



AACTOR !GT[©]

ENTWICKLUNG EINER INVERSEN GASTUR- BINE „AACTOR“ ZUR NUTZUNG ERNEUER- BARER ENERGIE UND INDUSTRIELLER AB- WÄRME, PHASE 2

Jahresbericht 2008

Autor und Koautoren	M. Schmid, J. Schiffmann, J. Borth
beauftragte Institution	Ökozentrum Langenbruck
Adresse	4438 Langenbruck BL
Telefon, E-mail, Internetadresse	062 / 387 31 37, schmid@oekozentrum.ch , www.oekozentrum.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	102'820 / 153623
BFE-Projektbegleiter	Th. Kopp, externer F&E-Programmleiter Ressortforschungsprogramm Wärmepumpen, WKK, Kälte
Dauer des Projekts	November 2008 bis Juni 2009
Datum	5. Dezember 2008

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Projektes sollen alle thermo- und schwingungsdynamischen Analysen und Simulationen, sowie die Konstruktion von Turbine und Peripheriegeräten durchgeführt werden. Ziel ist am Projektende der Projektphase II das Design eines Funktionsmusters einer Mikro-Gasturbine mit ca. 2.4 kW elektrischer Einspeiseleistung vorliegen zu haben, auf dessen Basis die Versuchsturbine hergestellt werden kann. Bei den Peripheriegeräten bilden der Schwachgasbrenner ($H_u \ll 4\text{MJ/m}^3_n$) und Rekuperator weitere Schwerpunkte, die auf Grund der Konstruktionspläne gebaut und im Labor getestet werden sollen.

In der nachfolgenden Projektphase III wird ein feldtesttaugliches Funktionsmuster einer inversen Gasturbine gebaut, das mit Schwachgas unter atmosphärischen Bedingungen befeuert werden kann.

Aus dem Funktionsmuster soll ein Prototyp einer Schwachgas-Mikroturbine mit 9 kW elektrischer Einspeiseleistung entstehen. Es sind weitere Diversifizierungen von Applikationen der Turbine geplant für die Nutzung fester Brennstoffe (Holzpellets) und WKK-Anwendungen vorgesehen. Im Rahmen der Projektphase II wird abgeklärt, ob sich die inverse Gasturbine auch für grössere Leistungen in Kombi-Kraftwerke mit konzentrierter Solarstrahlung (CSP) konzipieren lässt.

Da der Projektstart der Projektphase II im 4. Quartal 2008 erfolgte, liegen noch keine Ergebnisse vor.

Projektziele

a) Bedeutung und Hintergrund

Das Projekt „Aactor“ ist die Synthese von 25 Jahren F+E-Tätigkeit im Bereich der dezentralen Wärme-Kraft-Kopplung mit Biomasse-Brennstoffen und der Entwicklung von neuartigen Schwachgasbrennern-Technologien für industrielle Abgase und Deponiegas. Die teilweise schwierig zu verfeuernde Brennstoffen sind feste Brennstoffe (Kohle, Holz, Stroh, etc.) aber auch schwer entzündliche Stoffe wie stark CO₂-haltige Gase mit niedrigem Heizwert. Das Ökozentrum Langenbruck hat in einer Markt- und Technologiestudie für Biomasse-Brennstoffe die extern befeuerte Gasturbine [1] und die atmosphärisch befeuerte Gasturbine (auch inverse Gasturbine genannt) zur direkten Nutzung der Schwachgase als wirtschaftlichste und robusteste Lösungen evaluiert [2]. Beide Konzepte eignen sich überdies für die Nutzung von konzentrierter Solarstrahlung, am besten in Verbindung mit einem Kombi-Zyklus (Heissluft und Dampf analog GuD) und fossiler oder biogener Zufueuerung in den sonnenarmen Stunden [3]. Für die Anwendungen der Turbinentechnik im WKK-Kleinleistungsbereich, müssen die Kosten im Vergleich zur Heissluftturbine stark gesenkt werden. Die Kosten der Heissluftturbine werden dominiert durch den Überdruck-Heissluft/Abgaswärmetauscher aus hochwarmfesten und kriechbeständigen Materialien. Diesem Umstand will das Projekt Aactor begegnen durch das komplette Weglassen des Wärmetauschers durch die direkte atmosphärische Verbrennung bei sauber verbrennenden Brennstoffen bzw. ein atmosphärisch arbeitender Abgas/Luftwärmetauscher aus preiswerten Materialien bei verschmutzenden Brennstoffen.

Der Markt kennt die verschiedensten Anwendungen der atmosphärisch brennenden Turbinentechnik: In Mittel- und Osteuropa liegt von der ehemals intensiven Bergbautätigkeit Grubengas und von den Deponierung von Siedlungsmüll (Deponiegas) ein beträchtliches Potential vor. Dieses liefert mit ins Netz einspeisenden Biogasanlagen zusammen mindestens 4.5 GWth Gasleistung (H_u) [4]. Wird das Schwachgaspotential ausgeschöpft, müssten 100'000 Turbinen-Einheiten von 45 kWth (H_u) / 9 kWe installiert werden. Das Investitionsvolumen bewegte sich um ca. 5 Milliarden CHF.

Der technisch anspruchsvollere aber auch sehr viel grössere Markt der dezentralen WKK mit Fest-Brennstoffen würde alleine in der Schweiz ein Volumen von 2.6 Mia CHF ausmachen. Ein hoher Anteil des Potentials von Band-Heizleistungen läge zwischen 25 und 860 kWth mit einer möglichen Spitzenheizleistung zwischen 82 und 2000 kWth. In diesen Anlagen würden insgesamt 1.5 bis 1.8 TWh Strom und knapp 5 TWh Heizwärme produziert [2]. Das Volumen des Marktes für konzentrierte Solarenergie muss noch eruiert werden: Bei grösseren Turbinenanlagen mit grösseren Verdichtungsverhältnissen können sich die Kostenanteile vom Wärmetauscher zur Turbine hin verschieben, was ein konventionelles Turbinensystem im Überdruckbetrieb wieder favorisiert.

b) Quantitative Ziele im vorliegenden Projekt

Das Design für das erste Produkt vpm Aactor !GT zielt auf eine 9kWe (45 kW Gasleistung) Mikroturbine mit atmosphärischer Verbrennung. Als Brennstoff kommt Schwachgas zum Einsatz mit dem Heizwert von $\ll 4 \text{ MJ/m}^3_n$ (z.B. Deponiegase aus alternden Deponien). Für das Funktionsmuster der Projektphase II und III wird aber eine kleinere Turbine erstellt werden: Es wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 19% bei einer Leistung von ca. 3 kWe angestrebt. Die Verbrennungsabgase sollen die Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung einhalten. Es ist geplant, das Funktionsmuster bereits mit realen Schwachgasen zu testen.

Mit dem Budget der geplanten aktuellen Projektphase II bis Juni 2009 kann das Funktionsmuster nicht bis zur vollen Funktionsfähigkeit gebaut werden. Auf Grund der kompletten Konstruktion können die thermo- und schwingungsdynamische Analyse und Simulation (CFD und FEM) durchgeführt werden. Hingegen werden der Rekuperator und der Schwachgasbrenner konstruiert und als Funktionsmuster gebaut. Diese Peripheriegeräte werden im Labor des Ökozentrums Langenbruck getestet.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Projektphase I dauerte vom März 2007 bis zum Mai 2008. Auf Grund versprechender Anzeichen, die Finanzierung für die Phase II zu finden, wurden ab Juni 2008 bereits Arbeiten für die Projektphase II durchgeführt, obwohl die Verträge mit einer Investorin und dem Bundesamt für Energie erst Anfangs November 2008 unterzeichnet werden konnten.

Dieses Projektjahr war hauptsächlich geprägt von der detaillierten Auslegung der Komponenten. Dazu gehörte die Adaption der Turbine auf bestehende Generator-Spindeln, Beschaffung der Turbinen-Komponenten, sowie die Akquisition auf Rechnung unseres Institutes von Fondsgeldern seitens des Bundesamtes für Energie. Eine erweiterte Patentrecherche konnte abgeschlossen werden. Im Weiteren wurden durch Vergleichsmessungen in einem Evaluationsverfahren Varianten gesucht, die Gene-
ratorereinheit für das Funktionsmuster kostengünstiger zu gestalten.

a) Adaption der Turbine auf bestehende Generator-Spindeln:

Eine Generatorspindel, wie sie im Werkzeugmaschinenbau eingesetzt wird, umfasst einen auf höchste Drehzahlen ausgelegten elektrischen Generator mit Axial- und Radiallagerungen. Es ist vorgesehen, dass die Generatorspindelinheit die Lagerung der Gas-Turbine übernimmt. Obwohl das kommerzielle Endprodukt dieses Projektes eine 9 kWe Einheit werden soll, einigte sich die Projektleitung mit dem Spindelhersteller auf eine 3 kWe Einheit mit aerodynamischer Lagerung. Eine solche Einheit wurde vom Spindelhersteller seit 2006 entwickelt und stellt für das Projekt eine optimale Voraussetzung dar. Vom Upscaling sind weniger Probleme zu erwarten als von einem Downscaling. Dies deshalb, da die Wirkungsgrade der Gasturbinen-Komponenten bei höheren Leistungen zunehmen und der Spindelhersteller mit Spindeln bis 120 kWe Leistung langjährige Erfahrung hat. Falls es sich im Laufe des Projektes zeigt, dass sich auch die 3 kWe Einheit zu einem wirtschaftlich interessanten Produkt entwickeln lässt, ist dieses für den Einsatz in WKK-Anwendungen im Gebäudekontext prädestiniert.

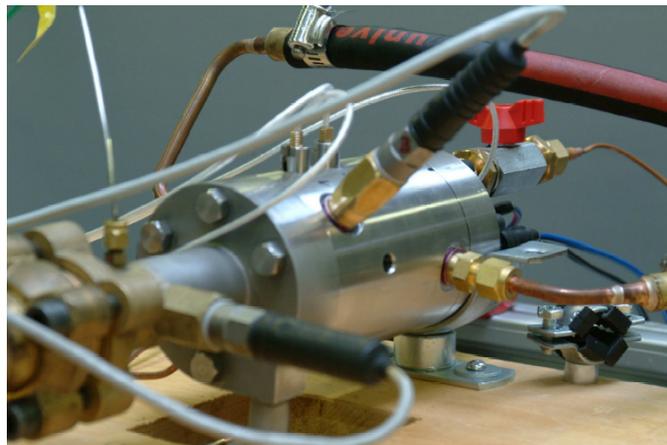


Abbildung 1 Erstes Funktionsmuster der 3 kWe Spindel als Antrieb eines Turboverdichters (Bild: Fischer Engineering Solutions AG)

b) Auslegung und Beschaffung der Gasturbinen-Komponenten

Dank der Auslegungsoftware unseres Industriepartners Wenko, sowie Datenbanken mit Verdichterkennfeldern und Turbinenkennlinien konnte bereits Ende 2007 die Auslegung mit Hinblick auf existierende Komponenten angegangen werden. Da der Entscheid für die Redimensionierung des Funktionsmusters von 9 kWe auf 3 kWe erst im Juli 2008 fiel, musste der Auslegungsprozess 2008 noch einmal durchgeführt werden. Da der Verdichter einer Gas-Turbine punkto Druckverhältnis, Drehzahl und Durchsatz sehr empfindlich auf Variationen reagiert, konzentrierte sich die Auslegung auf die Kennfeldern des Verdichters. Die Turbine weist einen in erster Näherung drehzahlunabhängigen Durchsatz auf, was die Evaluation einer passenden Turbine vereinfacht. Basis von Verdichter und Turbine sind zwei Turboladern aus der Automobiltechnik., Es liegen aber nur Herstellerdaten der Kennfelder vor, also keine unabhängigen Messungen. Auf Grund der vorhandenen Turbinenkonstruktionsdaten erstellt der Partner ZHAW ein dynamisches Modell, um die Auslegungspunkte von Verdichter und Turbine zu überprüfen.



Abbildung 2 Aactor Mk Funktionsmuster: Turbine mit hydrostatischer Lagerung. Der Zusammenbau von Verdichter und Turbine aus zwei verschiedenen Turboladern passt geometrisch ideal zusammen. (Bild: Ökozentrum Langenbruck)

Auslegungsphilosophie der gewählten Komponenten: die maximale spezifische Einspeiseleistung ist identisch mit dem höchsten E-Wirkungsgrad ohne Berücksichtigung der Rekuperation bei einem Turbinendruckgefälle von ca. 3.6. Die höchsten E-Wirkungsgrade inklusive Berücksichtigung der thermischen Rekuperation werden jedoch bei einem Druckgefälle von 2.0 erreicht, was die Nominalauslegung der gewählten Variante darstellt. Die existierenden Komponenten sind ohnehin nur für die gewählten niedrigeren Druckverhältnisse verfügbar. Die obigen Zahlen beziehen sich auf die effektiven Komponentenwirkungsgrade im Auslegungspunkt laut Herstellerangaben.

c) Suche nach einer kostengünstigen Lösung für die Stromerzeugung im Funktionsmuster

Messungen an einem Getriebestrang „Rotrex“ (Antrieb von Turboverdichtern mit einem deutlich langsamer laufenden Motor), sowie Erfahrungen und Limitierungen mit Lösungen mit Wälzlagern sowie hydrostatischer Lagerung zeigten klar auf, dass für eine Nenndrehzahl von $150'000 \text{ min}^{-1}$ und die vorliegenden Druckverhältnisse kein Weg an der vorgeschlagenen Lösung vorbeiführt. Die Lösung liegt bei einem auf der gleichen Welle laufenden Generator mit integrierter Lagerung mit dem Arbeitsmedium Luft/Abgas.

d) Abschluss der Patentrecherche und Marktübersicht

In der Literatur sind unter „inversed (oder inverted) Brighton-Cycle“, sowie „atmospheric gas turbine“ und „inverse Gasturbine“ dutzende von Literaturstellen sowie einige sehr alte (auslaufende oder bereits abgelaufene) Patente zu finden, die Anwendungen mit der inversen Gasturbine beschreiben. Die Patente umfassen die Energieerzeugung aus der Abhitze eines induktiven Stahlkochers (Stahlherstellung) [5], Ergänzung von bestehenden Gross-Gasturbinen an Stelle eines Dampfzyklus, die Nutzung der konzentrierten Sonnenstrahlung [6], die Nutzung von Anoden-Offgasen und Reformierabhitze von Brennstoffzellen [7], aber auch Gebäude-WKK mit flüssigen oder fossilen Festbrennstoffen (Kohle) [8].

Das Projektkonsortium ist überzeugt, mit der gewählten Anwendung weder gegen bestehende Patentierungen zu stossen, noch mit rechtmässigen gegnerischen Patentierungen rechnen zu müssen, da solche Patente sich dem Vorwurf zu geringer Neuartigkeit aussetzen müssten.

e) Aufbau eines dynamischen Modells und Vergleich mit Mikroturbinenprüfstand an der ZHAW

An der ZHAW wurde 2008, u.a. im Rahmen von studentischen Diplom- und Semesterarbeiten, ein Mikroturbinen-Prüfstand aufgebaut und mit Fahrzeug-Turboladerkomponenten ausgerüstet. Der Prüfstand wird für die vergleichende Bewertung des dynamischen Modells eingesetzt.

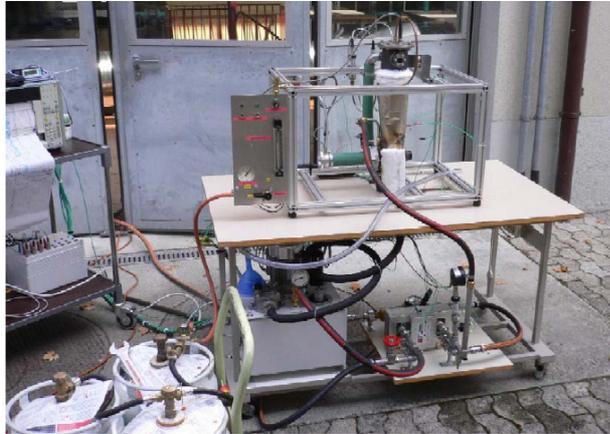


Abbildung 3 Mit Flüssiggas befeuerte Mikroturbine auf dem Prüfstand an der ZHAW (Bild: ZHAW)

Nationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt wird von den beiden **BRENET**-Partnern (Building- and Renewable Energie Network of Technology der Fachhochschulen) ZHAW (Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften) und Ökozentrum Langenbruck, sowie zwei Schweizer und einem deutschen Wirtschaftspartner durchgeführt. Alle Vorarbeiten, sowie die Projektphase I wurde vollständig von privater Seite finanziert. Auf Grund der verdankenswerten Unterstützung durch das Bundesamt für Energie konnte kurz nach Vertragsabschluss eine Venture-Kapitalgeberin bereits für die Projektphase III (ab Sommer 2009) gefunden werden.

Internationale Zusammenarbeit

Dieses Projekt hat einen deutschen Industriepartner, mit dem auf Grund von internationalen Forschungsprojekten (z.B. im Rahmen **EC FP6**) aber auch BafU und BfE seit Mitte der 90er-Jahre eine kontinuierliche Zusammenarbeit besteht. Dieses Projekt ist indirekt über die Projektleitung mit aktuellen internationalen Forschungsvorhaben vernetzt, die ebenfalls mit Biomasse-befeuerten Gasturbinen und Schwachgas-Brennertechnik zusammenhängt: Projekt **RENEC (EC FP7)**.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Der Erfolg dieses Jahres besteht aus der Gewinnung eines Wunschpartners aus der Maschinen-Industrie, der Koinzidenz einer nach bisherigem Wissensstand passenden bestehenden Spindel, sowie der erreichten Finanzierung dieses Projektes durch das Bundesamt für Energie.

Zu Beginn des Jahres 2009 steht der Meilenstein IV an, ob für das Funktionsmuster ein auf dem Markt erhältlicher Rekuperator eingesetzt werden kann, oder ob ein dieser selber konstruiert werden muss. Dies ist sicher einer der (auch finanziell) kritischen Punkte dieser Projektphase. Danach sollen die Versuche mit der Rekuperator/Brennereinheit möglichst bald aufgebaut und durchgeführt werden. Die thermodynamischen und schwingungsmechanischen Untersuchungen sollen spätestens bis Mai 2009 konkrete Ergebnisse für weitere Entscheidungen (Meilenstein III) liefern.

Referenzen

- [1] M. Schmid, C. Gaegauf; *Externally Fired Gas Turbine: Efficient Solution for Decentralized Biomass Power*, 15 th European Biomass Conference and Technology Exhibition, Berlin, 2007
- [2] M. Schmid, C. Gaegauf, M. Sattler; *Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoffbiomasse – Zusammengefasstes Wissen für Investoren über den Stand der Technik, die Technologien und die ökonomischen Fakten von gekoppelter Strom- und Wärmeproduktion aus Holz und anderer fester Biomasse bis 1 MW elektrischer Leistung*; Ökozentrum Langenbruck 2007;
- [3] M. Ebert, P. Heller, C. Richter; *200 kWe Heissluftturbinenanlage mit Hochtemperatur-Empfänger für konzentrierte Sonnenstrahlung mit Biodiesel-Stützfeuerung*, Forschungsanlage der DLR in Tabernas (E), 2007
- [4] Nach Informationen von Capstone Europe, modifiziert (reduziert) unter Berücksichtigung der Abschwächung des Heizwertes, nachdem die Gasquelle sich nicht mehr für eine konventionelle Mikroturbine eignet.
- [5] K. Purkarthofer: *inverse Gasturbine für die Nutzung von heissen Abgasen eines Elektro-Lichtbogenofens der Stahlherstellung*, europäisches Patent EP0916825, 1998
- [6] R. Mackay, *inversed brighton cycle for the use of concentrated solar radiation*, US-Patent 4,280,327, 1981
- [7] T. Yoshiharu et.al.; *Inverted Brayton Cycle for Heat Recovery of Fuel Cell(SOFC)*, Nihon Kikai Gakkai Nenji Taikai Koen Ronbunshu (Journal), Nr.1 / 2000
- [8] Noe, Friedman; *Heat Actuated Space Conditioning Unit with Bottoming Cycle*, US Patent 4,347,711, 1982