

**GreCoCon - Green Combustion Control –
Industrielle Verbrennungsregelung für
hohe, volatile
Wasserstoffanteile auf Basis von
Flammensignalen**

Thema kurz: GreCoCon

Das Urheberrecht an diesem Bericht und sämtlichen Beilagen verbleibt bei uns.

Der Bericht ist dem Empfänger nur zum eigenen Gebrauch anvertraut und darf ohne unsere schriftliche Genehmigung weder kopiert oder vervielfältigt noch Dritten mitgeteilt oder zugänglich gemacht werden.

FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT INDUSTRIEOFENBAU E.V.
Postfach 71 08 64, 60498 Frankfurt/Main



TTgoesH2 - GreCoCon

Leittechnologie-Vorhaben „TTgoesH2“: Integration von Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger in die industrielle und gewerbliche Thermoprozesstechnik

Teilprojekt 2 „GreCoCon“: Industrielle Verbrennungsregelung für hohe, volatile Wasserstoffanteile auf Basis von Flammensignalen.

Projektzeitraum: 01.01.2021 - 31.12.2023

Im Rahmen des Programms Leittechnologien der Energiewende bestand die Möglichkeit das Themengebiet „Integration von Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger in die industrielle und gewerbliche Thermoprozesstechnik - TTgoesH2“ umfassend zu untersuchen und mit mehreren parallelen, thematisch eng verbundenen Forschungsvorhaben wesentliche Fragestellungen zu bearbeiten. Aus dem Transformationsansatz und um der zu erwartenden Veränderung als Technologieführer entgegenzutreten, kristallisierten sich drei wesentliche Einzelschwerpunkte für das Leittechnologievorhaben heraus:

- Verbrennungssysteme mit kleinsten Schadstoffemissionen für den Energieträger Wasserstoff bzw. dessen Gemisch mit Erdgas.
- Neuartige Verbrennungsregelungen bei veränderlichen Gasgemischen inkl. der Prozessführung unter veränderten Abgas- und Wärmeübertragungsbedingungen.
- Neue Werkstoffkonzepte für den Einsatz in Thermoprozessanlagen mit veränderten Abgaszusammensetzungen.

Im hier vorgelegten Kurzbericht werden die Ergebnisse des zweiten der drei Teilvorhaben vorgestellt.

Das Teilprojekt 2 „Green Combustion Control (GreCoCon)“ hat zum Ziel, ein innovatives Regelungskonzept für industrielle Verbrennungsprozesse zu entwickeln. Dieses soll insbesondere auf in Folge der Energiewende im Gasnetz auftretende, hohe volatile Wasserstoffanteile in Brenngasen detektieren und ausregeln. Das dazu entwickelte Messkonzept basiert auf der Analyse des optischen Flammensignals bzw. der Chemilumineszenz, welche mittels kostengünstiger Sensoren erfasst wird. Ein darauf aufbauendes Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Anpassung einer Verbrennungsregelung, welche die erfassten optischen Flammensignale verarbeitet und auf Schwankungen in der Gaszusammensetzung reagieren kann, um eine optimale Verbrennungseffizienz und niedrige Emissionen von Thermoprozessanlagen zu gewährleisten. Die Kurzfassung der erzielten Ergebnisse folgt im weiteren Verlauf dieses Dokuments. Den detaillierten Abschlussbericht zum Vorhaben erhalten Sie auf Anfrage bei den genannten Ansprechpartnern.

Keywords:

Wasserstoff, Erdgas, Energiewende, industrielle Verbrennungsprozesse, Chemilumineszenz, optische Flammensignale, Regelungskonzept, Verbrennungseffizienz

Ergebnisse Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG):

Der methodische Ansatz des Projekts beinhaltet die Nutzung selektiver Chemilumineszenzbänder und anderer emissionsrelevanter Merkmale der Flamme. Daher fanden unter anderem zunächst im Labor Untersuchungen hinsichtlich wesentlicher Einflussgrößen wie Flammengometrie und Positionierung von Ionisations-Elektroden oder UV-Sonden in konventionellen Industriegasbrennern statt. In umfangreichen Voruntersuchungen erfolgte eine optische Charakterisierung von vorgemischten, laminaren und nicht vorgemischten, turbulenten Flammen in Abhängigkeit von Wasserstoffvolumenanteil und Luftzahl λ am IVG. In der Folge wurde eine Strategie zur Erkennung des H_2 -Inhalts entwickelt, welche auf der Detektion der Flammemissionsspektren im Bereich der Peaks von OH^* - und CH^* -Radikalen gründet. Das dedizierte Vorgehen zur Nutzung dieser Information der Flamme lässt sich wie folgt skizzieren:

- (i) Das gesamte Emissionsspektrum wird auf den maximalen Peak, der für OH^* steht, normiert.
- (ii) Es werden zwei Wellenlängenbereiche gewählt, die gewählten Signalbereiche für die OH^* - und CH^* -Radikale sind.
- (iii) Das Signal wird über jeden der gewählten Bereiche integriert, und das Verhältnis der integrierten Signale aus den beiden Bereichen wird berechnet.
- (iv) Die Schritte (i) bis (iii) werden für alle Versuche wiederholt und die Signalverhältnisse werden als Funktion des H_2 -Inhalts aufgetragen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden mehrere Wellenlängenbereiche nach dem oben beschriebenen Verfahren getestet. Als optimal erwiesen sich die Bereiche, die dem CH^* (425 – 440 nm) und dem OH^* (300 – 320 nm) entsprechen. Der sich daraus ergebende Verlauf des Signalverhältnisses von CH^*/OH^* ($S_{425-440}/S_{300-320}$) als Funktion des H_2 -Inhalts ist in Abbildung 1 für alle λ -Bedingungen dargestellt. Es ist eine monotone Abnahme des Signalverhältnisses zu erkennen. Der einzelne Punkt, der sich von dem Verlauf in Abbildung 1 für den Fall $\lambda = 1,2$ bei 35 Vol.-% H_2 unterscheidet, ist als Ausreißer zu betrachten. Die Spektren wurden für die Luftzahl $\lambda = 1$ in einer weiteren Höhe über demselben Brenner und in derselben Höhe mit einer nicht vorgemischten, turbulenten Flamme gemessen. Es wurden keine wesentlichen Unterschiede dabei festgestellt.

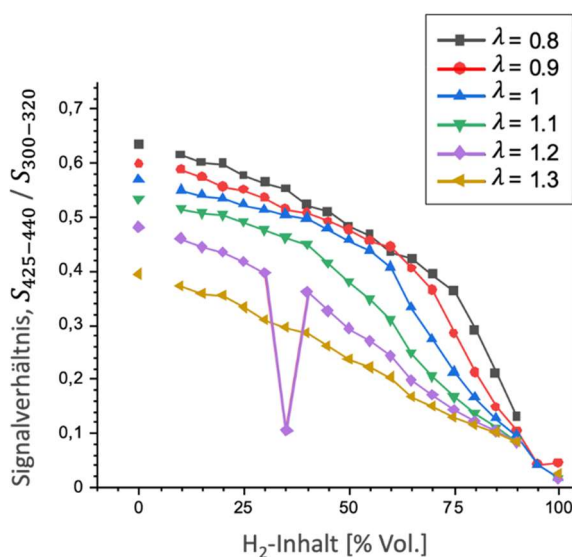


Abbildung 1: Verhältnis der Chemilumineszenz-Signalbanden für CH^* und OH^* als Funktion des Wasserstoffinhalts, für die laminare vorgemischte Erdgas / Luft-Bunsenflamme, berechnet für alle getesteten Luft-Brennstoff-Verhältnisse λ (links).

Den Voruntersuchungen im Labor folgend fand die Umsetzung und Erprobung der Methodik in einer industrienahen Umgebung im Technikumsmaßstab sowie die Entwicklung der entsprechenden Regelstrecken statt.

Ergebnisse DBI - Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI):

Untersuchungen am DBI - Gastecnologisches Institut gGmbH Freiberg haben gezeigt, dass es möglich ist, wesentliche Kenngrößen der Verbrennung eines unmodifizierten Erdgas-Geläsebrenners (Brennerleistung, Wasserstoffgehalt im Brenngas, Luftzahl), integriert in ein wassergekühltes 500 kW-Prüfflammrohr, auf der Basis optischer Signale zu erfassen. Zum Einsatz kamen handelsübliche Flammenwächter F300K, die sich lediglich in der Beschichtung der Photodioden (für die Untersuchungen empfindlich im Bereich 220 – 360 nm sowie 408 – 460 nm) von kommerziell erhältlichen Produkten unterscheiden.

Basierend auf der Annahme, dass sich die Intensität der Verbrennungsreaktion auch in der Amplitude des Wechselspannungssignals der F300K widerspiegelt, wurden im Rahmen des Projekts mehrere Kenngrößen entwickelt und umfangreich getestet.

Es hat sich gezeigt, dass Kenngrößen, die einen Anteil des Signals der Fotodiode im Bereich des CH^* -Radikals enthalten, als Regelgröße ungeeignet sind. Der Grund hierfür liegt vermutlich im vergleichsweise geringen Signal-Rausch-Verhältnis des Signals dieser Diode. Die Kenngrößen, welche sich aus dem Signal der im Bereich des OH^* -Radikals sensitiven Fotodiode ergeben, weisen hingegen stetige, widerspruchsfreie und differenzierbare Verläufe auf. Somit sind sie als Regelgröße nutzbar. Mögliche Regelgrößen für die Bewertung von Flammensignalen sind die Flacker- und Flickerfrequenz sowie die Kenngröße RECOP. Abbildung 2 zeigt die Flackerfrequenz und RECOP in Abhängigkeit von der Leistung für Wasserstoffvolumenanteile von 0, 20, 35 und 50 Vol.-% bei einer Luftzahl von (a) $\lambda = 1,05$ und (b) $\lambda = 1,25$.

Flackerfrequenz korreliert positiv mit steigender Leistung, steigender Luftzahl und steigendem Wasserstoffvolumenanteil in Erdgas. Hingegen sinkt RECOP mit und steigendem Wasserstoffvolumenanteil in Erdgas, steigender Leistung und steigender Luftzahl. Aufgrund der gegenläufigen Trends ist somit eine eindeutige Charakterisierung des Brennerzustandes in Hinblick auf die Brennerleistung, die Luftzahl und den Wasserstoffvolumenanteil im Erdgas möglich.

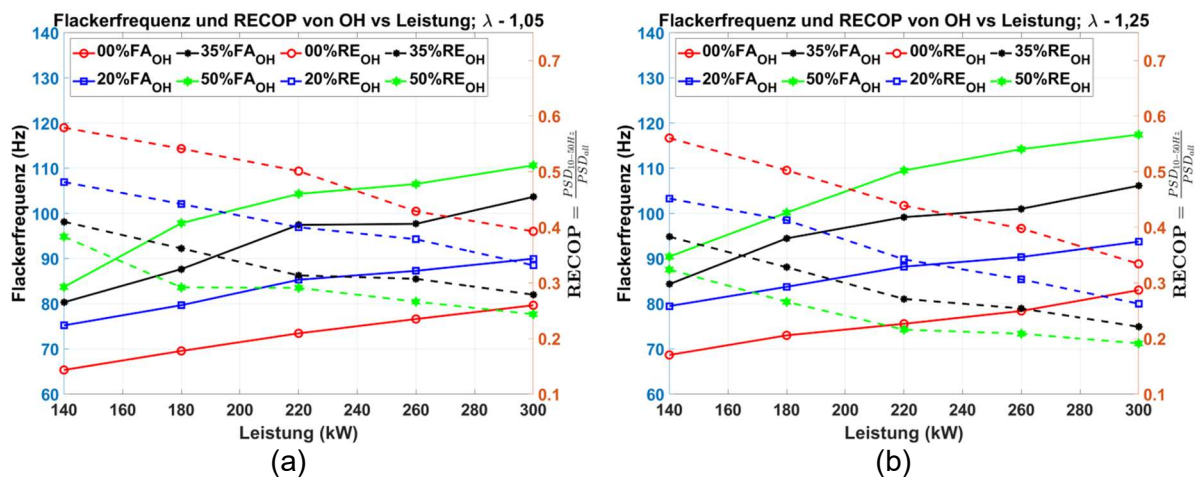


Abbildung 2: Darstellung der Versuchsdaten von Flackerfrequenz (links) und RECOP (rechts) für eine Luftzahl von (a) $\lambda = 1,05$ und (b) $\lambda = 1,25$.

Obwohl es im Rahmen des Projekts nicht möglich war, ein vollständiges Regelmodell zu entwickeln und im Rahmen von Komplexversuchen zu testen, zeigen die Ergebnisse, dass es möglich ist, ein solches Regelmodell auf Basis optischer Informationen aus dem Brennraum mit einfach verfügbarer Flammenüberwachungstechnik zu entwickeln. Nötig sind weitere Versuche zur Verifizierung der bisherigen Ergebnisse und zum Vervollständigen der Versuchsmatrix.

Ergebnisse Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.:

Am GWI kam ein industrielles, aus zwei Einzelsensoren der Fa. BFI (CFC x000 Serie) bestehendes Flammenüberwachungssystem zum Einsatz, das im Rahmen der Arbeiten für die spezifischen Anforderungen der angestrebten Messtrategie optimiert wurde. Darin erfolgte eine Kanaltrennung des einfallenden Lichtes, in den UV-Anteil ($< 347 \text{ nm}$) und den langwelligen Anteil ($> 347 \text{ nm}$). Diese ermöglichte es die spektrale Charakteristik des einfallenden Lichts mit zwei für den jeweiligen Wellenlängenbereich optimierten Flammensensoren zu erfassen. Die optische Anordnung erlaubte zudem eine optimale Überlagerung der Sensorensichtfelder in der Brennkammer, bei lediglich geringen Verlusten in der Lichtausbeute durch den Strahlteiler. Mit dem System war sowohl die Nutzung der Sensorrohrsignale für die Entwicklung eigener Auswerteroutinen als auch der integrierten elektronischen Auswertung des Seriengerätes möglich. Nach Versuchen im Labormaßstab fand eine Validierung der Ergebnisse im Technikumsmaßstab an einem industriellen Brennersystem statt sowie ein Komplexversuch an einem im Rahmen von TP 1 (ULoBurn) für Wasserstoff optimierten Brenner.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch ein Ergebnis des Komplexversuches. Das aus den Sensorrohrsignalen ermittelte Signalverhältnis $r_{S1/S2}$ ändert sich signifikant mit dem H_2 -Anteil im Brenngas und erreicht im Beispiel seinen Maximalwert bei 30 Vol.-%. Da das Signalverhältnis i. d. R. nicht als alleiniges Merkmal für die Bestimmung des H_2 -Anteils ausreichend ist, wurde als weiteres Merkmal die Frequenzcharakteristik mit Hilfe einer FFT-Analyse ausgewertet. Die Bestimmung des H_2 -Anteiles aus beiden ermittelten Merkmalen, Signalverhältnis und Frequenz, erfolgte kennfeldbasiert. Das für ein Verbrennungssystem ermittelte Kennfeld kann im Anschluss in das vorgeschlagene Regelungskonzept eingebunden werden.

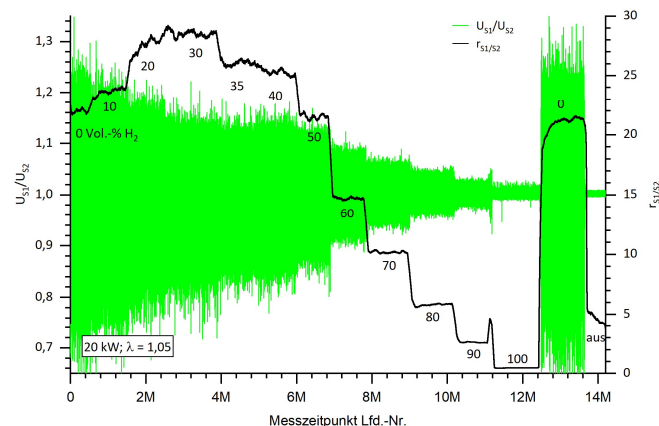


Abbildung 3: Signalverhältnis bei sich zeitlich änderndem H_2 -Anteil im Brenngas und 20 kW Brennstoffleistung, $\lambda = 1,05$ – Komplexversuch an H_2 -optimiertem Brenner.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Dioden mit geeigneter spektraler Charakteristik ermöglichen es, die entwickelte Messtrategie (Verhältniswertbildung) auf industrielle Sensoren zu übertragen.
- Das Verhältnis der Signalamplituden reicht als alleiniges Merkmal zur Bestimmung des H_2 -Anteils im Brenngas i. d. R. nicht aus.
- Unter Hinzunahme der Frequenzauswertung des Signals ist die Bestimmung des H_2 -Anteils aus dem Amplitudenverhältnis & Frequenz prinzipiell für den gesamten Bereich von 0 – 100 Vol.-% H_2 möglich.
- Kennfelder beschreiben den Zusammenhang von Amplitudenverhältnis und Frequenz mit dem H_2 -Anteil, sind aber nicht ohne Weiteres auf andere Verbrennungssysteme und Detektionsanordnungen übertragbar.
- Es besteht eine messbereichsabhängige Limitierung in der Genauigkeit der Bestimmung des H_2 -Anteils durch die begrenzte Empfindlichkeit der Sensoren, die Signalcharakteristik und das Kennfeld.

Zusammengefasste Erkenntnisse:

Im Folgenden wird die Ableitung einer Roadmap für den Einsatz von Wasserstoff in Industrieöfen anhand der erwarteten Schritte in deutschen und europäischen Gasnetzen beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass sowohl Gasnetzsegmente mit bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff im Erdgasnetz als auch Segmente mit etwa 100 Vol.-% H₂ (gemäß der 5. Gasfamilie nach [31]) vorkommen können. Grundsätzlich können außerhalb von Europa auch größere Bereiche bei H₂-Zumischung möglich sein. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich weltweit in öffentlichen Gasnetzen eine Grenze einstellt, die mit einfachen technischen Mitteln beherrschbar ist.

Das Projektziel bestand darin, eine Brennerregelung zu entwickeln, die auf optischen Signalen aus der Brennkammer und möglicherweise weiteren Kenngrößen wie dem Ionisationsstrom basiert. Diese Regelung soll Schwankungen in der Gaszusammensetzung ausgleichen, die durch die Beimischung von Wasserstoff entstehen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, die optische Flammenbildaufnahmen und spektral aufgelöste Chemilumineszenzmessungen an verschiedenen Flammentypen beinhalteten. Dabei wurden Variationen des Wasserstoffvolumenanteils im Brenngas und der Luftzahl berücksichtigt.

Die im Zuge dieser Laboruntersuchungen entwickelte Messstrategie zielt darauf ab, den Wasserstoffvolumenanteil durch die Erfassung der Intensität charakteristischer Spektralbanden in den Flammenemissionsspektren zu bestimmen. Die Verifizierung dieser Strategie erfolgte im Labor unter Verwendung kommerziell verfügbarer Messtechnik an den Modellflammen der Laborbrenner. In einem folgenden Schritt erfolgte die Anpassung der Versuchsanlagen im Technikum, um die entwickelte Messstrategie an industriellen Brennersystemen zu erproben und zu optimieren.

Es hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz von Dioden mit geeigneter spektraler Charakteristik sich die entwickelte Messstrategie auf industrielle Sensoren übertragen lässt. Es wurde festgestellt, dass unter Einbeziehung der Frequenzbewertung des Signals die Bestimmung des Wasserstoffanteils im gesamten Bereich von 0 – 100 Vol.-% prinzipiell möglich ist. Die Frequenzbewertung mittels FFT hat sich als zielführend erwiesen.

Im Rahmen des Projektes wurden zudem weitere potenzielle Regelgrößen wie die Flacker- und Flickerfrequenz sowie RECOP identifiziert, um eine präzise Charakterisierung des Brennerzustands zu ermöglichen. Es ist festzuhalten, dass das Verhältnis der Signalamplituden allein nicht ausreicht, um den Wasserstoffanteil im Brenngas genau zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass ein Regelmodell auf Basis optischer Informationen aus dem Brennraum unter Verwendung vorhandener Flammenüberwachungstechnik möglich ist. Dennoch sind weitere Versuche erforderlich, um die Ergebnisse zu verifizieren. Die Verwendung von (interpolierten) Kennfeldern hat gezeigt, dass die Genauigkeit des Zusammenhangs zwischen Amplitudenverhältnis, Frequenz und dem Wasserstoffanteil im Brenngas stark von der Anzahl und Position der Stützwerte abhängt.

Ein Ergebnis der Komplexversuche mit speziell für Wasserstoff optimierten Brennern ist, dass sich die im Technikum ermittelten Kennfelder sich bisher nicht ohne Weiteres auf andere Verbrennungssysteme und Detektionsanordnungen übertragen lassen. Stattdessen ist eine individuelle Anpassung an jedes System nötig. Ferner lässt sich aus den durchgeführten Versuchen schlussfolgern, dass die Genauigkeit der Bestimmung des Wasserstoffanteils durch die begrenzte Empfindlichkeit der Sensoren, die Signalcharakteristik und das Kennfeld messbereichsabhängig limitiert ist. Prinzipiell ist jedoch die Nutzung der kennfeldbasierten Bestimmung im Rahmen einer Verbrennungsregelung möglich. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um kommerziell verfügbare Produkte zu entwickeln.

Impressum

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI)

Halsbrücker Straße 34, 09599 Freiberg

Bearbeiter: Dr. J. Nitzsche, Hr. M. Wiersig, Hr. P. Götze

Joerg.Nitzsche@dbi-gruppe.de



Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Hafenstraße 101, 45356 Essen

Bearbeiter: Dr. A. Giese, Hr. M. Röder



Universität Duisburg-Essen, Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG)

Carl-Benz-Str. 199, 47057 Duisburg

Bearbeiter: Professor K. Mohri, Hr. A. Müller



Dieses Teilprojekt der Leittechnologieprojektes „TTgoesH2“ wurde gefördert unter der IGF-Projektnummer 32 LBG durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sowie unter Mitwirkung der federführenden Forschungsvereinigung „Forschungskuratorium Maschinenbau e.V.“. Wir bedanken uns herzlich!



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages