

Einfluss von Gasbeschaffenheitsänderungen auf den Glasherstellungsprozess – Teil 4: Gasbeschaffenheitsänderungen und ihre Auswirkungen auf industrielle Feuerungsprozesse

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

1. Grundlagen der Gasbeschaffenheit

Den deutschen und europäischen Gasmärkten stehen in den nächsten Jahren erhebliche Veränderungen bevor. Traditionelle Bezugsquellen, etwa das westeuropäische L-Gas werden sich erschöpfen, während der Import aus außer-europäischen Quellen, z. B. aus Russland oder dem Nahen Osten, ansteigen wird [1]. Die Einspeisung brennbarer Gase aus erneuerbaren Quellen (z. B. Biogas oder Wasserstoff bzw. Methan aus Power-to-Gas-Anwendungen [2], [3] wird an Bedeutung gewinnen. Die Einspeisung von LNG, also verflüssigtem Erdgas, wird zunehmen. Seitens der EU gibt es zudem Bestrebungen, den internationalen Handel mit Erdgas zu forcieren, Handelshindernisse abzubauen und einen harmonisierten europäischen Erdgasmarkt im Rahmen der Richtlinie 2003/55/EC [4] zu schaffen.

In einem vorangegangenen Artikel wurden die Ursachen für die erwarteten Veränderungen im deutschen und europäischen Gasmarkt bereits detailliert beleuchtet und einige grundsätzliche Begrifflichkeiten zum Thema „Gasbeschaffenheit“ definiert, daher soll an dieser Stelle nicht genauer darauf eingegangen werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang jedoch der so genannte, Wobbe-Index, eine zentrale Größe in Fragen der Gasbeschaffenheit. Diese Größe ist definiert als das Verhältnis des Brennwertes H_S (bzw. des Heizwertes H_i für den unteren Wobbe-Index W_i) und der Wurzel der relativen Dichte d , die wiederum das Verhältnis der Normdichte des Brenngases zur Normdichte von Luft darstellt:

$$W_S = \frac{H_S}{\sqrt{d}} = \frac{H_S}{\sqrt{\frac{\rho_{\text{Brennstoff},n}}{\rho_{\text{Luft},n}}}}$$

Weisen zwei Gase den gleichen Wobbe-Index auf, so können sie – theoretisch - ohne Anpassung im gleichen Brenner verbrannt werden [5]. In Deutschland werden Gasbeschaffenheiten durch das DVGW-Arbeitsblatt G 260 [6] geregelt. Dort werden u. a. zulässige Bereiche von Wobbe-Index, Brennwert und relativer Dichte vorgegeben. Liegt ein Erdgas mit seinen Eigenschaften in den vorgegebenen Bereichen (es wird zwischen verhältnismäßig nieder-kalorischem L-Gas und hoch-kalorischem H-Gas unterschieden), darf es in das Erdgasnetz eingespeist werden.

2. Gasbeschaffenheit und industrielle Feuerungsprozesse

Diese stark reduzierte Beschreibung von Gasqualitäten mit Hilfe eines einzelnen Kennwerts vereinfacht die Festlegung von zulässigen Gasbeschaffenheiten in Transport- und Verteilnetzen erheblich. Sie stößt jedoch an ihre Grenzen, wenn es um die Auswirkungen verschiedener Gaszusammensetzungen auf Verbrennungsvorgänge geht. Dies gilt insbesondere für industrielle Feuerungsprozesse, bei denen neben Effizienz und Schadstoffemissionen auch der Einfluss der Verbrennung auf die Produktqualität im Vordergrund steht. Beispiele hierfür wären etwa die Glas- und Keramikindustrie ([7], [8]) oder auch manche Wärmebehandlungsprozesse in der metallverarbeitenden Industrie, bei

denen selbst geringe Änderungen im Ofenraum Auswirkungen auf Produktqualität oder Schadstoffbildung haben. Schwankende chemische Zusammensetzungen des Erdgases, wie sie in Zukunft u. U. verstärkt zu erwarten sind, können den wirtschaftlichen und umweltschonenden Betrieb einer Thermoprozessanlage erheblich erschweren. Erste Fälle, bei denen schwankende Gasbeschaffenheiten zu Produktionsausfällen und erhöhten Schadstoffemissionen geführt haben, sind bereits bekannt (etwa [8], [9]). In einer von der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) durchgeführten Umfrage bestätigten etwa 50 % der Befragten, bereits Produktionsprobleme aufgrund von Gasbeschaffenheitsschwankungen erlebt zu haben [10].

Gerade in Deutschland mit seinen traditionell lokal recht konstanten Gasbeschaffenheiten [1], [11] ist die Frage nach Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsschwankungen auf industrielle Feuerungsprozesse relativ neu. Dies hat seine Ursachen in der bisher sehr stabilen Versorgungssituation. Viele Gebiete wurden über sehr lange Zeiträume hinweg mit den gleichen Gasqualitäten beliefert. Die Gaslieferverträge waren häufig längerfristig abgeschlossen, die Gasversorgung und der Netzbetrieb arbeiteten zumeist nicht getrennt. Manchen Anlagenbetreibern ist daher noch nicht bewusst, dass schwankende Gasqualitäten zu Problemen führen können.

Während es bereits erste Studien zu den Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsschwankungen bzw. generellen Erweiterungen zulässiger Gasqualitäten auf gasbefeuerte Anwendungen im Haushalt gibt (siehe z. B. [12], [13], [14], [15]), existieren bisher kaum Untersuchungen im industriellen Sektor, gerade im Bereich der Thermoprozesstechnik. Dies ist umso überraschender, da der Anteil der Industrie am Erdgasverbrauch in Europa bei etwa 35 % liegt. Allein die deutsche Glasindustrie verbraucht jährlich etwa 45 PJ an Erdgas und deckt damit etwa 2/3 ihres Endenergieverbrauchs. In Summe ist die deutsche Glasindustrie damit für etwa 5 % des Gesamtgasverbrauchs der deutschen Industrie verantwortlich [16].

Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfachs e. V. (DVGW) finanzierte im Rahmen seiner Innovationsoffensive Gas eine Studie (Förder-Nr. G 1/06/10), in der die Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsschwankungen auf eine Reihe industrieller Feuerungsprozesse (darunter auch Glasschmelzwannen) untersucht wurden. Einige Ergebnisse dieser Studie werden im Folgenden kurz angerissen. Für eine umfassendere Zusammenfassung der in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse sei auf den Abschlussbericht verwiesen, welcher Ende 2013 veröffentlicht wird [17]. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit zwischen den Forschungsstellen DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig (DBI, Koordinator), der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut am Karlsruher Institut für Technologie (EBI) und dem Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI) erarbeitet. Unterstützt wurde das Projekt von zahlreichen Mitgliedern aus Industrie, einschlägigen Verbänden und Energieversorgern.

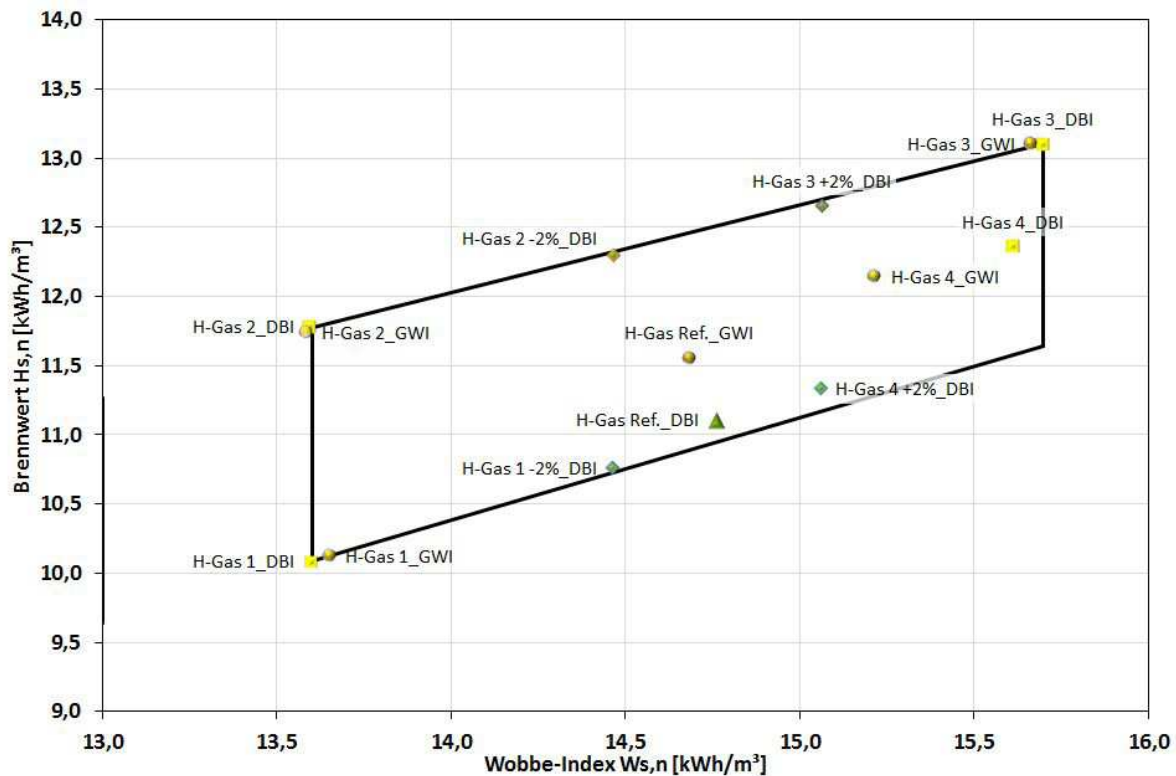


Abbildung 1: Testgase für die durchgeführten Untersuchungen.

Zur Abschätzung von möglichen Gasbeschaffenheitsschwankungen wurden Prognosen zur Erdgasförderung, Einspeisung regenerativ erzeugter Gase und von LNG recherchiert und in einer Gasmatrix zusammengeführt. Unter verbrennungstechnischen Gesichtspunkten wurde auch das novellierte DVGW-Arbeitsblatt G 260:2013 als Regelwerksvorgabe mit einbezogen.

Für alle Untersuchungen im Rahmen des Projektes wurden neben einem Referenzgas (z. B. H-Gas Ref_GWI) weitere Gase definiert, die sich an den Grenzen des von der G 260 erlaubten H- und L-Gas-Bereichs orientieren. Abbildung 1 zeigt die Testgase, welche an den Forschungsstellen GWI und DBI verwendet wurden. Als Referenzgas wurde das jeweils an den Standorten der Forschungsstellen vorhandene Erdgas verwendet. Die Testgase wurden aus den Referenzgasen durch Konditionierung (mit Propan, Stickstoff und Wasserstoff) hergestellt. Dies bedingt, dass sich die Testgase in ihrer Zusammensetzung geringfügig unterscheiden, jedoch sind die Wobbe-Indices und Brennwerte der Eckpunkte ähnlich.

H-Gas 1 weist dabei die minimalen für H-Gase zugelassenen Werte für Wobbe-Index, Brennwert und relativer Dichte auf, während H-Gas 3 für ein hoch-kalorisches Erdgas mit den maximal zulässigen Werte-Kombinationen für Wobbe-Index, Brennwert und relative Dichte steht. Die chemischen Zusammensetzungen und die entsprechenden verbrennungsrelevanten Kennwerte der Test-Gase für die Standorte Essen (GWI) und Freiberg (DBI) sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass weder H-Gas 1_GWI noch H-Gas 3_GWI real in Deutschland verteilte Gase sind. Sie wurden vielmehr ausgewählt, um Zustände an den Grenzen des von der G 260 aufgespannten Bereichs zulässiger Wobbe-Indices, Brennwerte und relativer Dichten abzubilden. Daher stellen auch die Simulationen, in denen vom Referenzgas auf eines der beiden anderen Gase umgestellt wird, extreme Szenarien dar. Es sind jedoch bereits in Europa Fälle bekannt geworden, bei denen Schwankungen, wie sie in diesen Szenarien

angenommen wurden, real aufgetreten sind, insbesondere in der Nähe von LNG-Terminals [9]. Am Beispiel dieser Szenarien werden im Folgenden einige Beispiele simuliert bzw. an Versuchsständen untersucht.

	H-Gas Ref._ GWI	H-Gas 3_GWI	H-Gas 1_GWI	H-Gas Ref._ DBI	H-Gas 3_DBI	H-Gas 1_DBI
Spezies	x_i [mol-%]	x_i [mol-%]	x_i [mol-%]	x_i [mol-%]	x_i [mol-%]	x_i [mol-%]
CH ₄	90,3133	67,735	74,96	98,0358	69,0172	82,0069
N ₂	1,1735	1,1301	0,974	0,7724	2,9938	5,9961
CO ₂	1,43	1,0725	2,8869	0,0316	0,0222	0,0264
C ₂ H ₆	5,4554	4,0916	4,528	0,8236	0,5798	0,6889
C ₃ H ₈	1,1916	15,6437	0,989	0,2409	17,8696	2,0015
n-C ₄ H ₁₀	0,1643	0,1232	0,1364	0,0389	0,0274	0,0325
i-C ₄ H ₁₀	0,1588	0,1191	0,1318	0,0409	0,0288	0,0342
n-C ₅ H ₁₂	0,0321	0,0241	0,0266	0,0063	0,0044	0,0053
i-C ₅ H ₁₂	0,0406	0,0305	0,0337	0,0074	0,0052	0,0062
n-C ₆ H ₁₄	0,0404	0,0303	0,0335	0,0021	0,0015	0,0018
H ₂	0	10	15,3	0,0000	9,4500	9,2000
Normdichte [kg/m ³]	0,80039	0,90428	0,71101	0,732	0,905	0,723
Heizwert [kWh/m ³]	10,436	11,884	9,114	10,02	11,84	9,11
Brennwert [kWh/m ³]	11,553	13,100	10,124	11,11	13,10	10,11
Wobbe-Index [kWh/m ³]	14,683	15,664	13,652	14,76	15,70	13,52

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung und verbrennungsrelevante Kennzahlen der Test-Gase an GWI und DBI.

3. Numerische Untersuchungen anhand einer Glasschmelzwanne

Die Glasindustrie gilt gemeinhin als eine Branche, die besonders sensibel auf schwankende Gasbeschaffenheiten reagiert [8], [9], [18]. Dies hat eine Reihe von Ursachen: die Qualität des Glases ist in hohem Maße von den Ofenraumtemperaturen, der Gasatmosphäre oberhalb der Schmelze und einem kontrolliertem Wärmeeintrag in das Glasbad abhängig. Selbst geringfügige Änderungen können hier zu veränderten Produkteigenschaften und damit schlimmstenfalls zu Produktionsausfällen führen. Da je nach Glasqualität für den Schmelzvorgang 50 - 80 % des Primärenergiebedarfs pro Tonne Glas für den Schmelzvorgang benötigt werden, kommt dem Schmelzaggregat eine herausragende Bedeutung im Produktionsprozess zu. Feuerraumtemperaturen von 1600 °C und mehr sind in einer Glasschmelzwanne nicht ungewöhnlich. Die im Ofenraum auftretenden Maximaltemperaturen sind entsprechend höher. Um derart hohe Temperaturniveaus zu erreichen, werden Glasschmelzwannen meist mit sehr hohen Luftvorwärmtemperaturen (bis zu 1400 °C) betrieben, die durch Regeneratoren erreicht werden. Bei dieser Prozessführung ist die erhöhte Bildung thermischer Stickoxide (NO_x) kaum zu vermeiden, zumal Glas-

schmelzwannen in der Regel bei knapp überstöchiometrischen Luftzahlen betrieben werden. Insofern stellen die NO_x -Emissionen für eine Glasschmelzwanne ein ausgesprochen wichtiges Kriterium dar.

Im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens wurde mit Hilfe von CFD-Simulationen untersucht, wie ein typischer Glasschmelzwannenprozess auf Änderungen in der Brenngaszusammensetzung reagiert. Der Einsatz von Simulationsverfahren bietet sich für diese Fragestellung aus einer Reihe von Gründen an. Zum einen erlaubt die hohe räumliche Auflösung der CFD-Simulation detaillierte Einblicke in die sich abspielenden Strömungs-, Mischungs-, Verbrennungs- und Wärmeübertragungsprozesse in einer industriellen Feuerungsanlage, die messtechnisch kaum zu realisieren wären. Dies ist insbesondere bei der vorliegenden Fragestellung relevant. Zum anderen ist es technisch nicht sinnvoll, eine Anlage dieser Größenordnung kontrolliert mit verschiedenen Gasqualitäten zu beaufschlagen. Die numerischen Simulationen wurden im Rahmen des Projekts auch mit Hilfe von Messungen an Brennerprüfständen validiert, so dass die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse sichergestellt ist.

In den Simulationen wird durchgespielt, was passiert, wenn die auf das Referenzgas eingestellte Glasschmelzwanne unvermittelt mit anderen Gaszusammensetzungen beaufschlagt wird. Für den Referenzfall mit dem Brenngas H-Gas Ref._GWI wird die Glasschmelzwanne mit einer Leistung von 4 MW bei einer Luftzahl von $\lambda = 1,05$ simuliert. Die Luftvorwärmtemperatur liegt bei 1300 °C. Dies ist ein typischer Betriebszustand für eine solche U-Flammenwanne. Für das Glasbad wurde in allen Simulationen ein realitätsnahes Temperaturprofil angenommen.

In einem der untersuchten Szenarien wurde durchgespielt, was passiert, wenn sich die Brenngaszusammensetzung ändert und eine im Abgaskanal montierte O_2 -Sonde diese Veränderung bemerkt. Der Verbrennungsluftvolumenstrom wird angepasst, um die eingestellte Luftzahl konstant zu halten, während der Brenngasvolumenstrom konstant bleibt. Dies hat zur Folge, dass die in den Ofenraum eingebrachte Leistung sich je nach Gaszusammensetzung unterscheidet. Damit verschiebt sich auch die Energiebilanz des Schmelzaggats (siehe Tabelle 2).

Global betrachtet hat diese Veränderung der Energiebilanz eine Reihe von Auswirkungen. Die Wärmemenge, die aus dem Feuerungsraum in die Schmelze eingebracht wird, verändert sich erheblich, was sich auf die Produktqualität des Glases auswirkt. Auch die im Abgas enthaltene thermische Energie variiert (siehe Abgastemperatur in Tabelle 2), je nachdem, ob die Brenner nun mit einer höheren (im Falle H-Gas 3_GWI) oder einer niedrigeren Leistung (bei H-Gas 1_GWI) betrieben werden. Dies hat in einer realen Anlage Auswirkungen auf die Effizienz der Regeneratoren und damit auf die Luftvorwärmtemperatur. Im Rahmen der Simulationen wurde diese Temperatur jedoch konstant gehalten.

Gasart	Q_{Reaktion} [kW]	Q_{Luft} [kW]	Q_{Glasbad} [kW]	$Q_{\text{Ofenwände}}$ [kW]	Q_{Abgas} [kW]	T_{Abgas} [°C]	NO_x [%]
H-Gas Ref._GWI	4000	2175	1096	2525	2554	1340	100
H-Gas 3_GWI	4554	2437	1455	2632	2904	1377	107
H-Gas 1_GWI	3494	1900	741	2519	2134	1316	95

Tabelle 2: Energiebilanz, Abgastemperatur und Änderung der NO_x-Emissionen in einer simulierten Glasschmelzwanne bei Anpassung des Verbrennungsluftstroms (Szenario: $V_{\text{Gas}} = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$).

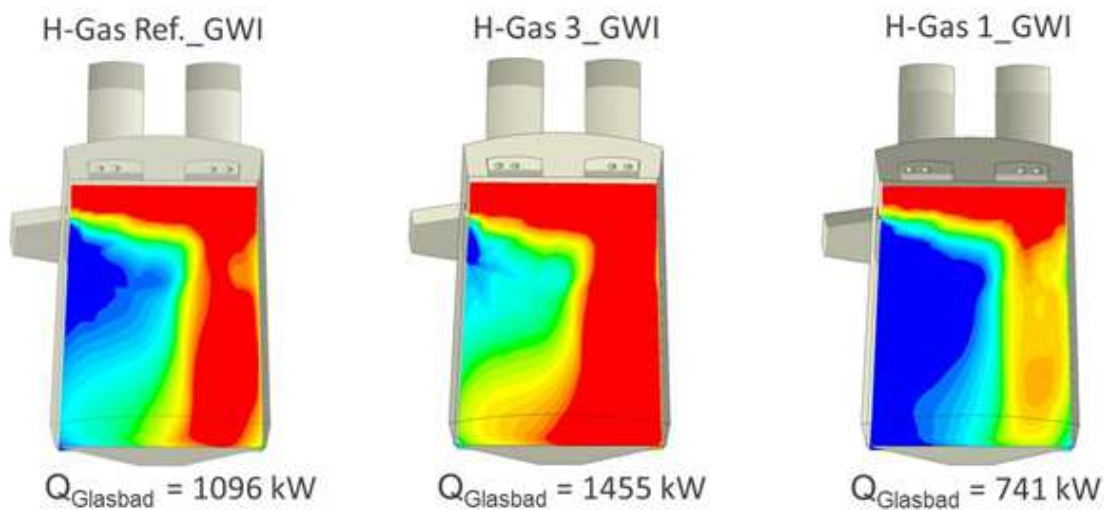


Abbildung 2: Wärmestromdichtenverteilung auf dem Glasbad für die drei untersuchten Gase bei Anpassung des Verbrennungsluftstroms (Szenario $V_{\text{Gas}} = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$).

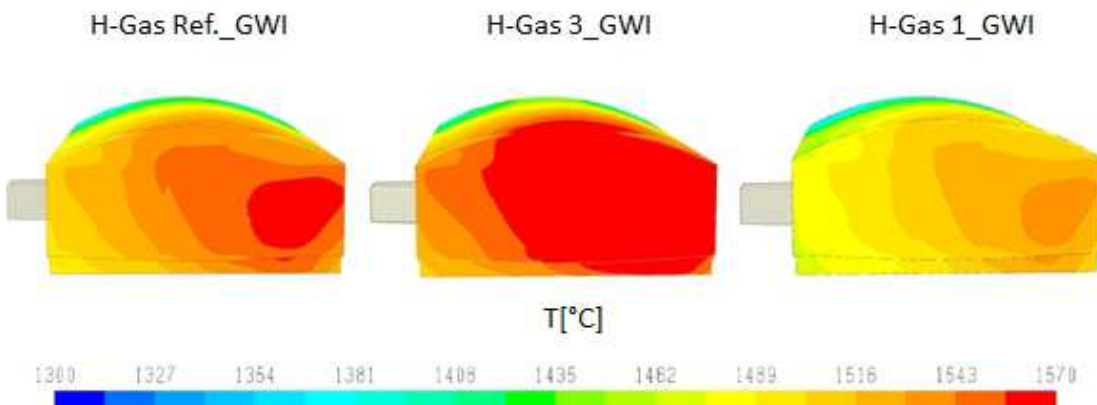


Abbildung 3: Oberflächentemperaturen an der Rückwand der Glasschmelzwanne bei Anpassung des Verbrennungsluftstroms (Szenario $V_{\text{Gas}} = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$).

Bei der Glasproduktion spielt der lokale Wärmeeintrag in das Glasbad, insbesondere die Positionen der „hot spots“, eine wesentliche Rolle für die Strömungsverhältnisse im Bad und damit für die Produktqualität. Abbildung 2 stellt dar, wie sich die veränderte Brenngaszusammensetzung auf die in das Glasbad eingetragene Wärmemenge auswirkt. Der heiße Bereich über dem Glasbad ist im Falle des hochkalorischen H-Gas 3_GWI erheblich ausgeprägter als im Referenzfall. Entsprechend weniger Wärme kann beim Einsatz des nieder-kalorischen H-Gas 1_GWI übertragen werden. Dies war bereits anhand der integralen Wärmeflüsse in das Glasbad (siehe Tabelle 2) zu erwarten gewesen, kann aber mit Hilfe der CFD-Simulation räumlich aufgelöst dargestellt werden.

Von den Veränderungen ist nicht nur das Glasbad betroffen, auch die Wärmebelastung des Feuerfestmaterials der Wanne variiert je nach betrachtetem Brenngas, wie anhand von Abbildung 3 deutlich wird. Hier sind die Oberflächentemperaturen an der Rückwand der Glasschmelzwanne für die drei untersuchten Fälle dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Falle des höher-kalorischen H-Gas 3_GWI die Rückwand einer erheblich größeren Wärmebelastung ausgesetzt ist als im Referenzfall. Die Ursache hierfür ist die weitaus größere Reaktionszone im Fall H-Gas 3_GWI, die sich bereits in Abbildung 2 erkennen lässt. Im schlimmsten Fall kann dies bedeuten, dass das Feuerfestmaterial hier überhitzt und damit beschädigt wird. Das beeinflusst unmittelbar die Lebensdauer des gesamten Aggregates.

Neben der Wärmeverteilung im Ofenraum stellen die NO_x -Emissionen einen wichtigen Aspekt bei der Auslegung einer Glasschmelzwanne dar. Anhand der Tabelle 2 wird deutlich, dass die im Abgas enthaltene thermische Energie erheblich von der Brennerleistung und damit vom verwendeten Brenngas abhängig ist. Dies schlägt sich auch in den Abgastemperaturen und in den NO_x -Emissionen nieder. Bei den Simulationen ergab sich, bezogen auf den Referenzfall, für H-Gas 3_GWI ein Anstieg der NO_x -Emissionen um knapp 7 %, für H-Gas 1_GWI hingegen eine Reduktion um etwa 5 %. Da der Verbrennungsvorgang in Glasschmelzwannen prozessbedingt mit starker NO_x -Bildung verbunden ist, könnte ein gasqualitätsbedingter Anstieg der Emissionen durchaus zur Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte oder zu steigenden Betriebskosten in nachgeschalteten DENOX-Anlagen führen.

In einem weiteren Szenario wurden die Auswirkungen einer unbemerkten Gasbeschaffenheitsänderung simuliert, d.h. die Volumenströme für Luft und Brenngas wurden trotz eines veränderten Brenngases nicht angepasst. Hierbei handelt es sich definitiv um ein „worst case“-Szenario. Im Falle des Wechsels zum hoch-kalorischen H-Gas 3_GWI kommt es in der Wanne zu einer unterstöchiometrischen Verbrennung mit hohen CO -Emissionen verbunden mit potentiell gefährlichen Auswirkungen für Personal und Anlage. Im Falle des Wechsels hin zum nieder-kalorischen H-Gas 1_GWI sind die Auswirkungen nicht ganz so dramatisch, allerdings wird die Anlage nun mit einer Luftzahl von 1,21 betrieben, mit entsprechenden Verlusten bei der thermischen Effizienz.

Die Simulationen weisen noch auf andere potentielle Auswirkungen von Gasbeschaffenheits-schwankungen hin. So führen veränderte Volumenströme z. B. unter Umständen zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten unmittelbar über der Glasbadoberfläche, was einen erhöhten Staubaustrag aus dem Ofenraum in den Regenerator zu Folge haben kann.

Die Untersuchungen an der simulierten Glasschmelzwanne verdeutlichen, welche Bedeutung die genaue Kenntnis der Zustände im Ofenraum für einen sicheren, effizienten und schadstoffarmen Betrieb bei konstanter Produktqualität hat. Wenn die Möglichkeit einer veränderten Brenngaszusammensetzung besteht, sollte diese detektiert und mit geeigneten Maßnahmen kompensiert werden. Neben dem Schmelzaggregat selbst

werden jedoch auch insbesondere Feeder-Brenner als besonders empfindlich in Bezug auf Gasbeschaffenheitsschwankungen eingeschätzt, da sie als Vormischbrenner sehr sensibel auf Änderungen der Brenngaszusammensetzung reagieren. Zudem stellen Feeder-Systeme extreme Anforderungen an die Temperaturkontrolle, um eine Homogenisierung des Temperaturprofils in der Schmelze zu erreichen. Gespräche mit Glasmelzwannenbetreibern bestätigten die mit Hilfe der Simulationen gewonnenen Erkenntnisse.

4. Experimentelle Untersuchungen

Die CFD-Analysen wurden von umfangreichen Messkampagnen an einem semi-industriellen Brennerprüfstand des GWI und dem Prüffeld „Industriekessel“ des DBI begleitet. Ziel dieser Untersuchungen war es, mit messtechnischen Methoden den Einfluss von Gasbeschaffenheitsschwankungen zu belegen und gleichzeitig Messdaten für die Validierung der CFD-Simulationen zur Verfügung zu stellen. Die Erkenntnisse der Simulationen konnten durch die Messungen bestätigt werden. Die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messungen an den Prüfständen belegt zudem, dass auch die mit Hilfe der Simulation gewonnenen Erkenntnisse zu realen Industriefeuerungen aussagekräftig sind. So konnte zum Beispiel durch Messungen am Brennerprüfstand des GWI belegt werden, dass sich selbst bei gleicher Leistung und Luftzahl aufgrund der unterschiedlichen Gaszusammensetzungen unterschiedliche Temperaturfelder im Feuerraum einstellen.

Am DBI wurden u. a. die Auswirkungen eines plötzlichen Gasbeschaffenheitswechsels auf den Brenner eines Industriekessels untersucht. Bei dem verwendeten Brenner (Brennerleistung 100 kW) handelte es sich um einen Gebläsebrenner, der auf einen konstanten Verbrennungsluftvolumenstrom (drehzahlgesteuert) eingestellt war. Der Brenngasvolumenstrom wird über einen zum Verbrennungsluftvolumenstrom proportionalen Differenzdruckregler gesteuert. Bedingt durch die veränderten strömungsmechanischen und chemischen Eigenschaften der Brenngase (z. B. Dichte und minimaler Luftbedarf) kommt es zur Veränderung des Luftverhältnisses. Für die Versuche wurde, analog zu den Untersuchungen am GWI, eine Reihe von Testgasen definiert, die die maximalen Grenzen der G 260 im H-Gas-Bereich abdecken (H-Gas 1_DBI, H-Gas 3_DBI, H-Gas Ref._DBI vgl. Abbildung 1 und Tabelle 1). Anders als am GWI wurde jedoch direkt von dem nieder-kalorischen Erdgas auf das hoch-kalorische Gas (bzw. umgekehrt vom hoch-kalorischen auf das nieder-kalorische Gas) umgestellt.

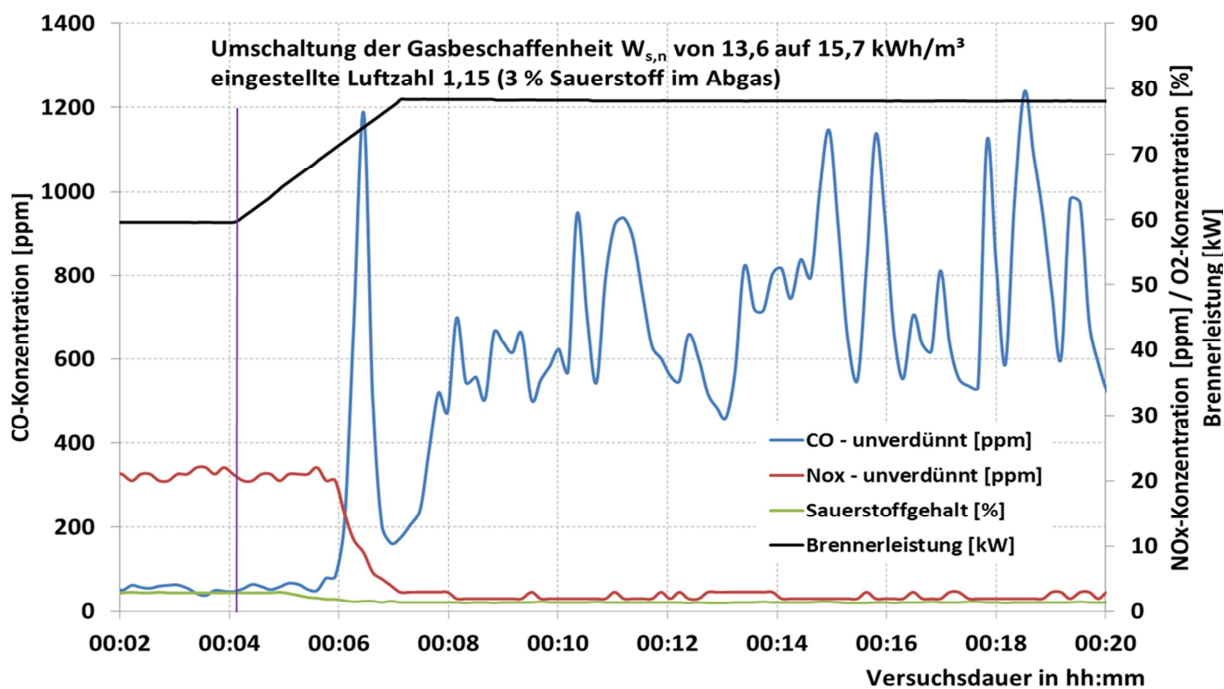


Abbildung 4: Auswirkungen eines Wechsels von nieder-kalorischem Erdgas zu hoch-kalorischem Erdgas in einem Versuchskessel [17].

Bei den Versuchen wurde deutlich, dass ein Gasbeschaffenheitswechsel über den gesamten Gültigkeitsbereich der G 260 hinweg (im H-Gas-Bereich) erhebliche Auswirkungen auf den Betrieb der Anlage hat. In einem Versuch, der in Abbildung 4 dargestellt ist, führte ein Wechsel vom nieder-kalorischem H-Gas 1_DBI ($W_{s,n} = 13,6 \text{ kWh/m}^3$) auf das hoch-kalorische H-Gas 3_DBI ($W_{s,n} = 15,7 \text{ kWh/m}^3$) zu erheblichen Betriebsproblemen. Die Brennerleistung stieg an, während der Rest-Sauerstoffgehalt im Abgas abfiel, da sich sowohl Dichte als auch Heizwert und minimaler Luftbedarf des Brenngases (bei konstanter Luftzufuhr) veränderten. Problematisch war insbesondere der drastische Anstieg der CO-Emissionen, die zudem starken Fluktuationen unterworfen waren. Der Brenner konnte bei diesen Einstellungen nicht stabil betrieben werden.

5. Lösungsansätze und Zusammenfassung

Erdgas-befeuerte industrielle Feuerungsanlagen unterliegen in der Regel weitaus strengeren wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen als Gasgeräte im Haushalt. Aufgrund der deutlich höheren Brennerleistungen spielen vor allem Wirkungsgrade und damit Betriebskosten eine größere Rolle. Das Fenster zum optimalen Betrieb einer solchen Anlage ist daher in der Regel recht klein, weswegen gerade Industriebrenner oft sehr „scharf“, also nur mit minimalem Luftüberschuss, gefahren werden. Gasbeschaffenheitsschwankungen mit ihren komplexen Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess erschweren den optimalen Betrieb einer Anlage zusätzlich, zumal sich diese Schwankungen in der Regel der Kontrolle des Betreibers entziehen.

Zudem stehen Thermoprozessanlagen meistens im Verbund mit komplexen Produktionsketten. Im Bereich der Glasindustrie etwa wäre nicht nur die Glasschmelzwanne von einer eventuellen Änderung der dargebotenen Gasbeschaffenheit betroffen, sondern auch alle anderen Prozessschritte, in denen Erdgas zum Einsatz kommt, also zum Beispiel im Feeder oder auch in den Kühlöfen. Außerdem würde sich aufgrund der veränderten Abgastemperaturen eine Änderung der Gasqualität auch auf den Betrieb des

Regenerators niederschlagen. Es genügt daher nicht, Verbrennungsprozesse nur isoliert zu betrachten, sondern vor- oder nachgeschaltete Anlagen und Prozesse müssen ebenfalls ganzheitlich berücksichtigt werden.

Prozess	Variation des Brennwertes oder Wobbe-Index		
	< 3 %	3 - 5 %	5 - 10%
Heizkessel	■	■	■
Trocknung	■	■	■
Schmelzprozesse (NE-Metalle)	■	■	■
Vorwärmung (Metalle)	■	■	■
Glasnachbehandlung	■	■	■
Ziegelfertigung	■	■	■
Wärmebehandlung	■	■	■
Glasschmelzen (Behälterglas), Feeder	■	■	■
Porzellanbrennen	■	■	■
Kalköfen, Kalzinierung von Tonerden	■	■	■
Glasschmelzen (Flachglas)	■	■	■
Kunststoffindustrie	■	■	■

■ kaum empfindlich

■ empfindlich

■ sehr empfindlich

Abbildung 5: Einschätzung eines französischen Gasversorgers: Empfindlichkeiten verschiedener industrieller Feuerungsprozesse in Bezug auf Gasbeschaffenheitsschwankungen [18].

Die Glasindustrie steht nicht allein vor der Herausforderung, schwankende Gasbeschaffenheiten mit einer optimalen Fahrweise in Einklang zu bringen. So zeigt Abbildung 5 eine aktuelle Einschätzung eines großen französischen Gasversorgers hinsichtlich der Empfindlichkeiten verschiedener industrieller Feuerungsprozesse in Bezug auf Veränderungen des Wobbe-Index bzw. des Brennwertes [18]. Zwar ist diese Darstellung nicht unumstritten (siehe z.B. auch [19] für eine alternative Einschätzung aus deutscher Sicht), sie macht jedoch deutlich, dass die Frage der Auswirkungen von Erdgasbeschaffenheitsschwankungen auf industrielle Feuerungsprobleme ein branchenübergreifendes Thema ist.

Die Untersuchungen im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens zeigen, dass es keine allgemeingültigen Lösungsansätze gibt. Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und Anforderungsprofile des Energieträgers Erdgas in der Industrie haben sich in den verschiedenen Bereichen der thermischen Verfahrenstechnik sehr unterschiedliche Technologien und Ansätze zum optimalen Betrieb von Thermoprozessanlagen entwickelt. Einige Gemeinsamkeiten gibt es aber dennoch.

Neben einer verbesserten Kommunikation zwischen Gasversorger und Anlagenbetreiber (auch und gerade unter Einbeziehung moderner Kommunikationswege wie etwa dem Internet oder SMS ([18], [20], [21]) wird vor allem eine bessere messtechnische Erfassung der relevanten Prozessparameter als unerlässlich angesehen. Dabei sollte die Überwachung des Feuerungsprozesses im Feuerungsraum zur besseren Brennersteuerung Stand der Technik sein, um Produktqualität, Effizienz und niedrige Schadstoffemissionen sicher-

zustellen. Für die Prozessregelung ist insbesondere der Restsauerstoffgehalt im Abgas von Bedeutung, da sich daraus die im Ofenraum vorliegende globale Luftzahl ableiten lässt. Änderungen der Gasbeschaffenheit wirken sich u. a. auf den minimalen Luftbedarf und damit auf die Luftzahl aus, sodass eine Lambda-Sonde ein erster Ansatz zur Kompensation von Gasbeschaffenheitsschwankungen sein kann. Darüber hinaus kann aus Umweltschutzgründen die Messung weiterer Abgaskomponenten wie CO und NO_x ebenfalls erforderlich sein. Auf europäischer Ebene sind Luftzahlvorgaben für Thermoprozesse im Bereich von $\lambda = 1,1$ [22] geplant, was bei Gasbeschaffenheitsschwankungen hin zu höher-kalorischen Gasen ohne Kompensation zu Emissionsproblemen führen kann. Eine Leistungsregelung wäre durch die Messung der Abgasbestandteile noch nicht gegeben. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass nach wie vor zahlreiche Anlagen existieren, die über fest hinterlegte Volumenstromverhältnisse oder eingestellte Brenngasdruckverluste gesteuert werden. Die bereits vorgestellten Simulationen und Messungen weisen die unzureichende Flexibilität dieser Steuerungsmethodik auf, da hier nicht in ausreichendem Maße auf variable physikalische und chemische Eigenschaften des Brenngases Rücksicht genommen werden kann. Eine separate Steuerung der Brenngas- und Oxidatorvolumenströme ist diesbezüglich im Sinne einer kombinierten Leistungs- und Verbrennungsgüteregelung weitaus zielführender. Solch innovative, vergleichsweise kostengünstige Leistungs- und Verbrennungsgüteregelungen auf Basis von Abgasmessungen und Temperaturmessungen können auch im Bestand nachgerüstet werden, vielfach müssen aber entsprechende Schnittstellen zwischen Sensorik und Aktorik und vor allem ein prozessspezifisches Regelungsmodell eingeführt werden. Durch die Bestimmung charakteristischer Brenngasgrößen, etwa Heizwerte, Wobbe-Index oder auch physikalische Größen wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit oder Schallgeschwindigkeit, können Eigenschaften eines Brenngasgemischs in größerem Umfang bei der Regelung der Anlage berücksichtigt werden. Hierbei ist sicherzustellen, dass die zu erwartenden Brenngaszusammensetzungen mit dem verwendeten Messverfahren kompatibel, d. h. durch die Kalibration und Justage abgedeckt sind

In manchen Anwendungsfällen ist die Bestimmung einiger weniger charakteristischer Brenngaskenngrößen nicht ausreichend, um Produktqualität und Effizienz einer Thermoanlagen sicherzustellen. Dies gilt im Wesentlichen für Prozesse, bei denen die Flamme in unmittelbarem Kontakt mit einem Wärmegut kommt, etwa bei Schmelz- oder Wärmebehandlungsprozessen, wie sie in der Glas-, Keramik- oder auch Metallindustrie zu finden sind. Bei diesen Prozessen spielen Flammenlänge und -form sowie die sich daraus ergebenden Wärmeflüsse in das Wärmegut eine wesentliche Rolle für die Produktqualität. Die Flammenform wiederum wird durch die chemische Zusammensetzung des Brenngases beeinflusst, so dass eine Reduktion der Beschreibung der Gasqualität auf einen oder mehrere Kennwerte oft nicht ausreichend ist. In diesen Fällen kommen Gaschromatographen (GC) zum Einsatz, die die chemische Zusammensetzung eines Gases aufschlüsseln können. In [8] und [9] sind Fälle beschrieben, in denen empfindliche Prozesse aus der Glasindustrie durch den Einsatz von Gaschromatographen in Kombination mit entsprechenden Regelungsstrategien erfolgreich trotz schwankender Gasqualitäten betrieben werden konnten, während vorher installierte Regelungen über den Wobbe-Index versagt hatten. Nachteile von Gaschromatographen sind jedoch die vergleichsweise hohen Investitions- und Betriebskosten. Zwar hat der Einsatz von Micro-GCs bislang kaum zur Senkung der Investitionskosten des Messgeräts beigetragen, die Betriebskosten jedoch konnten deutlich gesenkt werden. Erste vereinfachte Messverfahren existieren bereits im Labor, müssen aber noch auf ihre Industrietauglichkeit überprüft werden.

Eine weitere Möglichkeit, eine konstante Gasbeschaffenheit an einer Thermoprozessanlage zu gewährleisten, ist die Kombination einer Gasbeschaffenheitsmessung mit einer Konditionierung vor Ort mit Hilfe von Zusatzgasen, z. B. Flüssiggas, Stickstoff oder Luft, wie sie etwa auch bei der Einspeisung von Bioerdgas angewendet wird. So eine lokale Gaskonditionierung dürfte für viele Industriebetriebe jedoch keine wirtschaftlich sinnvolle Lösung sein. Bei allen adaptiven Leistungs- und Verbrennungsgüterregelsystemen auf Basis von Prä-, In-situ- und/oder Post-Prozessmessungen ist zu klären, wie solche Geräte sinnvoll, sicher und normgerecht in bestehende Mess-, Steuer- und Regelungssysteme von Thermoprozessanlagen eingebunden werden können. Es sei an dieser Stelle u. a. auf die DIN EN 746, Teil 2, und die Maschinenrichtlinie hingewiesen. Diese Normen betrachten erstmalig die gesamte Sicherheitskette. Um ausreichend hohe Sicherheitsintegritäts-Level (SIL) und Performance-Levels (PL) zu erreichen, genügt es nicht mehr, dass die Einzelkomponenten entsprechend zertifiziert sind. Vielmehr muss die gesamte Prozesssteuerung den definierten Anforderungen gerecht werden [23].

Allgemein lässt sich festhalten, dass Gasbeschaffenheitsschwankungen bei Auslegung und Betrieb von Thermoprozessanlagen in Zukunft eine weitaus größere Rolle spielen werden als bisher. Im Bereich von gasbeschaffenheitssensiblen Thermoprozessanlagen sind bereits Prozess- und Produktqualitätsstörungen aufgrund von Gasbeschaffenheitsfluktuationen aufgetreten. Angesichts der Vielfalt an gasbefeuerten Thermoprozessen gibt es jedoch keine allgemeingültige Lösung, wie in Zukunft mit solchen Schwankungen umzugehen ist. Jeder Prozess und jede Anlage reagieren unterschiedlich. Viele Prozesse weisen eine ausreichende Robustheit in ihren Betriebsparametern auf, um mit verhältnismäßig geringem Aufwand auf Gasbeschaffenheitsfluktuationen vorbereitet werden zu können. Andere hingegen sind prozessbedingt sensibler und erfordern entsprechend mehr Aufwand bei der Kompensation. Im Abschlussbericht des DVGW-Projektes G 1/06/10 „Untersuchung der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen“ wird auf die Kompensationsverfahren ausführlicher eingegangen [17].

Für alle Thermoprozessanlagen gilt jedoch, dass mehr und detaillierte Informationen über relevante Prozessparameter vor, während und nach dem Verbrennungsvorgang von entscheidender Bedeutung sind, um Gasbeschaffenheitsschwankungen und ihre Auswirkungen auf sensible Feuerungsprozesse frühzeitig zu erkennen und zu kompensieren. Flexiblere Eingriffsmöglichkeiten (etwa die separate Regelung von Brenngas- und Oxidatorvolumenströmen) ermöglichen eine einfachere Kompensation. Gerade automatisierte Regelungssysteme bieten hier viele Vorteile [18].

Darüber hinaus ist wichtig, ein wachsendes Bewusstsein bei der Gaswirtschaft, den Anlagenbauernbetreibern und Komponentenherstellern bezüglich der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsschwankungen auf sensible industrielle Anlagen und Prozesse zu schaffen. Für die Betreiber solcher Anlagen wäre eine frühzeitige Information über anstehende Gasbeschaffenheitsänderungen auf jeden Fall hilfreich.

7. Danksagung

Die Projektpartner danken dem DVGW für die Förderung des Projektes im Rahmen der Innovationsoffensive Gas. Weiterhin möchten die Forschungsstellen allen Mitgliedern der Projektbegleitgruppe für ihre intensive und engagierte Zusammenarbeit sowie den Industriefirmen für die Bereitstellung von Untersuchungsmaterialien ihren Dank aussprechen.

8. Literatur

- [1] Nitschke-Kowsky, P., Schenk, J., Schley, P., Altfeld, K., "Gasbeschaffenheiten in Deutschland", *Gaswärme International*, Ausgabe 6, S. 55–60, 2012.
- [2] Krause, H., Müller-Syring, G., "Das Erdgasnetz als Speicher für regenerative Energie", *gwf-Gas|Erdgas*, Ausgabe 11, S. 764–770, 2010.
- [3] Krause, H., "Bewertung der Energieversorgung mit leitungsgebundenen gasförmigen Brennstoffen im Vergleich zu anderen Energieträgern", Abschlussbericht DVGW Forschungsprojekt G 5-04-09, Bonn, 2011.
- [4] Directive 2003/55/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 98/30/EC. 2003.
- [5] Bunte, K., *Das Gas und Wasserfach*, Band 70, Ausgabe 19, S. 445–446, 1927.
- [6] "Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G260 (A), 'Gasbeschaffenheit'", Bonn, 2013.
- [7] Spielmann, S., "Schwankungen im Erdgasnetz und die Auswirkungen auf industrielle Feuerungsanlagen", *VIK Mitteilungen*, Ausgabe 3, S. 17–19, 2012.
- [8] Giese, A., "Gasbeschaffenheitsschwankungen - Mögliche Auswirkungen auf industrielle Anwendungen", *Gaswärme International*, Ausgabe 2, S. 70–75, 2013.
- [9] Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality. BP/IGU, 2011.
- [10] Fleischmann, B., "Ergebnis einer HVG-Umfrage zu Erfahrungen der Glasindustrie mit Gasbeschaffenheitsschwankungen im Erdgasnetz", Mitteilung Nr. 2155, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V., Offenbach, 2011.
- [11] Nitschke-Kowsky, P., Schenk, J., Schley, P., Altfeld, K., "Gasbeschaffenheiten in Deutschland: Was zum Wobbe-Index gesagt werden muss", *gwf-Gas|Erdgas*, Ausgabe 06, S. 440–445, 2012.
- [12] Kaltenmaier, A., Endisch, J., "Das GASQUAL-Projekt - Ausweitung der Grenzen der Erdgasbeschaffenheit und Konsequenzen für den Betrieb häuslicher Geräte im Bestand", *gwf-Gas|Erdgas*, Ausgabe 5, S. 348–357, 2013.
- [13] "GASQUAL Deliverable Approved by CEN/BT WG 197 'Gas Quality'", CEN/AFNOR/WG 197 N 231, 2010.
- [14] Singer, B.C., "Natural Gas Variability in California: Environmental Impacts and Device Performance: Literature Review and Evaluation for Residential Appliances", California Energy Commission, CEC-500-2006-110, 2007.
- [15] Nitschke-Kowsky, P., Radtke, H., "Untersuchung von verbrennungsgeregelten Gasbrennwertgeräten aus der Praxis", *gwf-Gas|Erdgas*, Ausgabe 12, S. 858–866, 2010.
- [16] Fleischmann, B., "Einfluss von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle Prozessfeuerungen am Beispiel der Glasindustrie", Gasfachliche Aussprachetagung (gat), Nürnberg, 2013.
- [17] Wersch, M., Franke, S., Dörr, H., Giese A., Benthin, J., "DVGW-Forschungsauftrag: Gasbeschaffenheit Industrie - Untersuchungen der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen (G 1/06/10 Phase I und II)", Abschlussbericht DVGW Forschungsprojekt G 1/06/10, 2013.

- [18] Cordier, R., "Impacts des variations de la qualité du gaz H dans les usages industriels", Colloque d'AFG sur la qualité du gaz, Paris, Frankreich, 2012.
- [19] Wersch, M., Krause, H., Franke, S., Giese, A., Dörr, H., "Vorstellung der F&E-Untersuchungen zum Einfluss der Gasbeschaffenheit in der Industrie", Gasfachliche Aussprachetagung (gat), Nürnberg, 2013.
- [20] Cordier, R., "A service offer in combustion control of gas-fired industrial thermal processes: applications in the glass industry (melting furnaces and feeders)", GLASSMAN Conference, 2009.
- [21] Lindgren, T., "Change of gas quality: a case study from Denmark", EGATEC 2013, Paris, Frankreich, 2013.
- [22] Beneke, F., "Aktuelle Entwicklungen im Normungsumfeld der ISO/TC 244 und der ErP", 4. Praxistagung "Effiziente Brennertechnik für Industrieöfen", Essen, 2013.
- [23] "Europäische Maschinenrichtlinie- einfach umgesetzt," Siemens AG, 2009.