vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

Ertüchtigung eines Gasturbinenbrenners für höhere Anteile von Wasserstoff im Brenngas

Dominik Waßmer und Bernhard Ćosić

Die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas ist ein möglicher Weg zur Dekarbonisierung von Industriegasturbinen für Kraft-Wärme-Kopplungsanwendungen. Um eine signifikante Verringerung der CO_2-Emissionen zu erreichen, sind sehr hohe Volumenanteile von Wasserstoff im Brenngas erforderlich. Die vorgemischte schadstoffarme Verbrennung von hohen Wasserstoffanteilen in Gasturbinen ist jedoch herausfordernd, weil sich das Risiko eines Flammenrückschlags in die Vormischpassagen des Brenners deutlich erhöht. In diesem Beitrag wird eine Modifikation zur Verbesserung der Wasserstofffähigkeiten des emissionsarmen Advanced Can Combustion (ACC)-Systems für die MGT6000-Gasturbine vorgestellt. Stromauf des Drallbrenners wurde ein Strömungskonditionierer installiert, der das Brennstoff-Luftgemisch in der Nähe der Brennerwände abmagert und homogenisiert, wodurch die Rückschlagfestigkeit des Brenners erhöht wird. Hochdruckverbrennungstests bei ca. 14 bar mit voller thermischer Leistung von ca. 4 MW_{th} und atmosphärische Brennertests wurden zur Bewertung der Wasserstoffkapazitäten des ursprünglichen Brenners und des nachgerüsteten Brenners durchgeführt. Verschiedene Wasserstoffbeimischungen von über 70 Vol-% bei hohem Druck und 93 Vol-% bei atmosphärischen Bedingungen sowie verschiedene gasturbinenrelevante Flammentemperaturen werden hinsichtlich Emissionen, Flammenrückschlag und thermoakustischer Stabilität bewertet. Zur Erkennung eines drohenden Flammenrückschlags wurden Thermoelementmessungen an den Brennerwänden als guter Frühwarnindikator für einen wasserstoffinduzierten Flammenrückschlag identifiziert. Die Amplitude der Thermoelementschwankung ist bei atmosphärischem und erhöhtem Druck ähnlich. Außerdem wird gezeigt, dass der mit der Wasserstoffbeimischung verbundene Anstieg der NO_x-Emissionen von atmosphärischen Bedingungen auf erhöhten Druck übertragen werden kann. Der experimentelle Datensatz wird für die Kalibrierung von CFD-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics) verwendet, um die Bewertung unter verschiedenen Betriebsbedingungen und zukünftige Änderungen zu ermöglichen und die gefundene Verbesserung zu erklären.

Autor

Dr. Dominik Waßmer
Dr. Bernhard Ćosić
MAN Energy Solutions SE
Oberhausen, Deutschland

Einführung

Kleine Industriegasturbinen im Bereich von 5 bis 20 MW werden für Kraft-Wärme-Kopplungsanwendungen in industriellen Prozessen eingesetzt, die Hochtemperaturdampf benötigen. Zudem kommen diese Gasturbinen als Kompressorantriebe überall dort zur Anwendung, wo eine Elektrifizierung nur schwer möglich ist, beispielsweise in Gastransportpipelines. Um auch in solchen Fällen die nachhaltige Dekarbonisierung weiter voranbringen zu können, ist die Nutzung von Wasserstoff als Gasturbinenbrennstoff eine essentielle Maßnahme.

Derzeit ist die Verfügbarkeit von kohlenstoffneutralem Wasserstoff (sogenannter „grüner Wasserstoff“) sehr begrenzt, während der Bedarf für industrielle Prozesse hoch ist und immer weiter steigt. Eine Idee ist jedoch, Wasserstoff in das Erdgasnetz einzumischen (1) und dadurch eine Verringerung der Kohlendioxidemissionen durch die Substitution von Erdgas durch grünen Wasserstoff zu erreichen. Aufgrund der vorgeschriebenen Kompatibilität für alle an das öffentliche Netz angeschlossenen Verbraucher wird die Beimischung von grünem Wasserstoff jedoch wahrscheinlich auf maximal 20–30 % Volumenprozent im Gemisch begrenzt sein [2], was etwa drei bis zehn Prozent des Wärmeeintrags des Brennstoffmassenstroms auf der Grundlage des unteren Heizwerts entspricht. In Bild 1 ist dieser Zusammenhang dargestellt und zeigt zugleich auf wie irreführend es sein kann, wenn man über Volumenprozente Wasserstoff im Brennstoff diskutiert. Aufgrund des Verhältnisses der Molmassen von Methan und Wasserstoff hat die gestrichelte Kurve einen exponentiellen Verlauf und erst ab einem Anteil von circa 60 Vol-% Wasserstoff steigt der Anteil am Wärmeeintrag in der Gasturbine signifikant an. Davor ist der Anteil des Wasserstoffs am Wärmeeintrag unterhalb von 30 %, was dementsprechend auch zu einer relativ geringen CO_2-Einsparung führt. In ähnlicher Weise verhält es sich mit den Verbrennungseigenschaften, wie zum Beispiel der Flammengeschwindigkeit. Diese erhöht sich zwar bereits bis zu einem Volumenanteil von 60 % Wasserstoff

vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

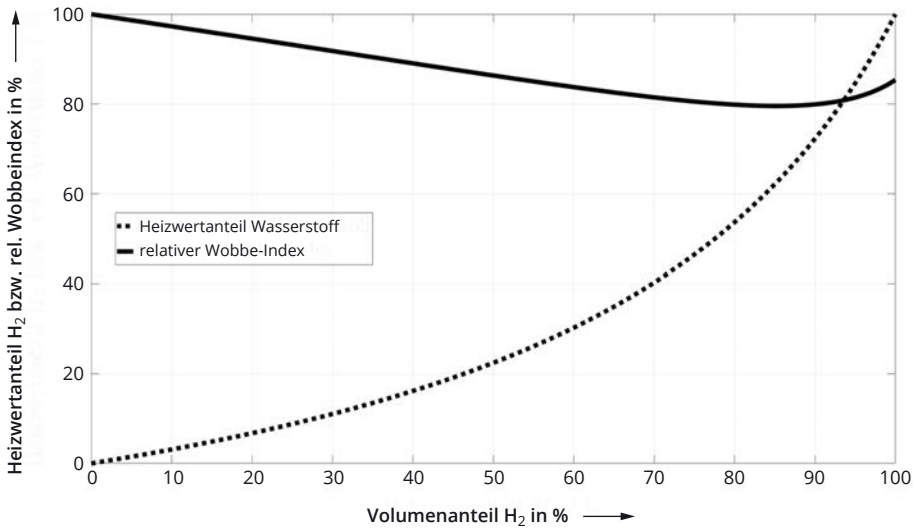


Bild 1. Relativer Wobbe-Index und Heizwertanteil (unterer Heizwert) des Wasserstoffs in Abhängigkeit des Volumenanteils im Brennstoff.

signifikant, steigt danach jedoch auf Grund der höheren Reaktivität von Wasserstoff exponentiell an. Bild 1 zeigt zusätzlich die Änderung des Wobbe-Index mit dem Volumenanteil von Wasserstoffs im Brennstoff. Es wird deutlich, dass der Wobbe-Index, der ein Maß für die Austauschbarkeit von Brennstoffen ist, sich nicht signifikant mit dem Wasserstoffanteil ändert. Dies bedeutet, dass die Rohrleitungsquerschnitte im Brennstoffversorgungssystem trotz der geringeren Dichte von Wasserstoff nicht größer ausfallen müssen als mit Erdgas. Sofern es Sicherheitsüberlegungen bzgl. der Ex-Zonen Regularien zulassen und keine Wasserstoffversprödungsprobleme zu erwarten sind, können die Systeme bei bestehenden Kraftwerken im Wesentlichen beibehalten werden. Ein zentraler Aspekt für die Weiterverwendung ist jedoch eine Retrofitmöglichkeit des Verbrennungssystems.

Es ist prinzipiell denkbar, dass bestimmte Industriestandorte lokale Brennstoffmischungen mit höheren Wasserstoffanteilen erzeugen, um ehrgeizigere Ziele bei der Kohlendioxidreduzierung zu erreichen. Die Brennstoffquelle hierfür könnte grüner Wasserstoff sein, der durch Elektrolyse erzeugt wird, oder Wasserstoff könnte bereits im Produktionsprozess vorhanden sein. Kleine Industriegasturbinen eignen sich aufgrund ihres hohen Brennstoffausnutzungsgrades von knapp über 90 % sehr gut für die Nutzung von bis zu 100 % Wasserstoff als kohlenstofffreier Brennstoff [3]. Darüber hinaus sind die Brennstoffdurchsätze in Bezug auf Versorgung, Speichergröße und Verrohrung im Vergleich zu wesentlich größeren Gasturbinen noch überschaubar.

Neben der Frage der Wasserstoffverfügbarkeit ist die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff in Gasturbinen derzeit durch die verfügbare Gasturbinen-Verbrennungstechnologie begrenzt. Zwar ist die herkömmliche Diffusionsverbrennungstechnologie in der Lage 100 % Wasserstoff zu verbrennen, jedoch entstehen hierbei extrem hohe Stickoxidemissionen (NO_x) und es sind zusätzliche Emissionsminderungsmaßnamen, wie Wassereinspritzung oder Katalysatoren, erforderlich [4]. Dies steht aber im klaren Widerspruch zur Idee von Wasserstoff als umweltfreundlicher Kraftstoff. Zudem ist die Abgasnachbehandlung für kleine Gasturbinen oft unwirtschaftlich, da dies die Investitionskosten für kleine Anlagen unverhältnismäßig stark in die Höhe treibt. Auf der anderen Seite muss die Technologie für magere Vormischverbrennung verbessert werden, um Wasserstoffgemische mit niedrigen Emissionen sicher zu verbrennen. Die größten Herausforderungen sind der Flammenrückschlag [5-8], die NO_x-Emissionen [9] und verbrennungsinduzierte thermoakustische Instabilitäten [10].

Grundsätzlich wird die Anfälligkeit für thermoakustische Instabilitäten durch einen erhöhten Anteil von Wasserstoff im Brennstoff nicht zwingend erhöht. Zwar zeigen Studien [10], dass Wasserstoff die Flammenübertragungsfunktion verändert, die die Kopplung zwischen der Brennkammerakustik und der Wärmefreisetzung in der Flamme beschreibt, jedoch bedeutet das aus praktischer Sicht lediglich, dass sich das Pulsationsverhalten in Bezug auf die Gasturbinenlast und das Pilot-Brennstoff-Verhältnis verändern kann. Somit ergeben sich u.U. andere Pulsationsfrequenzen- und Charakteristiken, die einer Nachjustierung des Brennkammerdesigns oder der Dämpfungscharakteristik bedürfen.

Im Allgemeinen führen höhere Wasserstoffgehalte zu höheren NO_x-Emissionen bei bestehenden Vormischbrennern im Vergleich zum reinen Erdgasbetrieb. Aufgrund der höheren turbulenten Flammengeschwindigkeit von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas [11] wird die Reaktionszone kompakter und die Flamme bewegt sich stromaufwärts. Dadurch verkürzt sich die Vormischstrecke von Brennstoff und Luft, was lokal zu heißen Strähnen führt und damit potenziell die NO_x-Emissionen erhöht.

Darüber hinaus verändert ein erhöhter Wasserstoffanteil im Brennstoff bei gleichem Wärmeeintrag die Abgaszusammensetzung im Vergleich zu Erdgas. Dies führt zu einem Anstieg der NO_x-Emissionen in Bezug auf den volumetrischen Anteil, normiert auf 15 % O_2, obgleich es sich um den exakt gleichen Massenstrom von NO_x handelt. Folglich sollten die NO_x-Messungen für einen fairen Vergleich mit Erdgasflammen bei gleicher Leistung korrigiert werden, damit die tatsächlichen Umweltauswirkungen korrekt bewertet werden können. Ansonsten steigen die NO_x-Emissionen rein rechnerisch um bis zu ca. 35 % für reinen Wasserstoff an, obwohl die eigentliche Schadstoffmenge der gleichen entspricht wie bei einer Verbrennung mit gleicher Leistung aber mit reinem Erdgas [12].

Die größte Herausforderung bei der Verwendung von Wasserstoff bleibt die Vermeidung eines Flammenrückschlags. Hierbei brennt die Flamme in der Vormischpassage oder anderen Bereichen des Brenners, die nicht für die Flammenstabilisierung ausgelegt sind. Meist führen Flammenrückschläge sofort zu kapitalen Schäden der betroffenen Brennerteile. Mehrere experimentelle Studien zum Flammenrückschlag bei Wasserstoff haben gezeigt, dass ein hoher Brennkammerdruck, hohe Flammentemperaturen und hohe Verdichteraustrittstemperaturen die Wahrscheinlichkeit eines Flammenrückschlags signifikant erhöhen [5–8]. Die hohen turbulenten Flammengeschwindigkeiten, die durch den reaktiven Wasserstoff erreicht werden, übersteigen lokal die konvektiven Strömungsgeschwindigkeiten des Frischgases. Insbesondere an den Grenzschichten der Brennkammerwände [13,14], aber bei Drallflammen auch in der Nähe der zentralen Rezirkulationszonen [15-17], sind die Strömungsgeschwindigkeiten lokal klein genug, um einen Flammenrückschlag zu ermöglichen.

Je nach angestrebtem Wasserstoffgehalt im Brennstoff verfolgen die OEMs unterschiedliche Strategien zur Anpassung der mageren Vormischtechnologie [9,17-20]. In diesem Beitrag wird der Ansatz der MAN Energy Solutions zur Erweiterung der Wasserstofffähigkeiten des Verbrennungssystems der MGT-Gasturbinenfamilie auf mittlere Wasserstoffgehalte in Brennstoffmischungen beschrieben. Unser Ziel war es, das MGT Advanced Can Combustion System (ACC) [21] für Wasserstoffanteile von bis zu 60 Vol-% in Erdgasmischungen zu ertüchtigen und dabei die bislang sehr niedrigen NO_x-Emissionen beizubehalten. Dazu haben wir Hochdruck-Volllast-Verbrennungstests mit einer unskalierten Brennkammer und atmosphärische Einzelbrennertests durchgeführt, um die Fähigkeiten dieses modernen Verbrennungssystems in Bezug auf Wasserstoffverträglichkeit zu bewerten. Ein weiteres Ziel war es, dass die konstruktiven Änderungen, die für die Verbesserung des Verbrennungssystems notwendig sind, in bestehenden An-

vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

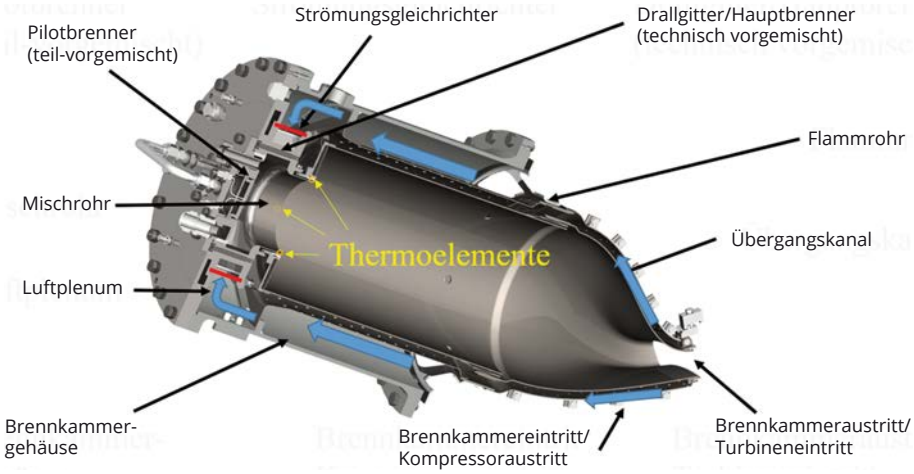


Bild 2. Querschnitt des ACC Brennkammersystems von MAN ES.

lagen nachgerüstet werden können. Bei dieser konstruktiven Anpassung handelt es sich um einen Strömungskonditionierer, der unmittelbar stromauf des radialen Drallerzeugers angebracht wird. Um das Funktionsprinzip dieses Strömungskonditionierers besser verstehen zu können, wurden CFD-Berechnungen durchgeführt, die auch in künftige Arbeiten zur weiteren Steigerung der Wasserstoffkapazitäten genutzt werden können.

Experimentelle Untersuchungen

Eine dreidimensionale Querschnittsansicht des untersuchten Verbrennungssystems ist in Bild 2 dargestellt. Die Kompressorluft kühlt den Übergangskanal und anschließend das Flammrohr, bevor sie in den Radial-Drallerzeuger eintritt (siehe blaue Pfeile). Dort wird der Hauptbrennstoff zugegeben, während der Pilotbrennstoff stromabwärts des Drallerzeugers in der Nähe der Brennerplatte zugegeben wird. Das verdrallte Luft-Brennstoff-Gemisch tritt durch das Mischrohr in das Flammrohr ein, wo sich die Flamme stabilisiert. Nach der Reaktionszone wird das Abgas durch den Übergangskanal zur Turbine geleitet. Die MGT6000/MGT 8000 Gasturbine ist mit sechs identischen Rohrbrennkammern bestückt. Der untersuchte Strömungskonditionierer wird direkt stromauf des Drallerzeugers fest installiert (rote Markierung in Bild 2). Der zusätzliche Druckverlust des Strömungskonditionierers liegt in der Größenordnung von 0,1-0,2 % des Betriebsdrucks und hat keine signifikante Auswirkung auf den Wirkungsgrad der Gasturbine. Die daraus resultierenden Änderungen in der Luftverteilung wurden für die Berechnung der Flammentemperaturen berücksichtigt.

Für die experimentellen Untersuchungen sind vier Thermoelemente an der Außenseite des Mischrohrs angebracht, die zur frühzeitigen Erkennung eines Flammenrückschlags dienen. Diese Positionierung wurde ausgewählt, da im Falle eines Flammenrückschlags die Flamme in der Nähe der Mischrohrwand zu brennen beginnt und sich stromauf in Richtung der Eindüsungslöcher des Brennstoffs bewegt. Die Spitze jedes Typ-K Thermoelementes ist so angebracht, dass das Thermoelement einen möglichst guten thermischen Kontakt zur Mischrohraußenwand hat. Die Abtastrate der Thermoelemente beträgt 1 Hz. Diese zusätzliche Instrumentierung ist für den Serienbetrieb nicht vorgesehen. Alle Untersuchungen wurden bei einer Vorheiztemperatur der Luft von etwa 670 K durchgeführt, was einer realistischen Kompressorendtemperatur entspricht. Die Flammentemperatur ist auf eine Referenztemperatur T_{ref} normiert, die der typischen Flammentemperatur bei Volllastbedingungen einer Gasturbine mit Erdgas entspricht. Die Wärmeleistung war mit zunehmender Wasserstoffbeimischung für einen einzelnen Betriebspunkt konstant, wie es auch im typischen Kraftwerksbetrieb der Fall wäre. Die Flammentemperatur ist somit nicht ganz konstant und schwankt leicht bei Variation des Wasserstoffgehalts im Brennstoff in einem konstanten Betriebspunkt. Der Betriebsdruck für die Hochdrucktests beträgt ≈ 14 bar(a). Bei den atmosphärischen Versuchen sind die Strömungsbedingungen mit denen unter Hochdruck vergleichbar, da die Eintrittstemperatur die gleiche ist und nur die Leistung mit dem Betriebsdruck skaliert wird.

Bild 3 zeigt den Hochdruckprüfstand für die experimentelle Untersuchung der modifizierten Brennkammer unter realistischen Randbedingungen. Die Tests wurden in den Brennkammerlaboren des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt im dortigen Institut für Antriebstechnik in Köln durchgeführt. Der Einzel-Brennkammer-Prüfstand wird mit aufgeheizter und verdichteter Luft versorgt und dem Erdgas kann stufenlos ein beliebiger Anteil von Wasserstoff beigemischt werden. Der Lufteintritt in die Brennkammer und der Abgasaustritt aus der Brennkammer sind so gestaltet, dass die Eigenschaften der Gasturbine bzgl. Strömungsfeld und akustischen Randbedingungen genau nachgebildet werden.

Die zusätzlich an der TU Berlin durchgeführten atmosphärischen Versuche sind im Entwicklungsprozess stets den Hochdrucktests vorgeschaltet, da sie deutlich günstiger sind und u.a. wegen eines optischen Zugangs zudem eine Vielzahl von zusätzlichen Untersu-

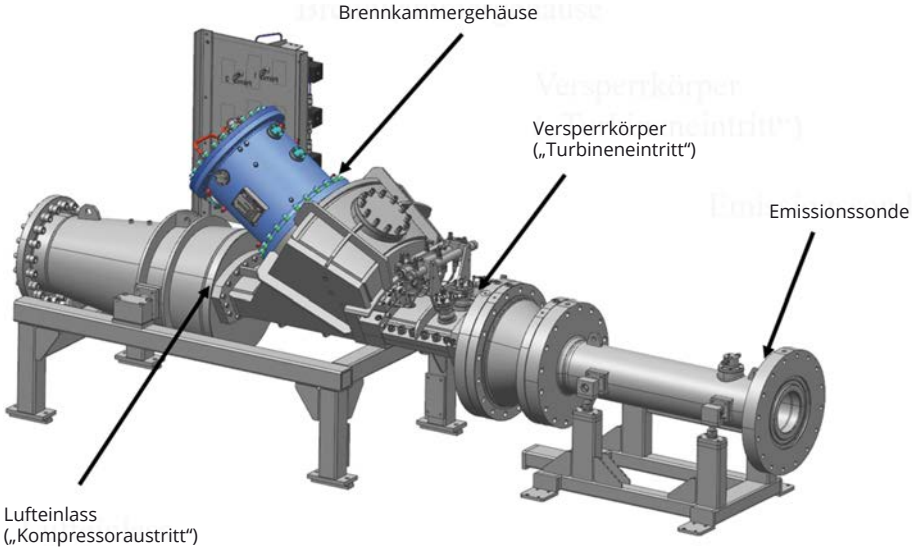


Bild 3. Hochdruckprüfstand für unskalierte Brennkammertests.

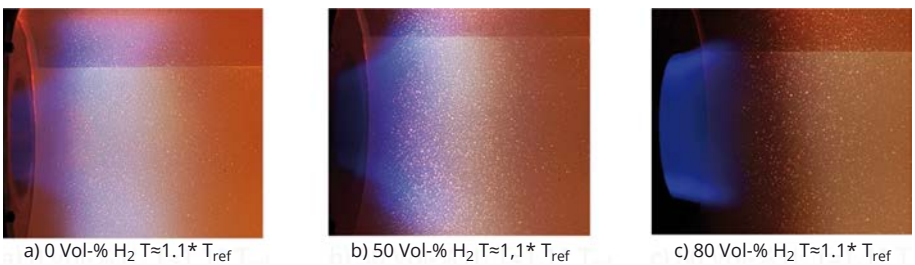


Bild 4. Fotos der Flamme bei atmosphärischen Tests für verschiedene Wasserstoffanteile [22].

vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

chungsmethoden erlauben. Dies erleichtert die Vorauswahl verschiedener Entwicklungsvarianten in finanzieller und zeitlicher Hinsicht deutlich. Allerdings lassen sich bestimmte chemische Abläufe nicht von atmosphärischen Bedingungen auf Druckbedingungen übertragen, weshalb Hochdruckvalidierungsversuche weiterhin zwingend zum Entwicklungsprozess dazugehören.

Bild 4 zeigt Fotos der Flamme bei drei verschiedenen Raten der Wasserstoffbeimischung. Alle Bilder sind bei $T \approx 1{,}1 * T_{ref}$ und atmosphärischem Druck aufgenommen. Bild 4a zeigt die mit reinem Erdgas betriebene Flamme. Die Flammenform kann als M-förmig beschrieben werden. Mit zunehmendem Wasserstoffgehalt im Brennstoff (von links nach rechts) wird die Flamme deutlich kürzer und ähnelt bereits bei 50 Vol-% Wasserstoffbeimischung eher einer V-förmigen Flamme. In Bild 4c ist die Flamme für 80 Vol-% Wasserstoff dargestellt. Hier wird die Flamme aufgrund der viel höheren Flammengeschwindigkeit extrem kurz und kompakt.

Ergebnisse der Untersuchungen

In Bild 5 sind die Ergebnisse der atmosphärischen Tests und der Hochdrucktests für Brennervarianten mit und ohne Strömungskonditionierer gezeigt. Auf der horizontalen Achse ist der Volumenanteil Wasserstoff im Erdgas aufgetragen, auf der vertikalen Achse ist die maximale Standardabweichung der Temperatursignale ($SD(T_{Mischrohr})$) der Mischrohr-Thermoelemente als Indikator des Flammenrückschlags dargestellt. Eine gestrichelte schwarze Linie bei $SD(T_{Mischrohr}) = 6\,K$ stellt den empirischen Schwellenwert für einen bevorstehenden Flammenrückschlag dar. Wenn die Fluktuationen der Temperatursignale in ihrer Amplitude zu groß werden, kann es – speziell unter atmosphärischen Bedingungen – erst nach einigen Minuten zu einem Flashback kommen. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die lokale Erwärmung des luftgekühlten Mischrohrs und die sich damit erhöhende Wahrscheinlichkeit für einen Flammenrückschlag an der immer heißer werdenden Wand des Mischrohrs zurückzuführen. Mittels des optischen Zugangs bei den atmophärischen Tests konnten in solchen Zuständen kleine Flämmchen an der Stromab-Kante des Mischrohrs beobachtet werden, die sich lokal an Stellen, bei denen die Geschwindigkeiten, das Äquivalenzverhältnis und die Wandtemperatur einen Rückschlag begünstigen, formieren. Der in Bild 5 jeweils letzte dargestellte Marker einer Konfiguration kennzeichnet den höchsten Wasserstoffanteil, der ohne Flammenrückschlag gemessen wurde. Ein weiterer Anstieg des Wasserstoffanteils führt zum sofortigen Rückschlag. Bei einem Brenner ohne Strömungskonditionierer (blaue Kreise) treten bei atmosphärischen Bedingungen

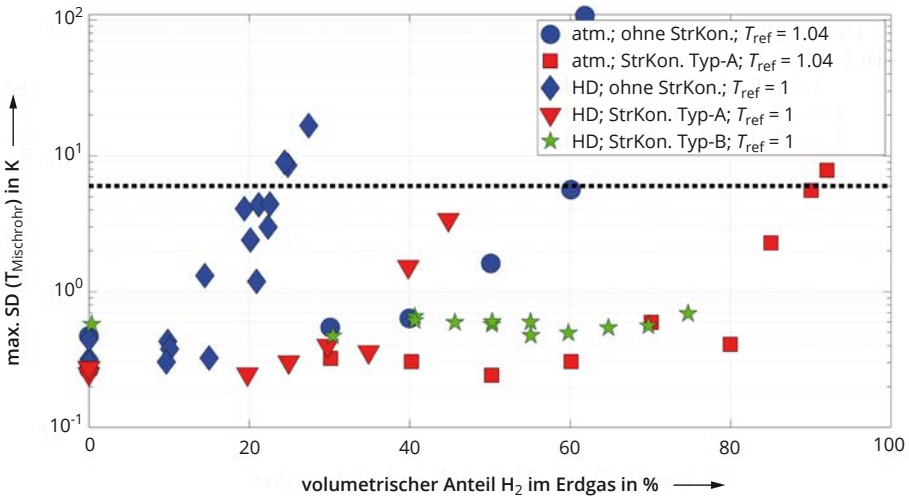


Bild 5. Standardabweichung der Mischrohr-Thermoelemente in Bezug auf den Wasserstoffanteil im Brennstoff. Die Marker kennzeichnen Messungen bei atmosphärischem und hohem Druck mit und ohne Strömungskonditionierer. Die gestrichelte Linie zeigt die empirische Rückschlagsgrenze an.

bei 50 Vol-% Wasserstoff erhöhte Fluktuationen der Temperaturwerte der Mischrohr-Thermoelemente auf, bei einer Wasserstoffbeimischung von mehr als 60 Vol-% kommt es dann zum Flammenrückschlag. Die entsprechenden Daten bei Hochdruckbedingungen (blaue Rauten) deuten auf einen Flammenrückschlag bei einer Wasserstoffbeimischung von bereits mehr als 25 Vol-% hin. Im Vergleich dazu ergeben die Messdaten für den Brenner mit eingebautem Strömungskonditionierer Typ-A eine hohe Wahrscheinlichkeit eines Flammenrückschlags bei atmosphärischen Bedingungen erst bei mehr als 93 Vol-% Wasserstoff im Erdgas. Unter Hochdruckbedingungen liegt die Schwelle für den Flammenrückschlag für den identischen Brenner bei 45 Vol-%. Ausschließlich bei den Hochdrucktests wurde zudem noch eine weitere Modifikationsvariante Typ-B getestet, bei der es sogar erst bei über 70 Vol-% Wasserstoff zu einem Flammenrückschlag kommt. Der Druckverlust der beiden Varianten Typ-A und Typ-B ist identisch, lediglich die Homogenität des Strömungskonditionierers über den Umfang wurde verändert. Aufgrund der nun noch stärkeren Abmagerung des Brennstoff-Luft Gemisches an der Wand, kommt es bei Variante Typ-B zu einem Flammenrückschlag im Zentrum des Mischrohres und nicht an der Wand, weshalb in Bild 5 auch kein Anstieg der Temperaturfluktuationen zu sehen ist.

Bild 6 zeigt die NO_x-Emissionen normiert auf 15 % O_2 und zusätzlich normiert auf die entsprechenden Emissionen bei reinem Erdgasbetrieb. Die Ergebnisse der verschiedenen Hardware-Varianten (mit und ohne Strömungskonditionierer) sind bei einer adiabaten Flammentemperatur $T = T_{ref}$ für Hochdruckbedingungen und bei $T = 1{,}04 * T_{ref}$ für atmosphärische Bedingungen dargestellt. Neben den eindeutigen Trends mit zunehmendem Wasserstoffgehalt zeigen die Daten eine gewisse Streuung aufgrund kleinerer Diskrepanzen im Gesamtwärmeeintrag zwischen den Messpunkten. Insgesamt zeigen die Daten aber einige bemerkenswerte qualitative Ähnlichkeiten zu Bild 5, in der die zeitlichen Fluktuationen der gemessenen Temperaturen

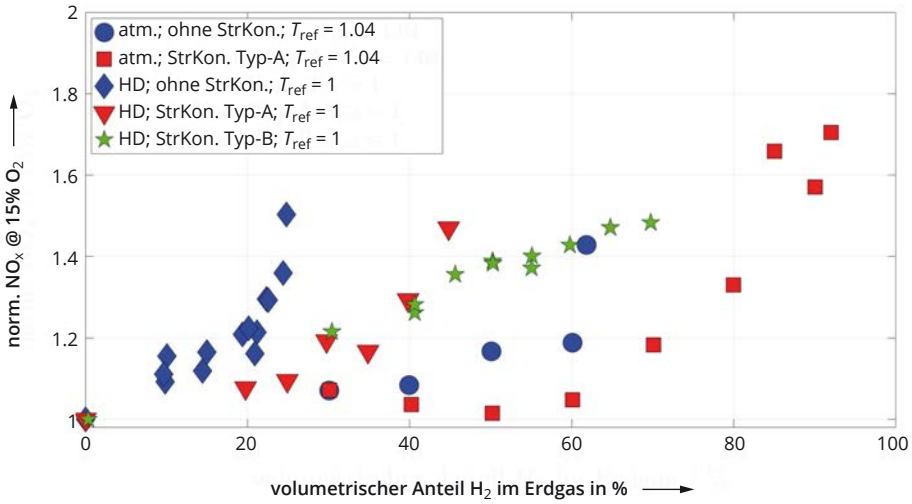


Bild 6. Normierte NO_x-Emissionen, normalisiert in Bezug auf den Wasserstoffanteil im Brennstoff. Die Symbole kennzeichnen Messungen bei atmosphärischem und hohem Druck mit und ohne Strömungskonditionierer.

vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

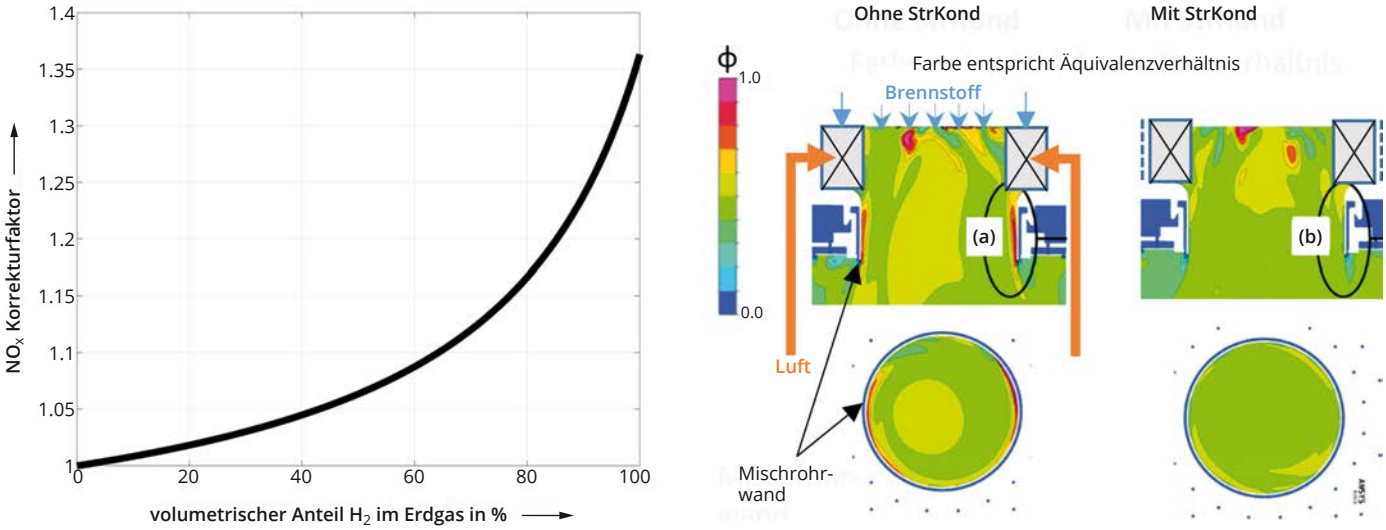


Bild 7. a) Korrekturfaktor für gemessene NO_x-Emissionen bezogen auf 15 % O_2 im Abgas in Abhängigkeit des H_2-Anteils im Erdgas; b) Numerische Berechnung (RANS) der Brennstoffverteilung in Brenner und Mischrohr: links: ohne Strömungskonditionierer, rechts: mit Strömungskonditionierer.

der Mischrohrthermoelemente dargestellt sind. Die NO_x-Emissionen steigen bei atmosphärischen als auch bei Hochdruckbedingungen mit zunehmendem Wasserstoffgehalt im Brennstoff an. Zunächst bleiben die Emissionen auf einem nahezu konstanten Niveau, beginnen dann aber fast kontinuierlich zu steigen, bevor dann die Temperatur der Thermoelemente am Mischrohr signifikant zu schwanken beginnen und somit der Bereich des Flammenrückschlags erreicht wird. Der Anstieg der NO_x-Emissionen wird höchstwahrscheinlich durch die verringerte Flammenlänge und die damit verbundene Verringerung der Mischzeit für das Frischluft-Brennstoff-Gemisch verursacht, was zu lokalen Hot Spots und damit zu mehr NO_x-Emissionen führt. Im Bereich des drohenden Flammenrückschlags sind die Emissionen um etwa 50 % erhöht, wobei wichtig ist, dass die NO_x-Emissionswerte in Bild 6 bzgl. der geänderten Abgaszusammensetzung korrigiert sind. Der Korrekturfaktor ist in Bild 7a in Abhängigkeit des volumetrischen Wasserstoffanteils in Erdgas (H-Gas) dargestellt [12]. Dies ermöglicht einen fairen Vergleich der tatsächlich produzierten NO_x-Moleküle bei konstantem Wärmeeintrag für verschiedene Wasserstoffmischungen, wie sie in dieser Studie untersucht wurden. Aufgrund des relativ geringen Einflusses der Wasserstoffbeimischung bis zu ≈60 Vol-% spielt die Korrektur jedoch erst bei sehr hohen Anteilen von Wasserstoff eine signifikante Rolle. Daraus ergibt sich, dass die Verschlechterung der NO_x-Werte aufgrund der Wasserstoffbeimischung bei konstanter Leistung für die untersuchten Brenner bei atmosphärischen und Hochdruckbedingungen kurz vor dem Erreichen der Rückschlaggrenze etwa 40 % beträgt. Dies zeigt, dass ein relativer Anstieg der NO_x-Emissionen durch die Wasserstoffbeimischung, der bei atmosphärischen Versuchen beobachtet wurde, eine grobe Abschätzung der NO_x-Emissionen bei erhöhten Druckbedingungen erlaubt.

Die erzielte Verschiebung der Rückschlaggrenzen zu höheren Wasserstoffanteilen im Brenngas lässt sich mithilfe von numerischen Simulationen qualitativ gut erklären. Dazu zeigt Bild 7b farblich die Äquivalenzverhältnisse im Vormischbereich des Brenners. Auf der linken Seite ist ein Schnitt durch einen nicht modifizierten Brenner gezeigt, wohingegen auf der rechten Seite ein Brenner mit dem Strömungskonditionierer dargestellt ist. Die oberen Rechtecke symbolisieren das radiale Drallgitter und die Mischrohrwand ist eingekreist. Der Vergleich der Äquivalenzverhältnisse zeigt für den Brenner ohne Strömungskonditionierer eine stärkere Brennstoffanreicherung an der Mischrohrwand (siehe Bereich (a)) und im Gegensatz dazu einen magereren Brennstoffbereich an der Mischrohrwand mit installiertem Strömungskonditionierer (siehe Bereich (b)). Diese fetten Strähnen in Wandnähe führen lokal zu stark erhöhten Brenngeschwindigkeiten. Da die Strömungsgeschwindigkeiten in Wandnähe ohnehin bereits signifikant niedriger als in der Kernzone des Mischrohrs sind, erhöht dies das Flammenrückschlagrisiko deutlich. Eine bessere lokale Ausmischung, wie sie durch die homogenere Strömungsführung auf Grund des Strömungskonditionierers erreicht wird, reduziert diese Gefahr erheblich.

Fazit

Die Beimischung von Wasserstoff in Erdgas als Brennstoff für Gasturbinen verringert die Kohlendioxidemissionen bei der Stromerzeugung und bei mechanischen Antriebsanwendungen. Hiermit gehen allerdings auch einige Herausforderungen für den Betrieb der Gasturbinenbrennkammer in Bezug auf Thermoakustik, Flammenrückschlag und NO_x-Emissionen einher. In diesem Beitrag wurde die Verbesserung eines Vormisch-Erdgasbrenners der Industriegasturbine MGT6000/MGT8000 im Hinblick auf die Verträglichkeit von Wasserstoff als Brennstoff vorgestellt. Hierzu wurde stromauf des Drallerzeugers ein Strömungskonditionierer eingesetzt, der das Brennstoff-Luftgemisch an den Brennkammerwänden abmagert und dadurch die Rückschlagfestigkeit des Brenners erhöht.

Die Brennermodifikation wurde experimentell anhand von atmosphärischen Brennerversuchen und Hochdrucktests unter Maschinenbedingungen bewertet. Die Hardwarevarianten mit Strömungskonditionierer zeigten experimentell, dass die Flammenrückschlagsicherheit bei atmosphärischen und Hochdruckbedingungen erheblich verbessert wird. Während der Standardbrenner unter Volllastbedingungen mit bis zu 25 Vol-% Wasserstoff betrieben werden kann, erhöht der Strömungskonditionierer die Wasserstoffkapazitäten bei den selben Betriebsbedingungen auf bis zu 70 Vol-%, ohne dass sich dadurch signifikante Nachteile in Bezug auf die thermoakustische Stabilität und die Einhaltung der NO_x-Emissionen ergeben. Es konnte zudem gezeigt werden, dass die Fluktuation der Temperatursignale von Thermoelementen, die an der Außenwand des Brennkammermischrohrs angebracht sind, mit dem Einsetzen eines wasserstoffinduzierten Flammenrückschlags an der Wand korreliert werden können. Die Korrelation ist bei atmosphärischen Bedingungen ähnlich wie bei erhöhtem Druck. Bei weiterer Abmagerung des Brenngases an der Wand kann der Brenner mit noch höheren Wasserstoffanteilen betrieben werden, jedoch findet ein Flammenrückschlag dann nicht mehr an der Wand sondern im radialen Zentrum des Mischrohres statt. Analog zum Wasserstoffgehalt im Brennstoff steigen die NO_x-Emissionen im Abgas an, bleiben aber bei den untersuchten Konfigurationen unter den Garantieschwellenwerten. Nach Anwendung einer Korrektur, die die Änderungen in der Abgaszusammensetzung bei höheren Wasserstoffbeimischungen berücksichtigt, zeigen die Daten für beide untersuchten Geometrien

vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

einen ähnlichen Anstieg der NO_x-Emissionen vor dem Rückschlag, was auf eine gewisse Übertragbarkeit zwischen atmosphärischen Tests und Hochdrucktests hindeutet.

Die vorgestellte Arbeit zeigt, wie vorgemischte, emissionsarme Drallbrenner, die ursprünglich für reinen Erdgasbetrieb ausgelegt wurden, modifiziert werden können um auch mit Brennstoffen, die einen signifikanten Wasserstoffanteil haben, sicher betrieben werden zu können. In der aktuellen Studie wurden die Wasserstoffkapazitäten in Bezug auf den volumetrischen Anteil der Wasserstoffbeimischung mehr als verdoppelt. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Entwicklung neuer Konzepte für reine Wasserstoffverbrennung konzentrieren, um den Betrieb kleiner industrieller kohlendioxidfreier Gasturbinen zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

[1] P.E. Dodds, S. Demoullin, *Conversion of the UK gas system to transport hydrogen,* Int. J. Hydrogen Energy. 38 (2013) 7189-7200. https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2013.03.070.

[2] D.R. Jones, W.A. Al-Masry, C.W. Dunnill, *Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel: an analysis based on flash-back and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK*, Sustain. Energy Fuels. 2 (2018) 710-723. https://doi.org/10.1039/C7SE00598A.

[3] K. Saidi, U. Orth, S. Boje, C. Frekers, A *Comparative Study of Combined Heat and Power Systems for a Typical Food Industry Application*, in: Vol. 3A Coal, Biomass Altern. Fuels; Cycle Innov. Electr. Power; Ind. Cogener., American Society of Mechanical Engineers, Düsseldorf, Germany, 2014. https://doi.org/10.1115/GT2014-26234.

[4] B. Emerson, D. Wu, T. Lieuwen, D. Noble, S. Sheppard, L. Angello, *Assessment of current capabilities and near-term availability of hydrogen-fired gas turbines considering a low-carbon future*, Proc. ASME Turbo Expo. 6 (2020) 1-10. https://doi.org/10.1115/GT2020-15714.

[5] T.G. Reichel, S. Terhaar, O. Paschereit, *Increasing Flashback Resistance in Lean Premixed Swirl-Stabilized Hydrogen Combustion by Axial Air Injection*, J. Eng. Gas Turbines Power. 137 (2015). https://doi.org/10.1115/1.4029119/373737.

[6] C. Eichler, G. Baumgartner, T. Sattelmayer, *Experimental investigation of turbulent boundary layer flashback limits for premixed hydrogen-air flames confined in ducts,* J. Eng. Gas Turbines Power. 134 (2012). https://doi.org/10.1115/1.4004149/455299.

[7] A. Kalantari, V. McDonell, S. Samuelsen, S. Farhangi, D. Ayers, *Towards improved boundary layer flashback resistance of a 65KW gas turbine with a retrofittable injector concept,* Proc. ASME Turbo Expo. 4A-2018 (2018) 1-9. https://doi.org/10.1115/GT201875834.

[8] D. Ebi, P. Jansohn, *Boundary layer flashback limits of hydrogen-methane-air flames in a generic swirl burner at gas turbine relevant conditions,* Proc. ASME Turbo Expo. 4B-2020 (2020) 1-9. https://doi.org/10.1115/GT2020-16230.

[9] W.D. York, W.S. Ziminsky, E. Yilmaz, *Development and testing of a low NO_x hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines,* J. Eng. Gas Turbines Power. 135 (2013). https://doi.org/10.1115/1.4007733/373379.

[10] E. Æsøy, J.G. Aguilar, S. Wiseman, M.R. Bothien, N.A. *Worth, J.R. Dawson, Scaling and prediction of transfer functions in lean premixed H2/CH4-flames, Combust.* Flame. 215 (2020) 269-282. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.045.

[11] H. Kutkan, A. Amato, G. Campa, G. Ghirardo, L. Tay Wo Chong, E. Æsøy, *Modelling of Turbulent Premixed CH4/H2/Air Flames Including the Influence of Stretch and Heat Losses,* in: Vol. 3A Combust. Fuels, Emiss., American Society of Mechanical Engineers, 2021: pp. 1–12. https://doi.org/10.1115/GT2021-59063.

[12] Douglas, C.M., Shaw, S.L., Martz, T.D., Steele, R.C., Noble, D.R., Emerson, B.L., and Lieuwen, T.C., *"Pollutant Emissions Reporting and Performance Considerations for Hydrogen–Hydrocarbon Fuels in Gas Turbines."* ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. September 2022; 144(9): 091003. https://doi.org/10.1115/1.4054949.

[13] V. Hoferichter, P. Mohammadzadeh Keleshtery, C. Hirsch, T. Sattelmayer, Y. Matsumura, *Influence of Boundary Layer Air Injection on Flashback of Premixed Hydrogen-Air Flames,* in: Vol. 4A Combust. Fuels Emiss., American Society of Mechanical Engineers, 2016. https://doi.org/10.1115/GT2016-56156.

[14] G. Blesinger, R. Koch, H.-J. Bauer, *Influence of flow field scaling on flashback of swirl flames,* Exp. Therm. Fluid Sci. 34 (2010) 290-298. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.10.026.

[15] M. Brower, E. Petersen, W. Metcalfe, H.J. Curran, M. Füri, G. Bourque, N. Aluri, F. Güthe, *Ignition delay time and laminar flame speed calculations for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures,* Proc. ASME Turbo Expo. 2 (2012) 1005-1016. https://doi.org/10.1115/GT2012-69310.

[16] A. Endres, T. Sattelmayer, *Numerical investigation of pressure influence on the confined turbulent boundary layer flashback process,* Fluids. 4 (2019). https://doi.org/10.3390/fluids4030146.

[17] K.-K. Lam, P. Geipel, J. Larfeldt, Hydrogen Enriched Combustion Testing of Siemens Industrial SGT-400 at Atmospheric Conditions, J. Eng. Gas Turbines Power. 137 (2015) 1–10. https://doi.org/10.1115/1.4028209.

[18] H.H.W. Funke, N. Beckman, J. Keinz, A. Horikawa, *30 Years of Dry Low NO_x Micromix Combustor Research for Hydrogen-Rich Fuels: An Overview of Past and Present Activities,* in: Vol. 4B Combust. Fuels, Emiss., American Society of Mechanical Engineers, 2020: pp. 1-14. https://doi.org/10.1115/GT2020-16328.

[19] K. Lam, N. Parsania, *Hydrogen Enriched Combustion Testing of Siemens SGT-400 at High Pressure Conditions,* in: Vol. 4B Combust. Fuels Emiss., American Society of Mechanical Engineers, 2016: pp. 1-10. https://doi.org/10.1115/GT2016-57470.

[20] M. Zajadatz, F. Güthe, E. Freitag, T. Ferreira-Providakis, T. Wind, F. Magni, J. Goldmeer, *Extended Range of Fuel Capability for GT13E2 AEV Burner with Liquid and Gaseous Fuels*, J. Eng. Gas Turbines Power. 141 (2019) 1-13. https://doi.org/10.1115/1.4041144.

[21] F. Reiss, S.-H. Wiers, U. Orth, E. Aschenbruck, M. Lauer, J. El Masalme, J. El Masalme, *Combustion system development and testing for MAN's new industrial gas turbines MGT 6100 and MGT 6200,* in: Proc. ASME Turbo Expo, American Society of Mechanical Engineers, Düsseldorf, Germany, 2014: pp. 1-9. https://doi.org/10.1115/GT2014-25907.

[22] Ćosić, B, Wassmer, D, Kluß, D, Jaeschke, A, Reichel, T, & Paschereit, CO. *"Experimental and Numerical Advancement of the MGT Combustor Towards Higher Hydrogen Capabilities."* Proceedings of the ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 3B: Combustion, Fuels, and Emissions. Rotterdam, Netherlands. June 13-17, 2022. V03BT04A005. ASME. https://doi.org/10.1115/GT2022-82110

Abstract

Upgrading a gas turbine burner for higher shares of hydrogen in the fuel gas

The addition of hydrogen to natural gas is a possible pathway for decarbonizing industrial gas turbines for combined heat and power applications. To achieve a significant reduction in CO_2 emissions, very high volume fractions of hydrogen in the fuel gas are required. However, premixed low-emission combustion of high hydrogen fractions in gas turbines is challenging because the risk of flame flashback into the premix passages of the burner increases significantly. This paper presents a modification to enhance the hydrogen capabilities of the low-emission Advanced Can Combustion (ACC) system for the MGT6000/MGT8000 gas turbine. A flow conditioner was installed upstream of the swirl burner to lean and homogenize the fuel-air mixture near the burner walls, thereby increasing the flashback resistance of the burner. High-pressure combustion tests at approximately 14 bar with full thermal power of about 4 MW_{th} and atmospheric burner tests were conducted to assess the hydrogen capabilities of the original burner and the retrofitted burner. Various hydrogen blends exceeding 70 vol-% at high pressure and 93 vol-% under atmospheric conditions, as well as various gas turbine relevant flame temperatures, are evaluated for emissions, flame flashback, and thermoacoustic stability. Thermocouple measurements on the burner walls were identified as a good early warning indicator for hydrogen-induced flame flashback. The amplitude of thermocouple fluctuations is similar at atmospheric and elevated pressure. Additionally, it is shown that the increase in NO_x emissions associated with hydrogen blending can be transferred from atmospheric conditions to elevated pressure. The experimental dataset is used for calibrating computational fluid dynamics (CFD) simulations to enable evaluation under various operating conditions and future changes and to explain the improvement found.

vgbe energy - All rights reserved / Alle Rechte vorbehalten - ©

vgbe Events 2024 | Please visit our website for updates!

Congress/Kongress

vgbe | Congress 2024
vgbe | Kongress 2024

Call for Papers!

11 & 12 September 2024
Potsdam, Germany

Contact
Ines Moors
t +49 201 8128-222
Angela Langen
t +49 201 8128-310
e vgbe-congress@vgbe.energy

vgbe/VEÖ Expert Event
River Management and Ecology

21 and 22 May 2024
Salzburg, Austria

Contact
Eva Silberer
t +49 201 8128-202
e eva.silberer@vgbe.energy

Konferenzen | Fachtagungen

DIHKW 2024
Energieversorgung Deutschlands – Chancen und Risiken

Fachtagung mit Fachausstellung

16. und 17. April 2024
Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

Kontakt
Jennifer Kulinna
t +49 201 8128-206
e vgbe-dihkw@vgbe.energy

vgbe KELI 2024
Elektro-, Leit- und Informations-technik in der Energieversorgung

mit Fachausstellung

14 to 16 May 2024
Bonn, Germany

Contact
Ulrike Troglio
t +49 201 8128-282
e vgbe-keli@vgbe.energy

vgbe Dampfturbinen und Dampfturbinenbetrieb 2024
vgbe Steam Turbines and Operation of Steam Turbines 2024

mit Fachausstellung/
with Technical Exhibition

28 and 29 May 2024
Würzburg, Germany

Contact
Diana Ringhoff
t +49 201 8128-232
e vgbe-dampfturb@vgbe.energy

vgbe Chemiekonferenz 2024
vgbe Conference Chemistry 2024

mit Fachausstellung/
with Technical Exhibition

22 to 24 October 2024
Potsdam, Germany

Contact
Ines Moors
t +49 201 8128-222
e vgbe-chemie@vgbe.energy

Seminare | Workshops

Basics Wasserchemie im Kraftwerk

vgbe | Online-Seminar

21. und 22. Februar 2024

Kontakt
Eugenia Hartmann
t +49 201 8128-266
e vgbe-wasserdampf@vgbe.energy

Information on all events with exhibition
Auskunft zu allen Veranstaltungen mit Fachausstellung

t +49 201 8128-310/-299
e events@vgbe.energy

Updates **www.vgbe.energy**

Wasseraufbereitung
vgbe | Seminar

20. und 21. März 2024
Velbert, Deutschland

Kontakt
Eugenia Hartmann
t +49 201 8128-266
e vgbe-wasseraufb@vgbe.energy

Flue Gas Cleaning 2024

Workshop

22 and 23 May 2024
Frankfurt a.M., Germany

Contact
Ines Moors
t +49 201 8128-222
e vgbe-flue-gas@vgbe.energy

Chemie im Wasser-Dampf-Kreislauf

vgbe | Seminar

13. und 14. November 2024

Kontakt
Eugenia Hartmann
t +49 201 8128-266
e vgbe-wasserdampf@vgbe.energy

Offshore Windenergieanlagen – Arbeitsmedizin 2024

Fortbildungsveranstaltung

6. und 7. September 2024
Emden, Deutschland

Kontakt
Dr. Gregor Lipinski
t: +49 201 8128 272
t +49 201 8128-272
e gregor.lipinski@vgbe.energy

Immissionsschutz- und Störfallbeauftragte 2024

Fortbildungsveranstaltung

26. bis 28. November 2024
Höhr-Grenzhausen, Deutschland

Kontakt
Stephanie Wilmsen
t +49 201 8128-244
e vgbe-immission@vgbe.energy

Exhibitions and Conferences

E-world energy & water

20. bis 24. Februar 2024
Essen, Deutschland

www.e-world-essen.com

Enlit Europe 2024

22 to 24 October 2024
Milan, Italy

www.enlit-europe.com/

56. Kraftwerkstechnisches Kolloquium

8. und 9. Oktober 2024
Dresden, Deutschland

https://t1p.de/tud-kwt (Kurzlink)