

Einfluss von Gasbeschaffenheitsänderungen auf den Glasherstellungsprozess – Teil 5: Wasserstoff im Erdgas - Auswirkungen auf Verbrennungsvorgänge und die Glasherstellung

J. Leicher, A. Giese; Gas- und Wärme- Institut Essen e.V., Essen

B. Fleischmann; Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V.,
Offenbach

1. Abstract

Ein Teilaspekt der aktuellen Diskussion über sich verändernde Erdgasbeschaffenheiten in Deutschland und der EU und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf industrielle Feuerungsprozesse ist die Möglichkeit, in Zukunft größere Mengen Wasserstoff in das Erdgasnetz einzuspeisen. Mit Hilfe von Elektrolyseuren könnte auf diese Weise überschüssige elektrische Energie in so genannten „Windwasserstoff“ umgewandelt und in der vorhandenen Erdgasinfrastruktur gespeichert werden, ein Konzept, das als „power-to-gas“ bezeichnet wird. Auf diese Weise könnte ein zentrales Problem von Wind- und Sonnenenergie, ihre Volatilität, kompensiert werden. Auch durch eine vermehrte Einspeisung von Biogas könnte in Zukunft der Wasserstoffanteil im Erdgas steigen. Im vorliegenden Artikel werden die Auswirkungen erhöhter Wasserstoffkonzentrationen auf die Verbrennung beleuchtet und mögliche Auswirkungen auf feuerungstechnische Prozesse in der Glasproduktion diskutiert.

2. Einleitung

Die Gasmärkte in Deutschland und Europa durchlaufen derzeit eine Phase des Wandels: traditionelle inner-europäische Erdgasquellen, etwa das niederländische Groningen-Feld, erschöpfen sich, gleichzeitig wächst die Bedeutung von Erdgasimporten, sei es leitungsgebunden z.B. aus Russland oder Mittelasien, oder aber auch zunehmend weltweit mit Hilfe von Tankschiffen und Flüssiggas (LNG). Die Liberalisierung des Gasmarkts und das damit verbundene „unbundling“ von Handel, Transport und Verteilung von Erdgas sowie die Bestrebungen seitens der Europäischen Kommission, Handelshemmnisse für die Ware „Erdgas“ in Form unterschiedlicher nationaler Regelungen der Gasbeschaffenheit abzubauen (die so genannte H-Gas-Harmonisierung) werden, neben allen volkswirtschaftlichen Vorteilen, die diese Entwicklung mit sich bringt, auch dazu führen, dass die chemische Zusammensetzung und damit die Verbrennungseigenschaften des verteilten Erdgases in Zukunft größeren Schwankungen als bisher unterworfen sein werden. Die Hintergründe dieser Entwicklungen und ihre Auswirkungen auf empfindliche Feuerungsprozesse in der Thermoprozesstechnik wurden bereits in vorangegangenen Beiträgen ausgiebig dargestellt [1], [2].

Neben dieser Transition der europäischen Erdgasmärkte wird sich jedoch auch die zunehmende Bedeutung der regenerativen Energien, sowohl Biogas, aber insbesondere der Wind- und Sonnenenergie, auf die Gasabnehmer auswirken. Ein wesentliches Problem bei der Nutzung dieser Energiequellen ist ihre volatile Natur. Die Elektrolyse bietet hier eine Möglichkeit, überschüssige elektrische Energie in Form von Wasserstoff (oder nach einem weiteren Schritt auch in Methan) zu speichern, ein Konzept, das als „power-to-gas“ bezeichnet wird [3], [4]. Es ist naheliegend, das auf diese Weise erzeugte Gas in das Erdgasnetz einzuspeisen, wobei es energetisch gesehen günstiger wäre, den bei der Elektrolyse erzeugten Wasserstoff direkt einzuspeisen. Eine nachgeschaltete

Methanisierung ist hingegen mit einem zusätzlichen technischen und energetischen Aufwand verbunden. Vor dem Hintergrund der veränderten Gaszusammensetzungen andererseits wäre eine solche Methanisierung durchaus wünschenswert, da auf diese Weise vermieden werden kann, dass größere Mengen Wasserstoff die Verbrennungseigenschaften des dargebotenen Erdgases maßgeblich beeinflussen.

In Deutschland wird die Einspeisung von Wasserstoff in das Gasnetz durch die Arbeitsblätter G 260 „Gasbeschaffenheit“ [5] und G 262 „Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung“ [6] des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW) geregelt. In der aktuellen Version des Arbeitsblatts G 262 von 2011 wird die Einspeisung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Zusatzgas betrachtet. Wörtlich heißt es dort: „Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Wasserstoffgehalt in einstelligem Prozentbereich im Erdgas in vielen Fällen unkritisch ist, wenn die brenntechnischen Kenndaten entsprechend DVGW-Arbeitsblatt G 260 eingehalten werden.“ Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass es weitere Kriterien für die Wasserstoffeinspeisung gibt. So begrenzt die DIN 51624 [7] derzeit den Wasserstoffgehalt in Erdgas, welches als Kraftstoff für Kraftfahrzeuge verwendet wird, auf max. 2 Vol.-%, zudem muss das Erdgas eine minimale Methan-Zahl von 70 aufweisen. Auch für Erdgasspeicher sind höhere Wasserstoffkonzentrationen mitunter problematisch [8]. Hersteller von stationären Gasturbinen für den Einsatz in Kraftwerken begrenzen ebenfalls oft den maximal zulässigen Wasserstoff-Gehalt im verwendeten Erdgas, da die in Gasturbinen vorherrschende magere Vormischverbrennung ausgesprochen empfindlich selbst auf geringfügige Änderungen der Brenngaszusammensetzung reagiert [9]. Die Grenzen reichen hier, je nach Hersteller, von 1 - 5 Vol.-%. Derzeit sind viele Prozess-Gaschromatographen nicht in der Lage, Wasserstoff im Erdgas zu messen [10]. Die zunehmende Bedeutung von Biogasen und Wasserstoff für die Gaswirtschaft hat hier jedoch Hersteller von Gas-Chromatographen bewogen, die technische Weiterentwicklung voranzutreiben, so dass heute bereits wasserstoff-taugliche Gas-Chromatographen am Markt vorhanden sind [11], [12].

3. Verbrennungseigenschaften von Methan/Wasserstoff-Gemischen

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas in Bezug auf das Verbrennungsverhalten dargestellt. Da technisch relevante Verbrennungsprozesse in hohem Maße von den gegebenen Randbedingungen, dem verwendeten Brenner und dem zugrunde liegenden turbulenten Strömungsfeld abhängig sind, erscheint es sinnvoll, sich hier auf eine rein chemisch-thermodynamische Betrachtung der Wasserstoff/Erdgas-Gemische zu konzentrieren, um zu allgemeingültigen Aussagen zu gelangen. Zudem wird im Folgenden das Erdgas durch reines Methan ersetzt, um Überlagerungen mit anderen chemischen Komponenten, etwa höheren Kohlenwasserstoffen, wie sie in real verteilten Erdgasen zu finden sind, zu vermeiden und auf diese Weise die Effekte der Wasserstoffzumischung deutlicher hervorzuheben.

In Tabelle 1 sind einige wesentliche chemische und thermodynamische Stoffwerte von Methan, Wasserstoff und CH_4/H_2 -Gemischen dargestellt. Zu sehen sind Heiz- und Brennwerte (sowohl volumetrisch als auch massen-spezifisch), der obere Wobbe-Index W_{I_s} , der minimale Luftbedarf für stöchiometrische Verbrennung L_{\min} , die adiabate Flammentemperatur (bei $\lambda = 1$, $p = 1$ bar, $T_{\text{ein}} = 25$ °C, unter Berücksichtigung der Dissoziation), die Normdichte ρ_n sowie die unteren und oberen Zündgrenzen Z_u und Z_o , berechnet nach dem Verfahren von Le Chatelier (vgl. [13]). Der Vergleich veranschaulicht, dass eine moderate Wasserstoffbeimischung zum Methan nur einen geringen Einfluss auf den volumetrischen Energieinhalt des Brenngases, ausgedrückt durch Heiz- bzw. Brennwert, hat. Dies ist im Wesentlichen durch die extrem geringe Dichte des

Wasserstoffs begründet. Massenbezogen betrachtet, entsprechen 10 Vol-% Wasserstoff lediglich 1,38 Massen-%. Mit zunehmendem Wasserstoffanteil nehmen die volumetrisch bezogenen Heiz- und Brennwerte ab, so dass größere Volumenströme benötigt werden, um eine gegebene Brennerleistung zu erreichen. Zudem sind adiabate Flammentemperaturen und Brennwerte entkoppelt: obwohl die volumetrischen Heizwerte abnehmen, steigen die adiabaten Flammentemperaturen.

Bild 1 zeigt einen grafischen Vergleich ausgewählter verbrennungstechnischer Größen. Es sei darauf hingewiesen, dass die Gasgemische volumetrisch angegeben sind, wie es in der Gasindustrie üblich ist. Heiz- und Brennwerte sind in der Tabelle sowohl volumetrisch als auch massen-spezifisch aufgeführt.

Tabelle 1: Vergleich verbrennungsrelevanter Kenngrößen für verschiedene CH₄/H₂-Gemische

X_{CH_4} / X_{H_2}	H_i	H_i	H_s	H_s	Wl_s	L_{min}	T_{ad}	ρ_n	Z_u	Z_o
[Vol.-%]	[MJ/m ³]	[MJ/kg]	[MJ/m ³]	[MJ/kg]	[MJ/m ³]	[m ³ Luft / m ³ Brst]	[°C]	[kg/m ³]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
100/0	35,816	50,012	39,745	55,498	53,269	9,524	1958,6	0,716	5	15
99/1	35,566	50,101	39,475	55,607	53,14	9,452	1959,03	0,71	4,99	15,12
98/2	35,316	50,191	39,205	55,718	53,011	9,381	1959,47	0,704	4,98	15,24
95/5	34,565	50,472	38,395	56,065	52,624	9,167	1960,83	0,685	4,94	15,62
90/10	33,314	50,976	37,046	56,686	51,976	8,81	1963,23	0,654	4,88	16,3
75/25	29,561	52,825	32,999	58,967	50,032	7,738	1971,71	0,56	4,71	18,74
50/50	23,306	57,822	26,252	65,131	46,9	5,952	1992,28	0,403	4,44	24,96
0/100	10,796	119,969	12,76	141,795	48,245	2,381	2117,13	0,09	4	74,2

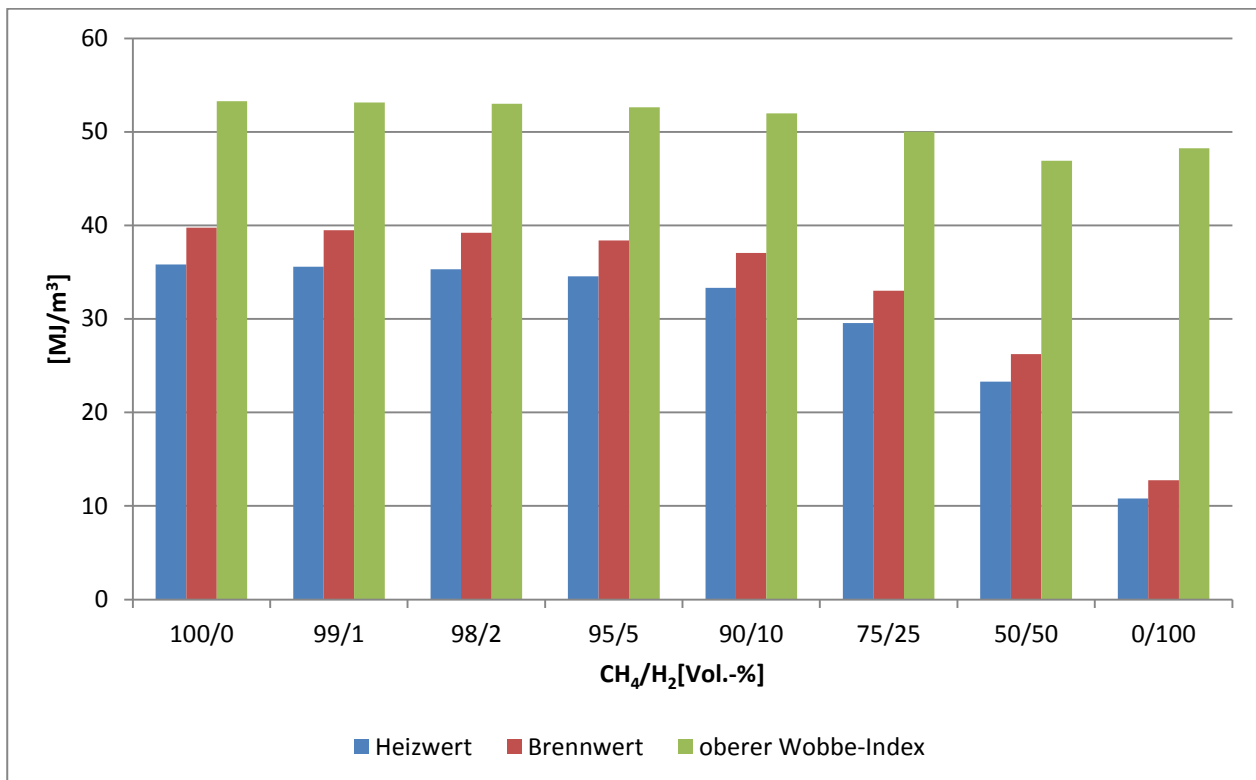


Bild 1: Vergleich von Heizwert H_i , Brennwert H_s und oberem Wobbe-Index Wl_s für verschiedene CH₄/H₂-Gemische

Des Weiteren ist zu sehen, dass der Wobbe-Index, eine der am häufigsten verwendeten Kenngrößen in Fragen der Gasbeschaffenheit, kaum auf die veränderten Gemischzusammensetzungen reagiert. Der Unterschied im Wobbe-Index beim Vergleich

von reinem Methan zu reinem Wasserstoff beträgt lediglich -9,43 %, während sich die Unterschiede im volumetrischen Heizwert auf -69,86 %, im minimalen Luftbedarf auf -75 % und in der adiabaten Flammentemperatur auf +8,09 % belaufen. Dies wirft die Frage auf, inwieweit der Wobbe-Index bei stark wasserstoff-haltigen Brenngasen geeignet ist, Aussagen über den Verbrennungsvorgang zu machen, oder als Regelungsgröße dienen kann.

Neben den allgemeinen feuerungstechnischen und thermodynamischen Größen ist gerade in Bezug auf Wasserstoffbeimischung das reaktionskinetische Verhalten der untersuchten Gasgemische interessant. Reiner Wasserstoff ist deutlich reaktionsfreudiger als Methan, wie auch schon in Tabelle 1 anhand der Zündgrenzen deutlich wurde. Bild 2 zeigt einen Vergleich verschiedener Messungen laminarer Flammgeschwindigkeiten von Wasserstoff und Methan, aufgetragen über das so genannte Äquivalenzverhältnis ϕ , eine in der Chemie häufig verwendete Größe, die dem Kehrwert von λ entspricht [14].

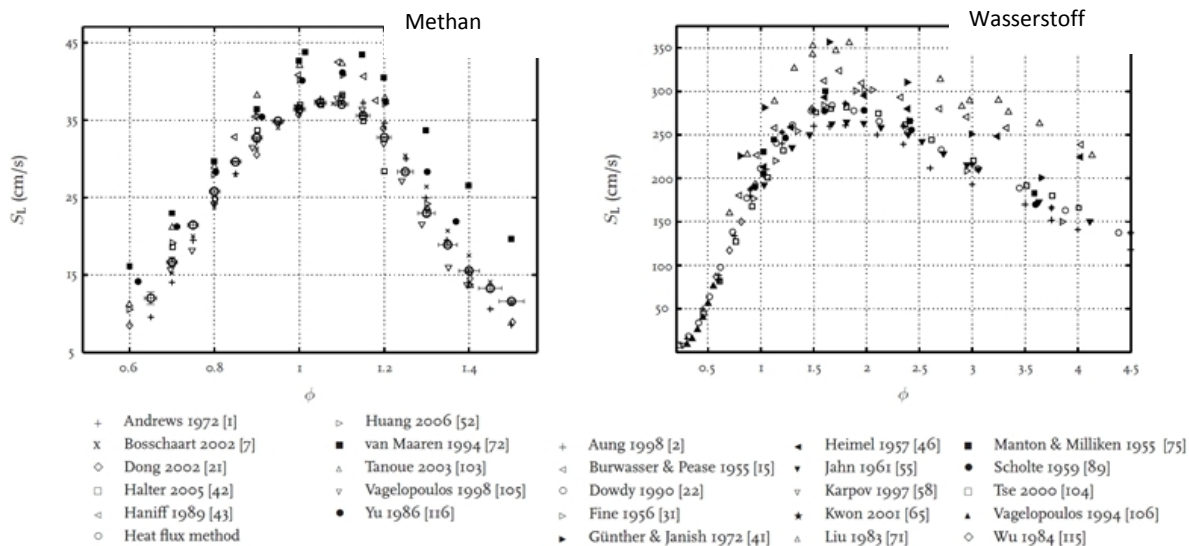


Bild 2: Gemessene laminare Flammgeschwindigkeiten von Methan (links) und Wasserstoff (rechts). Die Darstellungen wurden [15] entnommen und basieren auf Messungen unterschiedlicher Herkunft.

Die Darstellungen wurden [15] entnommen und zeigen die erheblich höheren laminaren Flammgeschwindigkeiten von reinem H_2 , verglichen mit reinem CH_4 . Zudem wird deutlich, dass beim Wasserstoff die maximale laminare Flammgeschwindigkeit in weitaus brennstoffreicheren ($\phi > 1$) Gemischen auftritt als bei Methan. Während bei reinem Methan die maximalen laminaren Flammgeschwindigkeiten etwa bei $\phi = 1,05$ (entspricht $\lambda = 0,95$) auftreten, sind sie bei reinem Wasserstoff bei $\phi = 1,75$, also $\lambda = 0,57$, zu finden.

Betrachtet man die Auswirkungen der Zumischung von Wasserstoff in Methan auf die laminaren Flammgeschwindigkeiten, so ist bei moderaten Zugaben auch hier nur ein geringfügiger Anstieg der Flammgeschwindigkeiten zu beobachten, wie Tabelle 2 zeigt. In dieser Tabelle sind die laminaren Flammgeschwindigkeiten für die untersuchten Brenngasgemische bei $\lambda = 1$, $T_{ein} = 300$ K und $p = 1$ bar zu sehen, die anhand reaktionskinetischer Simulationen frei propagierender Vormischflammen bestimmt wurden. Als Reaktionsmechanismus kam der GRI 3.0 [16] des Gas Research Institute zum

Einsatz, ein mittelgroßer Standard-Reaktionsmechanismus für die Methan-Verbrennung, der aus 53 Spezies und 325 Elementarreaktionen besteht.

Tabelle 2: Laminare Flammgeschwindigkeiten verschiedener CH₄/H₂-Gemische bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 300 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar}$

$X_{\text{CH}_4} / X_{\text{H}_2}$ [Vol.-%]	s_l [cm/s]	Δ [%]
100/0	38,39	0,00
99/1	38,63	0,63
98/2	38,87	1,25
95/5	39,64	3,26
90/10	40,92	6,59
75/5	45,95	19,69
50/50	60,06	56,45
0/100	200	420,97

Die zweite Größe, die aus reaktionskinetischer Perspektive interessant ist, ist die so genannte Zündverzugszeit. Sie ist ein Maß für die Neigung eines Brennstoffs zur Selbstzündung, wenn Druck und insbesondere Temperatur es erlauben. Auch die Zündverzugszeit lässt sich mit Hilfe von reaktionskinetischen Simulationen ermitteln. Tabelle 3 zeigt den Einfluss der Wasserstoffkonzentration auf die Zündverzugszeit. Diese Rechnungen wurden ebenfalls auf Basis des GRI 3.0 für stöchiometrische Gemische bei einem Druck und einer Gemisch-Anfangstemperatur von 1200 K durchgeführt.

Tabelle 3: Zündverzugszeiten verschiedener CH₄/H₂-Gemische bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 1200 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar}$

$X_{\text{CH}_4} / X_{\text{H}_2}$ [Vol.-%]	τ [ms]
100/0	46,16
99/1	41,01
98/2	36,48
95/5	25,95
90/10	15,367
75/5	4,296
50/50	0,9325
0/100	0,04613

Im Gegensatz zur laminaren Flammgeschwindigkeit wirken sich bei der Zündverzugszeit selbst geringe Mengen an Wasserstoff im Brenngasgemisch unmittelbar aus. Schon ein Anteil von 1 Vol.-% H₂ im Brenngas führt zu einer Reduktion der Zündverzugszeit um etwa 11%, bei 10 Vol.-% H₂ verringert sie sich sogar um mehr als 66 %. In Bild 3 ist ein Vergleich der Selbstzündzeiten, der mit Hilfe reaktionskinetischer Simulationen, basierend auf dem Reaktionsmechanismus GRI 3.0 [16] mit 53 Spezies und 325 Elementarreaktionen, erstellt wurde, dargestellt.

Der Vergleich der Verbrennungskennwerte und der reaktionskinetischen Charakteristika der untersuchten CH₄/H₂-Gemische deutet darauf hin, dass nicht-vorgemischte Brennersysteme, wie man sie z.B. in Glasschmelzwannen findet, in ihrem Betriebsverhalten nicht wesentlich durch moderate Wasserstoffbeimischungen beeinflusst werden, wenn der Wasserstoffanteil erkannt und die Prozessregelung entsprechend angepasst wird. Allerdings steigt der Brenngasverbrauch aufgrund abnehmender

volumetrischer Heizwerte, während die Flammentemperaturen hingegen leicht ansteigen. Wichtig ist in diesem Kontext auch der Einfluss des Wasserstoffs auf den minimalen Luftbedarf und damit auf die lokal anliegenden Luftzahlen. Wenn es zu einem plötzlichen und nicht erkannten höheren Anteil von Wasserstoff im Erdgas kommt, kann sich dies schnell negativ auf die Effizienz der Anlage auswirken, da die Luftzahlen u. U. plötzlich ansteigen. Untersuchungen von Ayoub et al. [17] an Laborbrennern belegen zudem, dass die Beigabe von Wasserstoff zu erhöhten Stickoxidemissionen führen können. Inwieweit diese Ergebnisse auf Glasschmelzwannenfeuerungen übertragen werden können, ist noch zu prüfen, aber die lokal höheren Flammentemperaturen dürften auch hier eine verstärkte thermische NO_x -Bildung bewirken.

Außerdem ist die bereits erwähnte Entkopplung von Heizwert und Verbrennungstemperatur zu beachten. Bei H_2 -Beimischung kann eine Verbrennung eine höhere Temperatur erreichen, obwohl die in das System eingebrachte Leistung reduziert wurde.

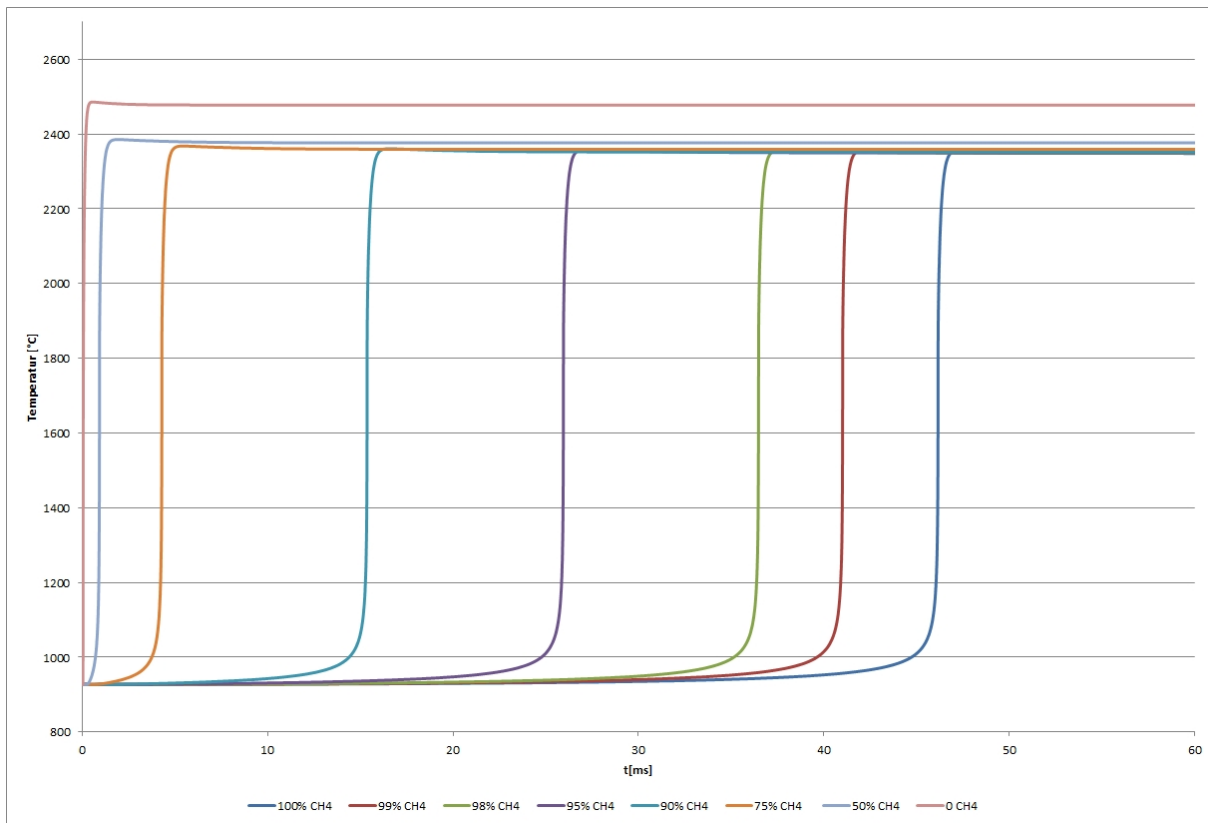


Bild 3: Berechnete Selbstzündzeiten für verschiedene CH_4/H_2 -Gemische bei $\lambda=1$, $T_{\text{ein}} = 1200 \text{ K}$ und $p = 1 \text{ bar}$. Die Rechnungen basieren auf dem GRI 3.0-Reaktionsmechanismus mit 53 Spezies und 325 Elementarreaktionen [16]

Ein Aspekt, der mit Hilfe reaktionskinetischer Simulationen nicht untersucht werden kann, ist die veränderte Wärmeabgabe der Flamme. Reine Wasserstoffflammen weisen hohe lokale Temperaturen auf, geben jedoch verhältnismäßig weniger Wärme ab und verbrennen fast unsichtbar. Obwohl der Anteil der Kohlenstoff-Atome im Brenngas durch die Wasserstoffzugabe reduziert wird, bleiben die trockenen CO_2 -Emissionen bei konstanter Luftzahl für moderate Wasserstoffzugaben jedoch annähernd konstant. Eine unerkannte Beimischung von H_2 in das Brenngas, in Kombination mit der daraus resultierenden, plötzlich höheren lokal anliegenden Luftzahl λ kann jedoch schnell dazu

führen, dass weniger CO₂ im Abgas vorhanden ist, mit negativen Auswirkungen auf die Strahlungswärmeübertragung im Schmelzaggregat.

Die vorgestellten Untersuchungen legen zudem nahe, dass insbesondere Vormischbrenner, wie man sie z.B. in Feedern oder auch in Kühltöpfen findet, aufgrund des veränderten Reaktionsverhaltens prinzipiell empfindlicher auf höhere H₂-Konzentrationen im Brenngas reagieren als nicht-vormischende Brennersysteme. Die Auswirkungen können hier von zunehmender Verbrennungsinstabilität bis hin zum Flammenrückschlag reichen. Dies gilt insbesondere im Teillastbetrieb. Entsprechende Erfahrungen aus anderen vormischenden Verbrennungssystemen, etwa Gasturbinen, belegen dies.

Falls Wasserstoff in Zukunft verstärkt in das Erdgasnetz eingespeist werden sollte, erscheint es für Betriebe mit empfindlichen feuerungstechnischen Prozessen auf alle Fälle sinnvoll, in geeignete mess- und regelungstechnische Systeme zur Überwachung und gegebenenfalls Kompensation von veränderlichen Brenngaszusammensetzungen zu investieren.

4. Auswirkungen auf den Gesamtprozess der Glasherstellung

Neben den bisher diskutierten verbrennungstechnischen und chemisch-thermodynamischen Fragestellungen sind von der zeitweisen Zumischung von Wasserstoff ins Brenngas und den sich daraus ergebenden Schwankungen auch noch weitere Problemkreise betroffen. Die hier diskutierten Grundlagen haben auch Auswirkungen auf die Glastechnologie, die Anlagensicherheit und die Schadgasemissionen der Anlage. Eine ausführlichere Betrachtung dieser Aspekte findet sich in [18] und [19].

Der erhöhte Wassergehalt im Abgas und die lokal erhöhten Temperaturen auf Grund der H₂-Zumischung führen in der Glasschmelzwanne zu einer erhöhten Verdampfungsrate von leicht flüchtigen Komponenten. Betroffen sind hiervon vor allem Alkalien und Schwefel, aber auch Bor und Selen. Die erhöhte Verdampfung von Alkalien und Schwefel führt in der Regenerativkammer von Massengläsern im Kondensationsbereich zu einer vermehrten Abscheidung von Alkalie-Schwefel-Verbindungen und damit zu einer schnelleren Alterung und Effizienzminderung der Luftvorwärmung. Dies führt entweder zu einem erhöhten Energieverbrauch über die Laufzeit oder auf Grund der häufigeren Reinigung der Kammersysteme zu einer kürzeren Laufzeit der Schmelzanlage bzw. zu einem kombinierten Effekt.

Der Einfluss von Wasserstoff im Brenngas auf die Anlagensicherheit muss ebenfalls berücksichtigt werden. Weder die Rohrleitungen noch die Regel- und Kontrolleinrichtungen sind zur Zeit auf die verspröde Wirkung von Wasserstoff auf metallische Werkstoffe ausgelegt. Außerdem diffundiert Wasserstoff durch die meisten Werkstoffe und kann so möglicherweise auch korrosiv auf eigentlich nicht betroffene Anlagenteile wirken. Der erhöhte Wassergehalt des Abgases wirkt sich vor allem bei Abgaszusammensetzungen mit entsprechendem Schwefelanteil (technologisch bedingt aus der Schwefelläuterung oder als Bestandteil des Brenngases, ...) auf den Säuretaupunkt aus. Mit steigendem Wassergehalt erhöht sich der Säuretaupunkt. Die Abgas führenden Anlagen werden so gefahren, dass der Säuretaupunkt normalerweise nicht unterschritten wird. Wird die Säuretaupunkttemperatur nun erhöht, so kann dies in Filteranlagen, im Fuchs oder Kamin zu entsprechenden Schädigungen führen, wenn auf Grund der Verschiebung des Säuretaupunktes die Kondensate schon bei höheren Temperaturen in den Abgas führenden Anlagenteilen anfallen.

Wie sich die Wasserstoffeinspeisung auf das Verhalten von feuerfesten Werkstoffen auswirkt, die zur Zeit im Anlagenbau bei Thermoprozessanlagen zum Einsatz kommen, soll ein beantragtes Forschungsvorhaben der Forschungsgemeinschaft Feuerfest, Höhr-Grenzhausen, und des Gas- und Wärme- Instituts, Essen, in absehbarer Zukunft genauer klären.

Die Folgen der Wasserstoffzugabe auf die Emissionen, vor allem auf die Stickoxidstehung, sind in der vorhergehenden Betrachtung schon angedeutet worden. Da der maßgebende Bildungsmechanismus für die Stickoxide in der Glasschmelzwanne das thermische NO_x ist, führt vor allem die, wenn auch nur lokale, Erhöhung der Flammentemperatur zu deutlich erhöhten Bildungsraten. Bei einer weiteren Senkung der Grenzwerte, die sich in der Gesetzgebung schon andeutet, sind dann durch primäre Maßnahmen, die zur Zeit mit den meisten Anlagen schon schwer erreichbaren Grenzwerte nicht mehr realisierbar und teure sowie energieaufwendige sekundäre Minderungsmaßnahmen müssten ergriffen werden, um die gesetzlichen Auflagen zu erfüllen.

5. Literatur

- [1] Leicher, J., Giese A., "Gasbeschaffenheitsregelungen in Deutschland und Europa: Eine Übersicht", HVG Mitteilungen, Mitteilung Nr. 2160, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V., Offenbach, 2014.
- [2] Leicher, J., Giese, A., Tali, E., "Gasbeschaffenheitsänderungen und ihre Auswirkungen auf industrielle Feuerungsprozesse", HVG Mitteilungen, Mitteilung Nr. 2161, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V., Offenbach, 2014.
- [3] Linke, G., "Die Rolle von Erdgas in den zukünftigen Strukturen der Energiespeicherung", *gwf-Gas|Erdgas*, Ausgabe 11, S. 772–775, 2010.
- [4] Krause, H., Müller-Syring, G., "Das Erdgasnetz als Speicher für regenerative Energie", *gwf-Gas|Erdgas*, Ausgabe 11, S. 764–770, 2010.
- [5] "Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G260 (A), 'Gasbeschaffenheit'", Bonn, 2013.
- [6] "Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G262 'Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung'", DVGW, Bonn, 2011.
- [7] "DIN 51624: Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge - Erdgas - Anforderungen und Prüfverfahren", 2008.
- [8] Altfeld, K., Schley, P., "Entwicklung der Erdgasbeschaffenheiten in Europa", *Gaswärme International*, Ausgabe 2, S. 57–63, 2012.
- [9] Abbott, D., "The impact of variations in gas composition on gas turbine operation and performance", *Energy Delta Institute Quarterly*, vol. 4, no. 1, 2012.
- [10] Sygulla, R., "Wasserstoff für das Erdgasnetz", *Energy 2.0*, Ausgabe 6+7, S. 28–31, 2013.
- [11] Kastner, J., "Weiterentwicklung der Prozessgaschromatographie", in *Gasqualitäten im veränderten Energiemarkt: Herausforderungen und Chancen für die häusliche, gewerbliche und industrielle Anwendung*, 1. Auflage, Deutscher Industrie-Verlag, München, 2013.
- [12] Pöpl, H., "Flexibler Prozess-Gaschromatograph für die neuen Anforderungen an Gasanalysegeräte", in *Gasqualitäten im veränderten Energiemarkt: Herausforderungen und Chancen für die häusliche, gewerbliche und industrielle Anwendung*, 1. Auflage, Deutscher Industrie-Verlag, München, 2013.
- [13] Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (Hrsg.), *gwi-Arbeitsblätter*, Vulkan-Verlag, Essen, 2012.

- [14] Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. W., *Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*, 3. Auflage, Springer-Verlag, 2001.
- [15] Hermanns, R.T.E., "Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures", Dissertation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Niederlande, 2007.
- [16] Smith, G. P., Golden, D. M., Frenklach, M., Moriarty, N. W., Eiteneer, B., Goldenberg, M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Song, S., Gardiner Jr., W. C., Lissianski, V. V., Quin, Z., www.me.berkeley.edu/gri_mech, 2000.
- [17] Ayoub, M., Rottier, C., Carpentier, S., Villermaux, C., Boukhalfa, A. M., Honoré, D., "Mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures in a laboratory-scale pilot furnace", 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Estoril, Portugal, 2011.
- [18] Spielmann, S., "Schwankungen im Erdgasnetz und die Auswirkungen auf industrielle Feuerungsanlagen," *VIK Mitteilungen*, Ausgabe 3, S. 17–19, 2012.
- [19] Spielmann, S., Fleischmann, B., "Der Einfluss von variierenden Wasserstoffgehalten im Brenngas auf die Verbrennungseigenschaften", 87. Glastechnische Tagung der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft, Bremen, 2013.