



## Schlussbericht

---

# Weiterentwicklung und Optimierung einer Heissluftturbine im kleineren Leistungsbereich (80-95 kWel)





Weiterentwicklung und Optimierung einer  
Heissluftturbine im kleineren  
Leistungsbereich (80-95 kWel)



**Datum:** 23.03.2017

**Ort:** Bern

**Auftraggeberin:**

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

**Auftragnehmer/in:**

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

**Autor/in:**

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

**BFE-Bereichsleitung:** Yasmine Calisesi, [yasmine.calisesi@bfe.admin.ch](mailto:yasmine.calisesi@bfe.admin.ch)

**BFE-Programmleitung:** Sandra Hermle, [sandra.hermle@bfe.admin.ch](mailto:sandra.hermle@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/500980-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Mit dem Ziel ein holzbefeuertes Blockheizkraftwerk in kleinerem Leistungsbereich als Demonstrationsanlage zu realisieren, wurde dieses Projekt als Nachfolgeprojekt eines in Eschlikon installierten Prototypen, basierend auf einer von extern befeuerten Gasturbine, gestartet.

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

Nach einer Entwicklungsphase musste festgestellt werden, dass die Beschaffung der geplanten Turbineneinheit nicht mehr möglich war. Eine neue Turbogruppe wurde evaluiert und daraufhin das gesamte System neu ausgelegt und berechnet.

Die Herstellung in Eschlikon und die Montage der Komponenten in der Heizzentrale Düdingen waren aufwendig, verliefen aber weitestgehend ohne Verzögerung. Während der Inbetriebnahme musste vor allem der Schmier- und Kühlkreis der Turbogruppe optimiert und angepasst werden.

Seit der ersten Stromerzeugung im Mai 2016 konnte inzwischen auf einen kontinuierlichen Betrieb gewechselt werden. Die erreichten elektrischen Leistungen sind stark von der Umgebungstemperatur abhängig und liegen mit knapp 100 kW in dem erwarteten Bereich.

Eine Optimierung der Abstimmung der Komponenten der Turbogruppe zueinander zeigt noch Verbesserungspotential und ist geplant.



Weiterentwicklung und Optimierung einer  
Heissluftturbine im kleineren  
Leistungsbereich (80-95 kWel)

## **Verzeichnis der Anhänge**

Anhang 1: Energieflussdiagramm (in diesem Dokument)

Anhang 2: durchgeführte und geplante Veranstaltungen

Anhang 3: Presseschau

Anhang 4: Marketing Schmid AG



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Verzeichnis der Anhänge .....	4
Inhaltsverzeichnis .....	5
Abkürzungsverzeichnis .....	7
1 Einleitung .....	8
2 Hintergrund .....	8
3 Der Heissluftkreislauf .....	8
4 Hauptkomponenten .....	9
4.1 Die Feuerung .....	9
4.2 Der Heissluftwärmetauscher.....	10
4.3 Die Turbogruppe .....	11
4.3.1 Lieferantenwechsel .....	11
4.3.2 Turbolader und Abgasturbinen .....	11
4.4 Steuerung .....	12
5 Umsetzung, Installation und Inbetriebnahme .....	13
5.1 Herstellung und Vormontage in Eschlikon.....	13
5.2 Lieferung, Einbringung und Montage .....	14
5.3 Inbetriebnahme .....	17
5.4 Probleme und Projektverzögerungen.....	17
6 Ergebnisse .....	18
6.1 Technische Daten und Messungen.....	18
6.2 Emissionen .....	21
6.3 Umgesetzte Verbesserungen gegenüber Prototypenanlage.....	21
7 Betrieb, Wartung und Ausblick.....	22
7.1 Betrieb und Wartung .....	22
7.2 Ausblick .....	22
8 Kommunikationsmassnahmen.....	24
8.1 Einleitung .....	24
8.2 Website <a href="http://www.heissluftturbine.ch">www.heissluftturbine.ch</a> .....	25
8.3 Vorstellungen / Tagungen / Konferenzen .....	26
8.4 Fachtagung HLT .....	26
8.5 Drucksachen .....	27
8.6 Medien und Fachmagazine .....	27
8.7 Präsentation Messen.....	28
8.8 Video .....	28



Weiterentwicklung und Optimierung einer  
Heissluftturbine im kleineren  
Leistungsbereich (80-95 kWel)

8.9	Ausblick 2017.....	28
8.10	Resonanz beim Fachpublikum.....	29
9	Schlussfolgerungen.....	29
Anhang 1: Energieflussdiagramm HLT-100 Compact: .....		31



## Abkürzungsverzeichnis

EFGT	external fired gas turbine – von extern befeuerte Gasturbine
ORC	Organic Rankine Cycle – Dampfkreislauf mit Thermoöl zur Stromerzeugung
HGWT	Heissgaswärmetauscher
PE	Power Electronic – Umrichter
TIT	Turbolader-Turbineneintrittstemperatur



# 1 Einleitung

Zur Stromerzeugung aus Biomasse werden verschiedenste Technologien entwickelt oder weiterentwickelt und getestet, darunter Stirlingmotor, Holzvergasung mit Gasmotor, Dampfmotor und weitere. Allerdings sind nur die wenigsten Systeme ausgereift und kommerziell. 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. Die robuste Technologie einer von extern befeuerten Gasturbine (EFGT) kann diese Lücke füllen.

In einem EFGT Kreislauf wird angesaugte Umgebungsluft in einem Kompressor verdichtet und anschliessend, extern, in einem Wärmeübertrager weiter erhitzt. In der nachgeschalteten Turbine wird die heisse Luft entspannt und erzeugt über einen Generator elektrische Energie. Eine so betriebene Turbine wird in diesem Zusammenhang auch Heissluftturbine genannt.

# 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.

Ein erstes Projekt einer von extern befeuerten Gasturbine (EFGT) wurde gestartet. Dieses Projekt „Holzbefeuertes Blockheizkraftwerk mit Heissluftturbine im kleineren Leistungsbereich 80-100 kWel“ wurde vom BFE unterstützt (Projekt Nr.: SI/500488). Die Anlage liefert 80...95 kW elektrische Leistung und mit einer entsprechenden Abwärmenutzung werden 350 kW thermische Energie ausgekoppelt. Die Schmid AG hat einen Prototyp seit Herbst 2011 im Werk in Eschlikon in Betrieb.

In diesem Nachfolgeprojekt will die Schmid AG auf dem erlangten Wissen aufbauen, die Anlage konstruktiv überarbeiten, wirkungsgradtechnisch optimieren und mit entsprechenden Komponenten Servicearbeiten ermöglichen/vereinfachen und Wartungskosten senken.

Ziel dieser Demonstrationsanlage ist es, diese Technologie bei einem Betreiber zu installieren, zu testen und dem Fachpublikum zu präsentieren.

# 3 Der Heissluftkreislauf

Im abgebildeten Schema (Abbildung 1) sind die Hauptkomponenten und der Heissluftkreislauf dargestellt. Ein Turbolader komprimiert Umgebungsluft und bezieht die dafür benötigte Energie aus der Teilentspannung der im Abluftwärmetauscher erhitzten Prozessluft. Die Stromerzeugung erfolgt in einer zweiten Entspannungsstufe über zwei Heissluftturbinen mit zwei Turbogeneratoren. Die Prozessluft wird dazu nach dem Turbolader aufgeteilt. Für jeden Generator kommt ein Umrichter zum Einsatz. Die Turbinenabluft wird teilweise als Verbrennungsluft genutzt, bzw. über einen Abluftwärmetauscher abgekühlt. Die in den Abgasen aus der Verbrennung vorhandene Wärme wird in einem Nachwärmetauscher an das Wassernetz übertragen.

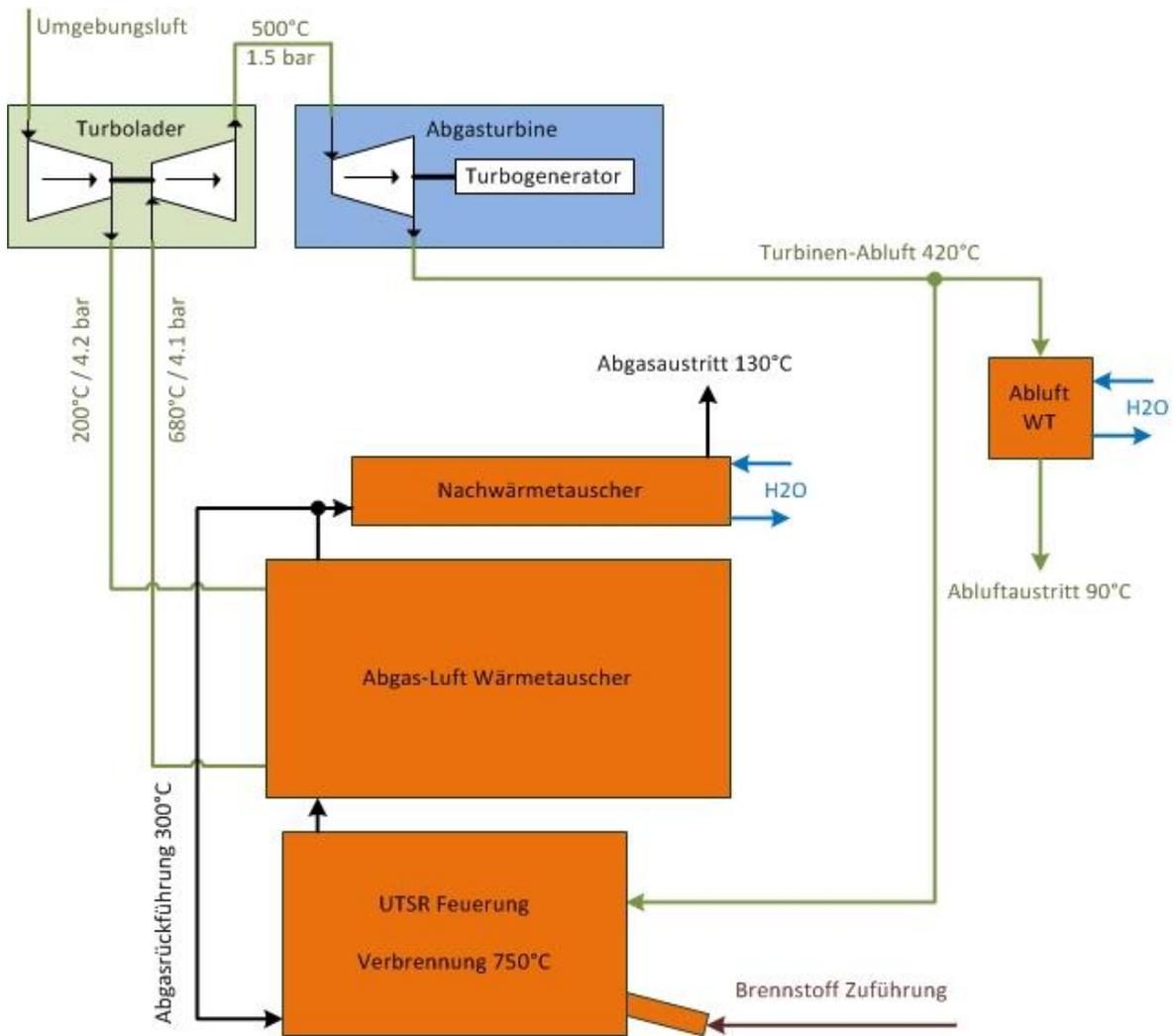


Abbildung 1: Gesamtschema der Heissluftturbinenanlage

## 4 Hauptkomponenten

### 4.1 Die Feuerung

Die automatische Vorschubrostfeuerung ist für die wirtschaftliche und emissionsarme Verbrennung von Waldhackschnitzeln und Pellets gebaut. Für dieses Projekt wurde die Ausmauerung angepasst, die Luftführung geändert und die Grösse auf das nötige Abgas- und Rezirkulationsvolumen angepasst.

Jede zweite Gussrippenreihe ist über einen gemeinsamen hydraulischen Antrieb gesteuert und fördert den Brennstoff bzw. die Verbrennungsrückstände bis zur Rostentaschungsschnecke. Zur Steuerung des Verbrennungsprozesses sind verschiedene Luftzuführungen vorgesehen. Zwei Primärluftzonen unter dem Rost für die Trocknung, Vergasung und den Ausbrand sowie Sekundärluftzonen im Feuerraum für die Verbrennung der Gase. In die Sekundärluftzone wird einerseits heisse Abluft aus der Turbine beidseitig eingeblasen, und andererseits stirnseitig Rezirkulationsgas eingedüst. Die Überwachung des Verbrennungsprozesses erfolgt durch Luftmengenmessungen in der Abluft- und



Abgasrückführungsleitung, der Verbrennungstemperaturrefassung sowie der O<sub>2</sub>- Messung. Um eine gute Durchmischung der Holzgase mit der Verbrennungsluft und damit einen vollständigen Ausbrand mit tiefen CO-Werten zu erzielen, erfolgt die Sekundärlufteindüsung, bzw. die Turbinenablufterdüsung im oberen Teil des Feuerraums (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2 Brennkammer mit Doppelstoker, Öffnungen für Abgasrückführung (hinten) und Turbinenabluft (seitlich)**

Die Brennkammer ist einerseits zum Schutz der Stahlkonstruktion, andererseits zur Speicherung der für eine optimale Verbrennung notwendigen Temperatur, auf der Feuerraumseite mit speziellem, dicken, feuerfesten Beton ausgemauert. Zur besseren Durchmischung der verschiedenen Gasströme wurden speziell geformte Gewölbeeinbauten in die Feuerung integriert.

## 4.2 Der Heissluftwärmetauscher

Der Wirkungsgrad der Anlage ist stark abhängig von der Grädigkeit und vom Druckverlust im Heissluftwärmetauscher sowie von der Turbineneintrittstemperatur bzw. von der Rauchgaseintrittstemperatur in den Wärmetauscher.

Die relativ niedrigen Eintrittstemperaturen des Turboladers (im Vergleich zu anderen extern befeuerten Turbinen) ermöglichen 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).

Aufgrund der neuen Turbogruppe, mussten die Auslegungswerte für dieses Bauteil hinsichtlich der geänderten Randbedingungen wie Druck, Temperatur und Gasvolumen überarbeitet werden. Der Heissluftwärmetauscher wurde nach der Druckgeräterichtlinie hergestellt, geprüft und abgenommen.

In Abbildung 3 ist eine Kassette des Heissluftwärmetauschers während der Produktion zu sehen.

Für dieses Demonstrationsprojekt wurde die Stabilität des Wärmetauschers komplett überarbeitet und die Zugangsöffnungen wurden wartungsfreundlicher gestaltet. Weiterhin wurden die abgasseitigen Schnittstellen abgeändert.



**Abbildung 3 Eine Kassette mit installierten Wärmetauscherrohren während der Fertigung**

Der Einbau des Heissluftwärmetauschers erfolgte in einen Container, welcher quasi die isolierte Aussenhülle des Heissluftwärmetauschers ist.

## 4.3 Die Turbogruppe

### 4.3.1 Lieferantenwechsel

In diesem Projekt kam es zu unerwarteten Lieferschwierigkeiten der Heissluftturbine. Der Turbinenlieferant PBS aus Tschechien war nicht mehr bereit weitere Turbinen-Einheiten des eingesetzten Typs auszuliefern. Grund dafür war die hohe Auslastung in anderen Bereichen. Diese Situation zwang die Schmid AG Alternativen zu suchen, um einen Projektabbruch zu vermeiden. In der breiten Suche wurden verschiedenste Mikrogasturbinen angeschaut. Nach einer umfassenden Bewertung fiel der Entscheid auf eine Lösung mit einem Turbolader und zwei Abgasturbinen. Die Hauptvorteile dieser Lösung sind die erprobte Technik, die schnelle Verfügbarkeit, die einfache Einbindung und das flexible Betriebsverhalten.

### 4.3.2 Turbolader und Abgasturbinen

Im Laufe dieses Projektes wurde die Turbogruppe neu spezifiziert, die Schnittstellen erarbeitet, Lieferumfang festgelegt, das Kühlsystem neu ausgelegt, Schemata und das Elektrokonzept ausgearbeitet und Notstrom und Sicherheitsvorrichtungen bestimmt.

Die Turbogruppe wird auf einem separaten Rahmen gebaut und komplett in den Turbinenraum des Containers integriert.

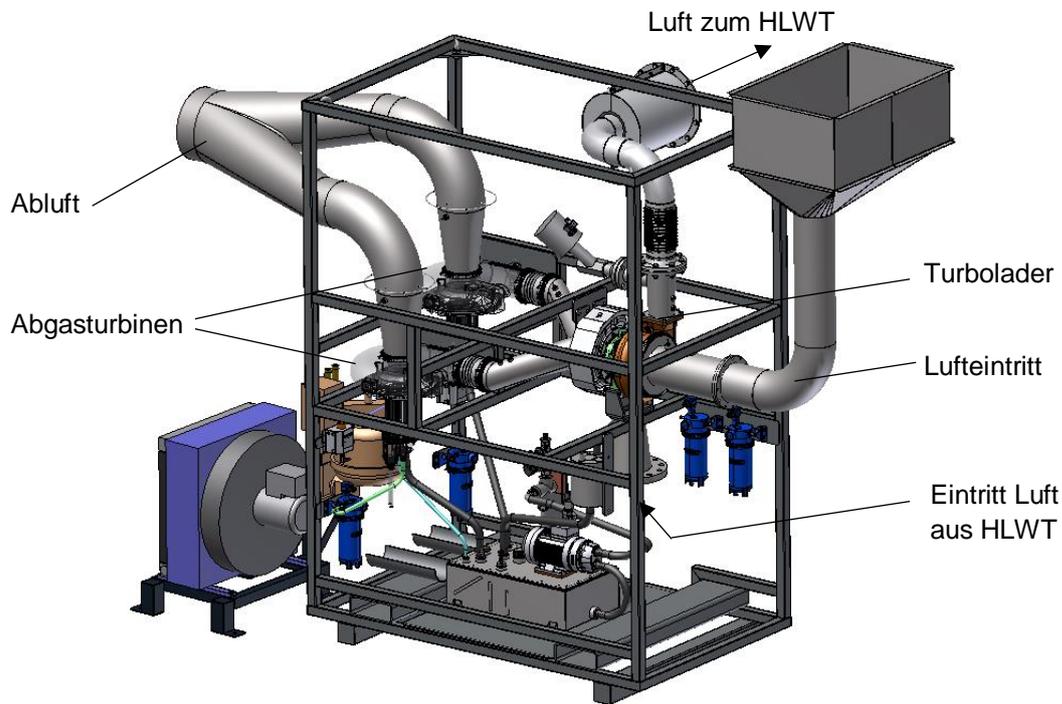


Abbildung 4: Entwurf der Turbogruppe

## 4.4 Steuerung

Die Steuerung der Heissluftturbine 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, Turbogruppe, Umrichter, Kühlsysteme usw.

Da die neue Turbogruppe komplett anders angesteuert werden muss, wurde quasi die gesamte Steuerung neu aufgebaut. Aus einer Turbinen-Generatoren-Einheit im Prototypen sind jetzt Kompressor mit Turbine und Abgasturbine mit Umrichter entstanden. Sämtliche Grenzwerte wurden neu definiert und programmiert, in der Summe ergibt das mehr als 300 Warnungen, bzw. Störungsmeldungen mit entsprechenden automatisch ausgelösten Aktionen wie z.B. das Abschalten der Brennstoffzufuhr. Weitere Funktionen wurden für die Demonstrationsanlage neu programmiert:

- Visualisierung auf einem PC vor Ort mit Fernzugriff
- Regelung der drei verschiedenen Ventilatoren und deren Zusammenspiel
- Ansteuerung zusätzlicher Klappen und (Bypass-)Ventile
- Generierung von Tages- und Wochendatenfiles
- Regelung der Startluft
- Ansteuerung der Kühl- und Schmiersysteme
- Automatischer Start-Ablauf mit diversen Betriebszuständen (Anfeuern, Vorwärmen, Beschleunigen, Stromproduktion, ... )

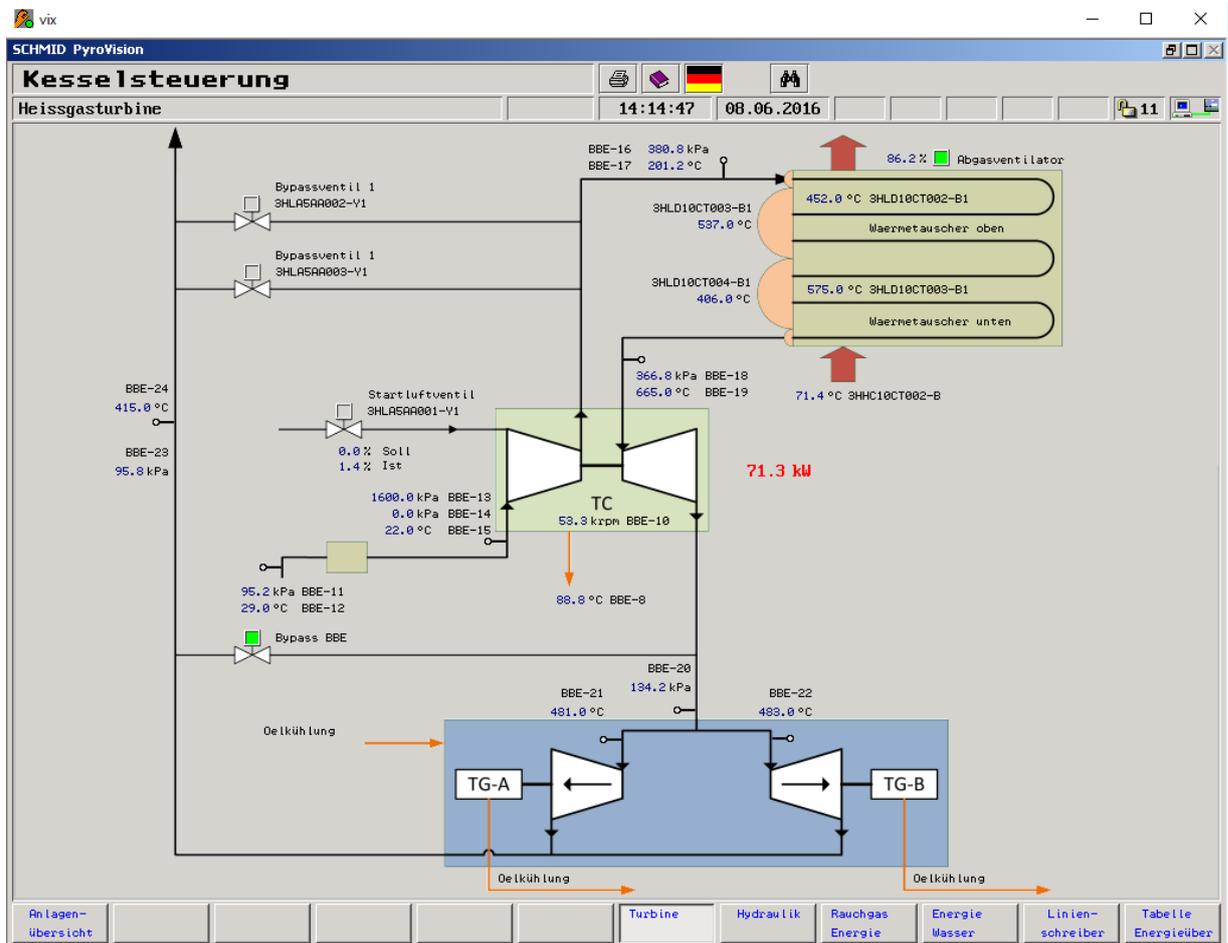


Abbildung 5 Auszug der Visualisierung der Anlagensteuerung

In Abbildung 5 ist das Turbinenblatt der Visualisierung mit Momentanwerten vom 08.06.2016 zu sehen.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erfolgt via Bus und Netzwerk. Eine besondere Herausforderung stellt eine automatisch, geregelte, konstante Leistung während Nennlast dar, da sich der Wirkungsgrad des Kompressors in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur verändert.

## 5 Umsetzung, Installation und Inbetriebnahme

### 5.1 Herstellung und Vormontage in Eschlikon

Nach der konstruktiven Überarbeitung der Hauptkomponenten wurde die Herstellung im Sommer 2015 begonnen. Es wurde dabei versucht, möglichst viele Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt „Holzbeheiztes Blockheizkraftwerk mit Heissluftturbine im kleineren Leistungsbereich 80-100 kWel“ (Projekt Nr.: SI/500488) zu nutzen. Bis Dezember 2015 konnten die meisten Arbeiten abgeschlossen werden.

Um den Aufwand auf der Baustelle, bzw. in der Heizzentrale in Düdingen zu reduzieren, wurden möglichst viele Komponenten bereits in Eschlikon montiert und vormontiert.



Weiterentwicklung und Optimierung einer  
Heissluftturbine im kleineren  
Leistungsbereich (80-95 kWel)

In einem ersten Schritt wurde der Heissluftwärmetauscher in den Container eingesetzt und isoliert. Weiterhin wurde der Container komplett abgedichtet, damit keine Umgebungsluft an den Wärmetauscher gelangen kann. In den vorderen Teil des Containers wurde die Turbogruppe vormontiert. Die Schnittstelle der Feuerung zum Heissluftwärmetauscher wurde auf Funktionalität geprüft. Eine Stahlträgerkonstruktion stützt den Container mit Turbogruppe und Heissluftwärmetauscher über der Feuerung ab.

Auf einem weiteren Trägergestell wurde der abgasseitige Nachwärmetauscher zusammen mit dem Rezirkulationsventilator und dem Multizyklonvorabscheider installiert.

## 5.2 Lieferung, Einbringung und Montage

Am 01.02.2016 erfolgte die Lieferung der Komponenten nach Düdingen. Die Bauteile wurden nicht durch ein geöffnetes Dach in die Heizzentrale eingebracht, sondern durch das Haupttor.



Abbildung 6 Montage des Abgarrückführventilators in der Heizzentrale Düdingen

Im Dach befinden sich ausschliesslich vier Öffnungen, durch welche der Container mit Kränen angehoben wurde. Unter dem schwebenden Container wurde die Feuerung platziert und danach die Stützkonstruktion montiert. Nachdem diese Komponenten zueinander ausgerichtet waren, wurde der Rahmen mit dem Nachwärmetauscher auf den Container gehoben sowie der Abgarrückführventilator und der Multizyklonabscheider montiert (siehe Abbildung 6).



In den darauf folgenden Wochen fand die Montage der Anlage statt inkl. allen luftseitigen und abgasseitigen Verrohrungen und deren Isolation, der Brennstoffzuführung, der Entaschung, Installation des Elektroabscheiders und die komplette elektrische Verkabelung der Anlage.

Die Abbildung 7 zeigt den Grundriss des Einbauplanes der Heizzentrale Düdingen und Abbildung 8 die Seitenansicht.

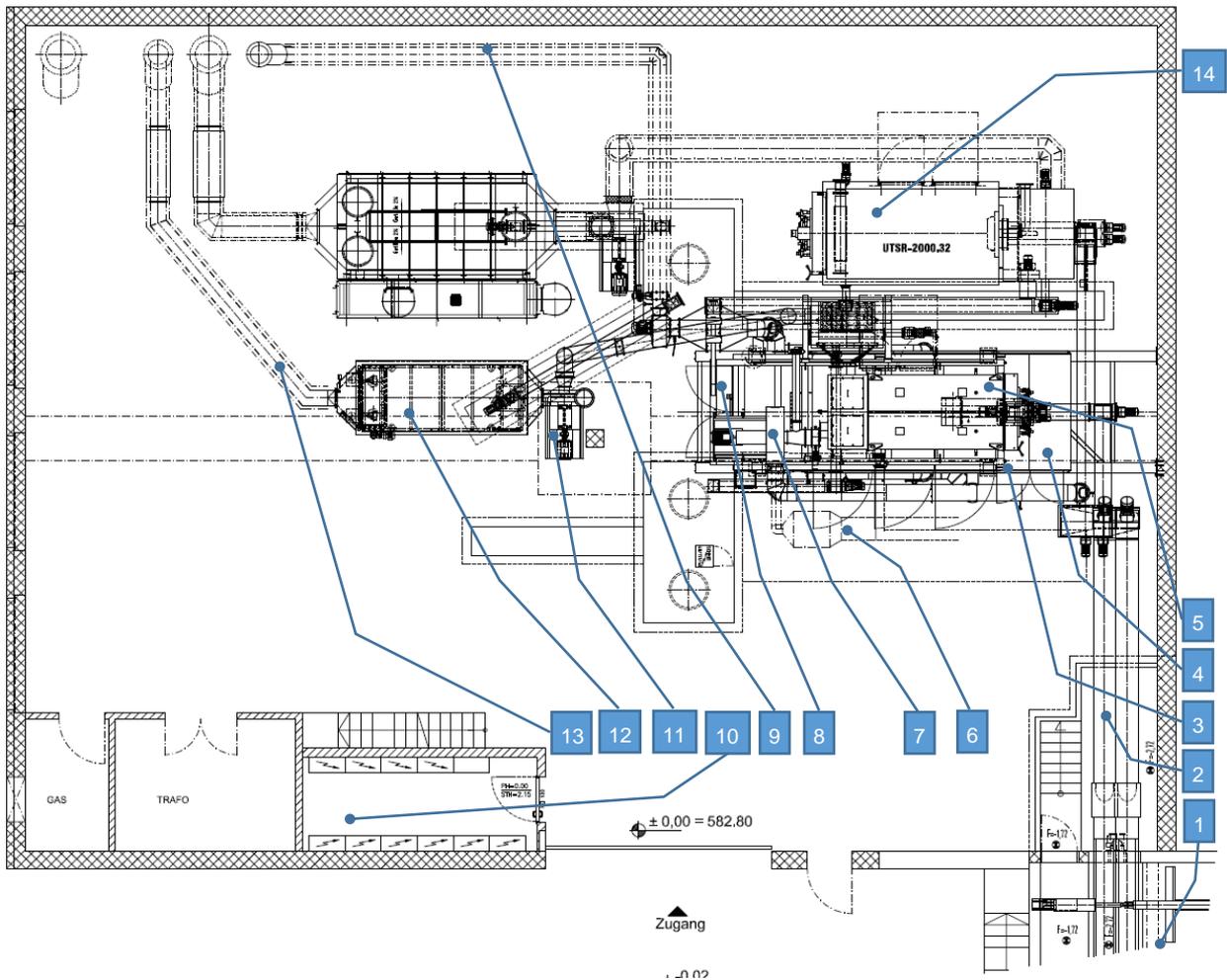
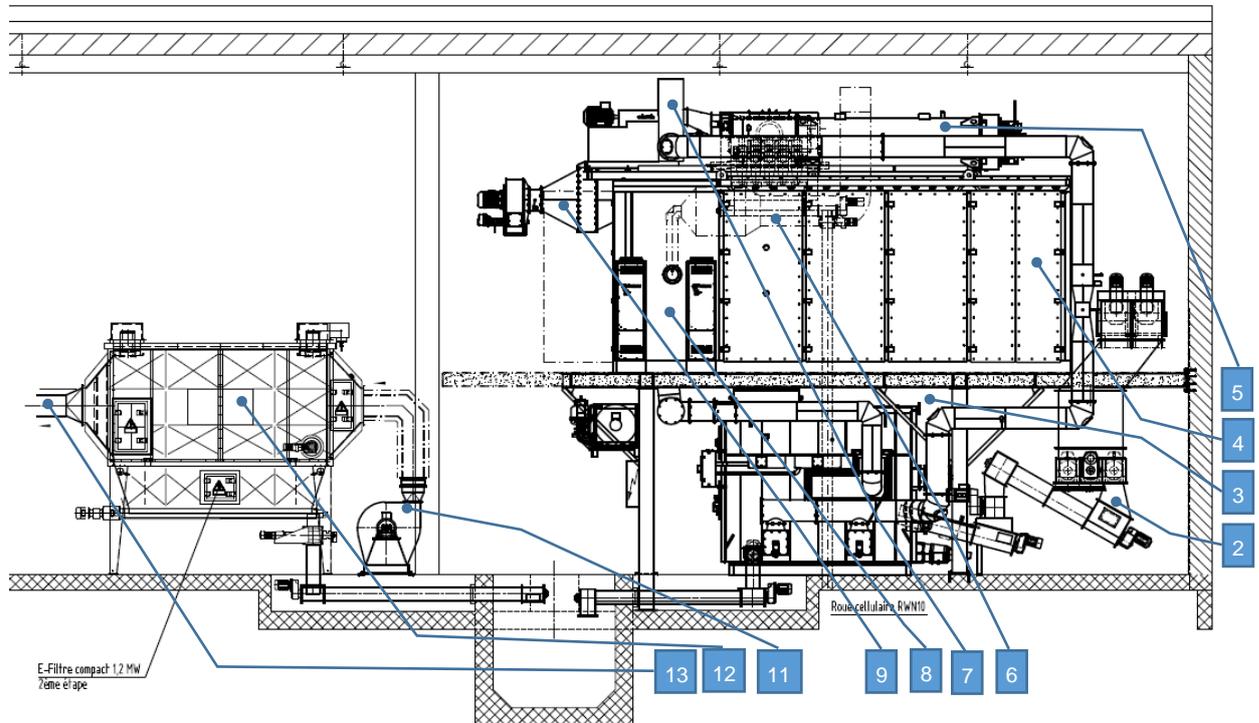


Abbildung 7: Grundriss des Einbauplanes der Heizzentrale in Düdingen



**Abbildung 8 Seitenansicht der Heizzentrale Düdingen mit der HLT-100 Compact**

Ersichtlich sind:

1. Brennstoff Silo (im Grundriss)
2. Brennstofftransport
3. Vorschubrostfeuerung auf Basis UTSR1200
4. Heisslust-Wärmetauscher
5. Nachwärmetauscher (NWT)
6. Zuluft-Leitung
7. Rezi-Ventilator
8. Turbinenraum
9. Abluftleitung
10. Schaltschränke
11. Abgasventilator
12. Elektro-Filter
13. Abgasleitung
14. Zweite Feuerung UTSR2000 mit E-Filter



### 5.3 Inbetriebnahme

Mitte April 2016 startete die Inbetriebnahme der Heissluftturbine in Düdingen. Das heisst, es wurde konkret mit der Drehrichtungskontrolle aller Antriebe begonnen, die Klappenstellungen wurden überprüft und zusätzliche Sensoren installiert. Der Schaltschrank konnte in Betrieb genommen, und die Signale aller Sensoren auf Plausibilität geprüft werden.

Weiterhin wurde die Kommunikation via Bus und Netzwerk geprüft und die Netzwerktopologie aufgebaut. In der ersten Phase der Inbetriebnahme war vor allem das Zusammenspiel zwischen Turbogeneratoren und den Umrichtern ein Problem. Ursache hierfür waren falsche Settings in den Umrichtern.

Das erste Anfahren der Turbine und damit die erste Stromproduktion erfolgte am 26.05.2016.

### 5.4 Probleme und Projektverzögerungen

In Tabelle 1 sollen kurz einzelne markante Probleme und Verzögerungen aufgelistet werden.

Die grössten Probleme und der grösste Aufwand stellte der Lieferantenwechsel der Turbogruppe dar. Die Suche nach einer passenden Turbogruppe war sehr aufwendig und benötigte viele Abklärungen. Aufgrund dieses Produktwechsels mussten sämtliche Komponenten neu ausgelegt, geprüft und bewertet werden.



Projektphase	Dauer	Bemerkungen
<b>Start</b>	01.02.2014	Die Vertragsunterzeichnung fand zwischen 07.11.2013 und 21.11.2013 statt
<b>Planungs- und Entwurfsphase</b>	02 / 2014 – 12 / 2014	Aufgrund des negativen Lieferbescheides des Turbinenherstellers konzentrierte sich in dieser Projektphase alles auf die Suche nach einer alternativen Turbogruppe. Diese Evaluation war Ursache für ca. 12 Monate Projektverzug.
<b>Konstruktive Überarbeitung</b>	01 / 2015 – 12 / 2015	Die konstruktive Überarbeitung fand gleitend statt, d.h. während einige Komponenten schon in Produktion waren, konnten andere noch konstruiert werden. Lieferschwierigkeiten von externen Bauteilen führten in dieser Phase zu Problemen.
<b>Umsetzung und Installation</b>	08 / 2015 – 04.2016	Aufgrund der langen Lieferzeiten musste der Heissluftwärmetauscher als einer der ersten Komponenten aufgegeben und bestellt werden. Die Montage erfolgte ohne grössere Probleme, stellte sich aber als aufwendig heraus.
<b>Inbetriebnahme und Optimierungsphase</b>	04 / 2016 – 12 / 2016	Einige Probleme während der Inbetriebnahme, besonders mit dem Kühlkreislauf der Turbogruppe, verzögerten diese. Nach erster Auswertung Leitschaufeln der Turbinen gewechselt. Kontinuierlicher Betrieb seit 10 / 2016 (vorher auch zu geringe Wärmeabnahme) 11 / 2016: Turboladerkontrolle

Tabelle 1: zeitlicher Projekttablauf

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Technische Daten und Messungen

Die Anlage in Düdingen produzierte das erste Mal im Mai Strom. Seit dem werden die erfassten Daten in Tages- und Wochenfiles aufgezeichnet. Ausserdem wurden verschiedene Randbedingungen und Systemzustände gemessen und untersucht. In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Einflüsse von der Turbolader-Turbineneintrittstemperatur und Kompressor-Ansaugtemperatur auf die erzeugte elektrische Leistung dargestellt.

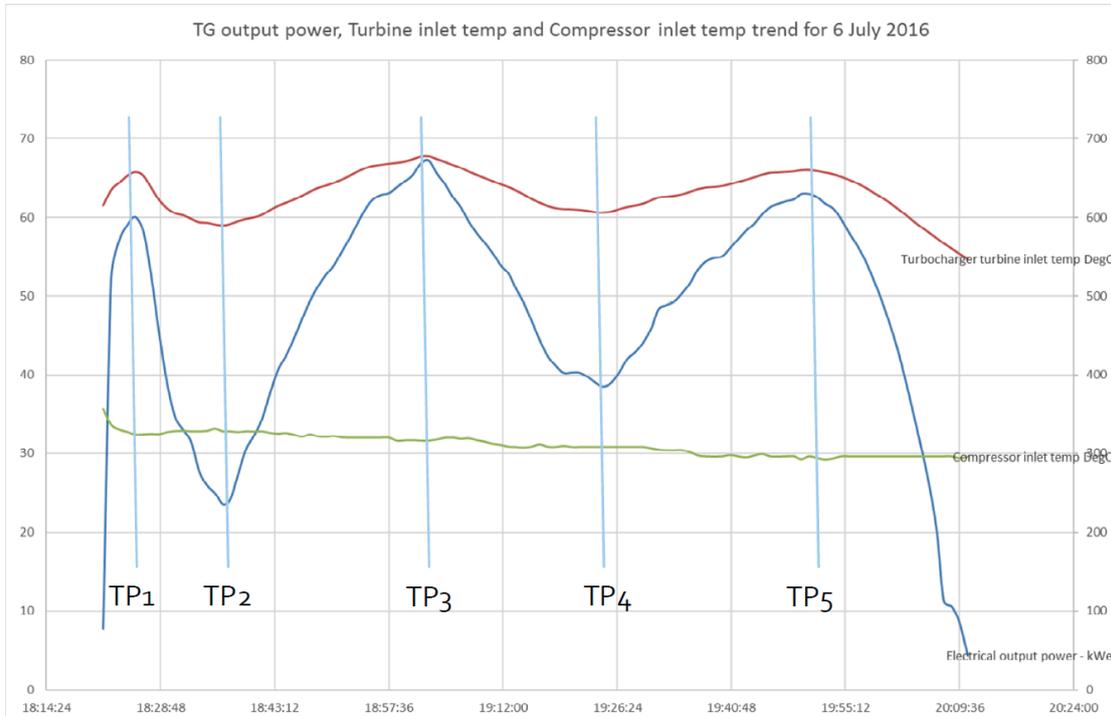


Abbildung 9: Einfluss der Turbolader-Turbineneintrittstemperatur (TIT) auf die elektrische Leistung der Turbogeneratoren (Y-Achse links: elektrische Leistung [kW]; Y-Achse rechts: TIT [°C]; X-Achse: Uhrzeit am 06.07.2016)

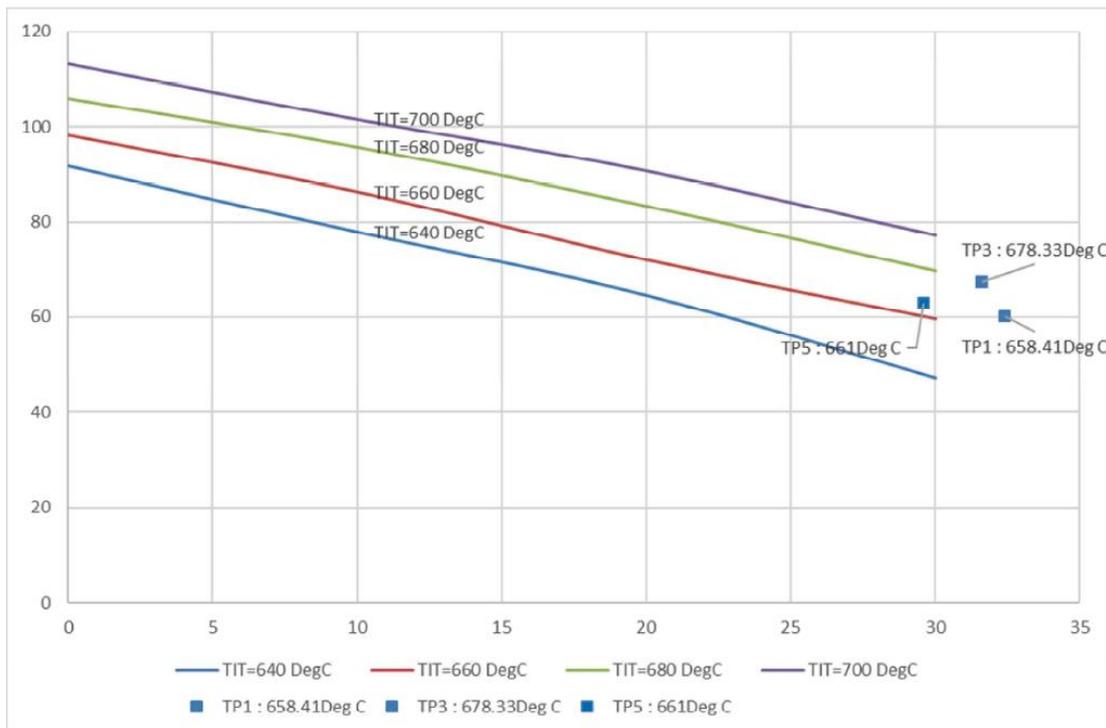


Abbildung 10: Abhängigkeit der Turbogruppe von der Turbolader-Turbineneintrittstemperatur (TIT) und Kompressor-Ansaugtemperatur am 06.07.2016 (Y-Achse links: elektrische Leistung [kW]; X-Achse: Kompressor-Ansaugtemperatur [°C])



Bei entsprechend hohen Umgebungstemperaturen ist der Wirkungsgrad des Turbolader-Kompressors niedriger als bei tiefen Ansaugtemperaturen. Bei möglichst hohen Luftdichten und hohen Turbineneintrittstemperaturen wird die meiste elektrische Leistung erzeugt. Aus diesem Grund ist es für einen guten Wirkungsgrad wichtig, die Ansaugluft möglichst über einen isolierten Zuluftkanal von ausserhalb der Gebäudehülle zu beziehen.

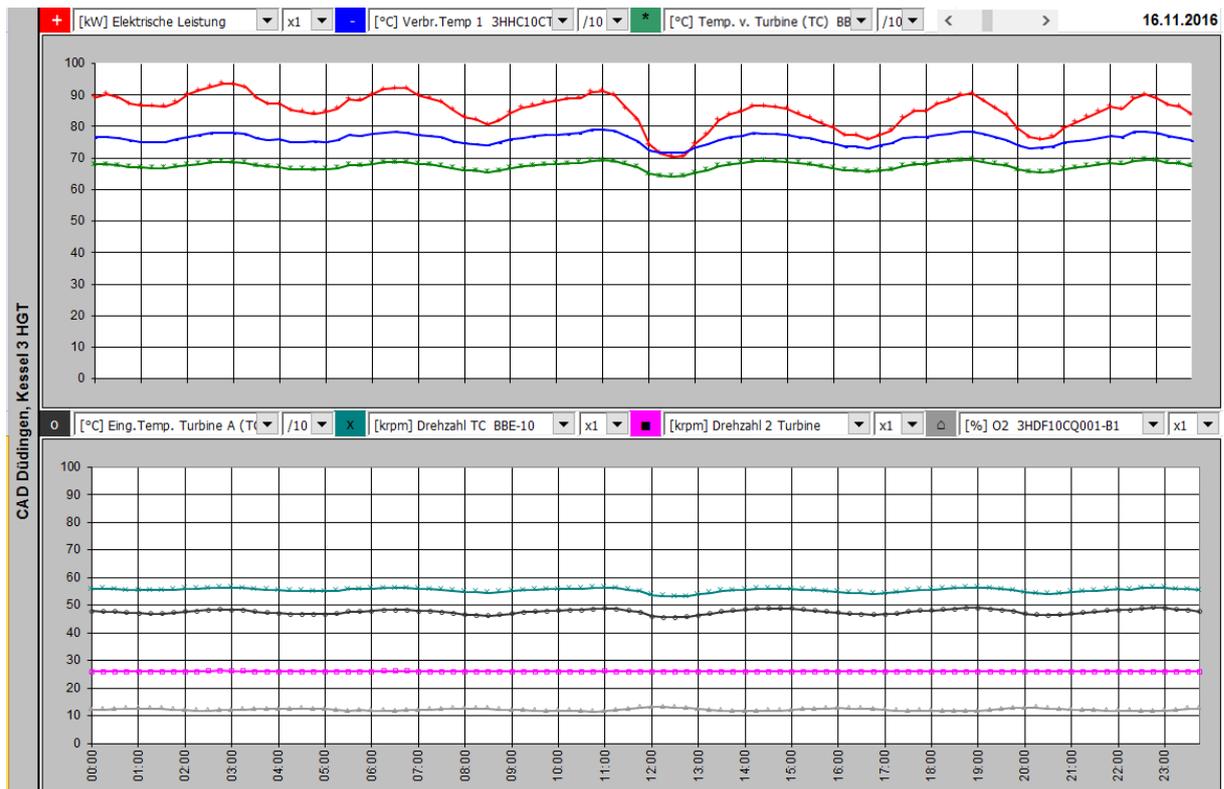


Abbildung 11: Aufzeichnung von Messwerten über 24h

In Abbildung 11 wurden verschiedene Messwerte über 24 h aufgezeichnet. Deutlich ist auch hier der Einfluss der Turbineneintrittstemperatur auf die erzeugte elektrische Leistung zu sehen. In den Nachmittagsstunden ist ausserdem ein Leistungsabfall ersichtlich. Grund dafür ist die höhere Umgebungstemperatur (= Kompressor-Ansaugtemperatur).



## 6.2 Emissionen

Während dem Betrieb der Anlage wurden verschiedentlich Emissionen gemessen. Der O<sub>2</sub> Gehalt im Abgas wird mit einer Lambdasonde permanent erfasst (siehe auch Abbildung 11).

### Emissionen

CO bei 13% O <sub>2</sub>	ca. 200 mg/Nm <sup>3</sup>
O <sub>2</sub>	ca. 12 %

**Tabelle 2: gemessene Emissionen während dem Betrieb der Anlage**

Zur Staubabscheidung wurde ein Multizyklon installiert und ein Elektroabscheider nachgeschaltet.

## 6.3 Umgesetzte Verbesserungen gegenüber Prototypenanlage

In folgender Tabelle 3 werden einige der umgesetzten Verbesserungen gegenüber der Prototypenanlage in Eschlikon aufgelistet.

Komponente	Verbesserungen
Feuerung	Gewölbeeinbauten zur Emissionsreduzierung, optimiertes Einströmen der Turbinenabluft, dicke Spezialmauerung, mit Luft hinterkühlte Aussenhülle, Gewölbeabreinigung, und O <sub>2</sub> abgesenkt
Container mit Heissluftwärmetauscher	Strahlungsverluste wurden durch einen verbesserten Isolationsaufbau reduziert. Die Containeraussentemperaturen sind deutlich gesunken. Die Zugänglichkeit wurde verbessert und die Stabilität erhöht.
Turbogruppe	Standardkomponenten, keine auf dieses System zugeschnittenen Entwicklungen, robustes System, schneller Austausch, Komponenten 100 Fach erprobt!
Abluftsystem	Ein grösserer Abluftventilator ermöglicht einen flexibleren Betrieb der Anlage und einen tieferen O <sub>2</sub> Gehalt in den Abgasen
Multizyklon	Der für diese Anlage neu dimensionierte Multizyklon liefert gute Abscheidegrade und einen tieferen Druckverlust.
Rezirkulation	Die überarbeitete Regelung der Rezirkulation ermöglicht eine ruhigere Verbrennung in der Brennkammer der Feuerung bei tieferen O <sub>2</sub> Werten und damit tieferen Abgasverlusten.
Ölnebel	Ein Ölnebelabscheider konnte evaluiert werden um austretenden Öldampf zu filtern und abzuscheiden.

**Tabelle 3 einige wichtige, erreichte Verbesserungen gegenüber der Prototypenanlage**

Eine Isolierung des Ansaugluftkanals wurde realisiert und ist für den Wirkungsgrad des Kompressors des Turboladers von grosser Bedeutung. Eine Steigerung von ca. 1..2 % des elektrischen Wirkungsgrades (je nach Aussentemperaturen) wurde damit erreicht.

Durch ein verbessertes Isolierungskonzept gegenüber dem Prototyp konnten die Strahlungsverluste vor allem des Heissluftwärmetauschers deutlich reduziert werden. Erste Messungen haben gezeigt, dass die Oberflächentemperaturen deutlich reduziert werden konnten.



Eine Turbinen- Abluftnutzung wurde an dieser Anlage noch nicht realisiert. Ein entsprechender Anschluss wurde vorbereitet. Eine Abluftnutzung würde eine Steigerung des thermischen Wirkungsgrades um ca. 7% ermöglichen.

Schlussendlich kann an dieser Stelle betont werden, dass diese Demonstrationsanlage nur noch Ähnlichkeiten mit der Prototypenanlage in Eschlikon aufweist, da eigentlich alle Komponenten überarbeitet, angepasst, optimiert, verbessert und neu ausgelegt wurden. Das betrifft neben den konstruktiven Änderungen, die prozesstechnische Auslegung und die komplette Steuerung der Anlage. Neben den wirkungsgradrelevanten Punkten standen aber auch Verbesserungen und Optimierungen zur Handhabung, Bedienung, Wartung und Verfügbarkeit im Vordergrund. Die Schmid AG legt Wert darauf, dass auch diese Neuentwicklung vom Kunden selbst betrieben werden kann, ohne dass permanent ein Ingenieur die Anlage überwachen muss.

Trotzdem hat auch diese Anlage in gewissem Sinn einen Prototypencharakter, da die Turbogruppe in dieser Konstellation das erste Mal verbaut wurde. Das hat zu Problemen und Verzögerungen geführt, was allerdings die Vorteile dieser Komponenten nach wie vor nicht negativ beeinträchtigt.

## 7 Betrieb, Wartung und Ausblick

### 7.1 Betrieb und Wartung

Die Wartung der Anlage ist aufwendiger als eine Holzfeuerung ohne Stromerzeugung allerdings kann hier sehr viel über die Visualisierung in Kombination mit einer Fernüberwachung stattfinden. Eine regelmässige Kontrolle der verschiedenen zusätzlichen Komponenten (im Vergleich zu einer herkömmlichen Holzfeuerung) ist aber notwendig. Als eines der kritischsten Bauteile muss sicher der Kühl- und Schmierkreislauf der Turbogruppe betrachtet werden. Natürlich sind für Turbolader, Turbogeneratoren, Pumpen und Ventilatoren übliche Wartungsintervalle vorgeschrieben. Mindestens eine jährliche Reinigung des Heissluftwärmetauschers ist notwendig.

### 7.2 Ausblick

Nach der Definition der neuen Turbogruppe verlief das Projekt relativ erfolgreich bis hin zur funktionierenden Anlage. Die Herausforderung besteht jetzt darin, aus dieser Demonstrationsanlage ein kommerzielles Produkt zu entwickeln. Einerseits müssen weitere erkannte Verbesserungen umgesetzt und Kosten gesenkt werden und andererseits sollen Mitarbeiter geschult werden um den internen Aufwand zu reduzieren. Auch in Zukunft wird es ohne Förderbeiträge für erneuerbaren Strom schwierig werden so eine Anlage wirtschaftlich zu betreiben.

Verschiedene Massnahmen zur Wirkungsgradsteigerung sind in die Demonstrationsanlage (gegenüber dem Prototyp) eingeflossen, wie z.B.: reduzierte Strahlungsverluste durch bessere Isolation des Heissluftwärmetauschers, reduzierte Abgasverluste aufgrund tieferer O<sub>2</sub> Werte und höheres Rezirkulationsvolumen für besseren Wärmeübergang im Heissluftwärmetauscher, andere Optimierungsmöglichkeiten stehen noch aus:

- Abluftwärmenutzung (ein späterer Anschluss ist vorgesehen),
- Nutzung der warmen Luft der Feuerungskühlung und
- Nutzung der Wärmeleistung aus der Öl- und Wasserkühlung der Turbogruppe.

Weitere Optimierung besteht auch auf Seiten der Turbogruppe. Die Leitschaufeln im Turbogenerator wurden schon auf dieses System hin angepasst, allerdings besteht die Möglichkeit die Drehzahl des Turbogenerators noch etwas zu erhöhen. Das gleiche gilt für die Drehzahl des Turboladers, auch hier sind einige Geschwindigkeitsanpassungen möglich.



Neben diesen verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten stehen für die Schmid AG die Langzeitstabilität und ein störungsfreier Betrieb im Vordergrund. Nur mit einem stabilen Betrieb ist auch ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage möglich. Langzeitmessungen werden zeigen, wie sich dieses System in der Praxis betreiben lässt. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit der Prototypanlage in Eschlikon rechnet die Schmid AG nicht mit gravierenden Problemen. Die grössten Unsicherheiten bestehen bei den „neuen“ Komponenten, welche hauptsächlich aus der Turbogruppe und deren Peripherie bestehen.

Um eine erfolgreiche Umsetzung der Kommerzialisierung dieses Systems zu erreichen, wird es wichtig sein, dass auch zukünftig die Beschaffung einiger komplexer Komponenten, wie z.B. der Turbogruppe und ihrer Bauteile möglich ist.

Ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage ist mit einer kostendeckenden Einspeisevergütung erreichbar (siehe Tabelle 4).



### Wirtschaftlichkeitsbetrachtung HLT-100

<b>Ertrag</b>			
genutzte thermische Leistung	kW	466	
thermische Leistung Abluft	kW	51	nicht genutzt
Kühlleistung	kW	14	nicht genutzt
elektrische Leistung	kW	98	Eigenverbrauch von 5 kW abgezogen
genutzte Volllaststunden	h/a	6'550	3 Monate Stillstand im Sommer
erzeugte elektr. Energie	kWh/a	641'900	
erzeugte therm. Energie	kWh/a	3'052'300	genutzt
erzeugte therm. Energie	kWh/a	425'750	nicht genutzt
KEV	Rap/kWh	32	
el. Energie ohne KEV	Rap/kWh	11	
therm. Energie	Rap/kWh	8	
Ertrag Energie el KEV	SFr/a	205'408	
Ertrag Energie el ohne KEV	SFr/a	70'609	
Ertrag Energie therm.	SFr/a	244'184	
<b>Summe Ertrag mit KEV:</b>	<b>SFr/a</b>	<b>449'592</b>	
<b>Kosten</b>			
zugeführte Leistung	kW	820	
Hu	kWh/kg	2.22	
Brennstoff pro h	kg/h	369	
Brennstoff pro a	t/a	2'419	
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	340	
Brennstoff pro a	m <sup>3</sup> /a	7'116	
Schnitzelkosten	SFr/m <sup>3</sup>	25	
<b>Brennstoffkosten</b>	<b>SFr/a</b>	<b>177'895</b>	
Anlagekosten	SFr	1'250'000	
Zinssatz	%	3	
Abschreibung	a	8	
Annuitätsfaktor		0.142	
<b>Kapitalkosten</b>	<b>SFr/a</b>	<b>178'070</b>	
<b>Wartung / Unterhalt</b>	<b>SFr/a</b>	<b>40'000</b>	
<b>Summe Aufwand</b>	<b>SFr/a</b>	<b>395'965</b>	
<b>Gewinn / Verlust</b>	<b>SFr/a</b>	<b>53'627</b>	

Tabelle 4: einfache Wirtschaftlichkeitsrechnung der HLT-100

## 8 Kommunikationsmassnahmen

### 8.1 Einleitung

Das Projekt HLT Düdingen war prädestiniert für ein Leuchtturmprojekt mit grossem Kommunikationsaufwand: Einerseits ist die Heissluftturbine Teil einer grösseren Demonstrationszentrale für innovative erneuerbare Energien. Andererseits hatte das Projekt von



Weiterentwicklung und Optimierung einer Heissluftturbine im kleineren Leistungsbereich (80-95 kWel)

Beginn an auch internationalen Mustercharakter, da eine vergleichbare Technologie noch nicht auf dem Markt existierte.

Neben Projektvorstellung in kleineren Gremien haben wir das Projekt auch gezielt an Messen, Konferenzen und Fachtagungen vorgestellt.

Ebenfalls haben wir die Chance im internationalen Bereich gesucht und gute Gelegenheiten genutzt die Technologie gezielt auch im Ausland vorzustellen (z. B. Globe 2016 in Vancouver oder Mitteleuropäische Biomassekonferenz 2017 in Graz).

## 8.2 Website [www.heissluftturbine.ch](http://www.heissluftturbine.ch)



Abbildung 12: Website [www.heissluftturbine.ch](http://www.heissluftturbine.ch)

Um dem Fachpublikum und anderen Interessenten das Projekt und den innovativen Heissluftkreislauf näher zu bringen, wurde eine eigene Website [www.heissluftturbine.ch](http://www.heissluftturbine.ch) (siehe Abbildung 12) erstellt. Neben technischen Informationen wurde hier auch der Projektfortschritt regelmässig mit Beiträgen und Fotos aufgeschaltet.

Aktuell sind die geplanten Anlässe 2017 auf der Homepage ausgeschrieben.

Die Rückmeldungen über diese Form der Projektinformation waren sehr positiv und für uns als Hersteller sehr praktisch. Oft konnten wir auf weiterführende Informationen der Website verweisen.

Die Auswertung der Website von „google adwords“ hat bis jetzt ca. 15'000 Aufrufe gezählt.



### 8.3 Vorstellungen / Tagungen / Konferenzen

Die Schmid AG hat den Focus besonders auf Projektvorstellungen an Tagungen und Konferenzen gesetzt. Unter diesem Punkt sind einige ausgewählte Aktivitäten aufgelistet, bei welchem die HLT Compact Düdingen und die eingesetzte Technologie vorgestellt wurde.

- September 2014: Vorstellung Projekt / Technologie Mogami Town (Tomoe, Japan)
- September 2014: Vorstellung Projekt / Technologie Herbstanlass 2014 Holzenergie-Holzverstromung
- März 2015: Vorstellung Projekt / Technologie Rotary Frauenfeld TG
- Juni 2015: Vortrag Genova in Italien / Andreas Soder
- März 2016: Politischer Anlass CVP / SVP / FDP: Stromerzeugung aus Holz
- März 2016: Planeranlass Vorstellung Projekt / Technologie in Brunex, Südtirol
- März 2016: Partneranlass Amsterdam Begreen
- März 2016: Präsentation Globe 2016 in Vancouver
- April 2016: Vorstellung Projekt / Technologie Planeranlass Roadshow in DE-Bonndorf
- Juni 2016: WWK-Forum 2016, EHT Zürich, Vorstellung Projekt / Technologie
- August 2016: Planeranlass im Südtirol: Projektvorstellung
- Januar 2017: Mitteleuropäische Biomassekonferenz in Graz
- Januar 2017: Vorstellung im Foyer, 9. Tagung Holzenergie Biel
- Januar 2017: Schmid-Planeranlass: Referat Projekt
- Februar 2017: Vorstellung im Foyer, Fernwärmeforum Biel

Diese Aufzählung ist nicht abschliessend.

### 8.4 Fachtagung HLT

2017 werden diverse Fachanlässe stattfinden, welche die HLT-100 Compact und das Projekt Düdingen thematisieren.

Zwei Anlässe sind direkt in Düdingen auf der Anlage geplant (11.05.2017 sowie am 7.9.2017).

Es wird voraussichtlich jeweils eine Morgen- und eine Nachmittagsveranstaltung (9.00-12.00 Uhr / 14.00-17.00 Uhr) stattfinden.

Der Ablauf ist wie folgt geplant:



– Vorträge

Die extern befeuerte Gasturbine

Der Heissluftkreislauf der Schmid AG

Vorstellung der einzelnen Komponenten inkl. Turbogruppe und Steuerung

Dimensionen und Planungsbeispiel

Randbedingungen und Betriebserfahrungen

– Rundgang und Besichtigung Anlage Düdingen

– Fragen und Ausklang mit Apéro

Im Juni 2017 wird ebenfalls die Schmid Fachtagung „Holzenergie“ stattfinden.

Wir rechnen mit 170 Teilnehmern. Das Projekt HLT-100 Compact wird analog dem Inhalt der Veranstaltungen in Düdingen vorgestellt.

## 8.5 Drucksachen

Verschiedene Drucksachen wurden vor Ort aufgelegt sowie im Rahmen von den durchgeführten Veranstaltungen und Präsentationen zur Information abgegeben:

- Prospekt Vorstellung Projekt Düdingen
- Werbebanner für die Vorstellung an Messen / Tagungen usw. (in allen Sprachen)  
Neuaufgabe im 2016
- Poster / Schautafeln zur Erklärung
- Fernwärmebroschüre
- Schmid-Kundenmagazin Focus

Als besonders wichtig erachten wir auch den Bericht in unserem Kundenmagazin Focus. Das wird in einer Auflage von rund 7000 Exemplaren in vier Sprachen gedruckt und erreicht ausschliesslich und ohne Streuverlust interessierte Fachpersonen.

## 8.6 Medien und Fachmagazine

Während der Projektdurchführung wurden einzelne Artikel in Fachzeitschriften z.B. „SchweizerHolzZeitung“ Nr10 2014 und in "SpektrumGebäudeTechnik" 2/2016" über die Heissluftturbine veröffentlicht. Eine Zusammenstellung inklusive der Pressemitteilungen befindet sich in Anhang 3.

Da die Anlage jetzt in Betrieb ist und entsprechende Fachanlässe und Informationsveranstaltungen stattfinden, rechnen wir mit weiteren Veröffentlichungen. Entsprechende Pressemitteilungen sind geplant.



Weiterentwicklung und Optimierung einer  
Heissluftturbine im kleineren  
Leistungsbereich (80-95 kWel)

## 8.7 Präsentation Messen

Neben kleineren Veranstaltungen haben wir 2015 und 2016 an folgenden Messen teilgenommen:

- Ligna Hannover, 2015
- ISH Frankfurt, 2015
- Swissbau Basel, 2016

## 8.8 Video

Während der Fertigung in Eschlikon haben wir einen Video erstellt, welcher die Entstehung der HLT-100 Compact Düdingen dokumentiert (siehe Abbildung 13).

<https://www.youtube.com/watch?v=oK-wwCjZyls>



Fertigung Heissluftturbine Düdingen



265 Aufrufe

**Abbildung 13: Video über die Entstehung der HLT-100 Compact**

## 8.9 Ausblick 2017

Auch 2017 möchten wir an der bisherigen Strategie festhalten.

Wie unter 8.4 beschrieben, sind diverse Anlässe für 2017 geplant.



Die Informationen zu den Veranstaltungen sind bereits gestreut worden. An der Fernwärmetagung sowie an der Holzenergie-Tagung in Biel haben wir darüber informiert und eine erste Ausschreibung wird im Frühjahr 2017 im Spektrum publiziert.

Ein Versand an unseren Focus-Adressstamm ist im März 2017 geplant.

## 8.10 Resonanz beim Fachpublikum

Die Resonanz zu diesem Leuchtturmprojekt beim Fachpublikum ist enorm, auch weit über die Landesgrenzen hinweg. Die eingesetzte Technologie wird auf dem Markt sehr genau beobachtet und die Vorteile gegenüber Holzvergaseranlagen unter anderem bei der Brennstoffqualität, werden sehr positiv aufgenommen.

Besonders hoch ist das Interesse dort, wo Fördermittel (z.B. KEV) in Aussicht sind oder ein hoher Prestigeeffekt erzeugt werden soll.

Die bisher durchgeführten Projektvorstellungen waren alle sehr gut besucht.

## 9 Schlussfolgerungen

Nach Problemen mit der Beschaffung der auf das Gesamtsystem ausgelegten Turbineneinheit, musste zum einen eine alternative Turbogruppe gesucht, und andererseits die Anlage komplett neu ausgelegt und überarbeitet werden.

Mit der neuen Turbogruppe konnten Komponenten gefunden werden, die als Serienkomponenten auf dem Markt verfügbar sind, was eine vereinfachte Beschaffung und einen schnellen Austausch verspricht.

Das Ausmass der Komplexität des Schmier- und Kühlkreises wurde anfänglich stark unterschätzt, was zu Verzögerungen, Diskussionen und Schäden geführt hat. Grund sind die verschiedenen zu kühlenden Geräte mit unterschiedlichen Kühlanforderungen (Temperatur, Massenstrom, Druck).

Nach der Erfahrung im kontinuierlichen Betrieb (24h/7d) haben sich folgende Erkenntnisse herauskristallisiert:

Die Schmid Steuerung der gesamten Anlage ermöglicht einen bedienungsfreundlichen und automatischen Betrieb mit entsprechenden Sicherheitsfunktionen, Alarmmeldungen, automatischem Start und Fernüberwachung.

Für einen optimalen Betrieb ist eine volle Wärmeabnahme unumgänglich.

Im Vergleich zu der Prototypenanlage in Eschlikon konnten viele Details verbessert und die Gesamtanlage optimiert werden. Einige Verbesserungsmöglichkeiten sind noch vorhanden (z.B.: Strahlungsverluste an Rezi- und Abluftleitung, Abstimmung der Komponenten der Turbogruppe untereinander) aber deren Umsetzung darf nicht auf Kosten eines relativ robusten Systems stattfinden.

Mit der Nutzung der Turbinenabluft und der Wärmeleistung des Kühlkreislaufes sind sehr gute Gesamtwirkungsgrade erreichbar.

Die Schmid AG ist überzeugt, dass sich dieses System trotz der relativ hohen Kosten auf dem Markt behaupten wird. Die Vorteile gegenüber anderen Technologien zur Stromerzeugung aus Holz im diesem Leistungsbereich sprechen für sich wie z.B. der relativ geringe Wartungsaufwand und die grosse Bandbreite der einsetzbaren Holzqualität.

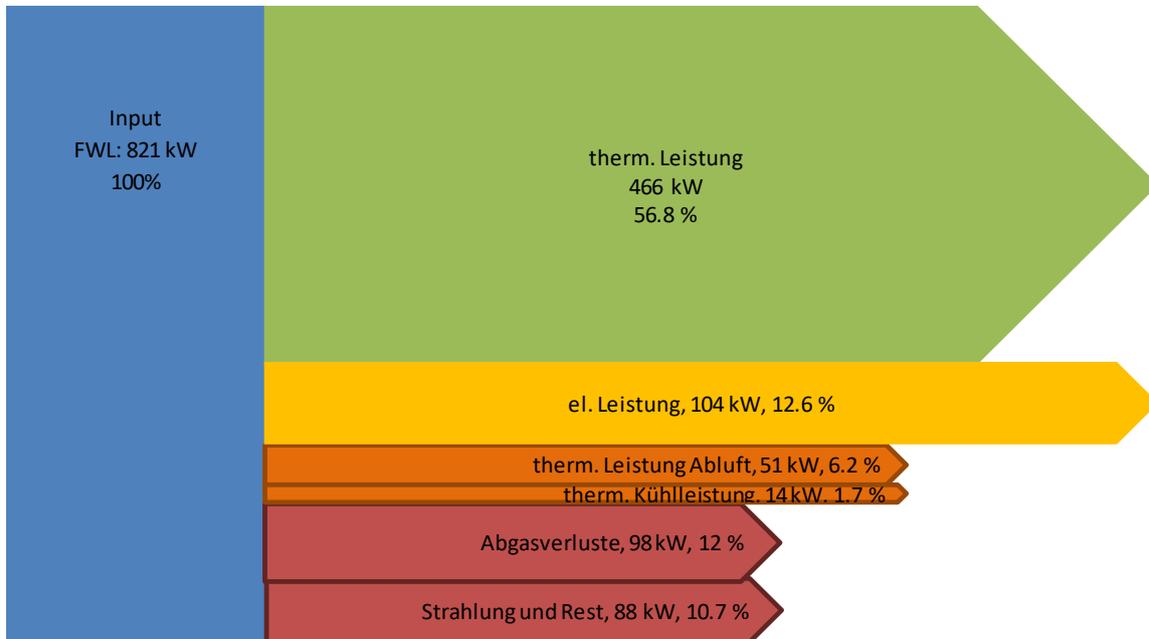


Weiterentwicklung und Optimierung einer  
Heissluftturbine im kleineren  
Leistungsbereich (80-95 kWel)

Der Einsatz von weiteren Heissluftturbinenanlagen bei weiteren Kunden ist geplant und das Ziel der Schmid AG.



## Anhang 1: Energieflussdiagramm HLT-100 Compact:



### Legende:



Angaben basieren auf den Auslegungswerten der Wirkungsgradberechnungen mit und ohne Abluftnutzung.