

Abschlussbericht BWPLUS

Retrofit H₂: Retrofitkonzepte für Bestandskraftwerke als Einstieg in die Wasserstoffnutzung

von

Dr. Martina Hohloch, Dr. Peter Kutne, Timo Lingstädt, Markus Wächter, Tze-Yeung Cheung

DLR, Institut für Verbrennungstechnik
Power Service Consulting GmbH (PSC)

Förderkennzeichen: BWZPH222118-9

Laufzeit: 01.01.2022 – 30.09.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Dezember 2024



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Kurzfassung

Im Projekt Retrofit H₂ wurde erfolgreich ein Konzept für die Umrüstung von bestehenden Gasturbinenanlagen auf die Nutzung von Wasserstoff und Mischungen von Wasserstoff und Erdgas gezeigt. Hierzu wurden zunächst durch die Firma PSC verschiedene Bestandssysteme analysiert - vor allem in Bezug auf den Aufbau der Brennstoffverteiler- und Regelsysteme, sowie deren Sicherheitseinrichtungen und das Steuerungssystem. Für den Aufbau der Demonstrationsanlage wurde die Betrachtung speziell auf eine kommerziell erhältliche Mikrogasturbine (MGT) mit einer Größe von 100 kW der Firma Ansaldo Green Tech angewendet und die erforderlichen Umbauten definiert. Gleichzeitig wurde ein auf die MGT angepasstes flexibles Steuer-, Regel- und Mischsystem entwickelt. Dieses dient dazu, die vom Nutzer gewünschte Brennstoffmischung bereitzustellen und der Mikrogasturbine zuzuführen. Hierfür musste eine Kommunikation zwischen Gasturbinensteuerung und der Steuerung des Mischsystems aufgebaut werden, die sicherstellt, dass beide Systeme aufeinander abgestimmt laufen und ein Informationsaustausch stattfindet. Die Mikrogasturbine wurde für die Nutzung von Wasserstoff und Brennstoffmischungen aus Wasserstoff und Erdgas umgebaut. Die Sicherheitseinrichtungen wurden überprüft und durch wasserstofftaugliche Gaswarnsensoren ergänzt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Brennkammer und das Brennstoffsystem gesetzt. Am DLR Institut für Verbrennungstechnik (VT), Abteilung Gasturbinen, wurde für die Nutzung von Wasserstoff ein neues Brennkammersystem entwickelt. Die erste Auslegung wurde mittels CFD Methoden durchgeführt. Hierbei wurde ein Brennerkonzept gewählt, was auf der jetstabilisierten Verbrennung basiert. Dieses Konzept bietet eine hohe Brennstoffflexibilität und eine erheblich reduzierte Gefahr von Flammenrückschlägen, was vor allem in Hinblick auf die Nutzung von Wasserstoff von Vorteil ist. Aus den numerischen Untersuchungen konnten erfolgversprechende Varianten abgeleitet werden. Diese wurden zunächst in einem atmosphärischen Einzelbrennerprüfstand untersucht und nacheinander zwei Prototypen für die Anlage ausgewählt. Als Testumgebung für die Demonstrationsanlage wurde der DLR Standort Lampoldshausen ausgewählt, da hier eine Testplattform für Wasserstoffanwendungen aufgebaut wurde, die alle Testplätze mit grünem Wasserstoff versorgt und die notwendige Infrastruktur bereitstellt. Die Demonstrationsanlage wurde von PSC und DLR-VT gemeinsam aufgebaut und mit den entwickelten Komponenten Mischsystem und Brennkammersystem ausgestattet, sowie für den Betrieb modifiziert. Die Anlage wurde zudem mit einer mobilen Messdatenerfassung vom Institut VT ausgestattet. Die Demonstrationsanlage konnte erfolgreich mit dem Prototyp 1 in Betrieb genommen werden. Da dieser Prototyp noch Verbesserungspotentiale aufzeigte, wurde daraufhin ein zweiter Prototyp aufgebaut und ebenfalls in der Anlage vermessen. Hiermit konnte ein Wasserstoffbetrieb mit Emissionen unterhalb von 15 ppm NO_x (normiert auf 15 Vol% Restsauerstoff) erreicht werden. Damit wurde die Grenze von Erdgas aus der TA Luft deutlich unterschritten, was für die Wasserstoffverbrennung, die tendenziell höhere NO_x Emissionen verursacht als die Erdgasverbrennung ein außerordentliches Ergebnis darstellt. Zudem konnte die erfolgreiche Zumischung von Erdgas bei stabiler Verbrennung gezeigt werden.

Inhalt

Kurzfassung.....	iii
Inhalt.....	iv
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
Abkürzungsverzeichnis.....	ix
1 Einleitung.....	11
1.1 Motivation.....	11
1.2 Zielsetzung.....	12
1.3 Vorgehen.....	13
2 Verfahrensentwicklung und Design eines brennstoffflexiblen Regel-, Misch- und Verteilungssystems.....	16
2.1 Analyse der Bestandssysteme.....	16
2.1.1 Analyse des Brennstoffsystems „AE-T100“.....	16
2.1.2 Analyse der Schutzsysteme und Anforderungen gemäß ISO 19372 ..	17
2.1.3 Übertragung der Erkenntnisse auf Anlagen bis 100 MWel.....	20
2.1.4 Ergebnis.....	21
2.2 Entwicklung notwendiger Sensorik.....	22
2.3 Entwicklung eines brennstoffflexiblen Regel-, Misch-, und Verteilsystems	23
2.3.1 Entwicklungsprozess.....	23
2.3.2 Designmerkmale.....	25
2.3.3 Funktionslogik.....	25
2.3.4 Schutzkonzept.....	26
2.3.5 1D-Simulation Fluidtechnik und Regelung.....	26
2.3.6 CAD-Konstruktion Wasserstoffbeimischsystem.....	27
2.3.7 Montage und Prüfung.....	28
2.3.8 Dokumentation.....	29
2.3.9 Funktionsweise im Zusammenspiel mit der Mikrogasturbine.....	29
2.4 Entwicklung eines Retrofitkonzepts.....	30
2.4.1 Allgemein.....	30
2.4.2 Integration des Brennkammersystems.....	31

2.4.3	Erdgasversorgung	31
2.4.4	Austausch Ventilblock	31
2.4.5	Zündvorgang	32
2.4.6	CFD-Berechnung Leckageerkennung	33
2.4.7	Konformitätsuntersuchung	34
3	Brennkammerentwicklung	36
3.1	Brennkammersystem der AE T100	36
3.2	Auslegung des Brennkammersystems mittels CFD Methoden.....	37
3.3	Untersuchung des Brenners im atmosphärischen Prüfstand	39
3.3.1	Versuchsergebnisse mit Wasserstoff	43
3.3.2	Vergleich Wasserstoff zu Erdgas	44
3.3.3	Einfluss der Pilotstufe bei Erdgas und Wasserstoff	46
3.4	Ableitung des Brennkammersystems für die Mikrogasturbine.....	49
4	Erprobung im MGT System	50
4.1	Mikrogasturbine AE-T100.....	50
4.2	Aufbau und Anschluss der Mikrogasturbine auf dem Testfeld	51
4.3	Anpassungen an der Mikrogasturbine	54
4.4	Inbetriebnahme	55
4.5	Experimentelle Ergebnisse.....	56
4.5.1	Transiente Charakterisierung	56
4.5.2	Charakterisierung in stationären Punkten	59
5	Zusammenfassung	62
6	Verwertung	63
7	Ausblick	65
	Literaturverzeichnis	66
	Anhang	A
	Veröffentlichungen und weiterführende Links	A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Projektstrukturplan.....	14
Abbildung 2-1 Minimalanforderung an Brennstoffsysteme für gasförmigen Brennstoff	18
Abbildung 2-2 Blockdiagramm Wasserstoffbeimischsystem.....	24
Abbildung 2-3 Simulation Regelungsverhalten Mischsystem	27
Abbildung 2-4 Außendarstellung H ₂ -Mischsystem	28
Abbildung 2-5 Innenleben H ₂ -Mischsystem	28
Abbildung 2-6 Integration des Beimischsystems in den Brennstoffpfad	31
Abbildung 2-7 Brennstoffregel- und Verteilerblock	32
Abbildung 2-8 Verteilung fünf verschiedener Leakagestellen in der Schallhaube.....	34
Abbildung 3-1 Schnitt durch die jet-stabilisierte DLR-Brennkammer für die AE-T100	36
Abbildung 3-2: Isokonturen der Wärmefreisetzungszonen mit farblicher Visualisierung der Temperaturverhältnisse im F400h1	37
Abbildung 3-3: Luftzahl, Wärmefreisetzungszone und Peak-Temperaturzonen für v.l. F400h1, F400h2, F400h3 bei Referenzvollastbetriebspunkt.....	39
Abbildung 3-4 Brenner auf dem atmosphärischen Prüfstand im Hintergrund Luftherhitzer und Luftversorgung.....	40
Abbildung 3-5 Übersicht ATM Prüfstand.....	41
Abbildung 3-6 Schnitt ATM Prüfstand.....	41
Abbildung 3-7 Vergleich F400h1, h2, h3: OH* Chemolumineszenz	43
Abbildung 3-8 Vergleich F400h1, h2, h3: NO _x Emissionen.....	44
Abbildung 3-9 Vergleich von verschiedenen Brennstoffen	45
Abbildung 3-10 Emissionen von NO _x und CO für die verschiedenen Brennstoffe	46
Abbildung 3-11 Einfluss der Pilotstufe bei Erdgas	47
Abbildung 3-12 Einfluss der Pilotstufe auf die Emissionen bei Erdgas	47
Abbildung 3-13 Einfluss der Pilotstufe bei Wasserstoff	48
Abbildung 3-14 Einfluss der Pilotstufe auf die Emissionen bei Wasserstoff	48
Abbildung 4-1 Schnitt durch die Hauptkomponenten der Mikrogasturbine	50
Abbildung 4-2 Gesamtansicht AE-T100 im Gehäuse	50
Abbildung 4-3 Gasturbinenkreislauf und Prozess im T,s - Diagramm	51
Abbildung 4-4 Schematische Anordnung von Turbine und Mischsystem	51

Abbildung 4-5 Mobiler Messdatenkoffer (Innenansicht).....	52
Abbildung 4-6 Zwischenschritte im Aufbau der Anlage	53
Abbildung 4-7 Gesamtübersicht der Anlage	53
Abbildung 4-8 geänderte Brennstoffzuführung und Brenneraufbau.....	54
Abbildung 4-9 F400h1: Kaltstart auf 100 kW	57
Abbildung 4-10 F400h1: Warmstart auf 100 kW.....	58
Abbildung 4-11 F400h1: Variation der Pilotmappe bei Volllast	58
Abbildung 4-12 NO _x und CO-Verhalten des h1-Brenners bei Erdgaszumischung....	59
Abbildung 4-13 NO _x -Verhalten des h3-Brenners über den Lastbetriebsbereich bei 100% H ₂ -Verbrennung.....	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Projektzeitplan	15
Tabelle 3-1 Konstante Parameter	42
Tabelle 3-2 Parametervariationen	42

Abkürzungsverzeichnis

AE	Ansaldo Energia
AP	Arbeitspaket
ATEX	Atmosphères Explosibles (Explosionsfähige Atmosphären)
ATM	atmosphärisch
BK	Brennkammer
CAD	Computer-Aided Design (Computerunterstütztes Design)
CE	Conformité Européenne (Europäische Konformität)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)
CO	Kohlenmonoxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EN	Europäische Norm
FLOX	Flameless Oxidation (Flammenlose Oxidation)
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse)
HAP	Hauptarbeitspaket
IEA	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
λ	Luftzahl / [-]
LHV	Lower Heating Value (Unterer Heizwert) / [MJ/kg]
\dot{m}	Massenstrom [g/s]
MGT	Mikrogasturbine
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
NG	Natural Gas (Erdgas)
NO _x	Stickoxid
OH	Hydroxylradikal
PSC	Power Service Consulting GmbH
PWM	Pulsweitenmodulation
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes

S	Split (Brennstoffaufteilung) / [-]
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
T	Temperatur / [°C]
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TOT	Turbinenausstrittstemperatur
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UV	Ultraviolett
VDC	Volt Direct Current (Gleichstrom)
VT	Verbrennungstechnik

1 Einleitung

1.1 Motivation

Um nachhaltig die Klimaerwärmung zu beeinflussen ist eine starke Dekarbonisierung des Stromerzeugungssektors notwendig, die über einen intensiven Ausbau der erneuerbaren Energien (Solar und Wind) erreicht werden kann (IEA, Energy Technology Perspectives, 2020). Jedoch muss die fluktuierende Bereitstellung von Strom durch andere zuverlässige, bezahlbare und nachhaltige Erzeugungsverfahren ausgeglichen werden können, um eine zuverlässige und bedarfsgerechte Stromversorgung zu gewährleisten. Diese Stromerzeugungsverfahren müssen sich aus erneuerbaren Quellen speisen. Wasserstoff als Energiespeicher bietet hier großes Potential, da er durch Elektrolyse aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden kann, wenn diese zur Verfügung stehen und in großen Mengen speicherbar ist. Die IEA (IEA, The Future of Hydrogen, 2019) bestätigt, dass Wasserstoff einen wichtigen Beitrag zu einem sauberen Energiesystem leisten kann. Dass dies der breiten Meinung entspricht, zeigen auch die Vielzahl an nationalen und internationalen Förderaufrufe zur Entwicklung und Umsetzung von Wasserstofftechnologien (zum Beispiel Förderaufruf des Bundes „Technologieoffensive Wasserstoff“).

Gasturbinen leisten heute schon einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilisierung und sind aufgrund ihrer hohen Lastflexibilität und kurzen Startzeiten bestens für diese Aufgabe geeignet. Durch eine Erweiterung des Brennstoffspektrums auf Wasserstoff können Gasturbinen sowohl in der Übergangsphase der Energiewende, als auch langfristig eine zentrale Rolle spielen. Wasserstoff-Gasturbinen können als CO₂ neutrale Technologie einen großen Beitrag leisten um die ambitionierten Energie- und Klimaziele zu erreichen. Darüber hinaus ist aufgrund des hohen Reifegrades der Gasturbinentechnologie ein schneller Einstieg in die Nutzung von Wasserstoff möglich. Dies wurde auch von den Gasturbinenherstellern erkannt und 2019 hat sich die Gasturbinenindustrie dazu verpflichtet bis 2030 Gasturbinen zu entwickeln, die mit 100% Wasserstoff betrieben werden können (EUTurbines, 2019). Die Selbstverpflichtung zeigt eindrucksvoll, wie wichtig die Nutzung von Wasserstoff in Gasturbinen in Zukunft eingeschätzt wird, denn die Adaption, insbesondere der hocheffizienten Gasturbinensysteme, auf Wasserstoff erfordert signifikante Investitionen und Entwicklungsarbeit. Der Fokus liegt hier allerdings zuerst auf den neuen Gasturbinen. Die Entwicklung von Retrofit-Lösungen für Bestands-gasturbinen hat nicht die oberste Priorität. Für die Gasturbinenhersteller ist dies auch nicht besonders rentabel, da die Bestandsanlagen je nach Baujahr und Upgradestufe stark unterschiedlich sind und jede Umstellung auf Wasserstoff im Einzelfall betrachtet werden muss.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist allerdings der Anreiz in eine neue Gasturbine zu investieren, die ausschließlich mit 100% Wasserstoff betrieben werden kann noch sehr gering. Zum einen stellt sich die Frage woher und wie zuverlässig Wasserstoff in großen Mengen herkommen und zur Verfügung stehen kann. Zum anderen ist noch nicht klar, wie ein wirtschaftlicher Betrieb mit Wasserstoff realisiert werden kann, da Wasserstoff erheblich teurer ist als Erdgas und konkrete Perspektiven fehlen. Bis auf wenige

Demonstrationsprojekte scheint der Aufbau von großen kommerziellen Wasserstoffkraftwerken noch in weiter Ferne.

Auch wenn hier in Zukunft Anreize geschaffen werden, um die Nutzung von Wasserstoff in der Stromerzeugung zu fördern, wird auch in den nächsten Jahren der Wasserstoff aufgrund der noch fehlenden Infrastruktur eher dezentral und aufgrund der unzureichenden Erzeugungskapazitäten auch nur in kleineren Mengen zur Verfügung stehen. Gerade um hier einen schnellen Einstieg zu ermöglichen, würde sich die Umrüstung von kleinen und mittleren Bestandskraftwerken anbieten. Hierfür fehlen aber sinnvolle und insbesondere flexible und skalierbare Retrofit-Konzepte, die auf die unterschiedlichen Systeme übertragen werden können.

Um die Einstiegshürde noch weiter zu reduzieren, wären brennstoffflexible Lösungen ideal, die bei Verfügbarkeit mit Wasserstoff betrieben werden können, aber auch mit einem Backupbrennstoff (heute Erdgas, in Zukunft Biogas oder Biomethan) oder Mischungen von beiden betrieben werden könnten. Hierfür sind neuartige Brennersysteme notwendig, die die enorme Bandbreite von unterschiedlichen Brennstoffeigenschaften von Wasserstoff bis Erdgas abdecken. Eine solche Umrüstung würde eine H₂-Ready Gasturbine, die weiterhin mit Erdgas betrieben werden kann, als Ziel haben. Eine solche Brennstoffflexibilität wird von den Gasturbinenherstellern erst als übernächster Schritt verfolgt und somit werden solche Lösungen in naher Zukunft voraussichtlich auch nicht für neue Gasturbinen zur Verfügung stehen.

Obwohl weltweit einige Serviceanbieter für Gasturbinen an solchen Entwicklungen arbeiten, gibt es bisher weder in Deutschland noch weltweit fertige Lösungen hierfür. Ein zentraler Grund dafür ist die hohe Komplexität des Brennersystems, das sowohl das sehr reaktionsträge Erdgas als auch den sehr reaktiven Wasserstoff stabil und schadstoffarm umsetzen muss. Weitere Fragestellungen betreffen die Brennstoffzuführung, Sensorik und die Betriebssicherheit.

Für einen schnellen und einfachen Einstieg der Stromerzeugung in die Nutzung von Wasserstoff werden möglichst gut auf unterschiedliche Gasturbinen übertragbare Retrofit-Konzepte benötigt, die einen brennstoffflexiblen Betrieb der Gasturbinen mit Erdgas und Wasserstoff ermöglichen. Um diese Herausforderung anzugehen ist sowohl ein tiefes Verständnis der Verbrennungsvorgänge von Bedeutung als auch ein detailliertes Wissen über ein breites Spektrum an Gasturbinen im kleinen und mittleren Leistungsbereich erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Das Gesamtziel des Verbundprojektes umfasst die Umrüstung einer kommerziell erhältlichen Gasturbine der Firma Ansaldo Green Tech vom Typ AE-T100 (Ansaldo Green Tech, 2024) (elektrische Leistung: 100 kW) von reinem Betrieb mit Erdgas auf Mischbetrieb mit Erdgas und Wasserstoff mit wechselnden Volumenanteilen sowie auf den reinen Wasserstoffbetrieb im Hinblick auf den kommerziellen Betrieb und die entsprechenden Sicherheitsaspekte. Im Einzelnen wurden dazu folgende Ziele gesetzt:

Die Firma PSC analysiert Bestandssysteme mit einer Größe von bis zu 100 MW_{el} inklusive Mikrogasturbinen und entwickelt aus den Erkenntnissen Konzepte für das

Retrofit auf die Wasserstoffanwendung. Des Weiteren soll ein modulares und skalierbares Brennstoffzuführungssystem inklusive der notwendigen Sensorik ausgelegt und aufgebaut werden. Dieses beinhaltet ein brennstoffflexibles Regel-, Misch-, und Verteilungssystem, die Zuführung zur Gasturbine sowie Änderungen im bestehenden Brennstoffstrang. Das DLR Institut für Verbrennungstechnik entwickelt ein brennstoffflexibles Brennkammersystem für die Nutzung von reinem Wasserstoff und Zumischung von Erdgas. Die entwickelten Komponenten werden anschließend in die eingangs beschriebene Demonstrationsanlage integriert und das Retrofit Konzept exemplarisch umgesetzt.

1.3 Vorgehen

Im Projektverlauf wurden Änderungen im Projektplan und im Zeitplan vorgenommen. Für die Demonstrationsanlage wurde anstatt einer Aurelia A400 eine Ansaldo Green Tech AE-T100 ausgewählt. Im Folgenden ist das Vorgehen im Projekt mit diesen Änderungen dargestellt.

Das Projekt wurde in drei Hauptarbeitspakete (HAP 1000 bis HAP 3000) und die übergeordnete Projektleitung (HAP 0) unterteilt, wie in Abbildung 1-1 im Projektstrukturplan dargestellt ist. Die Arbeitspakete wurden entsprechend dem Projektzeitplan in Tabelle 1-1 durchgeführt.

Im HAP 1000 „Verfahrensentwicklung und Design eines brennstoffflexiblen Regel-, Misch- und Verteilungssystems“, das von PSC geleitet wurde, sind die Arbeiten zusammengefasst, die maßgeblich zur Entwicklung des Retrofitkonzepts beitragen. Diese Arbeiten wurden federführend von PSC durchgeführt. Dabei wurden als Basis für die Retrofitkonzepte im AP 1100 zunächst die Bestandssysteme in einem Leistungsbereich bis zu 100 MW elektrischer Leistung, sowie die Mikrogasturbinensysteme Aurelia A400 und Ansaldo AE-T100 analysiert. Im AP 1200 startete die technische Entwicklung damit, zu analysieren welche Modifikationen an der Sensorik der Gasturbine notwendig sind, um dann im zweiten Schritt notwendige Sensoren zu entwickeln. Im AP1300 wurden schließlich die Retrofit-Konzepte entwickelt.

Im HAP 2000 wurden alle Arbeiten zur Entwicklung der brennstoffflexiblen Brennkammer zusammengefasst. Dieses HAP wurde vom DLR geleitet und durchgeführt. In einem ersten Schritt wurde ein bestehendes Brennkammersystem auf die Nutzung von Wasserstoff hin untersucht und weiter optimiert. Für die geforderten Betriebsbedingungen wurden im AP 2100 umfangreiche Auslegungsrechnungen durchgeführt und das Brennersystem angepasst. Mit dem angepassten Design wurden verschiedene vielversprechende Prototypen gefertigt, die im AP 2200 dann in einem atmosphärischen Verbrennungsprüfstand des DLR erprobt und bewertet wurden. Das Design und insbesondere die Mischluftkonfiguration wurde auf Basis der experimentellen Ergebnisse im Rahmen des AP 2300 nochmals angepasst und abschließend Fertigungsunterlagen für ein optimiertes Brennersystem für die Ansaldo AE-T100 Gasturbine an das HAP 3000 übergeben.



Abbildung 1-1 Projektstrukturplan

Im HAP 3000, welches vom DLR geleitet wurde, wurden die Arbeitsergebnisse aus dem HAP 1000 und HAP 2000 gemeinsam dazu genutzt eine Ansaldo Green Tech AE-T100 Gasturbine, die bisher nur für Erdgas ausgelegt ist, auf den Betrieb mit Wasserstoff und Zumischung von Erdgas umzurüsten. Dazu übernahm die Firma PSC im AP 3100 die Fertigung des Brennersystems aus dem AP 2300 und führte auch die notwendigen Modifikationen an der Gasturbine durch. Das DLR unterstützte hier beim Aufbau, der Instrumentierung, der Messdatenerfassung und bei der Messung der Abgasemissionen. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der Gasturbine mit Wasserstoff wurden im AP3200 experimentelle Untersuchungen an der Gasturbine durchgeführt, bei der sowohl die Funktionsweise der Regel-, Misch- und Verteilmechanismen, wie auch das Brennerverhalten für unterschiedliche Brennstoffgemische untersucht wurden.

Tabelle 1-1 Projektzeitplan

AP	Arbeitspunkt / Monat 1-33	1. Projektjahr 2022				2. Projektjahr 2023				3. Projektjahr 2024			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
110 0	Analyse Bestandssysteme Aurelia® A400, Ansaldo AET100 und Gasturbinen im 10 - 100 MWel Bereich												
120 0	Entwicklung notwendiger Sensorik												
130 0	Entwicklung Retrofit Konzepte												
210 0	Weiterentwicklung des F400h BK-Systems												
220 0	Erprobung des BK-Systems im Labor												
230 0	Design-Anpassungen des BK-Systems												
310 0	Umrüstung der Gasturbine auf H ₂												
320 0	Demonstration H ₂ Betrieb												
000 0	Projektmanagement												

2 Verfahrensentwicklung und Design eines brennstoffflexiblen Regel-, Misch- und Verteilungssystems

2.1 Analyse der Bestandssysteme

2.1.1 Analyse des Brennstoffsystems „AE-T100“

Die Analyse des Brennstoffsystems „AE-T100“ umfasste mehrere wesentliche Aspekte. Zunächst wurde der grundlegende Aufbau des Systems untersucht, wobei die Hauptkomponenten und ihre spezifischen Funktionen detailliert beschrieben wurden. Ein weiterer wichtiger Punkt bestand in der Bestimmung der Rohr- und Ventillnennweiten, um die Durchflusskapazitäten und möglichen Druckverluste im System zu bewerten. Die verwendeten Werkstoffe wurden ebenfalls analysiert, um ihre Eignung für die Betriebsbedingungen und ihre Beständigkeit gegenüber den im System eingesetzten Brennstoffen zu gewährleisten. Zudem wurde die mechanische Integration des Systems in die Gesamtanlage untersucht, einschließlich der Befestigungspunkte und der Verbindungen zu anderen Systemen. Abschließend erfolgte eine Bewertung der Integration des Brennstoffsystems in das übergeordnete Steuerungssystem, um eine optimale Regelung und Überwachung sicherzustellen.

Um die Rechte des Originalherstellers der Mikrogasturbine nicht zu verletzen, wird an dieser Stelle auf Abbildungen und Zeichnungen verzichtet. Die Untersuchung erfolgte anhand der vom Hersteller bereitgestellten Kundendokumentation sowie durch Begutachtung des physisch vorhandenen Mikrogasturbinenexemplars.

Das Brennstoffsystem beginnt mit dem Eintritt auf Niederdruckebene (25 - 100 mbar). Außerhalb der Einhausung befindet sich ein automatisches Absperrventil (Typ: Magnetventil). Der Brennstoff tritt in den Erdgaskompressor ein, welcher ein Scroll-Verdichter ist und druckgeregelt über Drehzahlvariation mit einem Frequenzumrichter arbeitet. Der Einlass des Kompressors wird mit einem Druckschalter auf ausreichenden Eintrittsdruck überwacht. Der Druck wird auf etwa 7 bar erhöht und zum Brennstoffblock weitergeleitet. Am Eingang des Brennstoffblocks befindet sich ein 3-Wege-Magnetventil, das den Brennstoff vom stromabwärts liegenden Systemteil absperrt und gleichzeitig den Abschnitt zwischen erster und zweiter Absperrung entlastet. Stromabwärts des Absperr- und Entlastungsventils befindet sich ein Drucksensor, der den Brennstoffdruck als Rückführung für die Druckregelung des Erdgaskompressors und als Prozessgröße für die Brennstoffregelung bereitstellt. Im Brennstoffblock erfolgt eine Aufteilung auf zwei Stränge: Haupt- und Pilotstufe. Beide Stufen werden mit elektrischen Proportionalventilen geregelt. Die Pilotseite enthält eine feste Blende, parallel zum Pilot-Regelventil, um die zum Zünden notwendige Menge an Brennstoff bereitzustellen. Die Brennstoffversorgung des originalen Brenners erfolgt mit je einer Rohrleitung für die Pilot- und die Hauptstufe.

Die Anschlussnennweite des automatischen Absperrventils beträgt DN32 (1 1/2"). Der Austritt und die Zuführung zum Erdgasverdichter erfolgen über 25 mm Präzisionsstahlrohr, während der Austritt des Erdgaskompressors über 12 mm Präzisionsstahlrohr erfolgt. Die Brenneranschlussleitungen und die Brennstoff-Entlastungsleitung

bestehen aus 10 mm Präzisionsstahlrohr. Alle internen Rohrleitungen sind aus rostfreiem Stahl gefertigt und alle internen Verbindungen werden mit Doppel-Klemmringverschraubungen realisiert. Der Ventilblock besteht aus Messing und ist am Grundrahmen befestigt. Die Ventile sind in den Ventilblock integriert (Blockaufbau). Aufgrund der kurzen Strecken erfolgt eine fliegende Verrohrung.

Die Spannungsversorgung aller elektrischen Bauteile erfolgt mit 24 VDC. Die Magnetventile werden über Relais-Ausgänge eines Microcontrollers gesteuert, während die Proportionalventile mit PWM-Controllern betrieben werden. Die Sollwertsignale der Regelventile und das Ausgangssignal des Drucksensors betragen 4 – 20 mA. Die Signalverarbeitung erfolgt über einen Microcontroller. Das Brennstoffdrucksignal wird dupliziert und sowohl an einen Analogeingang des Microcontrollers als auch an einen separaten Eingang am Frequenzumrichter übergeben.

2.1.2 Analyse der Schutzsysteme und Anforderungen gemäß ISO 19372

Die international für die Sicherheit der Applikation Mikrogasturbine herangezogene Norm ist *ISO 19372 – Mikroturbinen – Sicherheit*. Um bei Retrofits den erforderlichen Sicherheitsstandards gerecht zu werden, ist es notwendig, zu bestimmen, welche sicherheitsrelevanten Systeme und Eigenschaften von einem Retrofit berührt werden. Daher wurden die Schutzsysteme und Anforderungen gemäß ISO 19372 detailliert analysiert. Nachfolgend werden die Erkenntnisse auf die einzelnen Systeme und Anforderungen bezogen zusammengefasst.

2.1.2.1 Brennstoffsysteme

In Abschnitt 5.10 der ISO 19372 werden die Anforderungen an den Aufbau, die Funktionalität und die Prüfung von Brennstoffsystemen für gasförmige Brennstoffe festgelegt. Der verfahrenstechnische Aufbau des Brennstoffsystems der AE-T100 entspricht grundlegend den Minimalanforderungen aus ISO 19372 (siehe Abbildung 2-1).

Der Lieferumfang der AE-T100 beginnt an Position 3, während die Positionen 1 und 2 auf Seiten der Kundenanlage sind. An dieser Schnittstelle beginnt ebenfalls die spätere Betrachtung des Retrofit-Konzeptes.

Leichte Unterschiede bestehen darin, dass zwischen dem automatischen Absperrventil (3) und dem Entlastungsventil (9) der Erdgaskompressor innerhalb der Einhausung angeordnet ist und sich das Entlastungsventil somit innerhalb der Einhausung befindet.

- | | | | |
|---|----------------------------------|----|--|
| 1 | Manuelles Absperrventil | 9 | Entlastungsventil |
| 2 | Schmutzsieb | 10 | Automatisches Schnellschlussventil |
| 3 | Automatisches Absperrventil | 11 | Regelventil |
| 6 | Brennstoffentlastung | 13 | Brennersystem |
| 7 | Schmutzsieb (optionale Position) | 14 | Grenze der Einhausung der Mikro-
gasturbine |

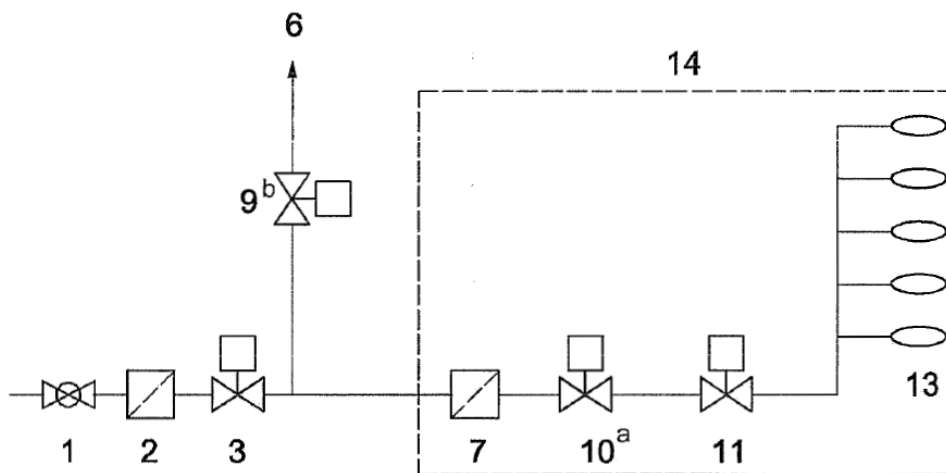


Abbildung 2-1 Minimalanforderung an Brennstoffsysteme für gasförmigen Brennstoff¹

Abschnitt 5.10.7 der ISO-Norm beschreibt Anforderungen an Mehrbrennstoffsysteme, welche für die Entwicklung des brennstoffflexiblen Regel-, Misch-, und Verteilsystems (2.3) relevant sind.

2.1.2.2 Verbrennungsüberwachung

In Abschnitt 5.11 von ISO 19372 werden Anforderungen an die Überwachung des Verbrennungsvorgangs definiert. Dem Hersteller wird die Wahl überlassen, die Flamme direkt (optisch) oder indirekt aus einem Zusammenspiel von Turbinenaustrittstemperatur, Druck und Drehzahl zu überwachen. In der AE-T100 wird das indirekte Verfahren angewendet. Die Auswertung der erforderlichen Signale und der Schutz eingriff im Falle eines Erlöschens der Flamme bzw. einer Fehlzündung erfolgt parallel über einen Microcontroller und eine sicherheitsgerichtete SPS.

Um gefährliche Gasansammlungen in der Mikrogasturbine und dem angeschlossenen Abgassystem zu vermeiden, muss beim Zünden der Zeitraum zwischen Gaseintritt in den Brenner und erfolgreicher Zündung begrenzt werden. In ISO 19372 werden keine Zeiten vorgegeben, jedoch muss der Energieeintrag innerhalb des Zeitfensters auf ein Maß begrenzt werden, welches sicherstellt, dass der Druckanstieg bei der Umsetzung

¹ (International Organization for Standardization, 2015)

unverbrannten Brennstoffs in einem tolerierbaren Umfang bleibt. Diese Anforderung ist für das Retrofitkonzept (2.4) relevant.

2.1.2.3 Einhausungen

Abschnitt 5.13 in ISO 19372 definiert Anforderungen an Einhausungen für Mikrogasturbinen. Der Großteil der Anforderungen wird von einem Retrofit nicht berührt. Bei notwendigen Anpassungen der Einhausung sind die Anforderungen hinsichtlich des Eintrags von Feuchtigkeit und Schmutz jedoch zu beachten. Außerdem wird in diesem Abschnitt auf die Themen Gehäusebelüftung und Gasdetektion hingewiesen, welche in separaten Kapiteln behandelt werden.

2.1.2.4 Explosionsschutz, Belüftung und Gasdetektion

Aus Abschnitt 5.16 der ISO 19372 gehen Anforderungen an den Explosionsschutz von Mikrogasturbinenanlagen hervor. Durch den Wasserstoff-Retrofit ergeben sich neue Anforderungen an den Explosionsschutz, da Wasserstoff gegenüber Erdgas veränderte explosionstechnische Eigenschaften aufweist. Das Explosionsschutzkonzept der AE-T100 beruht auf dem Prinzip des primären Explosionsschutzes, namentlich dem Vermeiden des Auftretens einer explosionsfähigen Atmosphäre. Dies wird erreicht, indem das Gehäuse mit einem Ventilator stark belüftet wird und potenzielle Gasleckagen so verdünnt werden, dass kein Explosionsrisiko von ihnen ausgeht. Die Norm legt fest, dass die Wirksamkeit der Belüftung durch CFD-Berechnungen validiert werden soll, um sicherzustellen, dass auch in verbauten Räumen mit Strömungsbehinderungen keine gefährlichen Gasansammlungen entstehen können. Aus dem Retrofit ergeben sich Änderungen an Ventilen und Brennstoffleitungen und im Zusammenspiel mit den veränderten Eigenschaften des Wasserstoffs ergibt sich die Notwendigkeit zu verifizieren, dass die vorhandene Belüftung nach dem Retrofit die gewünschte Wirksamkeit erzielt. Dadurch ergeben sich Berührungspunkte mit Abschnitt 5.17 der ISO 19372, welche die Belüftungssysteme von Mikrogasturbinen behandelt. Außerdem werden in Abschnitt 5.19 Anforderungen an Detektionssysteme für entzündliche Gase definiert. Die Kombination aus Explosionsschutz durch Verdünnung, Belüftung und Gasdetektion wurde im Projekt in einer CFD-Studie behandelt, welche im Abschnitt 2.4.6 behandelt wird.

2.1.2.5 Schutzsysteme

Sowohl durch den Retrofit als auch durch die Kombination mit einem Erdgas-Wasserstoff-Mischsystem ergeben sich Berührungspunkte mit den Schutzsystemen der Mikrogasturbinenapplikation. Aus diesem Grund sind die Anforderungen aus Abschnitt 5.20 der ISO 19372 zu beachten. Durch den Retrofit ist sicherzustellen, dass das Schutzniveau nach einem Umbau und in Kombination mit dem Mischsystem mindestens auf dem gleichen Niveau verbleibt. Dies ist insbesondere bei den Sicherheitsstellungen von Ventilen, der Integration von Komponenten in sicherheitsgerichteten Schaltkreisen, der Integration in das Not-Aus-Konzept sowie bei Verriegelungen von Relevanz.

2.1.2.6 Entlüftungen

Die Hinweise zur Ausführung von Entlüftungen für entzündliche Gase in Abschnitt 5.22 von ISO 19372 sind für H₂-Retrofit-Anwendungen erneut zu betrachten, da durch die von Erdgas abweichenden physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs die Explosionsschutzzonen andere Abmessungen annehmen. Außerdem sind die Durchmesser von Entlüftungsleitungen hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund der geringeren Dichte des Wasserstoffs anzupassen.

2.1.2.7 Drucktragende Bauteile

Die aus Abschnitt 5.23 in ISO 19372 hervorgehenden Anforderungen an drucktragende Bauteile entsprechen im Wesentlichen der gängigen Industriepraxis. Für H₂-Retrofits von Relevanz ist die Prüfung der verwendeten Werkstoffe auf die Verträglichkeit mit Wasserstoff. Des Weiteren sind die Vorgaben hinsichtlich Rohrverbindungen und Leckageprüfungen zu beachten.

2.1.3 Übertragung der Erkenntnisse auf Anlagen bis 100 MWe

Während für Mikrogasturbinen die Sicherheitsanforderungen in der ISO 19372 dargestellt werden, gilt für Gasturbinen in Industrie- bzw. Schwerbauweise („Heavy Duty“) die *ISO 21789 - Gasturbinenanwendungen – Sicherheit*. Die zuvor aufgeführten Kapitel tragen in ISO 21789 die gleiche Nummerierung und sind inhaltlich äquivalent.²

Große Unterschiede ergeben sich jedoch aus der systemtechnischen und konstruktiven Ausführung der Brennstoffsysteme von Gasturbinen in Industrie- und Schwerbauweise.

Die hier betrachteten Anlagentypen, welche als am geeignetsten für einen H₂-Retrofit erachtet werden, sind standardisierte Gasturbinenanlagen in E- bzw. F-Klassen-Technologie (> ca. 1100°C Turbineneintrittstemperatur). Diese weisen akzeptable (Kombi-) Wirkungsgrade auf und sind zu einem großen Teil mit Vormischbrennersystemen ausgestattet, in welchen keine Additive zur Stickoxidminderung benötigt werden. Dadurch ergibt sich ein kostengünstiger Betrieb, welcher aufgrund der höheren antizipierten Brennstoffkosten bei zukünftigem Einsatz von Wasserstoff von hoher Relevanz sein wird.

In diesen Gasturbinenklassen hat sich in der Entwicklungsgeschichte eine breite Vielfalt an Brenner- und Brennkammertechnologien, inklusive der dazugehörigen Brennstoffsysteme, ergeben. So existieren Gasturbinen mit Silobrennkammern, Ringbrennkammern und Rohrbrennkammern. Die Brennerkonzepte bestehen aus zweistufigen Brennern, welche je nach Leistungsgröße der Gasturbine einzeln bzw. in Gruppen geschaltet werden können, bis zu vierstufigen Brennerkonstruktionen, in welchen für die Leistungsregelung Stufen zu- bzw. abgeschaltet werden. Darauf basierend wurden viele Varianten an Brennstoffsystemen und Regelungslogiken entwickelt, welche zum Teil typisch für einzelne Gasturbinenhersteller sind. Darüber hinaus erfordern die

² (International Organization for Standardization, 2022)

Eigenschaften der Brennersysteme sowie die spezifischen dynamischen Eigenschaften der Gasturbinentypen verschiedene Antriebsarten und Schutzsysteme. Daher finden sich im Bereich der Gasturbinen bis 100 MW_{el} Leistung sowohl hydraulisch als auch elektrisch angetriebene Brennstoffregelventile mit linearer als auch rotatorischer Betätigung.

Obwohl die Regelgrößen (Turbineneintrittstemperatur, Leistung, Abgastemperatur) von Gasturbinen allgemein über alle Modelle gleich sind, hat jeder Hersteller proprietäre und spezifische Reglerkonzepte und Funktionslogiken für die Gasturbinenregelung. Aus diesem Grund sind die Regelglieder Brennstoffventile und Aktuatoren nicht ohne Weiteres mit beliebigen Teilen ersetzbar.

Ebenso existieren große Unterschiede in der Anordnung der Brennstoffsysteme innerhalb der Anlage. Durch Standardisierungsbestrebungen und zur Vereinfachung der Montage liefern viele Hersteller das Brennstoffsystem für Gasturbinen in Scherbauweise in vorgefertigten Gestellen („Skids“). Um diese kostengünstig zu halten, wird der notwendige Bauraum so weit wie möglich reduziert. Dadurch sind Modifikationen, um z.B. weitere Ventile für eine Mischung zu integrieren, erschwert. Im Industriegasturbinen- und Aeroderivative-Bereich sind die Ventile wiederum innerhalb des Gasturbinenpackages angeordnet, um die Grundfläche der Aufstellung möglichst klein zu halten. Des Weiteren bestehen Anforderungen hinsichtlich des Rohrleitungsvolumens stromabwärts der Brennstoffschnellschlussventile, um im Falle einer Notabschaltung der Turbine sicherzustellen, dass die Verbrennung der in der Rohrleitung verbliebenen Gasmenge nicht zu einer gefährlichen Überdrehzahl führen kann.

Durch die verschiedenen Anordnungen variieren ebenfalls die Anforderungen an Explosionsschutz, Belüftung und Leckageüberwachung.

2.1.4 Ergebnis

Aus den vorangegangenen Analysen ergab sich eine Vielzahl an Erkenntnissen sowohl für einen Retrofit als auch für die Integration eines Regel-, Misch- und Verteilsystems. Um mit dem später ausgearbeiteten Konzept möglichst flexibel auf alle Applikationen reagieren zu können, fiel die Entscheidung, das Mischsystem als „Black Box“ auszuführen. Das bedeutet, dass das System als autarke Einheit mit einer eigenen Steuerungs- und Bedieneinheit ausgeführt wird. Dadurch wird an der Schnittstelle „Brennstoffversorgung“ der Gasturbinenanlage der Brennstoff in einem kontrollierten, den spezifischen Anforderungen entsprechenden, Zustand bereitgestellt. Der Signalaustausch mit der Gasturbinenanlage wird auf die notwendigen Parameter begrenzt, welche für die Funktion des Brennstoffregel- und Schutzsystems der angeschlossenen Gasturbine sowie die Sicherheitsfunktionen des Mischsystems selbst notwendig sind. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass das verfahrens- und regelungstechnische Konzept des Mischsystems nur einmal aufgesetzt werden muss und für verschiedene Applikationen lediglich Skalierungen von Rohrleitungen und Ventilen erforderlich werden. Des Weiteren kann die Integration in eine Anlage in kurzer Zeitdauer erfolgen, da die in der Bestandsanlage notwendigen Anpassungen klein gehalten werden. Ebenso kann die Konformität für das Mischsystem erklärt werden, ohne aufwendige Beurteilungen der Gesamtanlage durchführen zu müssen. Das Mischsystem wird dadurch unabhängig

von der Applikationsseite und die gasturbinenherstellerseitigen Leitsysteme und Regelungskonzepte bleiben, bis auf die Integration der Austauschsignale, unberührt.

Der Nachteil liegt im Platzbedarf in der Gesamtanlage sowie in den zusätzlich notwendigen Komponenten wie Gehäuse, Belüftungssystem und Steuerung. Durch stark verkürzte Entwicklungs- und Integrationszeiten werden die Nachteile jedoch vielfach kompensiert.

2.2 Entwicklung notwendiger Sensorik

Aufgrund geltender Sicherheitsvorschriften für den Betrieb von Feuerungsanlagen, wie z.B. EN 746-2, müssen Gasturbinen über nichttrennende Schutzeinrichtungen verfügen, die sowohl das erfolgreiche Zünden als auch das Verlöschen der Flamme sicher erkennen. Hierfür kommen direkte Verfahren durch optische Erkennung einer Flamme oder indirekte Verfahren durch Auswertung von Betriebsparametern wie Temperatur, Druck und Drehzahl in Frage. Während die indirekten Systeme von einer Umstellung der Verbrennung von Erdgas auf Wasserstoff nicht betroffen sind, müssen optische Flammenerkennungssysteme für ihre Tauglichkeit mit Wasserstoffflammen untersucht werden, da Kohlenwasserstoffe bei Verbrennung ein von Wasserstoff abweichendes Emissionsspektrum aufweisen. Die standardisierten Flammenwächter industrieller Gasturbinen arbeiten im Regelfall im UV- oder Infrarotspektrum. Typischerweise werden die Sensoren jedoch auf sehr enge Spektralbereiche eingestellt, um eine zuverlässige Signalverstärkung zu erhalten. Beim Betrieb mit Wasserstoff besteht daher die Gefahr, dass ohne Anpassung der Flammendetektion die Flamme nicht erkannt werden kann und der Gasturbinenbetrieb damit unmöglich wird. Die Umrüstung auf einen für Wasserstoffflammen tauglichen Sensor ist als unproblematisch zu erachten. Beim Betrieb mit variablen Mischungen aus Erdgas und Wasserstoff ergibt sich jedoch die Herausforderung, dass das Emissionsspektrum der Flamme über den Konzentrationsbereich einen Verlauf annimmt und das System somit nicht mehr auf eine Auswahl weniger charakteristischer Spektren abgestimmt werden kann.

Da als Versuchsträger in diesem Projekt eine Mikrogasturbine mit indirekter Flammenerkennung dient, wurde die Anpassung der Flammenerkennung im Projektverlauf nicht weiterverfolgt. Eine Analyse des Marktes für Anbieter von Flammenüberwachungssystemen hat ergeben, dass diese bereits eine breite Palette an Systemen für die Erkennung von Kohlenwasserstoff- und Wasserstoffflammen anbieten. Inwiefern die angebotenen Systeme für variable Mischungen tauglich sind, ist Gegenstand weiterer zukünftiger Untersuchungen. Es ist denkbar, zwei Sensorsysteme, jeweils optimiert für Kohlenwasserstoffe und Wasserstoff zu kombinieren und die Signalauswertung leittechnisch zu optimieren, sodass für jeden Konzentrationsbereich eine zuverlässige Überwachung gegeben ist. Idealerweise finden die Untersuchungen hierzu aufgrund des niedrigeren Gefahrenpotenzials zunächst in Laboren bzw. Prüfständen statt.

2.3 Entwicklung eines brennstoffflexiblen Regel-, Misch-, und Verteilsystems

2.3.1 Entwicklungsprozess

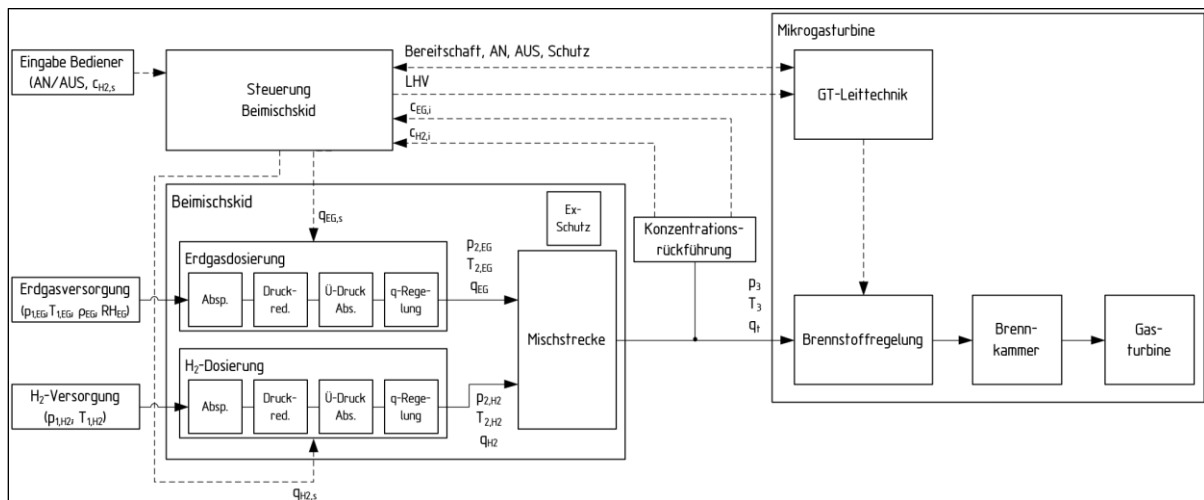
Die Entwicklung des brennstoffflexiblen Regel-, Misch-, und Verteilsystems erfolgte nach dem industrieweit etablierten Schema der Entwicklung verfahrenstechnischer Anlagen. In einer Produktspezifikation wurden alle Anforderungen, Leistungsmerkmale, Randbedingungen und relevante Normen und Richtlinien festgehalten. Diese wurden u.a. durch die zuvor durchgeführte Analyse der Bestandssysteme und Normenrecherche festgelegt. Die Produktspezifikation wurde sehr detailliert ausgearbeitet, um konkrete Vorgaben für das verfahrenstechnische, mechanische und steuerungstechnische Engineering zu liefern und die Schnittstellen so klar wie möglich zu definieren. Im Einzelnen beinhaltet die Spezifikation Anforderungen an:

- Anzuwendende Normen und Regelwerke
- Dokumentationsumfang
- Einzusetzende Materialien (metallische und nicht-metallische Werkstoffe)
- Einzusetzende Rohrnennweiten und Wandstärken
- Beschaffenheit von Verbindungselementen
- Beschaffenheit von Rohrverschraubungen
- Armaturen
- Strukturteile und Gehäuse
- Stoffdaten
- Integration in das Bestandssystem
- Verfahrenstechnische Auslegungsdaten
- Verfahrenstechnische Funktionalität
- Regelgüte und -dynamik
- Schutzfunktionen
- Umgebungsbedingungen
- Explosionsschutz
- Merkmale für Transport und Montage

Auf Basis der Anforderungsspezifikation wurde zunächst ein Blockdiagramm erstellt, welches das Gesamtsystem in einzelne Funktionsblöcke unterteilt und die Integration in die Gesamtanlage darstellt (Abbildung 2-2).

Das Beimischsystem besteht aus den Hauptfunktionen Erdgas- und Wasserstoffdosierung, Explosionsschutz und Mischstrecke. Die Hauptfunktionen der jeweiligen Dosierung sind nochmal in Unterfunktionen der verfahrenstechnischen Anforderungen Absperrung, Druckreduzierung, Überdruckabsicherung und Massenstromregelung unterteilt. Am Eingang des Systems werden Erdgas und Wasserstoff in bestimmten Parametern bereitgestellt. Das Beimischsystem verfügt über eine Steuerung, welche über eine Bedienschnittstelle verfügt und die Bedieneringaben automatisiert umsetzt. Dabei werden mit der Gasturbinensteuerung die notwendigen Signale für Schutz- und Bereitschaftsfunktionen ausgetauscht. Der Ist-Wert der Wasserstoffkonzentration wird

durch die Steuerung des Beimischsystems ermittelt. Daraus errechnet die Steuerung den unteren Heizwert des Brenngasgemisches und überträgt diesen als Signal an die Gasturbinensteuerung. Die übrige Brennstoffregelung der Gasturbinensteuerung bleibt vom Retrofit unberührt.



Legende	
$c_{EG,i}$	Erdgaskonzentration Ist-Wert
$c_{H_2,i}$	H ₂ -Konzentration Ist-Wert
$c_{H_2,s}$	H ₂ -Konzentration Soll-Wert
LHV	Unterer Heizwert Mischung
$p_{1,EG}$	Eingangsdruck Erdgasdosierung
p_{1,H_2}	Eingangsdruck H ₂ -Dosierung
$p_{2,EG}$	Ausgangsdruck Erdgasdosierung
p_{2,H_2}	Ausgangsdruck H ₂ -Dosierung
p_3	Eingangsdruck Brennstoffregelung
Q_{EG}	Erdgasmassenstrom
$Q_{EG,s}$	Erdgasmassenstrom Sollwert
Q_{H_2}	H ₂ -Massenstrom
$Q_{H_2,s}$	H ₂ -Massenstrom Sollwert
q_t	Massenstrom Total
RH_{EG}	Relative Feuchte Erdgas
ρ_{EG}	Dichte Erdgas
$T_{1,EG}$	Eingangstemperatur Erdgasdosierung
T_{1,H_2}	Eingangstemperatur H ₂ -Dosierung
$T_{2,EG}$	Ausgangstemperatur Erdgasdosierung
T_{2,H_2}	Ausgangstemperatur H ₂ -Dosierung
T_3	Eingangstemperatur
	Medienfluss
	Signalfluss

Abbildung 2-2 Blockdiagramm Wasserstoffbeimischsystem

Aus dem Blockdiagramm wurde ein R&I-Schema abgeleitet, in welchem alle für die Sicherheit und Funktionalität notwendigen Einzelkomponenten dargestellt und in einen verfahrenstechnischen Zusammenhang gebracht wurden. Im letzten Entwicklungsstadium des R&I-Schemas befinden sich über 50 Armaturen, Instrumente und Aggregate. Die Anzahl der Komponenten resultiert aus den Anforderungen der relevanten europäischen Richtlinien (Druckgeräte-Richtlinie, ATEX-Richtlinie und Maschinenrichtlinie) sowie den Ergebnissen der parallel zur Entwicklung durchgeführten Risikoanalysen in Form von FMEA sowie Risikobeurteilung nach Nohl. Im Vergleich zum Blockdiagramm in Abbildung 2-2 änderten sich die Teilfunktionen mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt wie folgt:

- Einbindung des in der MGT-Einheit verbauten Erdgasverdichters
- Integration von Anschlüssen zur Inertisierung (N₂-Spülung) des Systems
- Absperrungen als Doppelabsperrung mit Zwischenentlastung

- Vordruckregelung und Überdruckabsicherung nur auf Wasserstoffseite notwendig
- Funktionalitäten zur Rückflussverhinderung
- Berechnung der H₂-Konzentration durch Vergleich der Massenströme

Mit Hilfe des R&I-Schemas sowie der anfangs erstellten Anforderungsspezifikation wurden sämtliche Komponenten verfahrenstechnisch ausgelegt und in Einzelteilspezifikationen definiert. Der überwiegende Teil der Ausstattung konnte durch Standardbauteile der entsprechenden Anbieter beschafft werden. Der für die Mischung der zwei Brenngase notwendige statische Mischer sowie das Gehäuse für das Gesamtsystem wurden jedoch auf Basis von PSC erstellter Spezifikationen und Anforderungen konstruiert und hergestellt.

2.3.2 *Designmerkmale*

Auch wenn das Wasserstoffbeimischsystem zunächst in einem Versuchsaufbau zur Demonstration des H₂-Retrofits eingesetzt werden sollte, war es Ziel der Entwicklung ein nahezu marktreifes Produkt anzufertigen. Aus diesem Grund wurde von Beginn an Wert darauf gelegt sowohl Konstruktion als auch Funktion für den Einsatz bei Endkunden vorzusehen. Daher wurde der gesamte Produktlebenszyklus betrachtet und als Zielgruppe für die Anwendung technisches Betriebspersonal mit verfahrenstechnischem Grundwissen eines Anlagenbetreibers festgelegt. Ebenso sollte das System für den Betrieb im Innen- und im Außenbereich in gemäßigten Breiten möglich sein. Durch diese Anforderungen weist das Wasserstoffbeimischsystem einige relevante Designmerkmale auf:

- Unterdruckbelüftung zur Vermeidung einer Ex-Zone außerhalb des Gehäuses
- Externe Inertisierungsanschlüsse mit Schnellkupplungen für einfachen Anschluss von Stickstoffflaschen
- Außen angebrachte manuelle Absperrventile zur Medienisolation
- Regenwassergeschütztes Gehäuse
- Beheizbarer Innenraum
- Heiz- und kühlbarer Abschnitt für die Steuerungskomponenten
- Transportfähigkeit mittels Kran, Gabelstapler und Gabelhubwagen
- Lokal angebrachte Bedienschnittstelle mit Touchscreen
- Optische und akustische Alarmierungseinrichtung

2.3.3 *Funktionslogik*

Um die Ansteuerung der eingesetzten Komponenten und die Auswertung der eingebauten Sensorik zu realisieren, war es notwendig das Mischsystem mit einer eigenständigen Leittechnik auszustatten. Um auch in Zukunft die Wartung und Fehlerbehebung des Systems gewährleisten zu können, wurde das Leitsystem auf Basis einer am Markt weit verbreiteten Hardware realisiert.

Als Programmiervorgabe für das Leitsystem wurde die Erstellung von systemunabhängigen Funktionsplänen gewählt. Diese beschreiben die zu realisierenden Funktionalitäten auf Basis allgemeiner Symbole. Durch diese Vorgehensweise sind die

umzusetzenden Funktionalitäten auch ohne spezifische Kenntnisse der eingesetzten Leittechnik lesbar und verständlich.

Grundlage für die Erstellung der Funktionslogiken waren zunächst verbale Beschreibungen der umzusetzenden Funktionalitäten. Dies sind unter anderem:

- Signalaustausch mit der MGT
- Ansteuerung des Erdgasverdichters
- Ansteuerung der Absperr- und Regelventile
- Berechnung des aktuellen Konzentrationsverhältnisses
- Verarbeitung des Konzentrationssollwertes
- Automatismus zum Spülen des Systems
- Überwachung der Schutzkriterien

2.3.4 Schutzkonzept

Im Rahmen der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse wurden potenzielle Fehler und Risiken identifiziert, kategorisiert und hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und ihres Schadenspotenzials bewertet. Die aus der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse gewonnenen Informationen wurden im Anschluss in ein Schutzkonzept für das Mischsystem überführt. Im Rahmen der Bewertung des Systemzustandes werden die erforderlichen Prozesswerte verarbeitet und in Form eines kombinierten Schutzsignals bereitgestellt, welches den Betrieb des Mischsystems freigibt. Des Weiteren wurden folgende Funktionen realisiert:

- Überwachung der Belüftung
- Detektion von Erdgas und/oder Wasserstoff
- Rückflussüberwachung über Regelventile
- Störungsüberwachung Regel- und Absperrventile

Sobald einer der überwachten Parameter die vorgegebenen Grenzen überschreitet, erfolgt eine Abschaltung des Mischsystems. Dabei werden die Regelventile für beide Versorgungsstränge geschlossen und die Steuersignale der Absperr- und Entlüftungsventile entzogen, wodurch diese in eine sichere Betriebsposition wechseln (Absperrventile = geschlossen; Entlüftungsventile = geöffnet).

Der aktuelle Zustand des Systems kann dem zum Mischsystem gehörigen Bedienbildschirm entnommen werden.

2.3.5 1D-Simulation Fluidtechnik und Regelung

Da es sich bei dem Mischsystem um eine Neuentwicklung handelt, konnten für die Erstellung des Regelalgorithmus keine Erfahrungswerte herangezogen werden. Aus diesem Grund wurde für die Parametrierung der Regelung eine Simulation auf Basis der Funktionslogiken durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein Modell des Mischsystems auf Basis des R&I-Schemas und der zu verbauenden Komponenten erstellt. Das Modell wurde mit einer simplifizierten Version des Regelalgorithmus kombiniert, um dessen Verhalten bereits vor der physikalischen Inbetriebnahme des Systems optimieren zu können.

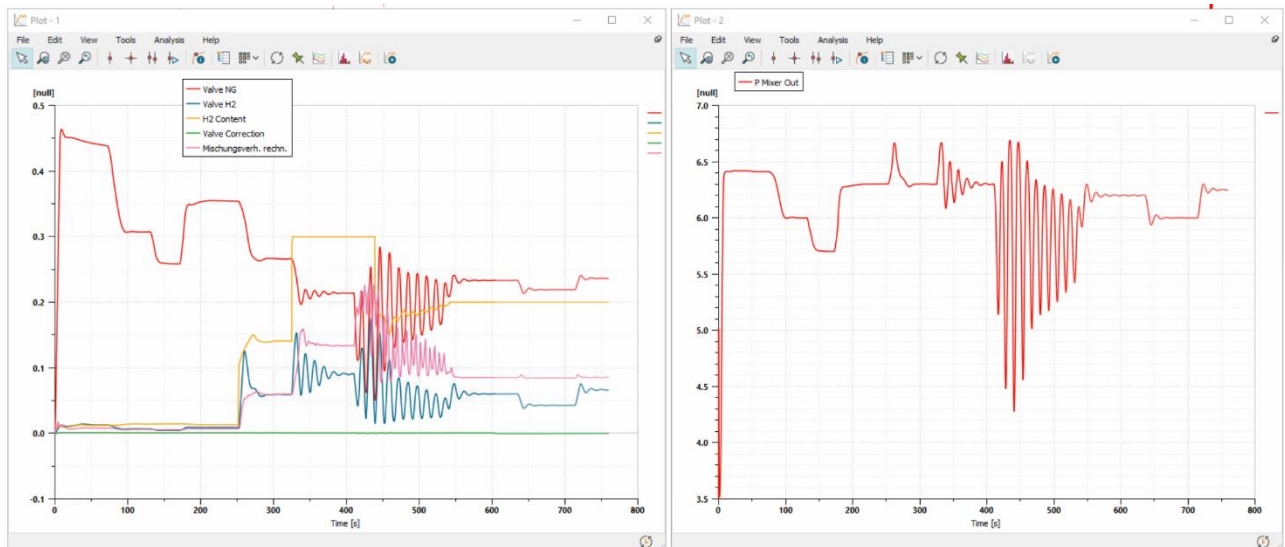


Abbildung 2-3 Simulation Regelungsverhalten Mischsystem

Mit Hilfe der Simulationsergebnisse war es möglich, Einstellwerte des Reglers für die Erstinbetriebnahme zu ermitteln. Hierbei wurde sowohl das Verhalten für transiente Änderungen als auch für Sollwertsprünge evaluiert.

2.3.6 CAD-Konstruktion Wasserstoffbeimischsystem

Nach der Definition der Armaturen und Instrumente wurden die Vorgaben aus dem R&I-Schema und der Anforderungsspezifikation in eine CAD-Konstruktion umgesetzt. Die Entwicklung des CAD-Modells erfolgte dabei schrittweise. Zunächst wurden die Komponenten räumlich angeordnet, um spezifische verfahrenstechnische Bedingungen (z.B. Ein- und Auslaufstrecken) einzuhalten und die Sensoren entsprechend anzuordnen. Darauffolgend wurden die Komponenten im Modell verrohrt und alle Rohrleitungsfittings ausgewählt und im Modell integriert. Für den Einbau von Sensoren wurden Anschlussblöcke entworfen und gefertigt. Nachdem die Verrohrung und Anordnung der Komponenten fertiggestellt waren, wurde die Konstruktion mit einem Befestigungsgestell aus standardisiertem Installationsmaterial erweitert. Nach Einfrieren aller mechanischen Schnittstellen und Medienanschlüsse konnte das wetterfeste Gehäuse entworfen werden. Dabei wurden alle notwendigen Gehäuseöffnungen bereits für die Fertigung vorgesehen, um einerseits die Montage effizient zu gestalten und andererseits den Korrosionsschutz zu gewährleisten, da durch spätere Bohrungen o.ä. die Korrosionsschutzschicht beschädigt werden würde. Es wurden Abdichtungsmöglichkeiten für alle Durchführungen definiert und sowohl die Montierbarkeit als auch die spätere Wartbarkeit des Systems berücksichtigt. Außerdem wurden Vorrichtungen für den Transport per Kran, Gabelstapler und Gabelhubwagen vorgesehen. Des Weiteren galt es, die Verkabelung aller Komponenten zu berücksichtigen. An der Trennwand zur Steuerung befinden sich Ex-zertifizierte Mehrfach-Kabeldurchführungen und es wurden innere und äußere Erdungsanschlüsse für die gesamthafte Erdung des Systems vorgesehen.



Abbildung 2-4 Außendarstellung H2-Mischsystem

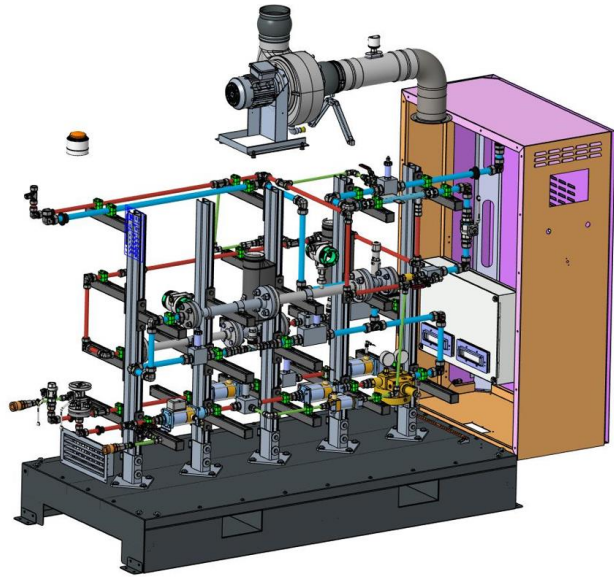


Abbildung 2-5 Innenleben H2-Mischsystem

2.3.7 Montage und Prüfung

Die Montage erfolgte in der PSC-eigenen Werkstatt. Nach dem Eintreffen des Gehäuses vom Zulieferer wurde das Befestigungsgestell aufgebaut und der Einbau von Instrumenten und Armaturen schrittweise mit der Verrohrung fortgesetzt. Der Einsatz von Rohrleitungsfittingen und einem standardisierten Installationssystem bot dabei den Vorteil, bei der Montage eine gewisse Flexibilität für die Montageschritte und die Ausrichtung aller Komponenten zu haben. Aufgrund der Vielzahl der Komponenten, welche sich zum Teil äußerlich ähneln, jedoch verschiedene funktionale Eigenschaften haben (z.B. Abdichtungsformen von Rohrverschraubungen, Sensoren mit verschiedenen Messbereichen, etc.), war eine akribische Arbeitsvorbereitung entscheidend, um spätere aufwendige Änderungen oder Probleme bei der Inbetriebnahme zu vermeiden. Der Montagefortschritt wurde dabei kontinuierlich vom Engineering verfolgt, um Erkenntnisse für zukünftige Optimierungen zu sammeln und bei unvorhergesehenen Problemen zu unterstützen.

Nachdem der mechanische Teil der Montage abgeschlossen war, wurden alle elektrischen Komponenten verdrahtet und mit der Steuerung verbunden. Außerdem wurde das gesamte System an den notwendigen Stellen geerdet, um allen Explosionsschutzvorschriften gerecht zu werden.

Zur Überprüfung der Verdrahtung wurden in der Werkstatt vollumfängliche Funktionstests durchgeführt. Dabei wurde ebenfalls die Steuerung erstmalig angeschaltet und alle Signale und Messungen überprüft.

Nachdem alle Funktionen getestet wurden, erfolgte eine Druckfestigkeitsprobe und das System wurde auf Dichtheit geprüft. Hierbei wurde die Methode der Druckabfallprüfung gewählt, da hiermit auch sehr kleine Leckagen feststellbar sind. Aufgrund der Vielzahl an Verbindungen wurde zur Lokalisation von Leckagen auf Lecksuchspray

zurückgegriffen. Durch diese Maßnahmen konnte sichergestellt werden, dass ein dichtes System ausgeliefert wurde und nach erfolgter Installation im Feld nicht mit überraschenden Nacharbeiten gerechnet werden muss.

2.3.8 Dokumentation

Im Zuge der Entwicklung des Wasserstoffbeimischsystems wurde eine umfangreiche Dokumentation erstellt. Diese ist einerseits notwendig, um das System anfertigen, prüfen und in Betrieb nehmen zu können, andererseits unterliegt das System den bereits genannten europäischen Richtlinien, welche die Bereitstellung bestimmter Dokumente vorschreiben. Die angefertigten Dokumente umfassen:

- R&I Schema
- Technische Spezifikationen
- Armaturen- und Instrumentenliste
- Technische Zeichnungen (Einzelteile und Zusammenbau)
- Stromlaufpläne
- Funktionspläne
- Steuerungssoftware
- Prüfpläne und qualitätssichernde Dokumente (Lieferantendokumentation)
- Inbetriebnahmeanweisung
- Betriebsanleitung
- Konformitätserklärung

2.3.9 Funktionsweise im Zusammenspiel mit der Mikrogasturbine

Die Steuerung des Mischsystems erfolgt automatisiert mit dem Start der MGT, sodass keine separaten Eingaben erforderlich sind. Der Betriebszustand der MGT wird durchgehend überwacht, sobald das Mischsystem eingeschaltet und der Not-Aus nicht betätigt ist. Mit Erreichen der Spüldrehzahl der Gasturbine im Hochfahrvorgang erfolgt zugleich der Start des Mischsystems. In der Folge wird zunächst der Erdgasverdichter innerhalb der Turbineneinhausung der AE-T100 gestartet, um anschließend die Funktionalität der Doppelabspernung im Erdgaspfad über einen Ventiltest zu verifizieren. Eine vergleichbare Prüfung wird ebenfalls für die Absperrventile des Wasserstoffpfades durchgeführt. Diese Prüfungen erfolgen parallel zum 60 Sekunden andauernden Spülzyklus der Gasturbine und öffnen bei Erfolg die stromaufwärts der Regelventile liegenden Absperrventile. Innerhalb des Projektes wurde sowohl der Start und das Zünden auf Erdgas als auch auf Wasserstoff erfolgreich durchgeführt. Nachfolgend wird exemplarisch der Startvorgang und Mischbetrieb mit Erdgas als führendem Brennstoff beschrieben. Der Ablauf erfolgt für Wasserstoff sinngemäß. Mit Beginn des Zündvorgangs der Gasturbine erfolgt die Öffnung des Erdgasregelventils, um den Brennstoff für die MGT bereitzustellen. In der Folge wird die Gasturbine entsprechend dem vorgegebenen Leistungssollwert hochgefahren und belastet.

Sobald die Mindestlast der MGT (ca. 70 kW) erreicht ist, wird am Mischsystem die Beimischung von Erdgas freigegeben. Die Aktivierung des Mischbetriebes sowie die Eingabe des Konzentrationssollwertes erfolgen über den Bedienbildschirm des Mischsystems. Um eine stabile Verbrennung zu gewährleisten, ist es im Falle von

Beimischungen erforderlich, den sich ändernden Heizwert an das Leitsystem der Gasturbine zu übermitteln. Der aktuelle Heizwert wird daher nach dem Start kontinuierlich in der Leittechnik des Mischsystems berechnet und an das Gasturbinenleitsystem übermittelt. Dort wird es für die Sollwertbildung der Ventilansteuerung verwendet.

Im Falle einer Fehlfunktion seitens des Mischsystems wird dessen Schutzfunktion aktiviert, wodurch die Brennstoffversorgung unterbrochen und die Gasturbine über die Detektion niedrigen Eintrittsdruckes oder Flammabriss abgeschaltet wird.

Die für das Mischsystem verwendete Leittechnik bietet sowohl die Möglichkeit, dessen Betriebsdaten auf dem lokalen Bedienbildschirm anzeigen zu lassen, als auch deren lokale Speicherung oder Übertragung per Bus an eine übergeordnete Leittechnik.

2.4 Entwicklung eines Retrofitkonzepts

2.4.1 Allgemein

Grundsätzlich gilt es bei Retrofits, die Schnittstellen, welche durch das neue System berührt werden, sorgfältig zu identifizieren und die veränderten Randbedingungen darauf anzuwenden sowie die Tauglichkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten. Daher ist es sinnvoll zunächst festzulegen welche *äußeren* Parameter sich durch eine Retrofitmaßnahme ändern, um im nächsten Schritt die notwendigen Änderungen im *Inneren* des Systems zu definieren. Im vorliegenden Fall zeigen sich die äußeren Änderungen wie folgt:

- Neuartiges Brennkammersystem
- Andersartiger Brennstoff
- Integration eines zusätzlichen peripheren Systems in die Brennstoffzuleitung

Die Änderungen bedingen folgende Prüfungen und Modifikationen im Inneren des Bestandssystems:

- Veränderte Anzahl und Geometrie von Brennstoffanschlüssen
- Verträglichkeit der vorhandenen Werkstoffe mit dem neuen Brennstoff
- Einfluss des veränderten Heizwertes und Zustandsgrößen des neuen Brennstoffs
- Anpassung der Sicherheitseinrichtungen auf neuartige oder veränderte Gefahrenpotentiale
- Erweiterung der vorhandenen Steuerung
- Konformität des Gesamtsystems

Die zuvor beschriebenen Einflüsse lassen sich allgemein auf den H₂-Retrofit einer beliebigen Gasturbine übertragen. Die Auswirkungen der äußeren Änderungen auf die Inneren Bestandteile des Systems und die damit notwendigen Modifikationen sind jedoch individuell für jeden Gasturbinentyp zu betrachten.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Modifikationen am Versuchsträgermodell AE-T100 beschrieben.

2.4.2 Integration des Brennkammersystems

Das F400-Brennkammersystem wurde durch die Wahl der Schnittstellen so konstruiert, dass am Leistungsmodul der AE-T100 keine Modifikationen notwendig sind. Der Austausch der Brennkammer hat demnach keine unmittelbare Auswirkung auf dieses System. Der Einfluss der veränderten Abgaszusammensetzung auf Turbinenteile ist nicht Teil dieses Projekts und wird daher nicht betrachtet. Da die Regelung der Turbine u.a. von der Turbinenaustrittstemperatur begrenzt wird und keine Änderungen an den originalen Parametern vorgesehen sind, wird der Effekt im Bereich der Mikrogasturbinen als vernachlässigbar angesehen.

2.4.3 Erdgasversorgung

Der benötigte Druck der Brennstoffversorgung für die AE-T100 liegt bei ca. 6 bar. Um auch an Niederdruckquellen betrieben werden zu können, befindet sich in der Einhausung der Mikrogasturbine ein Erdgaskompressor, welcher im Auslieferungszustand direkt in den Ventilblock der Maschine einspeist. Für die Integration des Wasserstoffbeimischsystems war es notwendig, den Ausgang des Erdgaskompressors mit dem Anschluss für den Erdgaseintritt am Beimischsystem zu verbinden und den Ausgang des Beimischsystems wiederum zur Brennstoffzuführung der Mikrogasturbine zu führen.

Hierfür wurde die interne Rohrleitungsführung der Mikrogasturbine angepasst und das Beimischsystem rohrlinientechnisch integriert.

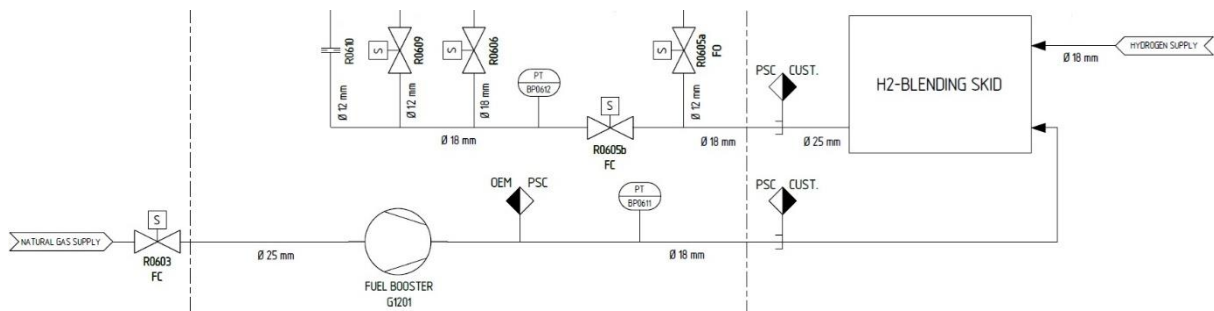


Abbildung 2-6 Integration des Beimischsystems in den Brennstoffpfad

Der Erdgaskompressor wird durch einen Frequenzumrichter drehzahl geregelt und nutzt als Regelgröße den Eingangsdruck zu den Brennstoffventilen, welcher durch einen Sensor im Ventilblock ermittelt wird. Durch die Zwischenschaltung des Beimischsystems und die Notwendigkeit, dass Erdgasdruck am Eingang anstehen muss, bevor das System Betriebsbereitschaft an die Mikrogasturbine zurückmeldet, musste ein Drucksensor direkt am Druckausgang des Erdgaskompressors nachgerüstet werden (BP0611 in Abbildung 2-6).

2.4.4 Austausch Ventilblock

Um die AE-T100 Mikrogasturbine für den Betrieb mit Wasserstoff zu adaptieren, wurde der bestehende Ventilblock mit Absperr-, Entlüftungs- und Regelventilen durch ein neues System ersetzt, das speziell auf die Eigenschaften von Wasserstoff ausgelegt ist. Der ursprüngliche Ventilblock war für die Handhabung von Erdgas ausgelegt, jedoch aufgrund der spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff – wie der geringeren

Molekülgröße, der höheren Diffusionsrate und der Neigung zur Versprödung von Metallen – nicht geeignet. Das neue Ventilsystem wurde aus Materialien gefertigt, die den Anforderungen der Wasserstoffanwendung entsprechen, insbesondere in Bezug auf Permeation und Korrosionsbeständigkeit. Zusätzlich wurden Ventile ausgewählt, welche die notwendigerweise höheren Ventilkapazitäten im Vergleich zur Regelung von Erdgas aufweisen, um eine präzise Steuerung und hohe Dichtigkeit auch bei variierenden Wasserstoffanteilen im Brennstoffgemisch sicherzustellen. Aufgrund des hohen konstruktiven Aufwands für einen vollintegrierten Ventilblock, welcher erst ab höheren Stückzahlen gerechtfertigt ist, wurde für den Versuchsträgeraufbau eine konstruktiv einfachere Konstruktion mit Inline-Ventilen gewählt. Das neue System ermöglicht zudem eine hohe Flexibilität bei der Nutzung unterschiedlicher Wasserstoffmischungen und trägt wesentlich zur Optimierung der Brennstoffverteilung und -regelung innerhalb des Gesamtsystems bei. Neben den Ventilen musste ebenfalls der Drucksensor zur Übertragung des Regelventileintrittsdrucks ausgetauscht werden, da Drucksensoren ohne spezielle Membranen durch Wasserstoff eine hohe Drift aufweisen können. Der nun eingesetzte Drucksensor wurde herstellerseitig speziell für den Einsatz mit Wasserstoff entwickelt.

Neben den notwendigen Änderungen an den Ventileigenschaften erfordert der F400-Brenner Anpassungen an der Brennstoffzuführung, da die Hauptstufe vier Brennstoffanschlüsse besitzt, während im originalen Erdgasbrenner der AE-T100 lediglich ein Anschluss vorhanden ist. Um eine homogene Brennstoffverteilung zu gewährleisten, wurde daher ein Verteilerblock in die Brennstoffstrecke integriert. Der gesamte Brennstoffregel- und Verteilerblock ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

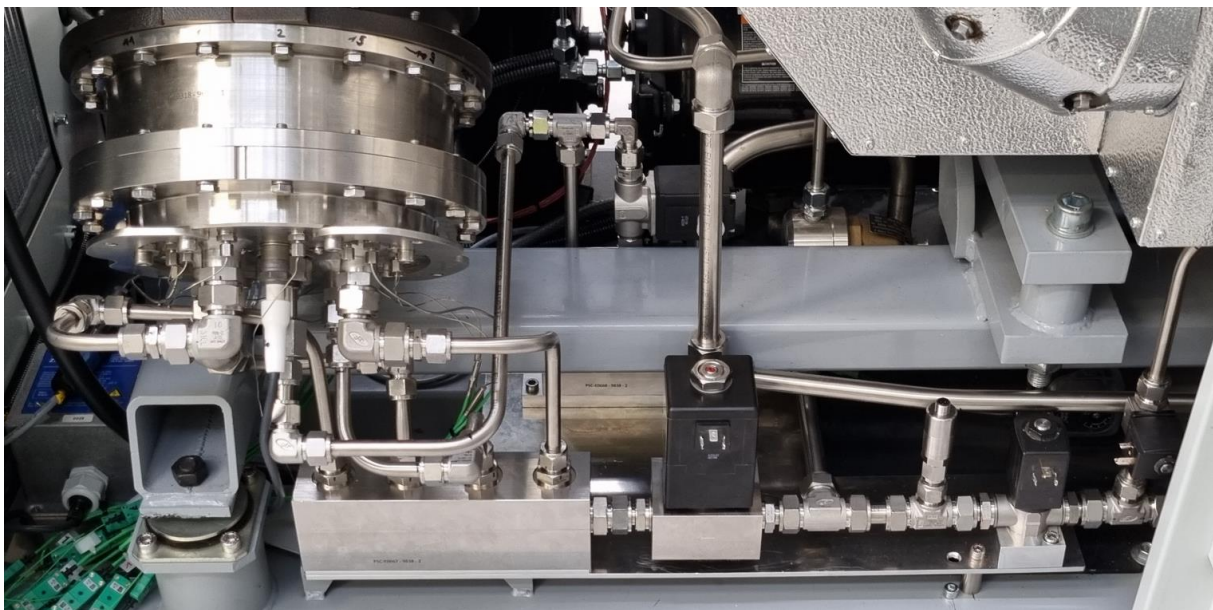


Abbildung 2-7 Brennstoffregel- und Verteilerblock

2.4.5 Zündvorgang

Die Zündung an der AE-T100 erfolgt durch Zugabe der notwendigen Zündgasmenge in einem Bypass zum Pilot-Regelventil. Der Ersatz des Brennstoffblocks zieht auch den Ersatz dieser Blende nach sich. In vorangegangenen Versuchen mit dem F400-

Brenner und Erdgasbetrieb wurde der ursprüngliche Blendendurchmesser beibehalten, da er sich als zuverlässig erwiesen hat. Die Umrüstung auf einen mit 100% Wasserstoff betriebenen Brenner erforderte eine Überprüfung des Zündprozesses. Hauptkriterien sind die Zündfähigkeit des Brenngases und die maximal zugeführte Energie.

Der Zündprozess ist in die Anfahrschrittkette der Mikrogasturbine integriert. Nach erfolgreichen Vorbereitungen wird die Brennkammer bei Erreichen der notwendigen Drehzahl in Zündbereitschaft versetzt. Das Entlastungsventil wird geschlossen, Absperrventile geöffnet und die elektrische Zündkerze betätigt. Der Prozess wird überwacht und bei nicht erfolgreicher Zündung innerhalb von zehn Sekunden abgebrochen. Ein Abbruch führt zur Druckentlastung und Spülung der Brennkammer.

Um vor den Feldversuchen den Zündvorgang sicherheitstechnisch zu überprüfen, wurden die relevanten Eigenschaften von Erdgas und Wasserstoff verglichen. Wasserstoff hat eine geringere Dichte und einen niedrigeren Heizwert, aber eine breitere Zündgrenze und niedrigere Zündenergie. Die über die Blende eingebrachte Energiemenge bei Wasserstoffzündung liegt unterhalb der von Erdgas, wodurch sicherheitstechnisch keine Bedenken bestehen. Aufgrund des breiteren Zündfensters und der niedrigeren Zündenergie wurde außerdem angenommen, dass mit dem für den F400-Brenner und Erdgasbetrieb ausgelegten Zündsystem auch eine Wasserstoffverbrennung zuverlässig gezündet werden kann.

Die durch analytische Berechnungen getroffenen Annahmen konnten bei den Realversuchen am Versuchsträger bestätigt werden. So konnte die Brennkammer bei den Versuchen zuverlässig gezündet werden und es kam nicht zu unvorhergesehenen Schäden aufgrund zu hohen Energieeintrags.

2.4.6 CFD-Berechnung Leckageerkennung

Im Originalzustand ist die AE-T100 mit einem Gaswarnsensor für Erdgas ausgestattet, welcher bei Überschreiten eines gewissen Levels der unteren Explosionsgrenzen ein Signal sendet, welches die Maschine abschaltet und für verstärkte Belüftung des Innenraums der Einhausung sorgt. Durch den vorgesehenen Betrieb mit Wasserstoff ergab sich die Notwendigkeit das Gaswarnsystem zu erweitern, um austretenden Wasserstoff frühzeitig detektieren zu können. Aus den Vorgaben der ISO 19372 ging hervor, dass eine gründliche numerische Strömungssimulation (CFD) notwendig ist, um durch die korrekte Platzierung und Einstellung eines zusätzlichen Gaswarnsensors für Wasserstoff das Sicherheitsniveau auf dem geforderten Maß zu halten. Die Simulation wurde anhand eines bereinigten 3D-Modells und einer Spezifikation mit den verfahrens- und sicherheitstechnischen Vorgaben durch einen Dienstleister erbracht. Basierend auf den technischen Daten der Schallhaubenbelüftung, der Schallhauben- und Komponentengeometrien sowie vorgegebener Leckagemengen an charakteristischen Stellen des Brennstoffsystems wurde der ideale Ort für die Platzierung des Wasserstoffwarnsensors ermittelt. Darüber hinaus wurde bestimmt, welche absolute Wasserstoffmenge bis zur Erkennung durch den Sensor austritt und bewertet, ob diese unterhalb der Vorgaben aus ISO 19372 liegt, um gefährliche Schäden durch eine potenzielle Explosion auszuschließen. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in die finale

Sicherheitsauslegung der Anlage ein. Die Verteilung fünf ausgewählter Leckagen in der Schallhaube ist in Abbildung 2-8 dargestellt.

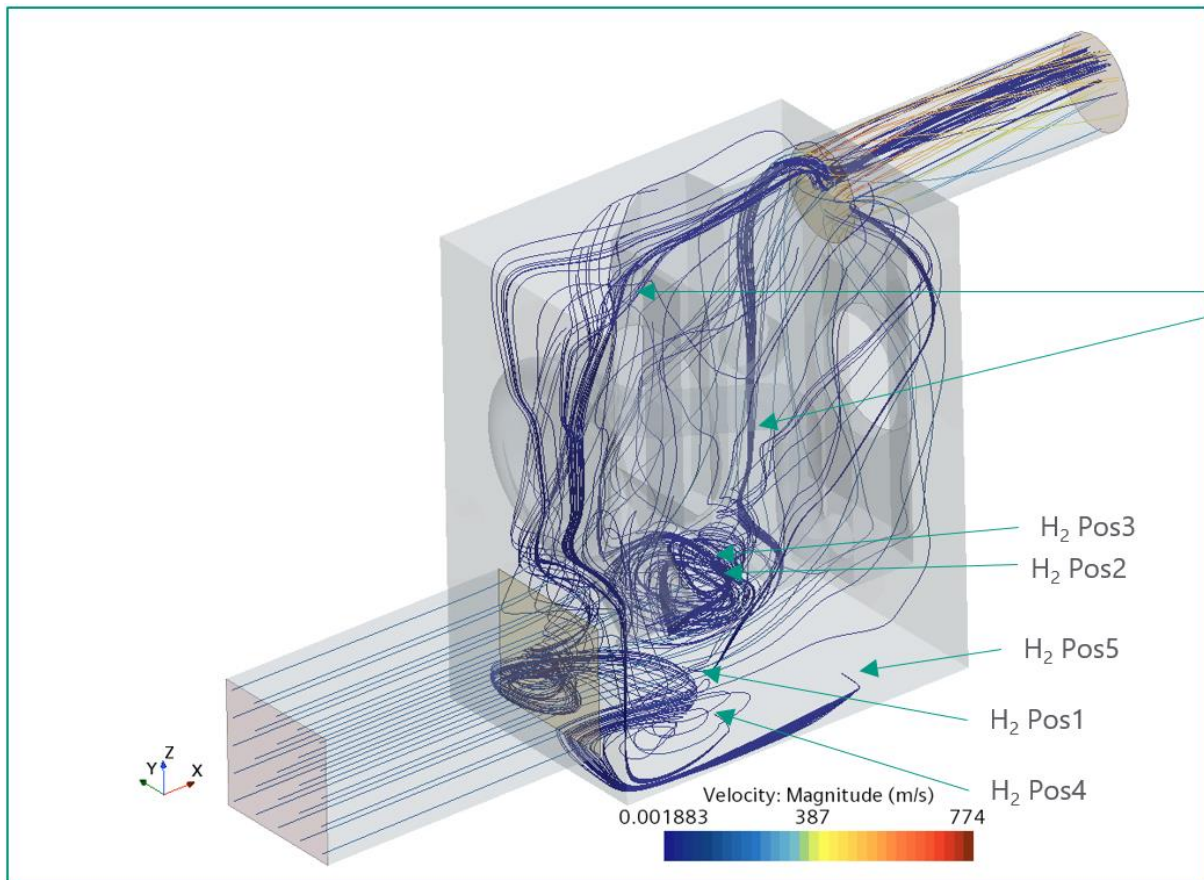


Abbildung 2-8 Verteilung fünf verschiedener Leckagestellen in der Schallhaube

2.4.7 Konformitätsuntersuchung

Werden Modifikationen an Maschinen, welche unter die Maschinenrichtlinie fallen, durchgeführt, so besteht die Pflicht für das ausführende Unternehmen, eine Konformitätsbetrachtung durchzuführen und die Änderung im Zusammenhang mit den vorhandenen Schutzmechanismen zu bewerten. Da die AE-T100 unter die Maschinenrichtlinie fällt und vom Originalhersteller mit CE-Kennzeichnung ausgeliefert wird, wurde die Analyse für die Änderungen von PSC durchgeführt. Oberste Prämisse ist, dass das vorhandene Schutzniveau durch die Änderungen keinesfalls schlechter werden darf.

In vorhergehenden Analysen zur Konformitätsbewertung des Brennkammersystems wurde ermittelt, dass für die Lieferung bzw. den Einbau der Brennkammer unter Beibehaltung von Erdgas als Brennstoff weder eine Konformitätserklärung noch eine Einbauerklärung bereitgestellt werden darf, da es sich bei dem Brennkammersystem weder um eine Maschine noch eine unvollständige Maschine im Sinne der Maschinenrichtlinie handelt. Auf freiwilliger Basis wird mit dem Brennkammersystem seitens PSC eine Herstellererklärung mitgeliefert, welche die Einhaltung aller relevanten Sicherheitsstandards und -normen erklärt.

Im Zuge des Retrofit-H₂ Projektes wurde der gesamte Retrofit inklusive Änderung des Hauptbrennstoffs hinsichtlich der Konformitätsanforderungen betrachtet. In diesem

Fall unterscheidet die Maschinenrichtlinie in „wesentliche“ und „unwesentliche Änderungen“. Wesentliche Änderungen bestehen, wenn grundlegende Funktionsänderungen, Leistungserhöhungen und/oder Änderungen der Sicherheitstechnik vorliegen. Durch den Retrofit wurde die grundlegende Funktion der Mikrogasturbine und deren Leistung nicht verändert. Die Erweiterung der Sicherheitstechnik durch Installation eines zusätzlichen Gaswarnsensors erfolgte ohne weiterführende Änderungen in der Sicherheitssteuerung, da mit dem Wasserstoffsensoren ein zum Erdgassensoren gleichartiges Produkt in denselben Überwachungskreis eingebunden wurde und die beiden Sensoren sich nicht gegenseitig beeinflussen können. Für den Retrofit wurde eine Risikobeurteilung durchgeführt, wobei keine weiteren höheren Gefahrenpotenziale identifiziert werden konnten. Auf dieser Basis wurde festgestellt, dass es sich bei dem vorliegenden Retrofit um eine „unwesentliche Änderung“ im Sinne der Maschinenrichtlinie handelt. Es wird für die umgebaute Mikrogasturbine daher keine neue Konformitätserklärung ausgestellt und kein neues Typenschild mit CE-Kennzeichen angebracht. In einer Herstellererklärung wird erklärt, dass der gesamte Retrofit den einschlägigen Sicherheitsvorschriften entspricht. Für die Änderungen wird die Originaldokumentation in Form eines Addendums zur Betriebsanleitung erweitert. Außerdem werden alle relevanten Unterlagen für den Betrieb, wie R&I-Schemata, Stromlaufpläne, Betriebsanleitungen für Komponenten, etc. mit dem Retrofit ausgeliefert.

3 Brennkammerentwicklung

3.1 Brennkammersystem der AE T100

Eine wesentliche Komponente der Mikrogasturbine, die für die Nutzung von Wasserstoff angepasst werden muss, ist das Brennkammersystem. In Abbildung 1-1 ist ein Schnitt durch die Brennkammer dargestellt. Die im Rekuperator vorgeheizte Luft tritt von der rechten Seite in die Brennkammer ein. In der Brennkammer nimmt nur ein Teil der Prozessluft an der Verbrennung teil. Der weitaus größere Teil der Luft wird über die sogenannten Mischluftbohrungen direkt durch das Flammrohr zwischen Verbrennungszone und Turbineneintritt eingebracht. Dies dient dazu, die Temperatur der heißen Abgase vor der ungekühlten Turbine zu senken, um die maximale Turbineneintrittstemperatur von 950°C nicht zu überschreiten. In der Mikrogasturbine wird ein zweistufiger Brenner eingesetzt, der aus einer Pilotstufe (in orange dargestellt) und einer Hauptstufe (in blau dargestellt) zusammengesetzt ist. Der Pilotbrenner wird für die Zündung beim Start und die Stabilisierung der Hauptstufe während des Betriebs eingesetzt. Die Hauptstufe wird während des Hochfahrens gezündet und setzt den Hauptteil des Brennstoffs im Betrieb um.

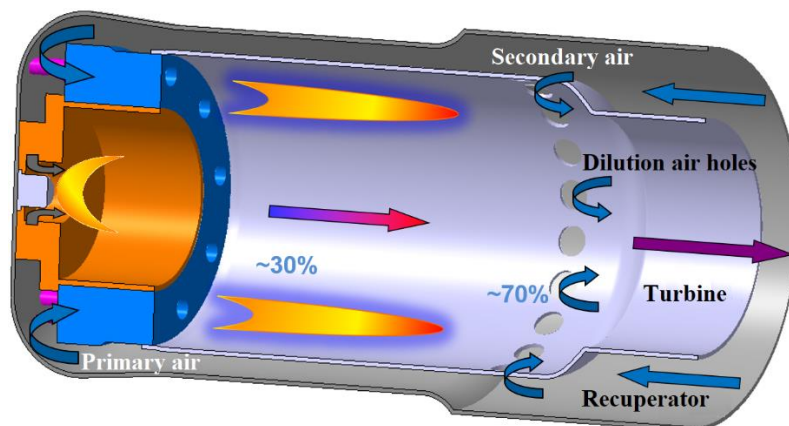


Abbildung 3-1 Schnitt durch die jet-stabilisierte DLR-Brennkammer für die AE-T100

Für den Brenner gibt es mehrere Konzepte, wie die Flamme in der Brennkammer stabilisiert werden kann. Die klassische Strategie, die auch in der AE-T100 zum Einsatz kommt, basiert auf dem drall-stabilisierten Konzept. Hierbei wird dem teilweise vorge-mischten Brennstoff-Luftgemisch ein Drall aufgeprägt, durch den die Flamme stabilisiert wird. Dieses Konzept eignet sich jedoch nicht besonders gut für die Verbrennung von Wasserstoff, da es hier zu Flammenrückschlag in die Brennstoffzuführung und damit zur Schädigung des Brenners kommen kann. Daher wurde am DLR Institut für Verbrennungstechnik das jet-stabilisierte oder auch teilweise als FLOX[®] bezeichnete Verbrennungskonzept für die Anwendung in Gasturbinen entwickelt (Lammel, et al., 2010) (Bower, et al., 2018). Hierbei wird der Brennstoff teilweise mit der Luft vorge-mischt und mit hoher Geschwindigkeit axial in die Brennkammer eingedüst. Durch die ringförmige Anordnung der einzelnen Brennstoffdüsen entsteht eine innere Rezirkulation (axiale Rückströmung), welche die heißen Abgase zurück zum Brennerkopf

transportiert und die Flamme so stabilisiert. Mit diesem Konzept kann eine sehr homogene Temperaturverteilung erreicht werden und damit auch niedrige Stickoxid-Emissionen. Die Gefahr eines Flammenrückschlags wird durch die hohen Jetgeschwindigkeiten minimiert. Daher eignet sich dieses Konzept sehr gut für den Einsatz mit hochreaktivem Wasserstoff. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Brennstoffflexibilität, die mit diesem Konzept erreicht werden kann, da im Projekt neben der reinen Wasserstoffverbrennung auch Mischungen von Wasserstoff und Erdgas umgesetzt werden sollen. Weitere Vorteile sind die emissionsarme Verbrennung und die geringere Anfälligkeit gegenüber thermoakustischen Schwingungen und die Lastflexibilität über einen weiten Bereich.

3.2 Auslegung des Brennkammersystems mittels CFD Methoden

Zur Auslegung des Brennkammersystems wurden weitere Modifikationen auf Basis des bestehenden bisher ungetesteten Wasserstoff-Brennkammersystems F400h1 numerisch untersucht (siehe Abbildung 3-2). Einige bekannte Problemstellen und H₂-spezifische neue Herausforderungen wurden im Zuge der Auslegung bereits adressiert. Dies betraf unter anderem die im Folgenden aufgeführten Punkte.

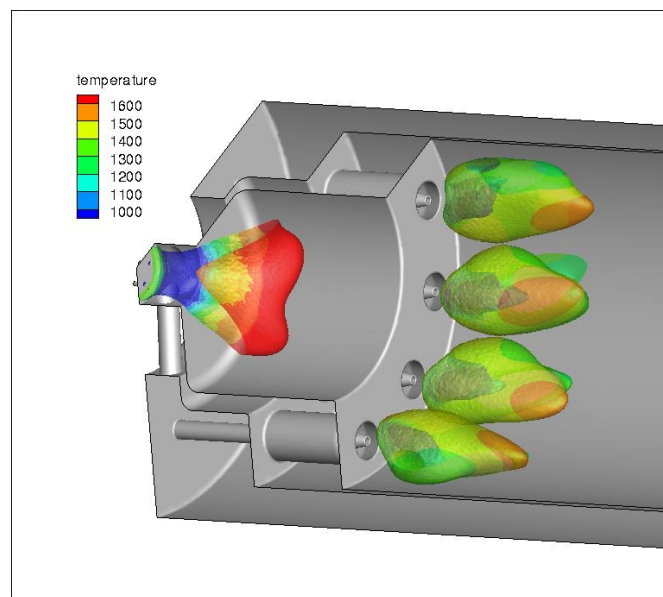


Abbildung 3-2: Isokonturen der Wärmefreisetzungszonen mit farblicher Visualisierung der Temperaturverhältnisse im F400h1

Der Lochkreisdurchmesser des Hauptstufenrings wurde reduziert. Das Ziel der Maßnahme war zum einen eine Reduktion der Temperaturbelastung auf der Flammrohrwand, zum anderen eine Optimierung der Wandstärkenverteilung im Pilotbrennerbereich hinsichtlich mechanischer Stabilität und thermischer Zyklenfestigkeit. Vergangene Untersuchungen hatten gezeigt, dass der zu geringe Abstand der Düsen zur Flammrohrwand und die damit einhergehende lokal sehr ungünstige geringe Wandstärke der tragenden Struktur in Kombination mit thermischen Zyklen zu unerwünschter bleibender Verformung des Brennerkopfes geführt hat. Dieses Problem wurde damit adressiert. Ebenfalls angepasst wurde in dem Zuge die Geometrie des Pilotdoms

selbst, mit dem Ziel, eine gleichmäßigere Wandstärkenverteilung und damit bessere Lastverteilung im Bauteil zu erreichen.

Die Zahl der Hauptstufendüsen wurde von zehn auf zwölf erhöht. Ziel der Maßnahme war eine Verkleinerung der Einzelflammen, was zum einen zu einer Verbesserung der Mischungsgüte und damit einer Reduktion der NO_x -Emissionen, zum anderen zu einer vollständigeren Oxidation auf gegebenem Bauraum und damit eine Verbesserung der CO-Bilanz führen sollte. Ein weiterer Nebeneffekt der Maßnahme war die Optimierung der numerischen Simulation, da jetzt eine bessere Ausnutzung periodischer Randbedingungen und damit eine Verkleinerung des effektiv zu lösenden Rechengbietes möglich war.

Zur Verhinderung eines potentiellen Flammenrückschlages, welcher die größte Gefahr beim Übergang zu reinem Wasserstoff darstellt, wurde die Vormischstrecke in den Hauptstufendüsen zunächst vollständig eliminiert. Zusätzlich wurden die Bohrungsdurchmesser auf die zu erwartenden Volumenströme des Wasserstoffgases sehr geringer Dichte angepasst.

Die Versorgung der Pilotstufe mit Brennstoff und Luft wurde neu designt. Die bisher verwendeten tangential angeordneten Einströmöffnungen für den Brennstoff wurden eliminiert, da die Erfahrung gezeigt hat, dass diese zu Fehl- und Rückströmungen mit entsprechendem Flammrückschlagrisiko führen könnten. Zusätzlich wurde die tangential Luftzufuhr von drei auf sechs Bohrungen erweitert und im Querschnitt angepasst, um die Bedingungen in der Pilotstufe abzumagern und den Anforderungen an die Wasserstoffverbrennung gerecht zu werden.

Zusätzlich wurden im Projekt ein Version F400h2 entwickelt, bei der eine technische Vormischung nach dem jet-in-coflow-Prinzip in der Hauptstufe realisiert wurde. Das Ziel der Maßnahme war nach dem Ausbleiben der befürchteten Flammenrückschlagproblematik eine Reduktion der Abhebehöhe und damit Verkürzung der Reaktionszone bei gleichzeitiger Reduktion der auftretenden Spitzentemperaturen und damit verbundener Bildung von thermischem NO_x .

In der finalen Iteration im Rahmen des Projektes wurde ein neuartiges Vormischkonzept durch aktive Rezirkulation in die Hauptstufendüsengeometrie der Version F400h3 integriert. Details zur konkreten technischen Lösung können an dieser Stelle aufgrund von laufenden Patentverfahren nicht veröffentlicht werden. Diese Maßnahme versprach aufgrund der numerischen Ergebnisse die Möglichkeit der weiteren Reduktion der NO_x -Emissionen bei gleichzeitiger Vermeidung von Flammrückschlag durch eine bewusste Aufrechterhaltung einer nicht reaktiven Schutzmantelschicht, was sich durch die Validierungsversuche auf dem atmosphärischen Prüfstand wie auch die Demonstration in der Gasturbinenanlage bestätigen ließ. Ein weiterer Nebeneffekt war die Erweiterung des Flexibilitätsbereichs hinsichtlich der Brennstoffmischungen aus Wasserstoff und Erdgas.

Zu den resultierenden Optionen bzw. Varianten wurden stationäre RANS- Verbrennungssimulationen mit detaillierter Chemie unter Verwendung des DLR intern entwickelten Strömungs- und Chemielösers ThetaCOM sowie einer gezielt reduzierten

Variante des ebenfalls in-house entwickelten Reaktionsmechanismus DLR Concise durchgeführt. Diese erlaubten eine vorläufige Einordnung und Bewertung des Potentials der verschiedenen Optionen. Möglich sind damit beispielsweise Betrachtungen von Vormischgüte und -charakteristik sowie Strömungsfeld, Aussagen zur Luftverteilung und Druckverlusten und Flammlage und Temperaturverteilung. Außerdem lassen sich in begrenztem Maße auch Vorhersagen zum Emissionsverhalten machen.

In Abbildung 3-3 sind exemplarisch einige Ergebnisse aus den Verbrennungssimulationen der verschiedenen Brennkammervarianten dargestellt. Gut erkennbar ist hier die Evolution über die unterschiedlichen Iterationen. Beispielsweise ist deutlich erkennbar, wie die Vormischgüte vor Erreichen der Flammfront sukzessive verbessert und die resultierenden Hochtemperaturzonen stromab der Reaktionszone bei ansonsten identischen Betriebsbedingungen verkleinert werden. Damit ist direkt eine Verbesserung des NO_x -Emissionsverhalten verbunden, was ebenfalls im Experiment nachgewiesen werden konnte.

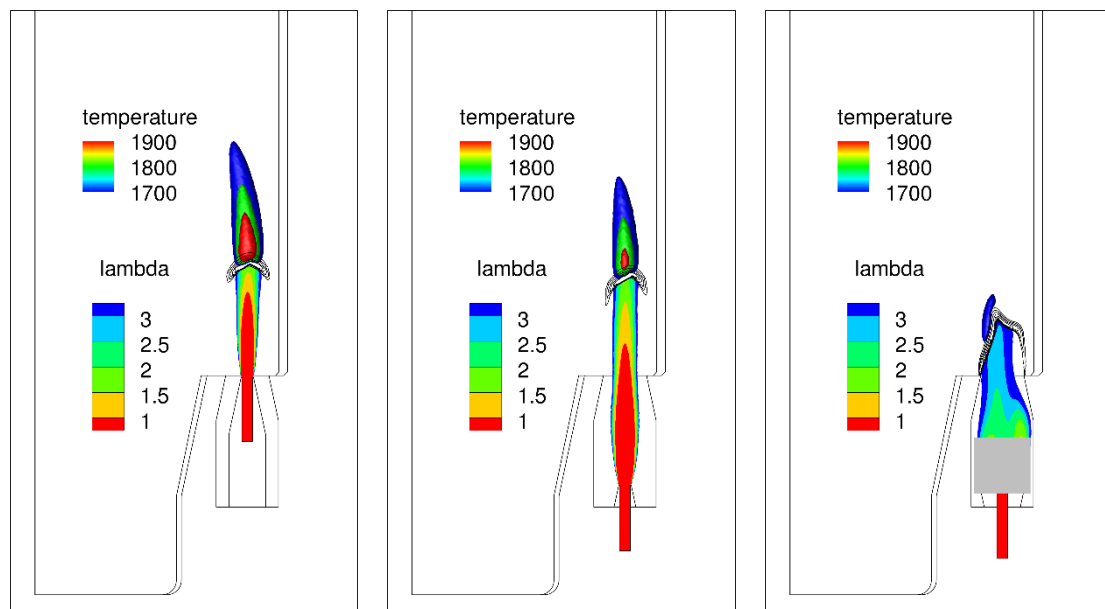


Abbildung 3-3: Luftzahl, Wärmefreisetzungszone und Peak-Temperaturzonen für v.l. F400h1, F400h2, F400h3 bei Referenzvollastbetriebspunkt

Zur Validierung der generellen Aussagekraft der gerechneten Ergebnisse sind grundsätzlich experimentelle Untersuchungen von ausgewählten Referenzfällen notwendig. Zu diesem Zweck wurden die Brennvvarianten „h1“, „h2“ und „h3“ ausgewählt und, in leicht überarbeiteter Form, um eine Kompatibilität mit dem bestehenden Prüfstand herzustellen, unter atmosphärischen Bedingungen untersucht und vermessen.

3.3 Untersuchung des Brenners im atmosphärischen Prüfstand

Für die Beurteilung der verschiedenen Varianten, die mittels CFD Methoden ausgelegt wurden, und deren experimentelle Untersuchung, wurde ein bestehender Einzelbrennerprüfstand mit optischem Zugang eingesetzt (siehe Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). An diesem Prüfstand wurde der Brenner zunächst unter atmosphärischen Bedingungen getestet. Dies stellt eine wesentliche Vereinfachung der Versuchsdurchführung dar, liefert aber bereits wichtige Erkenntnisse über die Charakteristik des

Brenners, insbesondere in Bezug auf die Verbrennungsstabilität und die erzielbaren Emissionen. Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem atmosphärischen auf den Druckbetrieb werden die Geschwindigkeiten durch eine Skalierung über den Druck konstant gehalten. Der Prüfstand wurde am Institut für Verbrennungstechnik speziell für die Untersuchung von Brennern der Ansaldo AE-T100 Mikrogasturbine entwickelt und bereits in mehreren Projekten erfolgreich für die Brennerauslegung mit verschiedensten Brennstoffen eingesetzt.

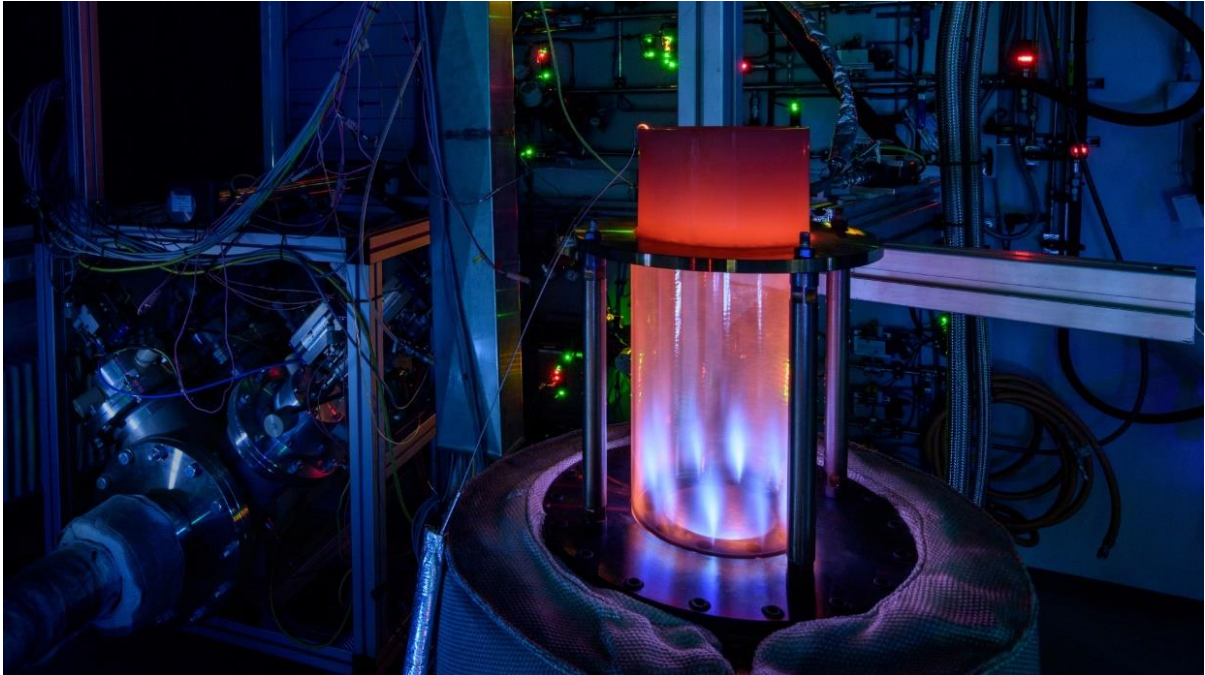


Abbildung 3-4 Brenner auf dem atmosphärischen Prüfstand im Hintergrund Luffterhitzer und Luftversorgung

In Abbildung 3-5 ist der Aufbau des atmosphärischen Prüfstands als CAD-Konstruktion dargestellt. Der Prüfstand bietet durch seinen optischen Zugang die Möglichkeit verschiedene Diagnosemethoden, wie beispielsweise die OH* Chemilumineszenz, einzusetzen. Mit Hilfe der OH* Aufnahmen kann auf die Position und die Form der Reaktionszone geschlossen werden. Des Weiteren bietet der Prüfstand die Möglichkeit, kontinuierlich Proben für die Emissionsmessung über eine Abgassonde direkt aus dem Abgasstrahl zu entnehmen und einer Gasanalyse zuzuführen. Damit können dann die Konzentrationen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHCs), NO_x, CO, CO₂ und der Restsauerstoffgehalt im Abgas bestimmt werden. Der Prüfstand ist detailliert instrumentiert mit Thermoelementen, Drucksensoren und Massenstrommessern.

Für die Untersuchung der verschiedenen Brennstoffe ist ein sogenanntes Synthesegaspanel im Brennstoffpfad integriert, mit dem von Reingasen bis hin zu definierten Mischungen verschiedenste Brennstoffe und Brennstoffgemische bereitgestellt werden können. Im Projekt wurden zum einen reiner Wasserstoff und reines Erdgas eingesetzt, aber auch verschiedene Mischungen von Erdgas und Wasserstoff eingestellt. Darüber hinaus wird mit dem Synthesegaspanel die Brennstoffleistung sowie das Brennstoff-Verhältnis zwischen Pilotbrenner und Hauptbrenner vorgegeben. In einer Mikrogasturbine wird die Luft, die an der Verbrennung teilnimmt durch den

Rekuperator vorgeheizt. Um diese Randbedingungen auch im atmosphärischen Versuch abzubilden, wird auch hier die Luft vor dem Brenner mittels elektrischer Luftherhitzer vorgeheizt. Standardmäßig wird am Brennereintritt eine Temperatur von 600°C eingestellt, die je nach Versuch aber auch variiert werden kann.

Die Abbildung 3-6 zeigt einen Schnitt durch den eigentlichen Prüfstand (Hohloch, Lingstädt, & Kutne, 2023). Hier kann man schematisch die Integration des zweistufigen Brenners (in grau dargestellt) mit der Brennstoffzuführung zur Pilotstufe und der Brennstoffaufteilung auf die einzelnen Düsen der Hauptstufe (in petrol dargestellt) erkennen. Bei der Zuführung der vorgeheizten Luft wurde mit Hilfe einer Strömungsumlenkung (in Gelb dargestellt) die Anströmung des Brenners in der originalen Brennkammer nachgebildet.

Die Abbildung 3-4 zeigt eine Gesamtübersicht über den Prüfstand (im Vordergrund rechts) und die Luftherhitzer (im Hintergrund links) im Betrieb mit einer reinen Wasserstoffflamme.

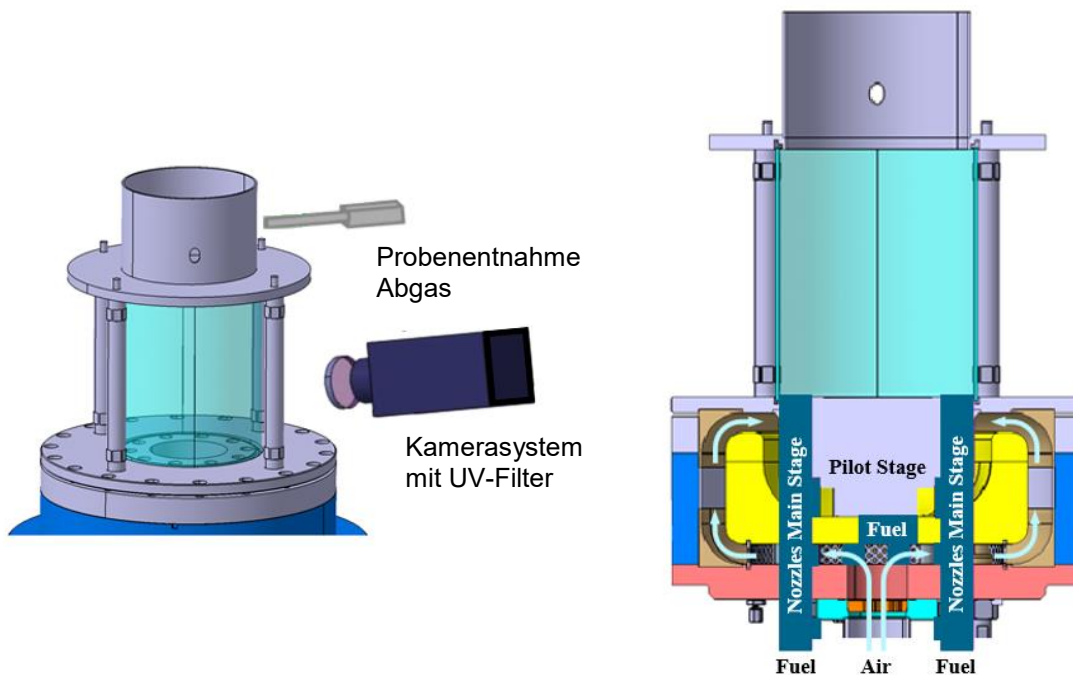


Abbildung 3-5 Übersicht ATM Prüfstand

Abbildung 3-6 Schnitt ATM Prüfstand

Der atmosphärische Prüfstand bietet neben dem optischen Zugang den weiteren Vorteil, dass die Randbedingungen frei von den Restriktionen der Mikrogasturbine eingestellt werden können. Damit können verschiedene Parameter, wie beispielsweise die Luftaufteilung auf Mischluft und Verbrennungsluft frei gewählt werden. Dies bietet für die folgende Abstimmung des Brennkammersystems auf die reale MGT einen entscheidenden Vorteil. Im Folgenden werden die Randbedingungen und Variationen, die in den Versuchen durchgeführt wurden, näher erläutert.

Da die Prozessluft in der Mikrogasturbine für einen Lastpunkt nicht variiert werden kann, bestimmt die Aufteilung zwischen Verbrennungsluft und Mischluft die Luftzahl

für die Verbrennung. Tendenziell liegt der optimale Auslegungspunkt für die Wasserstoffverbrennung bei höheren Luftzahlen und damit mageren Verhältnissen in der Brennkammer als bei der Verbrennung von Erdgas. Es ist daher sehr wichtig eine Variation der Luftzahl durchzuführen um den optimalen Betriebsbereich für die spätere Anwendung definieren zu können. Die Luftzahl wird dabei folgendermaßen bestimmt:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Luft,stöchiometrisch}} = \frac{\dot{m}_{Luft}}{\dot{m}_{Brennstoff} \cdot AFR}$$

Im Brenner kann auch die Aufteilung des Brennstoffs zwischen Pilotbrenner und Hauptbrenner variiert werden. Eine höhere Pilotierung kann zu einer verbesserten Stabilisierung der Flamme eingesetzt werden. Jedoch beeinflusst ein zu hoch gewählter Massenstrom über den Piloten unter Umständen die Emissionen negativ. Tendenziell kann der Pilot für die Wasserstoffverbrennung weiter reduziert werden. Für die Verbrennung von Erdgas wird eher eine stärkere Stabilisierung durch einen erhöhten Pilotmassenstrom benötigt. Die Aufteilung wird über den Pilotsplit eingestellt und ist über nachfolgende Gleichung definiert:

$$S_{Pilot} = \frac{\dot{m}_{Brennstoff,Pilot}}{\dot{m}_{Brennstoff}}$$

In Tabelle 3-1 sind die während der Versuchsreihen konstant eingestellten Parameter dargestellt. Die Vorwärmtemperatur in der realen MGT liegt bei ca. 600°C. Die thermische Leistung wird, wie bereits erwähnt, druckskaliert. Damit ergibt sich für den Vollastpunkt aus einer thermischen Leistung von ca. 330 kW bei 4,3 bar, eine skalierte thermische Leistung von ca. 80 kW.

Tabelle 3-1 Konstante Parameter

Parameter	Wert	Einheit
Vorwärmtemperatur $T_{cc, in}$	600	°C
Thermische Leistung	80	kW

Für die durchgeführten Versuchsreihen wurden verschiedene Parametervariationen durchgeführt. Die jeweiligen Parameter und die Variation sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Tabelle 3-2 Parametervariationen

Parameter	Variation	Einheit
Luftzahl λ	2 - 4,5	-
Pilotsplit S_{Pilot}	5 - 12	%
LHV	47 - 119	MJ/kg

Aus den Versuchsreihen werden nun in den folgenden Kapiteln exemplarisch einige Ergebnisse vorgestellt. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung ist für 2025 angestrebt.

3.3.1 Versuchsergebnisse mit Wasserstoff

Alle drei Brennervarianten (F400h1, h2 und h3) konnten mit reinem Wasserstoff in stabilen Lastpunkten betrieben werden. Es konnten dabei jeweils sehr weite mögliche Betriebsbereiche bis hin zu sehr mageren Bedingungen erreicht werden. Bei der Auswertung der Form und Lage der Reaktionszone mittels der OH* Chemolumineszenz Aufnahmen zeigten sich, wie bereits durch die CFD Rechnungen vorhergesagt, einige Unterschiede.

In Abbildung 3-7 ist ein Vergleich der drei Brennervarianten exemplarisch an einem Betriebspunkt gezeigt, bei dem die gleichen Bedingungen eingestellt wurden. In allen Fällen wurde reiner Wasserstoff (Heizwert: 119 MJ/kg) eingesetzt und eine Luftzahl von 3,5 eingestellt. Der Pilotsplit betrug 7%. Aus den OH* Chemolumineszenz Aufnahmen ist deutlich zu erkennen, dass bei allen Brennervarianten die Flammen abgehoben sind. Es ist in keinem Fall ein Ankern der Flamme im Brenner oder gar eine Rückzündung zu erkennen. Wie bereits bei den Auslegungen mittels CFD Methoden zu sehen war, sind die Flammen vor allem bei der F400h1 Variante sehr weit abgehoben, während sie bei den beiden anderen Varianten eher nahe am Brennerkopf liegen. In allen Fällen sind über den einzelnen Düsen diskrete Flammen zu erkennen.

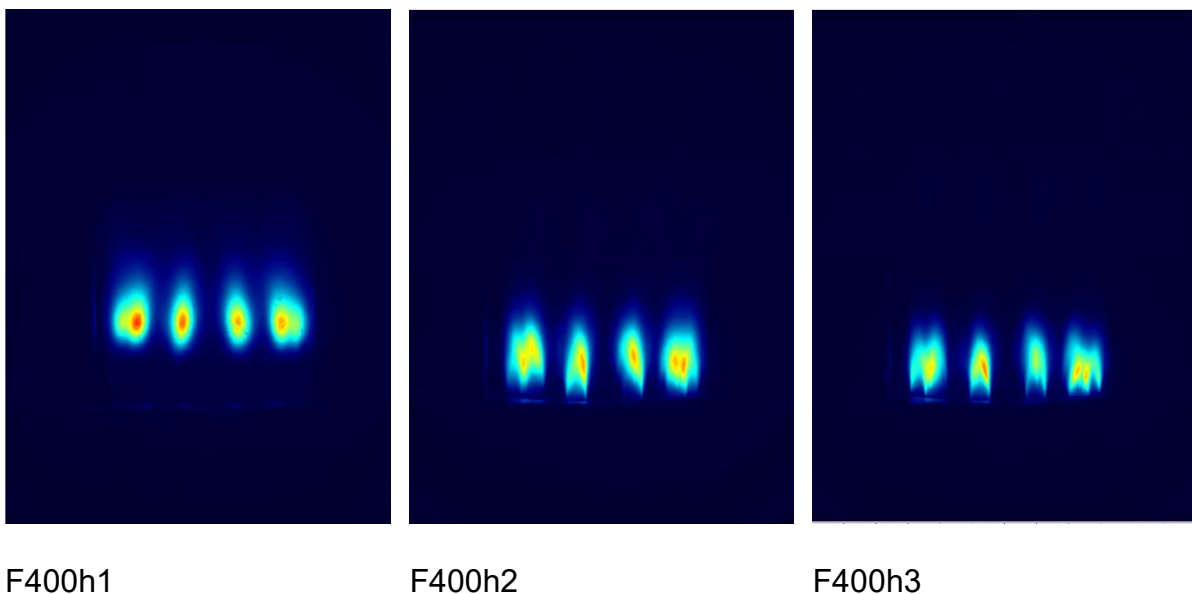


Abbildung 3-7 Vergleich F400h1, h2, h3: OH* Chemolumineszenz

In Abbildung 3-8 sind die Stickoxidemissionen für alle drei Varianten über dem untersuchten Luftzahl-Bereich dargestellt. Für Mikrogasturbinen ist es üblich die Emissionen auf einen Restsauerstoffgehalt von 15% im Abgas zu beziehen. Alle folgenden Emissionen sind daher auf diese Referenz umgerechnet. Anhand der Emissionen ist klar die Verbesserung von Variante h1 zu Variante h3 zu erkennen. Wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert wurde, konnten die Peak-Temperaturen durch die Verbesserung

der Mischung abgesenkt werden, was sich auch in den Stickoxidemissionen zeigt. Somit konnten die CFD Untersuchungen mit Hilfe der Messungen verifiziert werden.

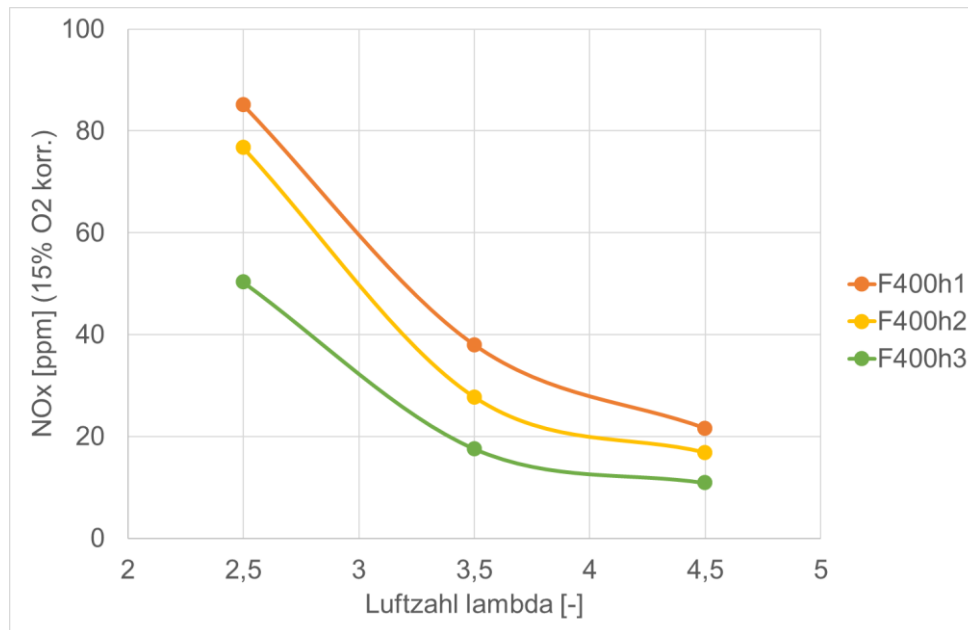
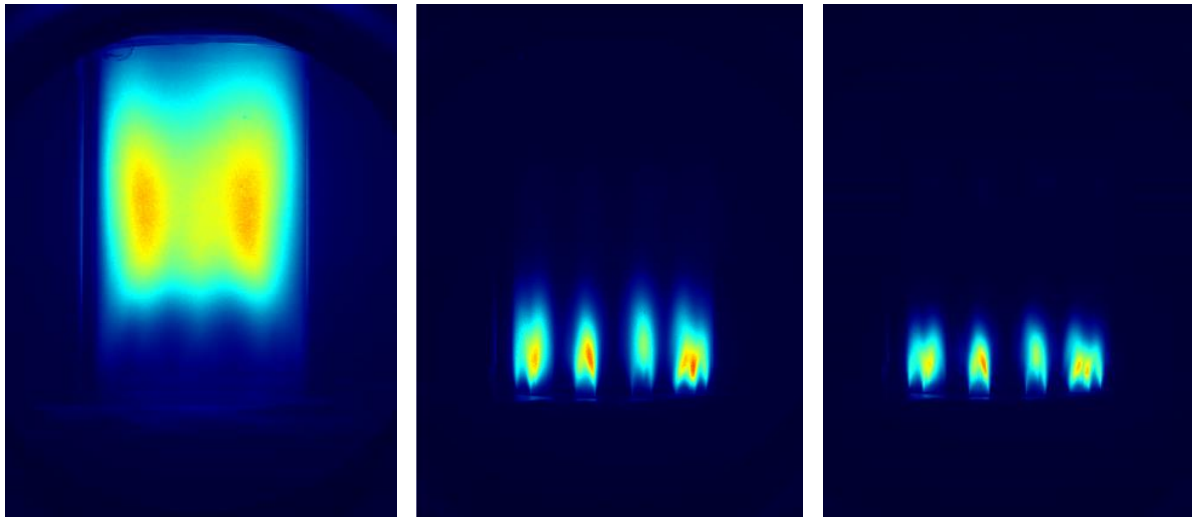


Abbildung 3-8 Vergleich F400h1, h2, h3: NO_x Emissionen

Bei allen Brennervarianten treten bei niedrigen Luftzahlen sehr hohe Emissionen auf, die dann mit steigender Luftzahl sehr schnell absinken. Hiermit bestätigt sich die Annahme, dass die Wasserstoffverbrennung bei eher mageren Verhältnissen im Bereich von einem Lambda von 3,5 oder höher eingestellt werden sollte.

3.3.2 Vergleich Wasserstoff zu Erdgas

Neben der Verbrennung von reinem Wasserstoff sollte im Projekt auch die Beimischung von Erdgas untersucht werden. Daher wurden am atmosphärischen Prüfstand auch Untersuchungen zu verschiedenen Brennstoffmischungen durchgeführt, die im Folgenden exemplarisch am Beispiel des F400h3 Brenners gezeigt werden sollen. Generell zeigten die Brenner eine hohe Brennstoffflexibilität und konnten alle mit Wasserstoff bis hin zu reinem Erdgas betrieben werden. Unterschiede ergaben sich, wie auch bei der Wasserstoffverbrennung im Flammenbild, der Abhebehöhe und vor allem bei den erreichbaren Emissionen. Da bei der Beimischung von Erdgas neben den NO_x – Emissionen auch CO- Emissionen eine Rolle spielen, wurden diese bei dem Vergleich mitbetrachtet.



100 m% NG, λ_3 , S_{Pilot} 7%

73 m% H₂, 27 m% NG,
 $\lambda_{3,5}$, S_{Pilot} 7%

100 m% H₂, $\lambda_{3,5}$, S_{Pilot} 7%

Abbildung 3-9 Vergleich von verschiedenen Brennstoffen

Die Abbildung 3-9 zeigt eine Gegenüberstellung der OH* Chemolumineszenz Aufnahmen für drei verschiedene Brennstoffe. Ganz links ist die Flamme bei Verwendung von Erdgas gezeigt, in der Mitte wurde eine Mischung von 73 m% Wasserstoff und 27 m% Erdgas eingestellt und rechts wurde reiner Wasserstoff verwendet. Kleine Unterschiede gibt es im eingestellten Betriebspunkt. Die Mischung und der Wasserstoffpunkt wurden bei einer Luftzahl von 3,5 aufgenommen, der Erdgaspunkt bei einer Luftzahl von 3. Der Pilotsplit war dagegen bei allen Punkten konstant bei 7% eingestellt. Zwischen den Betriebspunkten in denen Wasserstoff eingesetzt wurde und dem Erdgas ist ein großer Unterschied in der Ausformung der Reaktionszone, aber auch in der Abhebehöhe zu erkennen. Bei Erdgas ist die Reaktionszone eher volumetrisch und es sind nur noch sehr vage einzelne Flammen zu sehen. Die Reaktionszone ist weit vom Brennerkopf abgehoben und in die Länge gezogen. In den Wasserstoff Punkten sind dagegen wieder diskrete einzelne Flammen zu sehen. Bei der Mischung sind diese etwas in die Länge gezogen und weisen eine leicht größere Abhebehöhe auf als bei reinem Wasserstoff.

In Abbildung 3-10 sind für alle Brennstoffe die Emissionen aufgetragen. Dabei wurde auf der X-Achse der Heizwert der Brennstoffe verwendet, der für Erdgas je nach Qualität ca. 47 MJ/kg, für die Mischung 66 MJ/kg und für reinen Wasserstoff 119 MJ/kg beträgt. Während bei reinem Wasserstoff keine CO Emissionen auftreten, steigen diese für reines Erdgas in diesem Betriebspunkt bis auf 112 ppm an, was bereits einen sehr hohen Wert darstellt, der daraus resultiert, dass eine Luftzahl von 3 für die reine Erdgasverbrennung schon sehr mager ist. Tendenziell steigen die CO Emissionen vor dem mageren Verlöschen stark an. Dies zeigt auch, dass eine weitere Abmagerung des Betriebspunktes bis auf eine Luftzahl von 3,5 nicht mehr ohne zusätzliche Stabilisierung durch einen erhöhten Piloteinsatz möglich gewesen wäre.

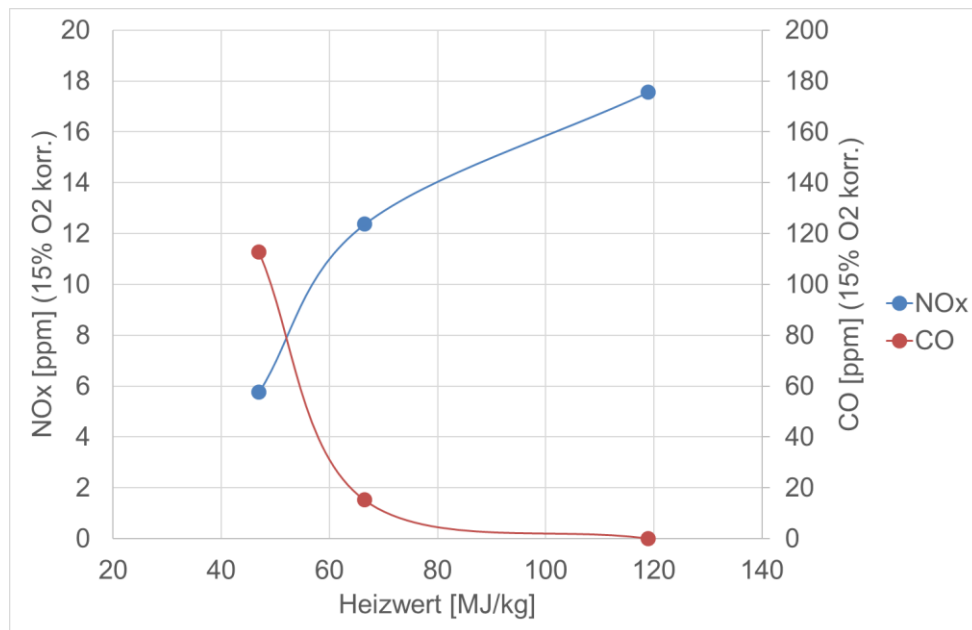


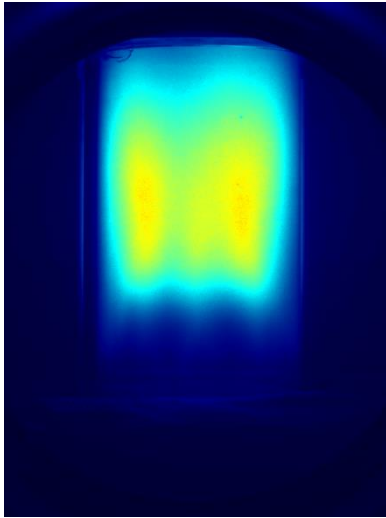
Abbildung 3-10 Emissionen von NO_x und CO für die verschiedenen Brennstoffe

3.3.3 Einfluss der Pilotstufe bei Erdgas und Wasserstoff

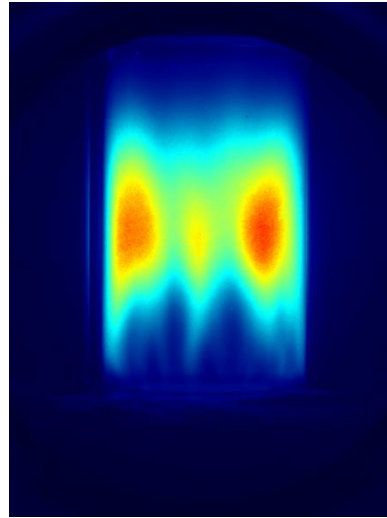
Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurde, wird der Pilot zum einen für den Start und zum anderen in den einzelnen Betriebspunkten für die Stabilisierung der Hauptstufe eingesetzt. Daher sollte auch in den atmosphärischen Versuchen der Einfluss der Pilotstufe untersucht werden. Zudem hat die Pilotstufe einen messbaren Einfluss auf die Emissionen.

Im Folgenden sind daher zwei Versuchsreihen dargestellt, die den Einfluss des Piloten bei unterschiedlichen Brennstoffen zeigen.

Bei der Verbrennung von Erdgas wird, wie bereits erwähnt, tendenziell ein höherer Brennstoffmassenstrom über den Piloten benötigt um die Flamme des Hauptbrenners zu stabilisieren. Dazu sind in Abbildung 3-11 zwei OH^* Chemolumineszenz Aufnahmen gegenübergestellt. Bei beiden Betriebspunkten wurde eine Luftzahl von 3 eingestellt. Links wurde ein Pilotsplit von 5% eingestellt. Im rechten Bild ein Pilotsplit von 18%. Zum Vergleich wird normalerweise für die Erdgasverbrennung ein Pilotsplit im Bereich von 7% eingestellt. Die beiden Einstellungen stellen daher eher schon Extrempunkte in beide Richtungen dar. Die Emissionen in NO_x und CO sind für beide Betriebspunkte in Abbildung 3-12 dargestellt. Bei 5% ist die Reaktionszone volumetrisch, im Gegensatz zur Erdgasflamme mit 7% Pilotsplit in Abbildung 3-9 (links) sind einzelne Flammen praktisch nicht mehr auszumachen. Dies zeigt sich auch in den Emissionen. Während die NO_x Emissionen bei 6,4 ppm sehr niedrig sind (was aufgrund des niedrigen Pilotsplits auch zu erwarten war) liegen die CO Emissionen mit 172 ppm weit außerhalb der Grenzwerte. In den transienten Aufnahmen sind auch starke Fluktuationen zu erkennen, was für einen sehr instabilen Betriebspunkt spricht. Im rechten Punkt (Abbildung 3-11) wurde der Pilotsplit dagegen massiv erhöht. Dies hat zur Folge, dass die NO_x Emissionen auf 8,8 ppm ansteigen. Der positive Effekt zeigt sich bei den CO Emissionen, die gleichzeitig auf 37 ppm und damit unterhalb die Emissionsgrenze für Erdgasanwendungen fallen.



100 m% NG, λ_3 , S_{Pilot} 5%



100 m% NG, λ_3 , S_{Pilot} 18%

Abbildung 3-11 Einfluss der Pilotstufe bei Erdgas

Solch ein hoher Pilotsplit ist nicht unbedingt für die Anwendung geeignet. Für Erdgas würde man vielmehr die Luftzahl auf niedrigere Werte und damit generell fettere Bedingungen setzen. Der Versuch zeigt aber deutlich den Einfluss der Pilotstufe für die Verbrennung von Erdgas.

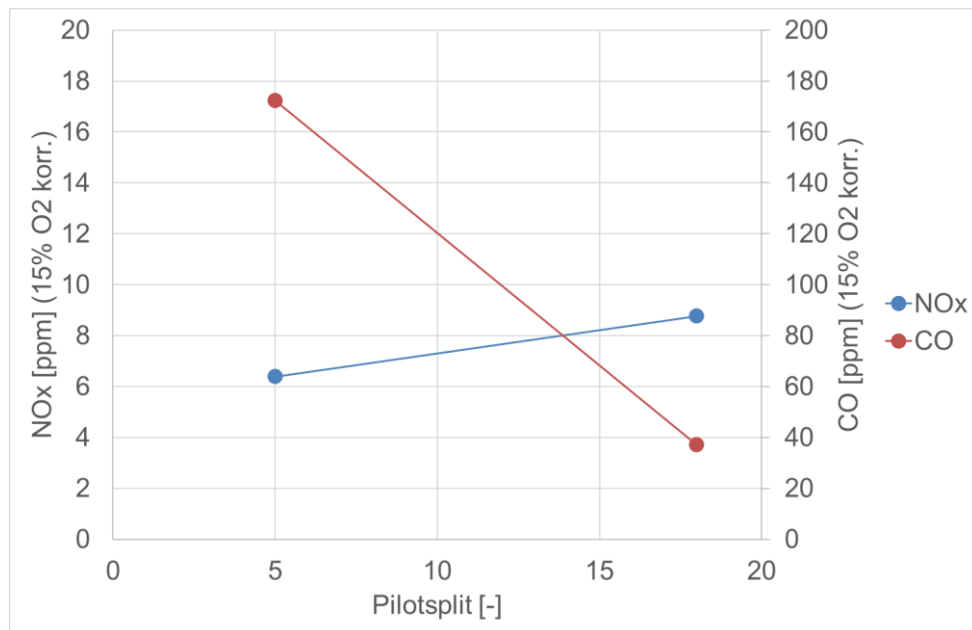
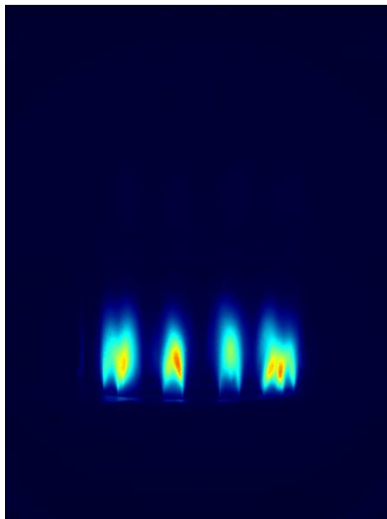


Abbildung 3-12 Einfluss der Pilotstufe auf die Emissionen bei Erdgas

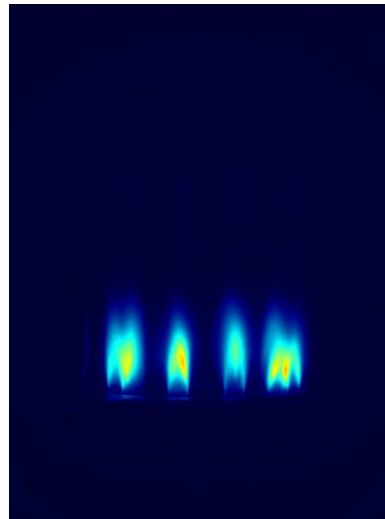
Im Gegensatz dazu hat die Pilotstufe tendenziell bei der Verbrennung von Wasserstoff einen geringeren Einfluss, was die folgenden Untersuchungen zeigen.

Für die Messreihe, aus der in Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 exemplarisch zwei Messpunkte gezeigt werden, wurde reiner Wasserstoff eingesetzt. Die Luftzahl wurde hier auf einen Wert von 4,5 eingestellt. Der Pilotsplit wurde, wie bereits bei Erdgas von 5% auf 18% variiert. In den OH* Chemolumineszenz Aufnahmen sind fast keine

Unterschiede zu erkennen. Der minimale Abfall in den Maxima ist dadurch zu erklären, dass bei der Erhöhung des Massenstroms über die Pilotstufe automatisch die Hauptstufe etwas abgemagert wird.



100 m% H₂, λ_{4,5}, S_{Pilot} 5%



100 m% H₂, λ_{4,5}, S_{Pilot} 18%

Abbildung 3-13 Einfluss der Pilotstufe bei Wasserstoff

Lediglich in den Emissionen ist ein Anstieg von 10,4 auf 13,6 ppm zu sehen. Da die Erhöhung des Pilotmassenstroms aber keinen positiven Einfluss auf die Stabilität der Hauptstufe hat, wird man den Luftsplit eher gering einstellen.

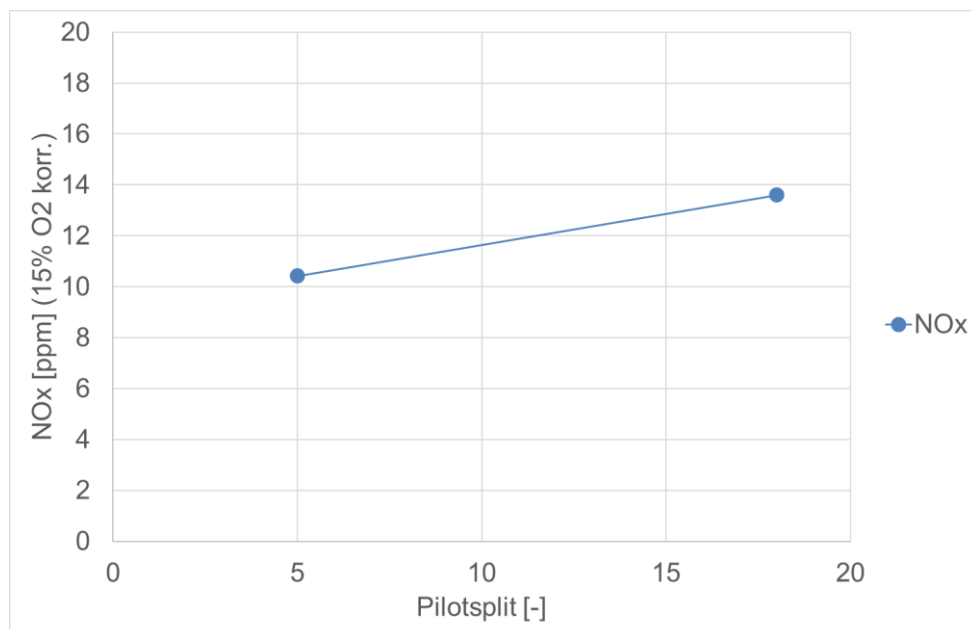


Abbildung 3-14 Einfluss der Pilotstufe auf die Emissionen bei Wasserstoff

Der Einfluss der Pilotstabilisierung für Wasserstoff war bei allen Varianten, wie erwartet, im untersuchten Bereich eher gering. Es zeigte sich, dass die Pilotierung bei der Wasserstoffverbrennung eine untergeordnete Rolle spielt und auf einem geringen Level gehalten werden kann. Theoretisch könnte der Pilotbrenner im stationären Betrieb

auch ausgeschaltet werden, was jedoch zu thermischen Spannungen im Brenner führen kann und daher verworfen wurde.

Die Versuche am atmosphärischen Prüfstand konnten wertvolle Ergebnisse für die optimalen Betriebsbereiche hinsichtlich der Luftzahl sowie die Einstellung des Pilotsplits liefern. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass mit allen Brennervarianten der Einsatz aller vordefinierten Brennstoffe möglich ist.

Schlussendlich konnte mit den atmosphärischen Versuchen eine erfolgsversprechende Optimierung für den Einsatz in der Demonstrationsanlage gefunden werden. Die veränderte Düsengeometrie der Version F400h3 zeigte im Vergleich die besten Werte hinsichtlich Emissionen, aber auch hinsichtlich Stabilität.

3.4 Ableitung des Brennkammersystems für die Mikrogasturbine

Wie in 3.1 beschrieben, wird grundsätzlich ein bestimmter Anteil der zur Verfügung stehenden Prozessluft an der eigentlichen Kernbrennkammer vorbeigeführt. Ein entscheidender Schritt zum Brennkammersystem der Maschine war daher, neben Aspekten der mechanischen Integration, Medienversorgung und Messtechnik, die Auslegung der Luftverteilung.

Die bewährte Methode zur Justierung ist hier die verhältnismäßig gut realisierbare Querschnittsanpassung der Mischluftbohrungen im hinteren Bereich des Flammrohrs stromab der eigentlichen Reaktionszone. Durch eine Veränderung der Bohrungsdurchmesser verschieben sich die Druckverluste relativ zwischen dem Hauptpfad zur Pilot- und Hauptstufe des Brenners und dem Mischluftpfad. Eine Vergrößerung bewirkt damit eine Verschiebung der Luftverteilung hin zur Mischluft und weg vom Brenner, was zu fetteren Bedingungen und niedrigeren Luftzahl-Werten führt. Entsprechend kann durch eine Reduktion der Durchmesser für die Mischluft mehr Luft dem eigentlichen Brenner zugeführt werden und die Bedingungen so zu magereren Verhältnissen verschoben werden. In der Praxis wird dies durch ein punktuell Aufschweißen von s.g. Mischluftblenden, welche auf die relativ große ausgeführten Standard-Bohrungen des Flammrohrs aufgebracht werden, realisiert. Die Auswahl erfolgte auf Basis der mittels CFD-Berechnungen vorhergesagten Luftverteilungen für unterschiedliche Bohrungsdurchmesser und der Emissions- und Stabilitätsergebnisse aus den Verbrennungsrechnungen sowie atmosphärischen Experimenten. Die optimale Abstimmung hinsichtlich sowohl guter NO_x als evtl. auch (im Falle von Mischungen oder Erdgas) CO-Emissionen war eine essentielle Herausforderung bei der finalen Auslegung der Maschinenbrennkammergeometrie.

4 Erprobung im MGT System

Für die Erprobung der im Projekt entwickelten Komponenten sowie die Umsetzung des Retrofit Konzepts wurde eine kommerziell erhältliche Mikrogasturbine der Firma Ansaldo Green Tech mit einer elektrischen Leistung von 100 kW vom Typ AE-T100 ausgewählt. Die Anlage bietet eine noch gut handhabbare Größe, mit direktem Zugang zum Brennkammersystem. Gleichzeitig bietet das Brennkammersystem aufgrund der Bauweise in Form einer sogenannten Topfbrennkammer die Möglichkeit der Skalierung auf größere Anlagen, wie beispielsweise die Aurelia A400. Bei Industriegasturbinen werden üblicherweise Ringbrennkammern eingesetzt, die wiederum aus einzelnen Topfbrennkammern zusammengesetzt sind. Somit wäre auch hier eine Skalierungsmöglichkeit gegeben. Für eine Erdgasanwendung konnte bereits erfolgreich eine Adaption von der AE-T100 auf eine 400 kW Mikrogasturbine der Firma Aurelia (A400) demonstriert werden.

4.1 Mikrogasturbine AE-T100

Bei der Mikrogasturbine AE-T100 handelt es sich um eine einstufige, rekuperierte Mikrogasturbine mit einer elektrischen Leistung von 100 kW und einem elektrischen Wirkungsgrad von 30%. Die Anlage kann mit einem Abgaswärmeübertrager ausgestattet werden, durch den zusätzlich eine thermische Leistung von bis zu 165 kW bereitgestellt werden kann, wodurch eine Gesamteffizienz von 80% erreicht wird. Für die Demonstrationsanlage wurde auf diesen Abgaswärmeübertrager allerdings verzichtet, da die Wärme auf dem Testgelände nicht genutzt werden kann. Die Abbildung 4-1 zeigt einen Schnitt durch die Hauptkomponenten im Strömungspfad. Die Komponenten sind in einem Gehäuse integriert (siehe Abbildung 4-2) und mit der Steuerung, der Leistungselektronik sowie den erforderlichen Nebenaggregaten verbunden.

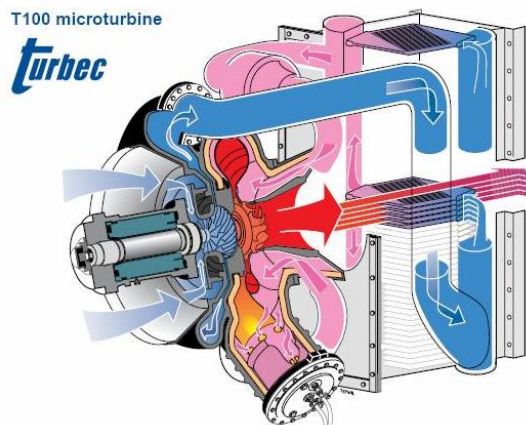


Abbildung 4-1 Schnitt durch die Hauptkomponenten der Mikrogasturbine³



Abbildung 4-2 Gesamtansicht AE-T100 im Gehäuse

³ Die Firma Turbec wurde von der Firma Ansaldo Green Tech übernommen und vertreibt die Turbec T100 nun unter dem Namen AE-T100

In Abbildung 4-3 ist der zugrunde liegende Kreislauf sowie der Prozess im T,s - Diagramm schematisch dargestellt. Umgebungsluft wird vom Verdichter (a) angesaugt und auf einen Druck von 4,5 bar komprimiert. Die Luft wird anschließend in einem Rekuperator (Luft/Luft Wärmeübertrager, b) durch die heißen Abgase weiter erwärmt und in die Brennkammer (c) geleitet. In der Brennkammer wird der Brennstoff zugeführt und mit der vorgewärmten Luft umgesetzt. Die heißen Abgase werden anschließend in der Turbine (d) auf nahezu Umgebungsdruck entspannt und über den Rekuperator abgekühlt. In der hier eingesetzten Variante wird dann das Abgas über den Kamin nach außen geleitet.

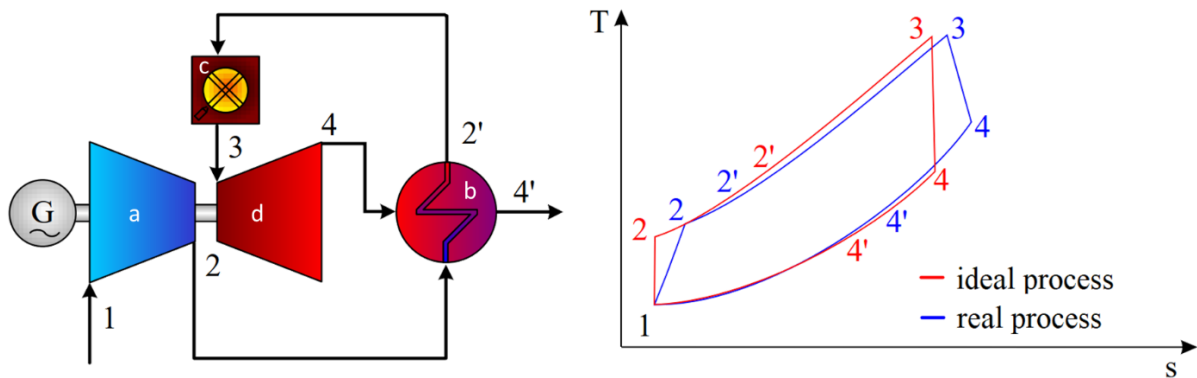


Abbildung 4-3 Gasturbinenkreislauf und Prozess im T,s - Diagramm

4.2 Aufbau und Anschluss der Mikrogasturbine auf dem Testfeld

Für das Projekt wurde eine Version der Mikrogasturbine gewählt, die für eine Außen- aufstellung ausgestattet ist. Dies beinhaltet einen Dachaufbau, in dem ein Grobfilter, der Lüfter und die Kamine für Spülluft und Abgas integriert sind. Die Aufstellung und der Anschluss der Anlage erfolgten im Rahmen des Projekts.

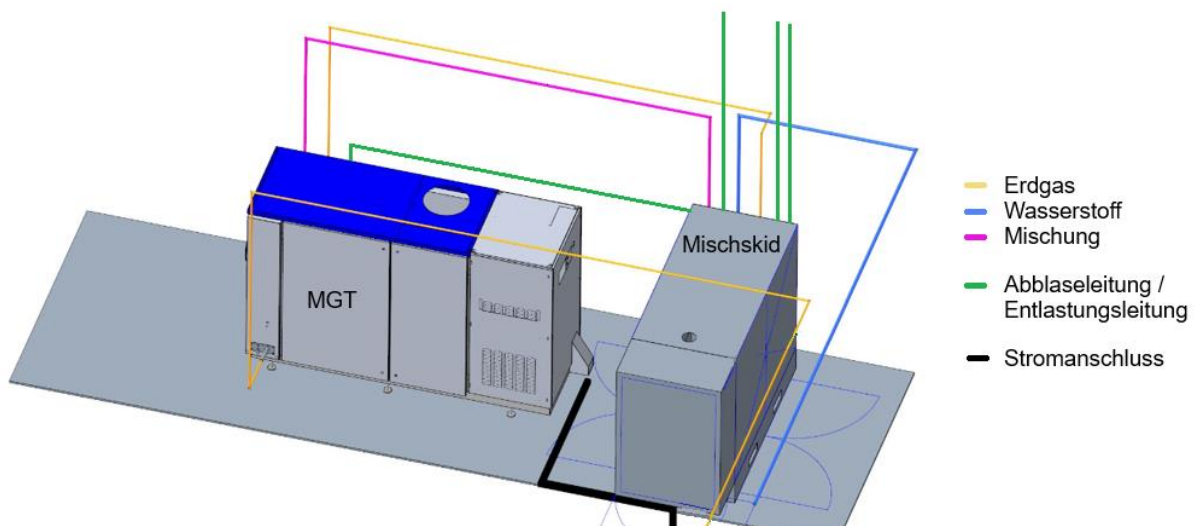


Abbildung 4-4 Schematische Anordnung von Turbine und Mischsystem

Die Anlage wurde an das Stromnetz des Standorts Lampoldshausen angeschlossen. Für den Start wird Strom aus dem Netz gezogen um die Welle zu beschleunigen und die Anlage zu zünden. Nach dem Hochfahren wird dann umgeschaltet und die produzierte elektrische Leistung in das Netz eingespeist. Des Weiteren musste ein

Rohrleitungssystem aufgebaut werden, um die Komponenten MGT mit dem Mischsystem und der Versorgung sowie Sicherheitseinrichtungen, wie Abblaseleitungen zu verbinden. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 4-4 gezeigt. Da im Projekt der Betrieb mit Wasserstoff aber auch mit Mischungen von Wasserstoff und Erdgas gezeigt werden sollte, wurde der in der MGT standardmäßig integrierte Erdgasverdichter beibehalten und an die Erdgasversorgung am Testfeld angeschlossen (in gelb dargestellt). Das verdichtete Erdgas wird dann vom MGT Erdgasverdichter direkt dem Mischsystem zugeführt (gelb dargestellt). Für die Wasserstoffversorgung (in blau dargestellt) wurde, aufgrund von Verzögerungen am Aufbau der Testinfrastruktur am Standort Lampoldshausen, eine Versorgung über Wasserstoffbündel aufgebaut. Hierbei konnten gleichzeitig zwei Bündel angeschlossen werden, wodurch ein nahtloser Betrieb beim Wechseln der Bündel sichergestellt wurde. Für das Abblasen von Brennstoff beim Stopp bzw. im Notfall und die Druckentlastung der Brennstoffleitungen von MGT und Mischsystem wurden Abblaseleitungen (grün dargestellt) mit Lambdaausbläsern in 5 m Höhe angebracht. Die Anlage sowie sämtliche Rohrleitungen wurden anschließend sorgfältig geerdet. Da, wie bereits beschrieben, auf den Abgaswärmtauscher verzichtet wurde, musste kein gesonderter Kühlkreislauf aufgebaut werden.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde zudem eine Messdatenerfassung aufgebaut. Kernstück der Datenerfassung ist ein mobiler Messdatenkoffer, mit integrierter SPS, der im DLR internen Projekt „KWK MGT“ ausgelegt und aufgebaut wurde (siehe Abbildung 4-5

Abbildung 4-5). Zukünftig soll der Koffer an Mikrogasturbinen im Feld in Langzeitversuchen Daten erfassen und speichern können. Das Projekt „Retrofit H₂“ bot hierfür einen ersten Anwendungsfall. Der Koffer musste jedoch für das Projekt noch um einige Funktionen und eine Benutzeroberfläche erweitert werden. In die Messdatenerfassung wurde zusätzlich die Anbindung an das Mischsystem und die Anbindung an die Gasanalytik integriert, sowie weitere Sensoren angeschlossen. Über die Benutzeroberfläche können die Betriebsdaten und Messdaten der einzelnen Komponenten über Graphen visualisiert und so überwacht werden. Des Weiteren kann darüber die Datenerfassung gesteuert werden.



Abbildung 4-5 Mobiler Messdatenkoffer (Innenansicht)

In Abbildung 4-6 sind zwei Zwischenschritte während der Aufbauphase dokumentiert. Für die Anlage wurde ein Fundament auf dem Testfeld gegossen. Daneben wurde ein Container aufgestellt, der als Leitwarte dient (linkes Bild). Im rechten Bild sind dann die Komponenten MGT und Mischsystem bei der Aufstellung zu sehen.



Abbildung 4-6 Zwischenschritte im Aufbau der Anlage

In Abbildung 4-7 ist schließlich eine Gesamtübersicht der fertigen Anlage dargestellt. Links ist das Mischsystem mit den Abblaseleitungen sowie dem Kamin der Gehäuselüftung zu sehen, mittig ist die Mikrogasturbine mit geöffneten Gehäusetüren sowie der Messdatenkoffer. Im Hintergrund ist der Bürocontainer zu sehen, in dem die Leitwarte eingerichtet wurde.



Abbildung 4-7 Gesamtübersicht der Anlage

Von der Leitwarte wurden Datenleitungen zu den Komponenten und dem Messkoffer gelegt, um so die Anlage auch von der Warte aus zu steuern bzw. aus der Warte den Betrieb zu überwachen. Die Gasanalytik ist ebenfalls im Container untergebracht. Die Proben werden kontinuierlich über eine Messsonde aus dem Abgas entnommen und über eine beheizte Probenleitung (im Bild in schwarz zu sehen) der Probenaufbereitung und schließlich der Gasanalyse zugeführt. Das Abgas wird wiederum aus dem

Container über einen Abgasschlauch nach außen befördert. Schlussendlich dient der Container auch zur Aufbewahrung von Ersatzteilen, Betriebsmitteln und Werkzeugen.

4.3 Anpassungen an der Mikrogasturbine

An der Mikrogasturbine mussten für den Einsatz von Wasserstoff und die Integration mit dem Mischsystem einige Veränderungen im Aufbau, der Sicherheit aber auch der Steuerung vorgenommen werden.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde, musste die Leitungsführung der Brennstoffleitungen angepasst werden. Da der originale in der MGT integrierte Erdgaskompressor beibehalten wurde, musste die ursprünglich vom Ausgang des Kompressors zur Brennkammer verlaufende Leitung entfernt und der Kompressor mit dem Mischsystem verbunden werden. Die Brennstoffzufuhr der Brennkammer wurde mit der Mischleitung vom Mischsystem verbunden. Für den Betrieb mit reinem Wasserstoff mussten auch die Brennstoffventile für Haupt- und Pilotbrenner auf Varianten angepasst werden, die für Wasserstoff zugelassen sind. Um den neu entwickelten Brenner zu integrieren, waren zudem Anpassungen in der Brennstoffverteilung notwendig, da der Hauptbrenner nicht mehr nur über einen zentralen Anschluss, sondern über vier gleichmäßig im Kreis angeordnete Leitungen gespeist wird. Des Weiteren braucht der neu entwickelte Brenner in der aktuellen Version eine längere Brennkammer. Daher wurde das Gehäuse mit einem Ring verlängert. Für die Detektion einer Brennstoffleckage ist in der Umhausung ein Gasdetektor angebracht, der jedoch nur für die Erkennung einer Erdgasleckage ausgelegt ist. Für die Detektion von Wasserstoff musste ein zusätzlicher Sensor nachgerüstet werden und mit der Sicherheitssteuerung verbunden werden. Für die Positionierung des Sensors wurden CFD-Simulationen durchgeführt um eine optimale Ausrichtung zu finden, bei der bereits kleine Leckagen zuverlässig detektiert werden können (siehe 2.4.6).

In Abbildung 4-8 sind schließlich die Änderungen rund um die Brennkammer, wie die geänderte Brennstoffzuführung, die neuen Ventile sowie die neuen Sicherheitseinrichtungen abgebildet.

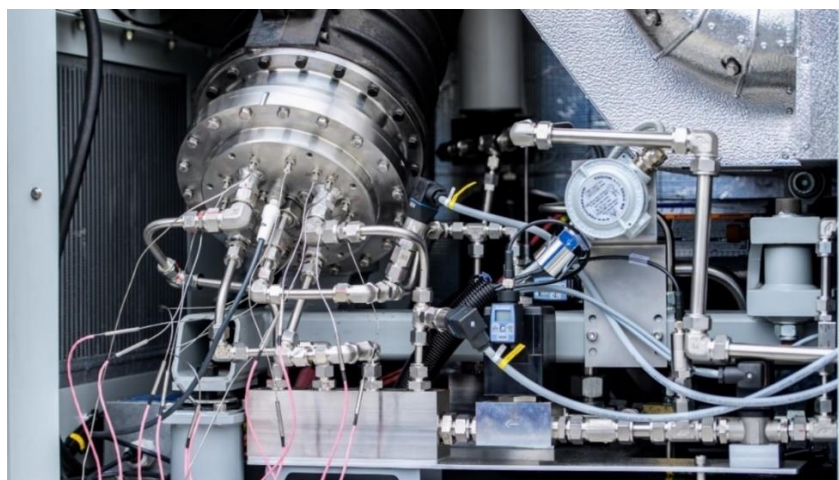


Abbildung 4-8 geänderte Brennstoffzuführung und Brenneraufbau

Für die Integration des Mischsystems in den Betrieb der Mikrogasturbine musste zwischen den beiden Komponenten eine Kommunikationsschnittstelle geschaffen werden, über die Signale und Werte ausgetauscht werden können. Für den Startvorgang muss zum einen eine Freigabe von der MGT an das Mischsystem erfolgen, dass der Brennstoff bereitgestellt wird und zum anderen eine Rückmeldung vom System, ob der Ventilttest erfolgreich durchgelaufen ist. In Notfallsituationen, wie beispielsweise Brennstoffleckagen, müssen beide Komponenten den Betrieb kontrolliert beenden. Aber auch im Betrieb wird vom Mischsystem eine Meldung über den aktuellen Heizwert der bereitgestellten Brennstoffmischung an die Turbine übertragen, durch die dann Korrekturen an den Einstellungen für den Brennstoffmassenstrom vorgenommen werden. Bei dieser Kommunikation musste ein besonderes Augenmerk auf die Abfolge und Geschwindigkeit der Übertragung gelegt werden.

Im Betrieb wird der Pilotbrenner über eine sogenannte Pilotmappe gesteuert, die in Abhängigkeit von der Turbinenaustrittstemperatur, dem Vordruck und der Ventilcharakteristik den Pilotventil-Sollwert vorgibt. Diese Mappe muss spezifisch auf den eingesetzten Brenner angepasst werden um zum einen eine ausreichende Stabilisierung in allen Betriebspunkten bzw. Transienten zu gewährleisten aber auch andererseits die maximalen Temperaturen im Brenner nicht zu überschreiten und die Emissionen (vor allem von Stickoxiden) nicht unnötig in die Höhe zu treiben. Die optimalen Einstellungen mussten im Zuge der experimentellen Untersuchungen gefunden werden.

4.4 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage waren Prüfungen durch eine zugelassene Überwachungsstelle notwendig. Die Prüfungen setzten sich zusammen aus einer Prüfung zum Explosionsschutz, die im vorliegenden Fall von der Dekra durchgeführt wurde und der Prüfung vor Inbetriebnahme, die durch den TÜV durchgeführt wurde. Bei der Abnahme zum Explosionsschutz wurden die technische Dokumentation, die Erdung/der Potentialausgleich, der Isolationswiderstand, die Ableitfähigkeit, der Fehlerstromschutzschalter, der Motorschutz sowie die elektrischen Betriebsmittel vermessen bzw. überprüft. Im Rahmen der Prüfung vor Inbetriebnahme wurde die weitere Dokumentation der Anlage, die Nachweise zu den zusätzlichen Komponenten und die Abschaltmatrix überprüft. Die Sicherheitseinrichtungen, wie Not-Aus bzw. Nothaltschalter sowie Gaswarnsensoren wurden getestet.

Für die Erst-Inbetriebnahme der Gasturbinenanlage am Standort Lampoldshausen konnte bereits die Brennkammervariante F400h1 eingebaut und anschließend vermessen werden. Die erste Zündung wurde erfolgreich mit reinem Erdgas durchgeführt. Nachdem der Fokus aber auf der Wasserstoffverbrennung mit Zumischung von Erdgas lag, wurde entschieden, die weiteren Einstellungen im Wasserstoffbetrieb durchzuführen. Für die Umstellung auf reinen Wasserstoff waren noch diverse Einstell- und Abstimmungsarbeiten an der Gasturbine und dem Mischsystem notwendig. Hierbei lag ein Schwerpunkt auf der Abstimmung der Kommunikation der beiden Komponenten, vor allem hinsichtlich dem korrekten Ablaufplan und den einzuhaltenden Zeitslots. An der Brennstoffsteuerung der Mikrogasturbine mussten ebenfalls Einstellungen

verändert werden. Schlussendlich konnte das wichtige Zwischenziel der Erstinbetriebnahme mit reinem Wasserstoff als Brennstoff erfolgreich erreicht werden.

4.5 Experimentelle Ergebnisse

Im Folgenden wird eine Auswahl an experimentellen Ergebnissen gezeigt, die den Fortschritt und die erreichten Resultate veranschaulichen soll (Hohloch, et al., 2025).

4.5.1 *Transiente Charakterisierung*

Im Fokus der Transienten Charakterisierung standen die Manöver der Mikrogasturbine, die direkt von einer Umrüstung auf eine neue Brennstoffzuführung und auf ein neues Brennkammersystem beeinflusst werden. Dies betrifft in erster Linie das Verhalten der Anlage bei den Startvorgängen. Die Anlage unterscheidet hier zwischen Kalt- und Warmstarts, die sich in der zeitlichen Abfolge der einzelnen Phasen unterscheiden. Die Laständerungen hängen eng mit dem Betrieb der Anlage in den stationären Punkten von minimaler Teillast bis hin zu Volllast zusammen. Ist der stationäre Bereich eingestellt, so sind an den Manövern der Laständerung keine zusätzlichen Änderungen mehr durchzuführen. Das Herunterfahren der Anlage wird hingegen durch den Retrofit gar nicht beeinflusst, da hierzu der Brennstoff durch das Hauptventil abgeschaltet wird und die Anlage danach kontrolliert die Drehzahl bis zum Stand reduziert. Daher soll im Folgenden vor allem auf den Start der Anlage eingegangen werden.

Wie bereits erwähnt unterscheidet die Anlagensteuerung beim Start zwischen einem Kaltstart und einem Warmstart. Der Warmstart ist dabei abhängig von der Vor- bzw. Durchheizung der Anlage. Prinzipiell bestehen beide Sequenzen aus den gleichen Einzelsequenzen, die sich nur in der Länge und den dabei angewendeten Gradienten für Drehzahl und Temperatur unterscheiden. In Abbildung 4-9 ist ein Kaltstart mit der Brennervariante F400h1 dargestellt. Dabei sind die Größen Drehzahl, elektrische Leistung, Turbinenausstrittstemperatur, Materialtemperatur im Pilotdom sowie die Ventil-Sollwerte zu Pilot- und Hauptbrenner über der Zeit aufgetragen. Die MGT startet, indem der Generator als Motor eingesetzt wird und die Welle auf die Zünddrehzahl von 28% beschleunigt. Hierzu wird Strom aus dem Netz benötigt, was im Diagramm an der negativen elektrischen Leistung zu sehen ist. Die Anlage wird dann für einige Zeit mit dem Luftstrom gespült um Restbrennstoff aus vorangegangenen Betriebsläufen zu entfernen. In dieser Zeit wird ein Ventilcheck für Pilot- und Hauptventil durchgeführt. Am Mischsystem wird ein Dichtigkeitstest über die Ventile durchgeführt. Nach der Freigabe wird die MGT über einen Bypass am Pilotbrenner gezündet. Die Drehzahl wird auf 35% erhöht und das Pilotventil geöffnet. Ab 35% wird der Ramp-up eingeleitet und gleichzeitig das Hauptbrennstoffventil geöffnet, in dem die MGT sehr schnell auf eine Drehzahl von 75% beschleunigt um möglichst schnell den Bereich der Eigenschwingungen zu passieren. Die Drehzahl wird nun im Kaltstart langsam bis auf 85% erhöht. In diesem Punkt verharrt die MGT einige Zeit, bis der Rekuperator aufgewärmt ist. Anschließend wird der angeforderte Lastpunkt von 100 kW bei einer Drehzahl von 100% angefahren. Die Pilotleistung wird abhängig von der TOT angepasst und hin zu höheren Temperaturen abgesenkt.

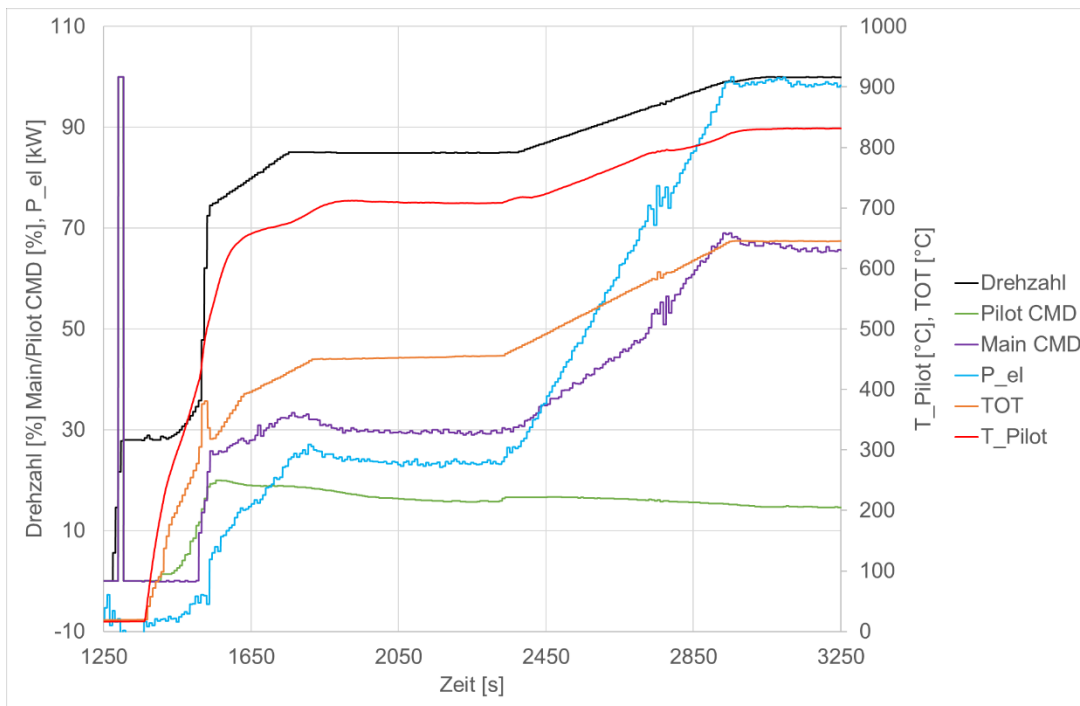


Abbildung 4-9 F400h1: Kaltstart auf 100 kW

Die Einstellungen im Startmanöver wurden so angepasst, dass die Temperaturen im Pilotbrenner nicht die kritischen Werte übersteigen, aber dennoch eine ausreichende Stabilisierung über den Piloten beim Start gegeben ist und der Start in der Anfangsphase reibungslos über den Piloten allein erfolgen kann. Weitere Anpassungen wurden gemacht, um die Phase der Durchwärmung anzupassen.

In Abbildung 4-10 ist ein Warmstart ebenfalls für den Brenner F400h1 dargestellt. Die Turbinenausstrittstemperatur beträgt hier bereits vor Beginn des Starts 418°C. Der Beginn des Startvorgangs läuft prinzipiell ab wie der Kaltstart. Ab 75% Drehzahl wird im Falle des Warmstarts jedoch die angeforderte Leistung direkt angefahren, da in diesem Falle keine Aufheizung des Rekuperators mehr notwendig ist. Beim Kaltstart müssen die Temperaturen am Brennerkopf für die Einstellungen besonders genau betrachtet werden, da hier bereits zu Beginn ein höheres Temperaturniveau herrscht. Die für den Kaltstart festgelegte Einstellung konnte auch für den Warmstart nachgeprüft und verifiziert werden.

Die Manöver konnten nach den Anpassungen für die weiteren Versuche eingesetzt werden. Auch mit dem F400h3 Brenner musste keine weitere Anpassung mehr erfolgen. Generell muss die Aufheizphase des Rekuperators nochmals genauer betrachtet werden, um diese zu optimieren und effizienter zu gestalten.

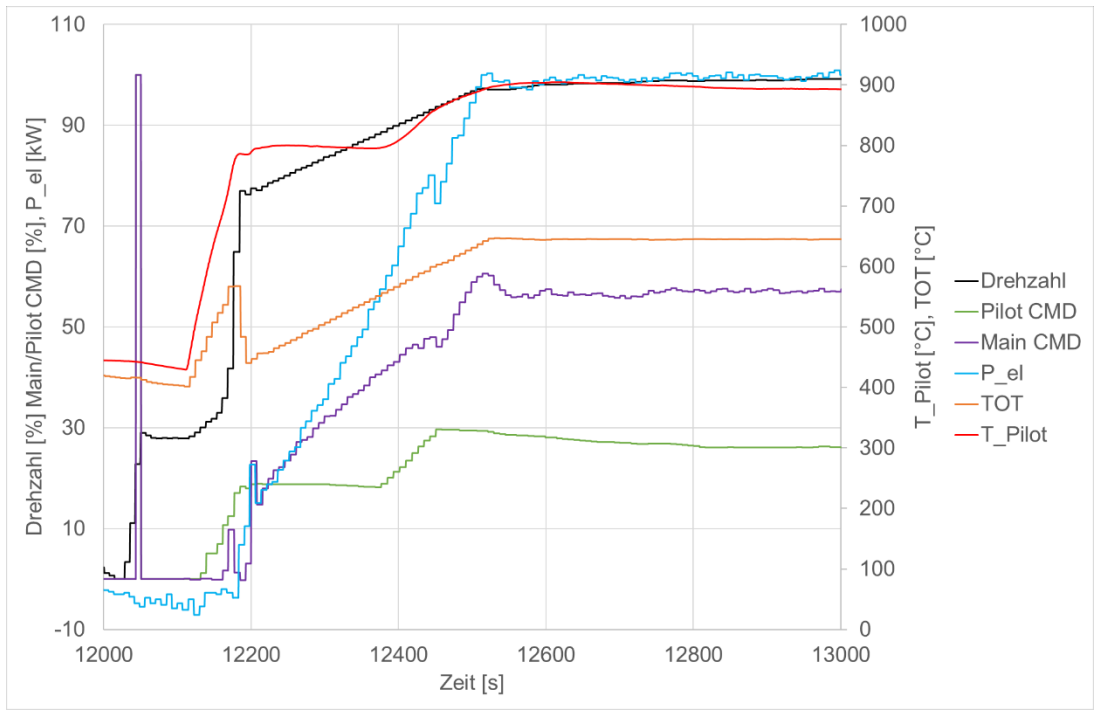


Abbildung 4-10 F400h1: Warmstart auf 100 kW

Um den Einfluss der Pilotmappe auf den stationären Betrieb der Anlage zu untersuchen, wurde für jeden Brenner eine Testreihe durchgeführt, in der die Piloteinstellung variiert wurde. In Abbildung 4-11 ist dazu ein Beispiel beim F400h1 Brenner mit reinem Wasserstoff aufgetragen.

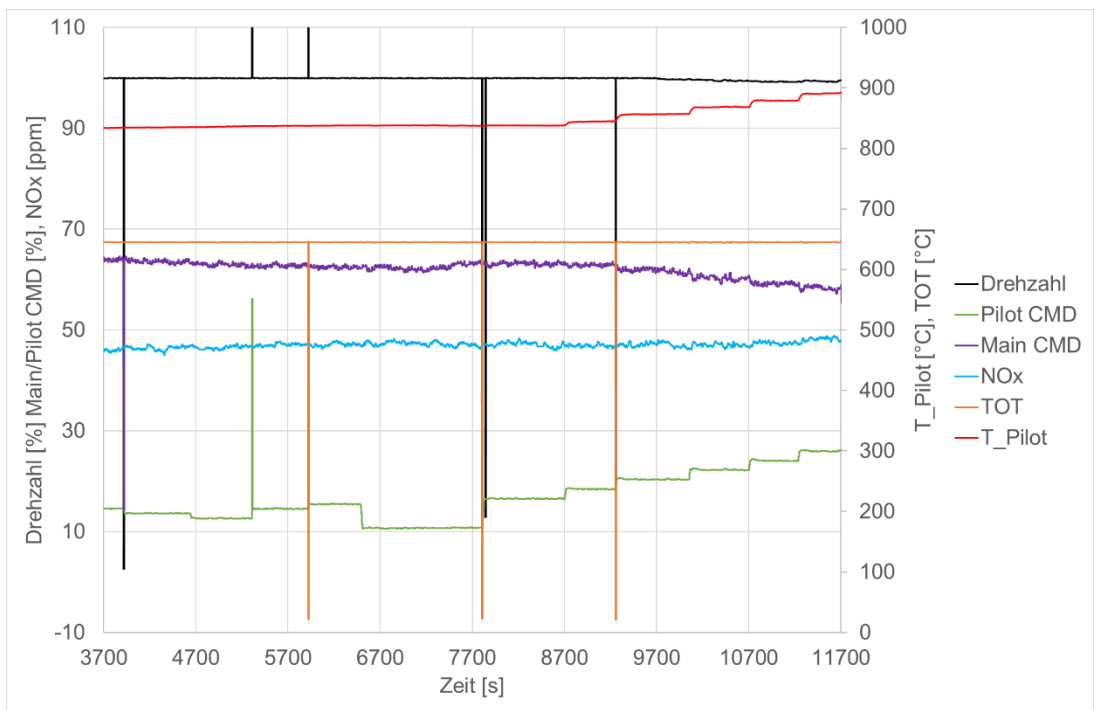


Abbildung 4-11 F400h1: Variation der Pilotmappe bei Vollast

Während des Testlaufs wurde die Einstellung der Pilotmappe variiert. Da man hierzu in die Steuerung eingreifen muss, gab es teilweise kurze Unterbrechungen in der Datenübertragung zur Messdatenerfassung. In diesem Diagramm ist anstatt der

elektrischen Leistung der Emissionswert für NO_x korrigiert auf 15% Restsauerstoffgehalt aufgetragen. Die Versuche konnten zeigen, dass für Wasserstoff ein sehr geringer Einfluss des Piloten auf die Emissionen vorliegt. Die Temperatur am Pilotdom steigt ab einer gewissen Pilotleistung an, was sich jedoch nicht in den Emissionswerten niederschlägt. Erst bei einer Erhöhung auf 30% (nicht mehr im Diagramm dargestellt) war ein kleiner Anstieg um 2 ppm in den Emissionen ersichtlich. Auch die atmosphärischen Versuche zeigten, dass im Wasserstoffbetrieb die Stabilisierung durch den Piloten nur in geringem Maße benötigt wird. Der Einfluss auf die Emissionen war jedoch höher als im Druckbetrieb. Damit kann die Einstellung des Piloten auf die Zumischung von bestimmten Anteilen von Erdgas optimiert werden, im besten Falle ohne Einfluss auf die Emissionen im Wasserstoffbetrieb.

4.5.2 Charakterisierung in stationären Punkten

Zunächst wurde die F400h1 Variante für die erste Testreihe vermessen. Aufgrund des konservativen Designs der Brennstoffdüsen zeigten die Emissionen keine Bestwerte, eine sichere Wasserstoffverbrennung wurde jedoch erfolgreich demonstriert. Nach weiteren Optimierungs- und Einstellarbeiten an der Gasturbinen- und Mischsystemsteuerung konnte schrittweise zu einem Mischbetrieb unter steigenden Beimischanteilen von Erdgas zum Wasserstoff übergegangen werden.

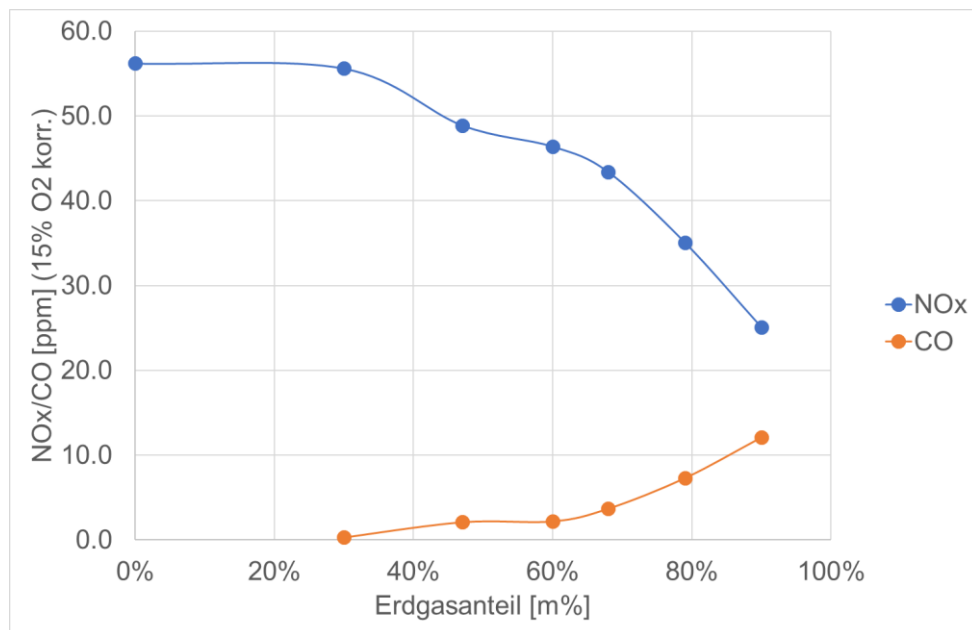


Abbildung 4-12 NO_x und CO-Verhalten des h1-Brenners bei Erdgaszumischung

Hierbei zeigte sich der erwartete Rückgang der NO_x -Emissionen aufgrund der Absenkung des Heizwertes und Reaktivität sowie eine langsame Steigerung der CO-Emissionen mit Erhöhung des Kohlenwasserstoffanteils (siehe Abbildung 4-12). Der Betriebsbereich hinsichtlich der Erdgasbeimischung ließ sich bis 90m% Erdgasbeimischung testen. Das gute Brennerverhalten und die Erwartungswerte aus Extrapolation der Emissionskurven lassen mit hoher Wahrscheinlichkeit einen möglichen Betrieb mit 100% Erdgas erwarten. Dies konnte leider aufgrund von Einschränkungen am

Mischsystem nicht validiert werden. Grundsätzlich ist aber erkennbar, dass das Emissionsniveau bei Verbrennung von 100% Wasserstoff noch zu hoch ist. Das Entwicklungsziel war, in die Größenordnung von 10-15 ppm korrigierter NO_x-Emissionen zu gelangen.

Nach abgeschlossener Fertigung der auf Basis der Ergebnisse der atmosphärischen Untersuchungen optimierten Brennerversion F400h3, wurde diese in die Gasturbinenanlage eingebaut und erstmalig unter Betriebsbedingungen getestet. Es traten hierbei keinerlei grundsätzliche Probleme beim Start oder dem generellen Betrieb auf. Im Gegensatz zur Version h1 zeigten sich jedoch bisher am Prüfstand nicht feststellbare bimodale Betriebszustände, welche nicht eindeutig reproduzierbar waren. Es konnte beobachtet werden, dass abhängig von der Anfahrtrichtung des Lastpunktes unterschiedliche Emissionsniveaus auftraten. Dieses Verhalten wurde auf unterschiedliche Stabilisierungsmodi der einzelnen Hauptstufendüsen zurückgeführt. Je nach vorangehenden Betriebsbedingungen scheinen sich eine Teilmenge der einzelnen Hauptstufenflammen abgehoben oder am Brennerkopf geankert zu stabilisieren, was zu nicht vorhersehbarem Emissionsverhalten führt.

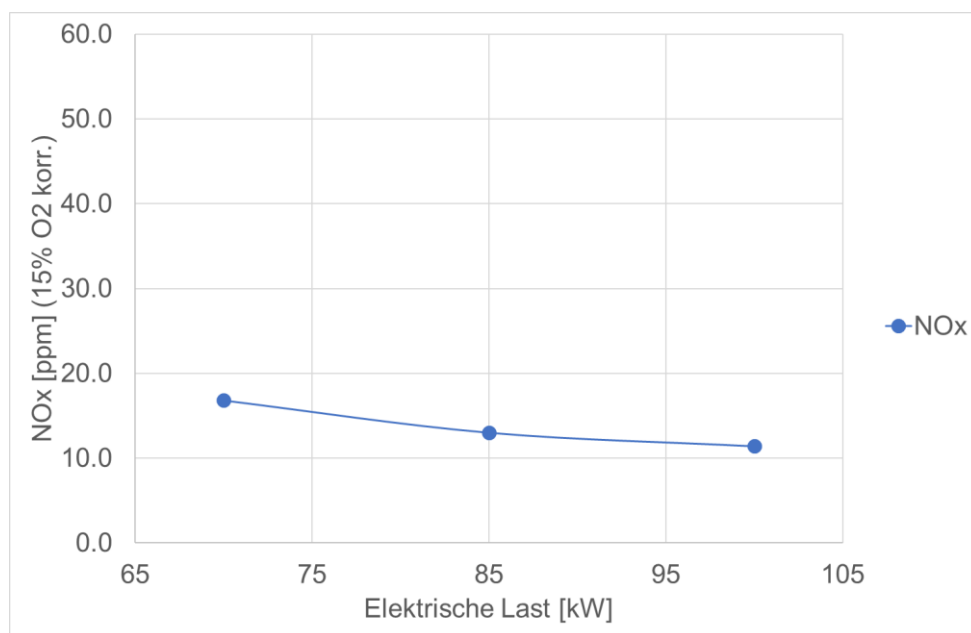


Abbildung 4-13 NO_x-Verhalten des h3-Brenners über den Lastbetriebsbereich bei 100% H₂-Verbrennung

Um diesem Verhalten entgegenzuwirken und auch zur Optimierung des generellen NO_x-Emissionsniveaus, wurde nach Ausbau der Brennkammer die Mischluftblende durch eine Variante mit kleineren Bohrungen ersetzt. Dies sorgt für eine magerere Abstimmung des Brenners und mit dieser auch für höhere Austrittsgeschwindigkeiten, welche typischerweise das Abheben der Flamme stabilisieren. Der gewünschte Effekt war zwar erkennbar, jedoch nicht ausreichend, um das bimodale Verhalten vollständig zu vermeiden. Das Optimum der erzielten Emissionswerte ist in Abbildung 4-13 visualisiert.

Das erzielte Emissionsniveau ist für die typischerweise eher NO_x-lastige Wasserstoffverbrennung als sehr gut zu bewerten. Zur Erreichung einer sicheren Reproduzierbarkeit muss das Düsendesign jedoch nochmals überarbeitet werden.

5 Zusammenfassung

Im Projekt Retrofit H₂ konnte erstmals erfolgreich ein Retrofitprozess an einer kommerziell erhältlichen Mikrogasturbine vollständig durchgeführt und der Betrieb mit reinem Wasserstoff sowie die Beimischung von Erdgas demonstriert werden.

Dazu wurde seitens der Firma PSC eine Analyse über Bestandsgasturbinenanlagen durchgeführt und ein Konzept für die Aufrüstung auf den Wasserstoffbetrieb bzw. der Beimischung von Erdgas erstellt. Die notwendigen Änderungen am Sicherheitskonzept, sowie die behördlichen Auflagen wurden geprüft und für die Demonstrationsanlage umgesetzt. Für den Mischbetrieb von Wasserstoff und Erdgas wurde ein Mischsystem entwickelt und aufgebaut. Dieses ermöglicht dem Nutzer Mischungen von reinem Wasserstoff bis hin zu Erdgas vorzugeben. Die Kommunikation mit der Mikrogasturbine übernimmt das Mischsystem.

Das DLR Institut für Verbrennungstechnik hat ein bestehendes Brennerkonzept auf Basis der jetstabilisierten Verbrennung weiterentwickelt und auf den Wasserstoffbetrieb hin optimiert. Dazu wurden zunächst CFD-Untersuchungen durchgeführt und einige Varianten im Anschluss in einem atmosphärischen Prüfstand hinsichtlich Verbrennungsstabilität und Emissionen untersucht. Aus den Untersuchungen wurden zwei Prototypen für die Demonstrationsanlage abgeleitet.

Die Mikrogasturbinenanlage und das Mischsystem wurden im Rahmen des Projekts am DLR Standort Lampoldshausen im dortigen Wasserstofftechnikum aufgebaut. Die erforderlichen Rohrleitungen wurden verlegt, die elektrischen Anschlüsse hergestellt. Die Anpassungen der Mikrogasturbine an den Wasserstoffbetrieb wurden durchgeführt. Die Sicherheitsüberwachung wurde aufgerüstet. Das entwickelte Brennkammersystem inklusive neuer Brennstoffzuführung wurde eingebaut. Die Überwachung und Aufnahme der Emissionen wurden mit einer kontinuierlich laufenden Gasanalyse sichergestellt. Die Messdaten aller Anlagen werden mit einer mobilen Messdatenerfassung, die im Rahmen eines DLR internen Projekts entwickelt und für das Projekt speziell angepasst und erweitert wurde, erfasst. Für die Inbetriebnahme wurde eine Explosionsschutzprüfung sowie eine Prüfung vor Inbetriebnahme durchgeführt. Somit besitzt die Anlage alle erforderlichen Überprüfungen.

Die Anlage konnte erfolgreich mit dem Prototyp F400h1 in Betrieb genommen werden und die erforderlichen Einstellungen für einen reibungslosen Betrieb der Anlage vorgenommen werden. Der Prototyp wurde anschließend mit reinem Wasserstoff und Mischungen bis hin zu 90m% Erdgas untersucht. Danach wurde der zweite Prototyp F400h3 integriert und ebenfalls mit reinem Wasserstoff und Beimischung von Erdgas untersucht. Mit dem hier weiterentwickelten Brennerkonzept konnten die Emissionswerte für die Wasserstoffverbrennung deutlich reduziert werden. Es konnte gezeigt werden, dass auch mit Wasserstoff die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für Erdgas möglich ist. Auch im Mischbetrieb zeigt der Brenner sehr niedrige Emissionen bei gleichzeitig hoher Brennstoffflexibilität.

6 Verwertung

Mit der Durchführung dieses Projektes wurde der gesamte Ablauf eines H₂-Retrofits anhand einer Demonstrationsanlage durchgespielt. Somit sind nun alle Schritte bekannt, welche bei der Umrüstung einer Anlage beachtet werden müssen. Dadurch kann die Firma PSC das im Projekt entwickelte Konzept für ein Retrofit an Bestands-gasturbinen nun als herstellerunabhängiges Unternehmen kommerzialisieren und am Markt anbieten.

Des Weiteren bietet sich für die Firma PSC aber auch die Möglichkeit, einzelne Dienstleistungen und Komponenten aus dem Projekt anzubieten. Als Beratungsunternehmen gehört dazu auch die Begleitung von Kraftwerksbetreibern beim Umrüsten ihrer Bestandsanlagen bzw. beim Herstellen der „H₂-Readiness“. Hierbei können durch PSC verschiedenste Rollen innerhalb dieser Projekte angenommen werden. Angefangen bei der Erstellung von Ausschreibungen und Spezifikationen über Projektplanung und -management, Risikobeurteilungen, Engineering-Dienstleistungen bis zur Qualitätssicherung und Koordination von Behörden und Zertifizierungsstellen. Durch die Erkenntnisse aus dem vorliegenden Projekt konnten umfangreiche Erfahrungen gesammelt werden, welche durch die beteiligten Mitarbeiter in die Organisation getragen werden.

Auf der Herstellerseite bietet es sich an das Brennstoffmischsystem generell auch für die Mischung anderer Gase zu erweitern und zu vertreiben. Der Anwendungsbereich liegt bei der Verwertung von Abfallgasen aus industriellen Prozessen (z.B. Synthesegas, Biogas, Kuppelgase, etc.). Denkbar ist dabei einerseits, das System zur Konditionierung des Brenngases auf einen gewünschten Heizwert bzw. Wobbe Index zu nutzen, um die anfallenden Gase überhaupt in einem gegebenen Brennkammersystem verbrennen zu können. Andererseits kann das Mischsystem genutzt werden, um auf schwankende Lagerbestände oder Einkaufspreise für verschiedene Gase reagieren zu können. Auch in einem Gesamtsystem aus regenerativer Stromerzeugung, Elektrolyse, Wasserstoffspeicherung und -verbrennung kann durch ein Brennstoffmischsystem auf schwankende Wasserstoffproduktion reagiert werden, wenn der nachgeschaltete Prozess einen kontinuierlichen Betrieb der Gasturbine erfordert.

Die Brennkammer wiederum kann auch für den reinen Wasserstoffbetrieb eingesetzt und ohne Mischsystem vertrieben werden. Auch die Umrüstung der Mikrogasturbine auf den reinen Wasserstoffbetrieb ist ein mögliches Geschäftsfeld. PSC konnte hierzu bereits erfolgreich eine auf Wasserstoff umgerüstete MGT mit DLR Brennkammersystem an die Technische Hochschule Ulm ausliefern. Auch die Herstellerfirma der Mikrogasturbine, die Firma Ansaldo Green Tech zeigt Interesse am Wasserstoffumbau. Weitere Gespräche hierzu folgen.

Das DLR Institut für Verbrennungstechnik konnte aus dem Projekt wertvolle Erkenntnisse für die Brennerentwicklung gewinnen und wird diese für die zukünftige Forschung weiter einsetzen. Am Brennkammersystem wurden noch Optimierungspotentiale erkannt, die in Zukunft umgesetzt werden sollen (siehe auch Ausblick). Das

Projekt hat gezeigt, dass mit dem jetstabilisierten Brennkammerkonzept gerade für die Wasserstoffverbrennung einzigartige Emissionen erreicht werden können. Dies soll nun weiter genutzt und entwickelt werden. Das Brennerkonzept kann auch auf größere Anlagen, wie beispielsweise die Aurelia A400 angewendet werden. In einem Projekt u.a. mit Aurelia wird diese Skalierung nun durchgeführt und die Erkenntnisse aus Retrofit H₂ angewendet. Aber auch für den Bereich der Industriegasturbinen bietet das Brennkammerkonzept eine Anwendungsmöglichkeit. Die Ergebnisse können genutzt werden, um auch hier weitere Interessenten zu finden. Als Partner für die Kommerzialisierung des Brennkammersystems und den Vertrieb ist die Firma PSC mit dem DLR eine Lizenzvereinbarung eingegangen. Diese Zusammenarbeit sichert die Übertragung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Anwendung.

7 Ausblick

Für die Adaption des Retrofit Konzepts an andere Gasturbinenanlagen sind jeweils auf den spezifischen Aufbau angepasste Änderungen durchzuführen. Generell kann das Konzept aber nun so für die Kommerzialisierung durch PSC vorbereitet werden.

Auf Seiten des Brennstoffmischsystems konnten bereits konstruktive und verfahrenstechnische Kostenreduktionspotentiale identifiziert werden, welche in zukünftigen Auslieferungen berücksichtigt werden sollen. Aktuell erfolgt die Bedienung des Brennstoffmischsystems durch eine manuelle Bedieneingabe des gewünschten Konzentrationswertes. Für eine bessere Einbindung in autarke Prozesse ist die automatische Ermittlung des idealen Konzentrationsbereiches, beispielsweise auf Basis von vorhandenen oder prognostizierten Lagerbeständen, Marktpreisen oder veränderlichen Grundgaszusammensetzungen ein wichtiger Schritt. Sofern die Resonanz des Marktes verspricht, dass diese Eigenschaften für ein erfolgreiches Produkt gewünscht werden, erfolgen weitere Entwicklungstätigkeiten in diese Richtung.

Die Untersuchung der Brennervariante F400h3 zeigte ein nicht immer reproduzierbares Verhalten, was zu unterschiedlichen Emissionsniveaus führte. Daher werden hierzu aktuell weitere Untersuchungen durchgeführt, um das Phänomen zu verstehen und einen stabilen Betriebsbereich zu erreichen. Erste Ideen wurden bereits mittels CFD-Berechnung charakterisiert und sollen noch in der Anlage untersucht werden.

Die im Projekt erreichten Ergebnisse für den Brenner zeigen auch für die Verbrennung von Erdgas ein großes Potential, bisherige Emissionswerte weiter zu reduzieren. Daher wird das Institut für Verbrennungstechnik die Forschung dahingehend weiterverfolgen. Das im Projekt erarbeitete neue Düsenkonzept, welches bereits eine signifikante Senkung des Emissionsniveaus ermöglicht hat, wird weiter optimiert werden und in Zukunft die Basis für weitere Brennkammerentwicklungen am Institut darstellen. Dies wird in Zusammenarbeit mit der Firma PSC erfolgen, die ein großes Interesse daran hat, den Brenner für verschiedene Anwendungen zu vermarkten.

Ein weiteres Potential liegt noch in der Reduzierung der Produktionskosten. Dies stellt ein weiteres Themengebiet für die Zusammenarbeit von PSC und DLR-VT dar.

Das im DLR internen Projekt KWK MGT entwickelte Messdatenerfassungssystem konnte im Projekt erfolgreich eingesetzt werden und konnte damit auch weiterentwickelt werden. Optimierungspotentiale wurden festgestellt und werden zukünftig umgesetzt. Das Datenerfassungssystem soll zukünftig in Feldanlagen eingesetzt werden, um eine Langzeitüberwachung durchzuführen und damit das Thema Lebensdauer bearbeiten zu können.

Literaturverzeichnis

- Ansaldo Green Tech.* (2024). Von <https://www.ansaldoenergia.com/offering/equipment/turbomachinery/microturbines/ae-t-100> abgerufen
- Bower, E., H. Grimm, F., Schwärzle, A., Roth, J., Zornek, T., & Kutne, P. (2018). Experimental Analysis of the Fuel Flexibility of a Jet-Stabilized Micro Gas Turbine Combustor Designed for Low Calorific Gases. *Proceedings of GPPS 2018-0012*.
- EUTurbines. (2019). *Power the EU - The Gas Turbines Industry Commitments to Drive the Transition to Renewable Gas Power Generation*. Von <https://www.euturbines.eu/power-the-eu/gas-turbines-renewable-gas-ready/commitments/> abgerufen
- Hohloch, M., Lingstädt, T., & Kutne, P. (2023). Experimental Analysis of the Hydrogen Capability of a Fuel Flexible Jet Stabilized Syngas Micro Gas Turbine Combustor Under Atmospheric Conditions. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 86960*.
- Hohloch, M., Lingstädt, T., & Kutne, P. (2023). Experimental Analysis of the Hydrogen Capability of a Fuel Flexible Jet Stabilized Syngas Micro Gas Turbine Combustor Under Atmospheric Conditions. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 86960*.
- Hohloch, M., Lingstädt, T., Kutne, P., Wächter, M., Körner, P., & Cheung, T.-Y. (2025). GT2025-153827 Retrofit of a 100kW Micro Gas Turbine for the Use of Hydrogen and Mixtures of Hydrogen and Natural Gas. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2025*.
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. Von <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> abgerufen
- IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives*. Von <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020> abgerufen
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 19372 - Microturbines - Safety.
- International Organization for Standardization. (2022). ISO 21789 - Gasturbinenanwendungen - Sicherheit.
- Lammel, O., Schütz, H., Schmitz, G., Lückerath, R., Stöhr, M., Noll, B., . . . Krebs, W. (2010). FLOX® Combustion at High Power Density and High Flame Temperatures. *J. Eng. Gas Turbines Power Vol. 132 No. 12*, S. 1-10.

Anhang

Veröffentlichungen und weiterführende Links

Das Projekt Retrofit H₂ wurde sowohl dem Fachpublikum als auch der breiten Öffentlichkeit in einer Vielzahl an verschiedenen Medien vorgestellt sowie der Fortschritt im Projekt und die Ergebnisse geteilt.

- Teilnahme an der Messe fcell 2023 in Stuttgart
- Vortrag auf dem Wasserstoffkolloquium 2023 in Fellbach
- Poster auf dem Wasserstoffkolloquium 2024 in Baden-Baden
- Vortrag auf dem Länderdialog Wasserstoff Baden-Württemberg Bayern 2023 in Ulm und Teilnahme an der Paneldiskussion
- Vorführung der Demonstrationsanlage auf dem Wasserstofftag 2024 in Lampoldshausen
- [Projektseite](https://www.dlr.de/de/vt/forschung-transfer/projekte/retrofith2-2) auf der Website des Instituts: <https://www.dlr.de/de/vt/forschung-transfer/projekte/retrofith2-2>
- [Beitrag im DLR Magazin](#), Ausgabe 176 „[Wissen schafft Sicherheit](#)“
- Pressemitteilung auf der DLR Homepage mit Video im Bereich Nachrichten 2024: [„Retrofit für kommerzielle Mikrogasturbinen erfolgreich erprobt“](#)

Für die wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse werden derzeit Veröffentlichungen auf einer Konferenz und in einem Journal vorbereitet.