



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung

April 2010

Forschungsprogramm

Kraftwerk 2020 / Carbon Capture & Storage (CCS)

Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Autor:

Dr. Peter Jansohn, Paul Scherrer Institut (PSI), peter.jansohn@psi.ch

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

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Durch den steigenden Strombedarf, das Auslaufen von Stromimportverträgen und das Erreichen der maximalen Betriebsdauer bestehender Kraftwerksanlagen zeichnet sich für den Zeitraum um das Jahr 2020 ein Engpass in der Stromversorgung der Schweiz ab. Um diese prognostizierte Versorgungslücke zu schliessen, sind Anstrengungen auf unterschiedlichen Ebenen (rationelle Stromverwendung, Ersatz von Stromerzeugungskapazitäten usw.) zu leisten. Eine Option für die Elektrizitätserzeugung in der Schweiz stellen dabei **Kombi-Kraftwerke auf Erdgas-Basis** dar, die aufgrund ihrer für thermische Kraftwerke hohen Effizienz und ihres niedrigen Schadstoffausstosses mittelfristig in der Stromerzeugung von Bedeutung sind. Diese Technik ist auch deshalb für die Schweiz von besonderem Interesse, weil Schweizer Industriefirmen und Forschungsorganisationen führend in der Weiterentwicklung dieser Technologie tätig sind und sich somit ein hohes Umsetzungspotenzial sowohl in der Schweiz als auch weltweit bietet.

Um auch die klimapolitischen Zielsetzungen der Schweiz zu erfüllen, sind bei einem zusätzlichen Einsatz von Erdgas für die Stromerzeugung flankierende Massnahmen zu ergreifen, die es erlauben, zu einer **Netto-Reduktion der CO₂-Emissionen** aus dem gesamten schweizerischen Energiesystem zu kommen. Die Prozessführung des Kraftwerks ist z.B. so zu gestalten, dass alternative Brennstoffe eingesetzt werden können und CO₂ ganz oder teilweise abgeschieden werden kann. Die bisherige Strategie der Kombination von modernen, effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Wärmepumpen muss ebenfalls weiterhin verfolgt und umgesetzt werden. Neu sind seit 2008 auch Prozesse ausserhalb des eigentlichen Kraftwerks, wie z.B. externe Brennstoffaufbereitung oder CO₂-Abtrennung und -Lagerung integraler Bestandteil des Programms. Aufgrund des begrenzten finanziellen Rahmens kann das Programm aber nur einen signifikanten Beitrag leisten, wenn eine starke Fokussierung auf Schlüsselkomponenten erfolgt.

Um der zeitlichen Zielsetzung des Forschungsprogramms gerecht zu werden, im Jahre 2020 die notwendigen Technologien einsatzbereit entwickelt zu haben, müssen die dazu erforderlichen **Basis-Technologien spätestens im Jahr 2015 verfügbar** sein. Deshalb ist das Programm vorerst auf

einen Zeitraum von ca. 10 Jahren (d.h. bis Ende 2015) ausgerichtet. Dieser Programmperiode können sich geeignete Fortsetzungsphasen mit erweiterten, angepassten Zielsetzungen anschliessen. Die Konzentration der Programm-Aktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren ist auch aus diesen zeitlichen Aspekten heraus erforderlich.

Ein wesentliches Ziel des Programms ist es, durch Bündelung der Aktivitäten und durch Koordination der Ausrichtung individueller Projekte zu einer **Stärkung des Forschungs- und Industriestandortes Schweiz** im Bereich fortschrittlicher Gas-kraftwerke zu gelangen. Dadurch soll auch sichergestellt werden, dass stets die bestgeeigneten Technologien bzw. Systeme für die Stromerzeugung zum Einsatz kommen. Die schweizerische Kraftwerksindustrie inklusive der Zulieferfirmen und dem unterstützenden, akademischen Umfeld ist international führend und hat eine starke Markstellung.

Zentrales technisches Ziel ist die **Maximierung des elektrischen Wirkungsgrads** eines kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozesses. Ein Wert von deutlich über 60 % (Zielbereich: 62–63 %) auf Basis Erdgas soll erreicht werden. Dies wird erwartungsgemäss dem im Jahr 2020 weltweit besten Standard entsprechen.

Weiteres Ziel ist die **Steigerung des Einsatzes von erneuerbaren, CO₂-neutralen Brennstoffen** (insbesondere Biomasse-basierenden Vergasungsprodukten) auf 15 % im produktiven Betrieb. Ferner sollen mit dem Einbezug von prozesstechnischen Varianten für die **erleichterte Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂)** darüber hinausgehende CO₂-Emissionsminderungs-Potenziale ausgenutzt werden.

Durch den zukünftig verstärkten Einsatz fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien wie Wind und Photovoltaik werden Stromversorgungsnetzwerke stärkeren, kurzfristigeren Produktionsschwankungen unterworfen sein, die durch die anderen Stromerzeuger kompensiert werden müssen. Ein weiteres Ziel des Programms ist es deshalb, Gasturbinen-Kraftwerke noch besser zu befähigen, die **Stabilisierung des Stromversorgungsnetzes** zu übernehmen. Dazu müssen Techniken entwickelt werden, die höhere Last-

gradienten (+/-3 % Last pro Sekunde) oder gar eine Netzfrequenz unabhängige Betriebsweise erlauben.

Nach dem offiziellen Start des Programms Anfang 2006 und der Initiierung einer ersten Welle von Projekten, die den Rahmenbedingungen des *Programmkonzeptes* [14] gerecht wurden, war die Programmwicklung 2009 stark beeinflusst durch die Umsetzung der Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂)» (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS). Dieser Programmwicklung wird durch eine veränderte Gewichtung der einzusetzenden Programmmittel (Wirkungsgradsteigerung: 45 %; CO₂-Minderung: 40 %; Netzunterstützung: 15 %) und einem insgesamt moderat erhöhten Gesamtbudget (dies bezieht sich auf die zur Verfügung gestellten BFE-Mittel) Rechnung getragen. Die angepasste Programmausrichtung ist in einer Fortschreibung des Programmkonzepts dokumentiert [15].

Aufgrund der mittlerweile mehr als 3-jährigen Programmalaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) war das Jahr 2009 ein Übergangsjahr in dem nun fast alle Projekte der Programm-Anfangsphase abgeschlossen wurden und teils durch thematisch ähnliche Fortsetzungsprojekte ersetzt wurden. Das Programm befindet sich nun in einer Phase der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios, welches die etwas modifizierte Ausrichtung (CCS) immer deutlicher widerspiegeln wird. Mit den neuen, 2009 lancierten Projekten wurden teilweise auch wichtige thematische Lücken (z.B. im Bereich «Schaufelkühlung») geschlossen, so dass das Programm nun (fast) alle ursprünglich vorgesehene Themenbereiche abdeckt. Der zur Verfügung gestellte Finanzrahmen aus BFE-Mitteln war 2009 durch Projekte aus der Anfangsphase noch weitgehend ausgeschöpft und erlaubte dementsprechend nur eine mässige Erweiterung des Projektumfangs.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Im Jahresverlauf 2009 konnten entsprechend der erweiterten Ausrichtung des Programms auf Themen im Bereich CO₂-Minderung neue Projekte lanciert und einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen werden.



Figur 1: Skalierter Versuchsstand für die experimentelle Simulation der Strömungsverhältnisse in einem luftgekühlten Generator am Standort Fachhochschule Nordwestschweiz [Quelle: Prof. T. Griffin]

Neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt die Förderagentur für Innovation (KTI), sowie der Forschungsfond der schweizerischen Energiewirtschaft (Swisselectric Research) und die Europäische Gemeinschaft im Zusammenhang mit dem 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) weitere für dieses Forschungsprogramm relevante Projekte.

Nachfolgend sind der Stand der Arbeiten und die erzielten Ergebnisse aus einigen ausgewählten Projekten aufgeführt, jeweils mit Zuordnung zu den Hauptzielsetzungen des Programms:

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads

Im Projekt **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (>99 %)** [1] wurde angestrebt, den Wirkungsgrad von grossen, luftgekühlten Generatoren (bis zu 400 MVA) bis über 99 % zu steigern (derzeitige Stand der Technik: bis zu 98,7 %) und damit auch einen Beitrag zur Steigerung des Gesamtsystem-Wirkungsgrades von Gas-Dampf-Kraftwerken zu leisten.

Die Wirkungsgradsteigerung soll durch eine Minimierung der Ventilationsverluste (d.h. Verluste

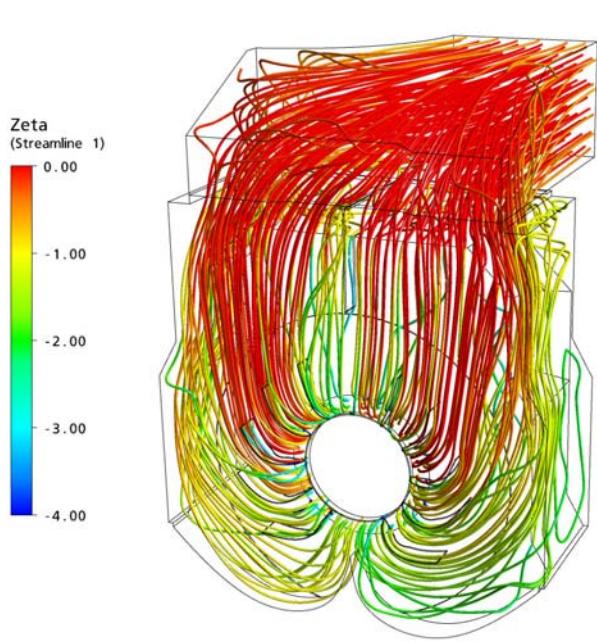
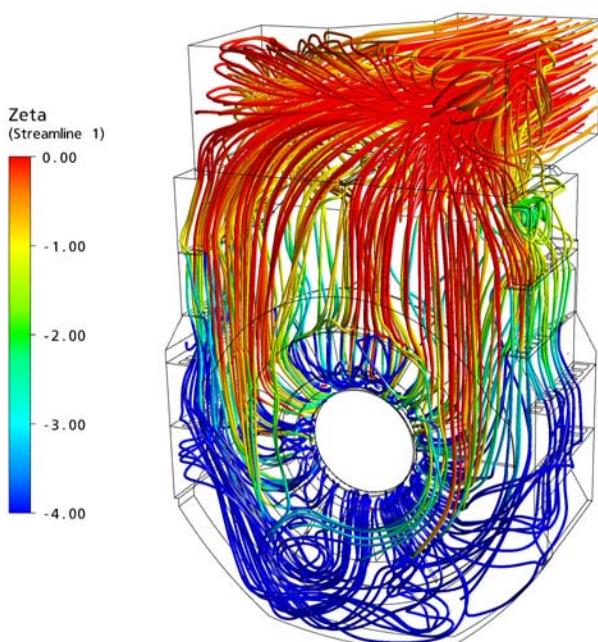
durch aktive Kühlung der elektrischen Leiterbahnen) erreicht werden, die gegenwärtig 40 % der gesamten Generatorverluste darstellen. Die Beiträge zur Steigerung des Wirkungsgrads sollen durch 3 Massnahmen bzw. Weiterentwicklungen erreicht werden:

- Verbesserter Wärmetransport zwischen elektrischem Leiter und Kühlmedium durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit günstigeren Eigenschaften (höhere Wärmeleitfähigkeit und/oder höhere Durchschlagfestigkeit);
- Reduzierung des Kühlluftbedarfs durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit verbesselter Temperaturbeständigkeit (zulässige Materialtemperatur: 180 °C; heutiger Stand der Technik: 155 °C);
- Verbesserung des aerodynamischen Wirkungsgrads (geringere Energieaufwand) des Kühlluft-Gebläses (Lüfterrad ist direkt mit dem Generator-Rotor verbunden) durch eine optimierte Einlass-Geometrie und modifizierte Profilierung der Gebläse-Beschaukelung.

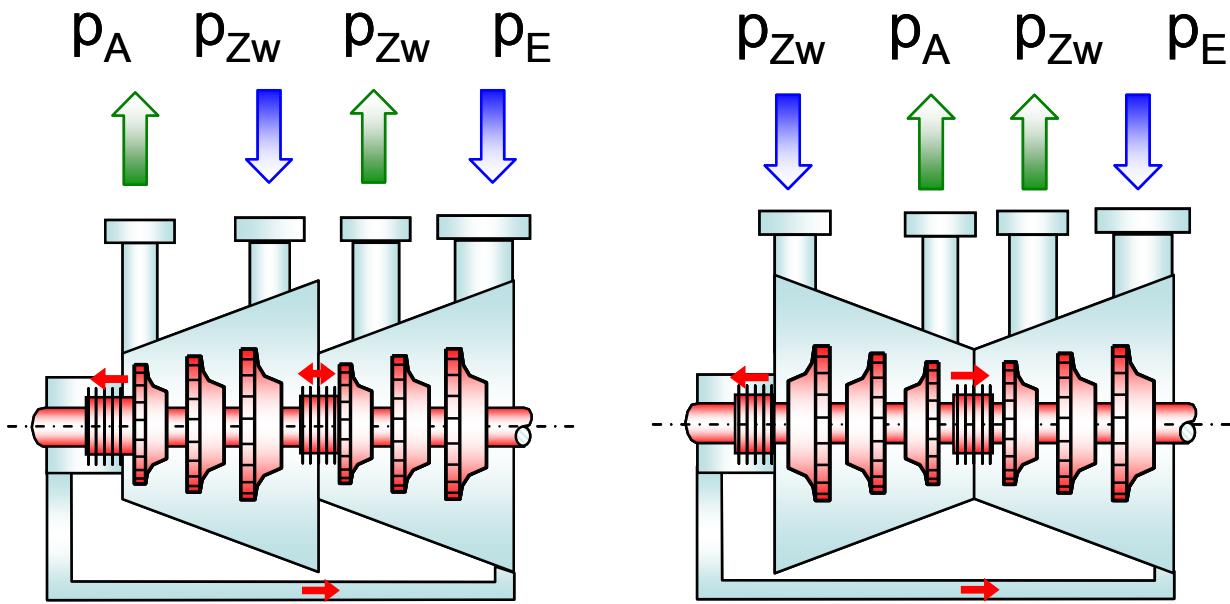
Der Schwerpunkt der Arbeiten 2009 lag bei der Inbetriebnahme des Versuchsstandes zur experimentellen Simulation der Strömungsverhältnisse im Einlauf- bzw. Ventilatorgehäuse eines luftgekühlten Generators. Der Versuchsstand (im Massstab 1:3) wurde beim Forschungspartner (Fachhochschule Nordwestschweiz, FHNW), in

Brugg-Windisch) 2009 in Betrieb genommen. Um repräsentative Strömungszustände in diesem verkleinerten Massstab zu generieren, sind verglichen zum realen Apparat entsprechend höhere Drehzahlen im Modellprüfstand zu verwirklichen. Aufgrund der recht hohen Drehzahlen (9000 U/min) ist hohe Sorgfalt bei der Ausbalancierung des Rotors von Nöten, aber auch Sicherheitsvorkehrungen (Fangvorrichtungen) für sich lösende Bauteile im Falle eines Rotorschadens zu treffen. Einen Eindruck vom Versuchsaufbau liefern Fig. 1 und 2.

Im Rahmen der Aktivitäten zur Modellierung der Strömungsverhältnisse (mittels CFD-Simulationen) im Einlassbereich der Kühlluft (Zuströmung zum Ringspalt zwischen Generatorwelle und den Statorelementen), welche letztlich mit experimentellen Messdaten validiert und schliesslich zur aerodynamischen Optimierung des Ventilatorrades und der Luft-Einlassgeometrie für die Kühlluft des Generators führen sollen, wurde erstmals die Wechselwirkung von rotierenden und statischen Elementen (Rotor–Stator-Interaktion) mitberücksichtigt. Dazu wurden verschiedene, sukzessive aufwendigere Modellansätze verwendet, wie z.B. die vereinfachende Verwendung einer Mischebene zum Austausch von Daten (Randbedingungen) beim Übergang vom Rechenmodell für die rotierenden bzw. statischen Komponenten des Versuchsaufbaus (Mixing Plane Interface), als auch ein vollständig gekoppelter, instationärer Modell-



Figur 2: Stromlinienbilder des Einlaufgehäuses (Farbkodierung: Totaldruckverlustkoeffizient zeta). Links: ursprüngliche Gehäusegeometrie; rechts: optimierte Gehäusegeometrie



Figur 3: Prinzip der Verdichteranordnungen und der sich ergebenden Leckageströme]. Links: In-Line-Anordnung; rechts: Back-to-Back-Anordnung

ansatz mit entsprechend vervielfachtem Rechenaufwand.

Mit Hilfe validierter Modellrechnungen (Rechenergebnisse werden mit Messwerten des statischen Drucks an der Gehäusewand und mit mittels einer pneumatischen 5-Loch-Sonde gemessenen Geschwindigkeitsprofilen verglichen) konnte bereits eine wesentliche Optimierung der Strömungsverhältnisse über eine verbesserte Führung der Strömung im Einlaufkanal erreicht werden. Die gleichmässigere Strömungsverteilung führt zu einer besseren (gleichmässigeren) Anströmung der Ventilatorblätter und vermeidet damit verlustreiche Strömungsablösungen und Wirbel. Allein mit diesen Massnahmen an der (statischen) Gehäusegeometrie sinkt der Druckverlust im Einlauf zum Generator signifikant (Druckverlust-Koeffizient bisher: 3,6, neu: 0,7), was sich schon mit einem Wirkungs-

gradgewinn von bis zu 0,1 Wirkungsgradpunkten auswirkt. Dies entspricht ungefähr einer Reduktion der bisherigen Verluste (für den gesamten Generator) um knapp 10 % (relativ) und übertrifft damit bereits die in den Projektzielen angestrebten Verbesserungen. Mit einer zusätzlichen Optimierung der Ventilatorblätter ist noch eine weitere Wirkungsgrad-Steigerung zu erwarten.

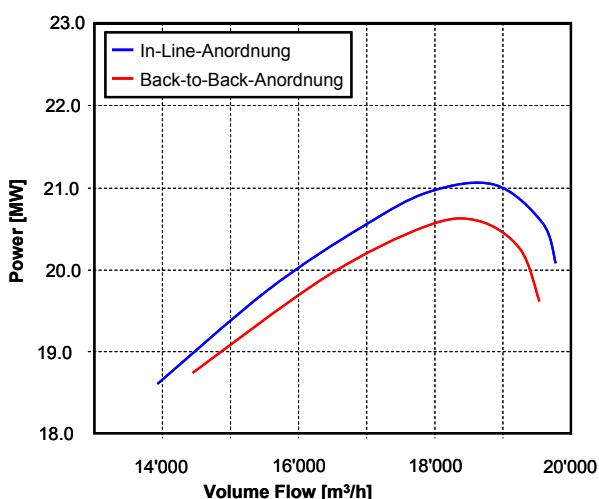
CO₂-Emissionsminderung

Im Projekt **hoch effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse** [4] werden Kompressoren weiter entwickelt, die für die Förderung der Produktgase aus Vergasungsprozessen von Biomasse (aber auch von fossilen, nicht gasförmigen Energieträgern und kohlenwasserstoffhaltigen Prozessrückständen) benötigt werden. Hoch effiziente Verdichter für solche Produktgase (auch Synthesegase genannt, da aus ihnen auch wieder «syntheti-

Massnahme	Wirkungsgradsteigerung	
	prognostiziert	ausgewiesen
Konzeptuelle Studie (Back-to-Back-Anordnung)	Modul 1	0,25
Entwicklung des erforderlichen Laufzeuges	Modul 2	2,50
Optimierung des Dichtungskonzeptes	Modul 3	0,25
Optimierung des Gehäuse-Ein-/Austritts	Modul 4	0,00
		(-0,03)

Tabelle 1: Erzielte und erwartete Wirkungsgradgewinne für eine Verdichterreihe, speziell ausgelegt für Brenngase (Synthese) aus der Biomassevergasung

sche» Kohlenwasserstoffe erzeugt werden können) sind eine wesentliche Voraussetzung um den Gesamtanlagen-Wirkungsgrad von sogenannten «Integrated Gasification Combined Cycle»-Prozessen (IGCC-Prozesse) zur Stromerzeugung weiter steigern zu können, da die Verdichtungsprozesse den höchsten Anteil der in neuen Kraftwerkssprozessen zusätzlich aufzuwendenden Energie ausmachen. Zielsetzung des Projektes ist es, eine Synthesegas-Verdichterbaureihe zu entwickeln, die das geforderte Druck- und Volumenstrom-Spektrum möglichst effizient abdecken soll. Dazu braucht es speziell für Synthesegase (Gasgemische, die sich hauptsächlich aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂) zusammensetzen) ausgelegte Strömungskomponenten und Laufräder, die eine der Verdichtung niedermolekularer Gase – verursacht durch den hohen Wasserstoff-Anteil – angepasste Betriebscharakteristik aufweisen. Die bearbeiteten Teilaufgaben – optimierte Anordnung, speziell ausgelegte Laufräder, optimiertes Dichtungskonzept, Verbesserung der Gehäusegeometrie am Ein-/Auslass – wurden alle sehr erfolgreich abgeschlossen und die erwarteten Zielvorgaben bezüglich eines verbesserten Wirkungsgrads alleamt erreicht bzw. übertroffen (Tab. 1).



Figur 4: Leistungsaufnahme für verschiedene Verdichter-Anordnungen

In Modul 1 wurde die sogenannte Back-to-Back-Anordnung untersucht, die inhärent geringere Leckagemengen über den Wellendichtungen aufweist. Der Wirkungsgradgewinn dieser Anordnung liegt in den unterschiedlichen Leckagemengen und deren Rückführung zum Prozessgas. Während bei der In-Line-Anordnung (Fig. 3a) der volle Austrittsdruck in einem Schritt gegenüber dem Saugdruck

abgedichtet werden muss ($p_A - p_E$), ist es in der Back-to-Back-Anordnung (Fig. 3b) einmal die Differenz zwischen Austrittsdruck p_A und Zwischen- druck p_{Zw} , und einmal zwischen diesem und dem Eintrittsdruck p_E . Für die In-Line-Anordnung bedeutet das, dass der gesamte Leckagemassenstrom nochmals verdichtet wird. In der Back-to-Back- Anordnung gilt das zwar auch, aber für einen kleineren Leckagemassenstrom. Hinzu kommt, dass die Leckagemenge von der Hoch- zur Niederdruckstufengruppe zuerst den Prozessgas-Kühler passiert, bevor sie wieder verdichtet wird. Im Gegenzug mischt sich in der In-Line-Anordnung der gesamte Leckagestrom ungekühlt mit dem Prozessgas am Eintritt der Niederdruckstufengruppe.

Welche Vorteile in thermodynamischer Hinsicht diese Anordnung bringt, sei exemplarisch an einem 9-stufigem Verdichter gezeigt (Fig. 4), bei dem nach fünf Stufen zwischengekühlt wird. Die Leistungsreduktion beträgt demnach rund 1,9 %. Das ist gleich zu setzen mit einem Wirkungsgradgewinn von 1,9 %.

Charakteristikum der in Modul 2 neu entwickelten Verdichterlaufräder (Bild 5) ist das vergleichsweise breite Kennfeld, das vor allem eine Folge der Verwendung von unbeschauften Diffusoren (sogenannten Low-Solidity-Diffusoren), wie auch der an das betrachtete Gas angepassten Kanalform. Betriebsbereich wie auch Wirkungsgrad sind mit den neuen Stufen deutlich besser. Der Wirkungsgradgewinn liegt bei ca. 2,6 % (Wirkungsgrad-Prozentpunkte).

Primäres Ziel der Optimierung des Dichtungskonzeptes (Modul 3) war es, im Betriebszustand eine geringere Leckage zu erzielen als mit der bestehenden Labyrinthdichtung. Dazu wurden verschiedene Materialen und verschiedene Geometrien im einem Prüfstand an der Hochschule Rapperswil untersucht, der es erlaubt, die Spaltweite zwischen den rotierenden (Laufrad) und statischen (Gehäuse-)Komponenten im Betrieb zu variieren. Die Tests zeigten, dass bei geeigneter Wahl von Material und Geometrie der Dichtspalt nahezu Null betragen kann (0,05 mm; anstatt 0,3 mm wie bei den bisher verwendeten konventionellen Labyrinthdichtungen). Das führt zu einer wesentlich kleineren Leckagemenge. Für die Back-to-Back- Verdichteranordnung (Fig. 3b) wurde im Auslegungspunkt eine Leistungsreduktion von 1,6 % erzielt, was gleichbedeutend mit einer entspre-

chenden Verbesserung des Wirkungsgrades von 1,6 % ist.

Im Ende 2009 gestarteten Nachfolgeprojekt **Entwicklung von integrierten Motorverdichtern für Brenngase aus Biomasse** [4] steht die Entwicklung einer Radialverdichter-Baureihe (1–6 m³/s; 4000–20'000 m³/h) in Form von integrierten Motorverdichtern zur Verdichtung von Rohsynthesegasen aus Biomasse im Vordergrund. Durch diese Entwicklung sollen verdichterseitig die Voraussetzungen geschaffen werden, um den aufwendigen Prozessschritt der Rohsynthesegas-Reinigung möglichst zu vermeiden. Dieser Maschinentyp soll aufgrund seines Designs inhärente Vorteile beim Umgang mit brennbaren, verschmutzten und ggf. toxischen Gasen aufweisen, wie z.B. hermetische Dichtheit (durch komplette Kapselung), geringer Platzbedarf und hohe betriebliche Flexibilität (drehzahlvariable Highspeed-Motor-Technologie), sowie geringe Unterhaltskosten (Magnetlager, komplett ölfreies Design).

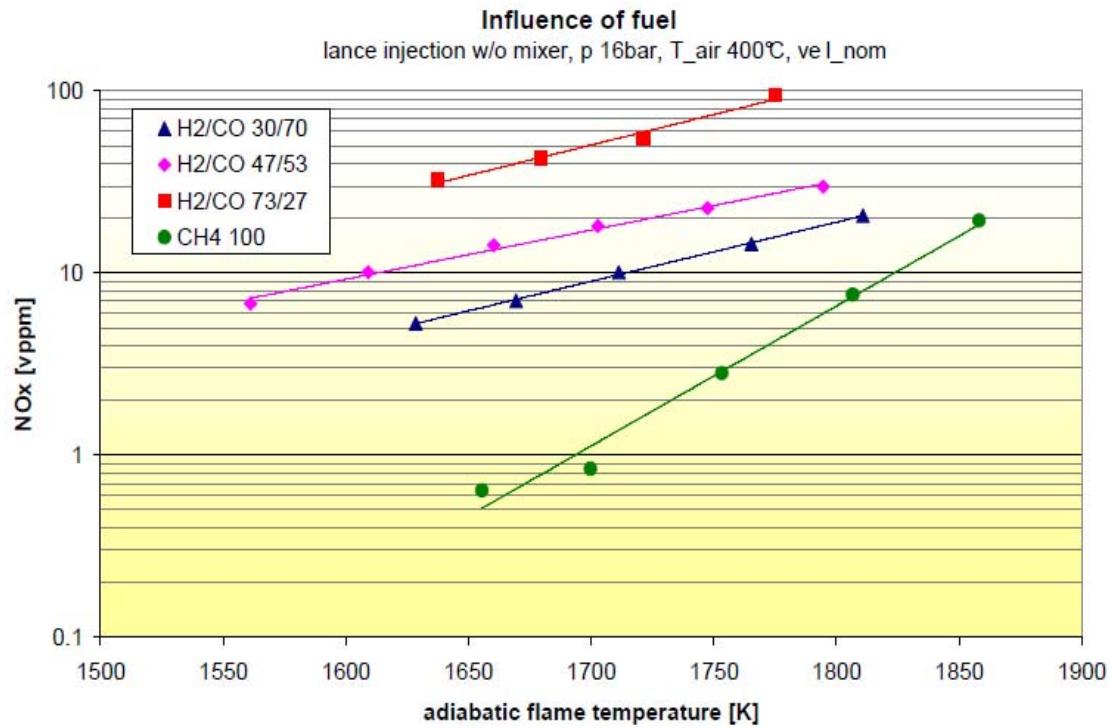
Die speziellen verbrennungstechnischen Besonderheiten beim Einsatz von Syngasen in Gasturbinen-Prozessen standen im Mittelpunkt des Projektes **Verbrennung von Syngasen** [5]. Durch den hohen Anteil an Wasserstoff (H₂) weisen Syngase ganz spezielle verbrennungstechnische Eigenschaften (Flammengeschwindigkeit, Zündgrenzen usw.) auf, die bei der Auslegung von Brenner- und Brennkammer-Systemen berücksichtigt werden müssen, um einen sicheren (d.h. stabilen, nicht fluktuierenden) und emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten. Fig. 6 zeigt beispielhafte Ergebnisse für Brenngase mit unterschiedlichem Wasserstoffgehalt, wie sie am Mini-Hochdruck(MHD)-Prüfstand der Fachhochschule Nordwestschweiz

(Standort der Anlage: Alstom, Birr) erarbeitet werden können. Es wird deutlich, dass bei Brenngasen mit hohem Wasserstoffanteil die Tendenz zu (sehr) hohen NO_x-Emissionen besteht, und ein starkes Augenmerk auf die Qualität der Vormischung von Brenngas und Luft gelegt werden muss, um diese Emissionen in einem akzeptablen Rahmen (zumindest unter 25 ppm NO_x bei einem Referenz-Sauerstoffgehalt von 15 % O₂) zu halten.

Der Betriebsbereich von Gasturbinen kann bei der Verwendung von Syngasen als Brennstoff ebenfalls deutlich eingeschränkt sein, wie die Ergebnisse in Fig. 7 aufzeigen. Weniger kritisch als bei Erdgasflammen ist dabei die Betriebsgrenze unter (sehr) mageren/brennstoffarmen Stöchiometriebedingungen ($\Phi < 0,3$; dies bedeutet: Brennstoff/Luft-Mischungsverhältnisse mit weniger als 30 % des Brennstoffs für optimale, vollständige Verbrennung), bei der es zu einem Verlöschen der Flamme kommen kann (Lean Blow Out, LBO). Dieses Löscherhalten ist für die am Paul Scherrer Institut (PSI) untersuchten Syngas-Flammen nur wenig vom Druck in der Brennkammer abhängig und tritt erst bei sehr mageren Mischungsverhältnissen auf ($\Phi < 0,3$), bei denen Erdgasflammen schon nicht mehr stabil betrieben werden können. Im Gegensatz dazu tritt bei Syngasflammen ein anderes Problem in den Vordergrund, nämlich die sichere/stabile Betriebsgrenze unter brennstoffreicher Bedingungen ($\Phi > 0,45$). Diese Betriebsgrenze, die sich durch Flammenrückschlag ausweist (Flash Back, FB) ist extrem abhängig vom Druck in der Brennkammer und engt den möglichen Betriebsbereich mit steigendem Druck so stark ein, dass die Verbrennung ab Drücken über 10 bar nicht mehr stabil betrieben werden kann. Nur durch eine leich-

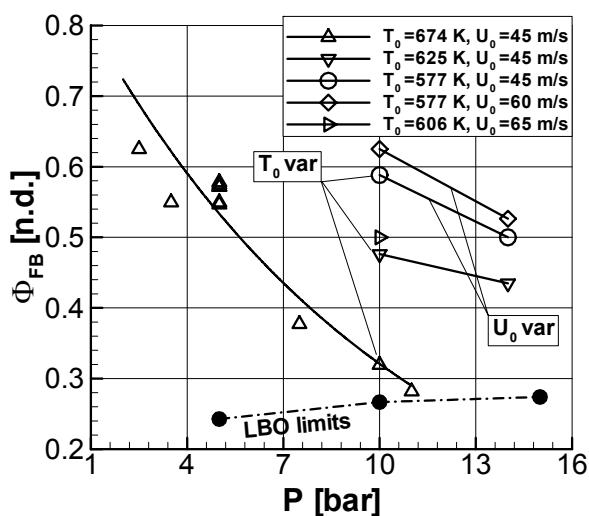


Figur 5: Versuchslaufräder für hohen (links) und mittleren (rechts) Durchsatz



Figur 6: NO_x-Emissionen für verschiedene Syngas-Zusammensetzungen (z. Vgl. Erdgas/Methan)

te Reduktion der Verbrennungslufttemperatur (die Verbrennungsluft erhitzt sich beim Kompressionsprozess im Verdichter der Gasturbine) um ca. 100 K kann allerdings der Betriebsbereich wieder deutlich erweitert werden, da sich die Flash-Back-Grenze bei niedrigeren Lufttemperaturen signifikant zu höheren Brennstoffanteilen ($\Phi > 0,45$) verschieben lässt.



Figur 7: Betriebsbereich (Stabilitätsgrenzen) für eine Syngasflamme (Gaszusammensetzung: H2/CO = 50 %/50 %)

Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit (um fast 50 %) hat dagegen – auf den ersten Blick über-

raschend – kaum einen Einfluss auf die Erweiterung des Betriebsbereichs. Wie sich durch detaillierte zusätzliche Untersuchungen der Flammenfrontoberfläche (d.h. der Reaktionszone, in der der Hauptumsatz des Brennstoffs erfolgt) zeigt, können sich – wasserstoffhaltige – Syngasflammen sehr gut den erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten anpassen, indem sie durch eine weitergehende Auffaltung der Flammenfront zusätzliche Reaktionsoberfläche generieren und damit den durch die höhere Anströmgeschwindigkeit geforderten höheren Brennstoffumsatz kompensieren, ohne nennenswert ihren Stabilisierungsort zu ändern (d.h. ohne stromab zu driften wie dies bei Erdgasflammen der Fall ist).

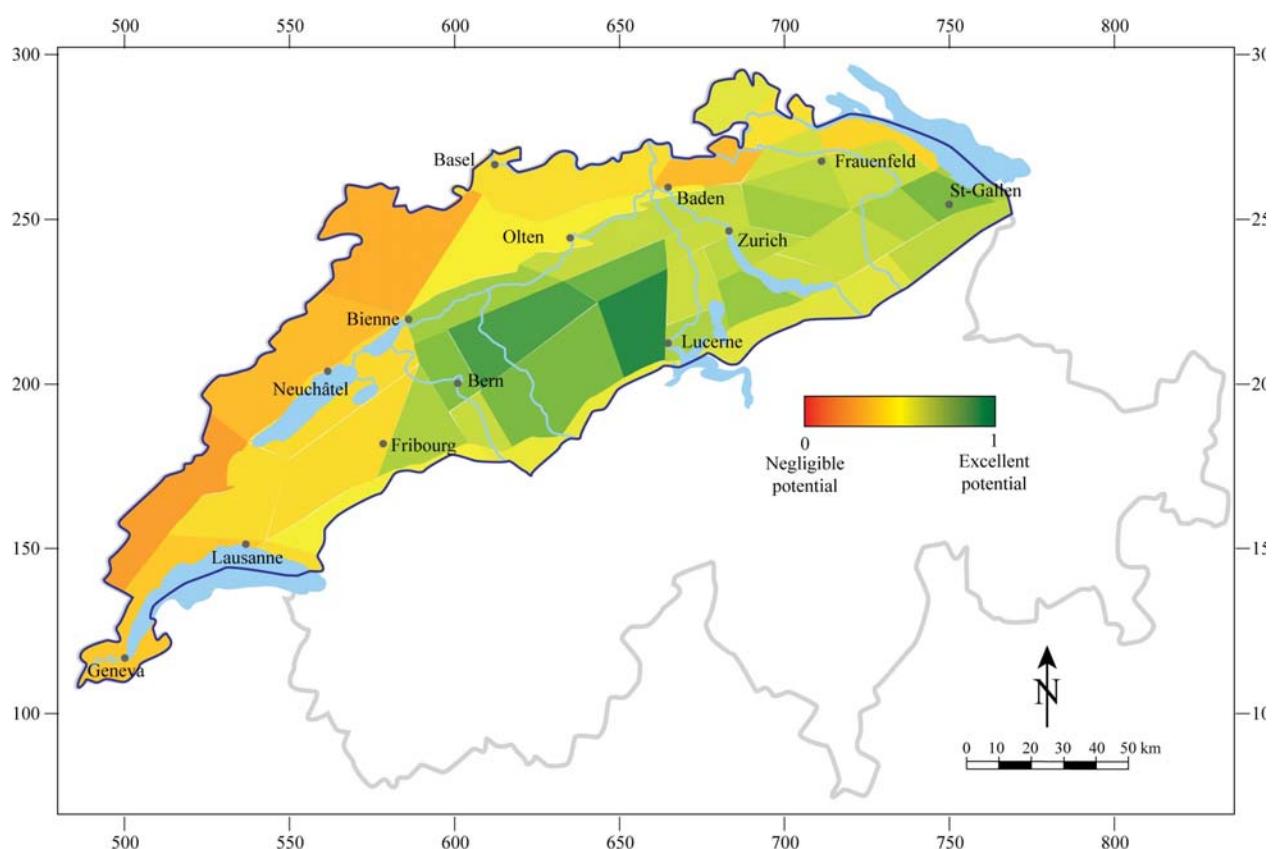
CO₂-Abscheidung und -Lagerung

Die Studie **Speicherpotenzial für CO₂ in der Schweiz** [12] fokussiert sich auf das Speicherpotenzial von tief liegenden, regional ausgedehnten Aquiferen (Wasser führenden Schichten) des Schweizer Molassebecken, die gekoppelt mit einem undurchlässigen Deckgestein eine mögliche Speicherstätte für CO₂ sein könnten. Andere klassische Speicher wie erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten, Kohleflöze oder durchlässige Basaltschichten werden in dieser Grobstudie nicht untersucht, da sie auf den ersten Blick hin nicht sehr relevant

für die Schweiz zu sein scheinen. CO_2 , ein Gas mit einer durchschnittlichen Konzentration von $\sim 0,3\text{--}0,4\text{ Vol.}\%$ (354 vppm) und einer Partialdichte von $\sim 0,006\text{ kg/m}^3$ in der Atmosphäre, wird unter hohem Druck in seine flüssige oder überkritische Phase gewandelt und mit einer Dichte von $\sim 500\text{--}700\text{ kg/m}^3$ geologisch eingelagert.

In der Schweiz gibt es drei, regional ausgedehnte mögliche Speicher- und Deckgesteinspaare; das Top des Kristallins mit dem überlagernden Gesteinsschichten des Mesozoikums, den Oberen Muschelkalk und den Oberen Malm. Gewichtete Kriterien (zum Beispiel Tektonik, Hydrogeologie, Tiefe der Speicher- und Deckgesteine, Kenntnis-

stand und noch andere) erlauben eine Klassifizierung möglicher Lagerstätten nach international vergleichbaren Massstäben. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Südkante des Molassebeckens und die subalpine Molasse prinzipiell attraktiv sein könnten, wobei die «sweet spots» verstärkt im Raum Fribourg–Biel bis Frauenfeld–St. Gallen zu suchen wären (Fig. 8). Mit der soeben erschienenen Synthese-Studie der Schweizerischen Geophysikalischen Gesellschaft, welche eine Neubewertung der Stratigraphie des Schweizer Molasse Beckens erlaubt, wird nun abschliessend in der ersten Hälfte 2010 ein wichtiger Datensatz hinzugezogen.



Figur 8: Qualitative Abschätzung des CO_2 -Speicherpotenzials des Schweizer Molasse Beckens an Hand von international vergleichbaren Kriterien, welche das Speicherpotenzial charakterisieren

Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet, weswegen eine starke Integration und Beteiligung der im angesprochenen Kraftwerksbereich tätigen Herstellerfirmen und Zuliefererbetriebe unabdingbar notwendig ist. Ein zentrales Element stellen dabei die Hersteller von Turbomaschinen und Kraftwerksanlagen dar (Alstom, MAN Turbo, Turbomach), die mit ihren in der Schweiz angesiedelten Entwicklungs- und Produktionszentren den Garant für die Umsetzung der Programmergebnisse bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zuliefererfirmen (u.a. Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll) sicherstellen, dass die Programmaufwendungen vorwiegend in der Schweiz wirksam werden. Daneben wird auch eine aktive Beteiligung der Strom- und der Gaswirtschaft in der Schweiz (Swisselectric, VSG) angestrebt, die als Anwender bzw. Versorger ebenfalls einen wesentlichen Nutzen aus der zu entwickelnden fortschrittlichen Technik ziehen sollen. Die äusserst anspruchsvollen technischen Ziele sind nur mit einem verbesserten Verständnis der technischen Zusammenhänge und auf einer erweiterten Basis von Grundlagenkenntnissen erreichbar. Diesen Beitrag zum Programmerfolg liefern die akademischen Institutionen der Schweizer Hochschul- und Forschungslandschaft (ETHZ, EPFL, Empa, PSI, FHNW, HSR, ZHW). Sie werden dabei auch ihrem Anspruch gerecht, neueste technische Erkenntnisse schnell in marktgerechte Produkte umsetzen zu helfen. Durch die hohe technische Kompetenz der im ETH-Bereich angesiedelten Forschungsinstitute – zusammen mit praxisnaher Unterstützung aus den Fachhochschulen – sind die Voraussetzungen, einen signifikanten Beitrag zum Programmerfolg beizutragen, in nahezu idealer Weise gegeben.

Damit das Programm einen spürbaren Einfluss auf die Entwicklung der notwendigen Technologien bewirken kann, ist ein gesamtes Projektvolumen in Höhe von 15 Mio. CHF pro Jahr anvisiert (Stand Ende 2009: ca. 5 Mio. CHF). Diese Kosten werden anteilmässig von der Privatwirtschaft (Firmen und Interessenverbände finanzieren knapp 2/3 der Gesamtkosten) und öffentlichen Förderinstitutionen in der Schweiz (BFE, KTI) und Europa (7. Rahmenprogramm, FP7) getragen.

Während der **Programmjahrestagung** am 22. Juni 2009 in Bern wurden die Kontakte zwischen den

verschiedenen Programmteilnehmern wieder aufgefrischt bzw. neue Verbindungen geknüpft. Die Jahrestagung gab allen Interessierten wieder die Möglichkeit, sich über die Zielsetzungen und den Stand des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen. Schwerpunktthemen der Jahrestagung 2009 waren die Forschungsprojekte, die sich mit Themen der Reduktion von CO₂-Emissionen befassen, sei es durch Einsatz von (CO₂-neutralen) Brennstoffen wie Biomasse oder durch Prozessmodifikationen zur vereinfachten Abscheidung von Kohlendioxid (CO₂). Auch die Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂) in geologischen Formationen in der Schweiz und der aktuelle Stand der CO₂-Gesetzgebung in der Schweiz wurden behandelt. Das nationale Netzwerk des Programms *Kraftwerk 2020* wird regelmässig in einer Jahresveranstaltung gepflegt (nächster Termin: voraussichtlich 7. Juni 2010), bei der ein Überblick über den Stand der Programmaktivitäten geboten wird und die Gelegenheit besteht, sich über die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen.

Enge Verbindungen werden zum **Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)** [16] des ETH-Bereichs unterhalten. Im Themenbereich *Elektrizität* im CCEM-CH besteht eine weitgehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit der Ausrichtung des Programms *Kraftwerk 2020*. Drei Projekte im Programm *Kraftwerk 2020* (*Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minderung* (GT-CO₂), *Verbrennung von Syngasen* und *Carbon dioxide management in Swiss power generation* (CARMA)) sind direkt mit Projekten im CCEM-CH verbunden und erhalten eine finanzielle Förderung aus ETH-Bereichsmitteln.

Sowohl das Projekt CARMA, als auch GT-CO₂, welche einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO₂-Problematik bearbeiten (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO₂-Abscheidungstechniken, CO₂-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz suchen, aber auch Resultate von internationaler Bedeutung bereitstellen, sind mit Projektunterstützungsanträgen an die Forschungsförderungsorganisation von Swisselectric Re-

search[<http://www.swisselectric-research.ch/D/forschungsprojekte/laufende-projekte/energiesysteme/technologies-for-gas-turbine-power-generation-with-co2-mitigation.html>]

verknüpft. Es ist gewünscht und beabsichtigt diese Verbindungen weiter auszubauen und damit das Programm *Kraftwerk 2020* breit in der Förderlandschaft der Schweiz abzustützen.

Internationale Zusammenarbeit

Das Programm vernetzt vornehmlich die massgeblichen Kompetenzträger aus Industrie und akademischen Institutionen in der Schweiz, ist aber in Einzelfällen auch offen für ausländische Partner, die exklusives Know-how in Projekte einbringen können.

Weltweit werden sehr grosse Anstrengungen unternommen, um den Wirkungsgrad von gasbefeuerten Kombi-Kraftwerken zu verbessern und um auf Systemebene die CO₂-Emissionen zu senken resp. durch Abscheiden und Lagern ganz zu vermeiden. Deshalb existieren inzwischen in mehreren Ländern (Deutschland, England, Norwegen, USA, Australien, Japan) und Regionen (z.B. **Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts»** [17] der Länder Bayern und Baden-Württemberg) ähnliche (inter-)nationale/regionale Programme wie das Programm *Kraftwerk 2020*, mit deren Ausrichtung und aktuellem Fortschritt ein regelmässiger Abgleich stattfindet. Durch gegenseitige Berichterstattung bei jährlich statt findenden Programmkonferenzen wird ein regelmässiger Informationsaustausch gepflegt. Gemeinsame Projekte sind aufgrund nationaler Finanzierungsregeln und komplizierter Konstellationen bezüglich Eigentumsrechten an Projektergebnissen bisher nicht konkret in Betracht gezogen worden.

Die europäische Integration wird durch die Einbettung von Projekten aus dem Forschungsprogramme *Kraftwerk 2020* im derzeit laufenden 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) der EU verfolgt. Die bisherige Erfahrung mit bereits erfolgten FP7-Projektausschreibungen zeigt, dass i.d.R. nur grosse Projektkonsortien (10–20 Partner) mit Projektanträgen erfolgreich sind. Daher ist es für Schweizer Partner essentiell, ein gut funktionierendes, weit gespanntes europäisches Netzwerk aufzubauen, um damit die Chance zu haben, schon im Frühstadium der Projektentwicklung mit-einbezogen zu werden. Dies ist im Rahmen des **European Turbine Network (ETN)** [18] durch aktive Beteiligung an einem erfolgreichen Projekt-

antrag (H2-IGCC) gelungen. Der offizielle Beginn des Projektes (Gesamt-Budget: 17,8 M€, Laufzeit 4 Jahre), an dem das Labor für Verbrennungsforschung des Paul Scherrer Instituts (PSI) einen wesentlichen Anteil hat, war der 1. November 2009. Die Zielsetzung des Projektes ist es, wichtige Technologien und Komponenten eines «Null-Emissions»-Kraftwerks auf Basis eines integrierten Vergasungs-Kombikraftwerks (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) mit CO₂-Abscheidung zu demonstrieren. Über den Fortschritt der Arbeiten wird in zukünftigen Jahresberichten des *Programms KW2020* in umfassender Weise berichtet werden.

Durch die Beobachtung und aktive Teilnahme am Arbeitsprozess der **EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»** [19] erfolgt sowohl eine regelmässige Abstimmung der Aktivitäten mit anderen nationalen Programmen (der Programm- bzw. der Bereichsleiter haben Einsatz in der begleitenden Länderarbeitsgruppe *Government Group*), als auch die Möglichkeit der Mitgestaltung von gemeinsamen Entwicklungszügen und EU-Arbeitsprogrammen (der Programmleiter ist Mitglied der Arbeitsgruppe *Taskforce Technology*). Diese Aktivitäten sind unabdingbar, um die Entwicklungen im europäischen Umfeld frühzeitig zu erkennen, und Chancen für die Schweiz und Schweizer Partner identifizieren und ausschöpfen zu können. Da eine Realisierung von neuen Kraftwerkskonzepten im Pilot- und Demonstrations-Massstab erheblicher Finanzierungsmittel bedarf, sind solche Entwicklungsschritte nur auf internationaler/europäischer Ebene denkbar (dies kann auch im Rahmen bi- oder multi-lateraler Zusammenarbeit zweier oder mehrerer Länder erfolgen).

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der **Internationalen Energie Agentur (IEA)** [20] wie der *Working Party for Fossil Fuels (WPFF)*, des *Implementing Agreement for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion*, des *Greenhouse Gas R&D Programme* sowie des *Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF)*

wird die internationale Vernetzung der Programmaktivitäten noch weiter verstärkt und damit Möglichkeiten eröffnet, durch gemeinsame Aktionen Projekte zu verwirklichen, die eine wesentlich grössere (internationale) Breitenwirkung entfalten und für die Schweiz allein sonst grundsätzlich gar

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Da die Programmziele anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet sind, ist bei einigen Projekten des Programms Kraftwerk 2020 bereits ein teilweiser Pilot- und Demonstrations-Charakter im Projektumfang integriert. Spezifische Pilot- und Demonstrationsprojekte sind derzeit nicht im Programm enthalten und werden auch zukünftig hauptsächlich über privatwirtschaftliche Initiativen abgedeckt werden müssen, da die für die interessierenden Kraftwerkstechnologien notwendigen Pilotanlagengrössen (i.d.R minimale Leistungsgröße: 50 MW) und die damit verbundenen Finanzsummen kaum über öffentliche Mittel bereit gestellt werden können.

In diesem Zusammenhang bieten ebenfalls bilaterale/internationale Kooperationen im europäischen Rahmen eine gute Gelegenheit in der Schweiz moderne Kraftwerkstechnologien zu demonstrieren, die eine Signalwirkung über die Schweiz hinaus (weltweit) ausüben. Entsprechende Möglichkeiten wären im Rahmen des De-

nicht zu realisieren wären. Das IEA Greenhouse Gas R&D Programme hielt Anfang Oktober 2009 seine 36th «Executive Committee»-Sitzung in der Schweiz ab, wobei als Gastgeber das BFE und Alstom Schweiz auftraten.

monstrations-Programms der EU gegeben (**European CCS Demonstration Project Network** [<http://www.ccsnetwork.eu>]), welches auf Initiative der EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants» im Aufbau ist. Um hier im europäischen Umfeld erfolgreich zu sein, ist aber eine (sehr) aktive Haltung der Schweizer Industrie und politischen Institutionen notwendig. Die Auswahl für die ersten (ca. 6 Einheiten) Pilot- und Demonstrationsanlagen von Null-Emissions-Kraftwerkskonzepten in Europa ist bereits weit fortgeschritten und demnächst entschieden. Diese Anlagen sollen als Vorreiter-Projekte bis zum Jahr 2015 realisiert werden und können mit einer finanziellen Unterstützung aus dem europäischen Handelsystem für CO₂-Emissionsrechte rechnen. In einer weiteren Vergaberunde können noch wenige (ca. 3) weitere Projekte mit einer Unterstützung rechnen, wenn gewisse Kriterien des Netzwerks erfüllt werden und verbliebene Technologielücken der bisher ausgewählten Projekte abgedeckt werden.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Aufgrund der mittlerweile mehr als 3-jährigen Programmalaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) war das Jahr 2009 ein Übergangsjahr in dem nun fast alle Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen und teils durch thematisch ähnliche Fortsetzungs-Projekte ersetzt wurden. Die bisher abgeschlossenen Projekte können mehrheitlich als recht erfolgreich bezeichnet werden. Alle Projektteams waren in erfreulicher Weise in der Lage, ihre Fachkompetenzen in den Projektarbeiten eindrucksvoll zum Einsatz zu bringen, was auch ein Verdienst der projektleitenden Partner ist, die ebenfalls sehr kompetent, professionell und umsichtig das Projektmanagement betreiben. Das Programm befindet sich nun in einer Phase der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios, welches die etwas mo-

difizierte Ausrichtung (inkl. Carbon Capture and Storage, CCS) immer deutlicher widerspiegeln wird. Mit den neuen, 2009 lancierten Projekten wurden teilweise auch wichtige thematische Lücken (z.B. im Bereich Schaufelkühlung) geschlossen, so dass das Programm nun (fast) alle ursprünglich vorgesehene Themenbereiche abdeckt.

Die Zusammenarbeit bzw. die Koordination mit anderen öffentlichen Förderinstitutionen (vornehmlich der Kommission für Technologie und Innovation, KTI) konnte nicht mehr wie in den zurück liegenden Jahren gepflegt werden, dementsprechend ist der Informationsaustausch stark zurückgegangen und über den in KTI-Projekten erzielten Fortschritt kann an dieser Stelle nur noch sehr begrenzt berichtet werden. Um einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten mit Bezug zum

Themenbereich des Programms *Kraftwerk 2020* zu gewährleisten, wäre es allerdings wünschenswert den Informationsaustausch wieder zu beleben. Das bisherige Projektportfolio ist neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) zu grossen Teilen der (in ähnlichem Umfang geleisteten) finanziellen Unterstützung durch die KTI zu verdanken. Da die finanzielle Ausstattung des Programms über das BFE-Budget hinter den ursprünglichen Erwartungen zurückgeblieben und 2010 sogar rückläufig ist, erscheint ein weiterer Programmausbau unrealistisch, auch wenn es gelingen sollte, durch eine stärkere Einbindung anderer Förderinstitutionen einen gewissen Ausgleich zu erreichen. Zielsetzung ist es, durch kontinuierliche Initierung von Projekte auf nationaler Ebene über die Forschungsfonds der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (Swisselectric Research) und der Gas- und Ölirtschaft die Basis des Programms zu stärken. Auf internationaler Ebene werden die Projektbeteiligungen im FP7 der EU weiter sehr intensiv vorangetrieben werden müssen, um absehbar das Programmvolume annähernd konstant halten zu können (bei ca. 5–7 Mio. CHF/Jahr).

Trotz der Konzentration der Programmaktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren kann mit dem gegebenen finanziellen Spielrahmen nur durch eine weiterhin starke Fokussierung auf einzelne Fragestellungen ein signifikanter technologischer Fortschritt bei einigen wenigen Schlüsselkomponenten erwartet werden. Mit der Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich *Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid* (Carbon Capture and Storage, CCS) haben sich zusätzliche Chancen ergeben, das Programm noch bedeutsamer für die Entwicklung Klima-relevanter Techniken zu gestalten. Diese Programmentwicklung, die sich in

einer veränderten Gewichtung der zukünftig einzusetzenden Programmmittel widerspiegelt, wird weiter fortgeführt.

Das Engagement der industriellen Partner wird auch zukünftig stark davon abhängig sein, wie die politischen Randbedingungen und die gesellschaftspolitischen Stimmungen in der Schweiz sich in Bezug auf künftige (Gross-)Kraftwerkstechnologien entwickeln, und wie die damit zusammenhängenden Fragen der Energieversorgungsbasis und der Emissionen an klimaschädlichen (Treibhaus-)Gasen wie CO₂ in der Öffentlichkeit diskutiert werden. Unter den derzeitigen (finanziellen) Rahmenbedingungen ist ein Ausbau der Projektaktivitäten auf das ursprünglich geplante Gesamtvolume von 15 Mio. CHF pro Jahr unrealistisch. Damit einher geht die Erkenntnis, dass nicht alle relevanten Fragestellungen in ausreichendem Masse mit den in der Schweiz zur Verfügung stehenden Ressourcen und Kompetenzen bearbeitet werden können. Umso mehr Bedeutung kommt deshalb der Einbindung in und der Abstimmung mit entsprechenden Initiativen in anderen europäischen Ländern und weltweit zu. Neben der Aktivierung aller möglichen Ressourcen (Projektpartner, Finanzierungsquellen) in der Schweiz wird deshalb die Integration der Programmaktivitäten in die laufenden internationalen Anstrengungen – vor allem im europäischen Umfeld – ein noch wichtigerer Schwerpunkt der Bemühungen 2010 darstellen. In diesem Kontext wird u.a. weiter versucht werden, eines der in der Planungsphase befindlichen Gas- und Dampfkraftwerke in der Schweiz (z.B. am Standort Chavalon oder in Cornaux) im Rahmen des Demonstrationsprogramms der EU (European CCS Demonstration Project Network) als eine der ersten Pilot- und Demonstrationsanlagen mit CO₂-Abscheidung zu etablieren.

Liste der F+E-Projekte

- (JB) Jahresbericht 2009 vorhanden
- (SB) Schlussbericht vorhanden

Unter www.energieforschung.ch sind die Berichte (angegebene Projektnummern) sowie weitere Informationen verfügbar.

- [1] Stefan Keller, (stefan.sk.keller@power.alstom.com), Alstom Power Turbo-Systems, Birr: **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %)** (JB)
- [2] Manfred Roth, (manfred.roth@empa.ch), Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf: **Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen** (JB)

- [3] Jürg Meier (mri@zhwin.ch), Zürcher Hochschule, Winterthur: **Hoch effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)** (JB)
- [4] Beat Ribi, (beat.ribi@ch.manturbo.com), MAN Turbo, Zürich: **Hoch effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse** (JB)
- [5] T. Griffin, (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: **Verbrennung von Syngasen** (JB).
- [6] Peter Griebel (peter.griebel@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruck-Flammen** (SB)
- [7] T.Griffin (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: **Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minderung** (KTI-Projektantrag).
- [8] S. Schenker, W. Kreutner, W. Huschmid (sabine.schenker@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen** (SB)
- [9] Norbert Hofmann (norbert.hofmann@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: **Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten** (JB).
- [10] Arnd Jung (jung@zhaw.ch), Zürcher Hochschule, Winterthur: **Entwicklung von verschleissbeständigen Werkstoffsystemen für Bypassventile in Dampfturbinen bis 650 °C** (KTI-Projektantrag).
- [11] Anja Skrivelik (anja.skrivelik@epfl.ch), Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, Lausanne: **Small Microwave Antenna for Rotating Turbomachinery** (KTI-Projektantrag).
- [12] Jean-Louis Hersener (hersener@agrenum.ch), Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen: **Verfügbarkeit von Gras für Kombikraftwerke in der Schweiz** (BFE-Projektantrag)
- [13] Marco Mazzotti (marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch), Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich: **CARMA – Carbon dioxide management in Swiss power generation** (CCEM-Projektantrag)

Liste der P+D-Projekte

keine

Referenzen

- [14] **Konzept für das Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»**, BFE, [Bundesamt für Energie BFE - Forschungsprogramm Kraftwerk 2020](http://www.bfe.admin.ch).
- [15] **Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»: Ergänzung und Aktualisierung des Programmkonzepts für den Zeitraum 2008–2011**, [Bundesamt für Energie BFE - Forschungsprogramm Kraftwerk 2020](http://www.bfe.admin.ch)
- [16] **Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH)**, [CCEM-CH](http://www.ccem.ch)
- [17] **Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts»**, [KW21](http://www.kw21.ch)
- [18] **European Turbine Network (ETN)**, www.eugasturbine.org/
- [19] **Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»**, www.zero-emissionplatform.eu/website/
- [20] **Internationales Energie Agentur (IEA)**, www.iea.org