



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech

Schlussbericht vom 13. Dezember 2017

Validierung einer neuartigen, sauberen und hocheffizienten Verbrennungstechnologie

Schlussbericht – extern



© Ansaldo Energia Switzerland AG 2017



Datum: 13. Dezember 2017

Ort: Baden

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Ansaldo Energia Switzerland AG
Römerstrasse 36, CH-5401 Baden
www.ansaldoenergia.com

Autoren:

Patrik Meier, Ansaldo Energia Switzerland AG, patrik.meier@ansaldoenergia.com

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Peter Jansohn, peter.jansohn@psi.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501154-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung, Résumé, Abstract, Sommario

Zusammenfassung

Mit Hilfe des Bundesamtes für Energie (BFE) ist es Ansaldo Energia gelungen, eine neuartige Verbrennungstechnologie (Constant Pressure Sequential Combustion) für die H-Klasse Gasturbine GT36 zu validieren. Zu diesem Zweck wurden Hochdruck-Verbrennungsversuche im Deutschen Luft- und Raumfahrt Institut in Köln sowie komplette Gasturbinen-Tests im neuen Ansaldo Energia Testkraftwerk in Birr, Schweiz über die Jahre 2015-2017 erfolgreich durchgeführt.

Um in Gasturbinen Kombikraftwerken einen Wirkungsgrad von mehr als 60% zu erreichen, sind sehr hohe Feuerungstemperaturen nötig. Durch die neuartige Verbrennungstechnologie und deren Validierung kann die GT36 die hohen Temperaturen innerhalb der gesetzlichen Emissionslimiten für NOx und CO sicher erreichen.

Die Markteinführung der GT36 mit der neuartigen Verbrennungstechnologie ist der nächste Schritt für Ansaldo Energia: die nächste Gasturbine dafür ist bereits in der Produktion und Verhandlungen mit dem ersten Kunden machen gute Fortschritte.

Résumé

Le soutien de l'office fédéral de l'énergie (OFEN) a permis à Ansaldo Energia de valider son dernier développement technologique en matière de combustion (Combustion séquentielle à pression constante) pour la turbine à gaz de classe H GT36.

Entre 2015 et 2017 de nombreux tests ont été effectués avec succès pour atteindre cet objectif, tout d'abord au Centre Aérospatial allemand (DLR) sur un banc d'essai de combustion à haute pression, puis au nouveau centre d'essai d'Ansaldo Energia à Birr.

Pour parvenir à dépasser un rendement énergétique de 60% pour une centrale à gaz en cycle combiné, il est nécessaire d'atteindre de très hautes températures de combustion. Grâce à la dernière technologie de combustion et à sa validation, la GT36 peut atteindre ces hautes températures tout en restant au-dessous des limites réglementaires en termes d'émission de NOx et de CO.

L'introduction de la GT36 sur le marché est la prochaine étape pour Ansaldo Energia : La prochaine turbine à gaz est déjà en production et les négociations avec le premier client sont très avancées.

Abstract

With the help of the Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Ansaldo Energia managed to validate the latest combustion technology (Constant Pressure Sequential Combustion) for the H-class gas turbine GT36. For the purpose of this validation, from 2015 to 2017, high pressure combustion tests at the German Aerospace Center (DLR) and at the newly built Ansaldo Energia test power plant in Birr have been successfully executed.

To reach more than 60% efficiency in combined cycle gas turbine power plants, very high gas turbine firing temperatures are necessary. With the help of the latest combustion technology and the validation thereof, the GT36 can reach the high temperatures within the regulatory limits for NOx and CO emissions.

The market introduction of the GT36 with the new combustion technology is the next step for Ansaldo Energia: the next gas turbine is already in production and negotiation with the first customer is making very good progress.



Sommario

Con l'aiuto dell'Ufficio Generale dell'Energia, Ansaldo Energia porta a termine la validazione dell'innovativa tecnologia di combustione (Constant Pressure Sequential Combustion) per la turbina GT36 con classe d'efficienza H. Al fine della validazione, dal 2015 al 2017, i test sono stati eseguiti presso Deutschen Luft- und Raumfahrt Institut (DLR) e l'impianto pilota di recente costruzione di proprietà di Ansaldo Energia.

Per raggiungere il 60% di efficienza nel ciclo combinato, diventano necessarie temperature di combustione estremamente elevate. Con l'ausilio delle ultime tecnologie di combustione e del processo di validazione, la GT36 raggiunge le alte temperature rispettando le normative in termini di emissioni di NOx e CO.

Per Ansaldo Energia, il prossimo passo, è l'introduzione nel mercato della GT36 con l'innovativa tecnologia di combustione: la produzione della prossima turbina a gas è già in corso, così come, la negoziazione con il nostro primo cliente.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung, Résumé, Abstract, Sommario	3
Inhaltsverzeichnis	5
Ausgangslage	6
Ziele des Projektes	6
Grundlagen – Randbedingungen.....	6
Konzept – Anlagenbeschrieb	7
Vorgehen – Methode	7
Ergebnisse	14
Diskussion	28
Schlussfolgerungen	29
Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss	29
Anhang	29



Ausgangslage

Neue Erfordernisse des Marktes bezüglich noch niedrigeren Emissionen und höherer Effizienz über 60% hinaus bei Kombikraftwerken verlangen kontinuierliche Anstrengungen, den technischen Fortschritt weiter zu treiben und neue Technologien auch zu testen.

In den Jahren 2010 bis 2016 wurde von Alstom und ab 2016 Ansaldo Energia¹, eine Heavy-duty Gasturbine der neuesten Generation (auch als H-Klasse bezeichnet) entwickelt, die GT36. Ein zentrales Element dieser Gasturbinengeneration ist die hohe Verbrennungstemperatur mit dem Ziel, Wirkungsgrade in Kombikraftwerken von über 60% zu ermöglichen. Die heissen Verbrennungstemperaturen fordern einen hohen Innovationsgrad bei der Entwicklung der Brennkammer, da sowohl Lebensdauerziele wie auch tiefe (saubere) Emissionen einzuhalten sind.

Zur Validierung dieser anspruchsvollen Verbrennungstechnologie wird ein Testkraftwerk benötigt, was wiederum hohe Investitionen mit sich zieht. Aus diesem Grund wurde im Dezember 2014 ein Gesuch um finanzielle Förderung des Projektes „Validierung einer neuartigen, sauberen und hocheffizienten Verbrennungstechnologie“ beim Bundesamt für Energie (BFE) eingereicht und von diesem bewilligt.

Ziele des Projektes

Für das Projekt Validierung einer neuartigen, sauberen und hocheffizienten Verbrennungstechnologie wurden die folgenden Ziele vereinbart:

- Erprobung, Validierung und Weiterentwicklung einer neuen, in der Schweiz entwickelten, innovativen Verbrennungstechnologie, welche Wirkungsgrade über 60% bei tiefst möglichen Emissionen und hohe Flexibilität im Betrieb erlauben.
- Erprobung, Validierung und Weiterentwicklung von neuen innovativen Methoden für Kosten- und Ressourcenoptimierte Installation, Inbetriebnahme, Betrieb sowie Unterhalt einer neuen Verbrennungstechnologie in einem realitätsnahen Umfeld (Pilotanlage).
- Validierung der Entwicklungszielvorgaben im Hinblick auf eine wirtschaftlich erfolgreiche und wirtschaftlich risikoarme Markteinführung dieser neuen Technologie.
- Bestätigung und Stärkung des Standorts Schweiz als Zentrum für Innovation, Entwicklung, Technologie und Know-how.

Grundlagen – Randbedingungen

Neue Technologie in einem realen Umfeld testen, validieren, optimieren und weiterentwickeln.

Zu diesem Zweck baute Alstom in Birr, Aargau, eine Test- und Validierungsanlage. Dafür musste die Kraftwerksanlage in Birr (AG), die bisher für die Validierung des Gasturbinentyps GT26 gebaut worden war, erweitert werden. Der Umweltverträglichkeitsbericht wurde im September 2013 eingereicht und die Baueingabe erfolgte im Dezember 2013. Ende April 2014 hatte Alstom die Bewilligung zum Bau der neuen Pilotanlage in Birr erhalten.

In einer ersten Phase des Projektes hat Alstom und später Ansaldo die Anlage ausgelegt und gebaut. Diese Phase startete im Mai 2014 mit der Vorbereitung des Bauplatzes und im Juli 2014 starteten die Tiefbauarbeiten mit den Maschinenfundamenten für die Montage der Komponenten. Ab anfangs Dezember 2014 wurde das Gebäude aufgebaut und ab Februar 2015 die Installation der Komponenten und dem Zusammenbau der Brennkammer / Gasturbine in situ begonnen. In der zweiten Phase hat Alstom/Ansaldo dann die Anlage ab Ende Jahr 2015 in Betrieb genommen. In der dritten Phase wurde ab Mai 2016 die Testkampagne Birr401 gestartet und bis April 2017 zu Ende geführt.

¹ Durch den Verkauf des Alstom Kraftwerkgeschäftes an General Electric musste ein Teil des Gasturbinengeschäfts an Ansaldo Energia weiterverkauft werden.



Konzept – Anlagenbeschreibung

Die Pilotanlage mit der Testbrennkammer wird im offenen Gasturbinenzyklus betrieben und leistet 320MW in Verbund mit dem Schweizer Stromnetz. Die neue Verbrennungstechnologie kann in Birr-4 direkt und in einem realen Umfeld im Massstab 1:1 getestet und optimiert werden. Ansaldo ist zurzeit weltweit der einzige Anbieter, welcher diese Art des Testens einer neuen Verbrennungstechnologie dieser Grössenordnung im realen Umfeld mit einer Pilotanlage im Massstab 1:1 durchführt.

Die von Ansaldo derzeit verwendete 2-stufige Verbrennungstechnologie, welche in der GT26 Gasturbine seit Mitte der 90er Jahre Anwendung findet, wurde kontinuierlich weiterentwickelt und ist im Bereich der Betriebsflexibilität und Emissionen weltweit auch heute noch führend, stösst jedoch langsam an ihre Grenzen.

Alstom hatte deshalb entschieden, eine vollkommen neue 2-stufige Verbrennungstechnologie zu entwickeln, welche alle Kriterien optimal erfüllt und in der Zukunft Kombikraftwerkswirkungsgrade von bis zu 65% ermöglichen wird und gleichzeitig eine Optimierung hinsichtlich Investitions- und Unterhaltskosten erlaubt. Die Entwicklungsziele beschränken sich jedoch nicht nur auf die Reduktion der Kosten und die Vereinfachung des Unterhalts und Betriebs, sondern sind auch und ganz speziell auf einen hohen Wirkungsgrad bei tiefen Emissionen ausgelegt. Ein hoher Wirkungsgrad bedeutet dabei prinzipiell hohe Feuerungstemperaturen. Diese wiederum haben einen negativen Einfluss auf die NOx Emissionen, welche bei einer Gasturbine die Hauptschadstoffkategorie bildet und bestimmend ist für die Verbrennungstechnologie. Die Bildung von NOx ist hauptsächlich von der Temperatur in der Brennkammer und der Verweilzeit der Heissgase in der Brennkammer abhängig. Man ist also bestrebt, eine möglichst heisse, homogene Flamme mit möglichst kurzer Verweilzeit der Heissgase in dieser Zone zu erreichen. Ein 2-stufiges Verbrennungskonzept hilft hier grundsätzlich, ein optimales Betriebsfeld zu finden und erlaubt eine hohe Flexibilität.

Vorgehen – Methode

Verbrennungsentwicklungsmethode

Im Entwicklungsprozess für die Verbrennung werden erste Konzepte mit analytischen und numerischen Methoden entwickelt. Je nachdem wie weit weg vom bekannten Erfahrungsbereich eines neuen Konzeptes man sich bewegt, werden danach unterschiedliche Laborversuche durchgeführt. Typischerweise werden dabei fluiddynamische Kennwerte aufgenommen für die Flammenstabilität und die Luft / Brennstoffvermischung. Anhand von diesen Versuchsergebnissen werden dann die Modelle und Berechnungsmethoden validiert und erste Designfeatures untersucht.

Nach der Herstellung einiger Hardwarevarianten werden atmosphärische Verbrennungstests gefahren, um die optimale Hardwarekonfiguration zu finden. Ansaldo betreibt zusammen mit Universitäten in Italien, verschiedene atmosphärische Teststände, welche diesem Zweck dienen. Erste thermoakustische Untersuchungen können ebenfalls auf diesen Testständen gefahren werden. Während der Alstom Zeit bestand ebenfalls eine atmosphärische Testinfrastruktur in Birr, welche während der Übergangszeit zu Ansaldo ebenfalls noch verwendet werden konnte.

Im nächsten Schritt muss dann die ausgewählte Hardware in einem Hochdruckprüfstand weiter getestet werden. Ansaldo betreibt verschiedene solche Teststände bei der DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) in Köln. Die gewählten Testbedingungen sollen dabei bereits das reale Umfeld in einer Gasturbine simulieren. Die thermoakustischen Wechselspiele in der Gasturbine und im Versuchsfeld sowie die Hochskalierung der Messresultate sind hier von besonderem Interesse.

Der beschriebene Prozess wird nun mehrfach iteriert. Sobald die Tests im Hochdrucktestfeld die gewünschten Resultate auf reale Bedingungen übertragbar sind, wird die Prototyphardware für die ersten Pilotversuche in einer Gasturbine definiert und hergestellt. Das Hauptziel dieser Pilotversuche ist es, die mechanische Integrität und die fluiddynamischen Kennwerte nachzuweisen. Es geht aber



auch und vor allem darum, die thermoakustischen Effekte (auch Pulsationen genannt) in Realumgebung zu studieren. Diese Effekte bei allen möglichen Betriebsbedingungen im Griff zu haben ist eine äusserst komplexe Aufgabe. Es muss ein Brennkammerfahrkonzept entwickelt werden, welches

- die Pulsationen bei allen Betriebsbedingungen im erlaubten Bereich hält;
- die Emissionen bei allen Betriebsbedingungen im spezifizierten Bereich möglichst tief hält;
- einen möglichst flexiblen Betrieb der Anlage erlaubt.

Bezugnehmend auf dieses Projekt und die Validierung der Verbrennungstechnologie für die GT36 wurden die folgenden Hauptarbeiten in der Periode Januar 2015 bis September 2017 als Teil der GT36 Entwicklung und Validierung durchgeführt. Die neuartige Verbrennungstechnologie der GT36 stand dabei immer im Fokus der Validierung.

GT36 Maschinen Entwicklung

Die einzelnen Komponenten der Gasturbine wurden fertig entwickelt und die Fertigungsdokumente wurden erstellt. Die Fertigbarkeit der kritischen Teile wurde in Zusammenarbeit mit den Herstellern und Lieferanten abgeklärt und das Design entsprechend angepasst, wo nötig.

Die Auslegung der Nebenbetriebskomponenten (Abgassystem, Luftansaugsystem, Gas Block, Dieselblock, etc.) wurde fertiggestellt.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden abgeschlossen und in die Validierung an einzelnen Brennern sowie der kompletten Gasturbine übergeleitet.

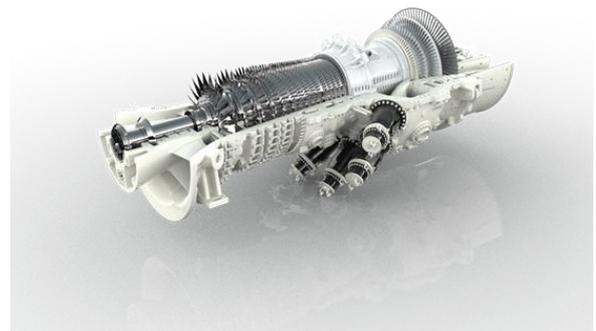


Abbildung 1: GT36 Maschinenansicht (geöffnet)

Brennkammertestkampagnen (Einzelbrennertests)

Die für die GT36 neu gebaute Verbrennungstestanlage „HBK5“, am Deutschen Luft- und Raumfahrtinstitut (DLR) in Köln, wurde in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce fertiggestellt und in Betrieb genommen.

In den Jahren 2015 und 2016 wurden total 6 Hochdrucktestkampagnen in der Anlage HBK5 mit DLR Köln durchgeführt.

Die im Jahre 2017 ausgeführten zwei weiteren Testkampagnen (HP17-A, -B in [Tabelle 1]) beziehen sich nicht direkt auf die Validierung der im Moment in der GT36 eingesetzten Verbrennungstechnologie sondern haben sich bereits mit den nächsten, weiterführenden Entwicklungen der Verbrennung beschäftigt.

Eine Übersicht aller durchgeführten Testkampagnen an einzelnen Can Brennkammern befindet sich in Tabelle 1.



Abbildung 2: Ansicht der Testanlage sowie des GT36 Combustor Test Rigs im Betrieb

Bau der ersten GT36 und Bau des Testkraftwerk Birr-4

Alle Gasturbinenkomponenten wurden in Alstom Fabriken und / oder bei Lieferanten hergestellt. Die inneren und äusseren Gehäuseteile wurden in der Alstom Fabrik in Mannheim probemässig zusammengebaut. Der Rotor wurde in der Fabrik in Birr hergestellt. Die statischen und rotierenden Heissgaspfadteile wurden zum grössten Teil bei Unterlieferanten hergestellt und wurden in Birr auf der Baustelle und in der Fabrik montiert. Die Brennkammerteile wurden von Unterlieferanten gefertigt und in Alstom Fabriken zusammengebaut.

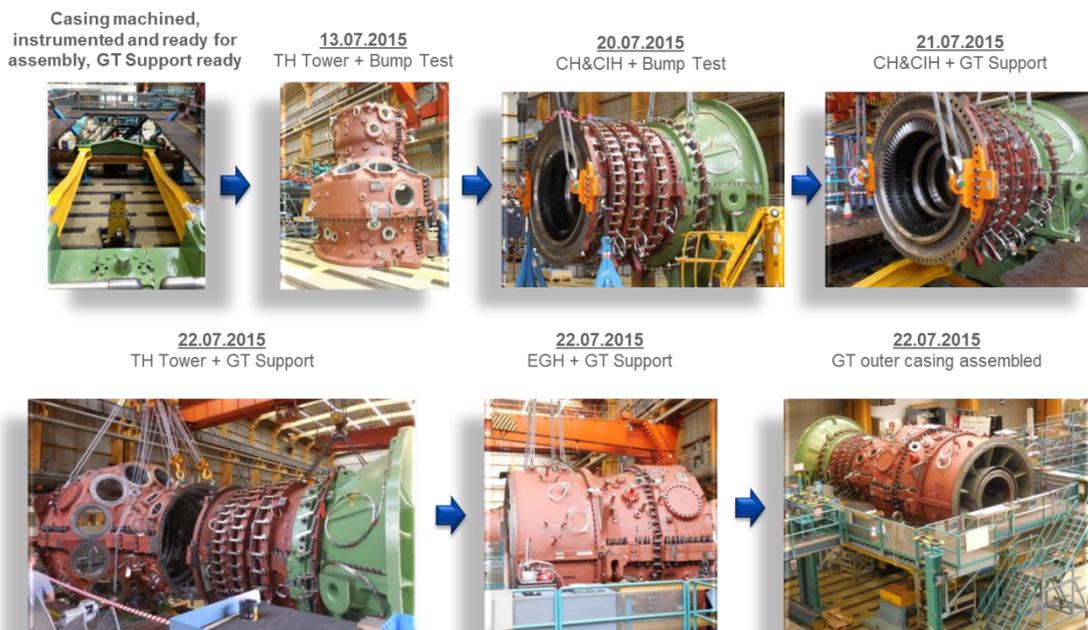


Abbildung 3: Auszug aus dem Zusammenbau der ersten GT36 für die Testanlage in Birr

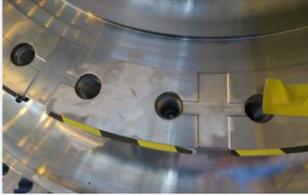
Die Anlagekomponenten wurden auf der Basis von den Entwicklungsdaten ausgelegt und die Schnittstellen zu bestehenden Gewerken definiert.

Die Prototypeninstrumentierung wurde von der Entwicklungsabteilung definiert und von Instrumentierungsspezialisten umgesetzt und auf Heissgaspfadteilen appliziert. Auf den Nebenanlagenkomponenten und dem Generator wurden ebenfalls speziell für die Validierung benötigte Instrumente ange-

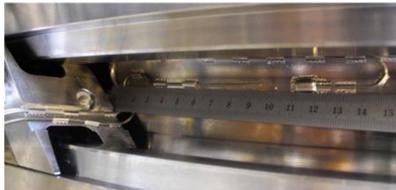


bracht. Insgesamt wurden ca. 3'000 Prototypmessstellen eingebaut. Die Infrastruktur, welche für die Datenerfassung und Datenverarbeitung sowie für die Instrumente selber nötig ist, wurde definiert und aufgebaut.

Rotor end-face milling for Kulite sensors



Routing inside compressor groove and locking



Installation of wire trays on turbine side



Routing to the Cold End telemetry



Abbildung 4: Beispiele von Prototypeninstrumentierung am Rotor

Sämtliche Baumeisterarbeiten über und unter Grund wurden fertiggestellt. Die Turbinenhalle wurde erstellt. Die existierenden Kontrollwarte (DEVA-Gebäude) wurde erweitert und ausgebaut.

Der ursprünglich auf der Anlage Birr-3 installierte Generator und zugehöriger Frequenzumrichter, nötig für den netzfrequenzunabhängigen Testbetrieb, wurden von der Anlage Birr-3 auf die Fundamente von Birr-4 verschoben und wieder angeschlossen.



Abbildung 5: Umzug des Frequenzumrichters und Generators nach Birr-4

Alle Kernkomponenten der Gasturbine wurden in zwei Etappen installiert. Zuerst die äusseren Gehäuse sowie alle mechanischen und elektrischen Nebenanlagenkomponenten und die Verrohrung.



Abbildung 6: Installation der GT36 in der Birr-4 Anlage.

In der 2. Etappe wurde die Gasturbine noch einmal geöffnet und sämtliche internen Teile sowie der beschaufelte Rotor eingebaut. Alle Hilfssysteme und die Schallschutzhaube wurden ebenfalls zusammen mit der 2. Etappe fertiggestellt und der Inbetriebnahme übergeben.

Eine Verbindung der Anlage zum Strom- und Erdgasnetz wurde erstellt und für den Betrieb freigegeben.

Die Montage und die kalte Inbetriebnahme wurde im Mai 2016 komplett abgeschlossen und die Anlage dem Testbetrieb für die Testkampagne Birr401 übergeben.

Testbetrieb der GT36 in der Birr401 Testkampagne

Die Testkampagne wurde im Mai 2016 mit dem ersten Zünden gestartet und im April 2017 mit dem letzten Testlauf abgeschlossen. Leider musste die Kampagne dreimal unterbrochen werden um Reparaturen an Schaufelinstrumentierung, Dampfleitungen und den Leitungsfreiräumen vorzunehmen.

Total war die Maschine während der Kampagne 147 Stunden in Betrieb und wurde 41-mal gestartet.



Abbildung 7: Birr-4 Brennstoff- und Abgasanlagen.

Zusammenfassung der Hauptarbeiten in Kurzform

1. Die GT36-S6 wurde fertig entwickelt und die erste Maschine für den Testbetrieb in Birr produziert.
2. Die Gesamtanlage für das Testkraftwerk (Birr-4) wurde ausgelegt und aufgebaut.
3. Prototypeninstrumentierung wurde definiert und in die GT sowie die Gesamtanlage eingebaut.
4. Der Generator und der Frequenzumrichter wurden von der Anlage Birr-3 in die neue Anlage Birr-4 verschoben.
5. Kalte Inbetriebnahme der Anlage mit der GT36 wurden ausgeführt.
6. Start der Testkampagne Birr401 und Durchführung der Testblöcke 1 bis 2.7.
7. Unterbruch der Testkampagne für Reparaturen an Schaufelinstrumentierung sowie Leitungen in den Wasser/Dampf und Hilfssystemen.
8. Die Inbetriebnahme des Sequential Brenner wurde fertig gestellt.



9. Fehlerhaft gelagerte Dampfleitung wurde repariert und ein Sicherheitsventil wieder zum Betrieb freigegeben.
10. Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit von Luft- und Dampfleitungen durch Gebäude und Plattformen wurden eliminiert.
11. Vollast und volle Verbrennungstemperatur wurden erreicht.
12. Voll- und Teillasteinstellungen wurden vorgenommen.
13. Ausgedehnte Messkampagnen sind aufgezeichnet worden.
14. Ein Übungslauf für den Thermalfarbestest wurde erfolgreich ausgeführt.
15. Diverse Inspektionen an der Maschinenhardware wurden durchgeführt.
16. Die Testkampagne Birr401 wurde am 12. April 2017 beendet.

Nationale Zusammenarbeit

Ansaldo war während des gesamten Projektes bestrebt, den in der Schweiz arbeitswirksamen Anteil so hoch als möglich zu gestalten. Die den Bau betreffenden Unterverträge sind alle abgeschlossen. Für kleinere Aufträge während des Testbetriebes und für die Implementierung weiterführender Technologien bieten wir weiterhin Schweizer Unternehmer auf.

Der Anteil der in der Schweiz investierten Mittel ist im Kapitel [Projektkosten] ersichtlich.

Internationale Zusammenarbeit

Die Internationale Zusammenarbeit von Ansaldo Energia Switzerland AG, im Bereich Forschung und Entwicklung rund um die GT36 und die Birr Testanlage, beschränkte sich in den Jahren 2015 bis 2017 im wesentlichen auf die folgenden Partner:

- Alstom Mannheim in Deutschland²
- Alstom Moskau in Russland
- Alstom Karlovac in Kroatien
- Alstom Rugby in England
- Ansaldo Energia (AEN und ASEN) in Italien
- Power Systems Manufacturing (PSM) in den USA

Testanlage Birr-4 / Testbetrieb

Alle Bauarbeiten wurden Anfang 2016 abgeschlossen und der Testbetrieb (Birr401) wurde im Mai 2016 aufgenommen.

Ausstehend ist die Implementierung der Ölbrennstoffsysteme welche für die dritte (Birr403) Testkampagne benötigt werden. Diese hat sich aufgrund der Reparaturen innerhalb von Birr401 soweit verschoben, dass der dazu nötige Bau nicht mehr im Rahmen dieses BFE Projektes fertiggestellt wird.

² Internationale Zusammenarbeit mit Alstom vor dem Vertragsübergang zu Ansaldo am 25. Februar 2016
12/29



Status Brennkammertestkampagnen (Hochdruck-Test)

Im Laufe des Projektes wurden die folgenden Hochdruck-Testkampagnen durchgeführt:

Block	Zeitraum	Test
HP14-E	Januar – März 2015	Erdgas und Diesel: voller Druck, voller Lastbereich
HP15-A2	Juni – Juli 2015	Erdgas: Stabilität, Akustik/Pulsationen und Thermalfarben test
HP15-A3	August – September 2015	Erdgas und Diesel: 50Hz spezifische Hardware (Sequential Liner)
HP16-A/-B	Januar – März 2016	Erdgas: Fokus Korrelation zwischen dem Teststand in HBK5 und der GT36 in Birr sowie Pulsationen/Akustik (Verwendung einer Can aus dem Birr401 Set)
HP16-C	Juni – Juli 2016	Erdgas und Diesel: 50Hz Bedingungen, Dieselbetrieb, Thermalfarben test
HP16-D	September – Oktober 2016	Weiterführenden Technologien für die GT36 Brennkammer
HP17-A	März – April 2017	Weiterführenden Technologien für die GT36 Brennkammer
HP17-B	September – Oktober 2017	Erdgas und Diesel: Betriebsfenster Erweiterung, Alternative, weiterführende Brenner Konzepte

Tabelle 1: Durchgeführte Hochdruck-Testkampagnen

Details und Resultate betreffend der Validierung dazu befinden sich in den abschliessenden Resultaten in diesem Bericht.

Testkampagne Birr401

Alle Testblöcke wurden erfolgreich durchgeführt. Die wichtigsten Meilensteine wurden wie folgt erreicht:

- Erstes Zünden ("first fire"): 27. Mai 2016
- Nenndrehzahl erreicht ("full speed, no load"): 9. Juni 2016
- Erstes Synchronisieren mit dem Netz ("minimum load"): 18. Juni 2016
- Reparaturen und Validierungsinstrumentierung auf dem Rotor abgeschlossen: 6. Dezember 2016
- Reparatur Leitungen abgeschlossen: 15. Februar 2017
- Vollast erreicht: 9. März 2017
- Testkampagne abgeschlossen: 12. April 2017

Ein Auszug aus dem detaillierten Plan [Tabelle 2] zeigt die wichtigsten Meilensteine und Testblöcke der ersten Testkampagne.



Ergebnisse

>> Erprobung, Validierung und Weiterentwicklung einer neuen, in der Schweiz entwickelten, innovativen Verbrennungstechnologie, welche Wirkungsgrade über 60% bei tiefst möglichen Emissionen und hohe Flexibilität im Betrieb erlauben.

GT36 Birr-4: Ergebnisse der Verbrennungstechnologie

Zusammenfassung der CPSC Verbrennungsergebnisse GT36 Birr 401

Das geplante Test- und Validierungsprogramm wurde vollständig durchgeführt. Die Brennkammer konnte in allen vorgesehenen Gasturbinen-Betriebspunkten gefahren werden.

Die Schutzsysteme (Flamm- und Temperaturüberwachungen und Brennkammerpulsationen) wurden getestet und arbeiten wie erwartet sicher und zuverlässig.

Die in den Hochdrucktests gewonnenen Verbrennungsergebnisse konnten im Testkraftwerk bestätigt werden; das Verbrennungsverhalten der Rohrbrennkammer (Can) in den Hochdrucktests stimmt mit dem Brennkammerverhalten im Testkraftwerk weitgehend überein.

Die Zuverlässigkeit des Brennkammersystems ist für eine Neuentwicklung sehr gut. „Zünden und Hochfahren auf Nenndrehzahl“ resultierte in wenigen Fehlstarts. „Lastbetrieb“ konnte zuverlässig gefahren werden; bei den durchgeführten Teillasteinstellungen der Maschine waren nur in wenigen Fällen Schnellentlastungen aufgrund von hohen Brennkammerpulsationen notwendig.

Die Gasturbineneinstellungen für Leerlauf und niedrigen Teillastbetrieb waren durch das Rotordynamikverhalten der Gasturbine (Torsionsschwingungen) limitiert; die Vorleitreihe des Verdichters konnte nicht wie geplant geschlossen werden; dadurch fährt die Maschine in diesem Lastbereich mit mehr Luft, daher fahren die Brennkammern bei tiefer Teillast kälter als vorgesehen.

Die Brennkammer erfüllt im Betriebsbereich von 50 % Last bis Vollast (100 % Last) alle Schadstoffziele (NO_x, CO) und kann leise, d.h. Brennkammerpulsationen innerhalb der Grenzwerte, betrieben werden. Die Stickoxidemissionen bei Vollast sind ausgezeichnet.

Bei 40% Teillast konnten die CO Emissionsziele nicht erreicht werden; in diesem Lastbereich traten hohe Pulsationen auf, die durch eine geänderte Brennstoffstufung mit Eintrittstemperaturabsenkung der sequentiellen Brennkammer abgefangen wurden.

Der Brennkammerdruckabfall bei Vollast liegt unterhalb des nötigen Limits.

Der Erdgasdruckabfall über das Brennstoffverteiler- und die Brennersysteme ist wie erwartet.

Die Streuung im Betriebsverhalten der 12 Rohrbrennkammern ist wie erwartet sehr gering; die oberen Cans laufen etwas kälter als die unteren Cans aufgrund der Brennstoffzuführung in die Verteilerringe.

Das Betriebsverhalten der Brennkammer (Luftverteilung, Emissionen, Pulsationen) war über den Verlauf der Testkampagne unverändert.

Die Brennkammer wurde während und nach der Testkampagne gründlich inspiziert und kann für die nächste Testkampagne wiederverwendet werden. Brennstoffführende Teile und Heissgasteile sind in sehr gutem Zustand.

Die innere Honigwabendichtung an der Schnittstelle zwischen Brennkammer und erster Turbinenstufe zeigt schon nach der kurzen Betriebszeit einen deutlichen Verschleiss. Diese Dichtung muss mittelfristig verbessert werden.

Die Brennkammer wurde im Betrieb mehrmals auf Luft- und Brennstoffleckagen überprüft. Es gab keine Dichtigkeitsprobleme. Das Brennstoffverteilsystem zeigte im Betrieb keine nennenswerten Vibrationen.

Bei der durchgeführten Montage und Demontage der Brennkammern im Testkraftwerk wurden die notwendigen Arbeitsschritte und Hilfsmittel validiert und der Zeitbedarf überprüft. Die Montage- und Demontagezeiten entsprechen den Erwartungen.

Beschreibung der Brennkammer:

Verbrennungskonzept:

Das sequentielle Verbrennungskonzept der GT36 Gasturbine (**Constant Pressure Sequential Combustion**) ist eine Weiterentwicklung des bewährten GT26-Reheat-Verbrennungskonzeptes.

Der ersten Vormischbrennkammer ist eine zweite, sequentielle Brennkammer nachgeschaltet. Das GT36 CPSC-Konzept unterscheidet sich vom GT26 Reheat-Konzept dadurch, dass auf die Hochdruckturbinenstufe verzichtet wurde; somit arbeiten beide Brennkammern auf demselben Druckniveau.

Die Eintrittstemperaturen in die sequentielle Brennkammer und die Brennkammer-Aufenthaltszeiten sind gleich gehalten wie bei der GT26. Die Heissgastemperatur am Eintritt der sequentiellen GT36-Brennkammer wird daher abgesenkt; dazu wird ein Teil der Verdichterluft dem Heissgas der ersten Brennkammer zugemischt. Die Heissgastemperatur am Brennkammeraustritt ist bei der GT36 deutlich höher als bei der GT26; dadurch werden die Leistung und der Wirkungsgrad der Maschine verbessert.

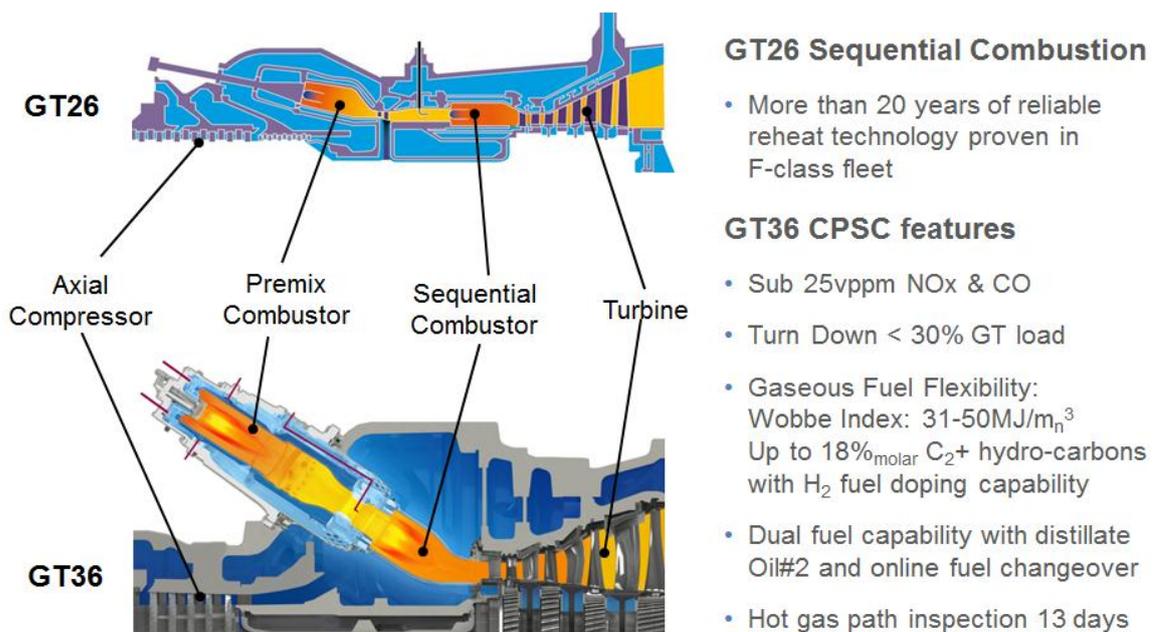


Abbildung 8: Vergleich Verbrennungskonzept GT36 versus GT26

Die GT36-Brennkammer ist – anders als die GT26-Ringbrennkammer - eine modulare Ring-Rohrbrennkammer-Konstruktion (auch Can-Brennkammer genannt).

Bei der GT36-S6 60Hz sind zwölf Rohrbrennkammern, bei der GT36-S5 50Hz sechzehn Rohrbrennkammern, im Brennkammer-Ringgehäuse der Gasturbine angeordnet.

Die Rohrbrennkammern beider Maschinenvarianten weisen einen hohen Anteil identischer Teile auf. Bei den Brennkammern wurde auf Durchzündrohre verzichtet. Jede Brennkammer wird mit zwei elektrischen Zündern gezündet.

Die GT36 Brennkammer verbindet die beiden sequentiellen Verbrennungsstufen in einem modularen Design.



GT36 CPSC Brennkammerluftverteilung und Betriebskonzept:

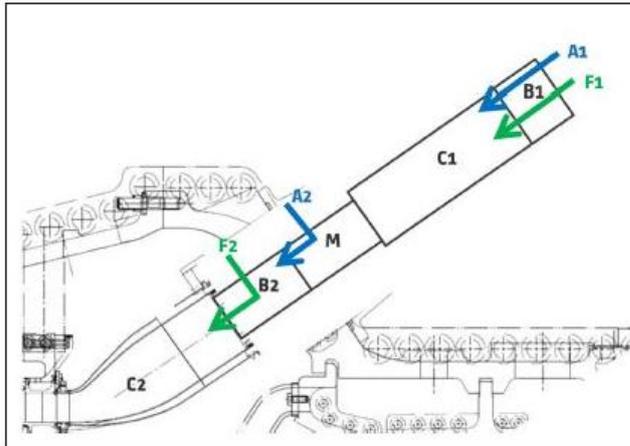


Abbildung 9: CPSC-Konzept, Sequentielle Verbrennung, 2 Stufen (C1, C2)

Die 1. Stufe (C1) ist ab Zünden im Betrieb (F1), die 2. Stufe (C2) wird bei tiefer Teillast zugeschaltet und bleibt bei der weiteren Lastaufnahme im Betrieb. Mit steigender Last nimmt der (Leistungs-) Brennstoff-Anteil (F2) der 2. Stufe kontinuierlich zu.

Ein Anteil der Verbrennungsluft (A2) umgeht die erste Brennkammer und wird dem Heissgas nach der ersten Brennkammer zugemischt. Dadurch befindet sich die erste Brennkammerstufe bereits bei Leerlauf in einem Temperaturfenster, welches homogene Vormischverbrennung, d.h. sehr tiefe NO_x Emissionen bei gutem Ausbrand, erlaubt.

Beim Betrieb beider Stufen (zwischen 10% Last und Vollast) sind nur kleine Änderungen in den Austrittstemperaturen der ersten Stufe notwendig; daher arbeitet die erste Stufe im gesamten GT-Lastbereich mit tiefen Stickoxid – und tiefen CO-Emissionen.

Die 2. Stufe ist für „Ultra Low NO_x“-Betrieb ausgelegt; die extrem tiefen Stickoxidemissionen werden durch eine sehr gute Mischung in Kombination mit einer kurzen Brennkammer-Aufenthaltszeit erreicht.

Bei Vollast wird die 2. Stufe mit deutlich höheren Heissgastemperaturen betrieben als die erste Stufe.

Ölbetrieb: Die GT36 CPSC-Brennkammer kann mit Heizöl als Ersatzbrennstoff betrieben werden; bei laufender Maschine kann von Erdgasbetrieb auf Ölbetrieb hin- und hergeschaltet werden. Das entsprechende Betriebskonzept wurde von der GT26 abgeleitet. Zur Einhaltung der Stickoxid-Emissionen wird Wasser in die Ölflammen eingespritzt.

Bei der ersten Brennkammer-Stufe, dem Flame Sheet-Brenner, wird die Öl/Wasser-Emulsion über mehrere Brennstoff-Stufen in der Zentral-Lanze eingedüst.

Bei der zweiten Brennkammer-Stufe wird die Öl/Wasser-Emulsion im Zentrum der Brennstoff-injektoren eingespritzt, dasselbe Konzept wird auch bei der GT26 SEV-Lanze verwendet.

**Allgemeine Informationen zur Validierung:**

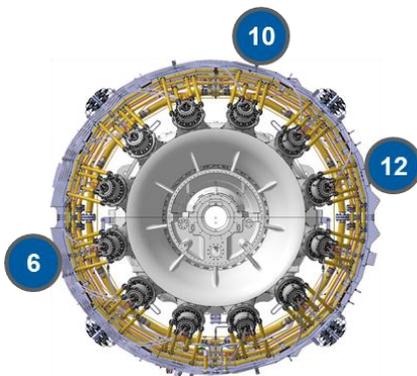
Die Brennkammervalidierung im GT36 Birr-4 Testkraftwerk beinhaltet folgende Themen:

- Überprüfung des Brennkammer-Betriebs in Birr und Vergleich des Betriebsverhaltens mit den durchgeführten HP Tests:
Betriebskonzept und vorhandener Betriebskorridor im Hinblick auf Schadstoffemissionen, Brennkammerdynamik (Pulsationen), Bauteilvibrationen und Brenner-Löschgrenzen. Brennkammer-Luftverteilung und Druckverluste, Metalltemperaturen und Heissgas-Temperaturprofile.
- Streuung des Verhaltens der einzelnen Rohrbrennkammern „can to can scatter“.
- Montage- und Demontagetests der Brennkammer: Überprüfung der Sequenzen, Hilfsmittel und Montagezeiten.
- Funktionalität und Betriebsverhalten des Brennstoffverteilsystems (FDS).
- Interaktion mit GT und Hilfssystemen (Zündsystem, Brennstoffregelsystem, Leittechnik).

Legend: ● = to be applied, ○ = to be partially applied / with limitations.

Validation Driver	CFD / analytic tools	Water channel lab	Flow bench	Atmospheric test rig	High pressure test rig		Test engine (Birr 4)		
					Intermediate pressure	Full pressure	T1	T2	T3
1. Component lifetime	○		○	○	○	●	○	●	●
2. Combustor operation & performance	○	○	○	○	○	●	●		●
3. Transferability of results	○			○	○	●	●		●
4. Emissions	○	○		○	●	●	●		●
5. Maintenance	○				○	○	●		
6. FDS functionality	○						●		●
7. Fuel Manifold (internal FDS)	○				●	●	●		
8. Can-to-can scatter	○		○				●	●	●

Abbildung 10: Validierungsplan, markiert T1 (Birr401)

Brennkammer-Instrumentierung Birr-4:

Alle Cans sind u.a. mit elektrischen Zündern, Sensoren zur Überwachung von Brennkammerdruckschwankungen, Thermoelementen zur Flammrückschlag-Überwachung sowie Thermoelementen zur Messung der Heissgastemperatur vor der sequentiellen Verbrennungsstufe (MET) ausgestattet.

Drei Cans (#6, 10, 12) sind mit zusätzlicher Prototypinstrumentierung instrumentiert; Druckmessstellen, Thermoelemente, Beschleunigungsaufnehmer, Pulsationssensoren; jeweils 143 Messstellen pro Can. Can #10 wurde bereits vorab auf dem Hochdruckprüfstand an der DLR in Köln unter verschiedenen Betriebsbedingungen getestet.

Abbildung 11: Brennkammerinstrumentierung Birr-4



Zünden und Hochfahren auf Nenndrehzahl:

Der Testblock „Zünden und Hochfahren auf Nenndrehzahl“ konnte erfolgreich abgeschlossen werden: Testen der Anfahrereinrichtung, schutztechnische Überprüfungen, Instrumentierungs-Checks, Zünden, Beschleunigen der Gasturbine, Zuschalten von Brennerstufen, Leerlaufbetrieb, Leckage-Tests, Bestätigung/Festlegung des Anfahrkonzepts und der relevanten Parameter (Zünddrehzahl, Brennstoffmengen der einzelnen Stufen, Stellung der Verdichter-Ausblaseventile).

Das Zusammenspiel der notwendigen Komponenten für das Hochfahren der Gasturbine – u. a.: Gasturbinen-Anfahrereinrichtung (Generator), Elektrisches Zündsystem, Brennstoffregelsystem, Brennstoffverteilssystem, Brennkammer(verhalten), Verdichter(verhalten), Leit- und Messtechnik – funktioniert gut.

Das Zünden und Hochfahren der Gasturbine auf Nenndrehzahl ist sehr robust und zuverlässig: Zuverlässige Zündung aller cans. Beim Zünden ist ein High Energy Igniter pro Can im Betrieb; Erdgas wird in der Brenner-Mitte durch die Pilot- und PilotTune Stufe eingedüst.

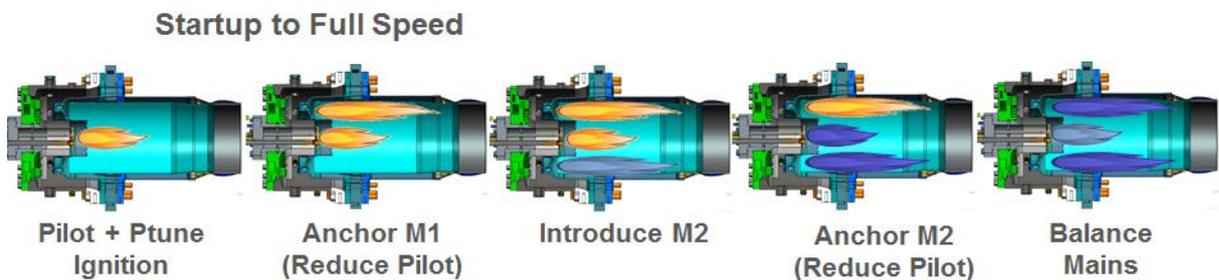


Abbildung 12: Betriebskonzept der ersten Brennkammer

Mit steigender Drehzahl wird zuerst die Main1-, danach die Main2-Premix-Stufe zugeschaltet und die Trimmung zwischen den Stufen verändert. Bei Leerlauf sind alle Brennstoff-Stufen der ersten Brennkammer in Betrieb. Das Zuschalten der Brennstoffstufen funktioniert stabil. Das Fahrkonzept ist von Brennkammertests an atmosphärischen und Hochdruckprüfständen abgeleitet und konnte ohne Änderung übernommen werden.

Der Start ist rauchfrei, das Emissionsverhalten wie erwartet; Stickoxidemissionen NO_x: <10 ppm, Kohlenmonoxid CO < 1000 ppm.

Das Betriebsfenster für das Hochfahren der Gasturbine ist sehr stabil (Kaltstart/Warmstart); die Brennkammer-Druckpulsationen und Vibrationen sind innerhalb des Limits; die Unterschiede in den Messwerten der einzelnen Cans sind sehr gering; sie zeigen ein homogenes Verhalten.

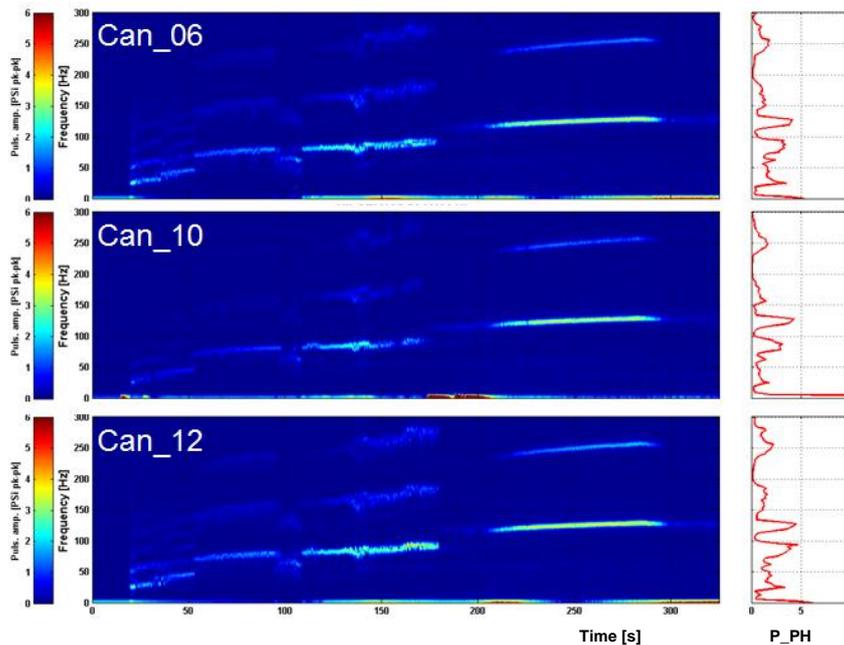


Abbildung 13: Run 4: Vergleich Brennkammerdruckschwankungen Can 6, 10, 12; homogenes Verhalten; geringe Streuung

Nenn Drehzahl/Leerlauf:

Die Brennkammerluftverteilung und Brennkammerdruckverluste bei Leerlauf entsprechen den Erwartungen. Dasselbe gilt für die gemessenen Materialtemperaturen und Heissgastemperaturprofile.

Betrieb auf Vollast / Last Betriebskonzept:

Betriebskonzept (Erdgas):

Beim Starten der GT wird Erdgas in den Pilot-Injektor eingedüst, mit der Innenluft des Brenners verdreht und vorgemischt. Das Brennstoff-Luft-Gemisch wird mit Zündfunken am Austritt in den Brennraum gezündet. Zünder befinden sich in der Zentrallanze. Beim Beschleunigen der GT auf Nenn Drehzahl wird Brennstoff durch den Main-Injektor (zwei über den Umfang gestufte Brennstoffeindüsen) zugeschaltet. Das durch den Main-Injektor eingedüste Erdgas wird mit der Brenner-Aussenluft vorgemischt und tritt über eine 180°-Umlenkung in den Brennraum ein. Die Pilot-Flamme ist drallstabilisiert, die Main-Flamme ist durch einen gebundenen Ring-Wirbel im Nachlauf der 180°-Umlenkung stabilisiert. Die Interaktion zwischen den zwei hochturbulenten Flammen trägt ebenfalls zur Stabilität der mageren Vormischflammen bei.

Bereits bei GT-Leerlauf befindet sich die erste Brennkammerstufe in einem Temperaturfenster, welches homogene Vormischverbrennung erlaubt, dadurch können schon bei Leerlauf sowohl sehr tiefe Stickoxidemissionen als auch ein guter Ausbrand erreicht werden.

Mit steigender Gasturbinenlast wird der Brennstoff zur ersten Stufe erhöht. Bei ungefähr 5 % Last sind die Eintrittstemperaturen in die sequentielle Brennkammer in einem optimalen Bereich zum Zünden und Betrieb der zweiten Brennkammer-Stufe. Durch Brennstoffzugabe in den Injektor der sequentiellen Brennkammer wird die zweite Stufe zugeschaltet. Mit steigender Lastaufnahme der Gasturbine wird mehr und mehr Erdgas zur Erhöhung der Brennkammeraustrittstemperatur in die sequentielle Stufe eingedüst, die Eintrittstemperatur in die sequentielle Brennkammer wird nahezu konstant belassen (dadurch produziert die erste Stufe tiefe NO_x und die zweite Stufe tiefe CO-Emissionen).



Die Flamme des sequentiellen Brenners stabilisiert durch Selbstzündung. Die Stabilität dieser Flamme hängt daher von der Eintrittstemperatur der zweiten Stufe ab.

Sowohl das sequentielle Brennerkonzept (Art der Wirbelgeneratoren) als auch das Brennstoffeindüsungskonzept sind von der GT26 SEV-Brennkammer abgeleitet. Die Mischung des Brennstoffs mit dem Heissgas wurde durch einen Brennstoff-Injektor mit Mehrpunkteindüsung (multi-point injector) sogar noch verbessert. Die extrem niedrigen NO_x-Emissionen der sequentiellen Stufe werden durch die Kombination von exzellenter „Brennstoff/Heissgas“ - Mischung vor der Verbrennung und kurzer Aufenthaltszeit im Brennraum erreicht.

Die Brennkammer wird betrieben und geregelt durch Variation der Brennstoffaufteilung in den Brennstoffstufen der ersten Brennkammer und durch Variation der Brennstoffmassenströme und Brennstoffaufteilung zwischen erster und zweiter Brennkammer. Daraus resultiert eine hohe Betriebsflexibilität.

Betriebskonzept (Heizöl):

Die GT36 CPSC-Brennkammer kann mit Heizöl als Ersatzbrennstoff betrieben werden; bei laufender Maschine kann von Erdgasbetrieb auf Ölbetrieb hin und her geschaltet werden. Das entsprechende Betriebskonzept wurde von der GT26 abgeleitet. Zur Einhaltung der Stickoxid-Emissionen wird Wasser in die Ölflammen eingespritzt.

Bei der ersten Brennkammer-Stufe wird die Öl/Wasser-Emulsion über mehrere Brennstoff-Stufen in der Zentral-Lanze eingedüst.

Bei der zweiten Brennkammer-Stufe wird die Öl/Wasser-Emulsion im Zentrum der Brennstoffinjektoren eingespritzt, dasselbe Konzept wird auch bei der GT26 SEV-Lanze verwendet.

Das Testen des Betriebes auf Öl war nicht Bestandteil der ersten Birr401 Testkampagne, Ölbetrieb ist für die 3. (Birr403) Kampagne geplant.

Pulsationen und Emissionen im gesamten Betrieb:

Die Brennkammerpulsationen werden in allen Cans am Eintritt der ersten Stufe gemessen. In den instrumentierten Cans sind, verteilt über die Länge des Brennraums, noch weitere dynamische Druckmessstellen vorhanden.

Im Lastbetrieb treten drei - von den Hochdrucktests bekannte - Pulsationsfrequenzen auf. Des Weiteren kann es beim Betrieb der ersten Stufe nahe der Löschgrenze zu zusätzlichen Pulsationen kommen, auch dieses Verhalten ist von den Hochdrucktests bekannt und für die Einstellung des Betriebsbereichs nicht kritisch.

Es sind bei der Gasturbinenvalidierung keine „neuen“ Pulsationsfrequenzen aufgetreten; die Übertragbarkeit des Brennkammerpulsationsverhaltens zwischen den Hochdrucktests und der Maschinenvalidierung in Birr ist gut.

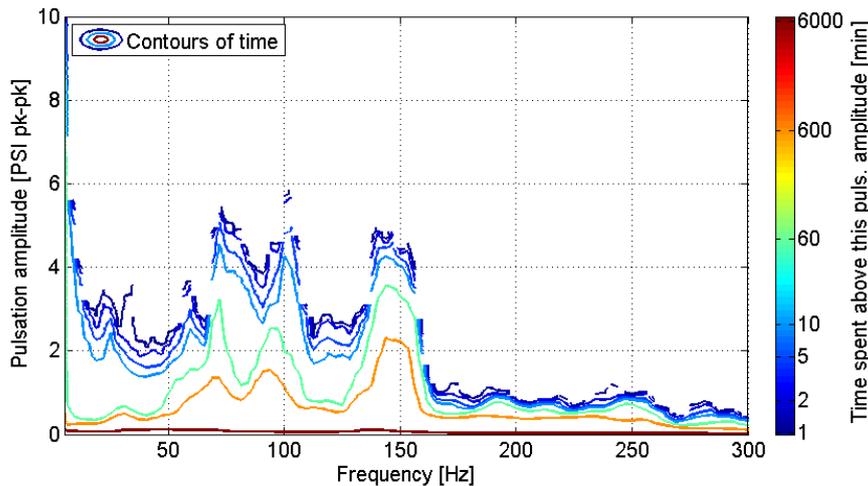


Abbildung 14: Kumulative Pulsationen Birr401 (142 Stunden Betrieb); Can #3

Pulsationen im Bereich von 100 Hz u 150 Hz treten auf, wenn die erste Brennkammerstufe innen (Pilot- / Anfahr- Stufe) oder aussen (Main-Stufe) „zu heiss“ betrieben wird. Die Pulsationen bei 70 Hz können auftreten, wenn die zweite Stufe zugeschaltet ist und die Brennkammer in einem mittleren TIT-Bereich (TIT: 1100°C – 1200°C) betrieben wird. Diese 70 Hz-Druckschwankungen werden reduziert oder vermieden, wenn die Brennkammer entweder mit einer relativ hohen oder einer relativ tiefen Eintrittstemperatur in die sequentielle Brennkammer betrieben wird.

Die Streuung im Pulsations-Verhalten zwischen den einzelnen Cans ist gering und lässt sich durch leicht unterschiedliche Heissgastemperaturen erklären; es wurde keine ausgeprägte Kopplung zwischen den Cans festgestellt, d.h.es tritt keine ausgeprägte Umfangs-Eigenform in den Pulsationen der einzelnen Cans auf.

Durch entsprechende Brennstoffstufungen in der ersten Brennkammerstufe und Einstellung der optimalen Eintrittstemperatur für die zweite Stufe wird die Maschine für einen ruhigen Betrieb eingestellt. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Brennkammern mit genügend Abstand zur Löschgrenze der Vormischbrenner betrieben wird. Die Verdichterluftmenge und die Gesamtbrennstoffmenge über die Last wird vom Gasturbinenfahrkonzept vorgegeben.

Die stationären Messpunkte im Betriebsbereich entlang der Gasturbinenbetriebskurve sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Für den effizienten Kraftwerksbetrieb ist nur die Standardbetriebskurve (Standard OPC) massgebend. Das alternative Betriebskonzept wird für den Thermalfarbentest verwendet.

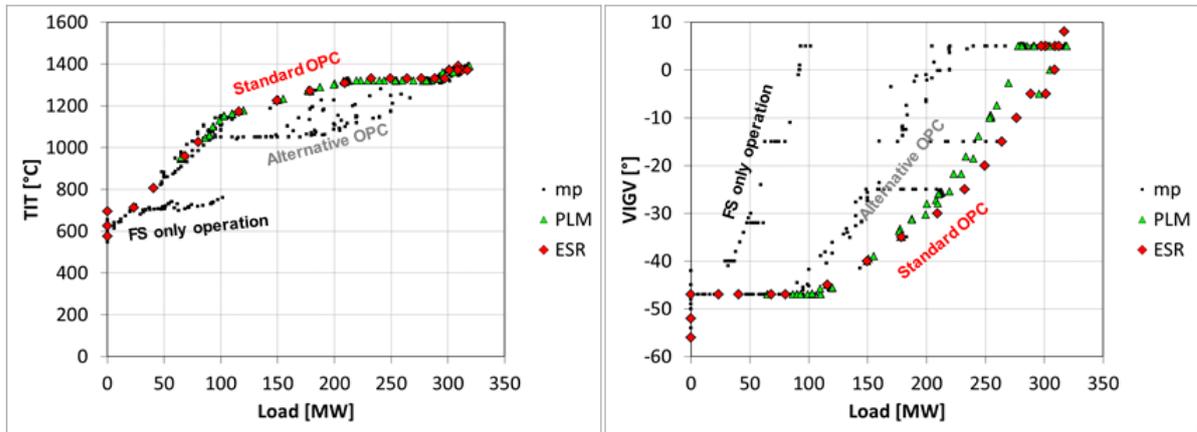


Abbildung 15: GT Messpunkte entlang der Betriebskurve

- TIT: Turbineneintrittstemperatur über der Gasturbinenlast
- VIGV: Verdichtervorleitreihe; Mass für Verdichterluftmenge über der Gasturbinenlast
- mp: Messpunkt (ohne Stabilisierungszeit)
- PLM: Part Load Mapping (Teillastmesspunkt mit Stabilisierungszeit)
- ESR: Extended Standard Reading (Messpunkt in warmer und stabilisierter Maschine)

Die Gasturbineneinstellungen für Leerlauf und niedrigen Teillastbetrieb waren durch das Rotordynamikverhalten der Gasturbine teilweise limitiert; die Vorleitreihe des Verdichters konnte nicht wie geplant geschlossen werden; dadurch fährt die Maschine in diesem Lastbereich mit mehr Luft, daher fahren die Brennkammern bei tiefer Teillast kälter als vorgesehen.

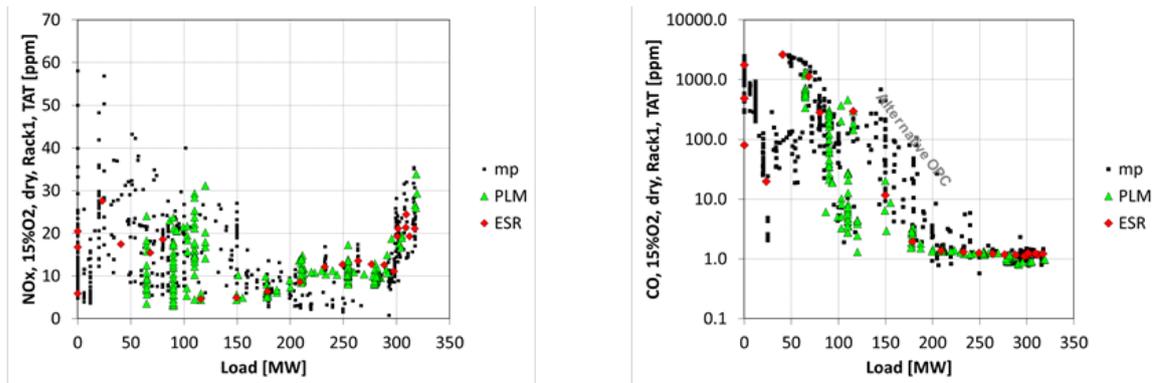


Abbildung 16: Stickoxide (NOx) resp. Kohlenmonoxid (CO über der Gasturbinenlast (alle Messpunkte) (Abkürzungen gleich wie in Abbildung oben)

Bei 40% Teillast konnten die CO Emissionsziele nicht erreicht werden; in diesem Lastbereich traten hohe BK-Pulsationen auf, die durch eine geänderte Brennstoffstufung mit Eintrittstemperaturabsenkung der sequentiellen Brennkammer gelöst wurden.

Durch diese Massnahme konnten die Pulsationslimits mit dem Standardbetriebskonzept deutlich unterschritten werden; Die Brennkammer kann daher in allen Betriebspunkten ruhig betrieben werden.

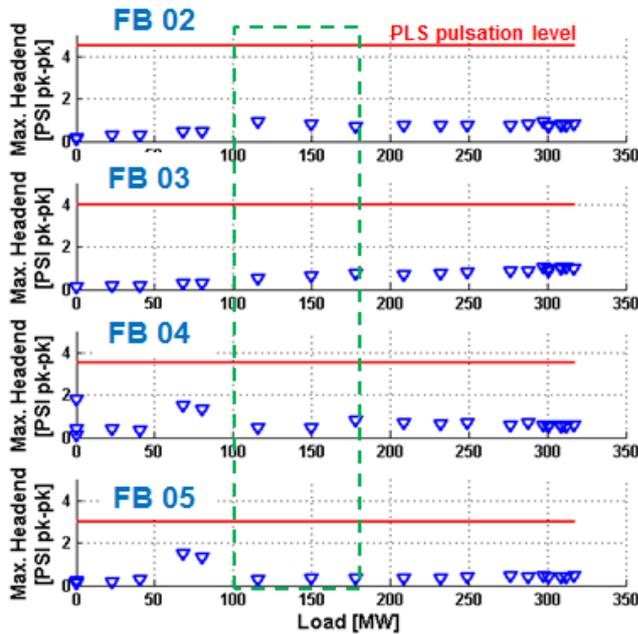
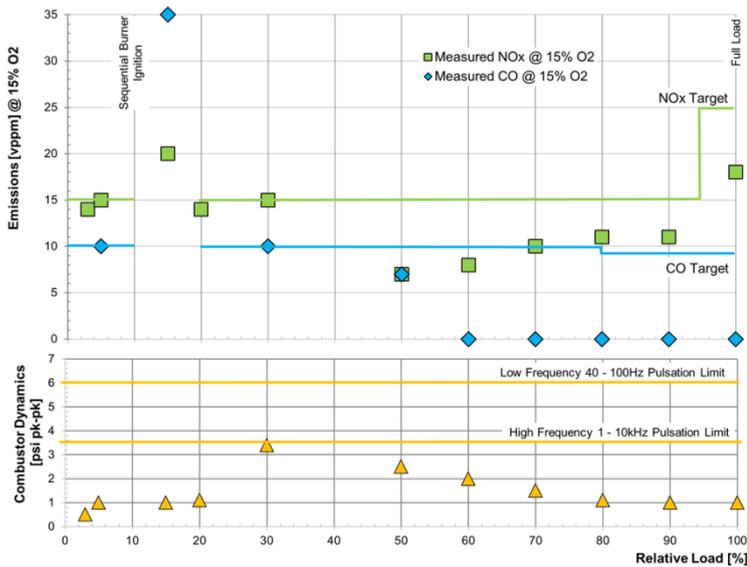


Abbildung 17: Brennkammerdruckschwankungen (Maximum aller Cans) in psi über der Gasturbinenlast
FB 2-5 sind die Frequenzbänder von 40 Hz – 300 Hz
FB2: 40-80 Hz; FB3: 80-110 Hz; FB4: 110-165 Hz; FB5: 165 – 300 Hz

Die Brennkammer erfüllt im Betriebsbereich von 50 % Last bis Vollast (100 % Last) alle Schadstoffziele (NO_x, CO) und kann leise, d.h. mit Brennkammerpulsationen deutlich unterhalb der Grenzwerte, betrieben werden. Die Stickoxidemissionen bei Vollast sind ausgezeichnet.



Emission and pulsation measurements of full engine under standard operation conditions.

Combustor Dynamics in psi peak to peak, maximum band selected, 6scan (2sec) average.

Abbildung 18: Birr-4: Emissionen/Pulsationen über der GT Last



Can to Can Scatter:

Bei der Fertigung der Cans wurden die einzelnen Brennkammerteile sorgfältig durchflussgetestet und kalibriert; die erwarteten Massenstromabweichungen (Luft und Brennstoff) zwischen den Cans liegen deutlich unter +/- 2 %. Das wird durch die bisherigen Messungen bestätigt. Die Unterschiede zwischen den Cans (Streuung) in Bezug auf Luftverteilung, gemessene Materialtemperaturen, Brennkammerdruckschwankungen, Vibrationen und Heissgastemperaturen sind sehr gering und liegen deutlich unter den Limiten.

Für den zuverlässigen und optimierten Betrieb des Brennkammersystems müssen sich die einzelnen Rohrbrennkammern (Cans) ähnlich verhalten.

Das wird durch die bisherigen Messungen an der GT bestätigt. Die Unterschiede zwischen den Cans (Streuung) in Bezug auf Druckverluste und Luftverteilung, gemessene Materialtemperaturen, Brennkammerdruckschwankungen, Heissgastemperaturen und Schadstoffemissionen sind sehr gering und liegen deutlich unter den Limiten.

Gemessene Heissgas- und Abgastemperaturvariationen bewegen sich im Bereich von +/- 10 K. Die oberen Cans laufen etwas kälter als die unteren Cans aufgrund der Anordnung der Brennstoffzuführung in die Brennstoffverteilerlinge.

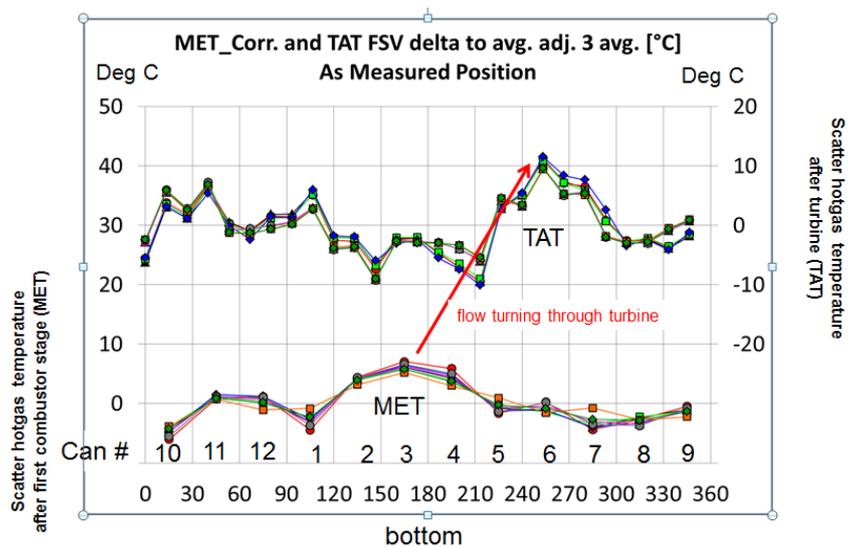


Abbildung 19: Lokale Heissgastemperaturen und Abgastemperaturen bei Volllast

Streuung der Heissgastemperatur nach der ersten Brennkammer (MET) in den einzelnen Cans (1-12) und entsprechende Abgastemperaturvariation nach der Turbine (TAT)

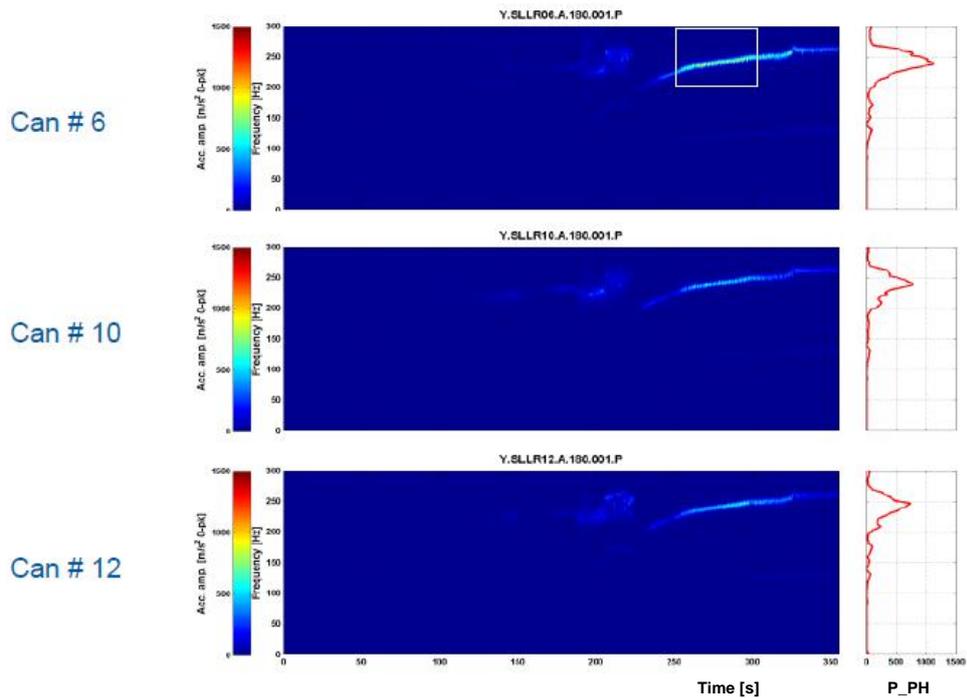


Abbildung 20: Spektrogramm der Sequential Liner Beschleunigungen beim Hochfahren in Run 15
Frequenz über Zeit, Farbe zeigt die Höhe der Beschleunigung. Die Graphen rechts zeigen die maximalen Beschleunigungen im Zeitintervall über die Frequenz.

Ein weiteres Beispiel für ein homogenes Brennkammerverhalten; geringe Can to Can-Variation ist das sehr ähnliche Pulsationsverhalten.

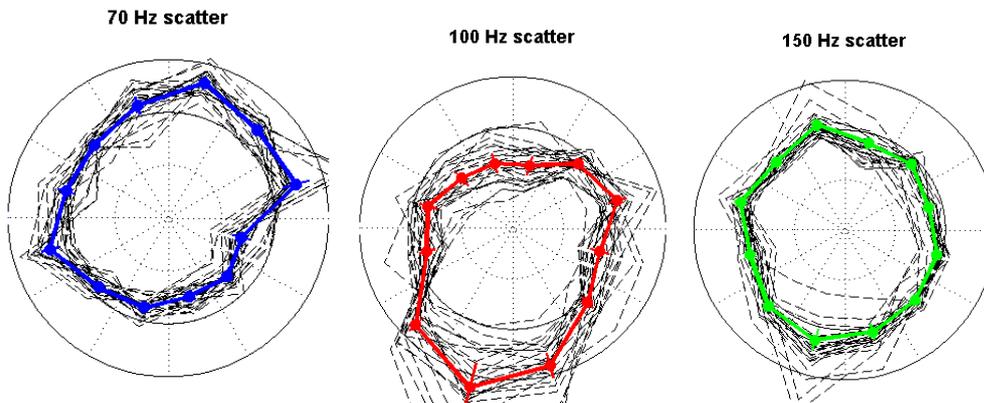


Abbildung 21: Pulsation-Variation bei drei Frequenzen über den Maschinenumfang (qualitativ)

Nächste Schritte:

Die Brennkammertests im Rahmen der GT36 Testkampagnen sind abgeschlossen. Weiterführende Entwicklungen wie auch Validierungen sind jedoch für das Optimieren und Weiterentwickeln der GT36 nötig. Deshalb ist weiter sicher noch mindestens eine Testkampagne für die Birr-Anlage bereits geplant. Ebenfalls werden weiterhin 1 bis 2 Hochdrucktestkampagnen pro Jahr in Köln durchgeführt.



GT36 Birr-4: Ergebnisse Leistung und Wirkungsgrad

Um Wirkungsgrade von über 40% für die Gasturbine und über 60% für das Kombikraftwerk zu erreichen, sind Feuerungstemperaturen von über 1800 Kelvin nötig. Die Feuerungstemperaturziele der GT36 Brennkammer wurden alle im Rahmen des Betriebes in Birr erreicht und die dazugehörigen Emissionen erfüllt.

Die erreichte Feuerungstemperatur in Kombination mit den gemessenen Komponentenwirkungsgrade (Politropischer Wirkungsgrad von Kompressor und Turbine sowie Druckverlust der Brennkammer) haben die Leistungs- und Wirkungsgradziele der Gasturbine bestätigt.

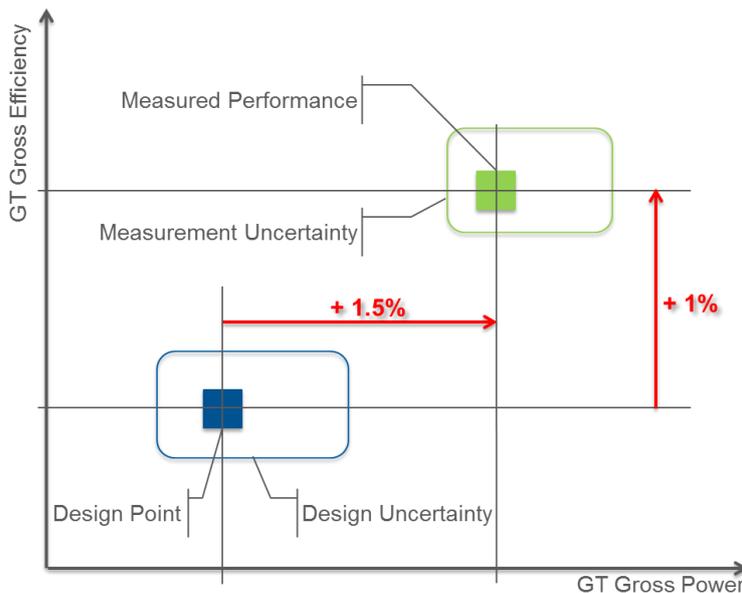


Abbildung 22: GT gross Wirkungsgrad über GT gross Leistung in Birr-4 (designed und gemessen)

Die in Birr gemachten Messungen korrigiert für die Verluste des Aktiven Generators (Frequenzumrichter), ergeben einen GT Wirkungsgrad grösser als 41%. Dieser GT Wirkungsgrad erlaubt den Bau eines Kombikraftwerkes mit mindestens 62% netto Wirkungsgrad.

GT36 Birr-4: Weitere Ergebnisse

>> Erprobung, Validierung und Weiterentwicklung von neuen innovativen Methoden für Kosten- und Ressourcenoptimierte Installation, Inbetriebnahme, Betrieb sowie Unterhalt einer neuen Verbrennungstechnologie in einem realitätsnahen Umfeld (Pilotanlage).

Die während der Erstinstallation gemachten Erfahrungen sind dokumentiert und aufgezeichnet. Installationsziele wurden trotz der vielen zusätzlichen Validierungsinstrumente praktisch überall erreicht. Verbesserungen waren allerdings im Bereich der Brennkammerinstallation benötigt. Diese hat beim ersten Mal die Zeitziele überschritten. Für die Reparatur der Instrumentierung wurden 6 der Brennkammern wieder ausgebaut. Die Möglichkeit wurde verwendet um erste Verbesserungen im Einbau zu prüfen. Ebenfalls wurden für das Öffnen der Maschine für den Einbau der Thermalfarbenanteile ein weiteres Mal Erfahrungen gesammelt und Verbesserungen ausprobiert. Aus heutiger Sicht lässt sich auch für die Brennkammerinstallation die Installationszeit bestätigen.



>> Validierung der Entwicklungsziel­daten im Hinblick auf eine wirtschaftlich erfolgreiche und risikoarme Markteinführung dieser neuen Technologie.

Während der gesamten Entwicklungs- und Herstellphase wird die Kostenentwicklung kontinuierlich verfolgt und an den Entwicklungszielen gemessen. Parallel dazu verfolgen wir systematisch die Entwicklung des Marktes und passen die Ziele an, falls nötig. Wir bewegen uns hier also in einem sehr dynamischen Umfeld. Deshalb analysieren und adaptieren wir systematisch und kontinuierlich. Das gleiche gilt auf der Seite der Leistungsdaten, welche wir parallel im Verkauf für Offerten verwenden.

Während wir heute gut fundierte Aussagen machen können über Leistungsparameter und Kosten, sind die Voraussagen der Lebensdauer der Hauptkomponenten noch ein wichtiger offener Faktor für die Wirtschaftlichkeit und risikoarme Markteinführung. Anhand der in Birr401 gewonnenen Messdaten lässt sich bestätigen, dass sämtliche gemessenen Metalltemperaturen innerhalb der Erwartungen liegen. Der in der zweiten Testkampagne (Birr402) geplante Thermalfar­bentest wird uns erlauben, die Lebensdauerziele zu bestätigen.

Betreffend Markteinführung wurde die GT36 durch Ansaldo Energia offiziell im Rahmen der Power Gen Ausstellung in Mailand im Juni 2016 angekündigt. In der Zwischenzeit wurden einige weitere Publikationen über die Maschine veröffentlicht (ASME und Power Gen) und die Maschine wurde für mehrere Projekte angeboten. Für die Platzierung der ersten Maschine (Frontrunner) erscheint im Moment ein Kraftwerk in China [Anhang 1] als sehr realistisch. Ebenfalls wurde der Produktionsstandort weiter ausgebaut um die Produktion der grossen GT36 zu ermöglichen [Anhang 2].

>> Bestätigung und Stärkung des Standorts Schweiz als Zentrum für Innovation, Entwicklung, Technologie und Know-how.

Auch 2017 hat Ansaldo für die Entwicklung der Technologie und des Produktes im Durchschnitt 220 Personen hauptsächlich in der Schweiz direkt beschäftigt. Dazu kommen noch diverse Stellen intern und extern, welche zuarbeiten. Weiter sind die zahlreichen direkten Zulieferer in der Schweiz und Europa dazuzuzählen. Das Investitionsvolumen des Projektes in der Schweiz war kumuliert über die Projektdauer rund 38'000k€.

Für den laufenden Testbetrieb sind im Durchschnitt 25 Personen mit dem Betrieb der Anlage und den zugehörigen Messsystemen beschäftigt – dieses Team setzt sich aus Personen von Ansaldo Schweiz sowie Ansaldo Italien und PSM in den USA zusammen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das vorliegende Projekt einen substantiellen Beitrag zur positiven Entwicklung des Wirtschafts- und Innovationsstandortes Schweiz beiträgt.



Diskussion

Alle wesentlichen technischen Ziele wurden erreicht und die Funktionalität der Verbrennungstechnologie für die GT36 ist bestätigt. Damit ist die technologische Zukunft sowohl für die Sequentielle Verbrennung wie auch das GT36 Produkt gesichert. Die Markteinführung wird weiter verfolgt und die nächsten, weiterführenden Entwicklungen, aufbauend auf den Birr Resultaten, werden sowohl die weitere Optimierung der GT36 wie auch anderer Ansaldo Gasturbinen Produkte sichern.

Projektplan

Die wichtigsten Projekt- und Testmeilensteine im Überblick:

Block	Hauptziel	Ende	Bemerkungen
1	Motorroll und Start	9. Juni 2016	
2.1 – 2.6	Heiss Inbetriebnahme der ersten Brennkammerstufe	18. Juni 2016	
n/a	Evaluation und Instrumentierungs-Reparatur	5. Dezember 2016	
2.7	Optimierung der ersten Stufe bei Teillast	16. Dezember 2016	
3	Sequential Brenner heiss Inbetriebnahme	5. Januar 2017	
4	Volllast Test	10. März 2017	
5	Teillast Messungen, Volllast Optimierungen	29. März 2017	
6	Ausgedehnte Messkampagne	5. April 2017	
7	Übungsläufe für den Thermalfarbentest	12. April 2017	Ende Birr401
Birr402	Thermalfarben Test	26. September 2017	
Birr403	Optionen (inklusive Diesel) Tests	Sommer 2018	

Tabelle 2: Testmeilensteine

Die Validierung der GT36 als Produkt, inklusive der Verbrennungstechnologie, konnte im April 2017 abgeschlossen werden, weniger als 1 Jahr nach dem ersten Zünden. Ebenfalls wurde der Thermalfarbentest im September 2017 erfolgreich durchgeführt und die Teile sind zur Untersuchung in den Laboren eingetroffen.

Der Fokus der Entwicklung liegt nun in den weiterführenden Testkampagnen. Birr403 mit Fokus auf neue Technologien, Optionen und Dieselbetrieb im 2018.



Schlussfolgerungen

Die GT36 Verbrennungstechnologie konnte in den Hochdrucktests und in der Birr-4 Testanlage erfolgreich validiert werden. Die Projektziele wurden erreicht und damit kann eine wirtschaftliche und risikoarme Einführung dieser Technologie in den Gasturbinen-Markt voranschreiten.

Ferner wurden Erfahrungen gesammelt, welche eine Weiterentwicklung des Verbrennungskonzeptes hin zu noch höheren Feuerungstemperaturen, für Kombianlagen mit Wirkungsgrad über 65%, als realistisch erscheinen lassen.

Die Unterstützung des Projektes durch das Bundesamt für Energie hat massgeblich dazu beigetragen, dass genügend Mittel für den Bau der Testanlage sowie die Durchführung der Validierung vorhanden waren und somit die Technologie wie auch der Technologiestandort weiter gesichert sind.

Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

Die Markteinführung der GT36 ist nach erfolgreicher Validierung von Verbrennungstechnologie und Produkt der wichtigste nächste Schritt für die Firma Ansaldo Energia. Daran wird mit Hochdruck gearbeitet und bereits sind die ersten „Memorandums of Understanding“ für drei Projekte unterzeichnet, sowie die nächste GT36 Gasturbine in der Produktion in Genua. Die Auslieferung der ersten Kundenmaschine, Produktdatenblatt im [Anhang 3], ist für Anfang 2019 geplant.

Ansaldo investiert weiter in die Zukunft der GT36 Maschinen indem bereits weiterführende Technologien, die über dieses Projekt hinausgehen, entwickelt und getestet werden. Bereits wurde ein Thermalfarbenetest, welcher neben den Standarteilen auch Teile der nächsten Generation enthält, erfolgreich durchgeführt. Die Auswertung dieses Tests läuft im Moment in den Laboren von Ansaldo und Rolls Royce.

Die fürs 2018 geplante, dritte Testkampagne Birr403, wird neben dem Testen von Dieselmotoren bereits Komponenten für die nächste Maschinengeneration beinhalten und somit das Produkt GT36 auf die zukünftigen Marktanforderungen vorbereiten.

Anhang

Anhang 1: Press Release – Shanghai Electric Partnership

Anhang 2: Press Release – Cornigliano Factory

Anhang 3: GT36 Produkt Datenblatt