

Auswirkungen eines schwankenden Wasserstoffanteils im Erdgas auf die Industrie

Gregor Berger, Florian Schilling, Harald Raupenstrauch, Sascha Grimm

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Franz-Josef-Str. 18, A-8700 Leoben, +43 3842 402-5801, gregor.berger@unileoben.ac.at, www.tpt-unileoben.at

Kurzfassung:

Wird in Zukunft Wasserstoff über erneuerbare Energieträger erzeugt und direkt in das Erdgasnetz eingespeist, kann dies zu schwankenden Wasserstoffanteilen im Erdgas führen. Industriebrenner sind auf die Verbrennung von Erdgas eingestellt und müssen auf einen möglichen schwankenden Wasserstoffanteil angepasst werden. Der Lehrstuhl Thermoprozesstechnik wurde von der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach beauftragt die Auswirkungen eines schwankenden Wasserstoffanteils im Erdgas auf Industriebrenner zu analysieren und Lösungsstrategien zu finden, wie damit umgegangen werden kann.

Keywords: Erdgasnetz, Wasserstoff, verbrennungstechnische Eigenschaften, Inertgase

1 Einleitung

Für die Verwertung der negativen Residuallasten, die zukünftig durch die Einbindung von erneuerbaren Energien ins Stromnetz entstehen werden, eignet sich die Elektrolyse von Wasserstoff. Die Gasinfrastruktur in Österreich stellt einen möglichen Speicher dieser negativen Residuallasten dar. Wasserstoff kann methanisiert und eingespeist oder direkt dem Erdgas beigemischt werden. Wird Wasserstoff direkt ins Erdgas eingespeist, kann dies, aufgrund der Unterschiede in der saisonalen und der täglichen Verfügbarkeit von elektrischer Energie aus Erneuerbaren, zu Schwankungen des Wasserstoffanteils führen. Eine Wasserstoff-Erdgasmischung hat andere verbrennungstechnische Eigenschaften als reines Erdgas. Da Industriebrenner optimal auf die Verbrennung von Erdgas eingestellt sind, wurde der Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik von der Österreichischen Vereinigung für das Gas- und Wasserfach (ÖVGW) beauftragt herauszufinden, wie mit Schwankungen des Wasserstoffanteils im Erdgas umgegangen werden kann.

2 Grundlagen und Methodik

Die Änderungen der verbrennungstechnischen Eigenschaften, bei einer Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas, werden mit dem GRI 3.0 Reaktionsmechanismus [1] und der dazugehörigen thermodynamischen Datenbank berechnet. Diese umfasst 53 Stoffe und 325 Reaktionen, welche zur detaillierten Abbildung der Methanverbrennung optimiert sind. Zur Lösung dieser komplexen Reaktionssysteme wird die Toolbox Cantera [2] verwendet. Mit dieser Toolbox können die erstellten Programme für die durchgeführten Berechnungen aufgerufen und ausgeführt werden.

Die Zusammensetzung der untersuchten Gase wird in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Zusammensetzung der untersuchten Gase

	Anteil in Vol.-%					
	Erdgas [3]	Wasserstoff	Argon	Stickstoff	Kohlendioxid	Luft
CH ₄	97,97	-	-	-	-	-
N ₂	0,87	-	-	100,00	-	79,00
CO ₂	0,11	-	-	-	100,00	-
H ₂	-	100,00	-	-	-	-
O ₂	-	-	-	-	-	21,00
C ₂ H ₆	0,92	-	-	-	-	-
C ₃ H ₈	0,13	-	-	-	-	-
Ar	-	-	100,00	-	-	-

Im Folgenden werden die untersuchten verbrennungstechnischen Eigenschaften und Toleranzgrenzen, für die Änderung dieser Eigenschaften, vorgestellt.

2.1.1 Sauerstoffbedarf

In modernen industriellen Ofenanlagen wird versucht, die Luftzahl aus Gründen der Energieeffizienz möglichst gering zu halten. Übliche Werte für die Luftzahl bewegen sich im Bereich von 1,05 bis 1,10. Werden an den Brennern keine Neueinstellung durchgeführt, so sollte die Steigerung des volumetrischen Sauerstoffbedarfs maximal 5% betragen. Ansonsten besteht die Gefahr, dass eine unterstöchiometrische Ofenatmosphäre entsteht. Diese ist jedoch bei gewissen metallurgischen Prozessen erwünscht. So werden Wiedererwärmungsöfen in Teilabschnitten bewusst mit einer Luftzahl von ca. 0,9 unterstöchiometrisch betrieben, damit einer Verzunderung entgegengewirkt wird. Um die reduzierende Atmosphäre zu erhalten, darf der volumetrische Sauerstoffbedarf um maximal 7% gesenkt werden.

2.1.2 Reaktionsenthalpie

Die Reaktionsenthalpie beschreibt den bei der Verbrennung in Wärme umgewandelten Energieinhalt in einem offenen System. Zur Berechnung wird zuerst die Enthalpie der Edukte über die thermodynamische Datenbank bestimmt. Anschließend erfolgt die Berechnung des Gleichgewichtes aller 53 Stoffe mittels freier Systementhalpieminimierung. Hierbei werden die Temperatur bei 293 K und der Druck bei 101.325 Pa konstant gehalten und anschließend die Enthalpie der Produkte bestimmt. Die Differenz der Enthalpie der Edukte und Produkte stellt die Reaktionsenthalpie dar. [4]

Moderne Prozessregelungen sollten eine Änderung der Reaktionsenthalpie von 10% ausgleichen können. Somit wurde dies als Grenze bezüglich der Änderung der Reaktionsenthalpie bestimmt.

2.1.3 Adiabate Verbrennungstemperatur

Die adiabate Verbrennungstemperatur ist die theoretische Temperatur, die eine Flamme erreichen würde, wenn keine Wärme an ihre Umgebung abgegeben wird. Somit ist sie die maximal erreichbare Temperatur und stellt einen Vergleichswert für verschiedene Flammen

dar. Um diese zu bestimmen, wird das Gleichgewicht durch freie Systementhalpieminimierung bei konstantem Druck bestimmt. Da keine Energieabgabe erfolgt, wird angenommen, dass die Enthalpie der Edukte gleich der Enthalpie der Produkte sein muss. Die erforderliche Temperatur der Produkte kann über die thermodynamische Datenbank bestimmt werden. Da die Gleichgewichtszusammensetzung eine Funktion der Temperatur ist, muss dieser Prozess iterativ gelöst werden. Als Ausgangszustand werden 293 K und 101.325 Pa gewählt. [4]

Eine steigende Flammentemperatur erhöht die Belastung der Feuerfestzustellung, insbesondere von Brennersteinen für Decken- und Schüsselbrenner. In der Regel sollte eine Zunahme der Temperatur um 80 K für bestehende Ofenanlagen verkraftbar sein. Prozesse im Hochtemperaturbereich, wie sie in der stahl-, glas-, oder mineralverarbeitenden Industrie beheimatet sind, benötigen hohe Temperaturen, da der Wärmetransport hauptsächlich über Strahlung erfolgt. Um den Wirkungsgrad in vernünftigen Ausmaßen zu halten, sollte der Temperaturabfall der adiabaten Verbrennungstemperatur maximal 50 K betragen.

2.1.4 Laminare Flammgeschwindigkeit

Um die Flammenlängen von vorgemischten Verbrennungsvorgängen zu vergleichen kann die laminare Flammgeschwindigkeit s_L herangezogen werden. Diese gibt an, wie schnell sich die laminare Flammenfront relativ zur Strömung bewegt. Sie ist eine wesentliche Einflussgröße für die Form von Vormischflammen und berücksichtigt Transporteffekte auf Basis von Wärmeleitung und Diffusion. In Abbildung 1 ist eine laminare vorgemischte 1D Flamme abgebildet, die durch die Erhaltungsgleichungen für Masse, Stoffe und Energie beschrieben wird.

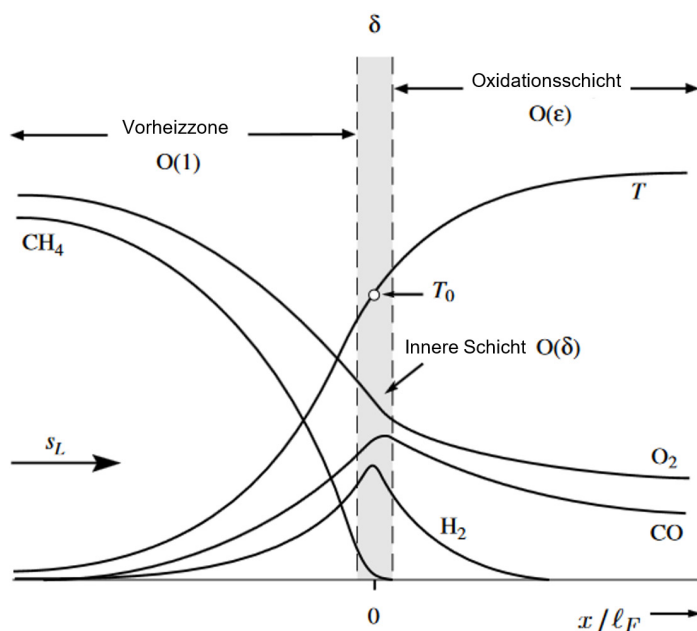


Abbildung 1: Konzept der laminaren Flammgeschwindigkeit [5]

Um die laminare Flammgeschwindigkeit zu berechnen, wird die Einlassgeschwindigkeit der unverbrannten Gasmischung so angepasst, dass die Flammenfront ihre Position nicht ändert. Dies wird mittels Referenztemperatur T_0 realisiert. Ist dieser Zustand erreicht, entspricht die Einlassgeschwindigkeit der unverbrannten Mischung der laminaren Flammgeschwindigkeit.

Erhöht oder vermindert sich die laminare Flammgeschwindigkeit um ca. 8%, verkürzt oder verlängert sich die Flamme um ca. 9% – unter der Annahme konstanter Turbulenz und einer kegelförmigen Flamme [5]. Für spezielle Wärmebehandlungsprozesse kann dies aufgrund der Temperaturverteilung grenzwertig sein.

3 Maßnahmen zur Bewältigung schwankender Wasserstoffanteile

Auf Basis der Berechnungen werden Schwankungsbreiten des Wasserstoffanteils definiert, in denen sich die Änderungen der verbrennungstechnischen Eigenschaften im tolerierbaren Bereich bewegen. Wenn die Wasserstoffanteile über diesen Schwankungsbreiten liegen, werden Strategien entwickelt, wie mit größeren Schwankungen des Wasserstoffanteils umgegangen werden kann.

3.1 Mess- und Regelkonzept zur Anpassung an den Sauerstoffbedarf

Wird Wasserstoff in das Erdgasnetz eingespeist, sinkt der stöchiometrische Sauerstoffbedarf linear mit zunehmendem Wasserstoffanteil, wie in Abbildung 2 dargestellt. Wird Luft als Oxidationsmittel eingesetzt, kann der stöchiometrische Luftbedarf über den stöchiometrischen Sauerstoffbedarf und den Sauerstoffanteil von 21% in der Luft berechnet werden. Der reale Fall unterscheidet sich allerdings von der stöchiometrischen Betrachtung. Durch die Bildung von Kohlenmonoxid und diversen Radikalen und dem Einstellen von chemischen Gleichgewichten im Verbrennungsprozess, reicht eine vereinfachte stöchiometrische Betrachtung nicht aus. Um dies aufzuzeigen wird der Verbrennungsprozess von Wasserstoff-Erdgasgemischen über Cantera [2] modelliert. Das Ergebnis der Modellierung zeigt eine teils deutliche Abweichung des realen vom stöchiometrischen Oxidationsmittelbedarf. Der reale Oxidationsmittelbedarf liegt durchwegs unter dem stöchiometrischen. In einem Bereich von 10-35% Wasserstoff im Erdgas ist diese Abweichung am größten.

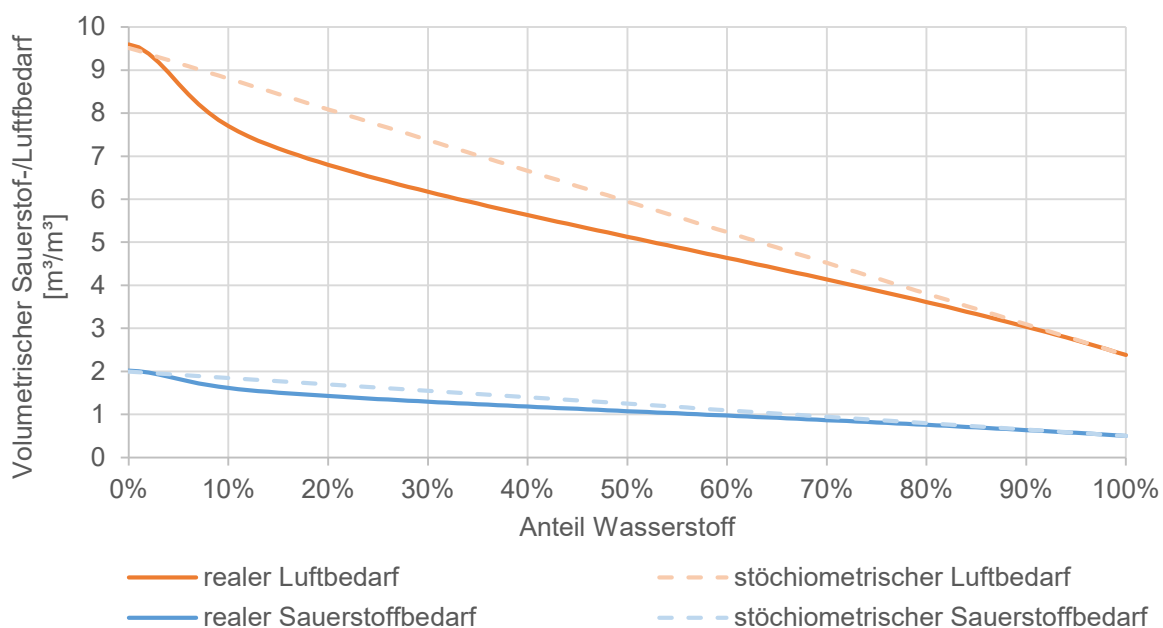


Abbildung 2: Realer und stöchiometrischer Oxidationsmittelbedarf eines Wasserstoff-Erdgasgemisches

Wenn dem Erdgas in Zukunft ein variabler Wasserstoffanteil beigemischt wird, müssen geeignete Mess- und Regelsysteme auf einen geminderten Sauerstoffbedarf durch eine variable Oxidationsmittelzufuhr reagieren. Es stellt sich die Frage, ob bereits Mess- und Regelsysteme bestehen, die diese Aufgabe übernehmen können.

3.2 Inertgasbeimengung

Bei verbrennungstechnischen Eigenschaften, die über eine Beimengung von Wasserstoff zu Erdgas angehoben werden, wird untersucht, ob diese durch eine zusätzliche Beimengung von Inertgasen wieder gesenkt beziehungsweise in welchem Ausmaß diese kompensiert werden können. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die laminare Flammgeschwindigkeit, die adiabate Verbrennungstemperatur und die massenspezifische Reaktionsenthalpie. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff ist die volumetrische Reaktionsenthalpie von Wasserstoff-Erdgasgemischen geringer als die von reinem Erdgas und kann somit nicht durch Inertgasbeimengung positiv beeinflusst werden. Können die genannten verbrennungstechnischen Eigenschaften durch eine Inertgasbeimengung beeinflusst werden, darf der benötigte Anteil an Inertgasen nicht zu hoch sein, um als geeignete Maßnahme zu dienen.

Da Wasserstoff sehr reaktionsfreudig ist und die kleinste atomare Masse aufweist, kommen nur inerte Gase mit einer erheblich höheren Masse in Frage. Als Inertgase werden Gase bezeichnet, die sehr reaktionsträge sind, sich also nur an wenigen chemischen Reaktionen beteiligen und bei Oxidationen den vorhandenen Sauerstoff verdrängen bzw. den Volumenanteil des Sauerstoffs reduzieren. [6]

Neben dem Einfluss auf die verbrennungstechnischen Eigenschaften muss auch auf die Wirtschaftlichkeit, die Umweltverträglichkeit und auf mögliche negative Auswirkungen auf Anlage und Prozess der beigemischten Gase geachtet werden. Im Folgenden werden die betrachteten Inertgase vorgestellt.

3.2.1 Argon

Edelgase sind die chemischen Elemente der Gruppe VIII des Periodensystems und haben ihren Namen wegen ihrer außerordentlichen Reaktionsträgheit. Aufgrund wirtschaftlicher Beurteilungskriterien und Aspekten der Umweltverträglichkeit, wie Radioaktivität, kommen aus der Gruppe der Edelgase nur Helium und Argon in Frage. Da die molare Masse von Helium ähnlich gering ist wie die des Wasserstoffes und somit der Einfluss auf eine Wasserstoff-Erdgasmischung gering ist, wurde Helium ebenfalls ausgeschlossen. Somit wird in weiterer Folge aus der Gruppe der Edelgase nur Argon betrachtet. [6, 7]

3.2.2 Kohlendioxid

Kohlendioxid entsteht bei jeder Verbrennung, bei der Kohlenstoff und ausreichend Sauerstoff vorhanden sind. Es ist ein dreiatomiges Molekül und der vierthäufigste Bestandteil der Erdatmosphäre mit knapp über 400 ppm. Es zählt zu den Treibhausgasen (THG), da es Infrarotstrahlung aufnimmt und diese in Bewegungsenergie umwandelt und wird zur Vergleichbarkeit anderer THG als Referenz herangezogen. Die Verwendung als Inertgas widerspricht dem formulierten Ziel des Projektes, das darauf abzielt durch Wasserstoff im Erdgas weniger Kohlendioxid zu emittieren. Wird das Kohlendioxid allerdings direkt vor Ort

mittels Carbon Capture and Utilization (CCU) gewonnen und anschließend die benötigte Menge gezielt eingebracht, könnten sich ökonomische und ökologische Vorteile ergeben, solange bei CCU erneuerbare Energie eingesetzt wird. Das beigemengte Kohlendioxid muss anschließend wieder aus dem Abgas abgetrennt werden. [6, 8]

3.2.3 Stickstoff

Stickstoff ist ein zweiatomiges Gas und bildet mit fast 79% den Großteil unserer Atmosphäre. Daher ist er auch bei allen Verbrennungen mit Luft als Oxidationsmittel vorhanden. Stickstoff wird industriell mittels Lindeverfahren gewonnen. Bei Verbrennungsvorgängen beginnt ab Temperaturen über 1.100°C die Kinetik von thermischen Stickoxiden (NO_x) bemerkbar zu werden. Stickoxide führen zum Abbau der Ozonschicht, tragen zu saurem Regen und zur Smogbildung bei. Aus diesem Grund wird gebildetes NO_x oft in der Abgasaufbereitung mittels SCR- oder SNCR-Verfahren wieder reduziert. Auch die Luftzahl, der Brennstoff und eine Abgasrückführung haben Einfluss auf die Entstehung. Neben dem thermischen NO_x wird noch zwischen prompten und Brennstoff- NO_x unterschieden. Bei hohen Temperaturen wird hauptsächlich thermisches NO_x gebildet. Eine Beimengung von Stickstoff zum Brenngas kann daher zu einer Erhöhung der NO_x -Emissionen führen. Das Ausmaß der Steigerung der Emissionen ist allerdings gering, da bei einer Verbrennung mit Luft als Oxidationsmittel schon ein großer Anteil von Stickstoff im Oxidationsmittel vorhanden ist. [6, 9]

3.2.4 Abgas

Abgas von Verbrennungsprozessen setzt sich aus vielen verschiedenen Gasen zusammen und ist abhängig von den Reaktanden und von der betrachteten Luftzahl. Auch die Temperatur des Abgases ist variabel. Im Zuge dieser Arbeit werden nur die Hauptbestandteile Kohlendioxid, Stickstoff, Wasserdampf und Sauerstoff bei einer Temperatur von 793 K untersucht. Der Vorteil von Abgas besteht darin, dass es bei jeder Verbrennung anfällt, kostenlos ist und somit ausgezeichnet zur Inertgasbeimengung geeignet ist. Allerdings kann der Rußanteil im Abgas zu negativen Auswirkungen auf den Prozess, wie etwa Verstopfungen, führen. Hier ist es ratsam die Wartungsintervalle dementsprechend anzupassen. [9]

4 Ergebnisse

Wie schon in Kapitel 3.2 erwähnt, steigt die laminare Flammgeschwindigkeit und die adiabate Verbrennungstemperatur durch eine Beimengung von Wasserstoff zu Erdgas, dargestellt in Abbildung 2 für die laminare Flammgeschwindigkeit bei verschiedenen Luftzahlen. Dies geht auf die hohe Reaktionskinetik, die hohe Diffusion und die hohe Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs zurück.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse werden Wasserstoffanteile für Erdgas abgeleitet, bei denen die verbrennungstechnischen Eigenschaften sich innerhalb der in Kapitel 3.2 angegebenen Toleranzen bewegen. Die Untersuchung des Sauerstoffbedarfs hat gezeigt, dass ab einem Anteil von 4% Wasserstoff im Erdgas in bestimmten Prozessen aus einer unterstöchiometrischen Atmosphäre eine überstöchiometrische wird. Die restlichen verbrennungstechnischen Eigenschaften erlauben höhere Anteile an Wasserstoff bzw. höhere Schwankungen des Wasserstoffanteils im Erdgas, wie in Tabelle 2 ersichtlich.

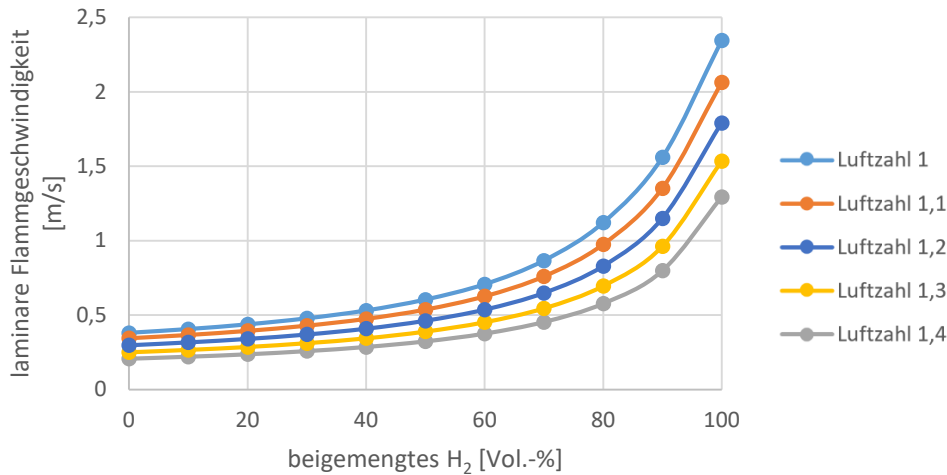


Abbildung 3: Vergleich der laminaren Flammgeschwindigkeit bei Beimengung von Wasserstoff zu Erdgas bei verschiedenen Luftzahlen [10]

Tabelle 2: Mögliche Wasserstoffanteile für betrachtete verbrennungstechnische Eigenschaften [10]

	Möglicher Wasserstoffanteil in Vol.-%
Reaktionsenthalpie	65
Adiabate Verbrennungstemperatur	70
Laminare Flammgeschwindigkeit	10
Sauerstoffbedarf	4

4.1 Mess- und Regelkonzept zur Anpassung an den Sauerstoffbedarf

In der Literatur werden mit der dynamischen Regelung auf Basis der Restsauerstoffmessung im Abgas, dargestellt in Abbildung 4, und dem elektronischen Verbundregler, dargestellt in Abbildung 5, bestehende Mess- und Regelsysteme zur automatischen Anpassung der Oxidationsmittelzufuhr an den Sauerstoffbedarf genannt. Beiden Systemen ist gemein, dass durch eine Messung des Sauerstoffgehalts im Abgas eine Einstellung der erforderlichen Oxidationsmittelmenge erfolgt. Der Unterschied liegt lediglich in der elektrischen Verbindung der Stellglieder beim elektrischen Verbundregler, die anstatt einer mechanischen zur Anwendung kommt.

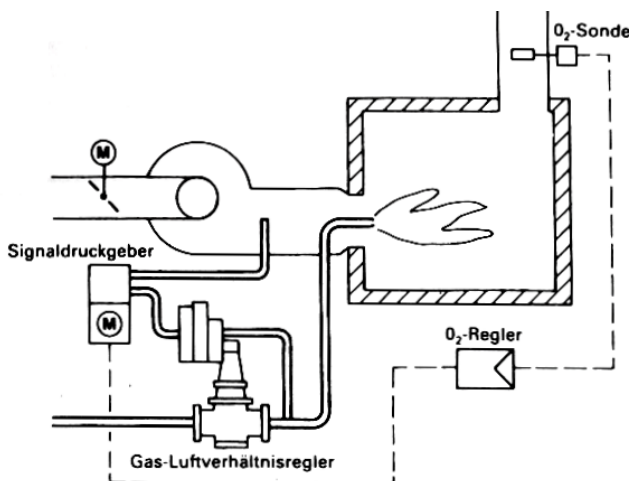


Abbildung 4: Pneumatisch dynamische Gemischregelung mit Lambdasonde [11]

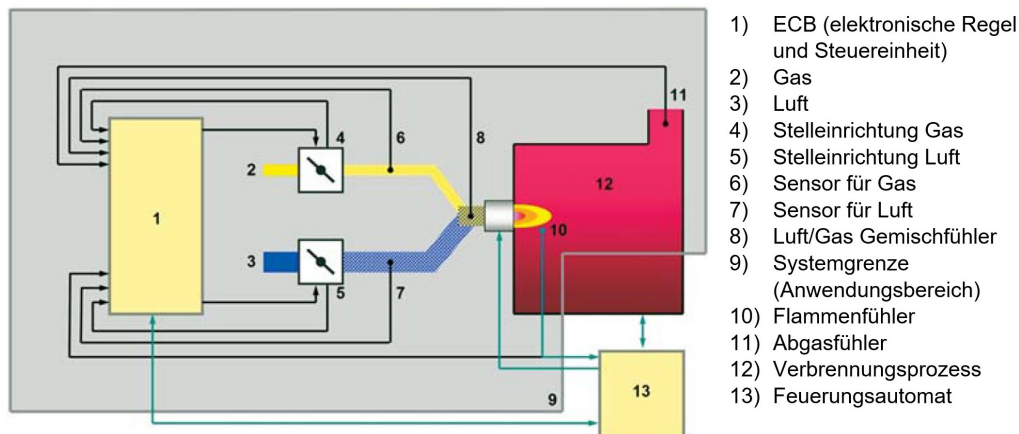


Abbildung 5: Aufbau einer elektronischen Verbundregelung für Brenngas/Luft-Gemisch nach EN 12067-2 [12]

Allerdings wird die Restsauerstoffmessung im Abgas nicht als geeigneter Regelparameter angesehen. Sensoren im Abgas sind oft hohen Staubbeladungen ausgesetzt und die Messung kann durch das Ziehen von Falschlufte verfälscht werden. Durch eine Bestimmung des Wasserstoffanteils im Erdgas über geeignete Verfahren können diese Probleme vermieden werden, wie in Abbildung 6 dargestellt.

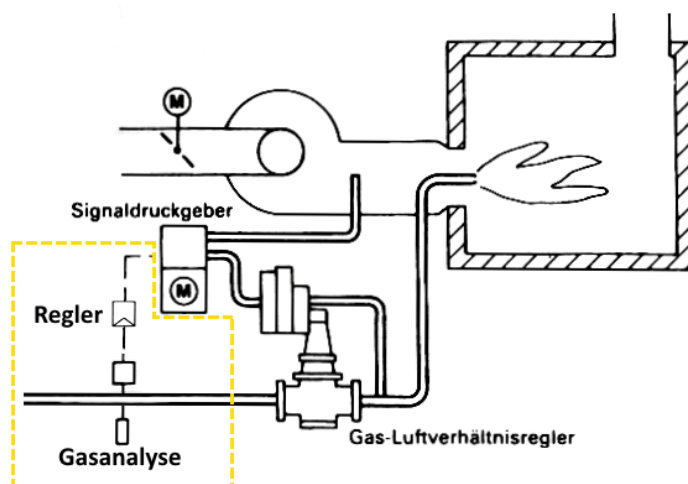


Abbildung 6: Pneumatisch dynamische Gemischregelung mit Gasanalyse (auf Basis von [11])

4.2 Inertgasbeimengung

Werden die in Tabelle 2 angegebenen Wasserstoffanteile für die Reaktionsenthalpie, die adiabate Verbrennungstemperatur und die laminare Flammgeschwindigkeit überschritten, können die genannten Eigenschaften durch eine Inertgasbeimengung auf dem Niveau bzw. innerhalb einer vertretbaren Toleranz von reinem Erdgas gehalten werden. Dafür werden die notwendigen Anteile an Argon, Kohlendioxid, Stickstoff und Abgas in einem Wasserstoff-Inertgas-Erdgasgemisch berechnet. Es zeigt sich, dass bei der laminaren Flammgeschwindigkeit die höchsten Inertgasanteile erforderlich sind. In Abbildung 7 sind die benötigten Mengen an den Inertgasen Kohlendioxid und Stickstoff dargestellt, um eine Mischung mit der gleichen laminaren Flammgeschwindigkeit wie Erdgas zu erhalten.

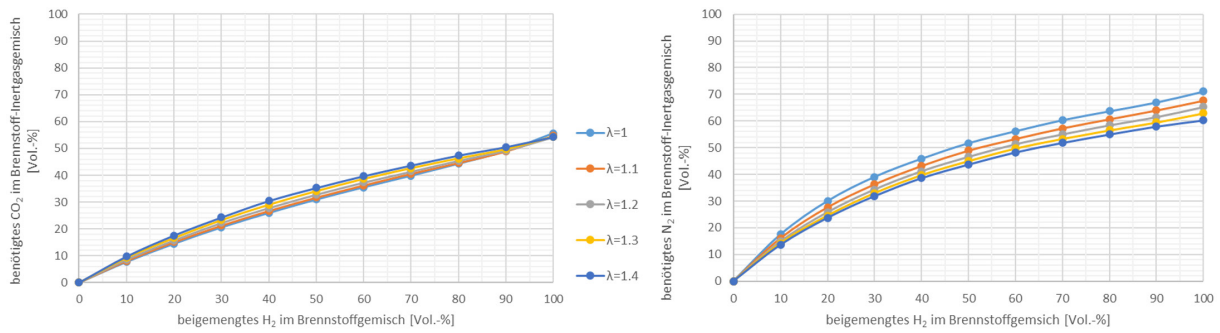


Abbildung 7: Benötigtes Kohlendioxid (links) und benötigter Stickstoff (rechts) für gleichbleibende laminare Flammgeschwindigkeit bei verschiedenen Luftzahlen

Werden die in Kapitel 3.2 definierten Toleranzgrenzen berücksichtigt, ergeben sich Volumenanteilsbereiche für jedes betrachtete Inertgas, in dem die Eigenschaften des Brenngas-Inertgasgemisches denen von Erdgas ähneln, dargestellt in Abbildung 8 bis Abbildung 11.

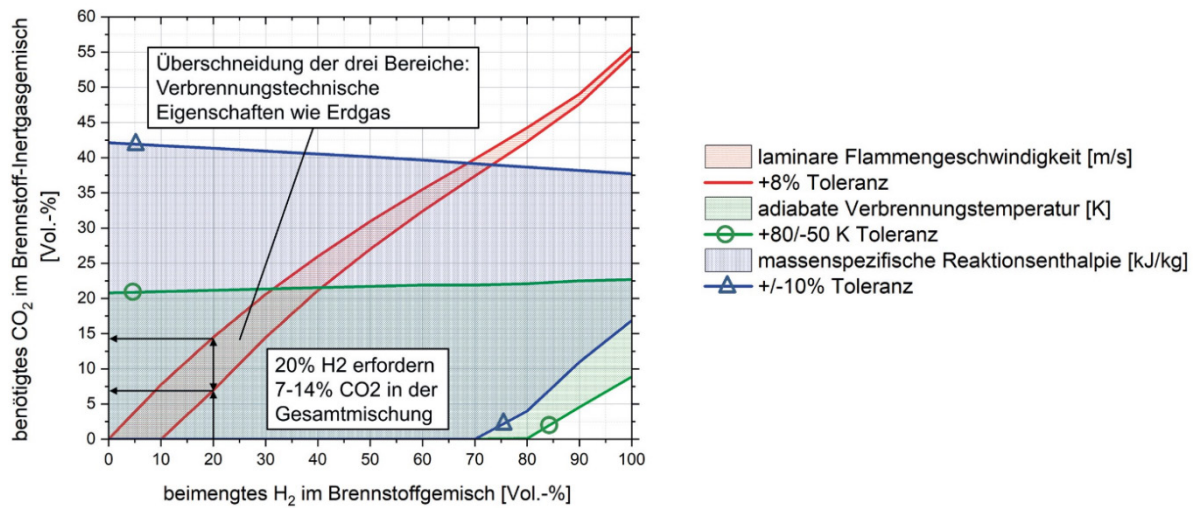


Abbildung 8: Benötigter Volumenanteilsbereich von Kohlendioxid für alle verbrennungstechnischen Eigenschaften bei einer Luftzahl von 1,0

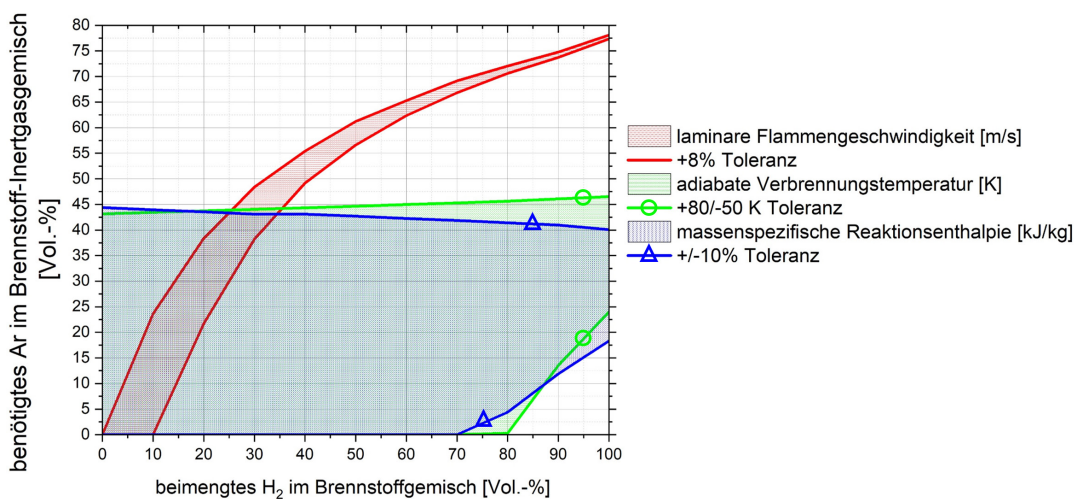


Abbildung 9: Benötigter Volumenanteilsbereich von Argon für alle verbrennungstechnischen Eigenschaften bei einer Luftzahl von 1,0

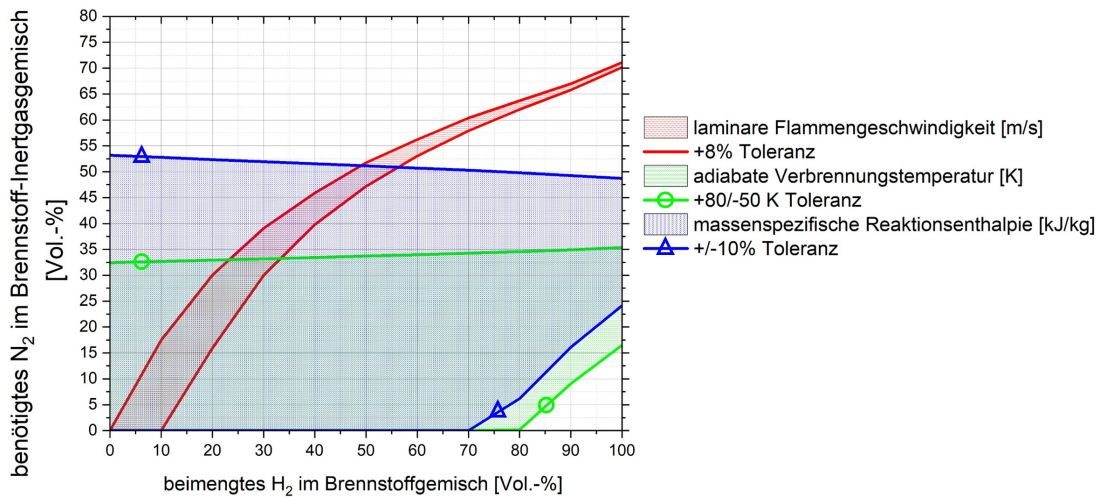


Abbildung 10: Benötigter Volumenanteilsbereich von Stickstoff für alle verbrennungstechnischen Eigenschaften bei einer Luftzahl von 1,0

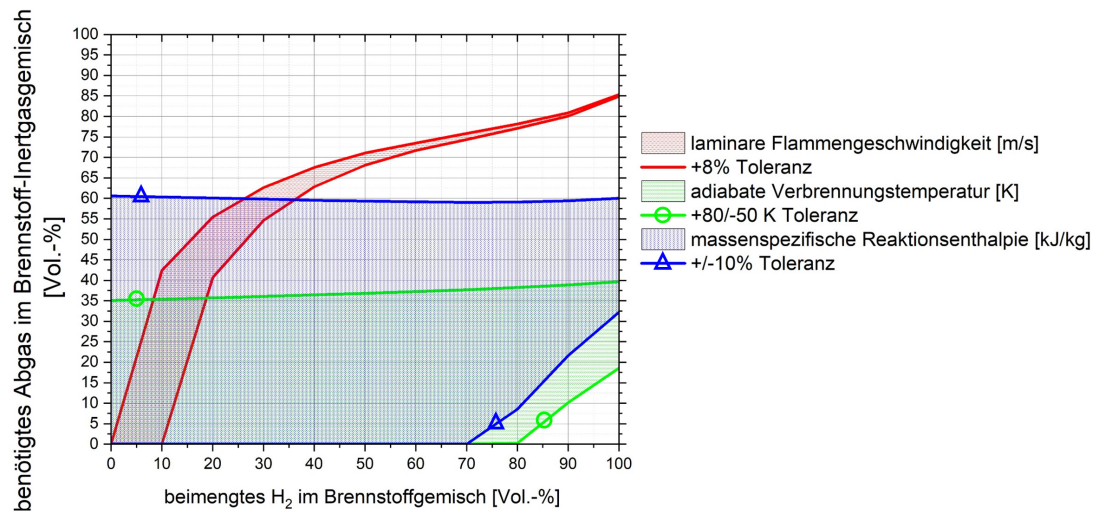


Abbildung 11: Benötigter Volumenanteilsbereich von Abgas für alle verbrennungstechnischen Eigenschaften bei einer Luftzahl von 1,0

Die geringsten Beimengungswerte, um die verbrennungstechnischen Eigenschaften auf dem Niveau von Erdgas zu halten, weist Kohlendioxid auf. Die hohe molare Masse von diesem ist der ausschlaggebende Faktor dafür. Das Abgas bedingt bei allen Eigenschaften, wegen seiner höheren Temperatur, die höchsten erforderlichen Anteile. Die massenspezifische Reaktionsenthalpie und die adiabate Verbrennungstemperatur können durch eine Beimengung relativ geringer Anteile von Inertgasen am Niveau von reinem Erdgas gehalten werden. Zum Erreichen des Vergleichswertes der laminaren Flammgeschwindigkeit von Erdgas ist eine deutlich höhere Beimengung notwendig. Die hohe Wärmeleitfähigkeit, die geringe atomare Masse und die geringe Größe des Wasserstoffes machen die laminare Flammgeschwindigkeit zur am schwierigsten beherrschbaren verbrennungstechnischen Eigenschaft.

Die Einstellung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Wasserstoff-Erdgasgemischen auf das Niveau von reinem Erdgas über Inertgase ist aufgrund der hohen erforderlichen Inertgasanteile voraussichtlich nicht flächendeckend realisierbar. Allerdings

kann es als Übergangslösung angesehen werden, bis Industriebrenner durch zusätzliche Regeleinrichtungen mit einem variablen Wasserstoffanteil im Erdgas umgehen können. Des Weiteren kann dieses Vorgehen auch bei Netzabschnitten des Verteilnetzes, in denen mit erhöhter Wasserstoffeinspeisung zu rechnen ist, eingesetzt werden.

Literatur

- [1] GRI-Mech releases, Online verfügbar unter <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/releases.html>, abgerufen am 20. Oktober 2020.
- [2] Cantera 2.3.0, Online verfügbar unter <https://cantera.github.io/docs/sphinx/html/about.html>, abgerufen am 20. Oktober 2020.
- [3] Voestalpine, Interner Bericht, Durchschnittliche Erdgaszusammensetzung am Standort Linz.
- [4] Moran, M. J. und H. N. Shapiro, Fundamentals of engineering thermodynamics. 3. ed., John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, 1998.
- [5] Peters, N., Turbulent combustion, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2006.
- [6] Haynes, W. M., CRC Handbook of chemistry and physics, CRC Press, Boca Raton, London, New York, 2017.
- [7] Elsner, H., Edalgase - Versorgung wirklich kritisch?, - DERA Rohstoffinformationen 39, Deutsche Rohstoffagentur (DERA), Berlin, 2018.
- [8] acatech, CCU and CCS – Building Blocks for Climate Protection in Industry, Analysis, Options and Recommendations, National Academy of science and Engineering, Munich, 2019.
- [9] Baukal, C. E., The John Zink Hamworthy Combustion Handbook, CRC Press, Hoboken, 2012.
- [10] Raupenstrauch, H., H. Kern, C. Spijker, D. Egger, G. Berger, A. Streitmayer und R. Kaupa, Projekt Greening the Gas., Verbrennungstechnische und sicherheitsrelevante Anforderungen in Hinblick auf einen erhöhten Biogas- und Wasserstoffanteil im Erdgas, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben, Leoben, 2019.
- [11] Brunklaus, J. H. und J. Stepanek, Industrieöfen, Bau und Betrieb, Vulkan-Verl., Essen, 1994.
- [12] Kroner, K. und M. Wicker, Luft/Gas-Verhältnisregelung an industriellen Beheizungseinrichtungen, in: GASWÄRME International (55), 2006.