

Stromerzeugung aus Abwärme von Glasschmelzen – Entwicklung und erster Einsatz eines optimierten Prototypen

Abschlussbericht über das Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az 26032 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Braunschweig, Februar 2012

URBANA AGIMUS Contracting GmbH

Am Alten Bahnhof 6

38122 Braunschweig

Gerresheimer Essen (43_07_011) vorderer Deckel

Stromerzeugung aus Abwärme von Glasschmelzen – Entwicklung und erster Einsatz eines optimierten Prototypen

Abschlussbericht über das Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az 26032 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Braunschweig, Februar 2012

URBANA AGIMUS Contracting GmbH

Am Alten Bahnhof 6

38122 Braunschweig

Gerresheimer Essen (43_07_011) Titelblatt

06/02			
3 Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	26032	Referat	Fördersumme 214.000 Euro
Antragstitel	Stromerzeugung aus Abwärme von Glasschmelzen – Entwicklung und erster Einsatz eines optimierten Prototypen		
Stichworte	Organischer Rankine Prozess (Organic Rankine Cycle, ORC); Wärmeanlage Niedertemperatur; Abhitzeverstromung; FCKW-freie ORC Anlage		
Laufzeit (Verl. notw.)	Projektbeginn 16.11.2007	Projektende 1. Februar 2012	Projektphase(n)
Zwischenbericht vom 5. August 2008	Zwischenbericht vom 28. Mai 2009	Zwischenbericht vom 29. März 2010	Zwischenbericht vom November 2011
Bewilligungsempfänger	URBANA AGIMUS Contracting GmbH Am Alten Bahnhof 6 38122 Braunschweig		Tel 0531 25676 0 Fax 0531 25676 66
			Projektleitung Dr. Ralf Utermöhlen
			Bearbeiter Dipl.-Ing. (FH) Robert Hennig
Kooperationspartner	GMK - Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen mbH Reuterstraße 5 18211 Bargeshagen Ansprechpartner: Herr Dr. Uli Drescher		
	Gerresheimer Essen GmbH Ruhrau 50 45279 Essen Ansprechpartner: Herr Frank vom Bruck		
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens			
Die Machbarkeit einer effizienten Stromerzeugung mit einem ORC (engl.: Organic Rankine Cycle, übersetzt: Organischer Rankine Prozess) soll mit einem Prototypen demonstriert werden, der Basis für eine Serienproduktion ist.			
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden			
Grundlegende Umrüstungen und Neuauslegungen der Wärmetauscher und der Turbine. Präzise Messungen der Prozessparameter, um das Optimierungspotenzial für eine Serie zu erfassen und ausschöpfen zu können.			
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de			

Ergebnisse und Diskussion

Die Anlage läuft seit 14. Juli 2011 bis auf schwingungsbedingte Ausfälle (Schwingungen am Generator bzw. Turbine, die trotz mehrfacher Auswuchtungen noch nicht abgestellt sind) stabil, aber immer noch weit unter der erwarteten elektrischen Netto-Leistung von 520 kW. Es wurde seit dem letzten Zwischenbericht vom November 2011 keine weitere Leistungssteigerung erreicht. Die maximale erreichte elektrische Bruttoleistung beträgt 394 kW (entsprechend ca. 344 kW netto).

Mit Datum 7. Februar 2012 beträgt die bisher eingespeiste Strommenge 1.678.363 kWh.

Aufgrund der in der jetzigen Anlagenkonstellation fehlenden Leistung, bzw. der zu geringen Jahresarbeit, wurde die Anlage noch nicht abgenommen. Es wird eine Abnahme mit Mängeln vorbereitet und die Anlage dann mit Minderleistung weiter betrieben.

Der Anlagenbauer/Generalunternehmer (GU) GMK argumentiert, dass die Abgaszusammensetzung der Glasschmelze nicht vertragskonform ist und dass die abweichende Zusammensetzung Auswirkungen auf die Wärmeübertragung hat. Dies ist nicht stichhaltig, da durch den TÜV Nord eine ausgekoppelte Abgaswärme von 2.624 kW nachgewiesen wurde und bei manuell frisch gereinigtem Kessel der nachgeschaltete Prozess aber selbst unter diesen optimalen Bedingungen nicht die vertragliche Leistung erbringt. Das zur Klärung dieser Fragen gemeinsam von GMK und UAC beauftragte TÜV Gutachten wird von GMK nicht anerkannt.

Auf Grund der Tatsache, dass auch nach Grundreinigung des Kessels und der Rohrleitung die Anlage bei weitem nicht auf die Sollleistung kommt, sind wir sicher, dass der Generalunternehmer GMK uns einen nicht vertragskonformen Kessel, sowie eine nicht entsprechend den Auslegungsparametern funktionierende Anlage geliefert hat. Weiterhin werden im originären ORC-Kreis durch noch nicht geklärte technische Probleme die seitens GMK zugesagten 20 % Wirkungsgrad nicht erreicht.

GMK seinerseits verteidigt sich mit der Behauptung, das Abgas enthielte zu wenig Energie (wahr ist, dass die Feuchte geringer und der Volumenstrom etwas größer sind als der Auslegungsfall, ein ausreichend dimensionierter Kessel müsste das aber abfangen), die Abgaszusammensetzung sei der Grund für die schlechte Wärmeübertragung und dass zu viel Staub im Abgas sei (wahr ist, dass der Auslegungsfall 10 mg/m³ um den Faktor zwei überschritten wird – also bis 20 mg/m³ - was aber genehmigungskonform ist (BlmSch-Genehmigung nach 4. BImSchV; Bescheid vom 22.1.2007)).

Die ursprüngliche Wirtschaftlichkeitsberechnung geht bei den bisher erreichten Parametern nicht auf, zumal für den langfristigen Betrieb der Anlage weitere Investitionen anstehen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation haben noch nicht stattgefunden. Das Interesse am Markt ist sehr wohl vorhanden. Trotz aller Probleme steht der Kunde Gerresheimer weiter zu der Aussage, drei weitere Anlagen bauen und im Contracting betreiben lassen zu wollen.

Ein Fachartikel ist in Vorbereitung, vorgesehen für ein Journal wie BWK o.ä.

Fazit

Es konnte mit dem geförderten Projekt belegt werden, dass industrielle Abwärme aus Glashütten oder vergleichbaren Industrien mit dem Temperaturniveau 350 bis 400 °C ohne weiteren Primärenergieträgereinsatz verstromt werden können. Es konnten wertvolle Kenntnisse für die Standardisierung solcher Anlagen gewonnen werden, dies gilt sowohl für den Kesselbau als auch für Rohrleitungsführung, Turbine, Generator und Rückkühl- / Kondensationstechnik ohne hohe Wasserverluste.

Die avisierten Wirkungsgrade in Größenordnung von 20 % (Netto-Strom/ausgekoppelte Wärme) konnten nicht erreicht werden und sind beim aktuellen Stand der Technik offenbar zu ambitioniert, der Betreiber wird auf eigene Kosten während des Regelbetriebes eine Wirkungsgradoptimierung anstreben. Durch die gestiegenen Strompreise können solche Anlagen künftig trotz des verminderten Wirkungsgrades wirtschaftlich sein.

4 Inhaltsverzeichnis

1	Vorderer Deckel	1
2	Titelblatt.....	2
3	Projektkennblatt	3
4	Inhaltsverzeichnis.....	5
5	Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	6
6	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	6
7	Zusammenfassung.....	7
7.1	Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels	7
7.2	Erzielte Ergebnisse	7
7.3	Empfehlungen für das weitere Vorgehen.....	8
7.4	Angabe von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Deutsche Bundesstiftung Umwelt mit Angabe des Aktenzeichens	9
8	Einleitung	10
9	Hauptteil	10
9.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse	10
9.2	Diskussion der Ergebnisse	17
9.3	Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand des Wissens, der Technik, des Handelns und der gesetzlichen Mindestanforderungen.....	17
9.4	Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	19
10	Fazit.....	19
11	Literaturverzeichnis	19
12	Anhänge.....	19
13	Rückendeckel.....	19

5 Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: 3D-Ansicht Abwärmenutzung Gesamt	8
Abbildung 2: Elektrische Leistung und Temperaturspreizung Rauchgas für den Zeitraum seit Juli 2011	12
Abbildung 3: Momentaufnahme aus der Leittechnik der ORC Anlage; Datum 5. Januar 2012.....	12
Abbildung 4: Auszug aus dem Bauvertrag UAC/GMK aus 2007, Festlegung der Abgasparameter	13
Abbildung 5: Bilanzierung des Thermoölkreislaufs am Abhitzeessel.....	15
Abbildung 6: Kreisprozess im T,S-Diagramm, Auszug aus GMK Zwischenbericht siehe Anlage 6	16
Abbildung 7: Diagramm Saugzug Leistungsaufnahme	18

6 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

- ORC: Organik Rankine Cycle
- GMK: Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen GmbH, Bargeshagen (Anlagenbauer als GU)
- GU: Generalunternehmer
- GxEssen: Gerresheimer Essen GmbH, vormals Wisthoff GmbH, Betreiber der Glashütte
- UAC: URBANA AGIMUS Contracting GmbH (Auftraggeber von GMK)
- BImSch-Genehmigung: Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz
- BImSchV: Bundes-Immissionsschutzverordnung
- BWK: Kurz für BWK – Das Energie-Fachmagazin
- DRN: Firma Dresser Rand Nadrowski; Lieferant des Turbo-Generator-Sets
- T,S-Diagramm: In der Thermodynamik und Energietechnik gebräuchliches Zustandsdiagramm zur Darstellung von Prozessen. Die absolute Temperatur T wird über der Entropie abgetragen.

7 Zusammenfassung

7.1 Durchgeführte Untersuchungen, Entwicklungen, Modellanwendungen mit Angabe des Ziels

Die Machbarkeit einer effizienten Stromerzeugung mit einem ORC Modul soll mit einem Prototypen demonstriert werden, der Basis für eine Serienproduktion ist.

Ziele sind grundlegende Umrüstungen und Neuauslegungen der Wärmetauscher und der Turbine, sowie präzise Messungen der Prozessparameter, um das Optimierungspotenzial für eine Serie zu erfassen und ausschöpfen zu können.

7.2 Erzielte Ergebnisse

Grundsätzlich funktioniert die ORC-Anlage im Zusammenspiel mit der Glasschmelze. Es konnte mit dem geförderten Projekt somit belegt werden, dass industrielle Abwärme aus Glashütten oder vergleichbaren Industrien mit dem Temperaturniveau von 350 bis 400 °C ohne weiteren Primärenergieträger-Einsatz verstromt werden kann. Die elektrische Nettoeinspeiseleistung von 520 kW wird in der jetzigen Anlagenkonstellation nicht erreicht, die avisierten Wirkungsgrade in der Größenordnung von 20 % (Netto-Strom/ausgekoppelte Wärme) konnten nicht erreicht werden und sind beim aktuellen Stand der Technik offenbar zu ambitioniert. Durch die gestiegenen Strompreise können solche Anlagen künftig trotz des verminderten Wirkungsgrades wirtschaftlich sein.

Es wurden grundlegende Erfahrungen mit dem aus dem E-Filter austretenden Staub gemacht, der von GMK weder bei der Auslegung des Rauchgas-Wärmeübertragers, noch bei dem automatischen Abreinigungssystem für die Wärmeübertragungsflächen ausreichend berücksichtigt wurde. Insbesondere die statische Aufladung des Staubs nach Austritt aus dem E-Filter wurde unterschätzt und bereitet beim Dauerbetrieb der Anlage Probleme. Diese Erkenntnis ist perspektivisch auf alle Wärmerückgewinnungssysteme anwendbar, deren Feuerung und Rauchgasreinigung nach dem gleichen Prinzip erfolgt. (Die Rauchgasreinigung erfolgt mittels E-Filter und dem Sorptionsmittel Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Horizontal E-Filter BS780 mit vorgeschalteter Sorptionsstufe.)

Weiterhin konnten sehr wertvolle Kenntnisse für die Standardisierung solcher Anlagen gewonnen werden, dies gilt sowohl für den Kesselbau als auch Rohrleitungsführung, Turbine, Generator und die neu entwickelte Rückkühl- / Kondensationstechnik ohne hohe Wasserverluste.

Der Kondensator ist eine Neuentwicklung durch GMK mit minimalem Wasserverbrauch und funktioniert offenbar bislang fehlerfrei.

Des Weiteren konnten wertvolle Kenntnisse für das Zusammenspiel mit der Glashütte gewonnen werden. So stand zum Beispiel die ORC-Anlage im Zeitraum Januar 2011 bis Juli 2011 still, weil immer wieder Schwankungen im Herdraumdruck der Glaswannen auftraten, wenn die ORC-Anlage in Betrieb genommen wurde. Erst nach einer Grundreinigung des Saugzuges der Glashütte stellte sich heraus, dass

- a) der Saugzug durch einmalige Ablösungen größerer Staubmengen aus dem Bypass verschmutzt war und daher unzureichend absaugte,
- b) im Regelbetrieb die ORC-Anlage den Saugzug jedoch deutlich entlastet (geringere Volumenströme nach Abkühlung) und damit auch positive Auswirkungen auf den Glasschmelzprozess hat.

Im Ergebnis konnte demonstriert werden, dass die Abhitzeverstromung von industrieller Abwärme durch Einsatz von ORC-Anlagen grundsätzlich möglich ist. Jedoch gelten im Zusammenspiel mit Industrieanlagen und bei der Berücksichtigung der individuellen Bedürfnisse eines Industriebetriebes (für welchen die eigene Produktion ohne riskante Veränderungen der Prozessparameter natürlich immer prioritär ist) andere Randbedingungen, als dies z.B. bei Restwärmenutzung von Biogasanlagen oder Abwärmeverstromung von Holzhackschnitzelfeuerungen der Fall ist. Die Abhitzeverstromung von industrieller Abwärme durch Einsatz von ORC-Anlagen kann künftig wirtschaftlich sein, auch wenn im vorliegenden Demonstrationsvorhaben die Wirtschaftlichkeit nicht erreicht wurde.

7.3 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Der Betreiber wird auf eigene Kosten während des Regelbetriebes eine Wirkungsgradoptimierung anstreben.

Als Maßnahmen zur Ertüchtigung der Anlage stehen zurzeit folgende – teils grundlegende – Änderungen oder Ergänzungen der Anlage zur Debatte:

- Neuauslegung / Vergrößerung des Abgaswärmeübertragers
- Änderung der Rauchgasstrecke nach E-Filter: Die aktuelle Rauchgasführung (siehe Abbildung 1, 3-D-Zeichnung der Gesamtanlage) ist von der Problematik geprägt, dass der Bypass mit der notwendigen Bypass-Klappe abwärts gerichtet ist. Auf Grund der beschriebenen Staubprobleme lagern sich im Regelbetrieb auf der Bypassklappe regelmäßig Staubmengen ab. Dies ist nicht zu verhindern, wird aber zusätzlich durch die elektrostatische Aufladung des Staubes gefördert. In der praktischen Konsequenz lösen sich dann erhebliche Staubmengen schlagartig, wenn die Bypassklappe geöffnet wird (z.B. vor Reinigung oder Revision oder bei Anlagenstillstand der ORC-Anlage aus anderen Gründen). Abhilfe kann an dieser Stelle nur die Veränderung der Bypassführung schaffen, indem der Bypass nach oben gerichtet wird und die Klappe damit über dem normalen Strömungsverlauf im Regelbetrieb angeordnet ist.
- Änderungen am E-Filter im Zusammenhang mit Wannenneubau der Glasschmelze in voraussichtlich in 2013
- Identifikation der geeignetsten Reinigungsmethode für den Rauchgaswärmeübertrager (Druckluft oder Kugelregen)
- Aufrüstung des Kessels mit zusätzlicher Wärmeübertragungsfläche
- Leitbleche am Kondensator, sowie weitere kleinere Modifikationen die den Wirkungsgrad weiter steigern könnten.

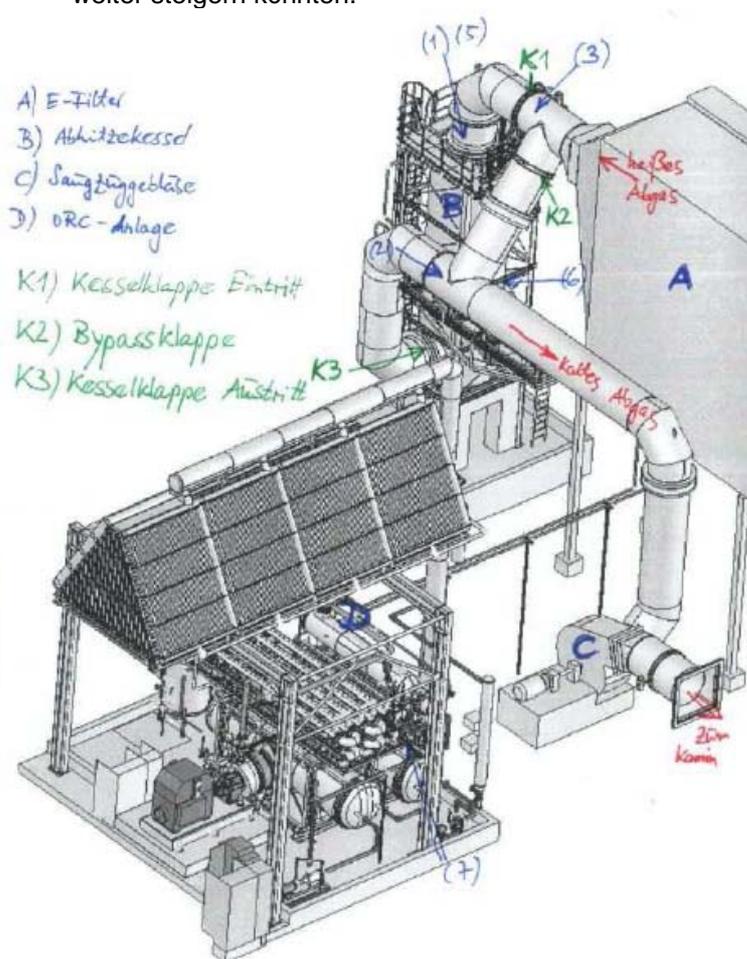


Abbildung 1: 3D-Ansicht Abwärmennutzung Gesamt

7.4 Angabe von Kooperationspartnern und Hinweis auf die Deutsche Bundesstiftung Umwelt mit Angabe des Aktenzeichens

Bewilligungsempfänger	URBANA AGIMUS Contracting GmbH Am Alten Bahnhof 6 38122 Braunschweig Ansprechpartner: Herr Dipl.-Ing. (FH) Robert Hennig	
Kooperationspartner	GMK - Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen mbH Reuterstraße 5 18211 Bargeshagen Ansprechpartner: Herr Dr. Uli Drescher	
	Gerresheimer Essen GmbH Ruhrau 50 45279 Essen Ansprechpartner: Herr Frank vom Bruck	
Gefördert durch die DBU unter dem Aktenzeichen: 26032		

8 Einleitung

Bei vielen industriellen Prozessen fällt in großem Ausmaß Abwärme an. Wenn diese nicht für Heizzwecke genutzt werden kann, wird sie an die Umgebung abgegeben. Eine Stromerzeugung war bisher wirtschaftlich nicht möglich. Mit dem Organic Rankine Cycle (ORC) steht ein Kreisprozess zur Verfügung, mit dem Strom aus Abwärme bei Temperaturen zwischen 300 °C und 400 °C erzeugt werden kann. Steigende Strombezugspreise rücken den ORC in den Bereich der Wirtschaftlichkeit. Bisher wird der ORC im Bereich Geothermie und bei der dezentralen Biomasseverbrennung eingesetzt. Eine Adaption für eine effiziente Stromerzeugung ist notwendig.

Die Machbarkeit einer effizienten Stromerzeugung mit einem ORC soll mit einem Prototypen demonstriert werden, der Basis für eine Serienproduktion ist. Hierfür sind grundlegende Umrüstungen und Neuauslegungen der Wärmetauscher und der Turbine notwendig.

Des Weiteren sollen an dem Prototypen präzise Messungen der Prozessparameter durchgeführt werden, um das Optimierungspotenzial für eine Serie zu erfassen und ausschöpfen zu können.

Für das Projekt haben sich ein ORC-Anlagenbauer, ein innovativer Betreiber einer Glasschmelze und ein Energieanlagen-Contractor zusammengefunden, da für eine Direktumsetzung durch die Glashütte die ROI-Zeiten zu lang sind.

Durch die Umsetzung dieses Projektes wird Strom ohne einen zusätzlichen Verbrauch an Energieträgern erzeugt. Somit wird fossil erzeugter Strom ersetzt und die damit verbundenen Umweltbelastungen werden gesenkt.

9 Hauptteil

9.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Im Bezug auf die beiden Hauptaspekte

- I.) Grundlegende Umrüstungen und Neuauslegungen der Wärmeübertrager und der Turbine
- II.) Messungen der Prozessparameter um das Optimierungspotential für eine Serienproduktion ausschöpfen zu können

wurden folgende Methoden angewandt und Ergebnisse erzielt.

Zu I.) Grundlegende Umrüstungen und Neuauslegungen der Wärmeübertrager und der Turbine:

Der Rauchgaswärmeübertrager wurde von der Firma AKB Wiesloch auf die vertraglich festgelegten Abgasparameter ausgelegt (Grundlage für die vertraglich festgelegten Werte war in 2007 die Berechnung der Firma SORG, siehe Anlage 1 „Daten-Temperaturen Sorg Original“, Excel Tabelle) Durch Nachrechnung der Auslegungsunterlagen ist seit 16.12.2010 bekannt, dass die mittlerweile insolvente Firma AKB Wiesloch den Rauchgaswärmeübertrager ohne jegliche Verschmutzungsreserve ausgelegt hat (siehe Anlage 8 _Kesselberechnung AKB aus 2008). Ebenso falsch ausgelegt wurde die automatische Abreinigungseinrichtung, die – so zurzeit die Vermutung – hauptsächlich aufgrund der statischen Aufladung des aus dem E-Filter austretenden Reststaubs nicht funktioniert.

Zur Neuauslegung der Turbine ist zu sagen, dass die vor Vertragsschluss angebotene Turbine Siemens AFA 10 auf Fabrikat Dresser-Rand-Nadrowski C11S geändert wurde. Über dieses Projekt wurde mit DRN ein weiteres Deutsches Unternehmen für den Bau von ORC-Turbinen qualifiziert. Vor dem Hintergrund der bisherigen schwerwiegenden Probleme, die Anlage überhaupt am Laufen zu halten und da sie bislang nicht in Vollast gegangen ist, hat eine verwertbare Beurteilung des Turbinenwirkungsgrades noch nicht stattgefunden.

Zum zeitlichen Verlauf seit Errichtung der Anlage ist zu sagen, dass die Anlage mit Datum 12.03.2010 fertig errichtet war und nach der Warminbetriebnahme erstmalig im Juli 2010 Strom erzeugte.

Folgende Umstände haben zu der langen Inbetriebnahmephase geführt:

- Klappen im Rauchgaskanal klemmten und waren festgerottet, konnten dann nur in bestimmten Zeitfenstern gangbar gemacht werden [März 2010];
- Die Turbinen-Inbetriebnahme im April wurde mehrfach verzögert, weil es zu Schwingungen am Generator kam. Nach mehreren Auswuchtversuchen on-site und off-site gab der Turbinen- und Generatorlieferant Dresser Rand Nadrowski (DRN) zu, dass der Lieferant des Generators ABB mitgeteilt habe, der Generator habe einen Serienschaden, der aber nicht bei allen Exemplaren auftritt [Dies wurde im April/Mai 2010 bekannt];
- Ab Mitte Mai 2010 wurde ein Ersatzgenerator gesucht, die Lieferung seitens ABB hätte 14 Wochen gedauert. Ein Marelli Motor, der von DRN angeboten wurde, sollte von GMK nur als Übergangslösung akzeptiert werden, da man nicht sicher war, dass er die Leistung bringt. GMK schlug den Klageweg gegen ABB vor. UAC hat in dieser Situation entschieden, den Marelli Motor durch DRN einbauen zu lassen unter dem Vorbehalt, dass er die Leistung bringt (Hier ist bei DRN Schadenersatz angemeldet.) [Mitte Juni 2010];
- Erforderliche Restisolierarbeiten am Kondensator, die hohen Julitemperaturen (dadurch erfolgte nach Aussage von GMK die Rückkühlung nicht vollständig) und Probleme mit Ölständen waren die in den ersten drei Juli Wochen 2010 zu lösenden Probleme. Am 19. Juli 2010 wurde die Anlage hochgefahren und es wurde mit der Einspeisung begonnen;
- Erneute Klappenverklebungen und Silikonöl-Fehlmengen traten Ende Juli bis Anfang August 2010 auf;
- Aufgrund der Saugzugprobleme und Problemen mit dem Herdraumdruck seitens der Glashütte stand die Anlage bis Sommer 2011 still;
- Ab Juli 2011 bis Februar 2012 erfolgte die erste Regelbetriebsphase ohne längere Stillstandszeiten außer für manuelle Kesselreinigungen und Betriebswuchtungen am Generator;

Zu II.) Messungen der Prozessparameter um das Optimierungspotential für eine Serienproduktion ausschöpfen zu können:

Das Projekt war von Anfang an durch regelmäßige Messungen der Prozessparameter geprägt. Dies war ursprünglich geplant, um das Optimierungspotential für eine Serienproduktion ausschöpfen zu können, diente im Projektverlauf dann aber auch nicht zuletzt der Aufgabe, den Grund für den mangelnden Wirkungsgrad der Anlage herauszufinden und die Ursache für die fehlende Leistung der Anlage zu klären.

Aus den Leistungsaufschreibungen der Prozessparameter ergibt sich folgende Übersicht, die erste Regelbetriebsphase stellt sich bezüglich elektrischer Einspeisung und Temperaturspreizung wie folgt dar (Sie finden die Grafik in besserer Auflösung im Anhang als Anlage 7_0125_Daten aus den Screenshots_Überprüfung Leistung):

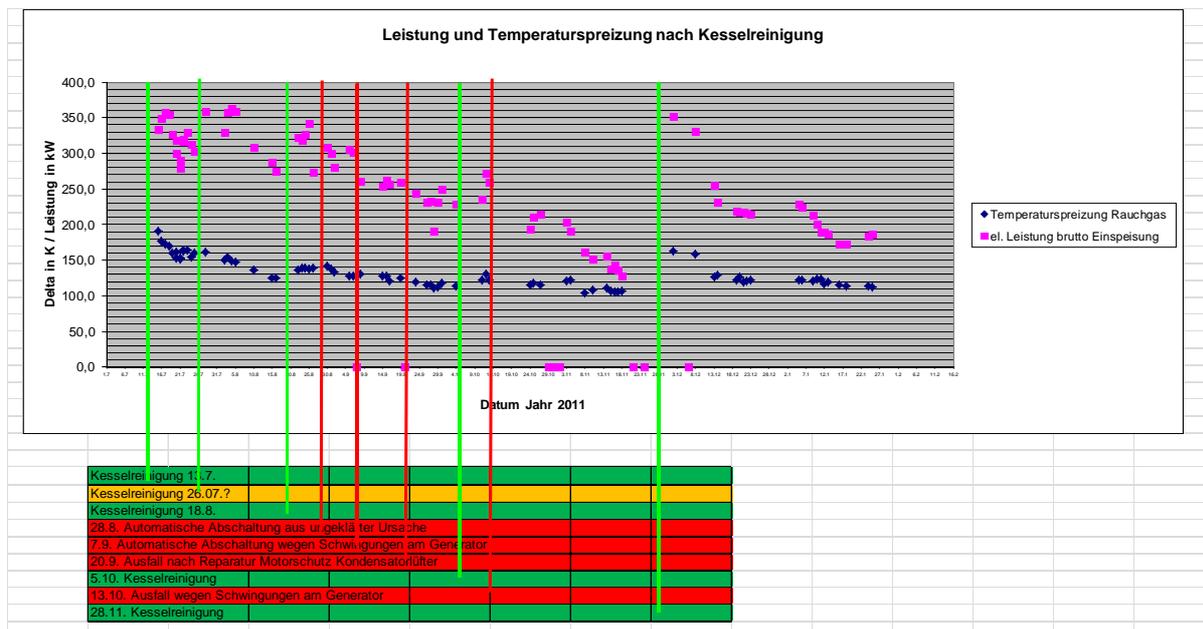


Abbildung 2: Elektrische Leistung und Temperaturspreizung Rauchgas für den Zeitraum seit Juli 2011

Auf die Daten der Daueraufzeichnung der Leittechnik hat UAC keinen Zugriff, diese müssen jedes Mal vom Datenträger kopiert werden, der sich in dem Steuerungsschrank vor Ort bei der Anlage befindet. Die zugrundeliegenden Daten für diese Darstellung sind die Aufzeichnungen aus den Momentaufnahmen der Leittechnik. Ein UAC Mitarbeiter hat wenn möglich täglich eine Momentaufnahme der Leittechnik gemacht und die entscheidenden Parameter Rauchgastemperatur und elektrische Momentanleistung festgehalten.

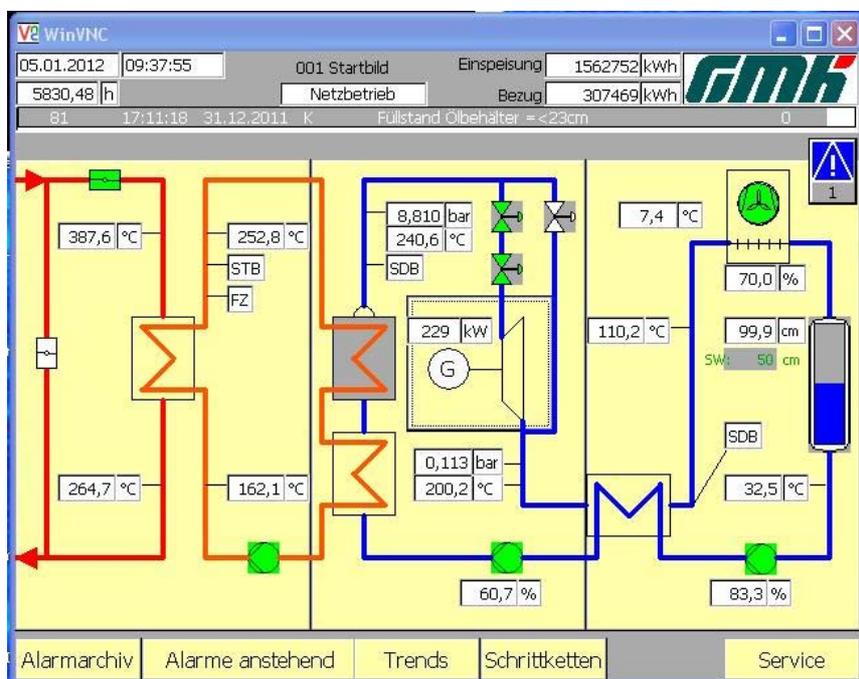


Abbildung 3: Momentaufnahme aus der Leittechnik der ORC Anlage; Datum 5. Januar 2012

Neben den offiziellen wiederkehrenden Emissionsmessungen wurden im bisherigen Betrieb folgende Messungen durchgeführt:

- Zwei offizielle Messungen durch den TÜV Nord
 - Erste offizielle TÜV Messung am 14.01.2011
 - Zweite offizielle TÜV Messung am 30.11.2011 (Bericht liegt seit 03.01.2012 vor)
 - Siehe Anlage 2 (TÜV Bericht 2011_0104) und Anlage 3 (Bericht TÜV Messung Januar 2012)
- Messungen durch Fa. Hitachi im Auftrag von Gerresheimer
 - Dies ist kein offizielles Messergebnis, lediglich eine Messung zur Plausibilisierung
 - Siehe Anlage 4 (Hitachi Messung 20101013)
- GMK eigene Messungen; Daueraufzeichnung der Leittechnik etc.
 - Die GMK eigenen Messungen dienen GMK zur Plausibilisierung; Aussagen zu den GMK eigenen Messungen sind in den GMK Zwischenberichten vom 20.08.2010 und vom 03.08.2011 enthalten; Siehe Anlagen 5 (GMK_Zwischenbericht vom 20Aug2010) und 6 (GMK_Zwischenbericht_vom 30Aug2011)
 - Die Daueraufzeichnung der Leittechnik hat offiziellen Charakter, die Messungenauigkeiten sind jedoch höher als bei den offiziellen TÜV Messungen. Im Abgas wird hierbei nur die Temperatur gemessen. Ein Auszug aus der Daueraufzeichnung befindet sich im Anhang als Anlage 7

Diese Berichte und Auswertungen sind im Anhang als Anlagen enthalten und sind Bestandteil des Hauptteiles des Abschlussberichtes; wir fassen hier tabellarisch und textlich nur die wesentlichen Ergebnisse zusammen.

	Normvolumenstrom Abgas, trocken	Ausgekoppelte Wärmemenge in kW	Wärmekapazität in kJ/kgK	Staub in mg/m³(i.N.)	Bemerkung
Gemäß Vertrag	33.000	2.600	n.a.	<20	
TÜV 14.01.2011	Ca. 31.600	n.a.	n.a.	20,3	nur bei eingeschalteter ORC Anlage gemessen, dadurch Staub und Volumenstrom verfälscht
TÜV 30.11.2011	33.246	2.624	1,13	n.a.	
Hitachi 1.10.2010	35.914	2.066	1,09	Ca. 5	
GMK Juli 2010	32.394	1.830	n.a.	n.a.	8% Verlust über Bypass
GMK Juli 2011	=> Auswertung der bisherigen Gutachten und Erfahrungen, keine neue Messung; Gemäß dem Zwischenbericht kann die Leistung des Abhitzekeessels nicht auf 2.600 kW angehoben werden, maximal wären 2.350 kW erreichbar. Als Hauptgrund nennt GMK die abweichenden Abgasparameter				

Tabelle 1: Übersicht über die Messungen/Auswertungen

Im Bauvertrag zwischen UAC und GMK steht folgendes zu den Abgasparametern:

Gerresheimer Essen GmbH betreibt eine Glasschmelze über 8.760 h pro Jahr. Die Wärme wird nach dem Elektrofilter vor dem Saugzuggebläse ausgekoppelt. Die Abluft nach der Elektrofilteranlage hat folgende Eigenschaften:	
- Normvolumenstrom	33.000 m³/h
- Temperatur	370°C
- Staubbelastung	<10 mg/Nm³tr
- thermische Leistung	2.600 kW bei Abkühlung auf 180°C (vermutlich)
- Rauchgaszusammensetzung (in Gew.%, gem. Angaben der Firma SORG GmbH)	
○ CO ₂	10,4
○ H ₂ O (Dampf)	17,3
○ N ₂	71,4
○ O ₂	0,9
- max. Rauchgastemperatur	435°C

Abbildung 4: Auszug aus dem Bauvertrag UAC/GMK aus 2007, Festlegung der Abgasparameter

Daueraufzeichnung der Leittechnik

Mit der Daueraufzeichnung der Leittechnik werden sämtliche für die Steuerung relevanten Daten gespeichert. Rückschlüsse auf die Abgasparameter sind kaum möglich, bis auf die Angabe der Rauchgastemperatur. ORC-seitig sind viele Daten vorhanden. Folgende Daten werden kontinuierlich mitgeschrieben:

Öldurchfluß vor Gleitringdichtung, Öldruck nach Gleitringdichtung, Schmieröldruck, Öltemperatur nach Gleitringdichtung, Temperatur nach Ölkühler, Temperatur vor Ölkühler, Dampftemperatur Turbineneintritt, Dampftemperatur Turbinenausritt, Lagertemperatur Antriebsseite, Lagertemperatur Lüfterseite, Wicklungstemperatur L1, Wicklungstemperatur L2, Wicklungstemperatur L3, Lagertemperatur Turbinenseite, Lagertemperatur Generatorseite, Schwingung Antriebsseite, Schwingung Lüfterseite, Lagerbock Schwingungen, Lagerbock Schwingungen, Axialpositionsüberwachung, Turbinendrehzahl Sensor 4, Turbinendrehzahl Sensor 5.

Eine vollumfängliche Auswertung sämtlicher Parameter hat noch nicht stattgefunden. Aufgrund der Tatsache, dass die Anlage bei Weitem noch nicht die Nennleistung erreicht hat, wurde sich bisher darauf konzentriert, die wesentlichen Gründe für die Minderleistung zu finden.

Ein Auszug aus der Daueraufzeichnung befindet sich im Anhang als Anlage 7.

TÜV Messung am 14.01.2011

Die vertraglichen Parameter konnten nicht 100% nachgewiesen werden. Es wurde nur bei eingeschalteter ORC Anlage gemessen, was die Aussagen zum Volumenstrom und insbesondere zum Staub verfälscht. In der Anlage hatte sich bereits Staub in großen Mengen angesammelt. Die Rohrleitung wurde vor der Messung nicht ausreichend gereinigt. Das erklärt die von den bisherigen Emissionsmessungen abweichenden Staubwerte.

Hinzu kommt, dass durch die Mehrbelastung des E-Filters und des Saugzugs durch unsere Anlage (Grund: der Staub, der sich durch die im Rahmen der ORC Anlage notwendigen Einbauten zusätzlich in Kessel und Rohrleitung ansammelt) die E-Filter Anlage und der Saugzug in Mitleidenschaft gezogen wurden, bzw. dass sich der Wartungsintervall verkürzt hat. Gerresheimer hat den Saugzug Mitte 2011 umfänglich ertüchtigt.

TÜV Messung am 30.11.2011

Die vertraglichen Parameter konnten trotz nicht 100% funktionierender ORC Anlage nachgewiesen werden, bis auf Staubmessung die nicht stattgefunden hat.

Staub wurde hier bewusst nicht gemessen, weil allen Beteiligten klar war, dass bezüglich Abreinigungsmöglichkeit und automatischen Staubaustrag nachgebessert werden muss und dass solange die Anlage von innen verschmutzt ist, eine Staubmessung keinen Sinn macht, da der aufgewirbelte Staub die Messung mutmaßlich verfälscht.

GMK Bericht Juli 2010

Der GU versuchte, mit diesem Zwischenbericht zu begründen, warum die Anlage bisher nicht auf Leistung kommt. Folgende Gründe wurden genannt:

Der rauchgasseitige Volumenstrom sei zu klein,
Die Staubbeladung sei zu hoch,
Geringer, jedoch vorhandener Verlust über den Bypass.

GMK Bericht Juli/August 2011

In dem GMK Bericht vom Juli/August 2011 führt GMK hauptsächlich die Ergebnisse des TÜV Messberichts auf und beschreibt die Maßnahmen die seit dem vorhergehenden GMK Bericht (vom Juli 2010, siehe oben) zur Leistungssteigerung durchgeführt wurden.

Mit einer Pseudo-Bilanz am Abhitzeessel wird versucht zu erklären, dass die 2.600 kW im Rauchgas nicht vorhanden sind.



Zwischenbericht

Projekt-Nr.309 Wisthoff

Datum: 03.08.11

Bilanzierung TÖK (Abhitzekeessel)

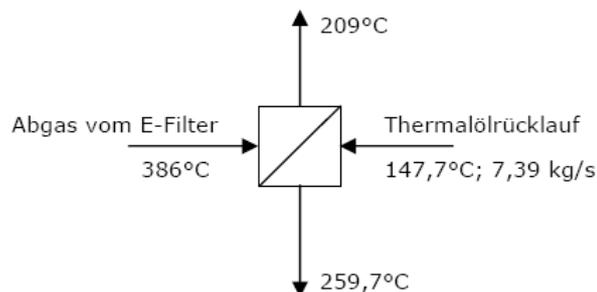


Abbildung 5: Bilanzierung des Thermoölkreislaufs am Abhitzekeessel

Weiter verweist GMK in dem Bericht vom Juli/August 2011 auf jahreszeitliche Effekte, die eine weitere Leistungssteigerung in der kälteren Jahreszeit möglich machen. Das Fazit des Berichts sagt aus, dass sofern die 2.600 kW im Rauchgas zur Verfügung stünden und sofern die Messung bei einer Außentemperatur von 12°C wiederholt würde, eine elektrische Bruttoleistung von mehr als 520 kW erreicht werden kann. Nach Erkenntnissen aus der TÜV Messung am 30.11.2011 wurden allerdings nachgewiesenermaßen ca. 2.600 kW ausgekoppelt, trotzdem kam die Anlage lediglich auf eine elektrische Leistung von max. 345 kW.

Insbesondere die gemeinsam konzertierte Messung am 30.11.2011, die mit allen Beteiligten abgestimmt und durch den TÜV Nord durchgeführt wurde, sollte Klarheit schaffen. Trotz der aufwendigen Abstimmung im Vorfeld der Messung werden die Ergebnisse nicht von allen Parteien akzeptiert, so dass sich eine einstimmige Aussage über das Optimierungspotential (dieser und künftiger Anlagen) auf folgende Punkte beschränkt:

- Verwerfen der Vorstellung, dass das Abgas immer die gleiche Zusammensetzung hat. Der Anlagenbauer GMK argumentiert, dass jegliche Abweichung von der vertraglich fixierten Abgaszusammensetzung grundlegende Auswirkung auf das Design und die Größe des Wärmeübertragers hat. UAC stellt sich hier vor, dass künftige Vertragswerke die Spanne der möglichen Abgaszusammensetzungen enthalten. UAC hatte bei Angabe der Abgasparameter vorausgesetzt, dass jedem Anlagenbauer bewusst sein muss, dass die bei einem Industrieprozess üblichen Schwankungsbreiten der Abgaszusammensetzung bei der Auslegung des Wärmeübertragers berücksichtigt werden.
- Entladung oder Verhinderung der statischen Aufladung des Staubs vor Eintritt in den Rauchgaswärmeübertrager:
Hier gibt es verschiedene Verbesserungsansätze
 - Komplettinstandsetzung des E-Filters im Zuge des Wannenneubaus 2013, somit Reduktion des Staubanteils
 - Entladung des Staubs über eine Art Entladungsgitter
 - Versetzen der Wärmeauskopplung VOR die Kalkeindüsung

Zur Bewertung des Kreisprozesses existiert bislang lediglich die vorläufige Bewertung von GMK im Zwischenbericht vom 3.8.2011 (siehe Anlage 6, GMK_Zwischenbericht_vom 30Aug2011). Abbildung 6 zeigt den Kreisprozess im T,S-Diagramm. Die vorläufige Auswertung konnte nicht für den Auslegungspunkt, sondern nur für den Punkt durchgeführt werden, bei dem die momentane elektrische Leistung von 357 kW erreicht wurde.

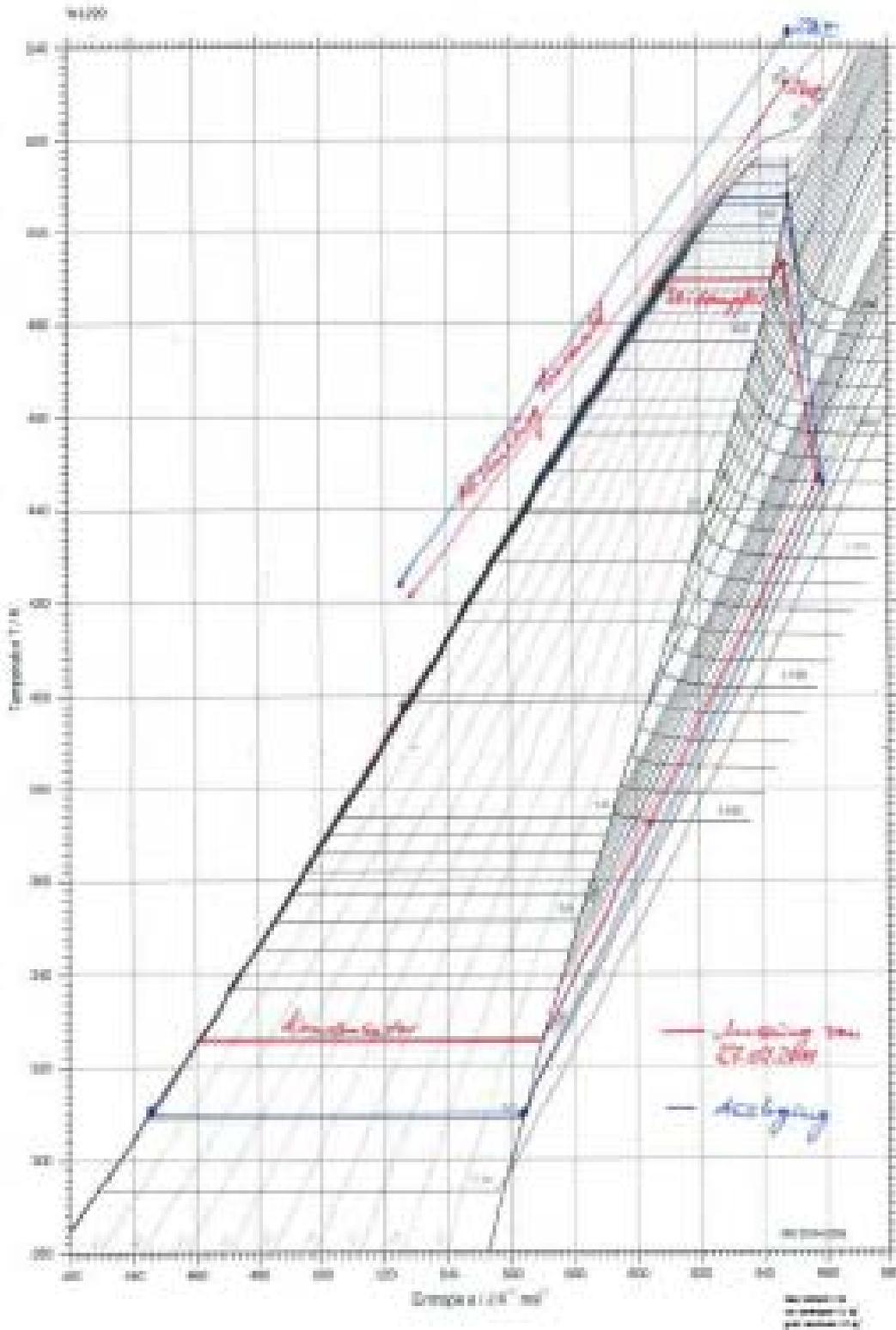


Abbildung 6: Kreisprozess im T,S-Diagramm, Auszug aus GMK Zwischenbericht siehe Anlage 6

9.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Abhitzeverstromung aus Glashütten mittels ORC-Anlage technisch machbar ist.

Es traten jedoch technische Probleme auf, die im Vorfeld nicht erkannt worden sind so dass die Wirtschaftlichkeit des hier beschriebenen Projekts nicht gegeben ist.

Für künftige Projekte wurden genügend Erfahrungen gesammelt, um Wirtschaftlichkeit zu erzielen.

9.3 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse im Abgleich mit dem Stand des Wissens, der Technik, des Handelns und der gesetzlichen Mindestanforderungen.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass eine erhebliche zusätzliche Umweltentlastung von den Vorhabensergebnissen ausgeht.

Auch bei einer Jahresarbeit von nur 60 % der ursprünglich avisierten (60 % von 4.368.000 kWh) werden pro Jahr 1.300 Tonnen weniger CO₂ emittiert, als dies bei Stromgestehung im deutschen Mix der Fall wäre. ($520 \text{ kW} * 8.400 \text{ h} * 0,6 * 0,5 \text{ kg CO}_2/\text{KWh}$).

In der CO₂-freien Stromerzeugung ohne Nutzung von Primärenergieträgern und nur aus bislang ungenutzter Abwärme liegt der wesentliche Nutzen der Anlage.

Die avisierte Umweltentlastung ist aus folgenden Gründen geringer als erhofft:

- Geringerer Wirkungsgrad des Gesamtsystems
- Aufgrund der mangelhaften Wärmeauskopplung läuft das System nur im Teillastbetrieb, der in unserem Fall einen schlechteren Wirkungsgrad bedingt
- Wirkungsgrad der Turbine 6 % schlechter, da kurz nach Vertragsschluss von Siemens AFA10 auf DRN C11S gewechselt wurde
- 3,5 %-ige Verschlechterung des Generatorwirkungsgrads aufgrund des provisorisch verwendeten Marelli Motors anstelle des ABB Generators, der von einem Serienschaden betroffen war
- Aufgrund mangelhafter Wärmedämmung geht nutzbare Wärme an die Umwelt verloren
- Erhöhter Betriebsmittelverbrauch durch Leckage an der Gleitringdichtung der Turbine (ca. 1 Liter pro Tag)

Positiv zu beurteilen ist die Auswirkung der Rauchgasabkühlung auf den Leistungsbedarf des Saugzuggebläses. Durch die bei der Kesselaustrittstemperatur niedrigere Dichte des Rauchgases (je niedriger die Temperatur, desto höher die Dichte des Rauchgases) sinkt der Leistungsbedarf des Saugzuggebläses. Diesen Effekt hatte GMK vor Projektbeginn wie folgt beschrieben:

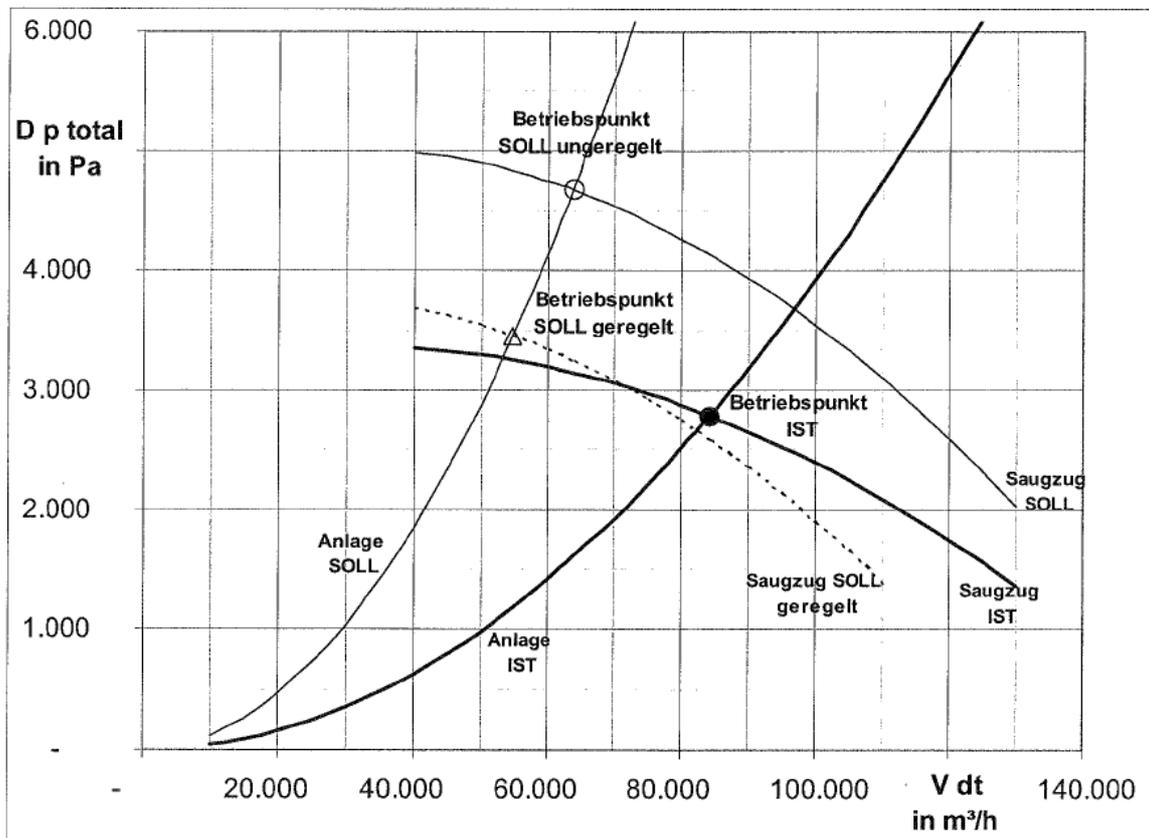


Abbildung 7: Diagramm Saugzug Leistungsaufnahme

Die „Anlagenplanung Saugzug“ findet sich im Anhang als Anlage 9.

Den tatsächlich erzielten Effekt der Rauchgasabkühlung auf den Leistungsbedarf des Saugzugs beschreibt GMK im Zwischenbericht vom Juli/August 2011 wie folgt:
Die FU-Einstellung des Saugzuggebläses konnte nach der Zuschaltung des Generators von 48,5 Hz auf 45,9 Hz geändert werden, so dass das Saugzuggebläse trotz 100 prozentiger Auslastung der Glasschmelze mit verringerter Drehzahl betrieben werden kann.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Leistungsbedarf des Saugzugs um einige Kilowatt gesenkt wurde.

Zur Wirtschaftlichkeit gab es ursprünglich folgenden Ansatz:

Die Gesamtanlage (incl. der erforderlichen Umbauten und bauseitigen Leistungen) sollte für 1,5 Mio EUR errichtet werden und 4.368.000 kWh Strom p.a. erzeugen. Dieser Strom kann wirtschaftlich nur mit Grundlastpreisen verglichen werden. Zum Projektstart bei 54 EUR / MWh war somit die Jahresarbeit 235.000 EUR wert. Bei linearer Betrachtung ergab sich ein ROI von 6,3 Jahren, weshalb ein Contractor eingeschaltet wurde, der die Anlage über 11 Jahre betreiben sollte.

Durch die erheblichen Mängel und die Minderleistung kann aktuell nur Strom im Wert von ca. 140.000 EUR erzeugt werden. Das Projekt ist damit aktuell nicht wirtschaftlich.

Durch die Ertüchtigungsangebote meinen wir, dass für 1,9 Mio EUR eine Anlage zu errichten ist, die tatsächlich die gewünschte Leistung bringt. Durch die zwischenzeitlich gestiegenen Strompreise dürfte eine Wirtschaftlichkeit künftiger Projekte zumindest im Contracting gegeben sein.

9.4 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation haben noch nicht stattgefunden. Das Interesse am Markt ist sehr wohl vorhanden. Trotz aller Probleme steht der Kunde Gerresheimer weiter zu der Aussage, drei weitere Anlagen bauen und im Contracting betreiben lassen zu wollen.

Ein Fachartikel ist in Vorbereitung, vorgesehen für ein Journal wie „BWK“ o.ä.

Nach Ertüchtigung der Anlage werden wir eine offizieller Einweihungsveranstaltung durchführen und regelmäßige Informationen über den Stand verbreiten.

10 Fazit

Die Anlage soll nach Beseitigung der genannten Mängel abgenommen werden und von UAC für den Endkunden Gerresheimer im Contracting betrieben werden.

In Vorbereitung auf die Abnahme sollen folgende offenen Punkte erledigt werden:

- I.) Beseitigung der Schwingungen am Generator (derzeit Ausfallursache Nr. 1)
- II.) Beseitigung der Leckage an der Turbine
- III.) Wärmedämmung vervollständigen und reparieren, speziell am Abhitzekeessel
- IV.) Staubablagerungen im Kessel und in den Rohrleitungen; Frage nach automatischer Staubaustragseinrichtung
- V.) Installation der automatischen Abreinigung
- VI.) Umbau der Rauchgasleitung / Beseitigung des Problems mit den Ablagerungen auf Bypassklappe und in Rohrleitung
- VII.) Umbau der Rauchgasleitung / Beseitigung des Problems mit den Ablagerungen auf Bypassklappe und in Rohrleitung
- VIII.) Leitbleche Kondensator, Verhinderung Ansaugung Warmluft in den Kondensator

11 Literaturverzeichnis

12 Anhänge

- (1) Anlage 1_Daten-Temperaturen Sorg Original
- (2) Anlage 2_ TÜV Bericht 2011_0104
- (3) Anlage 3 Bericht TÜV Messung Januar 2012
- (4) Anlage 4_Hitachi Messung 20101013
- (5) Anlage 5_GMK_Zwischenbericht vom 20Aug2010
- (6) Anlage 6_GMK_Zwischenbericht_vom 30Aug2011
- (7) Anlage 7_Betriebsdaten bis Nov2011
- (8) Anlage 8_Kesselberechnung AKB aus 2008
- (9) Anlage 9_Anlagenplanung Saugzug GMK

13 Rückendeckel