


Abbildung 6: Einbauplan Grundriss

Die Abbildung 6 zeigt den Grundriss des Einbauplanes. Die Feuerung, der Heissluftwärmetauscher und der Nachwärmetauscher (Pos. 2,3 und 4) liegen übereinander.

Ersichtlich sind:

1. Brennstoff Silo-Container
2. Vorschubrostfeuerung auf Basis UTSR1200
3. Heissluft-Wärmetauscher
4. Nachwärmetauscher (NWT)
5. Turbinenraum mit Turbinen-Generator-Einheit, Umrichter und Abluftwärmetauscher
6. Rezi-Ventilator
7. Abluft-Ventilator
8. Multizyklon-Partikelabscheider
9. Elektro-Filter
10. Abgasventilator
11. Kamin
12. Asche-Container
13. Schaltschränke

In der Abbildung 7 ist die Seitenansicht des Einbauplanes ersichtlich. Die Feuerung, der Heissluft-Wärmetauscher und der Nachwärmetauscher haben zusammen eine Höhe von 7.6m, sind 7m lang und 2.5m breit.

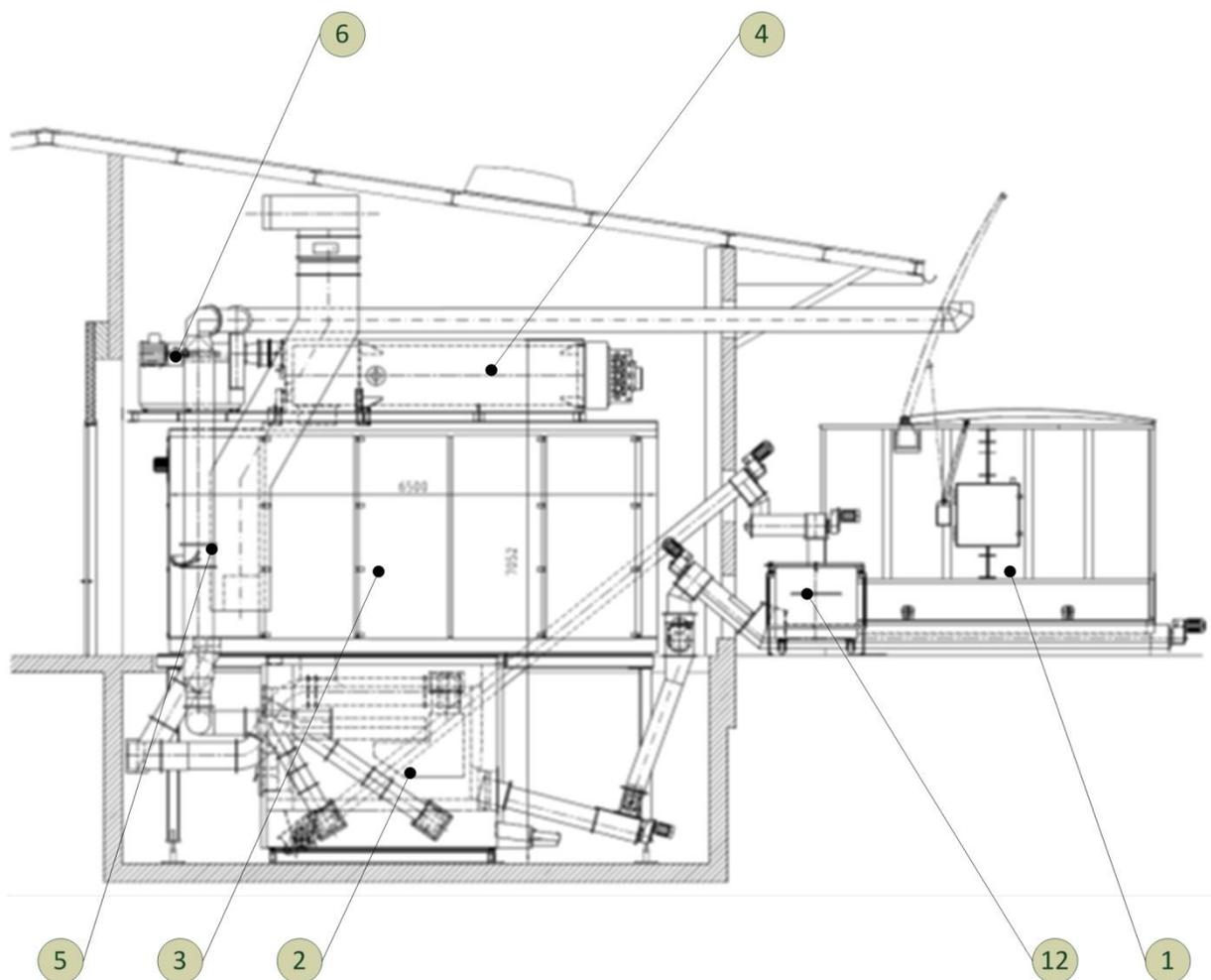


Abbildung 7: Einbauplan Seitenansicht

Zu Verzögerungen bei der Umsetzung kam es hauptsächlich in Zusammenhang mit dem Heissluft-Wärmetauscher und dessen langer Lieferfrist.

Nach der Ausmauerung und Trocknung wurde der Heissluft-Wärmetauscher isoliert, in den dafür vorgesehenen Container gehoben und positioniert, siehe Abbildung 8. Schlussendlich wurde dann der Container mit dem Wärmetauscher auf Rollen auf die Trägerschiene oberhalb der Feuerung geschoben und später abgesenkt. Als nächstes konnte dann die Turbine im Container positioniert und die Umrichter montiert werden, siehe Abbildung 9. Bei der Montage war stets darauf zu achten, dass keine Verschmutzung, Späne oder gar Schrauben oder Muttern in die Turbine, den Kompressor bzw. deren Zuluft-Kanäle gelangen. Fremtteile könnten den Kompressor oder die Turbine zerstören bei der Inbetriebnahme. Es war also spezielle Sorgfalt geboten. Schliesslich wurden alle Anschlüsse montiert, Sensoren eingebaut und verkabelt, usw.

Nach Fertigstellung der Installation wurden sämtliche Komponenten im kalten Zustand getestet und alles für die Heissinbetriebnahme vorbereitet. Für die Anlage wurde ein „Sicherheitsnachweis Elektroinstallation“ (SiNa) erstellt, welcher bestätigt, dass die Anforderungen der Gesetzgebung eingehalten werden und die Anlage den anerkannten Regeln der Technik entspricht.

Als erster Schritt der Heissinbetriebnahme wurde die Feuerung langsam aufgeheizt und die Mauerung über mehrere Tage getrocknet. Für den entscheidenden Tag des Turbinen-Starts vom 2. November 2011 waren dann die Experten des Turbinen-Herstellers und jene des Umrichters vor Ort um die Inbetriebnahme zu begleiten. Durch Mitwirken aller Beteiligten gelang es dann die Turbine zu starten und erstmals mit dieser Anlage Strom zu produzieren. Die Heissluftturbine wurde dann am Abend gestoppt und am nächsten Tag erneut gestartet. Dabei wurden nochmals als Sicherheitsfunktionen überprüft. Dies erlaubte dann bald in den unbeaufsichtigten 24-h-Betrieb überzugehen.



Abbildung 8: Montage Heissluft-Wärmetauscher



Abbildung 9: Turbinenraum bei Montage

In der Tabelle 1 ist der zeitliche Projektablauf grob dargestellt.

| <b>Projektphasen</b>            | <b>Dauer</b>                 | <b>Bemerkungen / Verzögerungen durch</b>  |
|---------------------------------|------------------------------|---|
| Planungs- und Entwurfsphase     | Mai 2010 – Dezember 2010     | <ul style="list-style-type: none"><li>- Entwurfsprüfung des Wärmetauschers durch TÜV</li><li>- Produktewechsel Umrichter</li><li>- Lieferzeit WT-Bauteile</li></ul> |
| Umsetzung und Installation      | Dezember 2010 – Oktober 2011 | <ul style="list-style-type: none"><li>- externe Produktion des WT</li><li>- Einbau WT in Container</li><li>- Verkabelung der Komponenten</li></ul>                  |
| Inbetriebnahme und 1. Testphase | November 2011 – Juni 2012    | <ul style="list-style-type: none"><li>- Betrieb ohne grössere Probleme</li></ul>  |

**Tabelle 1: zeitlicher Projektablauf**

## 6. Ergebnisse, Wirkungsgradmessung, Optimierung

Der Prototyp der Heissluftturbine wurde am 02.11.2011 in Eschlikon in Betrieb genommen. Seit diesem Zeitpunkt wurden bei verschiedenen Randbedingungen einige direkte und indirekte Wirkungsgradbestimmungen durchgeführt. Ausserdem wurden während einer kontinuierlichen Messung sämtliche Daten der Anlage und die Emissionen über 55 Stunden aufgezeichnet. Diese Messung wurde von einem externen Messbüro (Ingenieurbüro Willi Vock) durchgeführt, bzw. begleitet. Die Auswertung wurde vom Ingenieurbüro Willi Vock vorgenommen, sämtliche Daten hat Herr Jenni (ardens GmbH, siehe Tabelle 2 Tabelle 2) und die Schmid AG getrennt voneinander ausgewertet.

|  | Leistung 100% | Teilleistung 50% |
|--|---------------|------------------|
| Feuerungswärmeleistung (Brennstoffleistung)                              | 605 kW        | 468 kW           |
| feuerungstechnischer Wirkungsgrad $\eta_F$                               | 91 %          | 91.5%            |
| Gesamtwärmeleistung (Wärmezählerleistung)                                | 337 kW        | 271 kW           |
| thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th}$                                     | 55.7 %        | 57.9 %           |
| elektrische Wirkleistung Generator                                       | *81.57 kW     | *42.40 kW        |
| elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{ei}$ brutto bez. Feuerungswärmeleistung | 13.48%        | 9.06%            |
| Elektrische Wirkleistung Bezug (elektrischer Hilfsenergiebedarf)         | *13.18 kW     | *10.67 kW        |
| elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{ei}$ netto bez. Feuerungswärmeleistung  | 11.30%        | 6.78%            |

\* Mittelwert über Messintervall

**Tabelle 2: Wirkungsgradberechnung der ardens GmbH aus den durch Ingenieurbüro Willi Vock gemessenen Daten während der 55 Stundenmessung vom 27. - 29.03.2012**

Während dieser Messung lag die Turbineneintrittstemperatur unter dem Auslegungspunkt, was zu einer etwas tieferen Leistung führte. Im optimalen Arbeitspunkt sind bessere Wirkungsgrade zu erwarten.

Neben dem nicht optimalen Arbeitspunkt wurde an verschiedenen Stellen Optimierungspotential ausgemacht. Diese sind unter anderem:

- Bessere Einbindung der Anlage ins Gebäudekonzept
- Neudimensionierung einiger Komponenten
- Mehr Isolation
- Senkung des elektrischen Hilfsenergiebedarfs

Mit den geplanten Verbesserungen wird eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades um 1-3% und des thermischen Wirkungsgrades um 5-12% gerechnet.

Eine Gegenüberstellung des Gesamtwirkungsgrades mit einer modernen Holzfeuerung macht keinen Sinn. Im Vergleich zu einer herkömmlichen Feuerung zur Erzeugung von Warmwasser wird bei dieser Anlage fast der doppelte Luft-/Rauchgasmassenstrom zu- und abgeführt was einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad der Anlage hat. Die Gesamtwirkungsgrade beider Anlagentypen sind nicht miteinander vergleichbar, da die Exergie (der Gütegrad) dieser Leistungen sehr unterschiedlich ist.

## **7. Betrieb und Wartung**

### **7.1. Betrieb**

Die Heissluftturbine lief seit der Inbetriebnahme im November 2011 bis im Juni 2012 über 3700 Stunden. Die Anlage läuft ohne Beaufsichtigung und wird wärmegeführt betrieben, d.h. die Brennstoffzufuhr ist von der Wärmeabnahme abhängig. Ein Teillast-Betrieb wie man ihn bei anderen Holzfeuerungen kennt ist mit der Heissluftturbine nicht möglich. Ohne den Betrieb der Turbine ist auch keine Wärmeproduktion möglich. Die Leistung der Turbine ist zwar praktisch beliebig gegen unten regulierbar, aber wegen den hohen Temperaturen und Massenströmen ergibt sich auch bei einer sehr kleinen elektrischen Leistung von z.B. 20kW eine minimale thermische Leistung in der Grössenordnung von 250kW. Bei so tiefen Leistungen ist der elektrische Wirkungsgrad ungenügend. Die Heissluftturbine eignet sich also insbesondere für den kontinuierlichen Betrieb auf Vollast mit automatischem Ausgleich kleiner Leistungsschwankungen. Der Bandlastbetrieb könnte auch mit einem entsprechend ausgelegten Speicher ermöglicht werden. Für Lastspitzen ist ein zweiter Heizkessel vorzusehen.

Das Starten der Anlage, vom Anfeuern bis zur Stromerzeugung, dauert aus dem kalten Zustand ungefähr 3 bis 5 Stunden. Dafür ist ein automatisierter Start-Ablauf vorgesehen. Dieser wird noch verbessert, um einen möglichst reibungslosen und bedienerfreundlichen Start der Anlage zu erlauben.

Ein Langsam-Stopp bewirkt das Ausschalten des Automatikbetriebs und die Brennstoffzufuhr wird gestoppt. Die Turbine läuft aber noch einige Zeit weiter solange bis die Temperaturen zu niedrig werden, um Strom zu erzeugen. Dann werden die Turbinen-Bypässe geöffnet und innert Kürze läuft die Turbine aus. Bei einem Not-Stopp werden die Bypässe sofort geöffnet, was die Turbine sofort abbremst.

### **7.2. Wartung**

Bei der Turbine sind Wartungsarbeiten nach 10'000 Betriebsstunden, 1000 Starts oder 3.5 Jahren vorgesehen, je nach dem was früher erreicht wird. Die Lebensdauer ist auf den vierfachen Zeitraum ausgelegt. Danach muss die Turbine ersetzt werden.

Gegenüber einer normalen Holzfeuerung entsteht weiterer Wartungsaufwand beim Heissgas-Wärmetauscher, dem Zuluft-Filter, den Kühllüftern und dem Ölkreislauf. Die bisherigen Erfahrungen mit dem Heissgas-Wärmetauscher lassen vermuten, dass eine jährliche Reinigung notwendig sein wird. Über einen Mechanismus zur automatischen Abreinigung wird nachgedacht. Die Zuluft-Filter und Kühllüfter müssen regelmässig gegen verstopfen überprüft werden. Bei den Kühllüftern muss ausserdem der Stand im Kühlwassertank kontrolliert werden. Auch eine Füllstandskontrolle im Ölkreislauf der Turbine ist notwendig. Ansonsten ist im üblichen Mass für Sauberkeit und Ordnung rund um die Anlage zu sorgen.

## 8. Wirtschaftlichkeit der Anlage

Im diesem Kapitel soll anhand eines Beispiels die Wirtschaftlichkeit der Anlage diskutiert werden. Dazu wird im Folgenden der Ertrag durch den Verkauf der thermischen und elektrischen Energie den Kosten gegenübergestellt. Je nach Standort und Betriebsart kann die Ertragsrechnung stark abweichen. Die zur Berechnung verwendeten Daten beziehen sich auf die Erfahrungen mit der Prototyp-Anlage. Das Serienprodukt wird optimiert, dadurch verbessert sich auch die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

| Betriebsdaten        |        | Jährliche Produktion     |                             |
|----------------------|--------|--------------------------|-----------------------------|
|                      |        |                          | <i>7500 Betriebsstunden</i> |
| Thermische Leistung  | 350 kW | Thermische Energie       | 2'625'000 kWh/a             |
| Elektrische Leistung | 83 kW  | Elektrische Energie      | 622'499 kWh/a               |
| Eigenverbrauch el.   | 15 kW  | Eigenverbrauch el.       | 112'500 kWh/a               |
| Einspeiseleistung    | 68 kW  | Eingespeiste el. Energie | 509'999 kWh/a               |

Tabelle 3: Produktion elektrischer und thermischer Energie

| Vergütung gem. KEV (über 8760h gemittelt) | 58.2 kW       | Jährlicher Ertrag     |
|---|---------------|-----------------------|
| Grundvergütung                            | 27.58 Rap/kWh | 140'658 SFr./a        |
| Nat. Holz Bonus                           | 7.86 Rap/kWh  | 40'086 SFr./a         |
| <b>Verkauf thermische Energie</b>         |               |                       |
| Thermische Energie                        | 8 Rap/kWh     | 210'000 SFr./a        |
| <b>Total Rohertrag</b>                    |               | <b>390'744 SFr./a</b> |

Tabelle 4: Rohertrag

Je nach Lieferumfang belaufen sich die Investitionskosten auf ungefähr SFr. 1'250'000 (ohne Bau). Bei einem Zinssatz von 3% und einer Abschreibung innert zehn Jahren entspricht dies jährlichen Kapitalkosten von 146'538 SFr.

|  |                     |
|--|---------------------|
| Kapitalkosten  | 146'538 SFr./a      |
| Brennstoffkosten, 6'006 Sm <sup>3</sup> /a, 30 SFr/Sm <sup>3</sup> | 180'165 SFr./a      |
| Verbrauchskosten   | 6'000 SFr./a        |
| Entsorgungskosten  | 7'000 SFr./a        |
| Wartung und Unterhalt  | 50'000 SFr./a       |
| Total Aufwand Betriebsjahr   | 389'704 SFr./a      |
| Total Einnahmen  | 390'744 SFr./a      |
| <b>Gewinn</b>  | <b>1'040 SFr./a</b> |

Tabelle 5: Kostenzusammenstellung

Unter Berücksichtigung sämtlicher Kostenpunkte bleibt bei dieser Beispielrechnung ein jährlicher Gewinn von SFr. 1'040, siehe Tabelle 5. Somit ist eine Abschreibung der Anlage innert zehn Jahren möglich. Die Beispielrechnung zeigt aber auch, dass ohne die kostendeckende Einspeisevergütung ein wirtschaftlicher Betrieb schwierig zu erreichen ist.

## 9. Zukünftige Herausforderungen

Die Umsetzung von der Projektidee bis zum Betrieb der Heissluftturbine war sehr erfolgreich. Als nächstes besteht die Herausforderung darin, die Anlage zu einem kommerziellen Produkt weiterzuentwickeln. Dazu sollen einerseits vorgesehene Verbesserungen in den nächsten Projekten umgesetzt werden und andererseits müssen die Kosten gesenkt werden. Ein Risikofaktor bei den Kosten sind die Edelstahlpreise, welche einen grossen Einfluss auf den Preis des Heissluft-Wärmetauschers haben. Mögliche Einsparungen gibt es bei den Einkaufsteilen durch grössere Stückzahlen. Weiter kann auf diverse Sensoren mit rein informativer Funktion verzichtet werden. Eine bessere Einbausituation könnte auch einen positiven Effekt auf die Kosten haben. Negativ dürfte sich die lange Warteliste für die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) auswirken. Ohne die Förderbeiträge für erneuerbaren Strom ist es schwierig die Anlage wirtschaftlich zu betreiben.

Zur Kommerzialisierung der Anlage gehört aber auch die Aktualisierung und Fertigstellung sämtlicher Zeichnungen und Stücklisten, die Einbindung ins ERP System, das Supply Chain Management, sowie die Schulung von Monteuren und Inbetriebnahme Mitarbeitern. Um die Kommerzialisierung voranzutreiben sollen voraussichtlich zwei Anlagen als Nullserie bei interessierten Kunden platziert werden. Dies erfordert auch die Verbesserung der Bedienfreundlichkeit und der Zuverlässigkeit der Anlage.

Neben der Entwicklung zum kommerziellen Produkt ist der Weiterbetrieb der Anlage wichtig, um Erfahrungen im Langzeitbetrieb und der Lebensdauer der einzelnen Komponenten zu sammeln.

## 10. Schlussfolgerungen

Nach diversen Problemen mit der Herstellung, der Lieferung von Komponenten sowie der Montage, konnte das System ohne grössere Störungen in Betrieb genommen werden. Seit dem wurden ohne besonderen Wartungsaufwand 3700 Betriebsstunden (bis Juni 2012) erreicht. Während dem bisherigen Betrieb haben sich folgende Erkenntnisse herauskristallisiert:

- Die Steuerung der gesamten Anlage aus dem Hause Schmid garantiert einen hohen Automatisationsgrad der Anlage.
- Die Optimierung des Heissluftkreislaufes mit rezirkulierenden Rauchgasen hat sich bestätigt.
- Für die Nullserie sind diverse Verbesserungen geplant wie z.B.: stärkere Isolation, Reduzierung des Eigenstrombedarfs und Neudimensionierung diverser Komponenten.
- Der Aufstellungsort (Höhe über Meer) zukünftiger Projekte muss berücksichtigt werden in Bezug auf den Wirkungsgrad der Heissluftturbine.
- Besonders geeignet ist die Anlage als Bandlastkessel in Kombination mit einem Spitzenlastkessel.
- Eine Abschreibung der Anlage unter 10 Jahren ist dank der KEV möglich.

Der Betrieb dieses Prototyps ist erfolgsversprechend. Der Einsatz von weiteren Anlagen bei Kunden in Form einer Nullserie ist auf das Jahr 2013 geplant.