

Sektorkopplung Gas und Strom: Künftige Herausforderungen für die Verstromung regenerativ gewonnenen Gases

Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume

8. November 2017



Überblick

1. Herausforderungen des gekoppelten Systems
2. Künftiges Gasversorgungssystem
3. Künftige thermische Kraftwerke
4. Forschungsverbund und Forschungsbau „Dynamik der Energiewandlung“
5. Fazit

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung
Thermische
Kraftwerke
Dynamik der
Energiewandlung
Fazit

Skalierte tägliche Lastkurven im Jahr 2022 (auf Basis 2012)

Zielwerte für Anteil erneuerbare Energie nach EEG:

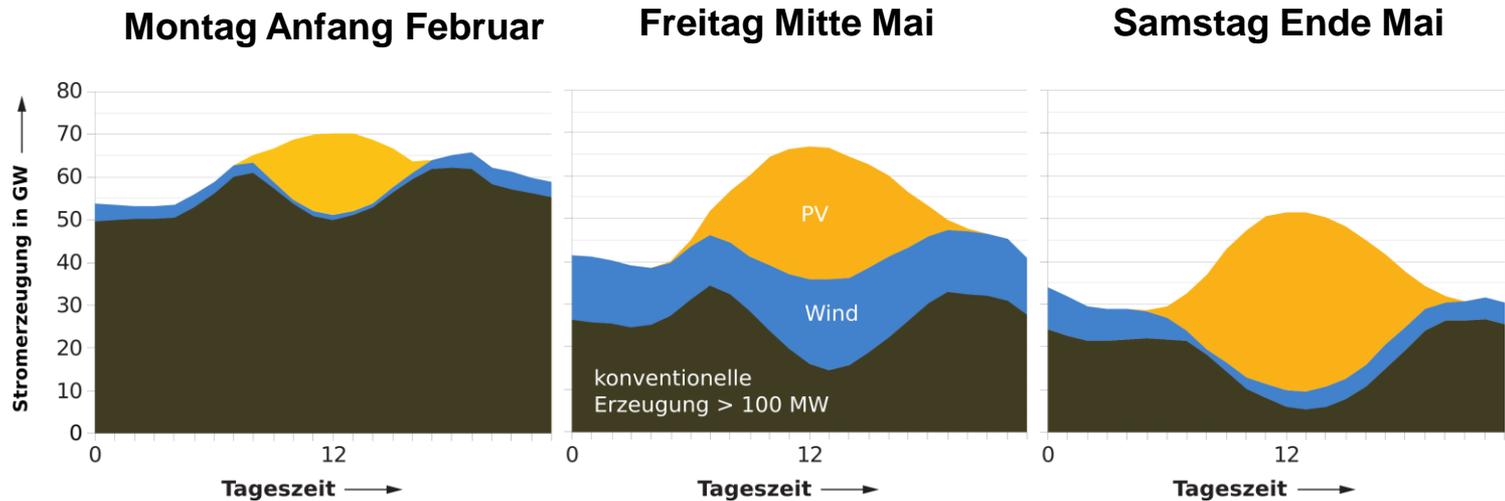
- 35% in 2020
- 80% in 2050

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

**Herausforderungen
Gasversorgung
Thermische
Kraftwerke**

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit



- Anteile erneuerbarer schwanken je nach Jahreszeit, Wochentag und Tageszeit
- Teilweise vollständige Abdeckung durch konventionelle Erzeuger
- ➔ **Deckungslücken/Residuallast in Folge geringer Planbarkeit**

Volatilität erneuerbarer Energien: Beispiel Windenergie

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

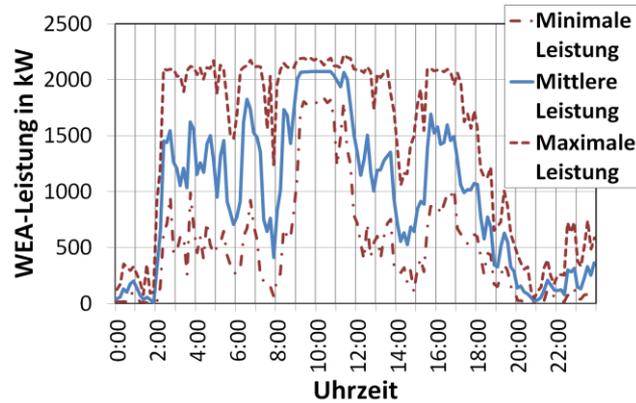
Herausforderungen

Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

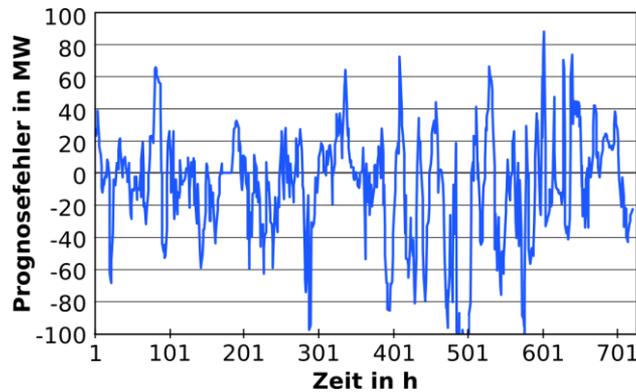
Dynamik der
Energiewandlung

Fazit



Schwankungen

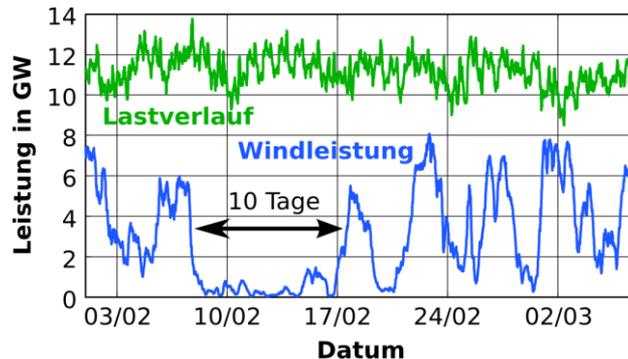
10-Minuten-Mittelwerte der elektrischen Leistung einer 2 MW Windenergieanlage nahe Hannover am 01.02.2014



Quelle: EURELECTRIC (2011)

Prognostizierbarkeit

Stündliche Differenz zwischen prognostizierter und tatsächlicher Leistung des 160 MW Offshore-Windparks Horns Rev 1



Quelle: IfR/TU Braunschweig (2009)

Langzeit-Flaute

Lastverlauf und erzeugte Leistung durch Windenergieanlagen in Vattenfall-Regelzone 2008

Absicherung der Energiewende

- Abdeckung der Residuallast
- mittels flexibler thermischer Kraftwerke
 - Teillastbetrieb
 - Transienter Betrieb

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen

Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit



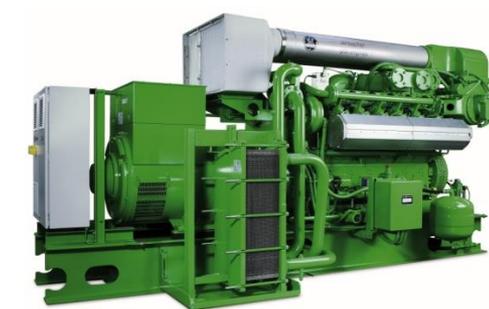
Quelle: ENERCON



Quelle: Siemens



Quelle: sonnenhungrig

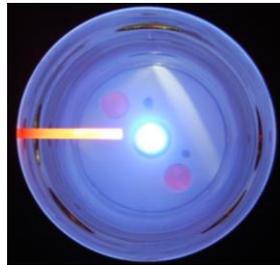


Quelle: GE Jenbacher

Programmatik

Themenbereich I

Dynamik der chemisch-thermischen Energiewandlung



Gasbrenner mit Sonde

Themenbereich II

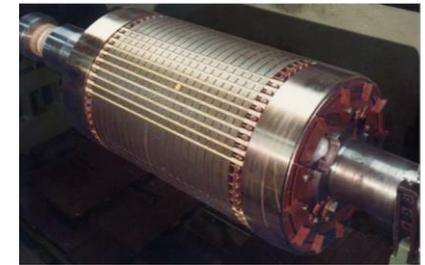
Dynamik der thermisch-mechanischen Energiewandlung



Axialturbine

Themenbereich III

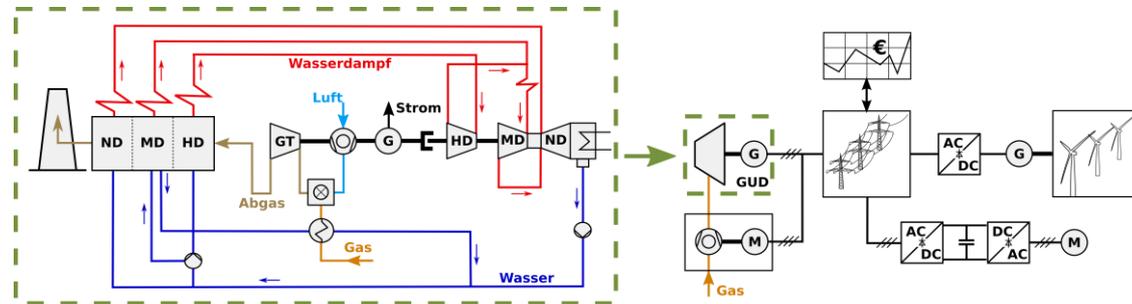
Dynamik der mechanisch-elektrischen Energiewandlung



Läufer Synchronmotor

Themenbereich IV

Dynamische Kopplung der Energiewandlungsprozesse



Themenbereich V

Energiemärkte

Sektorkopplung Gas und Strom:
Künftige Herausforderungen für die Verstromung regenerativ gewonnenen Gases

Herausforderungen Gasversorgung

Thermische Kraftwerke

Dynamik der Energiewandlung

Fazit

Komponenten des gekoppelten Energiesystems

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

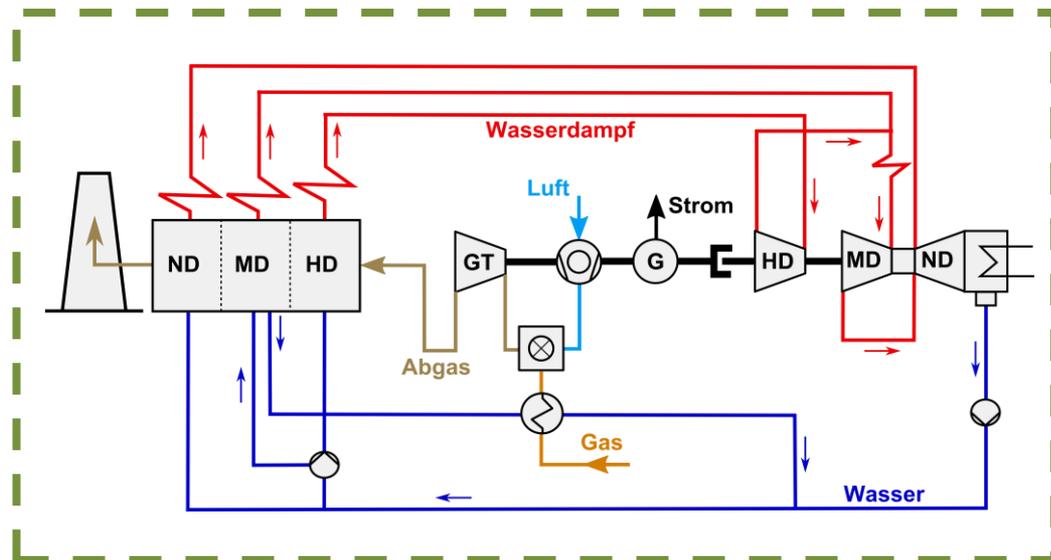
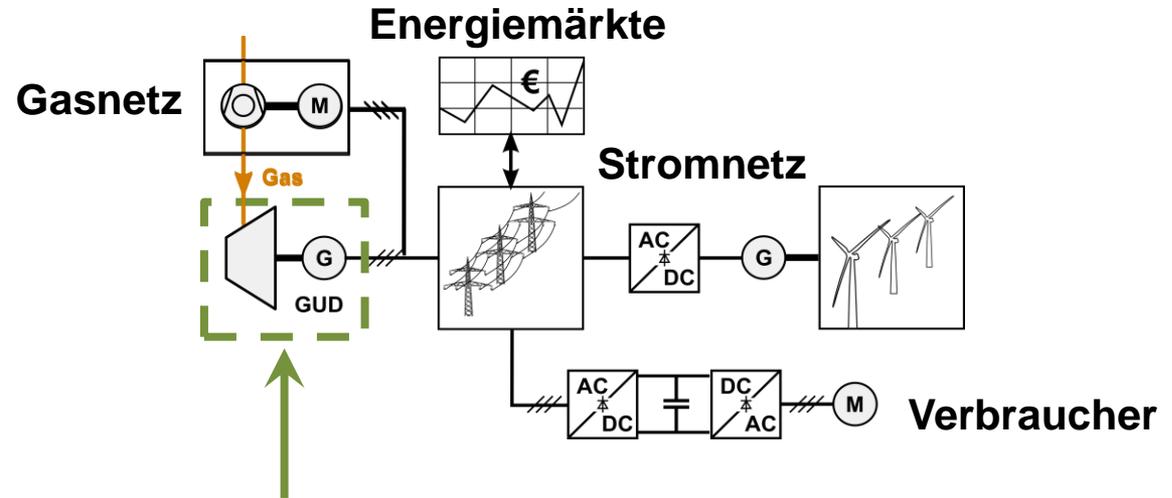
Herausforderungen

Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit



Konvergenz Strom-Gasnetze¹

Bestimmung der Systemdynamiken im gekoppelten Strom-Gassystem

- Gesamtsystemanalyse der überregionalen Gasversorgung
- Bestimmung der Leistungs- und Dynamikanforderungen von Gaskraftwerken in künftigen Energiesystemen mit hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energieeinspeisung
- Standortanalyse und –bewertung von Gaskraftwerken

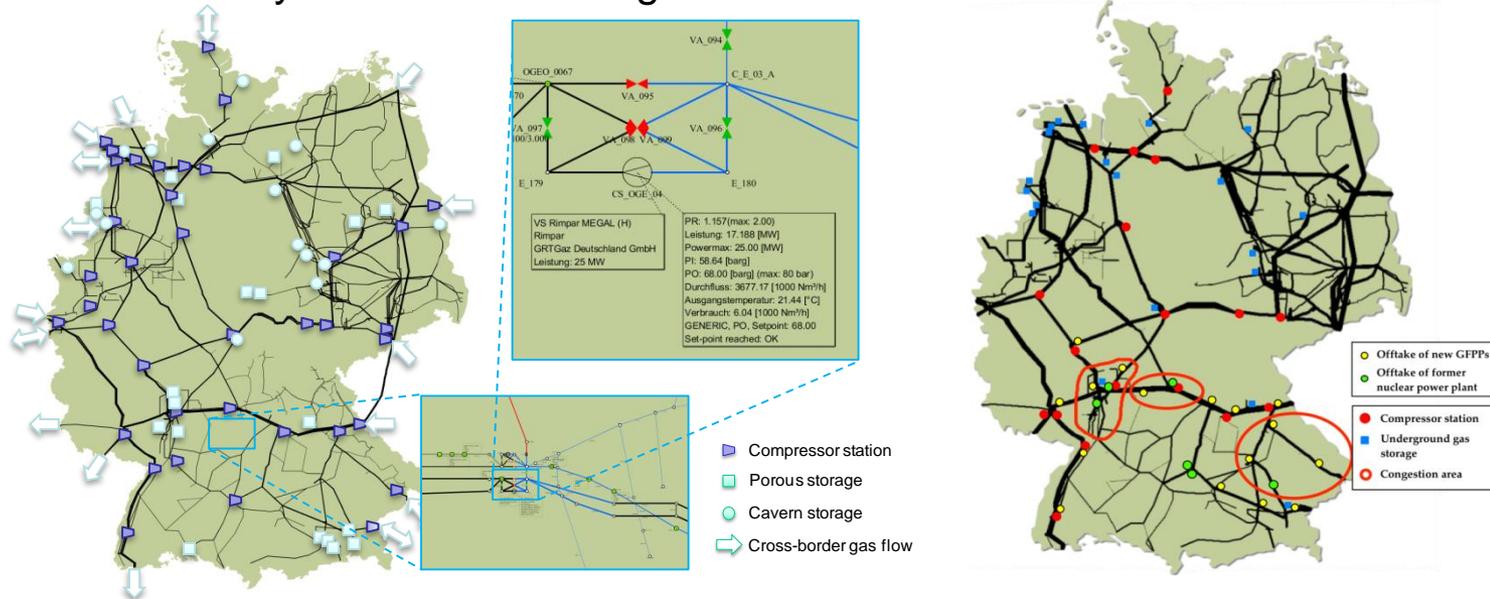
**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit



*Hydraulisches Modell des deutschen
Gastransportsystems (H-Gas)*

*Gasnetzengpässe durch neue Gaskraftwerke an
Kernkraftwerksstandorten in Süddeutschland*

1. Forschungsprojekt „Integration fluktuierender erneuerbarer Energien durch konvergente Nutzung von Strom und Gasnetzen – Konvergenz Strom- und Gasnetze“, Fördermittelgeber BMU, FKZ 0325576E, 08/2013 – 01/2016
2. **Müller-Kirchenbauer, J.**; Gorshkov, A. (2013): Possible Locations for Gas-Fired Power Generation in Southern Germany. in: M. Hou, H. Xie, P. Were. (Hrsg.), Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion - Proceedings of the 3rd Sino-German Conference “Underground Storage of CO₂ and Energy”, Goslar, Germany, 21-23 May 2013; Springer Berlin Heidelberg; S. 437-450

Wasserstoffeinspeisung in das Erdgas-Versorgungssystem

Systemanalyse der Wasserstoffeinspeisung¹

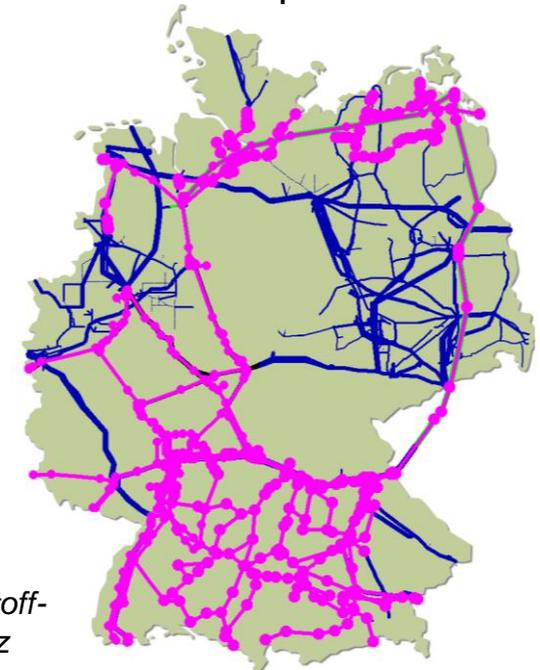
- Verteilung von Wasserstoff unter Berücksichtigung verschiedener Erdgas-Versorgungsszenarien
- Standortgenaue Bestimmung von Wasserstoffkonzentrationen im Gasnetz
- Interaktion der Einspeisung mehrerer Wasserstoffherzeuger

Materialtechnische Analysen

- Untersuchungen zur Wasserstoffverträglichkeit einzelner Komponenten im Erdgas-Versorgungssystem



Wasserstoff-Einspeiseanlage in das Erdgasnetz
(Falkenhagen, Brandenburg)



Simulation der Wasserstoff-
Verteilung im Erdgasnetz

1. Müller von der Grün, Götz; Hotopp, Steven; **Müller-Kirchenbauer, Joachim** (2013): Transport and Usage of Hydrogen via Natural Gas Pipeline Systems. In: Hou, Michael Z.; Xie, Heping; Were, Patrick (Hrsg.): Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion - Proceedings of the 3rd Sino-German Conference Underground Storage of CO₂ and Energy, Goslar, Germany, 21-23 May 2013; Springer Berlin Heidelberg

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit

Dynamischer Betrieb von Gasdruckregelstationen

Bedeutung für Dynamisierung

- Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen für das Stromversorgungssystem
- Verbesserte Energieeffizienz, Reaktionsfähigkeit und Flexibilität des Gasversorgungssystems
- Steigerung der Wirtschaftlichkeit



Axialverdichter für den Gastransport



Elektromotor für den Verdichtereinsatz



Erdgas-Entspannungsanlage in Arlesheim, CH

Folgen

- Hoch-Flexible **Verdichteranlagen** und **Entspannungsturbinen**
 - Weites Kennfelds hinsichtlich Druckverhältnis und Volumenstrom
 - Hohe Effizienz in einem weiten Kennfeldbereich
 - Hohe Regelbarkeit von elektrischen An- und Abtrieben
- Betriebsfestigkeit und Wirtschaftlichkeit im hochdynamischen Wechselbetrieb

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit

Komponenten des gekoppelten Energiesystems

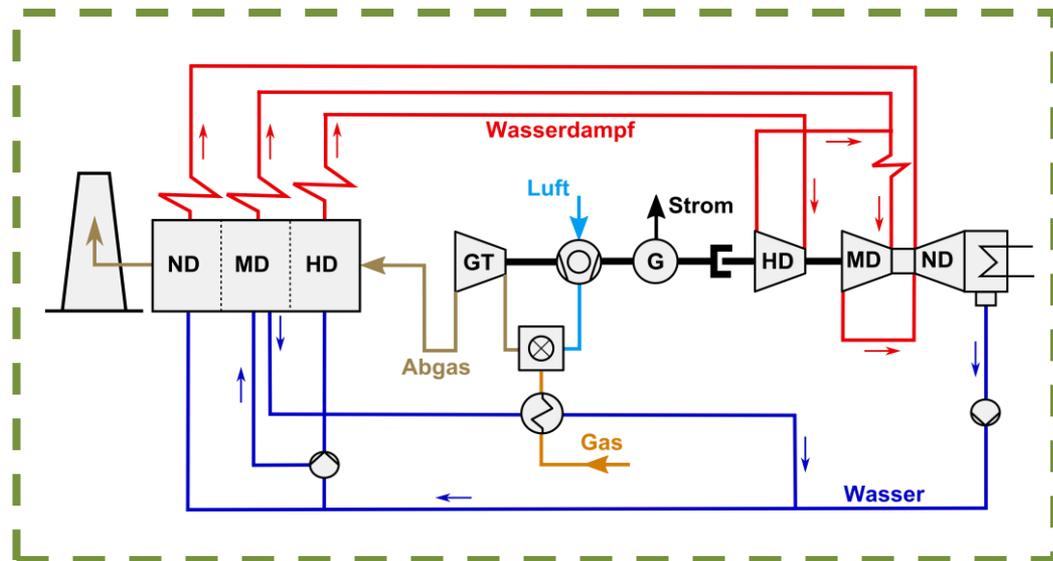
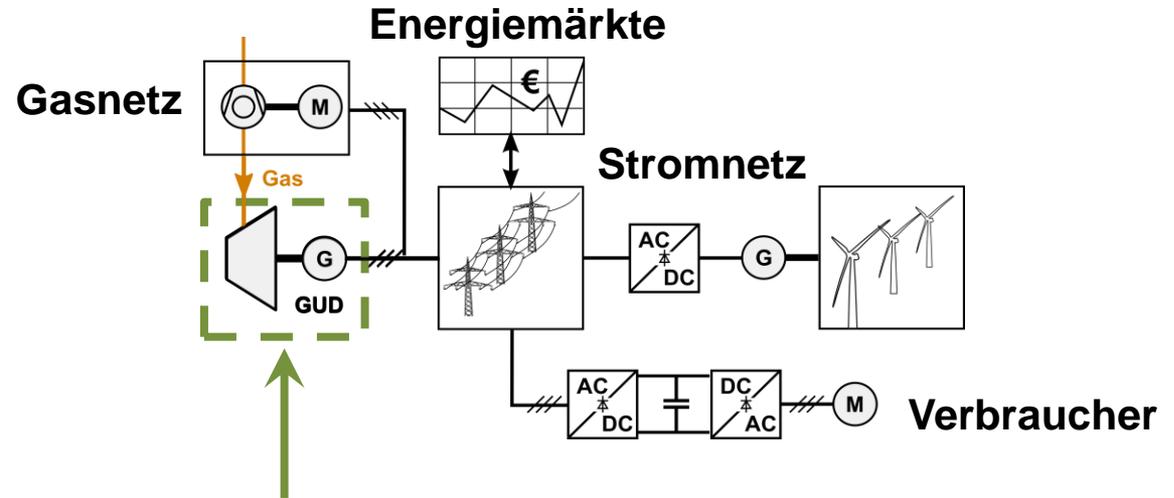
Sektorkopplung Gas und Strom:
Künftige Herausforderungen für die Verstromung regenerativ gewonnenen Gases

Herausforderungen Gasversorgung

Thermische Kraftwerke

Dynamik der Energiewandlung

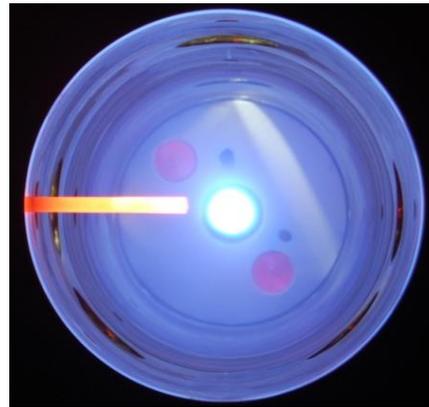
Fazit



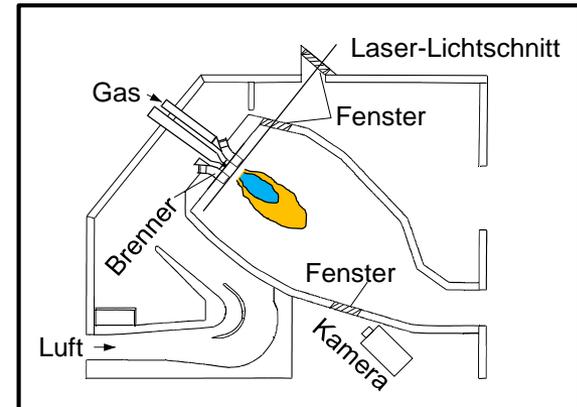
Forschungslinie Verbrennung: Beispiel Gasturbinen

Bedeutung für Dynamisierung

- Chemische Energiespeicherung hat hohes Potential (Power-to-Gas)
- Brennstoff-Variabilität (H_2 -Anteil durch Power-to-Gas/ Biogas)
- Brenner zukünftig durch Leistungspreizung oft weit abseits des Auslegungspunkts und durch Transienten nicht in thermischer Beharrung



Draufsicht Flamme eines Gasbrenners mit Sonde



Gasturbinen-Brennkammer für optische Vermessung

Folgen

- Probleme mit Flammenstabilisierung
 - Flammenrückschlag
 - Verlöschung
 - Thermoakustische Schwingungen
- Probleme mit Ausbrand
 - CO
 - HC-Emission

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung

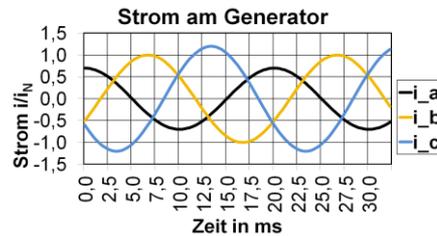
**Thermische
Kraftwerke**

Dynamik der
Energiewandlung

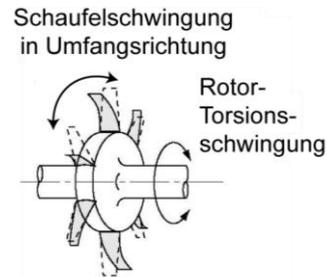
Fazit

Bedeutung für Dynamisierung

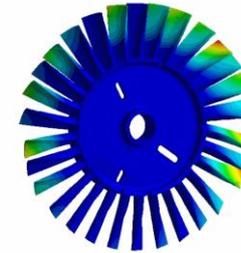
Transformiertes Energiesystem führt zu transientem Betrieb, leichteren Bauformen, Strömungsinzidenzen und Oberschwingungen im Stromnetz



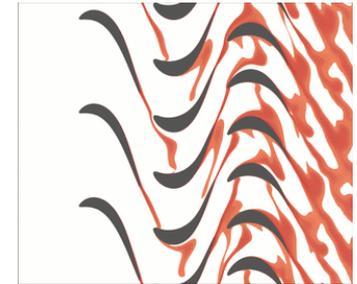
Asymmetrien der
Amplituden im Stromnetz



Quelle: Okabe et al. (2009)



Mode einer
verstimmten
Rotorscheibe



Rotor-Stator-
Wechselwirkung
in einer Axialturbine

MWK-gefördertes Projekt AMSES

Folgen

- Geringere strukturelle und aerodynamische Dämpfung
- Geänderte Größe und spektrale Verteilung der aerodynamischen Erregerkräfte (erzwungene Anregung)
- Höhere Anzahl an Resonanzdurchfahrten
- Rotor-Torsionsschwingungen
- ➔ Höhere Flutter-Anfälligkeit
- ➔ Erhöhte Low und High Cycle Fatigue Belastungen

Herausforderungen
Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

Dynamik der
Energiewandlung

Fazit

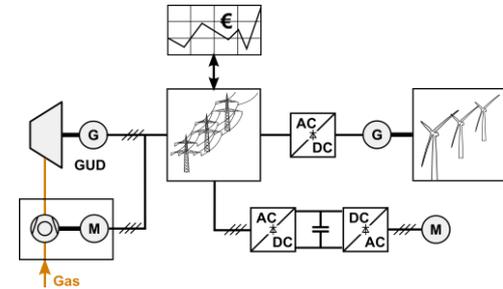
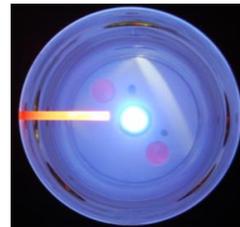
Zusammenführung interdisziplinärer Forschergruppen an einem Ort



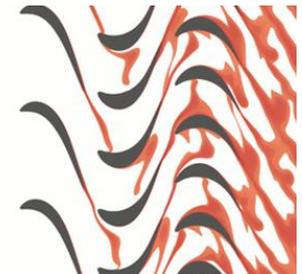
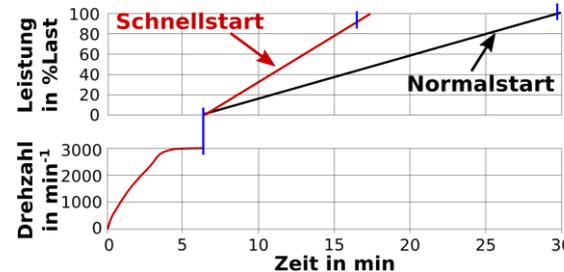
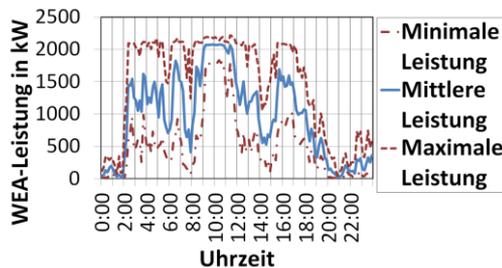
Sektorkopplung Gas und Strom: Künftige Herausforderungen für die Verstromung regenerativ gewonnenen Gases

Herausforderungen Gasversorgung
Thermische Kraftwerke
Dynamik der Energiewandlung
Fazit

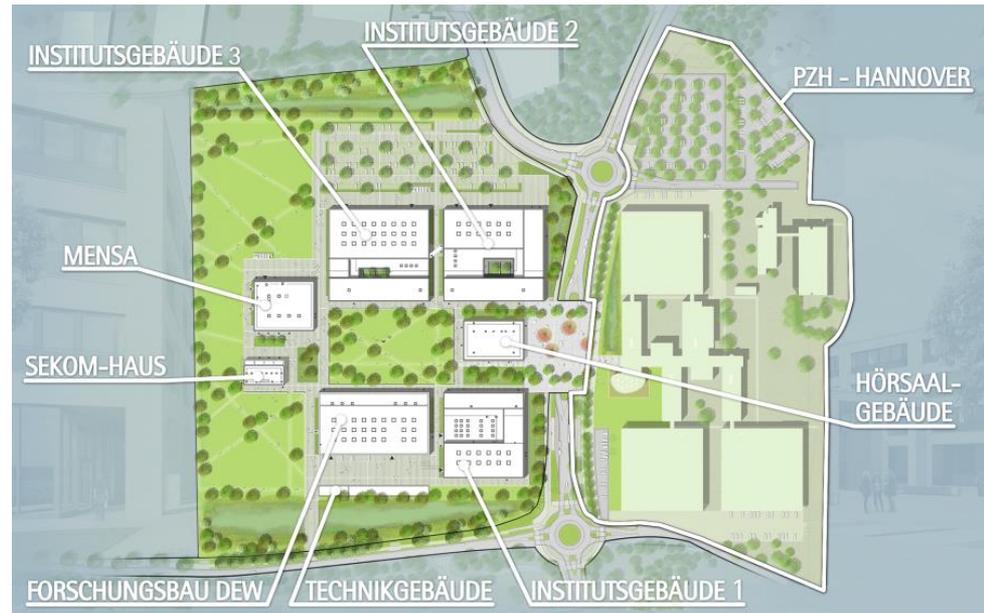
Experimentelle und simulationsbasierte Grundlagenforschung



Dynamik der relevanten Zeitskalen: Tage, Stunden, Minuten, Sekunden



Campus für Maschinenbau Garbsen (CMG)



- Zusammenführung aller 18 Institute an einem Standort
- attraktiver Ort für Studium und Forschung
- ideales Umfeld für das Studium – Leben und Lernen verbinden
- forschungsnahes Lernen – experimentelles Arbeiten vom Labor über das Technikum bis zur industriellen Umsetzung
- Forschung auf internationalem Spitzenniveau
- Kooperation und Interdisziplinarität
- Transfer Wissenschaft-Industrie: lokal, national, international

Herausforderungen
Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

**Dynamik der
Energiewandlung**

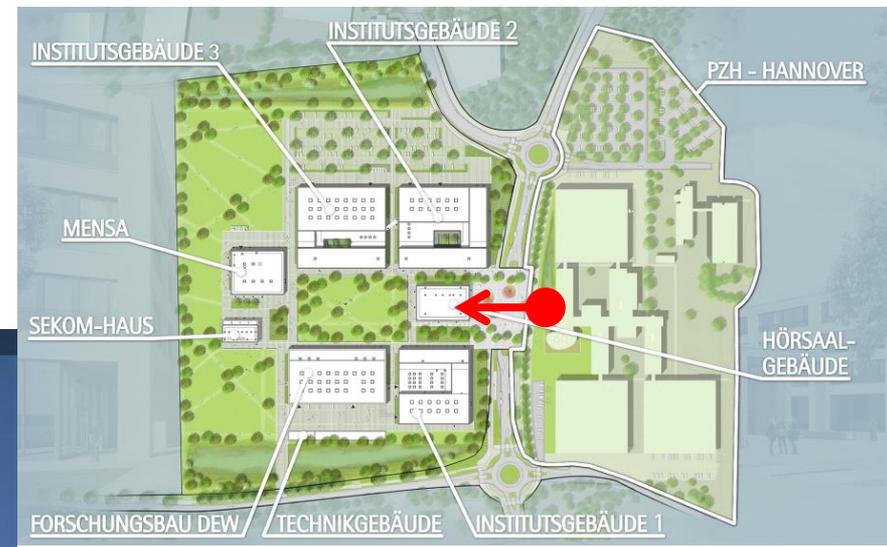
Fazit

Status: 06.11.2017

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung
Thermische
Kraftwerke
**Dynamik der
Energiewandlung**
Fazit

2017-11-06 10:00:10



Realisierung des Forschungsbaus Dynamik der Energiewandlung

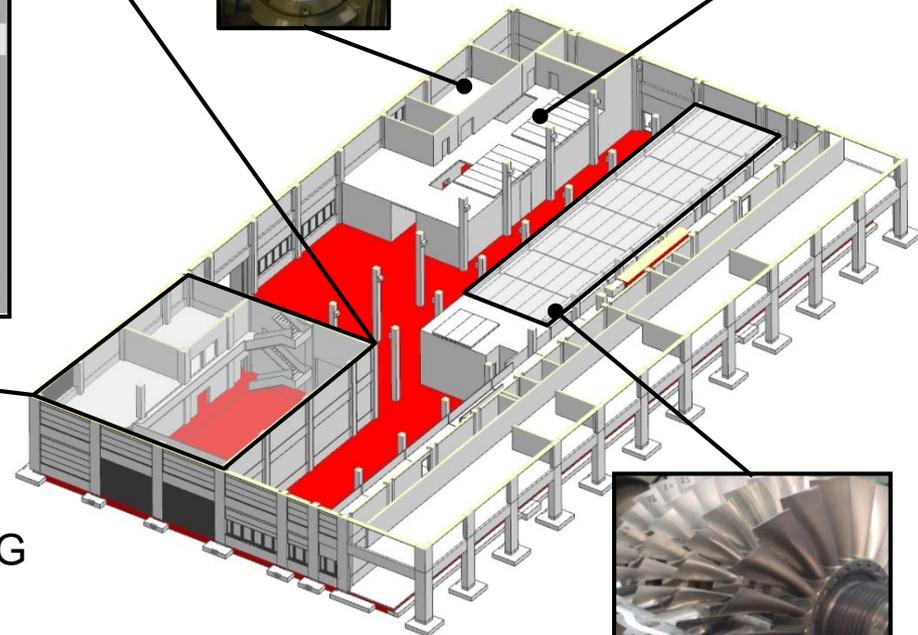
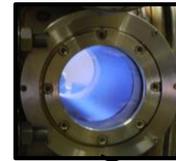
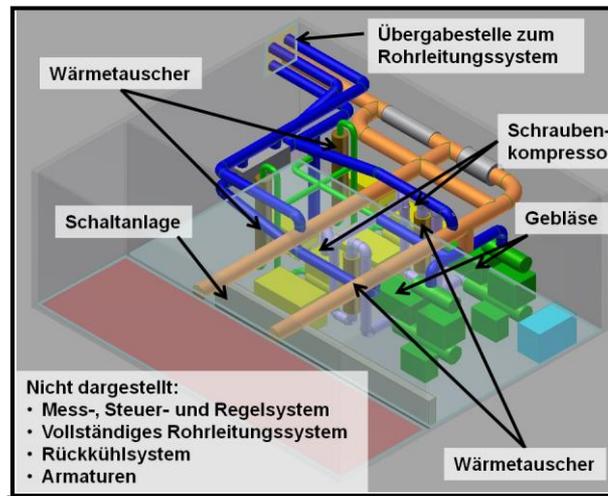
Sektorkopplung Gas und Strom: Künftige Herausforderungen für die Verstromung regenerativ gewonnenen Gases

Herausforderungen
Gasversorgung

Thermische
Kraftwerke

**Dynamik der
Energiewandlung**

Fazit



- synchrone Realisierung des Forschungsbaus und des CMG
- Inbetriebnahme: 2019
- Nutzfläche 2.494 m²
- 50 Arbeitsplätze
- Technikumsprüfstände

Beantragte/Genehmigte Kosten

- Großgerät Kompressorstation: 15,2 Mio. €
- Gebäude und Ersteinrichtung: 18,9 Mio. €

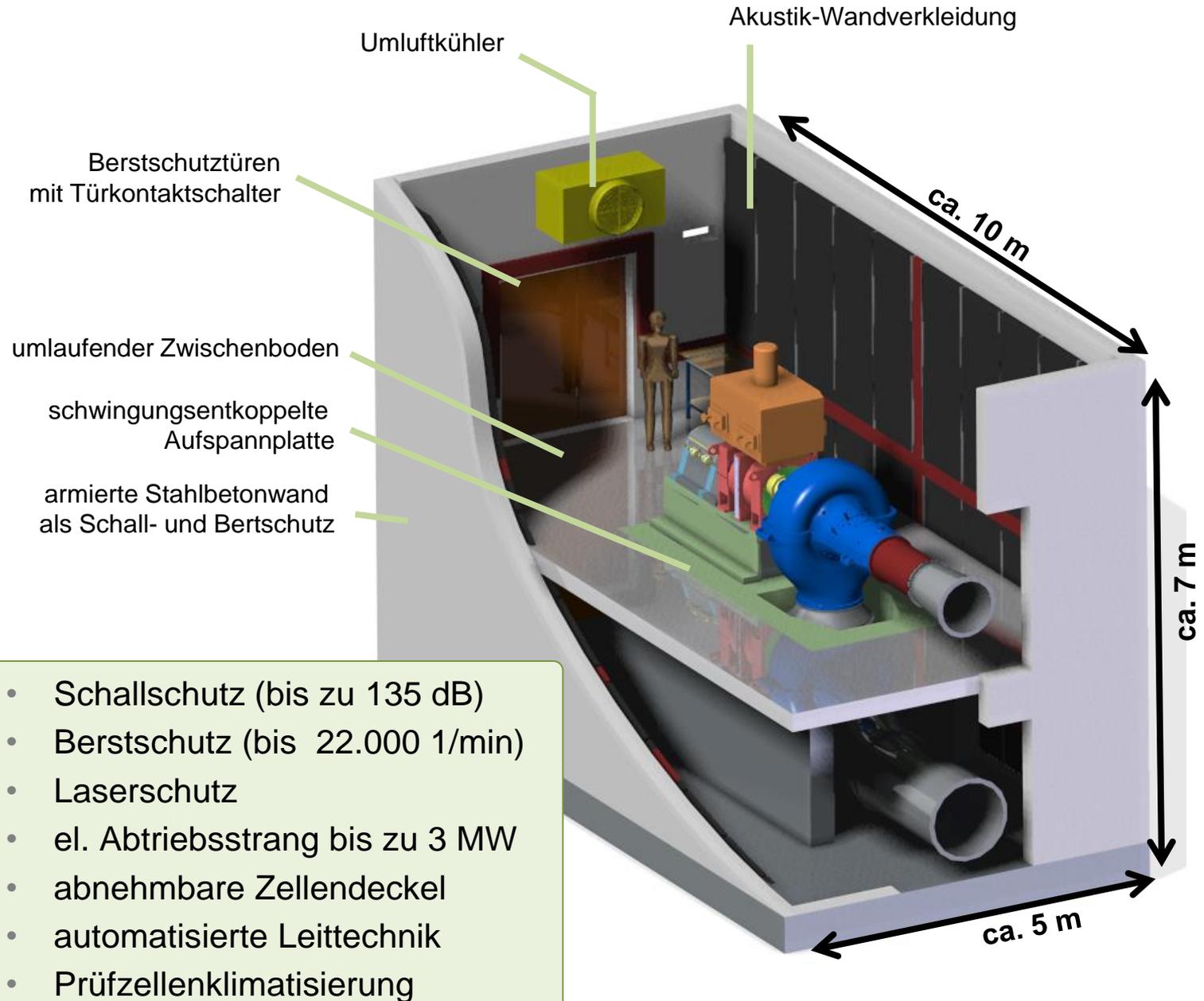
Aufbau einer Standard-Prüfzelle für Turbomaschinen

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung
Thermische
Kraftwerke

**Dynamik der
Energiewandlung**

Fazit



Dynamische Kraftwerke als eine Antwort auf die Anforderungen der Energiewende



Grundlagenwissenschaftliche Absicherung der Energiewende

- Abdeckung der Residuallast
- Entwicklung von flexiblen thermischen Kraftwerken
 - hohe Teillastwirkungsgrade
 - transienter Betrieb

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

Herausforderungen
Gasversorgung
Thermische
Kraftwerke

**Dynamik der
Energiewandlung**

Fazit

Programmatischer Ansatz

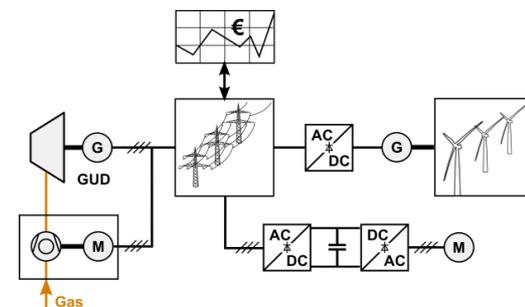
- interdisziplinäre Forschergruppen an einem Ort
- experimentelle und simulationsbasierte Forschung
- Verständnis gekoppelter dynamischer Systeme

Wirtschaftswissenschaften



Maschinenbau

Elektrotechnik





Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

www.dew.uni-hannover.de

contact@dew.uni-hannover.de



Dynamik der
Energiewandlung

1 1
1 0 2
1 0 0 4

Leibniz
Universität
Hannover

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

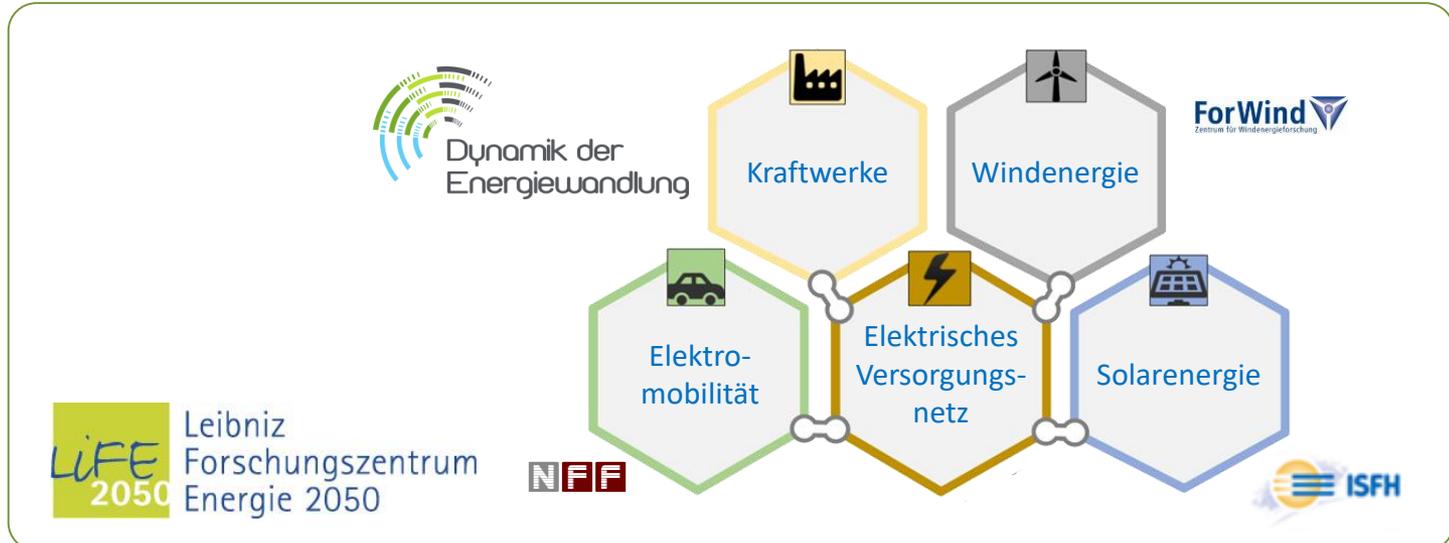
Niedersachsen

Komplementäre Ausrichtung der Energieforschung der Hochschulen und standortübergreifende Nutzung der Infrastruktur



Leibniz Universität Hannover

Stärkung der Energietechnik durch Bündelung der Aktivitäten aller Fakultäten in Leibniz Forschungszentrum Energie 2050, Berufungen und interdisziplinäre Studiengänge



Forschungslinie Diffusor

Bedeutung für Dynamisierung

Stark variierende aerodynamische und thermische Eintrittsbedingungen und kürzere/ leichtere Bauformen

Sektorkopplung

Gas und Strom:

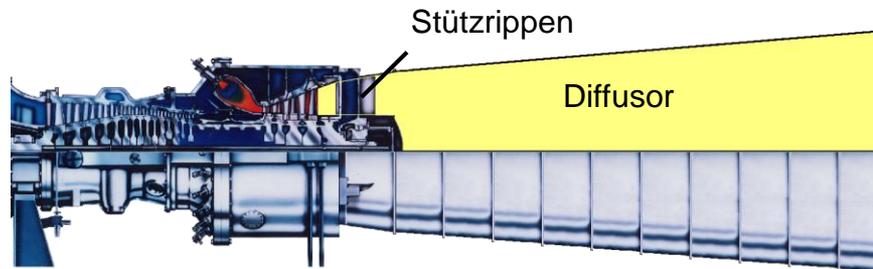
Künftige

Herausforderungen

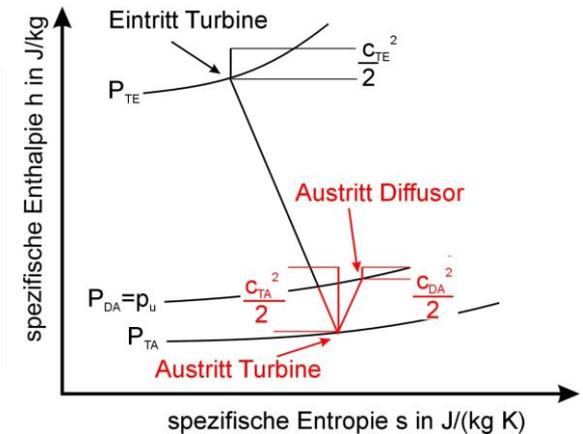
für die Verstromung

regenerativ

gewonnenen Gases



Quelle: Fleige (2002)



Quelle: Kuschel (2013)

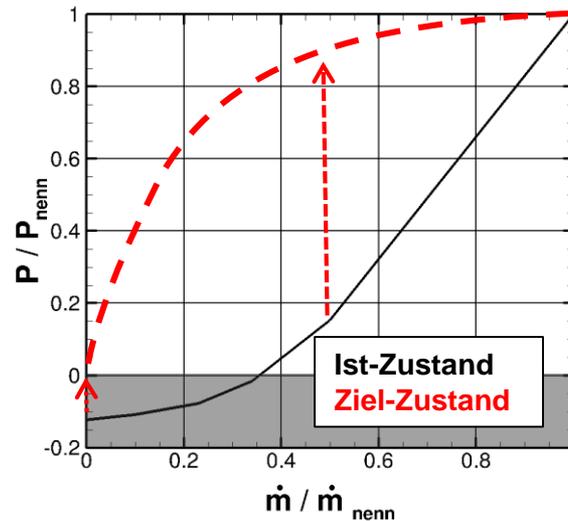
Folgen

- Höhere aerodynamische Belastung
- Hoher Drall der Zuströmung
- Eintrag kohärenter großskaliger Wirbelstrukturen
- Eintrag turbulenter Strukturen
- Variation der Temperatur

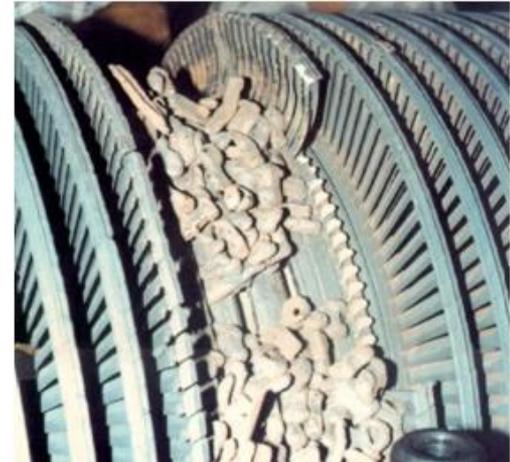
- ➔ Destabilisierung des Diffusors reduziert Arbeitsumsatz der Turbine
- ➔ Thermische Trägheit des Diffusors und Abhitzekessels beschränkt Lastgradienten

Bedeutung für Dynamisierung

Turbine arbeitet bei Teil- oder Schwachlast infolge Massenstromreduktion weit abseits des Auslegungspunktes



Kennfeld einer Turbinenstufe



Ventilationsschaden ND-Turbine
(Rothe et al. 2007)

Folgen

- Große Inzidenzwinkel
- Ablösungen
- Sinkende Wirkungsgrade
- Sinkende Leistung bei sinkender Drehzahl bis hin zur Ventilation
- ➔ Erhöhte thermische Belastung der Beschau felung
- ➔ Zwangs anregungen führen zu dynamischen Schaufelbelastungen

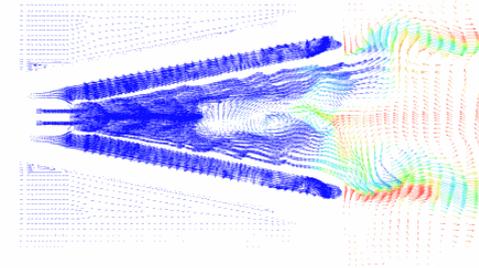
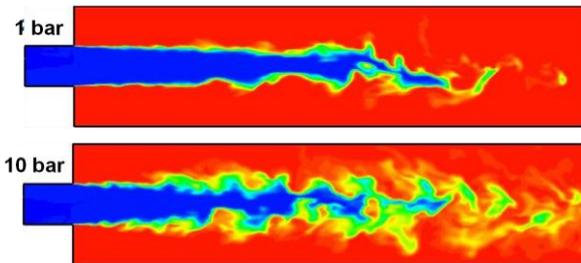
Grundlagenwissenschaftlicher Charakter der Verbrennung in Gasturbinen

Erarbeitung grundlegender Erkenntnisse...

- ... zur Flammenstabilisierung
- ... zu Brennstoffgemischen ($\text{CH}_4\text{-H}_2$ / Biogase)
- ... zu physikalischer und numerischer Modellbildung

**Sektorkopplung
Gas und Strom:
Künftige
Herausforderungen
für die Verstromung
regenerativ
gewonnenen Gases**

*Berechnung $\text{CH}_4\text{-H}_2$ -Flammen
(Manickam und Dinkelacker 2010)*



*LES-Berechnung Flashback
(Aluri und Dinkelacker 2006)*

Methodik → Bedeutung des Großgerätes

- Experimentelle Untersuchungen an Versuchsflammen (Labor- und Technikumsmaßstab)
- Druckeinfluss
- Hohe turbulente Reynolds- und Karlovitz-Zahlen
- Transienter Betrieb, Hochgeschwindigkeitsmesstechnik
- Verbesserung numerischer Modelle

Gasverbrennung bei Schwachlast und hohem Wasserstoff-/ Biogasanteil

Zielsetzung: Entwicklung von Verbrennungsmodellen zur Simulation unterschiedlicher Brennstoffzusammensetzungen

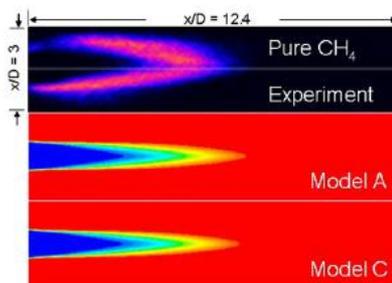
Methodik/ Ansatz

- Untersuchungen mit variierenden Brennstoffzusammensetzungen (z.B. bei Power-to-Gas, Biogas)
 - 1) Im atmosphärischen Brennerprüfstand
 - 2) In einem Hochdruck-Brennerprüfstand mit variierenden Drücken
- Brennverhalten bei schnellen Lastwechseln
- Modellentwicklung
- Validierung von Simulationsmodellen

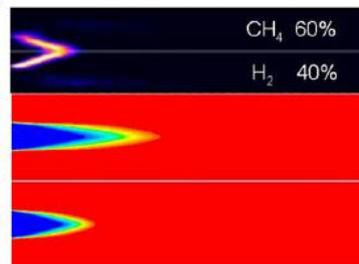
Beitrag zur Dynamisierung

- ➔ Stabilisierung des Brennverhaltens bei schnellen Lastwechseln
- ➔ Minderung der CO-Problematisierung und Ausbrand bei niedriger Teillast

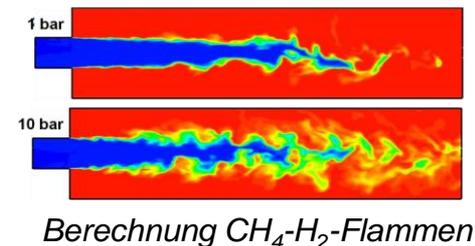
Methan-Luft-Flamme



wasserstoffangereicherte Methan-Luft-Flamme



LIF-Messungen
PSI
AFSW-Ansatz
Le-Zahl-Ansatz



Notwendigkeit des künftigen Großgerätes

- Experimentelle Untersuchungen im Technikumsmaßstab
- Hohe Drücke ➔ hohe turbulente Reynolds- und Karlovitz-Zahlen

Sektorkopplung Gas und Strom:
Künftige Herausforderungen für die Verstromung regenerativ gewonnenen Gases

Aktive Regelung von Verbrennungsschwingungen bei synthetischen Gas-Kraftstoff-Gemischen

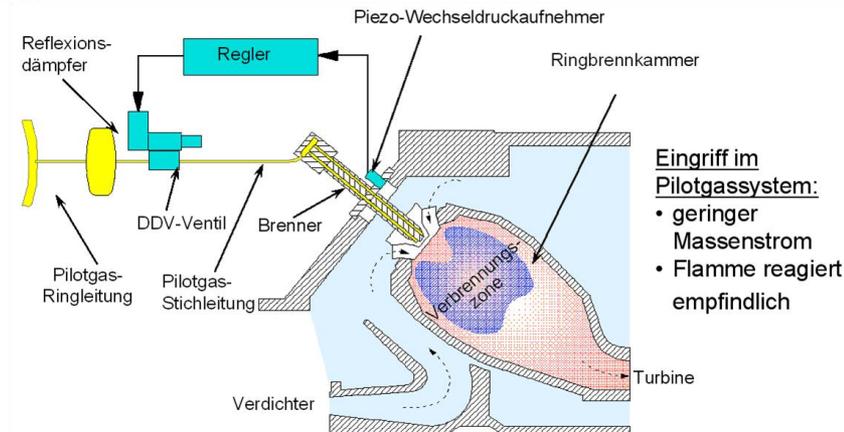
Zielsetzung: Verständnis der Flammeninstabilitäten bei Verbrennung variierender Gaszusammensetzungen ($\text{CH}_4\text{-H}_2$, Biogas)

Methodik/ Ansatz

- Flammenstabilisierung durch verbessertes Verständnis der physiko-chemischen Mechanismen
- Experimente an Versuchsflammen
- Parameteranalysen mit variierenden Gaszusammensetzungen und Drücken im Hochdruck-Brennerprüfstand
- Numerische Simulation und Modellbildung
- Ableiten aktiver Maßnahmen zur Stabilitätskontrolle

Beitrag zur Dynamisierung

Verbesserung der Flammenstabilität im Teillastbetrieb und bei transienten Vorgängen



Aktives Regelungssystem zur Flammenstabilisierung (Seume et al. 1998)

Notwendigkeit des künftigen Großgerätes

- Experimentelle Untersuchungen im Technikumsmaßstab
- Hohe Drücke → hohe turbulente Reynolds- und Karlovitz-Zahlen

Wasserstoffzusatzverbrennung im Dampfkreislauf thermischer Kraftwerke zur Bereitstellung von Sekundenreserveleistung

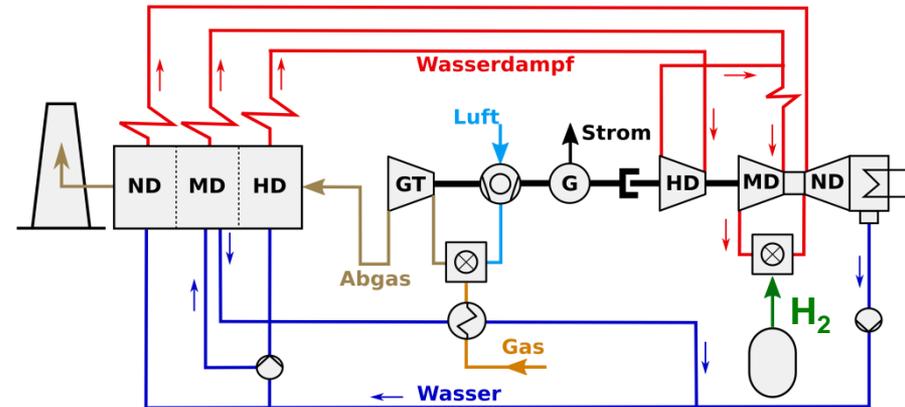
Zielsetzung: Bereitstellung von Sekundenreserve-Leistung durch kurzfristige Enthalpiesteigerung im Dampfkreislauf mittels H₂-Verbrennung

Methodik/ Ansatz

- Einleitung heißer Verbrennungsprodukte in den Dampfstrom zwischen MD- und ND-Turbine
- Wasserstoff/Sauerstoff-Brenner in Wasserdampfumgebung
- Sukzessive Entwicklung der Technologie vom Labor- zum Technikumsmaßstab
- Vorarbeiten: HYDROSS-Projekt 1994

Beitrag zur Dynamisierung

- ➔ Bereitstellung von Sekundenreserve in thermischen Kraftwerken
- ➔ Flexibilisierung der Stromerzeugung



Notwendigkeit des künftigen Großgerätes

- Transfer von experimentellen Untersuchungen vom Labor- in den Technikumsmaßstab (höhere Luftmassenströme und Drücke)
- Transienter Betrieb