

Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Kraftwerk 2020/CCS

Peter Jansohn

peter.jansohn@psi.ch

Programmschwerpunkte

Durch den steigenden Strombedarf, das Auslaufen von Stromimportverträgen und das Erreichen der maximalen Betriebsdauer bestehender Kraftwerks-Anlagen, 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 Stromerzeugungs-Kapazitäten 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 Programmaktivitäten 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 Gaskraftwerke 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 Marktstellung.

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-Emissionsminderungspotenziale ausgenützt 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, Gasturbinenkraftwerke noch besser zu befähigen, die **Stabilisierung des Stromversorgungsnetzes** zu übernehmen. Dazu müssen Techniken entwickelt werden, die höhere Lastgradienten (+/-3 % Last pro Sekunde) oder gar eine von der 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 Programmentwicklung im Jahr 2008 geprägt durch die Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂)» (Carbon Capture and Storage, CCS). Dieser Programmentwicklung wird durch eine veränderte Gewichtung der

zukünftig einzusetzenden Programmmittel 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] und war Bestandteil der Begutachtung des Programms durch die Forschungskommission CORE am 8. April 2008. Das Programm wurde zur Weiterführung im Rahmen der laufenden Konzeptperiode 2008–2011 empfohlen.

Aufgrund der mittlerweile 3-jährigen Programmlaufzeit (welche einer typischen Projektdauer entspricht) sind im Jahr 2008 einige Projekte der

Programmanfangsphase abgeschlossen worden, und das Programm tritt nun in eine Periode der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios ein. Der zur Verfügung gestellte Finanzrahmen aus BFE-Mitteln war 2008 durch noch laufende Projekte aus der Anfangsphase weiterhin weitgehend ausgeschöpft und erlaubte dementsprechend nur eine mässige Erweiterung des Projektumfangs. Zusätzliche Projekte werden insbesondere durch die 2008 beschlossene Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂)» (Carbon Capture and Storage, CCS) und einer damit verbundenen mässigen Erhöhung des Budgetrahmens ermöglicht.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Im Jahresverlauf 2008 konnten entsprechend der erweiterten Ausrichtung des Programms auf Themen im Bereich CO₂-Minderung neue Projektvorschläge soweit vorbereitet werden, dass diese Arbeiten Anfang 2009 gestartet werden konnten. Mit Ablauf des Jahres 2008 sind dafür einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen worden, über die damit letztmalig in diesem Jahresbericht informiert wird. Die Zusammenarbeit/Koordination mit anderen öffentlichen Förderinstitutionen – vornehmlich der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) – konnte weitergeführt werden, allerdings ist der Informationsaustausch durch das Ausscheiden wichtiger Verbindungspersonen stark zurückgegangen und erschwert worden. Um einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten mit Bezug zum Themenbereich des Programms «Kraftwerk 2020» aufrecht zu erhalten, wird es eine wichtige Aufgabe sein, diese Kommunikationskanäle wieder herzustellen. Neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) wird ein erheblicher Teil der Projekte (7 Projekte) durch die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) sowie (1 Projekt) durch den Forschungsfond der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (SwissElectric Research) finanziell unterstützt. Die Projektthemen sind nachfolgend aufgelistet und lassen sich den Hauptzielsetzungen wie folgt zuordnen:

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads

Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Birr; von Roll Isola, Breitenbach; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch.

Projektlaufzeit: 1.4.2006 bis 31.12.2009.

Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; Sulzer Metco, Wohlen; Stellba Schweisstechnik, Dottikon; Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf/Thun.

Projektlaufzeit: 1.12.2006 bis 30.11.2009.

Werkstoffe für Bypass-Ventile in Dampfturbinen mit hoher Dampftemperatur (650 °C)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: CCI AG, Winterthur; Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Winterthur.

Projektlaufzeit: 1.12.2007 bis 30.11.2009.

Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Winterthur; Hochschule für Technik und Architektur (HTA), Luzern.

Projektlaufzeit: 1. 1.2007 bis 31.12.2008.

Mikrowellen-Sensor zur Spaltweiten-Messung in Turbomaschinen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Vibro-Meter SA, Fribourg; Eidg. Technische Hochschule Lausanne (EPFL), Lausanne.

Projektlaufzeit: 1.11.2007 bis 31.10.2009.

New Generation thermal barrier coatings for operation at T=1400 °C (HAT-TBC)

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; ETH Zürich.

Projektlaufzeit: 1.3.2008 bis 28.2.2011.

CO₂-Emissionsminderung

Hoch-effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: MAN Turbo, Zürich; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Hochschule Rapperswil (HSR), Rapperswil.

Projektlaufzeit: 1.6.2006 bis 31.12.2008 (31.12.2009).

Verbrennung von Syngasen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Birr; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.11.2005 bis 31.12.2008 (30.6.2009; Phase 2).

Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minderung

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Birr; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.1.2007 bis 31.12.2009/1.7.2008 bis 30.6.2010.

Verfügbarkeit von grasartiger Biomasse für Kombikraftwerke in der Schweiz

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Ingenieurbüro Hersener (IBH), Wiesen-dangen; Ernst Basler und Partner AG (EBP), Zollikon; Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.11.2007 bis 31.8.2008.

Grundlagenprojekte

Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen.

Projektlaufzeit: 1.8.2005 bis 31.12.2007 (31.12.2008).

Das Projekt wurde aus dem Forschungsprogramm Feuerung und Verbrennung übernommen.

Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten

Beteiligte Industriepartner und Forschungsorganisationen: Alstom, Baden; Precicast, Novazzano; Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Brugg-Windisch/Olten.

Projektlaufzeit: 1.8.2006 bis 31.01.2008.

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads

Im Projekt **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %)** [1] wird 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 Gesamtsystemwirkungsgrades 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 verbesserter Temperaturbeständigkeit (zulässige Materialtemperatur: 180 °C; heutiger Stand der Technik: 155 °C);
- Verbesserung des aerodynamischen Wirkungsgrads (geringere Energieaufwand) des Kühlluftgebläses (Lüfterrad ist direkt mit dem Rotor des Generators verbunden) durch eine optimierte Geometrie des Einlasses und modifizierte Profilierung der Gebläse-Beschaufelung.

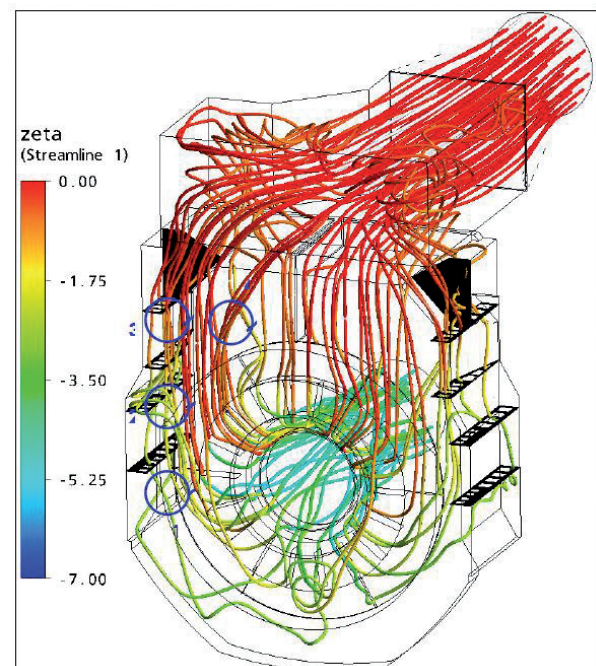
Zur Validierung der Effekte neu eingeführter, verbesserter Isolatormaterialien bzw. reduzierter Kühlluftmengen und aerodynamischer Verluste, wurde ein Referenz-Generatordesign definiert (verlängerte Version des luftgekühlten Generators Topair 300 MVA). Mit Modellrechnungen lässt sich damit prognostizieren, dass der Wirkungsgrad des vorgeschlagenen Generators durch die im Rahmen dieses Projekts zu erarbeitenden Verbesserungen tatsächlich auf 99 % erhöht werden könnte. Zum Erreichen einer besseren Wärmeübertragung vom Kupferleiter auf das Kühlmedium (Luft) wurden zwei Lösungsansätze verfolgt:

- Zum einen die Option des Einsatzes eines Isolationsmaterials mit höherer Wärmeleitfähigkeit ($> 0,5 \text{ W/mK}$ anstelle der heute üblichen $0,26 \text{ W/mK}$). Die Isolationsdicke kann in diesem Fall unverändert bleiben und trotzdem eine deutlich verbesserte Kühlwirkung erzielt werden.
- Der zweite Lösungsweg besteht aus dem Einsatz einer Isolation mit mässig verbesserter Wärmeleitfähigkeit (ca. $0,35 \text{ W/mK}$), aber gleichzeitig verbesserter Durchschlagsfestigkeit ($3,5 \text{ kV/mm}$ anstelle der heute üblichen $2,5\text{--}3 \text{ kV/mm}$). Die höhere Durchschlagsfestigkeit erlaubt eine verringerte Isolationsdicke und ermöglicht dadurch ebenfalls eine bessere Wärmeübertragung. Da sich bei der Herstellung von Probestäben mit Isolationsmaterial mit verbesserter Temperaturbeständigkeit (zulässige Materialtemperatur über 155°C) Kompatibilitätsprobleme zwischen der HTC-Isolation und den Alstom-spezifischen Imprägnierprozessen zeigten, wurde dieser Lösungsweg nicht prioritär weiter verfolgt. Als erfolgreiches Zwischenergebnis konnte eine Materialkombination gefunden werden, die unter identischen Bedingungen eine dreimal längere Lebensdauer aufweist als das derzeit verwendete Material (Micadur). Das neue Isolationssystem konnte an verschiedenen Versuchsserien von industriell gefertigten Statorstäben erfolgreich validiert werden. Die Lebensdauer, geprüft mittels *Voltage Endurance Tests* (VET), übertrifft bei weitem diejenige der internationalen Standards (Kema-Norm S14). Das neue Isolationssystem und die dafür benötigten Produktionsprozesse konnten freigegeben werden, so dass dieses nun für die Herstellung von Statorstäben in Alstom-Generatoren eingesetzt werden kann. In einer neuen Evaluation der Generatoreigenschaften mit den jetzt definitiven Isolationseigenschaften soll im Jahr 2009 überprüft werden, ob der Wirkungsgrad des vorgeschlagenen Generators durch die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Verbesserungen tatsächlich auf 99 % erhöht werden könnte.

Der Schwerpunkt der Arbeiten des Forschungspartners FHNW konzentriert sich auf die aerodynamische Optimierung des Ventilatorrades und der Luft-Einlassgeometrie für die Kühlluft des Generators. Dazu wurde ein Versuchstand entworfen und die Modellierung der Strömungsverhältnisse (mittels CFD-Simulationen) im Einlassbereich der Kühlluft (Zuströmung zum Ringspalt zwischen Generatorwelle und den Stator-Elementen) durchgeführt. Die statischen Teile des Ventilator-Modellprüfstands (Massstab 1:3) wurden im November 2007 fertig gestellt und in

Betrieb genommen. Mittels eines Hilfsventilators (Windkanal der FHNW) wird am Ringspalt der gewünschte Volumenstrom abgesaugt und damit die Zuströmung zum Ringspalt simuliert. 2008 wurde der statische Teil des Versuchstands vollständig instrumentiert (32 Drucksensoren) und zahlreiche Messreihen durchgeführt, die zur Validierung der CFD-Rechnungen herangezogen wurden. Die Wanddruckmessungen deckten eine ungenügende Übereinstimmung des Druckfeldes zwischen Simulation und Messung auf, welche sich auf Vereinfachungen in der CFD-Implementierung (Rechengitter) der Strukturbleche in den seitlichen Kanälen (siehe Figur 1) zurückführen lies. Schliesslich wurden auch die anfänglich vernachlässigten seitlichen Strukturwände im Rechengitter detailliert mitberücksichtigt, womit sich eine wesentlich verbesserte Berechnung der Wanddrücke ergab. Bis anhin wurden die Simulationen im Hinblick auf die Validierung ohne Ventilator durchgeführt, d.h. mit einer Druckrandbedingung am Strömungsausstritt. Neu muss nun noch der Einfluss des Ventilators stromaufwärts untersucht werden, da erwartet wird, dass sich die inhomogene Verteilung der Massenstromdichte direkt vor dem Ventilator durch die Saugwirkung des Ventilators verstärkt.

Der neu konstruierte rotierende Teil des Versuchstands (Massstab 1:3, mit Läufer, 9 000 UpM) befand sich Ende 2008 noch im Aufbau. Der komplette Aufbau des Prüfstandes inkl. Splitterschutzverschaltung soll Anfang 2009 abgeschlossen sein.

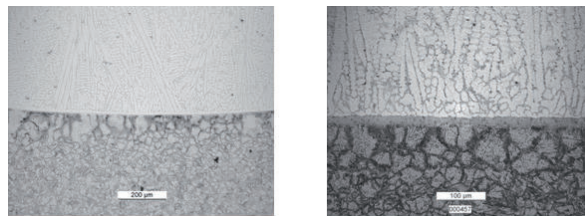


Figur 1: Stromlinienbild des Einlaufgehäuses (Farbkodierung: Totaldruckverlustkoeffizient Zeta) [1]. Blaue Kreise: Orte der pneumatischen Traversenmessungen; schwarz: definitive Implementierung der seitlichen Strukturbleche.

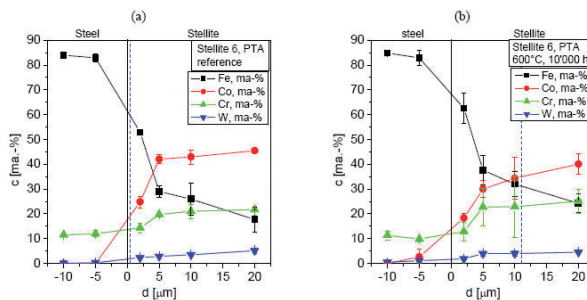
Die von der KTI geförderten Projekte *Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen* [2], *Werkstoffe für Bypass-Ventile in Dampfturbinen mit hoher Dampftemperatur (650 °C)* [10] und *Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln* («Schlanke Schaufel») [3] befassen sich mit Aufgabenstellungen, die zu einer höheren Effizienz des der Gasturbine nachgelagerten Dampfprozesses führen sollen.

Der aus der Abwärme des heißen Gasturbinen-Abgasstroms gewonnene Dampf soll zur Wirkungsgradsteigerung auf möglichst hohe Temperaturen gebracht werden. Für Hochtemperaturdampfturbinen ($> 600\text{ °C}$) sind dann allerdings entweder höherwertige metallische Werkstoffe oder aber gar (metallisch-keramische) Beschichtungen gegen Oxidation und Erosion für die hoch belasteten Bauteile zu entwickeln (insbesondere für die zurzeit noch unbeschichteten ersten Schaufelreihen bzw. für Bypass- und Schnellschlussventile, die zum An- und Abfahren bzw. Lastregelung der Anlage benötigt werden). Durch Oxidation und Erosion rauhen z.B. die Schaufeloberflächen ansonsten während des Betriebs recht schnell auf und erhöhen die Reibungsverluste. Dadurch gehen bei einem Kraftwerk mit 1000 MW Leistung im Laufe der ersten Jahre etwa 20 MW (2 % Leistungsverlust) verloren. Mit der Beschichtung von Dampfturbinenschaufeln wird grundsätzlich Neuland betreten, da diese Technologie bisher nur in Gasturbinen verwendet wird. Neben den Dampfturbinenschaufeln muss aufgrund steigender Betriebstemperaturen auch für die Panzerung von Dampfventilen (wichtig zur Steuerung des Dampfmassenstroms beim An- und Abfahren der Anlage bzw. zur Notabschaltung) neue Lösungen zum Aufschweißen von Hartstofflegierungen gefunden werden, da bei einem Ventilschaden sehr hohe Schadenssummen ($> 15\text{ Mio. €}$) entstehen z.T. durch Sekundärschäden (Beschädigung der Turbinenschaufeln durch Ventil(-sitz)-Bruchstücke). Beide Massnahmen werden in den verschiedenen Projekten verfolgt und sind wichtig, um höhere Dampfparameter in den nächsten Dampfkraftwerk-Generationen realisieren zu können. Durch Untersuchungen der Schädigungsmechanismen mittels mikrostruktureller Charakterisierung (Figur 2), konnten Veränderungen im Bereich der Verbindungsgrenzschicht (Interface) zwischen Trägermaterial und Beschichtung detektiert werden, die auf eine Bildung von intermetallischen Phasen schliessen lassen, welche zu Versprödung führen.

Mögliche Kombinationen aus Grundwerkstoff und Beschichtungsmaterial wurden eruiert (mittels thermodynamischer Simulationen) und zur Prüfung der Proben unter realitätsnahen Beanspruchungsbedingungen ein neuartiger



Figur 2: Materialgrenzschicht (unten: Grundwerkstoff; oben: Schutzschicht) vor (linkes Bild) und nach (rechtes Bild) einer thermischen Behandlung (10 000 Std. bei 600 °C); deutlich ist (im rechten Bild) eine Umwandlungszone an der Materialgrenzschicht zu erkennen [2].



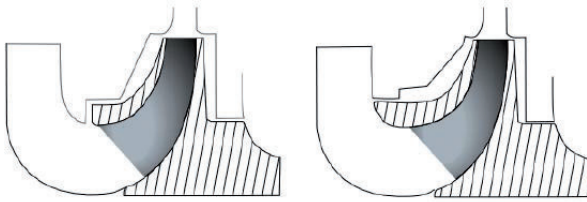
Figur 3: Elementverteilung senkrecht zur Phasengrenzschicht (a) vor und (b) nach einer Wärmebehandlung (600 °C , 10 000 h); die gestrichelte Linie kennzeichnet die maximale Dicke der Zwischenschicht [2].

Dampfoxidationsprüfstand an der EMPA aufgebaut, mit dem Oxidationsversuche in einer Wasserdampf-atmosphäre bei bis zu 750 °C durchgeführt werden können.

Die unterschiedliche Verteilung der Elemente Fe, Co, Cr, W vor und nach der Wärmebehandlung zeigt deutlich die Migration dieser Elemente in der sich ausbildenden Zwischenschicht (Figur 3) und bestimmt im Wesentlichen die Materialeigenschaften dieser Verbindungsschicht und damit die Hafteigenschaften der Beschichtung.

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 «synthetische» Kohlenwasserstoffe erzeugt werden können) sind eine wesentliche Voraussetzung um den Gesamtanlagenwirkungsgrad von so genannten «Integrated Gasification Combined Cycle»-Prozessen (IGCC-Prozessen) zur Stromerzeugung weiter steigern zu können, da die Verdichtungsprozesse den höchsten Anteil der in neuen Kraftwerksprozessen zusätzlich aufzuwendenden Energie ausmachen. Zielset-

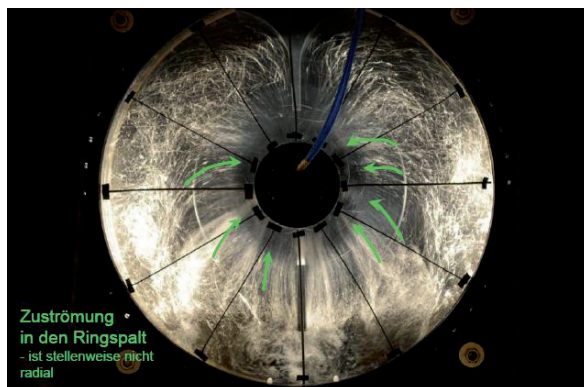


Figur 4: Deckscheibenseitige Leakage-Zuführung (links: ohne Nase; rechts: mit Nase) [4].

zung des Projektes ist es, eine Synthesegas-Verdichterbaureihe zu entwickeln, die das geforderte Druck- und Volumenstromspektrum möglichst effizient abdecken soll. Dazu braucht es speziell für Synthesegase (Gasgemische, die sich hauptsächlich aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) zusammensetzen) ausgelegte Strömungskomponenten und Laufräder, die eine, der Verdichtung niedermolekularer Gase (verursacht durch den hohen Wasserstoffanteil) angepasste Betriebscharakteristik aufweisen.

Für die erste der im Rahmen dieses Projektes auszulegenden Verdichterstufe fand der «Design-Freeze» im Februar 2008 statt. Damit ist die Auslegung in aerodynamischer, mechanischer und fertigungstechnischer Hinsicht abgeschlossen. Das bedeutet, dass eine Stufengeometrie vorliegt, die gemäss Vorhersage mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen (CFD, FEM, CAD und CAM) hinsichtlich Aerodynamik, Festigkeit und Herstellbarkeit das Pflichtenheft erfüllt. Damit wird von dieser Stufe ein Prototyp hergestellt (Versuchsstufe), der in einem der vorhandenen Prüfstände ausgetestet wird. Seit dem «Design-Freeze» laufen die Konstruktionsarbeiten für die Versuchsstufe. Messungen haben Anfang 2009 begonnen.

Im Rahmen der Auslegungen wurden umfangreiche Studien über den Einfluss der Zuführung der deckscheibenseitigen Leakage gemacht. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in der erreichbaren Stabilitätsgrenze je nach Ort und Orientierung der Leckagen-Zuführung. In Figur 4 sind zwei dieser Konfigurationen dargestellt.



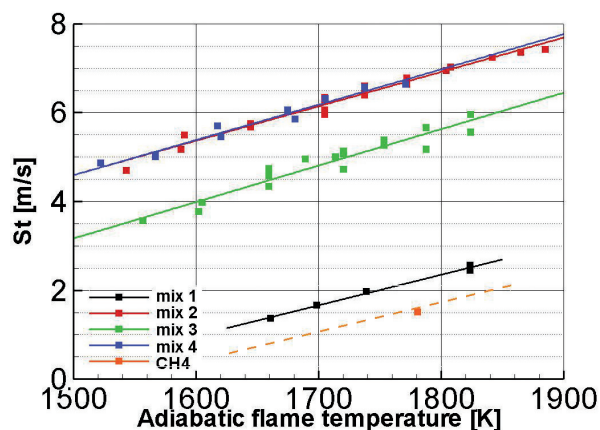
Figur 5: Strömungsvisualisierung mittels Luftblasen [4].

Die Arbeiten zur Optimierung der Einläufe und Austritte (Spiralen) des Verdichters, die an der FHNW (Institut für Thermo- und Fluid-Engineering, ITFE) durchgeführt werden, sind weit fortgeschritten. Für den vorliegenden – aber noch nicht optimierten – Einlauf wurden eine ganze Reihe von CFD-Rechnungen (mit verschiedenen Rechengittern, Turbulenzmodellen und Fluiden) durchgeführt, um eine konvergente und vertrauenswürdige Simulation zu erhalten. Die gewonnenen Ergebnisse wurden mittlerweile auch mit den im Labor durchgeführten Messungen an einem mit Wasser betriebenen Plexiglasmodell verglichen. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, von der existierenden Geometrie ausgehend eine Optimierung durchzuführen.

Die Strömungsvisualisierung mit Luftblasen dient mehr der qualitativen Veranschaulichung. Figur 5 zeigt exemplarisch ein Bild einer Visualisierung mittels Luftblasen. Gewisse Ablösezone und Sekundärströmungen, die auch die CFD-Simulationen ergeben haben, lassen sich hier am oberen und unteren Bildrand erkennen. Insbesondere wurde bei diesen Untersuchungen deutlich, dass die Zufluss zum Laufrad (im Zentrum des Modells) nicht rein radial erfolgt (grüne Pfeile), was unbedingt vermieden werden sollte. Mit dieser Art der Strömungsvisualisierung kann auch der stark instationäre (zeitlich variierende) Charakter der Strömung verdeutlicht werden, welcher ebenfalls Einfluss auf das Betriebsverhalten der Verdichterstufe hat.

Die speziellen verbrennungstechnischen Besonderheiten beim Einsatz von Syngasen in Gasturbinenprozessen stehen im Mittelpunkt des Projektes *Verbrennung von Syngasen* [5]. Durch den hohen Anteil an Wasserstoff (H_2) weisen Syngase ganz spezielle verbrennungstechnische Eigenschaften (Flammgeschwindigkeit, Zündgrenzen, ...) 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. Sollen solche Brenngase auch in Gasturbinen eingesetzt werden, ist insbesondere die Druckabhängigkeit der genannten verbrennungstechnischen Eigenschaften mit in Betracht zu ziehen; diesbezüglich ist die vorhandene, allgemein zugängliche Datenbasis sehr dünn und soll in diesem Projekt durch zielgerichtete Experimente ergänzt werden. Dies gilt auch für Methan/Syngas-Gemische ($CH_4/CO/H_2$), deren besseres Verständnis dann besonders von Interesse ist, wenn (biogene) Syngase in mit Erdgas betriebenen Gasturbinen zugemischt werden sollen. Dieser zusätzliche Aspekt wurde durch eine Projekterweiterung/-ergänzung 2008 in das Projektarbeitsprogramm aufgenommen.

Von besonderem Interesse für die Gasturbinen-Anwendung sind Daten über das Löschverhalten von extrem mager (d.h. mit starkem Luftüberschuss) betriebenen Vormischflammen bei Drücken bis zu 20 bar (für bestimmte Prozesse: 30 bar). Gasturbinen werden im realen Betrieb sehr nahe an dieser mageren Löschgrenze betrieben und die Kenntnis des (gerade noch) zulässigen, maximalen Luftüberschusses für einen stabilen Betrieb der Brennkammer ist ausschlaggebend für das NO_x -Emissionsverhalten der Gasturbine. Ein weiterer wichtiger verbrennungstechnischer Parameter für die Auslegung einer mageren Vormischflamme ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Brennstoffumsetzung – ausgedrückt als (flächen-) spezifischer Umsatz in Form einer so genannten Flammengeschwindigkeit). Durch Einsatz optischer (laserspektroskopischer) Messmethoden können Informationen zur Lage und Form der Flammenfronten gewonnen werden. Die mit laserinduzierter Fluoreszenz (LIF) von Flammenspezies (OH-Radikalen) gewonnenen Daten der Flammenfrontfläche werden auf Basis der im Vorgänger-Projekt *Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruck-Flammen* [6] entwickelten Auswertemethode zur Bestimmung verbrennungstechnischer Eigenschaften (hier: turbulente Flammengeschwindigkeit) herangezogen. Die turbulente Flammengeschwindigkeit ist ein extrem wichtiger Parameter für die Auslegung realer Brennersysteme, da sie die Gesamtumsatzrate an Brennstoff beschreibt und für die Positionierung der Reaktionsfront (Flammenfront) im Zusammenspiel mit dem Strömungsfeld in einer Brenner/Brennkammer-Konfiguration ausschlaggebend ist. Die Herausforderung der sicheren Stabilisierung (hier: Positionierung) einer Vormischflamme beim Einsatz von Synthesegasen (CO/H_2) wird aus den Daten in Figur 6 dadurch deutlich, dass offensichtlich Syn-

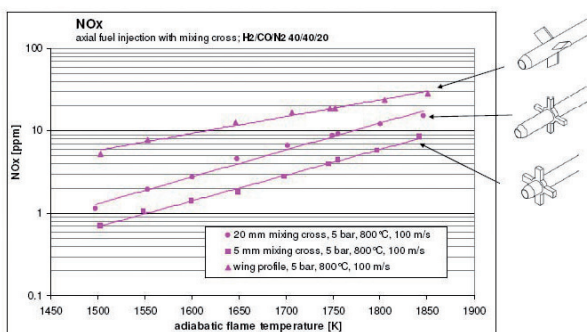


Figur 6: Turbulente Flammengeschwindigkeit in Abhängigkeit der adiabaten Flammentemperatur für verschiedene Brenngasmischungen ($\text{CO}/\text{H}_2/\text{N}_2/\text{CH}_4$). Druck: 5 Bar, Vorheiztemperatur: 673 K [5].

thesegas-Flammen wesentlich reaktionsfreudiger sind als Methan/Erdgas-Flammen (CH_4), die als Referenz mit enthalten sind. Die turbulenten Flammengeschwindigkeiten für Synthesegase sind für die untersuchten Bedingungen grundsätzlich um einen Faktor 3–8 höher und tendieren deshalb viel stärker zu so genannten Flammenrückschlag, d.h. einer Stabilisierung der Flamme nahe am/im Brenner (mit den damit verbundenen Problemen der Überhitzung dieser Komponente).

Auf dem Minihochdruck-Verbrennungsteststand der FHNW wurde darüber hinaus eine grosse Zahl von Verbrennungsversuchen mit der Variation verschiedener Brenngaseigenschaften, insbesondere Brenngaszusammensetzung (H_2 , CO , CH_4 , N_2) und Brenngaseindüsung durchgeführt. Dabei wurden nicht nur die für einfache Gasturbinenprozesse typischen Verbrennungslufttemperaturen (400 °C–550 °C), Verbrennungsdrücke (5–16 bar) und Flammentemperaturen (1500–1850 K) realisiert, sondern auch die speziellen Reaktionsbedingungen (Eintrittstemperaturen bis 1000 °C) für sequentielle Gasturbinen-Brennkammeranordnungen untersucht. Die Messwerte der NO_x -Emissionen (Figur 7) ergaben einen starken Einfluss der Art der Brennstoffeindüsung d.h. Brenngas/Luft-Mischungsqualität: Varianten mit massiver Turbulenzerzeugung zur verbesserten Mischung zeigten besonders niedrige Emissionswerte, aber auch eine wesentlich erhöhte Gefahr für «Flash-back» und damit für eine Überhitzung der Brennstoffdüse mit Brennnrohr.

Die 2007 in Auftrag gegebene Studie *Verfügbarkeit von grasartiger Biomasse für Kombikraftwerke in der Schweiz* [12] ist eine Erweiterung des durch den Axpo-Naturstromfond geförderten Projektes «Graskraftwerk», welches die technischen und wirtschaftlichen Entscheidungsgrundlagen vorlegen soll für die Umsetzung eines mit Gras betriebenen Kombikraftwerkes. Mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS) wurde abgeklärt, ob der benötigte Brennstoff für ein (Gras-)Kraftwerk in der Leistungsklasse 20 bis



Figur 7: Einfluss der Brennstoffdüsengeometrie (mit Turbulenzerzeugern) auf die NO_x -Emissionen [5].

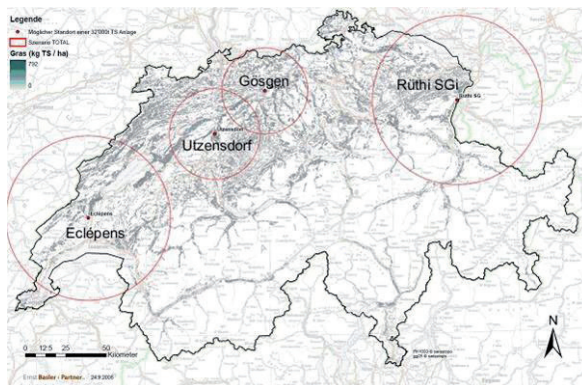
100 MW_{th} (auf Basis grasartiger Biomasse) in einem sinnvollen Umkreis in der Schweiz vorhanden ist. Darüber hinaus wurden technisch favorisierte Standorte (bereits bestehende Standorte mit entsprechender Kraftwerksinfrastruktur) bezüglich ihres umliegenden Biomasseaufkommens geprüft. Für ein wirtschaftlich zu betreibendes Graskraftwerk wurde für die Auswertung der GIS-Daten ein jährlicher Brennstoffbedarf von 32 000 t Trockensubstanzgehalt (20 MW_{th}, 7000 h/a) angesetzt. Dieses Material muss «just-in-time» zur Verfügung stehen, da grosse Brennstofflager beim Kraftwerk nicht praktikabel sind. Deshalb wurden auch die Logistik/Transport-Infrastruktur und die lokale Akzeptanz auf Seiten der Biomasseproduzenten in die Beurteilung miteinbezogen. Da nur ein Teil des Grünlandes für eine energetische Nutzung in Frage kommen kann, wurden entsprechende Restriktionen für die Berechnungen angenommen. Folgende Hauptkriterien wurden als Filter eingesetzt: Maximal ein Drittel der Fläche darf für die energetische Nutzung in Frage kommen, da der Rest für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion reserviert bleiben soll. Aus Akzeptanzgründen werden sich maximal ein Fünftel der Landwirtschaftsbetriebe beteiligen. Gute Ackerstandorte bleiben der Nahrungs- und Futtermittelproduktion vorbehalten. Flächen mit grosser Hangneigung (> 20 °) sowie Berggebiete über 1200 m.ü.M. fallen aus Bewirtschaftungsgründen ebenfalls weg. Die angenommenen Biomasserträge wurden je nach Exposition und Niederschlagsmenge gewichtet.

Unter den getroffenen Annahmen fällt die in Frage kommende Biomasse vor allem im westlichen Mittelland und in den tiefer gelegenen Futterbauregionen der Ost- und Zentralschweiz an. Innerhalb der ausgewiesenen Gebiete, die über ein ausreichendes Potenzial an Gras verfügen, sind entweder mehrere Standorte im Mittelland sowie je ein Standort in der Ostschweiz realisierbar oder insgesamt nur ein Standort für ein grosses Kraft-

werk mit einem Jahresverbrauch von 100 kt. Konzentriert man sich auf die Standorte mit den kleinsten Radien und damit mit den kürzesten Transportwegen, so kommen zwei Standorte zwischen Bern und Aarau in Frage. Beide Standorte mit den Zentren Utzensdorf oder Gösgen sind vom Einzugsgebiet ähnlich zu beurteilen: in einem Umkreis von knapp 30 km fällt die entsprechende Menge von 32 000 t TS an grasartiger Biomasse jährlich an. Da Gösgen bereits über ein Kraftwerk (AKW) verfügt, wurde dieser Standort bezüglich Logistik, Akzeptanz und Brennstoffkosten näher betrachtet. Die Auswertungen ergaben, dass eine kurzfristige Umsetzung eines (teilweise) grasbefeuerten Kombikraftwerks unter den aktuellen landwirtschaftlichen Bedingungen aufgrund der hohen Brennstoffkosten (Heupreis) kaum wahrscheinlich ist. Kurz- bzw. mittelfristig sind jedoch Szenarien (Anstieg der Nebenerwerbsbetriebe, Abbau des Grenzschutzes, Wegfall der Milchkontingentierung) denkbar. Bei den angenommenen Szenarien ist die Brennstoffproduktion, sowohl für die Landwirtschaft als auch für den Kraftwerksbetreiber möglich.

Grundlagenprojekte

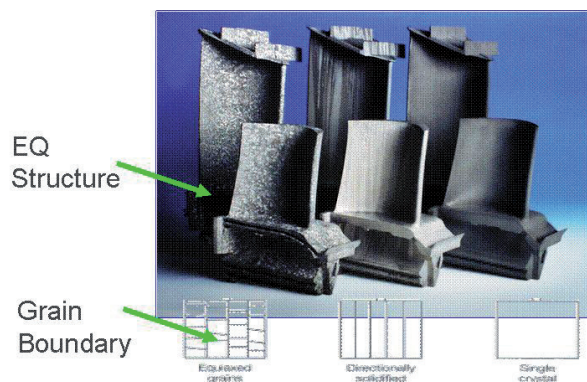
Im Projekt *Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen* [8] wurden die laserspektroskopischen Messmethoden (weiter) entwickelt, die notwendig sind, um Lage und Stabilität von Vormischflammen unter gasturbinentypischen Bedingungen bestimmen zu können. Beim Einsatz von laseroptischen Messtechniken in sehr mageren Flammen ($\Phi < 0,5$ bzw. $\lambda > 2,0$) hat sich gezeigt, dass die direkte Übertragung der Methoden, die aus der Anwendung in Flammen im Bereich der stöchiometrischen Zusammensetzung bekannt sind, zu Schwierigkeiten führt. Einerseits sind die erzielten Signalintensitäten oft sehr gering, andererseits ergeben sich Probleme bezüglich der Interpretation der Messergebnisse, wie z.B. Form und Ausdehnung der Flammenzone basierend auf Fluoreszenzmessungen von Hydroxyl-Radikalen (OH) oder Formaldehyd (CH₂O). Auf Basis chemisch-kinetischer Modellrechnungen stellt sich das direkte Abbauprodukt von Formaldehyd (CH₂O), das Formyl-Radikal HCO, als bestgeeigneter Kandidat für die Detektion des Ortes maximaler Wärmeabfuhr in der Flammenfront einer mageren Vormischflamme dar. Über dieses (instabile) Reaktionszwischenprodukt fließen über 80 % des Kohlenstoffumsatzes und es steht in der Mitte einer Elementarreaktionskette, die mit der höchsten Wärmeabfuhrungsrate sehr gut korreliert. Der experimentelle Nachweis (mittels laserinduzierter Fluoreszenz, LIF) dieser Radikal-Spezies ist unter den gegebenen turbulenten Flammenbedingungen mit den zur Verfügung stehenden Laserquellen jedoch nicht gelungen.



Figur 8: Einzugsgebiete für einen Jahresertrag von 32 000 t/TS grasartiger Biomasse an 4 möglichen Kraftwerksstandorten [12].

Die schnelle Herstellung massgenauer Einzelteile ist nicht nur für die kommerzielle Gasturbinen-Produktion sondern auch für begleitende Entwicklungs- und Forschungsprojekte von Bedeutung. Im Projekt *Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten* [9] wird ein Simulationssystem für Feingiessprozesse entwickelt, mit dem der Datenfluss im Entwicklungsprozess automatisiert und komplexe Simulationsmethoden in den Prozess integriert werden können. Das Simulationssystem wird auf die Herstellung eines Brennerbauteils und einer Turbinenschaufel angewandt (mit speziellem Schwerpunkt auf amorpher Kristallisation «equiaxed solidification») (Figur 9).

Da sich die Fertigungsqualität derartiger komplexer Gussteile wie Gasturbinenschaufeln und -brenner ohne Simulation nicht mit ausreichender Genauigkeit voraussagen lässt, sollte der Giessprozess vollständig simuliert werden, um die teure und zeitaufwendige Entwicklung von Giessprototypen allein auf Validierungsabgüsse zu reduzieren. Der Erfolg des Systems sollte sich an verbesserten Qualitäten der Gussteile bei gleichzeitig verkürzter Entwicklungszeit zeigen, was zu einer entsprechenden Kostensenkung führen würde. Das bisher entwickelte Simulationswerkzeug ist bereits in der Lage, die hauptsächlichen Qualitätsmerkmale (Porosität, Korn-Mikrostruktur und



Figur 9: Gasturbinenschaufeln mit unterschiedlicher Kornstruktur (links: amorph, «equiaxed» EQ; Mitte: gerichtet erstarrt; rechts: Einkristall) [9].

Materialspannungen) mit ausreichender Genauigkeit vorherzusagen. Eine quantitative Validierung mit gemessenen Temperaturverläufen ist erfolgt. Damit kann die Giessprozesssimulation nun mit einem Auslegungs- und Optimierungsalgorithmus für die wichtigsten Giessparameter (Vorheiztemperatur der Gussform, Giestemperatur, Kühlraten, Wärmeverluste) verknüpft werden, und damit zukünftig zur automatisierten Bestimmung der besten Giessbedingungen herangezogen werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet, weswegen eine starke Integration und Beteiligung der im angesprochenen Kraftwerksbereich tätigen Herstellerfirmen und Zulieferbetriebe 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 Produktions-Zentren den Garant für die Umsetzung der Programmergebnisse bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zulieferfirmen (u.a. *Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll* usw.) sicherstellen, dass die Programmaufwendungen vorwiegend in der Schweiz wirksam werden. Daneben wird auch eine aktive Beteiligung der Strom- und der Gaswirtschaft in der Schweiz (*Swisslectric, 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 akademi-

schen 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 Forschungs-Institute, 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 2008: nahezu 6 Mio. CHF). Diese Kosten werden anteilmässig von der Privatwirtschaft (Firmen und Interessenverbände finanzieren knapp 2/3 der Gesamtkosten) und der öffentlichen Hand (*BFE, kantonale Wirtschaftsförderungsstellen, KTI, EU*) getragen.

Während der Programmjahrestagung am 26. Juni 2008 in Bern wurden die Kontakte zwischen den verschiedenen Programmteilnehmern wieder

aufgefrischt bzw. neue Verbindungen geknüpft. Die Jahrestagungen geben jeweils allen Interessierten 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 letzten Jahrestagung waren die Forschungsprojekte, die mit der Entwicklung neuer Materialien für Schlüsselkomponenten im Kraftwerksbereich befasst sind, und die Aktivitäten auf europäischer Ebene, die mit der Einführung von Technologien der Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO₂) verbunden sind (EU Technology Platform Zero Emission Power Plants, ETP ZEP [19]).

Enge Verbindungen werden zum **Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)** [16] des ETH-Bereichs unterhalten. Im Themenbereich «Elektrizität» im CCEM-CH besteht eine weit gehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit

der Ausrichtung des Programms Kraftwerk 2020. Zwei der Projekte im Programm Kraftwerk 2020 («Gasturbinenprozess optimiert für CO₂-Minde-rung» und «Verbrennung von Syngasen») sind direkt mit Projekten im CCEM-CH verbunden. Es ist gewünscht und beabsichtigt diese Verknüpfungen noch weiter auszubauen. Ein weiteres Projekt wurde 2008 begutachtet und positiv bewertet. Das Projekt «Carbon dioxide management in Swiss power generation (CARMA)» [13], welches sich zum Ziel gesetzt hat, einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO₂-Problematik zu bearbeiten (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO₂-Abscheidungstechniken, CO₂-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz, aber auch von internationaler Bedeutung bereitzustellen, ist Anfang 2009 offiziell gestartet worden.

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 gasbefeue-erten 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 stattfindenden 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 angestrebte Einbettung von Projekten des Programms Kraftwerk 2020 im derzeit anlaufenden 7. Rahmenprogramm der EU verfolgt (FP7). Da die bisherige Erfahrung mit bereits erfolgten

FP7-Projektausschreibungen zeigt, dass i.d.R. nur grosse Projektkonsortien (10–20 Partner) mit Projektanträgen erfolgreich sind, ist es für Schweizer Partner essentiell, sich 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] im Jahr 2008 durch aktive Beteiligung an einem erfolgreichen Projektantrag («H2-IGCC») gelungen.

Durch die Teilnahme am Gestaltungsprozess 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 Einsitz in der begleitenden Länderarbeitsgruppe «Government Group» genommen), als auch die Mitgestaltung von gemeinsamen Entwicklungszielen und EU-Arbeitsprogrammen (der Programmleiter ist Mitglied in 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 Demonstrationsmassstab erheblicher Finanzierungssummen bedarf, sind solche Entwicklungsschritte nur auf internationaler/europäischer Ebene denkbar (dies kann auch im Rahmen bi-/multilateraler 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 Agreements for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion*, des *Greenhouse Gas R&D Programme* sowie des *Carbon Sequestration Leadership Forums (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 ansonsten grundsätzlich gar nicht zu realisieren wären.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Da die Programmziele anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet sind, ist bei einigen Projekten des Programms Kraftwerk 2020 bereits ein teilweiser Pilot- und Demonstrationscharakter 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 so genannten **Flagship Program** der **EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»** [19] gegeben. Um hier im europäischen Umfeld erfolgreich zu sein, ist aber eine aktive Haltung der Schweizer Industrie und der politischen Institutionen notwendig, da die Auswahl für einige wenige (ca. 6 Einheiten) Pilot- und Demonstrationsanlagen von Null-Emissions-Kraftwerkskonzepten in Europa schon weit fortgeschritten ist und demnächst entschieden wird. Diese Anlagen sollen als Vorreiter-Projekte bis zum Zeitraum 2015–2020 realisiert werden und können mit einer finanziellen Unterstützung aus dem europäischen Handelssystem für CO₂-Emissionsrechte rechnen.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Aufgrund der mittlerweile 3-jährigen Programmlaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) sind im Jahr 2008 einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen worden, und das Programm tritt nun in eine Periode der kontinuierlichen Erneuerung des Projekt-Portfolios ein. 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, welches auch ein Verdienst der projektleitenden Partner ist, die ebenfalls sehr kompetent, professionell und umsichtig das Projektmanagement betreiben.

Die Zusammenarbeit/Koordination mit anderen öffentlichen Förderinstitutionen – vornehmlich der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) – konnte zwar auf Basis bereits laufender Projekte weitergeführt werden, allerdings ist der Informationsaustausch durch das Ausscheiden wichtiger Verbindungspersonen stark zurückgegangen und erschwert worden. Um einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten mit Bezug zum Themenbereich des Programms

«Kraftwerk 2020» aufrecht zu erhalten, wird es eine wichtige Aufgabe sein, diese Kommunikationskanäle wieder herzustellen. Das derzeitige Projekt-Portfolio 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 ist und – trotz einer erfreulichen Budgeterweiterung 2008 – auch zukünftig höchstens mässig weiter wachsen wird, wird weiter versucht werden müssen, dies durch eine stärkere Einbindung anderer Förderinstitutionen auszugleichen. Vorrangige Zielsetzung ist es, zusätzliche Projekte auf nationaler Ebene über die Forschungsfonds der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (SwissElectric Research) und der Gas- und Ölwirtschaft zu lancieren. Auf internationaler Ebene werden die Projektbeteiligungen im 7. Rahmenprogramm der EU weiter sehr intensiv vorangetrieben werden müssen, um absehbar das Programmvolumen annähernd verdoppeln (auf ca. 10 Mio. CHF) zu können.

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 (CO₂)» (Carbon Capture and Storage, CCS) ergeben sich zusätzliche Chancen, das Programm noch bedeutsamer für die Entwicklung klimarelevanter Techniken zu gestalten. Dieser Programmentwicklung wird durch eine veränderte Gewichtung der zukünftig einzusetzenden Programmmittel Rechnung getragen.

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 Gasen wie CO₂ in der Öffentlichkeit diskutiert werden.

Selbst beim Ausbau der Projektaktivitäten auf das geplante Gesamtvolumen von 15 Mio. CHF pro Jahr ist nicht davon auszugehen, dass 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 und 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 wichtiger Schwerpunkt der Bemühungen zum weiteren Ausbau des Programms darstellen. In diesem Kontext kann u.a. weiter versucht werden, eines der derzeit in der Planungsphase befindlichen Gas- und Dampfkraftwerke in der Schweiz (z.B. am Standort Chavalon oder in Cornaux) als Pilot- und Demonstrationsanlage für eines der ersten «Null-Emissions»-Kraftwerke auf Erdgasbasis in Europa zu etablieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2008 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

(siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte 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 (mrj@zhwin.ch), Züricher Hochschule, Winterthur: Hoch-effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»).
- [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), Züricher Hochschule, Winterthur: Entwicklung von verschleissbeständigen Werkstoffsystemen für Bypassventile in Dampfturbinen bis 650 °C (KTI-Projektantrag).
- [11] Anja Skrivervik (anja.skrivervik@epfl.ch), Ecole Polytechnique Fédérale 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).

Referenzen

- [14] Konzept für das Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020», BFE, Bundesamt für Energie BFE – Forschungsprogramm Kraftwerk 2020.
- [15] Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»: Ergänzung und Aktualisierung des Programm-Konzepts für den Zeitraum 2008–2011, Bundesamt für Energie BFE – Forschungsprogramm Kraftwerk 2020.
- [16] Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH), CCEM-CH.
- [17] Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts», KW21.
- [18] European Turbine Network (ETN), www.eu-gasturbine.org.
- [19] Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants», [www.zero-emissionplatform.eu/website/Internationalen_Energie_Agentur_\(IEA\)_www.iea.org](http://www.zero-emissionplatform.eu/website/Internationalen_Energie_Agentur_(IEA)_www.iea.org).

Impressum

Juni 2009
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
Druck: Ackermann Druck AG, Bern-Liebefeld
Bezug der Publikation: www.energieforschung.ch

Programmleiter

Dr. Peter Jansohn
Paul Scherrer Institut (PSI)
CH-5232 Villigen-PSI
peter.jansohn@psi.ch

Bereichsleiter

Dr. Gunter Siddiqi
Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
gunter.siddiqi@bfe.admin.ch