

Die Forschungsinitiative

# KW 21 Kraftwerke des 21. Jahrhunderts

2004 bis 2008



Spitzenforschung aus Baden-Württemberg und Bayern

## Vorwort

Um neue Kraftwerkstechnologien zu entwickeln, bekannte zu verbessern, das Wissen zu vertiefen und Entwicklungswerkzeuge zu schaffen, wurde die Forschungsinitiative

### **„Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“**

als langfristig angelegtes Programm ins Leben gerufen. In der ersten Phase des Programms haben zahlreiche Wissenschaftler aus Forschungseinrichtungen in Bayern und Baden-Württemberg seit 2004 vier Jahre intensiv zusammengearbeitet. Dies geschah im Rahmen von fünf Arbeitskreisen. Die Arbeiten haben dazu geführt, dass sich der Begriff KW21 während der ersten Phase in der deutschen Energietechnik etablieren konnte und dass KW21 auch über Deutschland hinaus bekannt geworden ist.

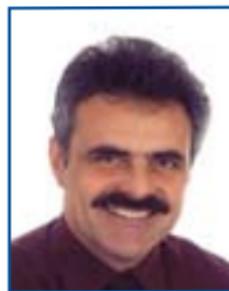
Diese Broschüre gibt dem Leser die Möglichkeit, schnell zu einem Urteil über das komplette Programm der ersten Phase zu kommen. Nach einer kurzen Übersicht über den jeweiligen Arbeitskreis, folgen Kurzzusammenfassungen aller Projekte, die sich auf das Erreichte konzentrieren. Zu jedem Projekt sind die Kontaktdaten der verantwortlichen Institution angeführt.

Dass dieses groß angelegte Forschungsvorhaben realisiert werden konnte, ist sowohl den öffentlichen Fördermittelgebern in Bayern und Baden-Württemberg als auch den beteiligten Industriepartnern zu verdanken, die sich zu einer länderübergreifenden Public Private Partnership zusammengeschlossen haben. Auf der letzten Seite dieser Broschüre sind Förderer, Industriebeteiligte und die wissenschaftlichen Institutionen im Einzelnen gelistet.



*Sattelmayer*

Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer,  
bayerischer Sprecher KW21  
TU München, Lehrstuhl für Thermodynamik



*Aigner*

Prof. Dr.-Ing. Manfred Aigner,  
baden-württembergischer Sprecher KW21  
DLR Stuttgart, Institut für Verbrennungstechnik

# Inhaltsverzeichnis

<b>Arbeitskreis Energiewirtschaft (E)</b>	<b>4</b>
Technik- und Kostenmodellierung (E1)	5
KWK-Verbund (E2)	6
KWK-Technik und regenerative Energien (E3)	7
Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue Kraftwerke (E4a)	8
Kriterien für Kraftwerksentscheidungen (E4b)	9
<b>Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger (DE)</b>	<b>10</b>
Prozessmonitoring (DE1)	11
Lebensdauer von Kesselbauteilen (DE2)	12
Porenbrenner (DE3)	13
GuD-Lastwechseldynamik (DE4)	14
Kondensation von Wasserdampf aus dem Abgas (DE5)	15
Großkraftwerk-Lastwechseldynamik (DE6)	16
<b>Arbeitskreis Fluidodynamik und Dampfturbine (DT)</b>	<b>17</b>
Aerodynamische Auslegung von Niederdruck-Teilturbinen (DT1)	18
Kaltes Ende Dampfturbine (DT2)	19
Schaufelerosion in Niederdruck-Dampfturbinen (DT3)	20
Endstufe und Diffusor (DT4)	21
Schweißverbindungen (DT6)	22
Adaptive Dichtung (DT7)	23
Aktive Strömungsbeeinflussung (DT8)	24
<b>Arbeitskreis Hochtemperaturkomponenten in Turbomaschinen (GT) 25</b>	
Wärmeübergangsmessungen von Kühlsystemen für Gasturbinenschaufeln (GT1)	26
Optimierung von 180°-Krümmergeometrien (GT2)	27
Konvektiver Wärmeübergang in gegossenen Gasturbinenschaufeln (GT3)	28
Toleranzkettenanalyse (GT4)	29
Fortschrittliches Monitoringsystem für Gasturbinen (GT5)	30
Diffusionslötten einkristalliner Turbinenschaufeln (GT6)	31
Widerstands- und Wärmeübergangsverhalten von Turbinenschaufeln mit rauer Oberfläche (GT7)	32
<b>Arbeitskreis Brennkammern für Gasturbinen (GV)</b>	<b>33</b>
Thermoakustische Eigenschaften von LP- und LPP-Flammen (GV1)	34
Zünd- und Löschverhalten (GV2)	35
Effiziente konvektive Kühlkonzepte für Gasturbinenbrennkammern (GV3)	36
Ringbrennkammerschwingung (GV4)	37
Designsystem (GV5)	38
Dynamik von Vormischflammen (GV6)	39
Turbulente Mischung (GV7)	40
Turbulenz-Chemie-Wechselwirkung (GV8)	41
Pilotierte Vormischflamme (GV9)	42
NOx-Reduktion (GV10)	43
Online Messsystem (GV11)	44
Elektrische Felder (GV12)	45
<b>Die Forschungsinitiative</b>	<b>46</b>



## Arbeitskreis Energiewirtschaft (E)

Die energiewirtschaftlichen Analysen zielten darauf ab, den Energieversorgern und der energietechnischen Industrie Hinweise darauf zu geben, welche Herausforderungen auf den Kraftwerkspark der Zukunft zukommen werden. Folgende Einflussfaktoren und Randbedingungen galt es dabei zu beachten:

- Grenzen der Regelfähigkeit von Kohlekraftwerken
- Einfluss eines zunehmenden Anteils an stochastischer Windeinspeisung und eines ergänzenden Anteils an dezentraler Energieerzeugung
- Erhaltung von Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit
- Liberalisierung der Energieversorgung und
- Erfüllung der Klimaschutzziele

Mit ganzheitlichen Modellen erfolgte eine umfassende Bewertung der Strombereitstellung in Deutschland. Hierbei standen der Primärenergieeinsatz, die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Stromgestehungskosten und der Stromaustausch in einem europäischen Energiemarkt im Mittelpunkt der Studien.



### **Arbeitskreissprecher:**

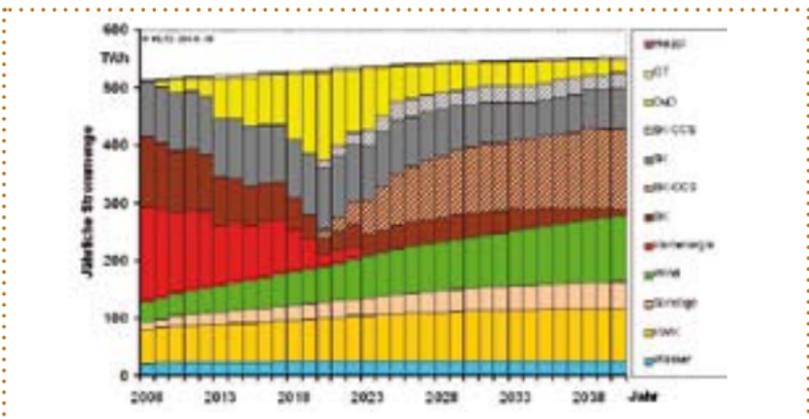
Dr. Wolfgang Woyke,  
E.ON Energie AG, München



## Technik- und Kostenmodellierung (E1)

Ziel des Projektes war die Modellierung zukünftiger Strukturen der Stromerzeugung in Deutschland in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen, um Aussagen über Emissionen, Kosten und Brennstoffzusammensetzung treffen zu können. Dabei wurden sowohl die Auswirkungen einer verstärkten Nutzung Erneuerbarer Energien als auch die Rolle thermischer Kraftwerke beleuchtet. Im Rahmen des Projekts entstanden Modelle und Methoden, die es ermöglichen, eine optimierte Kraftwerksparkentwicklung in den nächsten Jahrzehnten zu simulieren, welche dem heutigen hohen Niveau der Versorgungszuverlässigkeit gerecht wird. Darüber hinaus erfolgte eine umfangreiche Erhebung von Daten zu technischen Entwicklungen in der Kraftwerkstechnik.

Die Ergebnisse zeigten, dass die installierte Leistung thermischer Kraftwerke trotz der Zunahme Erneuerbarer Energien und KWK in der Stromerzeugung gegenüber heute nahezu unverändert bleiben muss. Um den Kernenergieausstieg zu kompensieren und gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken, ist zunächst eine deutliche Ausweitung der Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken notwendig. Sobald Kohlekraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung (CCS) zur Verfügung stehen, können diese in der Grundlast eingesetzt werden. Aufgrund unterschiedlicher Ursachen steigen die Kosten der Stromerzeugung in allen untersuchten Szenarien an. Eine Verlängerung der Kernenergie-Laufzeiten eröffnet einen weiteren Spielraum zur CO<sub>2</sub>-Einsparung.



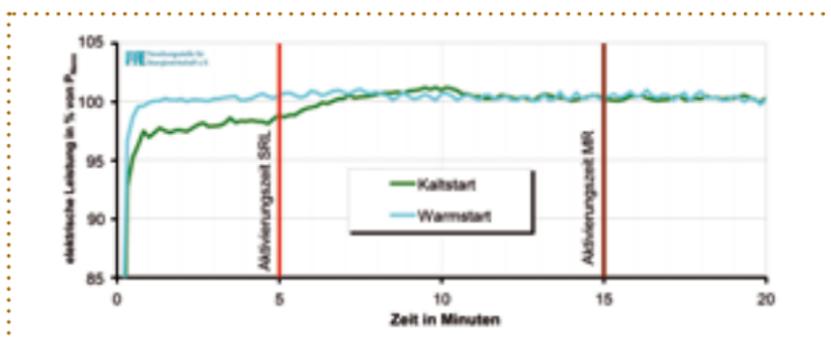
Modell der Entwicklung der Stromerzeugung



## KWK-Verbund (E2)

Aufgrund der hohen Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird politisch ein größerer Anteil der KWK an der zukünftigen Stromversorgung gefordert. Die hieraus resultierenden gesetzlichen Förderinstrumente und die technologischen Entwicklungen im Bereich der innovativen KWK haben die Marktchancen für KWK-Anlagen zur Gebäudeenergieversorgung deutlich erhöht. Eine über die verbrauchsnahe Erzeugung von Strom und Wärme hinausgehende Aufgabe von dezentralen KWK-Anlagen könnte die Bereitstellung von Regelleistung sein. Im Rahmen dieses Teilprojektes wurde daher die Eignung von kleinen KWK-Anlagen als virtuelles Regelleistungskraftwerk untersucht.

Mit einer auf Basis von Prüfstandsuntersuchungen validierten Simulation konnte gezeigt werden, dass die heute verfügbaren KWK-Anlagen zur Gebäudeenergieversorgung im Verbund die von den Regelzonenverantwortlichen gestellten technischen Anforderungen für die Regelleistungsbereitstellung erfüllen. Das technische Potenzial zur Regelleistungsbereitstellung kann durch eine geringere Auslegungsleistung oder einem größerem Wärmespeicher leicht erhöht werden. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigte allerdings, dass die im Untersuchungszeitraum beobachteten Marktpreise keinen nennenswerten Beitrag aus kleinen KWK-Anlagen zur Regelleistungsbereitstellung erwarten lassen. Zudem sind die energiewirtschaftlichen Auswirkungen einer Vernetzung zu einem virtuellen Regelleistungskraftwerks hinsichtlich CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung sowie der Substitution konventioneller Kraftwerke gering.



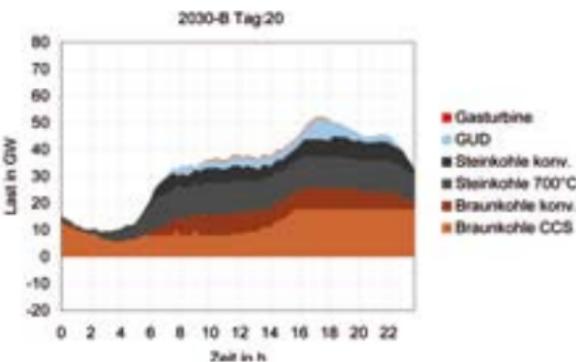
Kalt- und Warmstart eines motorischen KWK-Systems



## KWK-Technik und regenerative Energien (E3)

Die vermehrte Netzeinspeisung aus verteilten, regenerativen Quellen, wie der Windenergie, führt in Zukunft dazu, dass der vom konventionellen Kraftwerkspark zu deckende Lastgang nicht mehr allein durch die Verbraucherlast, sondern wesentlich vom Windangebot bestimmt wird.

Der zusätzliche Reserveleistungsbedarf infolge der steigenden Windenergieeinspeisung erfordert es, die dynamischen Anforderungen an konventionelle thermische Kraftwerke zu erhöhen, um die Sicherheit der allgemeinen Stromversorgung beizubehalten. Regelfähigkeit, Laständerungsgeschwindigkeiten und Anfahrverhalten eines Kraftwerkes stehen bei der Planung anderen Größen, wie Wirkungsgrad und Kosten, gegenüber. Um diese Punkte zu beurteilen, wurden im Rahmen dieses Teilprojekts Modelle entworfen, welche die zukünftigen Lastgänge der regenerativen Energiequellen sowie der Stromnachfrage abbilden. Weiterhin kam es zur Entwicklung eines Instrumentes zur Kraftwerkeinsatzplanung, mit dessen Hilfe die zukünftigen Betriebsbedingungen des Kraftwerksparks bestimmt werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anforderungen bezüglich Laständerungsgradienten, Reservevorhaltung und negativem Lastausgleich durchwegs beherrschbar sind. Um für die neuen Herausforderungen in wirtschaftlicher Sicht gerüstet zu sein, sind Kraftwerke mit hohen Teillastwirkungsgraden und der Möglichkeit zu häufigen An- und Abfahrvorgängen gefordert.



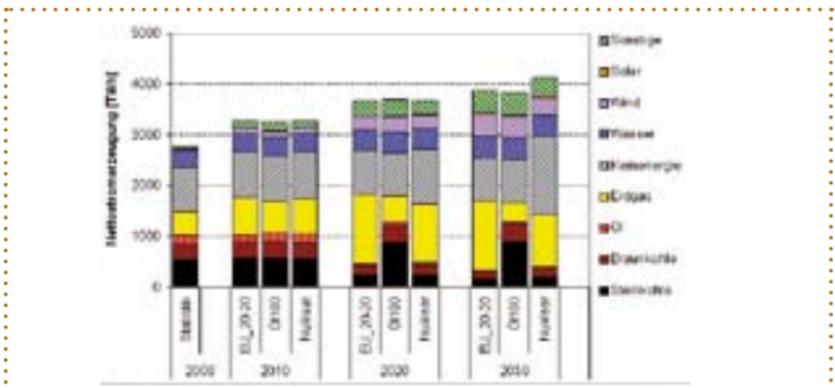
Kraftwerkseinsatz an dem Tag mit steilsten Gradienten in 2030: Selbst extreme Lastgradienten können weiterhin vom Kraftwerkspark bewältigt werden



## Energiewirtschaftliche Anforderungen an neue Kraftwerke (E4a)

Im europäischen Strommarkt ist in den kommenden zwei Dekaden eine Zubauleistung in Höhe 200 bis 400 GW notwendig. Dabei unterscheiden sich die politischen Rahmenbedingungen für den Zubau neuer Kraftwerke zwischen den einzelnen europäischen Staaten teilweise erheblich. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach den zukünftigen Strukturen der Strombereitstellung in Deutschland und Europa sowie den aus energiewirtschaftlicher Perspektive ableitbaren Anforderungen an neue fossile Kraftwerke.

Unter Verwendung des Energiesystemmodells TIMES PanEU wurden durch Szenarienanalysen die Auswirkungen unterschiedlicher energiepolitischer Rahmenbedingungen auf die europäische Erzeugungsstruktur analysiert und darauf aufbauend mittels Parametrischer Programmierung die technisch-ökonomischen Anforderungen zukünftiger Kraftwerkstechnologien in Deutschland untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen (wie z. B. Energieträgerpreise oder die Rolle der Kernenergie) direkt Investitionsentscheidungen beeinflussen und somit einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftigen Erzeugungsstrukturen ausüben. Welche Anforderungen dabei an Investitionskosten und Wirkungsgrad gestellt werden, wurde für die entsprechenden Technologien herausgearbeitet. Unter Klimaschutzgesichtspunkten ist ab 2030 die Kohleverstromung nur in Kraftwerken mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und nach folgender Speicherung zielführend.

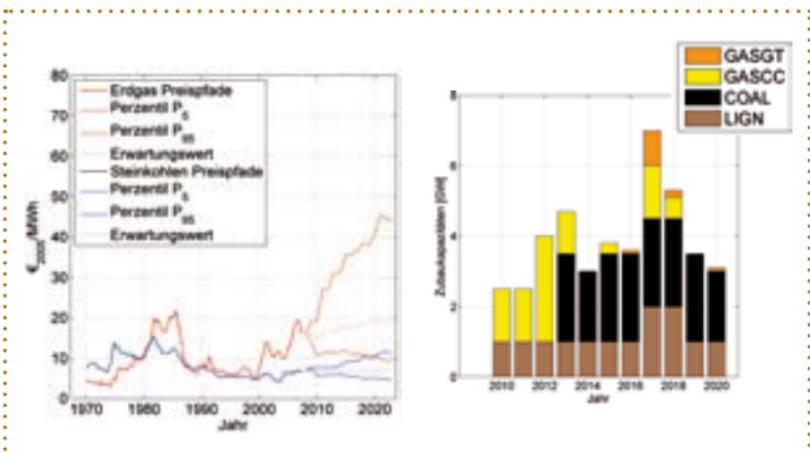


Nettostromerzeugung in der EU-27 im Szenarienvergleich 2000 - 2030



## Kriterien für Kraftwerksentscheidungen (E4b)

Im deutschen Elektrizitätsmarkt existiert ein erheblicher Investitionsbedarf an neuen Wärmekraftwerken, der auch noch im Jahr 2020 durch bisher bekannte Investitionsprojekte nicht vollständig gedeckt sein wird. Vor dem Hintergrund eines liberalisierten Marktumfeldes, müssen Investitionsentscheidungen in neue Kraftwerke getroffen werden, die relevante Risiken und Ungewissheiten explizit berücksichtigen. Hierzu sind jeweils aus der Sicht eines einzelnen Investors sowie des gesamten Elektrizitätsmarktes zwei Modelle entwickelt worden, die Kraftwerksinvestitionen unter unsicheren Marktumgebungen besser fundieren. Beide Modelle sind exemplarisch auf den deutschen Elektrizitätsmarkt angewendet worden. Anhand eines erweiterten Ansatzes aus der Realoptionstheorie, wird der Wert der zeitlichen Handlungsflexibilität eines einzelnen Investors im einzelwirtschaftlichen Modell unter Berücksichtigung stochastischer Brennstoffpreise erfasst. Es lässt sich feststellen, dass höhere Rentabilitätsanforderungen und (teilweise) kostenlos zugewiesene CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate, Steinkohlekraftwerken bei den Investitionsentscheidungen den Vorzug gegenüber Erdgaskraftwerken geben. Das fundamentalbasierte Elektrizitätsmarktmodell bildet die Windenergieeinspeisung als eine stochastische Größe ab und zieht die Schlussfolgerung, dass die zunehmenden Windanlagenkapazitäten eine höhere Betriebsflexibilität im Versorgungssystem erfordern und somit ein größerer Bedarf an gasbefeuerten Kraftwerken zu erwarten ist.



Modell Preisentwicklung Erdgas und Zubaukapazitäten



## Arbeitskreis Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger (DE)

Für bestehende und neue Kraftwerksprozesse wurden Einzelvorgänge der Verbrennung und der Dampferzeugung untersucht und verbessert. Hierbei kamen experimentelle Untersuchungen und simulationsgestützte Optimierungsmethoden zum Einsatz. Bei der Weiterentwicklung der Optimierungstools galt es die experimentellen Ergebnisse aus Versuchs- und Großanlagen zu berücksichtigen. Neben den klassischen Voll- und Teillastuntersuchungen stand der dynamische Vorgang der Laständerung im Fokus. Das Ziel sind Kraftwerke, die schnellen Lastwechsel Stand halten und trotzdem materialschonend und zuverlässig funktionieren. Einen Schwerpunkt des Arbeitskreises bildeten neue Methoden und Techniken zur Optimierung der Kraftwerksprozesse. Forschungsziel war ein möglichst kostengünstiger Betrieb mit hohem Wirkungsgrad, geringer Schadstoffemission und gleichzeitig hoher Brennstoffflexibilität.



### **Arbeitskreissprecher:**

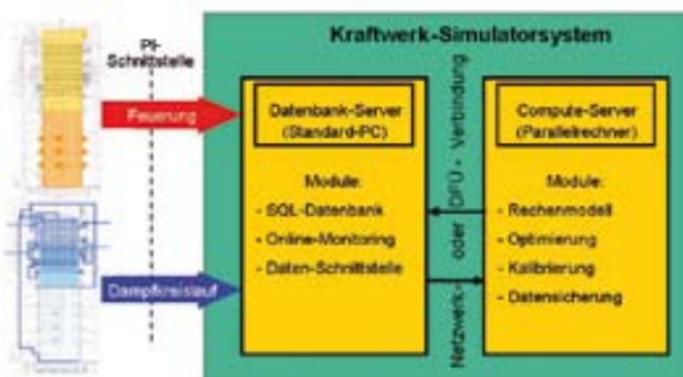
Dr. Martin Käb,  
EnBW Kraftwerke AG, Stuttgart



## Prozessmonitoring (DE1)

Dieses Teilprojekt beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Simulatorsystems für Kohlekraftwerke, welches automatisiert die Analyse und die Optimierung von Betriebszuständen mit sich zum Teil gegenläufig verhaltenden Zielgrößen ermöglicht.

Um dies leisten zu können, sammelt das System kontinuierlich Prozessgrößen des Feuerungs- und Dampferzeugerprozesses und erstellt daraus die wärme- und stofftechnischen Bilanzen. Aus diesen Bilanzen kann der aktuell in der Feuerung gefahrene Brennstoffmix ermittelt werden. Dies ermöglicht eine wesentlich exaktere Anpassung der Luftfahrweise in Hinblick auf eine optimale Feuerungseinstellung unter den Aspekten Schadstoffminimierung, Flugaschequalität (Ausbrand) und Schutz der Feuerraumwände vor korrosionsgefährdender Atmosphäre. Das Simulatorsystem kann, auf Basis von 3D-Feuerraumsimulationen, selbstständig Optimierungen der Ausbrandluft-Fahrweise vorschlagen. Das System wurde im Projektkraftwerk installiert und über das Ende des Projektes hinaus erprobt. Das System ist modular aufgebaut, was eine Weiterentwicklung und Wartung des Systems vereinfacht sowie eine Anpassung und Verwendung in anderen Kohlekraftwerken ermöglicht.



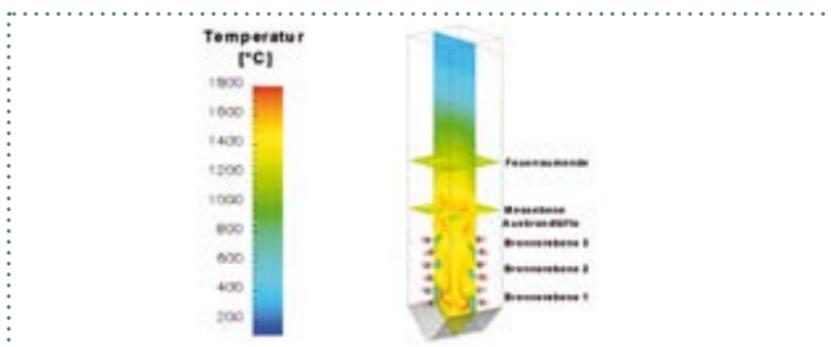
Komponenten des Simulatorsystems



## Lebensdauer von Kesselbauteilen (DE2)

In diesem Projekt kam erstmals eine Gesamtsimulation von Feuerung, Dampferzeugung, Beanspruchung und Schädigung zum Einsatz. Dabei wurden die unabhängig einsetzbaren Simulationsprogramme AIOLOS (Feuerraumsimulation), DYNAMIK (Wasser/Dampf-Kreislaufberechnung) und Simulationsmodule aus ALIAS (Advanced Life Assessment System) zur Lebensdauerberechnung verknüpft und neue Berechnungsmodule zur Berücksichtigung des Rußblasens und von Korrosions- und Oxidationsvorgängen integriert. Die an der Schnittstelle Rohrwand herrschenden Temperaturen bzw. Wärmestromdichten dienten als Kopplungsgrößen. Lokal aufgelöste Temperaturen und Drücke sowie Wandtemperaturdifferenzen waren maßgebliche Größen für die Lebensdauerberechnung.

Diese Werkzeuge erlauben die Verbesserung der Auslegung und Lebensdauerberechnung von Kraftwerksbauteilen auf der Basis einer erweiterten Datenbasis, u.a. für das Oxidations- und Korrosionsverhalten von Werkstoffen. Dies trägt zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit der Anlagen bei und erhöht deren Effizienz durch zielgerichteten Werkstoffeinsatz bei der Auslegung. Der Kraftwerksbetrieb kann durch die Lokalisierung von Komponenten mit hohen Erschöpfungsgraden in Bezug auf ihre Beanspruchungen optimiert werden, Lebensdauer verlängernde Maßnahmen können konzipiert werden und die betrachteten Kraftwerkskomponenten können bei gleichem Lebensdauerverbrauch mit höherem Wirkungsgrad bei optimiertem Inspektionsaufwand betrieben werden.



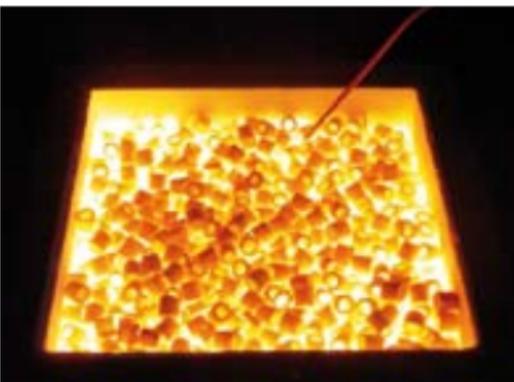
Berechnete Temperaturverteilung im Feuerraum



## Porenbrenner (DE3)

Um künftige Kraftwerke effizienter, kostengünstiger und umweltfreundlicher zu gestalten, wurde das Konzept eines modularen Kraftwerkes entwickelt, in dem mehrere leistungsmodulierbare Brennermodule entsprechend dem Wärmebedarf zusammengeschaltet werden. Ziel des Vorhabens war, einen völlig neuen Kesseltyp auf der Basis der Porenbrennertechnologie zu entwickeln.

In enger Kooperation mit der SGL Carbon GmbH wurde ein 350 kW Porenbrenner und ein kompakter Hochleistungs-Wärmeaustauscher entwickelt, umfassend charakterisiert und die Funktionsfähigkeit des Systems nachgewiesen. Durch den Einsatz des Materials Graphit für Brenner und Wärmeaustauscher war es möglich, die aus der Haushaltstechnik bekannte Brennwerttechnik zu nutzen. Die hohe Korrosionsbeständigkeit von Graphit erlaubt die Verbrennung von Gasen mit höherer Schwefelkonzentration, seine hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht höhere Wärmeübertragungsleistungen. Durch Optimierung der Verbrennungszone konnte der Betriebsbereich erweitert werden. Die Trennung von Verbrennungszone und Flammensperre vermindert die Rückschlaggefahr und stabilisiert die Flammensperre. Aus den gewonnenen Erfahrungen konnten neue Auslegungskriterien abgeleitet werden, die in das Design eines um eine Größenordnung leistungsfähigeren Prototyps eingeflossen sind.



Porenbrenner



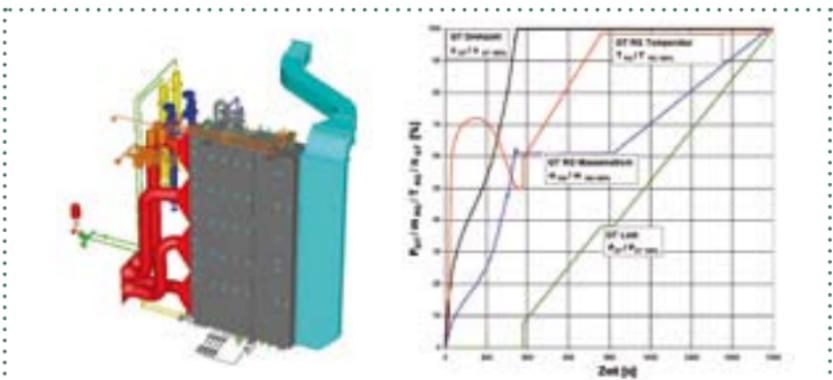
## GuD-Lastwechseldynamik (DE4)

Um die Lastwechseldynamik von Gas- und Dampf (GuD)-Anlagen zu verbessern, muss unter anderem die zulässige Laständerungsgeschwindigkeit des Abhitzedampferzeugers (AHDE) erhöht werden. Das Design des AHDE darf die Flexibilität der Gasturbine nicht einschränken. Dies bedingt den Einsatz eines Zwangsdurchlaufverdampfers in der Hochdruckstufe. Dem heutigen Stand der Abhitzedampferzeuger-Technik entspricht das GuD-Kraftwerk Cottam in Mittelengland.

Das Ziel des Teilprojektes war der Nachweis der Funktionalität der Weiterentwicklung der in Cottam verwendeten Verdampferschaltung und eines neuen Sammlers mit Abscheidefunktion.

Das neue Design des Verdampfers ermöglicht einen Einsatz in der Hoch-, Mittel- und Niederdruckstufe. In stationären Versuchen sollte dabei die Funktionalität des neuen Abhitzedampferzeugers (Verdampfer und Abscheider) in einem großen Lastbereich überprüft werden.

Zur Verbesserung der Betriebsdynamik von Abhitzedampferzeugern wurde ein neu entwickeltes wärmegeführtes Speisewasserregelkonzept in die Prozessleittechnik implementiert und überprüft. Das herkömmlich verwendete Regelkonzept diente dabei als Basis zur Beurteilung der erzielten Verbesserung des dynamischen Verhaltens. Die verbesserte Dynamik konnte mit den durchgeführten Versuchen, wie z.B. dem Kaltstart, einem schnellen Anfahren mit Simulation eines fliegenden Dampfturbinenstarts und der Ermittlung der beherrschbaren Druckänderungsgeschwindigkeit deutlich belegt werden.



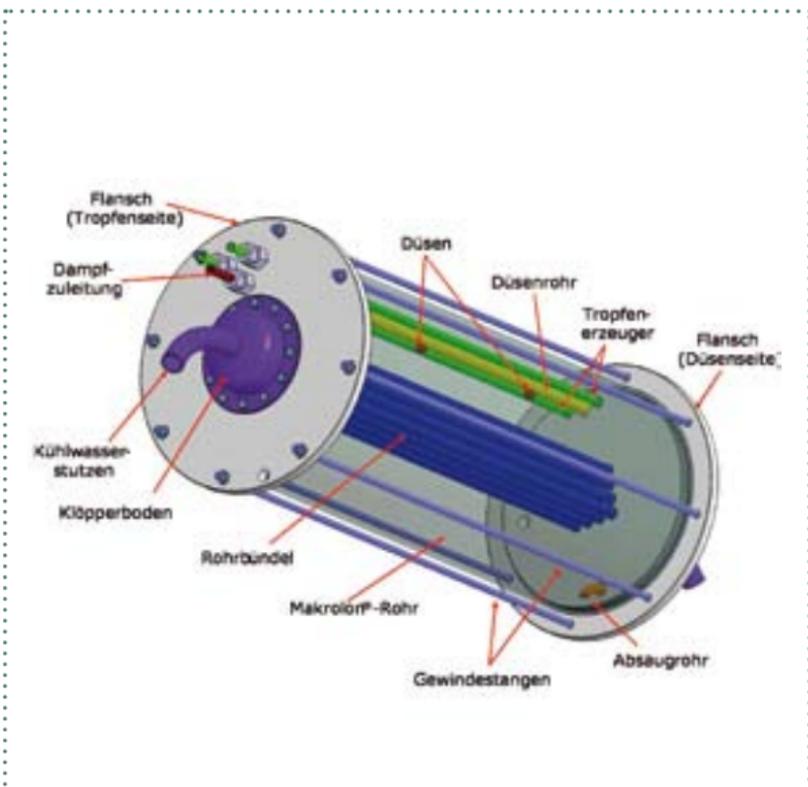
3D-Modell der Versuchsanlage und Anfahrtdiagramm



## Kondensation von Wasserdampf aus dem Abgas (DE5)

Beim Oxyfuel-Verfahren wird  $\text{CO}_2$  aus dem Rauchgas durch Kondensation des Wasserdampfes abgetrennt. Ein idealer Kondensator ist hierzu noch nicht entwickelt. Ziel war es, mit grundsätzlichen Untersuchungen prinzipielle Lösungen für die Schlüsselkomponente Kondensator mit integrierter  $\text{CO}_2$ -Abscheidung aufzuzeigen. Das geschah an Hand von vier Arbeitspaketen: Betriebsparameter des Kondensators, Konzeptlösung des Kondensators, Wärmeübergangsmessung, Bau Labormodell und Nachweis Funktion.

Wesentliche Ergebnisse des erfolgreich abgeschlossenen Projektes waren: Mit den Wärmeübergangsmessungen konnten die Berechnungsvorschläge des VDI Wärmetatlas in den untersuchten Bereichen verifiziert werden. Des Weiteren wurde ein innovatives Kondensationskonzept entwickelt, das gegenüber dem Stand der Technik eine effizientere  $\text{CO}_2$ -Abscheidung ermöglicht.



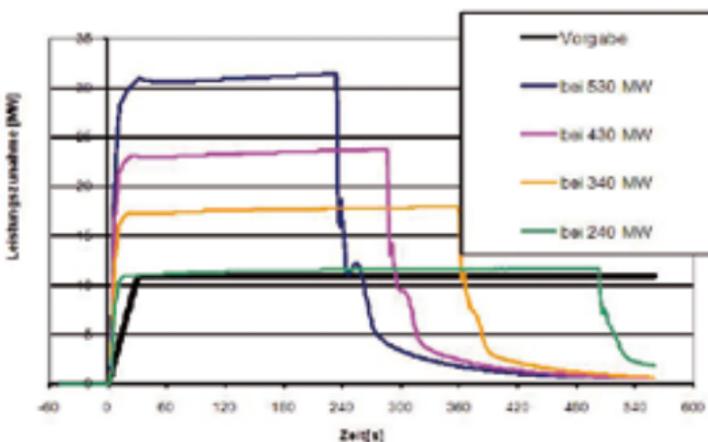
Labormodell eines Kondensators mit Kondensatzirkulationskonzept



## Großkraftwerk-Lastwechseldynamik (DE6)

Dieses Teilprojekt hatte die Verbesserung der leittechnischen Vorgaben beim Anfahren und bei Lastwechseln zum Ziel. Hierzu wurden anfahr- und lastwechseltaugliche Modelle zur Simulation der Dynamik modernster Steinkohlekraftwerke entwickelt. Der von der Simulationssoftware ermöglichte Überblick über sämtliche Zustände im Modell, ließ die schnelle Identifikation ungenutzter Potentiale und einfache Modifikationen der Leittechnik zu deren Nutzung zu.

Verbesserungen der Lastwechseldynamik wurden an der Primär- und der Sekundärregelung erreicht: Primärregelseitig trägt die detaillierte Simulation verschiedener Varianten des Kondensatstaus und deren leittechnische Abstimmung mit der unverzichtbaren Drosselung zur Steigerung von Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz bei. Zur Sekundärregelung wurde das bekannte Konzept der Speisewasservorsteuerung bei Leistungserhöhungen durch eine quantitative Ermittlung der Potentiale und modifizierte Einbindung in die Leittechnik weiterentwickelt. Dies ermöglicht bei gleichbleibend bauteilschonender Fahrweise Verbesserungen der Dynamik von bis zu 40 %. Durch kombinierte Simulation der Bauteilermüdungsberechnung neben der Leittechnik, kann ferner der Lebensdauerverbrauch dickwandiger Bauteile während Anfahrvorgängen online verfolgt und optimiert werden.



Direkter Kondensatstopp



## Arbeitskreis Fluidodynamik und Dampfturbine (DT)

Der Anteil der Dampfturbine an der weltweiten Stromerzeugung liegt bei derzeit 71 %. Mit deren technischer Weiterentwicklung ist die größte Hebelwirkung zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Schonung der Primärenergieressourcen bei der Stromerzeugung gegeben.

Ansatzpunkte zur Erhöhung des Wirkungsgrades waren in KW21 während der Phase von 2004 bis 2008 eine verbesserte aerodynamische Auslegung von Niederdruck-Teilturbinen und die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Dampfturbinen durch Optimierung des „Kalten Endes“. Das Langzeitverhalten der Niederdruck-Laufschaufelerosion sowie die strömungsmechanische Berechnung von Endstufe und nachfolgendem Diffusor bildeten einen weiteren Schwerpunkt der Forschungsarbeiten. Radialadaptive Dichtungen für Dampfturbinen erfuhren eine Verbesserung. Auf dem Gebiet der Werkstofftechnik wurde die Schweißverbindung im Maschinenbau bewertet. Im Themenfeld Wasserturbinen war ein Ziel die Verbesserung des Teil- und Überlastverhaltens durch aktive Strömungsbeeinflussung. Diese Projekte trugen zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Schonung von Primärenergieressourcen bei der Stromerzeugung bei.



### Arbeitskreissprecher:

Dr. Dirk Goldschmidt,  
Siemens AG, Energy Sector,  
Fossil Power Generation Division,  
Erlangen

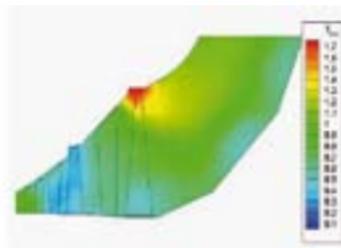


## Aerodynamische Auslegung von Niederdruck-Teilturbinen (DT1)

Die Vergrößerung der Abströmfläche von Niederdruckdampfturbinen führt aufgrund längerer Laufschaufeln der letzten Stufe (Endstufe) zu erhöhten Fliehkraftbeanspruchungen, was einen Wechsel im Schaufelmaterial von Stahl auf Titan erfordert. Da Titan zum Teil stark von Stahl abweichende Materialeigenschaften aufweist, ist eine neue struktur- und aerodynamische Auslegung der Endstufe notwendig. Um die neuen Auslegungsverfahren zu validieren und verschiedene Auslegungskonzepte vergleichen zu können, wurden drei Turbinenkonfigurationen experimentell untersucht. Neben einer Endstufe mit Titanlaufschaufeln und vergrößerter Abströmfläche, erfolgte die Untersuchung zweier unterschiedlicher Leitschaufelgeometrien gleicher Abströmfläche, um den Einfluss des Leitschaufeldesigns auf das Strömungsfeld zu ermitteln.

Die verminderte Steifigkeit von Titan erfordert zusätzliche Koppellemente wie Deckband und Snubbers, um den Schaufelverbund zu versteifen. Die strukturdynamischen Untersuchungen zeigten eine deutliche Verringerung der Schwingungsamplituden infolge der Kopplung. Die durch die Snubbers verursachten aerodynamischen Verluste wurden quantifiziert. Außerdem wurde ersichtlich, dass die durch das Deckband stark reduzierte Spaltströmung eine neue Auslegung des Diffusors erfordert.

Das neue Leitschaufeldesign und die Anhebung der Abströmfläche zeigten im Vergleich zur Ausgangskonfiguration einen optimierten Verlauf des Wirkungsgrades im Off-Design-Betriebsbereich.



3-stufige Versuchsturbine und ihr Temperaturfeld bei Ventilation

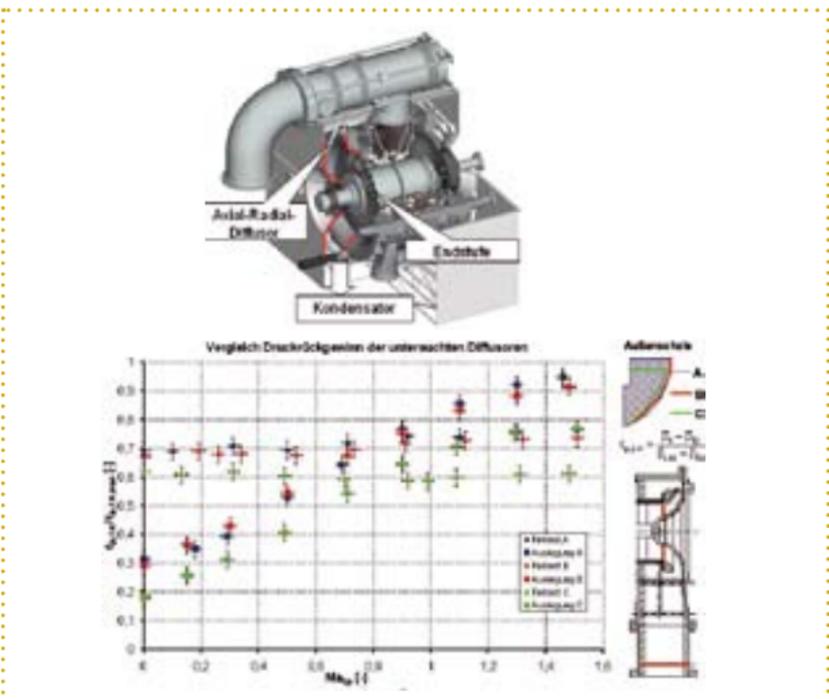


## Kaltes Ende Dampfturbine (DT2)

Die durchgeführten Messungen an einem luftbetriebenen Axial-Radial-Diffusorversuchsstand verdeutlichten die ausgeprägte Interaktion der stark dreidimensionalen Strömung in Diffusor und Abdampfgehäuse einer Niederdruckdampfturbine mit der Abströmung der Turbinenendstufe.

Bei diesen grundlegenden Untersuchungen zeigte sich ein starker Einfluss der Strömung um die Schaufelspitze auf den Diffusordruckrückgewinn. Bei der Gestaltung der Deckbanddichtungssysteme der Endstufe ist dieser Einfluss daher künftig nachdrücklich zu berücksichtigen, um einen optimalen Wirkungsgrad der Niederdruckdampfturbine zu erreichen.

Eine zuverlässige Vorhersage der Abdampfgehäuseströmung von Niederdruckdampfturbinen mit Programmsystemen zur numerischen Strömungssimulation ist derzeit nicht möglich. Deshalb sind für die Entwicklung verlustarmer Diffusoren auch weiterhin experimentelle Untersuchungen notwendig.



Abstromgehäuse einer Niederdruck-Dampfturbine; Druckrückgewinn der Diffusoren



## Schaufelerosion in Niederdruck-Dampfturbinen (DT3)

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Eigenschaften von verschiedenen Werkstoffen für Laufschaufeln von Turbinen bezüglich der Erosion durch Tropfenschläge mit sehr hohen Geschwindigkeiten von bis zu 500 m/s in einem speziellen Versuchsstand untersucht. Dabei war es möglich, alle relevanten Einflussparameter konstant zu halten bzw. gezielt zu verändern. Untersucht wurde der Einfluss von Auftreffgeschwindigkeit und -winkel der Tropfen. Zusätzlich erfolgte eine Potentialabschätzung verschiedener Möglichkeiten zur Minimierung der Erosion, beispielsweise durch Oberflächenbehandlungen der Werkstoffe.

Durch die Verwendung von Proben mit schaufelnahen Geometrien, die von Turbinenlaufschaufeln aus realen Niederdruck-Dampfturbinen abgeleitet wurden, konnte das Erosionsverhalten solcher Schaufeln simuliert werden. Mit Hilfe der experimentell bestimmten Erosionseigenschaften der verschiedenen Werkstoffe und einer Dimensionsanalyse war es möglich, Korrelationen für die Vorhersage der Erosion beliebiger Werkstoffe zu erarbeiten, wodurch ein innovativer Ansatz zur Auswahl von Schaufelwerkstoffen und damit ein Beitrag zur Sicherstellung einer langfristigen Verfügbarkeit und Betriebssicherheit von neuen Kraftwerksturbinen geleistet wird.



Erosionsprüfstand, Werkstoffproben vor und nach der Untersuchung



## Endstufe und Diffusor (DT4)

Das Projekt richtete sein Augenmerk auf die letzten Stufen einer Dampfturbine. Für die Entwicklung neuer Designs für Turbinenschaufeln und für das Turbinengehäuse wurden vornehmlich numerische Methoden eingesetzt. Der Einsatz von innovativen Werkstoffen ermöglichte den Vorstoß zu Endstufen neuer Dimensionen. Die Strömungsgeschwindigkeiten ragen dabei in den supersonischen Strömungsbereich hinein. Die Methoden und Validierungsdaten für die Berechnung der Zweiphasenströmung im Nassdampfbereich waren bislang unzureichend.

Um die physikalischen Vorgänge in den strömungsführenden Bauteilen aufzuklären, wurden mit Hilfe der am Endstufenversuchsstand der Forschungsstelle gewonnenen Randbedingungen, Simulationen der Strömung durch die drei Niederdruck-Turbinenstufen und den zugehörigen Diffusor durchgeführt. Für die drei Lastfälle Teillast, Design-Last und Überlast wurde das Strömungsfeld berechnet und eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Strömungsgrößen erzielt. Daher ergibt sich auch eine gute Vorhersage der Wirkungsgradcharakteristik. Die auftretenden Strömungsstrukturen für extreme Teillastbetriebszustände im Ventilationsbetrieb wurden berechnet und diskutiert. Die Simulation der Trajektorien feiner und grober Wassertropfen ergab einen aufschlussreichen Einblick in das Wasserabscheidungsverhalten von Turbinenschaufeln.



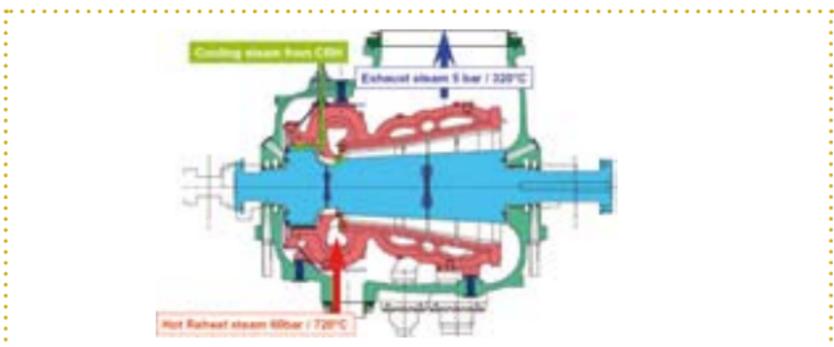
Turbinenschaufeln mit Entropie-Konturplotebene



## Schweißverbindungen (DT6)

Im Projekt kamen experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Durchführung, um eine umfassende Bewertung von modernen Schweißverbindungen im Turbomaschinenbau vornehmen zu können. Ziel war die Erarbeitung von fortgeschrittenen Auslegungs- und Fehlerbewertungskonzepten. Dabei standen ungleichartige Schweißverbindungen (2%-Cr-Stahl mit 10%-Cr-Stahl sowie 10%-Cr-Stahl mit der Nickelbasis-Legierung Alloy 617) im Vordergrund. Die experimentellen Arbeiten umfassten dabei Zug-, Schwing- und Zeitstandversuche und Versuche zur Ermittlung von Risseinleitung und -fortschritt unter zyklischer und Zeitstandsbeanspruchung an den beiden Verbindungen. Metallografische Untersuchungen dienten zur Festlegung der Prüfkörper und zur Klärung der auftretenden Versagensmechanismen. Die theoretischen Arbeiten umfassten numerische Untersuchungen zur Erstellung von Werkstoffmodellen, die in den erarbeiteten Auslegungskonzepten zur Anwendung kamen, weiterhin Erstellung von Auslegungsmatrizen anhand der erfassten Versagensmechanismen und Definition von zugehörigen Berechnungsmethoden. Zur bruchmechanischen Auslegung und Bewertung von Fehlern in kritischen Bauteilen wurde ein Fehlertolerierungskonzept erstellt.

Die Arbeiten zur Modellierung an der 10Cr-Ni-Basis-Verbindung zeigen auf, dass auf den Übergang zu anisothermer Modellierung nicht verzichtet werden kann. Die Komplexität der Beanspruchung bei Temperatur- und Lastwechsellvorgängen erfordert deshalb weitere Entwicklungen.



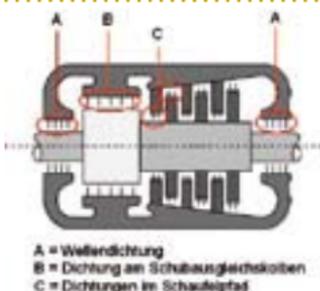
700 °C-Mitteldruckturbine von SIEMENS



## Adaptive Dichtung (DT7)

Ungefähr 70% des Stroms weltweit wird durch die Durchströmung von Dampfturbinen erzeugt. Die Erhöhung des Dampfturbinenwirkungsgrades verspricht einen sinnvollen Beitrag zur Minderung des Treibhauseffekts. Durch moderne Dichtungstechnik – wie der Bürstendichtung – lässt sich der Verlust durch Spalte minimieren. Ziele in diesem Projekt bei der Erforschung der Eigenschaften von Bürstendichtungen waren Untersuchungen zum: Leckageverhalten, Blowdown-Effekt, Schutz- und Stützringeinfluss, Leckage-Verteilung die Dichtung, Verschleißerscheinungen, drallbrechende Wirkung und Rotordynamik.

Zusammenfassend zeigte sich im Hinblick auf die Verluste eine Reduktion um 30 bis 70 % gegenüber herkömmlichen Labyrinthdichtungen. Der Grund dafür liegt im Blowdown-Effekt, der erstmals experimentell erfasst wurde. Diese Ergebnisse konnten für Modelle genutzt werden. Neuartig ist die systematische Untersuchung des Einflusses von Schutz- und Stützring. Hier zeigte sich, dass Optimierungspotential hinsichtlich der Spaltweiten vorhanden ist. Schäden an Bürstendichtungen während der Versuche beschränkten sich auf abrasiven Verschleiß. Der Drall ist maßgeblich für die Generierung rotordynamischer Kräfte verantwortlich. Die Messung der Drallverteilung in der Dichtungsgeometrie demonstrierte, dass die Bürstendichtung einen guten Drallbrecher darstellt. Das ist die Basis für ein sicheres Betriebsverhalten, wie die Messung rotordynamischer Kräfte bei Bürstendichtungen im Vergleich zu Labyrinth ergab. Der Einsatz von Bürstendichtungen in Dampfturbinen ist aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften empfehlenswert, das beweisen die Ergebnisse dieser Studie.



Dichtungen in Dampfturbinen

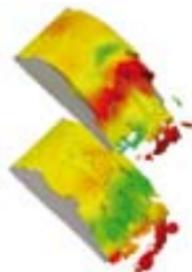
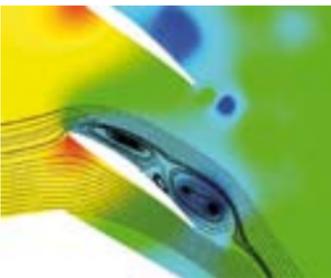


## Aktive Strömungsbeeinflussung (DT8)

Das Projekt galt der Entwicklung eines effizienten Computational Fluid Dynamics (CFD) Code, mit dessen Hilfe hochgenaue Untersuchungen an einem Turbinenmodell durchgeführt werden sollten. Es wurden verschiedene Turbulenzmodelle auf der Basis von Large Eddy Simulation (LES) und hybrider LES/RANS (RANS = Reynoldsgemittelte Navier-Stokes Gleichungen) integriert sowie für die Simulation der Strömung in Turbomaschinen angepasst und erweitert. Des Weiteren wurden verschiedene Wandmodelle implementiert und bewertet.

Durch die Auswahl geeigneter Modelle und deren problemspezifischer Erweiterung, war es möglich, die Strömungsphänomene, welche beim Teillastbetrieb einer Francis Turbine auftreten, mit hoher Genauigkeit und großer Effizienz zu simulieren. Dies war in dieser Form nach dem bisherigen Stand der Technik nicht möglich. Basierend darauf fanden an einem einfachen Turbinenmodell, mit Hilfe der numerischen Simulation, Untersuchungen des Teillastbetriebs sowohl mit feststehenden als auch mit schwingenden Vorleitschaufeln statt.

Daraus resultierte die Erkenntnis, dass durch die aktive Beeinflussung der Strömung, die Verluste innerhalb des Turbinengitters und die Druckschwankungen an den Schaufeloberflächen reduziert werden können. Dies bedeutet eine Verbesserung des Betriebsverhaltens einer Turbine hinsichtlich einer wirtschaftlichen Nutzung. Außerdem zeigte sich, dass es durch die Strömungsbeeinflussung möglich ist, die Frequenzen der Druckschwankungen zu verschieben.



Zweidimensionaler Stromlinienverlauf der Ablösung und dreidimensionale Darstellung der Ablösung durch Isoflächen der Geschwindigkeit



## Arbeitskreis Hochtemperaturkomponenten in Turbomaschinen (GT)

Gasturbinen sind sehr flexibel einsetzbar und können mit allen flüssigen/ gasförmigen Brennstoffen betrieben werden. Gasturbinen spielen eine essentielle Rolle bei der Elektrizitätsversorgung in großtechnisch realisierten Kraftwerksprozessen, in einem offenen Prozess zur Deckung von Leistungsspitzen und als ergänzendes Element im Portfolio „Windkraft und sonstige alternative Energien“. Die Bedeutung der Gasturbine für die Stromerzeugung wird weiter steigen.

Themenschwerpunkte des Arbeitskreises waren die Verbesserung der Umweltfreundlichkeit, die Steigerung des Wirkungsgrades und die Erhöhung der Zuverlässigkeit im Kraftwerksbetrieb. Die Technologieprojekte optimierten den gesamten Product Life Cycle. Ihre Ergebnisse sind kurzfristig wirksam, kosteneffizient und nachhaltig. Die entwickelten Technologien stehen sowohl für die Konzeption von neuen Kraftwerksanlagen als auch für die Nachrüstung zur Verfügung.



### **Arbeitskreissprecher:**

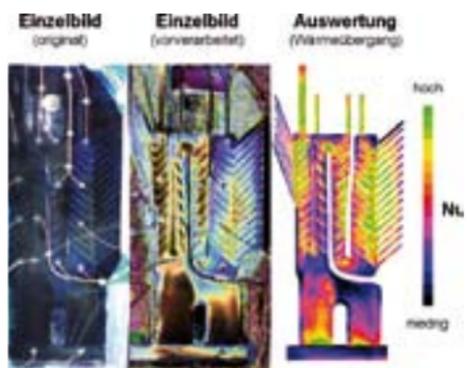
Heinz Knittel,  
MTU Aero Engines GmbH, München



## Wärmeübergangsmessungen von Kühlsystemen für Gasturbinenschaufeln (GT1)

Zielstellung dieses Projektes war es, die Genauigkeit experimenteller Wärmeübertragungsuntersuchungen in komplexen Konfigurationen durch neue, innovative Ansätze deutlich zu steigern. Damit sollten auch Anwendungen auf Gesamtkühlsystemen von Gasturbinenschaufeln mit der erforderlichen Genauigkeit ermöglicht werden. Zur experimentellen Untersuchung gelangte ein optisches Messverfahren zum Einsatz, unter Verwendung von thermochromatischen Flüssigkristallen. Hierfür wurde ein Versuchsstand mit flexiblen Einsatzmöglichkeiten aufgebaut und eine leistungsfähige Software zur Bildverarbeitung und Versuchsauswertung erstellt.

Eine Sensitivitätsanalyse war Ausgangspunkt zur Definition der Vorgehensweise und fand Eingang in viele Teilaspekte des Projektes. Die erarbeiteten Verfahren und Algorithmen zur Bildverarbeitung und Auswertung der Messdaten bewiesen ihre praktische Einsatzfähigkeit an verschiedenen Modellen komplexer Kühlsysteme (z.B. konvektiv gekühlt, prallgekühlt) und es konnten unterschiedliche Versuchskonzepte (z.B. Variation der Versuchsrandbedingungen) getestet werden. Hierbei konnte eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit, insbesondere bei den untersuchten kleinskaligen Modellen erreicht werden.



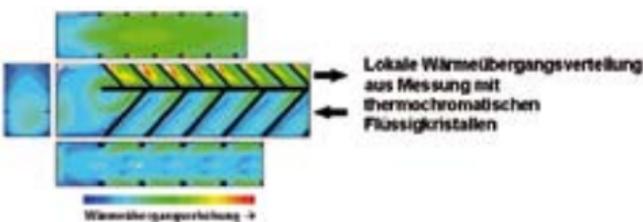
Plexiglasmodell und Versuchsauswertung



## Optimierung von 180°-Krümmergeometrien (GT2)

Die effiziente Kühlung von Gasturbinenbauteilen ist eine notwendige Voraussetzung zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades und damit zur Reduktion von Schadstoffemissionen in Gasturbinen. In diesem Forschungsvorhaben standen Strömungs- und Wärmeübergangsverteilungen in 180°-Umlenkungen von Kühlkonfigurationen in Gasturbinenschaufeln experimentell und numerisch zur Untersuchung. Eigens aus Plexiglas gefertigte skalierte Modelle für neue Kühlgeometrien, ermöglichten eine visuelle Zugänglichkeit für moderne bildgebende Messverfahren. Durch den Einsatz optischer Messmethoden gelang es, detaillierte Informationen für den Wärmeübergang mittels thermochromatischer Flüssigkristalle und für die Strömungsfelder mittels „Particle Image Velocimetry (PIV)“ für verschiedene Geometrien und Strömungsbedingungen zu erhalten. Variierende geometrische Bedingungen fanden Berücksichtigung, um eine aussagekräftige Datenbasis für numerische Vergleichsuntersuchungen mittels „Computational Fluid Dynamics (CFD)“ bereitzustellen.

Die experimentellen Resultate haben dabei gezeigt, dass eine Modellierung mit reduziertem numerischem Aufwand möglich ist, um die wesentlichen Effekte zur Beschreibung der Kühlungseffizienz für die untersuchten Konfigurationen zu erfassen. Damit kann diese neue Modellierungsstrategie auch in zukünftigen Optimierungsprozessen zur Verbesserung der Kühlungseffizienz erfolgreich eingesetzt werden.



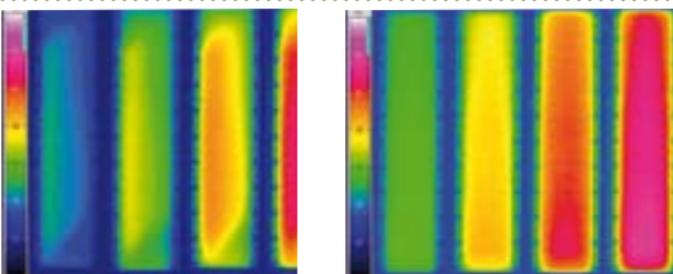
Lokale Wärmeübergangsverteilung aus Messung mit thermochromatischen Flüssigkristallen



## Konvektiver Wärmeübergang in gegossenen Gasturbinenschaufeln (GT3)

Dieses Vorhaben diente der Entwicklung eines Messverfahrens, mit dem zerstörungsfrei die inneren Wärmeübergangskoeffizienten bei der Durchströmung von gegossenen Gasturbinenschaufeln bestimmt werden können. Nach einer eingehenden Analyse vorhandener Qualifizierungstests, gelangte als nächster Schritt der notwendige Versuchsaufbau zur Ausführung, einschließlich der Konzeption der zugehörigen Messtechnik. Parallel dazu erfolgte die Ableitung eines eindimensionalen Auswerteprogrammes für die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten aus den beschreibenden Differentialgleichungen und dessen Implementierung und Prüfung in einer kommerziellen Simulationsumgebung. Die daran anschließende Erprobung des Messverfahrens geschah an Hand eines Referenzkanals mit verschiedenen Rippengeometrien. Die dabei bestimmten Wärmeübergangskoeffizienten wurden einerseits mit simultan bestimmten Werten unter Anwendung der Flüssigkristallmethode und andererseits mit Literaturwerten verglichen.

Der Vergleich mit der Flüssigkristallmethode ergab Werte auf gleichem Niveau, die allerdings durch die dämpfenden Eigenschaften der metallischen Werkstoffe glatter verlaufen. Der Vergleich mit den Literaturwerten resultierte in einer als gut einzustufenden Übereinstimmung der Ergebnisse. Abschließend fanden erste Versuche mit gegossenen Gasturbinenschaufeln statt. Diese zeigten, dass das Messverfahren prinzipiell auch bei diesen Bauteilen einsetzbar ist. Es sind aber noch Verbesserungen in der Modellierung des Temperaturfeldes innerhalb der Gasturbinenschaufeln notwendig, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen.



Infrarot-Aufnahmen mit 90°- und 45°-Rippen zu festgelegten Zeitpunkten

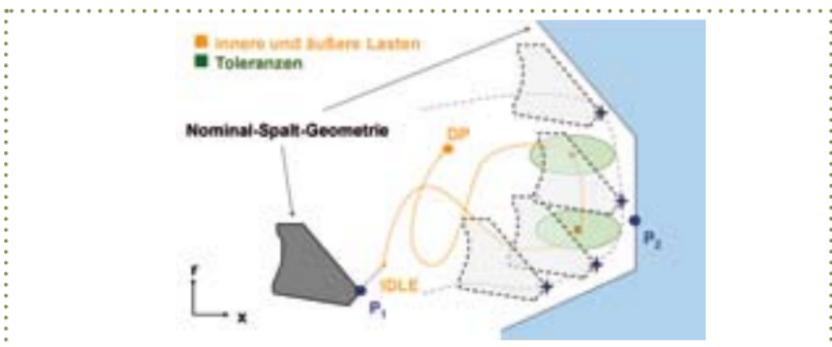


## Toleranzkettenanalyse (GT4)

Das wirtschaftliche Potenzial bei der Einführung eines CAD-basierenden Toleranzkettenanalyse-Systems liegt im Wesentlichen darin, die Qualität des Produkts bei gleichzeitiger Fertigungs- und Entwicklungs-Kostenreduktion zu verbessern. Eine Studie erbrachte den Beweis der generellen Machbarkeit der Toleranzanalyse im Gasturbinenbau anhand einer bestehenden Turbinenkonstruktion. Das kommerzielle Softwaretool, das dabei zum Einsatz kam, war bereits in einer Vorstudie bewertet und ausgewählt worden.

In einem zweiten Schritt folgte die Entwicklung eines Simulationsmodell-Templates zur Quasi-3D-Toleranzanalyse in der Auslegungsphase und deren Überprüfung auf Anwendbarkeit. Bei der Erstellung wurde verstärkt darauf geachtet, Erkenntnisse aus 3D-Detailuntersuchungen in das Quasi-3D-Modell einbinden zu können. Detailstudien erfolgten zur Exzentrizität eines speichenzentrierten Bauteils. Auch die Exzentrizität einer mehrstufigen Rotorbaugruppe war Gegenstand einer Detailstudie.

Mittels einer neu entwickelten Methodik war es möglich, die Ergebnisse der Toleranzanalyse mit der Verformungsrechnung zu überlagern. Damit kann in der Auslegungsphase eine sinnvolle Aussage hinsichtlich der erwarteten Spaltmaße sowie des Spaltverhaltens während des Betriebs der Gasturbine getroffen werden. Um die Datendurchgängigkeit während des Entwicklungsprozesses zu erhöhen, wurden zudem bestehende Möglichkeiten sowie Alternativen ermittelt, um Toleranzinformationen direkt an das CAD-Modell anzuknüpfen.

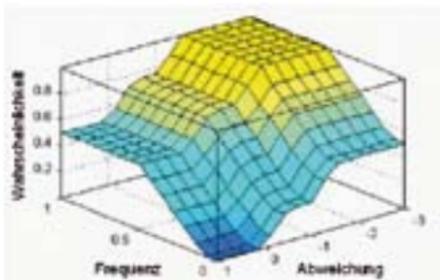


Spaltuferbetrachtung



## Fortschrittliches Monitoringsystem für Gasturbinen (GT5)

In diesem Teilprojekt erfolgte die Entwicklung eines fortschrittlichen Konzeptes eines Überwachungssystems für Gasturbinen (ECM System, *Engine Condition Monitoring System*) und dessen Umsetzung mit dem Softwaretool HealthGT®. Das Konzept basiert auf den folgenden drei Hauptprozessen: Detektion von Einzelereignissen, Diagnose von Einzelereignissen und Diagnose gradueller Verschlechterung. Durch die automatisierte Trennung zwischen Einzelereignissen und gradueller Verschlechterung ist es möglich verschiedene Verfahren zu verbinden, die jeweils auf eine der beiden Anwendungen zugeschnitten sind. Der Detektionsalgorithmus wurde in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner zum Patent angemeldet. Neben den drei erwähnten Hauptprozessen stehen weitere Funktionen zur Verfügung, wie z.B. eine erweiterte Beobachtbarkeitsanalyse, eine Identifikation durch Blockbildung und die Anwendung von Fusionsmethoden. Mit HealthGT® entstand eine neu entwickelte, umfangreiche, flexible und integrierte Diagnosesoftware für Gasturbinen, die darüber hinaus aufgrund ihrer grafischen Benutzeroberfläche über eine einfache Bedienbarkeit verfügt.



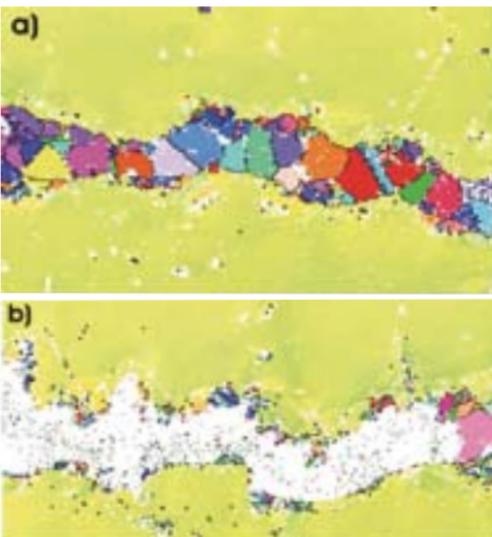
Fuzzy Response Oberfläche zur Einzelfehlerdiagnose und eingetragener Markenname der Diagnosesoftware



## Diffusionslötten einkristalliner Turbinenschaufeln (GT6)

Ziel des Projekts war die Entwicklung eines neuen Lotwerkstoffes zur Reparatur von einkristallinen Turbinenschaufeln, die aus dem Einsatz Risse aufweisen, verursacht durch Temperaturwechselbelastung. Der neue Lotwerkstoff kann außerdem verwendet werden, um einkristalline Turbinenschaufeln aus Einzelkomponenten aufzubauen, um über bessere Kühlung oder geeignetere Werkstoffe die Temperatureinsatzgrenze zu steigern.

Die heute in der Technik eingesetzten Lote verwenden Bor als schmelzpunktsenkenden Zusatz. Bor hat den Nachteil, dass es sich in der Grundmasse nicht löst und in Form von Sprödphasen ausgeschieden wird. Die mechanischen Eigenschaften sind entsprechend in der Lötnaht drastisch reduziert. Die mangelnde Löslichkeit des Bors führt außerdem zu sehr langsamer Risssschließung bei isothermer Erstarrung und entsprechend langen Prozesszeiten. Im Projekt wurde ein völlig neuer schmelzpunktsenkender Zusatz gefunden und erprobt, der die Probleme von Bor vermeidet. Es handelt sich um das Element Germanium. Es konnte gezeigt werden, dass einkristalline Lötungen von Rissen mit Germanium möglich sind, und dass nach der Reparatur über 90 % der Grundwerkstofffestigkeit erreicht werden.



EBSD-Untersuchung an Bauteilriss:

a) polykristallin gefüllter Riss, b) Rekristallisation an den Rissflanken im ungefüllten Zustand



## Widerstands- und Wärmeübergangsverhalten von Turbinenschaufeln mit rauer Oberfläche (GT7)

Der thermische Wirkungsgrad von Gasturbinen konnte in den letzten Jahren durch die Erhöhung der Turbineneintrittstemperatur beträchtlich gesteigert werden. Die extrem hohen Gastemperaturen, die weit über der Schmelztemperatur des Turbinenschaufelmaterials liegen, sind nur mit Hilfe hoch entwickelter Schaufelkühlungskonzepte zu verwirklichen. Ein Ziel intensiver Forschung ist die Verringerung des zur Kühlung erforderlichen Luftbedarfs, da der potentielle, mit einer Erhöhung der Temperatur verbundene Wirkungsgradgewinn, durch einen erhöhten Verbrauch von Kühlluft wieder zunichte gemacht wird. Immer größere Bedeutung bei der Auslegung und Dimensionierung der Kühlverfahren gewinnt dabei die durch den Betrieb bedingte Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der umströmten Turbinenschaufeln. Die zunehmende Oberflächenrauigkeit beeinflusst das Grenzschichtverhalten und kann zu einem drastischen Anstieg des Wärmeübergangs und der Materialtemperaturen führen.

Dieses Vorhaben widmete sich der Untersuchung des Einflusses realer, turbinentypischer Oberflächenrauigkeiten auf den lokalen äußeren Wärmeübergang an Turbinenschaufeln und Schaufelplattformen. Außerdem galt es die Änderung der aerodynamischen Verluste durch die Rauigkeit in einem weiten Betriebsbereich zu quantifizieren. Auf der Basis der gewonnenen Messdaten gelang es, ein neuartiges Modell für die Berechnung des Wärmeübergangs an rauen Oberflächen zu entwickeln und zu validieren. Dieses Modell ermöglicht künftig eine optimale Auslegung der Schaufelkühlung.



Oberflächenrauigkeiten an Gasturbinenschaufeln



## Arbeitskreis Brennkammern für Gasturbinen (GV)

Steigende Verbrennungstemperaturen zur Erreichung hoher Kraftwerkswirkungsgrade und die Begrenzung der Schadstoffemissionen stellen hohe Anforderungen an die Verbrennungstechnologie für Gasturbinen. Darüber hinaus werden vom Gasturbinenmarkt hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit der Maschinen gestellt, sowie eine hohe Flexibilität bezüglich Brennstoffeinsatz und Betriebsweise gefordert. Die weitere Optimierung der Verbrennungstechnologie setzt die Entwicklung verbesserter Auslegungswerkzeuge voraus. Es müssen auch grundsätzlich neue Verbrennungstechniken entwickelt werden, deren kommerzieller Einsatz erst längerfristig erwartet werden kann. Forschungsschwerpunkte waren das Zündverhalten auf Basis verbesserter Mischung von Brennstoff und Luft, die Flammenstabilisierung und optimierte Wandkühlung sowie Thermoakustik, Stickoxid-arme Verbrennung und Vermeidung von Flammenrückschlag sowie neue Konzepte für Verbrennungssysteme.



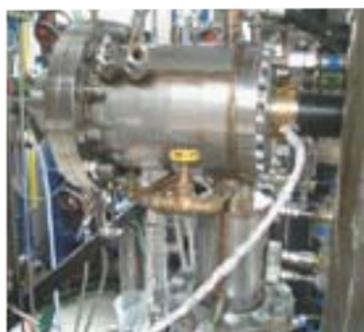
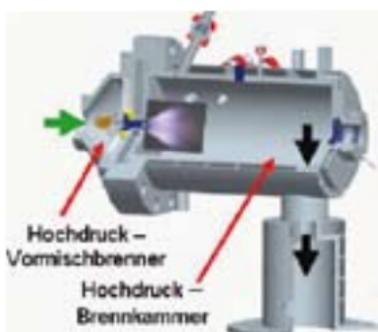
### **Arbeitskreissprecher:**

Armin Schimkat,  
ALSTOM Power Systems GmbH,  
Mannheim



## Thermoakustische Eigenschaften von LP- und LPP-Flammen (GV1)

Dieses Projekt hatte im ersten Schritt die Realisierung der Planung, Entwicklung und Inbetriebnahme einer neuen Hochdruckbrennkammer zum Thema, an der Untersuchungen zur Druckübertragungsfunktion unter erhöhtem Betriebsdruck durchgeführt und das Resonanzverhalten eines Helmholtz-Resonators identifiziert werden konnte. Damit wurde das Projektziel der Vorhersage der Druckübertragungsfunktion und der Skalierung des Dämpfungsmaßes in Abhängigkeit des Brennkammermitteldrucks erreicht. Im Anschluss konnte anhand von Flammenfrequenzgangsmessungen der Einfluss der wichtigsten Betriebsparameter auf das frequenzabhängige Reaktionsumsatzverhalten von Vormischdrallflammen unter atmosphärischen Bedingungen auch für dieses neue Brennerkonzept und somit als universell nachgewiesen werden. Mit der Hochdruckversuchsanlage war es möglich, eine Stabilitätskarte bezüglich des druckabhängigen Auftretens selbsterregter, periodischer Schwingungen erstmalig systematisch zu dokumentieren. Durch Weiterentwicklung des bereits zur Erklärung und Skalierung der dynamischen Flammencharakteristiken unter atmosphärischen Bedingungen vorgestellten und bewiesenen physikalischen Flammenmodells konnten abschließend die ermittelten kritischen Betriebsparameterkombinationen unter erhöhtem Betriebsdruck rechnerisch bestätigt werden. Damit war es möglich, alle für das Auftreten selbsterregter, periodischer Schwingungen kritische Betriebsparameterkombinationen auch unter erhöhtem Druck vorzuberechnen.



Neu entwickelte Hochdruck-Verbrennungsanlage



## Zünd- und Löschverhalten (GV2)

An einem in den Hochdruckbrennkammerprüfstand des DLR in Stuttgart implementierten, skalierten Gasturbinenbrenner der Fa. Alstom, fand die Untersuchung des Einflusses von längerkettigen Kohlenwasserstoffen und Wasserstoff auf die Stabilitätsgrenzen eines Vormischbrenners nahe der mageren Verlöschgrenze statt. An einer optisch zugänglichen Brennkammer wurden, mittels  $\text{OH}^*$ -Chemolumineszenz und planarer laserinduzierter Fluoreszenz, Flammenstrukturen in Erdgasflammen mit beigemischem Propan und Wasserstoff analysiert. In beiden Fällen konnte durch die Beimengung eine deutliche Erweiterung des Stabilitätsfeldes des Brenners hin zu mageren Brennstoff-Luft-Gemischen beobachtet werden. An ausgewählten Flammen kam erstmals ein-dimensionale Laser-Raman-Streuung zur simultanen Bestimmung der Hauptspezieskonzentrationen, des Mischungsbruches und der Temperatur zur Anwendung. Die Ergebnisse zeigten Variationen des Mischungsbruches aufgrund der technischen Vormischung in Abhängigkeit der Position in der Flamme.

Weiterhin fanden Untersuchungen zum Einfluss von Wasserstoff,  $\text{NO}_x$  und Wasser auf das Zündverhalten von Erdgas sowie ein Synthesegasgemisch aus Wasserstoff und  $\text{CO}$  statt, indem die Zündverzugszeiten mit verschiedenen Reaktionsmechanismen berechnet und mit Ergebnissen aus Experimenten an einem Stoßwellenrohr validiert wurden. Dabei konnten Mechanismen bestimmt werden, die die Zündverzugszeiten sehr gut wiedergeben und somit geeignete Werkzeuge für die Brennkammersimulation darstellen.

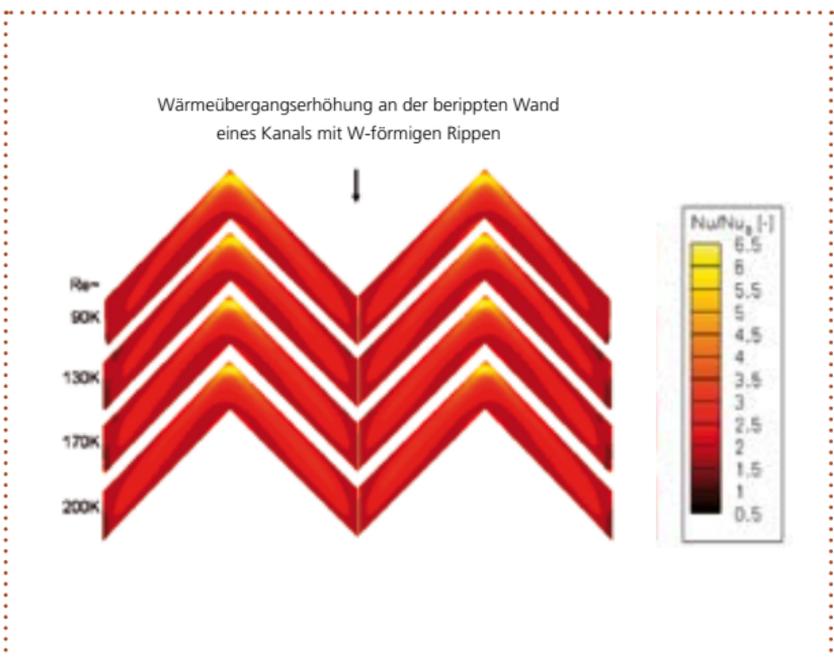


Blick auf die Brenneröffnung in der optisch zugänglichen Brennkammer des Hochdruckprüfstands



## Effiziente konvektive Kühlkonzepte für Gasturbinenbrennkammern (GV3)

Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen moderne konvektive Kühlkonzepte für die Kühlung der Brennkammerwand einer industriellen Gasturbine. Dafür wurden numerische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen vorgenommen, um den Druckverlust und die Wärmeübergangserhöhung für die in Frage kommenden Konfigurationen zu ermitteln. In allen numerischen Untersuchungen kamen kompakte periodische Rechengebiete mit einem kommerziellen Strömungslöser (FLUENT™) für die Analyse zur Anwendung. Die Experimente liefen ab im Windkanal an V-, W-, WW- und WWWW-förmige Rippen, sowie an Hemisphären und Halbkugelschalenelementen (Dimples). Dabei kam eine transiente Messmethode mit thermochromatischen Flüssigkristallen zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigten, dass diese neuen Kühlkonzepte - im Vergleich zu bis dato üblichen Techniken bei der Brennkammerkühlung - eine erwünschte Reduzierung des Druckverlustes bei gleichzeitiger Erhöhung des Wärmeübergangs erreichen können. Die W-förmigen Rippen stellen dabei die beste Lösung dar und können einen Beitrag zu umweltfreundlicheren, und effizienteren Gasturbinen leisten.



Wärmeübergangserhöhung an der berippten Wand eines Kanals mit W-förmigen Rippen

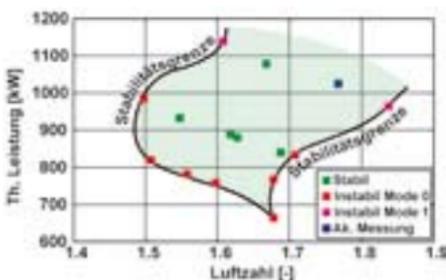


## Ringbrennkammerschwingung (GV4)

Gegenstand des Projektes waren Untersuchungen, inwieweit sich die dynamischen Eigenschaften von gasturbinentypischen Vormischflammen in Testkonfigurationen (Einzelbrenner im Rohr) von denen in maschinentypischen, ringförmigen Mehrbrennerkonfigurationen unterscheiden.

Durch den Übergang auf den vorgeheizten Betrieb und auf konische Vormischbrenner gelang es, nicht nur die Einzelbrennkammer, sondern auch die Versuchsringbrennkammer thermoakustisch stabil zu betreiben, eine Vorbedingung für die Tests mit Sirenenanregung. Im Vorhaben gelangte sowohl der extern vorgemischte Fall, sowie der technisch relevantere Fall der Brennstoffeindüsung in den Drallerzeugern zur Untersuchung. Für die Bestimmung der Flammentransferfunktionen kam eine Modellbasierte Methode in Kombination mit einem Flammenmodell zur Anwendung. Dabei bestätigte sich, dass sich die verwendete Formulierung mit freien Parametern für die Beschreibung der Flamme in beiden Konfigurationen eignet.

Die Experimente haben gezeigt, dass es bei beiden Injektionsszenarien substantielle Unterschiede sowohl in den stationären Wärmefreisetzungsverteilungen als auch in den Flammentransferfunktionen gibt. Der Hauptgrund hierfür liegt in unerwartet großen Abweichungen der Strömungsfelder trotz identischen Flächenverhältnisse in beiden Fällen: In der Einzelbrennerkonfiguration wird der aufplatzende Drallstrahl von den Brennkammerwänden angesaugt und es bildet sich eine voluminöse Rückströmzone, während dieser Effekt in der Ringbrennkammer nicht auftritt.



RBK: Stabilitätskarte des EV5 Brenners in der Ringbrennkammer bei der Vorwärmungstemperatur von 300 °C

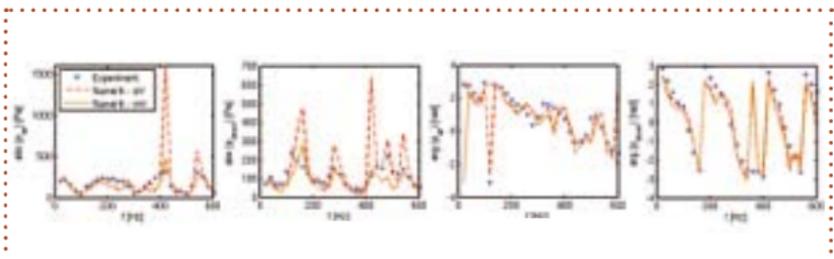


## Designsystem (GV5)

Ziel dieses Teilprojekts war die Weiterentwicklung eines Auslegungswerkzeugs zur Vorhersage selbsterregter Brennkammerschwingungen auf Basis der Wellengleichung.

Für erste Stabilitätsuntersuchungen fand zunächst eine Anpassung bestehender Modelle an eine MTU-Konfiguration, sowie an die deutlich veränderte Programmierumgebung statt. Um das zugrunde liegende Gleichungssystem zu optimieren, erfolgte eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Terme der Wellengleichung bzw. der linearisierten Eulergleichungen. Mittels der Generierung entsprechender Interfaces ließ sich die Geometrie der Flamme und die Dichteverteilung aus CFD-Daten realistisch erfassen. Darüber hinaus wurde zur realitätsnahen Beschreibung des Energiehaushalts der Schwankungen einerseits das Flammenmodell hinsichtlich der Betrachtung von Luftzahlschwankungen erweitert. Andererseits war ein Ziel, die im System auftretenden Verluste zu quantifizieren. Dies umfasste neben der Betrachtung numerischer Verluste insbesondere die Implementierung strömungsbedingter akustischer Verluste. Entsprechende Daten wurden aus einer stationären CFD-Rechnung abgeleitet und ebenfalls mittels eines Interfaces eingebunden. Zur Berücksichtigung komplexer Verluste an den Rändern gelangte der Transfer verschiedener frequenzabhängiger Randbedingungen in die Berechnungen im Zeitbereich zur Realisierung.

Somit konnte im Laufe des Vorhabens das Berechnungsverfahren deutlich erweitert und verbessert werden. Zudem gelang dabei der Aufbau eines umfangreichen Wissens zum Potential und zu den Grenzen der Methode.



Druckschwankungsverteilung des Brenners

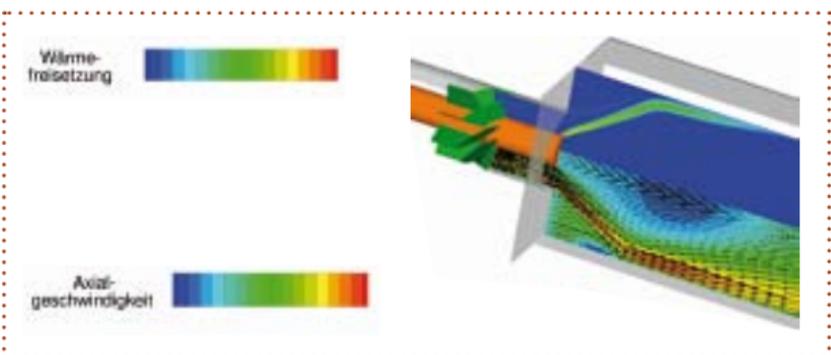


## Dynamik von Vormischflammen (GV6)

Gasturbinen sind eine Kernkomponente moderner GuD Kraftwerke, die zur hocheffizienten, emissionsarmen Stromerzeugung eingesetzt werden. In einer Gasturbinen-Brennkammer können *thermoakustische Instabilitäten* auftreten, die zu erhöhten Emissionen oder gar mechanischen Schäden führen. Bei der Entwicklung neuer Technologien können diese nur sehr schwer zuverlässig vorhergesagt werden.

Das Ziel des Teilprojekts *Dynamik von Vormischflammen* war die Validierung und Weiterentwicklung einer Methode, mit der sich die dynamischen Eigenschaften einer Flamme, welche gewissermaßen den *Schlüsselstein* der Instabilität darstellen, durch Computersimulation charakterisieren lassen. Ausgehend von einer numerischen Modellierung der turbulenten Verbrennung werden mit Methoden der Systemtheorie, wie sie in der Regelungstechnik entwickelt wurden, die für eine Stabilitätsvorhersage relevanten Eigenschaften identifiziert. Die Verknüpfung dieser beider Methoden ist ein Novum, ermöglicht es doch das Potential beider Disziplinen zu kombinieren.

Experimentelle sowie numerische Untersuchungen eines Versuchsbrenners haben eine detaillierte, umfassende Validierung der Methode ermöglicht und darüber hinaus maßgeblich zum Verständnis der physikalischen Zusammenhänge beigetragen. Die Ergebnisse belegen einerseits das Potential des Ansatzes, haben aber auch Defizite der verwendeten Simulationsmodelle aufgezeigt. Die Methode ist als Computerprogramm verfügbar und bereits bei den Industriepartnern des Projektes im Einsatz.



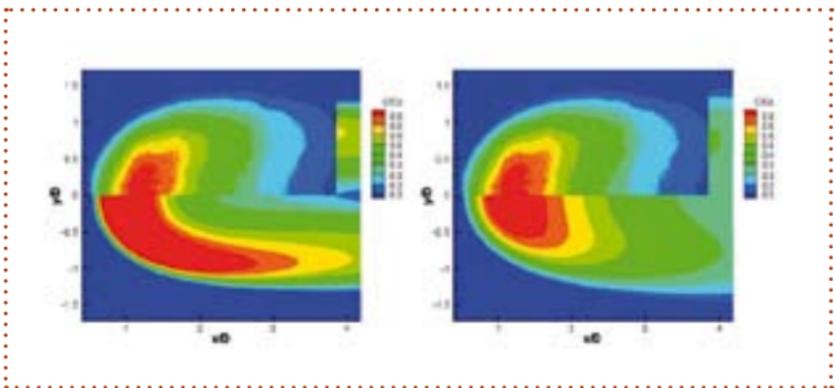
Computersimulation eines drallstabilisierten Brenners mit Wärmefreisetzung und Geschwindigkeitsfeld



## Turbulente Mischung (GV7)

Ziel des Projektes GV7 war die numerische und experimentelle quantitative Erfassung turbulenter Mischungsvorgänge am Beispiel der Querstrahleinmischung. Hierzu wurden zwei Experimente aufgebaut, die die Erfassung der turbulenten Mischung in einem ebenen und einem gekrümmten Kanal erlauben. Die eingesetzten optischen Messmethoden waren LDA (Laser Doppler Anemometrie) und PIV (Particle Image Velocimetry) zur Vermessung der Geschwindigkeiten, sowie LIF (Laser induzierte Fluoreszenz) zur Erfassung der Mischung.

Durch eine gleichzeitige Messung des Geschwindigkeitsfeldes mit PIV und der Konzentration mit LIF ist es zum ersten Mal gelungen für das Problem der Querstrahleinmischung, die so genannten Reynoldsflüsse  $\overline{u' \cdot \sigma}$ , experimentell zu bestimmen. Diese Größen sind deswegen wichtig, weil dadurch der turbulente Mischungsprozess gesteuert wird. Um die Unzulänglichkeiten gängiger Simulationsmethoden (RANS/URANS) zu quantifizieren, wurde neben den experimentellen Daten durch ein hoch auflösendes numerisches Verfahren (DES) eingesetzt. Basierend auf diesen Ergebnissen konnte eine einfache Erweiterung der RANS Modellierung entwickelt werden, welche die experimentellen Daten mit hoher Genauigkeit wiedergibt. Bei der vorgeschlagenen Erweiterung wird zusätzlich eine weitere Transportgleichung für die turbulente Viskosität berechnet. Diese Erweiterung lässt sich vergleichsweise einfach in kommerzielle Codes integrieren, ohne dass die Robustheit des Codes darunter leidet.



Normierte Konzentrationen  $c/C_0$ ; links Standard  $k-\epsilon$ -Modell, rechts neu entwickeltes Modell; obere Hälfte zeigt jeweils LIF-Messung, untere Hälfte berechnete Werte



## Turbulenz-Chemie-Wechselwirkung (GV8)

In diesem Vorhaben wurden Untersuchungen an einem industriellen Gasturbinenbrenner in einer optisch zugänglichen Brennkammer mit Lasermesstechniken durchgeführt, und insbesondere das Verfahren der 1D Laser-Raman-Streuung für diese Anwendung weiterentwickelt. Es wurde eine Brennkammer konstruiert, die auf vier Seiten mit großen Quarzfenstern versehen ist, und zusammen mit dem Gasturbinenbrenner der Firma Siemens in den Hochdruckbrennkammerprüfstand des DLR Stuttgart eingebaut. Neben Abgasmessungen mit Sondentechniken wurden die Flammenstrukturen mit Chemolumineszenz-Aufnahmen bestimmt, das Strömungsfeld mit Particle Image Velocimetry vermessen und die Hauptspezieskonzentrationen simultan mit der Temperatur durch 1D Laser-Raman-Streuung bestimmt. Die Gesamtheit der Messdaten aus unterschiedlichen Erdgas/Luft-Flammen mit thermischen Leistungen bis 1 MW und Drücken bis 6 bar bildet einen umfangreichen Datensatz, der zum einen für die Validierung numerischer Simulationsrechnungen eingesetzt wird, zum anderen aber auch die Wechselwirkung zwischen dem turbulenten Strömungsfeld und dem chemischen Reaktionsablauf widerspiegelt. Für einen industriellen Gasturbinenbrenner konnten hier erstmals der Mischungs- und Reaktionsfortschritt quantitativ erfasst werden und kinetische Effekte („Finite-Rate Chemistry“) wie lokale Flammenlöschung und Zündverzug durch korrelierte Messdaten aufgezeigt werden.



Laserpulsstreckter des 1D-Raman-Messsystems während des Betriebs



## Pilotierte Vormischflamme (GV9)

Das Projekt befasste sich mit der Wechselwirkung zwischen der Pilotgaseindüsung und der mageren Vormischflamme eines Gasturbinenbrenners. Durch detailliertes Verständnis der stabilisierenden Wirkung des Pilotgases sollte dessen Einsatz optimiert werden, um so die Stickoxidemission des Systems zu senken. Dazu erfolgte der Aufbau eines atmosphärischen Einzelbrennerprüfstandes für den beispielhaft betrachteten Brenner der Firma Siemens. In dieser nicht-adiabaten Brennkammer bestand die Möglichkeit, die Stabilität der Flamme durch die definierte Zugabe von Kühlluft in den Brennraum gezielt zu beeinflussen. Mit akustischen und laseroptischen Methoden ließen sich Betriebszustände mit und ohne Flammeninstabilitäten charakterisieren. So wird die Wirkung der Pilotflamme auf die magere Vormischflamme deutlich. Für die nahe der Magerverlöschgrenze untersuchten Drallflammen wurde festgestellt, dass die Zugabe von Pilotgas die großräumige Form des Strömungsfeldes entscheidend verändert. Es gelang der Nachweis, dass das Aufplatzen der Strömung, und damit die Ausbildung einer großräumigen inneren Rezirkulationszone, durch das Pilotgas gefördert wird. Diesem Effekt wird zugeschrieben, dass Flammen mit Pilotierung deutlich weniger Lärm emittieren und bei tendenziell mageren Mischungsverhältnissen verlöschen.

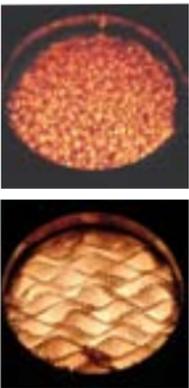


Die Brennkammer im Betrieb. Blick durch den Brenner auf die Flamme.  
Betriebstemperatur: 1500 °C



## NO<sub>x</sub>-Reduktion (GV10)

Da bei Gasturbinen die vorgemischte Verbrennung zu Verbrennungsinstabilitäten führt, werden die vorgemischten Hauptbrenner von diffusen Pilotbrennern unterstützt. Um die Entstehung von thermischem NO<sub>x</sub> zu verringern, gelang es in Zusammenarbeit mit der Siemens AG Power Generation, das Konzept eines voll-vorgemischten Pilotbrenners auf Basis der Porenbrennertechnologie zu entwickeln. Dazu kamen Prototypen innovativer Pilotbrenner für den konkreten Einsatz in einer Gasturbine zur Bemessung und Auslegung. Auf Basis der ersten Versuchsergebnisse wurden die Pilotbrenner einem Re-Design unterzogen und bei atmosphärischem und erhöhtem Druck charakterisiert und ihre Funktionsfähigkeit nachgewiesen. Die beiden untersuchten Keramikmaterialien Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Si-SiC unterscheiden sich signifikant in ihrem Betriebsverhalten. Die nach der Implementierung des Pilotbrenners in einen Gasturbinenbrenner durchgeführten Hochdruckversuche, führten zu einer lokalen Überhitzung der Porenstruktur. Ursache hierfür war die mangelnde Homogenität des Brennstoff-Luft-Gemisches. Durch umfangreiche numerische Berechnungen wurde die Gemischbildung optimiert und die Brennstoffzufuhr konstruktiv verändert. Die letzte Phase des Projektes behandelte die Skalierung der Pilotbrenner und ihre Charakterisierung unter atmosphärischen Bedingungen. Das wesentliche Ziel des Nachweises, die Pilotbrenner auch bei hohem Druck mit sehr geringen NO<sub>x</sub>-Emissionen zu betreiben, ließ sich im Laborversuch erreichen.



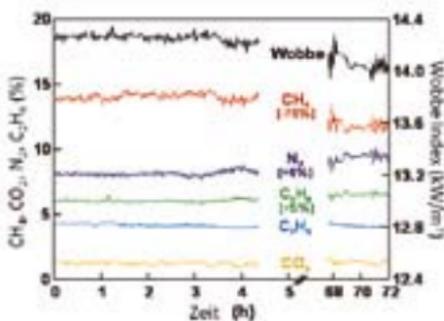
SiSiC-Schaumkeramik und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mischerstruktur während des Betriebs, Pilotbrenner verschiedener Leistung



## Online Messsystem (GV11)

Das Vorhaben hatte das Ziel, eine für den industriellen Einsatz taugliche On-Line Messtechnik zur Analyse von Erdgas auf Basis der Raman-Technik zu konzipieren und zu testen. Nach einer umfangreichen Evaluation der Vor- und Nachteile verschiedener optischer Grundanordnungen und der Komponenten, gelang es den optimalen Aufbau zu finden und als Prototyp zu realisieren. Hand in Hand ging die Weiterentwicklung der Auswertesoftware und die Abstimmung mit den Hardwarekomponenten. So konnte ein Auswertemodul entwickelt werden, mit dem aus den Raman-Spektren der Erdgasproben automatisch die Spezieskonzentrationen, Heizwert und Wobbeindex nach DIN 51857 berechnet werden.

Nach den Systemtests wurde das automatisch arbeitende Sensor-konzept im Rheinhafen-Dampfkraftwerk, Block 4, in Karlsruhe mit Unterstützung der EnBW AG erfolgreich getestet. Der Messort lag in direkter Nachbarschaft zur Gasturbine, so dass der Sensor ständigen Vibrationen und Temperaturschwankungen im Rahmen eines 100 Stunden Dauertests ausgesetzt war. Die Messdaten wurden mit den Resultaten eines vorhandenen parallel laufenden Gaschromatographen (GC) verglichen. Dabei lag die Messgenauigkeit für beide Geräte bei ca. 0,01 Vol%. Das Ramansystem lieferte eine wesentlich höhere Datenrate von 30 s, im Gegensatz zu 30 min für den Gaschromatographen.



Einsatz der neuen Online-Messtechnik, zeitlicher Verlauf des Wobbeindex und Spezieskonzentrationen gemessen an der Versorgungsleitung einer Gasturbine



## Elektrische Felder (GV12)

Dieses Projekt griff die Idee der Kontrolle von vorgemischten Flammen mittels elektrischer Hochspannungsfelder auf, um die technische Realisierbarkeit in Gasturbinenbrenner-Systemen im Kraftwerksbereich zu überprüfen. Zielsetzung war zum einen eine Verminderung der Schadstoffemissionen und zum anderen eine Erweiterung des Betriebsbereichs sowie eine Möglichkeit zur aktiven Flammensteuerung. Zur Abbildung der technisch relevanten Parameter, wie z. B. bei höheren Drücken oder Luftvorwärmung, wurde ein Hochdruckverbrennungsprüfstand mit einer thermischen Leistung bis 100 kW an die Aufgabenstellung angepasst und ergänzt. Die unter technisch relevanten Bedingungen durchgeführten Messungen zeigten, dass bei der gewählten Konfiguration Flammen durch elektrische Felder gezielt kontrolliert und somit stabilisiert werden können. Weiterhin ließ sich demonstrieren, dass drall stabilisierte Flammen, welche häufig in Gasturbinenbrennern eingesetzt werden, auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzgraden beeinflusst werden können. Darüber hinaus konnte durch Optimierung der Elektrodenanordnung eine wesentliche Verbesserung des Effektes erreicht werden. Die im Vorfeld getroffenen Annahmen hinsichtlich der aktiven periodischen Flammenkontrolle haben sich bestätigt und ergaben ebenfalls ein hinreichendes Potential für eine technische Realisierung. Die Autoren bewerten daher eine spätere industrielle Nutzung als aussichtsreich, und sehen ein großes Potential für die gezielte Anwendung im Gasturbinenbereich. Die nächsten Schritte zur technischen Umsetzung sollten daher Tests an realen Gasturbinen-Prüfständen sein, um die in diesem Teilprojekt erzielten Ergebnisse großtechnisch zu verifizieren.



Eigenleuchtenaufnahme einer Drallflamme ohne (links) und mit (rechts) aktivem elektrischen Feld

## Die Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts



Die Forschungsinitiative „Kraftwerke des 21. Jahrhunderts“ (KW 21) startete am 1. Juli 2004, zum 31. Dezember 2008 ist die erste Forschungsphase nun abgeschlossen. Die in den einzelnen Teilprojekten erzielten Ergebnisse sind Gegenstand dieser Broschüre. Ab 1. Januar 2009 schließt eine zweite vierjährige Phase mit neuen Projekten an.

Inhalt der ersten Phase von KW21 waren neue Technologien für mit fossilen Brennstoffen betriebene Dampf-, Gas- und Kombikraftwerke, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen aber ebenso auch energiewirtschaftliche Analysen und Strategien aus betriebswirtschaftlicher, volkswirtschaftlicher und ökologischer Perspektive. So ließ sich sicherstellen, dass technologische Entwicklungen sich gegenseitig sinnvoll ergänzten und Themen wie Energieeffizienz, NO<sub>x</sub>-Reduktion oder CO<sub>2</sub>-Abscheidung immer im Kontext der technologischen, betriebswirtschaftlichen, ökologischen und gesamtgesellschaftlichen Betrachtungsweisen angegangen wurden.

20 Forschergruppen arbeiteten mit 9 Industriepartnern an 36 Projekten, die in fünf Arbeitskreisen zusammengefasst sind:

- Energiewirtschaft
- Kraftwerkssysteme und Dampferzeuger
- Fluidodynamik und Dampfturbine
- Hochtemperaturkomponenten in Turbomaschinen
- Brennkammern für Gasturbinen

### **KW21 dankt seinen Förderern**

- Baden-Württembergische Zukunftsoffensive III
- Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
- Bayerische Forschungstiftung

### **Wissenschaftliche Partner**

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.
- TU München
- Universität Erlangen-Nürnberg
- Universität Karlsruhe
- Universität Stuttgart

### **Partner aus der Industrie**

- ALSTOM Power Systems GmbH
- E.ON Energie AG
- EnBW Kraftwerke AG
- Esytec Energie- und Systemtechnik GmbH
- MTU Aero Engines GmbH
- promeos GmbH
- SGL Carbon AG
- Siemens AG
- Voith-Siemens Hydro Power Generation GmbH & Co. KG

### **Redaktion:**

Dr. Günther Weiß, Bayerische Forschungsallianz GmbH



### **Gestaltung und Druck:**

abc cross media GmbH



Forschungsinitiative  
Kraftwerke des 21. Jahrhunderts

**[www.abayfor.de/kw21](http://www.abayfor.de/kw21)**

abayfor

Arbeitsgemeinschaft der Bayerischen  
Forschungsverbände

c/o Bayerische Forschungsallianz GmbH  
Nußbaumstraße 12

80336 München

Tel.: (089) 9901 - 888 0

Fax: (089) 9901 - 888 29

Mitglied der Arbeitsgemeinschaft

der Bayerischen Forschungsverbände



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Verbrennungstechnik

Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart

Tel.: (0711) 6862 309

Fax: (0711) 6862 578