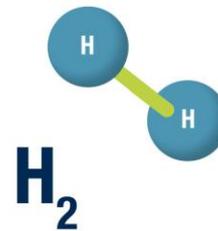


Verhalten bei volatilen Wasserstoffanteilen

Untersuchung des Verhaltens von Bestandsanlagen (Heiz- und KWK-Geräte) unter hohen, volatilen Wasserstoffmengen (0 – 40 Vol.-%) im Erdgas

Abschlussbericht



Quelle: DVGW



Impressum

Autoren

Dipl.-Ing. Frank Erler

Cand.-Ing. Philipp Röthig

Dr.-Ing. Matthias Werschky

DBI - Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg

Halsbrücker Str. 34

09599 Freiberg

Tel.: +49(0)3731 4195-310

Fax: +49(0)3731 4195-319

www.dbi-gruppe.de

Laufzeit

01.04.209 bis 01.11.2019

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Motivation und Zielsetzung	7
2 Auswirkungen der Zumischung von Wasserstoff in den Brennstoff Erdgas und damit verbundene Gasbeschaffenheitsschwankungen	8
2.1 Rahmenbedingungen der Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz	8
2.2 Brennverhalten bei Wasserstoff-Zumischung	10
2.2.1 Gegenüberstellung der brenntechnischen und reaktionskinetischen Kennwerte	10
2.2.2 Beeinflussung der Flammgeschwindigkeit	12
2.2.3 Beeinflussung der Zündeigenschaften	15
2.2.4 Neigung wasserstoffhaltiger Brenngase zum Übergang von Deflagration in Detonation	17
2.2.5 Einfluss auf den Löschabstand	18
2.2.6 Beeinflussung der Strahlung	18
2.2.7 Beeinflussung der Flammgeometrie	21
2.2.8 Flammentemperatur	23
2.2.9 Flammenüberwachung	24
2.2.10 Negativer Joule-Thomson-Effekt	26
2.2.11 Auswirkungen der Wasserstoffzumischung auf die akustische Belastung	27
2.2.12 Änderung der Abgaszusammensetzung	27
3 Durchführung von experimentellen Untersuchungen	28
3.1 Blockheizkraftwerk mit Gas-Ottomotor (Leistungsbereich 20 kW _{el})	29
3.1.1 Leistung und Effizienz	29
3.1.2 Abgastemperatur und -zusammensetzung	31
3.1.3 Kaltstartverhalten und Geräuschentwicklung	33
3.1.4 Verhalten bei dynamischer Änderung des Wasserstoffanteils	34
3.2 Gas-Brennwertgerät mit Gebläsebrenner (Leistungsbereich 20 kW)	35
3.2.1 Leistung und Effizienz	35
3.2.2 Abgastemperatur und –zusammensetzung	36
3.2.3 Geräuschentwicklung	37
3.2.4 Verhalten bei dynamischer Änderung des Wasserstoffanteils	37
3.3 Gas-Brennwertgerät mit Matrixbrenner (Leistungsbereich 100 kW)	38
3.3.1 Leistung und Effizienz	39
3.3.2 Abgastemperatur und –zusammensetzung	40
3.3.3 Geräuschentwicklung	41
4 Zusammenfassung und Ausblick	42

Inhalt

Literaturverzeichnis

43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einfluss der Zumischung von Wasserstoff, Stickstoff und Propan auf den Brennwert und Wobbe-Index verschiedener Gase (Nordsee H, Russ. Erdgas H) [6]	9
Abbildung 2:	Vergleich der laminaren Brenngeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils bei unterschiedlichen Stöchiometrischen Verhältnissen [16]	13
Abbildung 3:	Laminare Brenngeschwindigkeit von Methan, Wasserstoff und Gemischen mit mind. 50 Vol.-% Wasserstoff im Gemisch ($T_{ein} = 300\text{ K}$, $p = 1\text{ atm}$) [17]	14
Abbildung 4:	Laminare Brenngeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brennstoffgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{ein} = 300\text{ K}$, $p = 1\text{ bar}$)	15
Abbildung 5:	Zündungsverzugszeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brenngasgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{ein} = 1200\text{ K}$, $p = 1\text{ bar}$)	17
Abbildung 6:	Emissionsspektrum einer Wasserstoffflamme für die relevanten Wellenlängen [12]	19
Abbildung 7:	Emissionsspektrum einer Methanflamme aus einem Bunsenbrenner	19
Abbildung 8:	Strahlungswärmestromdichte für Erdgas und ein Brenngasgemisch mit 50 Vol.-% Wasserstoff [24]	20
Abbildung 9:	Verteilung der Wärmestromdichte, Brennerleistung und Brennkammerwandwärmestrom [24]	21
Abbildung 10:	Isofläche der trockenen CO-Konzentration aller Betriebspunkte; Vergleich der unkompenzierten (Szenario 1) und kompensierter (Szenario 3) Leistung und Luftzahl [24]	22
Abbildung 11:	Normalisierte Flammenlänge (L_i/d_j - Flammenlänge/Düsensdurchmesser) in Abhängigkeit der Wasserstoffkonzentration von 0 - 50 Vol.-% mit zusätzlicher Angabe der Schwankungsbreite [25]	23
Abbildung 12:	Temperaturfeld der Gemisch-Flamme von 0 - 50 Vol.-% Wasserstoffanteil im Erdgas (links) und radiales Temperaturprofil (rechts) brennernahe (1), mittig in der Flamme (2) und weit vom Brenner entfernt (3) [25]	24
Abbildung 13:	Ionisationsstrom als Funktion des H_2 -Anteils, Erdgas/ H_2 , Szenario 3, $T_{Ofen} = 700\text{ °C}$ [24]	25
Abbildung 14:	Emissionsspektren verschiedener Erdgas- / Wasserstoffgemische [26]	26
Abbildung 15:	Typische Lärmspektren turbulenter Flammen [29]	27
Abbildung 16:	Messstellenplan zur Bilanzierung der Testgerätes	28
Abbildung 17:	Verlauf von Brennstoffleistung und Nutzungsgraden bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen	31
Abbildung 18:	Verlauf der Abgasemissionen bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen	32
Abbildung 19:	Verlauf von Leistungen und Nutzungsgraden bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen	34
Abbildung 20:	Verlauf von Messdaten und Kenngrößen bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen im Brenngas	36
Abbildung 21:	Verlauf von Leistungen und Nutzungsgrad bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen	38
Abbildung 22:	Verlauf von Messdaten und Kenngrößen bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen im Brenngas	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte für Wasserstoff, mit einer Reinheit von 99,9 Vol.-% oder höher und Erdgas der Qualität Russland H, wie es am Standort vorliegt [8, 10, 12–14]	10
Tabelle 2: Ausgewählte brenntechnische und reaktionskinetische Eigenschaften von Erdgas Russland H, Wasserstoff und derer Gemische - Teil 1 [8, 10, 12–14]	11
Tabelle 3: Ausgewählte brenntechnische und reaktionskinetische Eigenschaften von Erdgas Russland H, Wasserstoff und derer Gemische - Teil 2 [8, 10, 12–15]	12
Tabelle 4: Laminare Brenngeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brennstoffgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 300\text{K}$, $p = 1 \text{ bar}$) [8]	14
Tabelle 5: Zündungsverzugszeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brenngasgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 1200\text{K}$, $p = 1 \text{ bar}$) [8]	17
Tabelle 6: Messstellen zur Erfassung aller erforderlichen Anlagendaten für eine vollständige Energiebilanz	29
Tabelle 7: Gemessene mittlere Leistungen bei unterschiedlicher Wasserstoffzumischung	30
Tabelle 8: Ermittelte Nutzungsgrad bei unterschiedlicher Wasserstoffzumischung	30
Tabelle 9: Gemessene Schallpegel am BHKW bei unterschiedlicher Wasserstoffzumischung	33
Tabelle 10: Mittlere Leistungen und berechneter Nutzungsgrad bei steigender Wasserstoffzumischung	35
Tabelle 11: Mittelwerte von Abgaskenngrößen bei steigender Wasserstoffzumischung	37
Tabelle 12: Gemessene Schallpegel am Brennwertkessel bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen	37
Tabelle 13: Mittlere Leistungen und berechneter Nutzungsgrad bei steigender Wasserstoffzumischung	39
Tabelle 14: Mittelwerte von Abgaskenngrößen bei steigender Wasserstoffzumischung	40
Tabelle 15: Gemessene Schallpegel am Brennwertkessel bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen	41

Abkürzungsverzeichnis

BHKW:	Blockheizkraftwerk
KWK:	Kraft-Wärme-Kopplung
BWK:	Brennwertgerät / Brennwertkessel

1 Motivation und Zielsetzung

„Die Bundesregierung misst mit Blick auf sektorenübergreifende Zusammenhänge dem grünen Wasserstoff für den Umbau der Wirtschaft eine zentrale Rolle zu. Gerade aber mit Blick auf die immer anspruchsvolleren Herausforderungen bis zur Mitte des Jahrhunderts wird die Dimension des Wasserstoffs noch erheblich an Bedeutung gewinnen. Das gilt es heute Bereits zu erkennen und die darin liegenden Chancen in Deutschland, Europa und Partner in der ganzen Welt durch Investitionen in Forschung und Innovationen sowie Marktanreizprogramme zu ergreifen. Daher wird die Bundesregierung noch bis Ende diesen Jahres eine Wasserstoffstrategie vorlegen“ [1].

Neben dem Klimaschutzprogramm 2030 hat die Bundesregierung im Zeitraum September/Oktober 2019 den Dialogprozess „Gas 2030“ veröffentlicht. Darin kommt den gasförmigen Energieträgern eine Schlüsselrolle in der Energiewende, vor allem in der Sektorenkopplung zu. Für die Gaswirtschaft bedeutet dies heute schon mit Weitblick auf mögliche Herausforderungen zuzugehen. Zudem soll bis zum Ende des Jahres 2019 eine Nationale Strategie Wasserstoff (NSW) veröffentlicht werden. Die Hauptaufgabe der NSW wird darin bestehen die Kernpunkte zum Thema Wasserstoff aus dem Dialogprozess „Gas 2030“ aufzugreifen und zu konkretisieren [2].

Um das CO₂-Einsparungsziel mittelfristig bis 2030 bzw. langfristig bis 2050 zu erreichen, muss auch im Gassektor ein Umbruch stattfinden. Dabei lag der Fokus dieses Projektes auf der Implementierung von grünem Wasserstoff als Zusatzgas im bestehenden Erdgasnetz. Der zu untersuchende Volumenanteil beläuft sich auf bis zu 40 Vol.-Prozent. Auf die Auswirkungen der Zuspeisung im einstelligen Anteil wird dabei nur bedingt eingegangen, da diese Zumischraten durch das bestehende DVGW-Arbeitsblatt G 260 mit den entsprechenden Restriktionen zugelassen sind [3–5].

Neben der Menge an Wasserstoff, welche dem Grundgas beigemischt wird, kann besonders die Volatilität der Einspeisemenge immense Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb und den Prozessablauf haben. Mit den von der Anlage und dem Brenngasgemisch bestehenden Vorkenntnissen können Modifikationen vorgenommen werden, um die Wasserstoffverträglichkeit der Anlage zu erhöhen. Diese Verträglichkeit lässt sich im Regelfall allerdings nur auf eine konstante Gemischzusammensetzung abstimmen. Wenn sich die Anteile der Komponenten im Brenngas sehr kurzfristig und im hohen Maß ändern, muss die Anpassung ebenso schnell, im Besten Fall noch vor dem Eintritt in den Prozess, vorgenommen werden. Ob und welche Anlagen einen Regelbedarf aufweisen und wie dieser umgesetzt wird, soll durch umfangreiche Literaturrecherche und Versuche an Bestandsanlagen ermittelt werden.

Im Rahmen des Projektes sollen folgende, im Bestand des AN befindlichen, handelsüblichen Heizgeräte und KWK-Anlagen untersucht werden:

- Blockheizkraftwerk mit Gas-Ottomotor (Leistungsbereich 20 kW_{el})
- Gas-Brennwertgerät mit Gebläsebrenner (Leistungsbereich 20 kW)
- Gas-Brennwertgerät mit Matrixbrenner (Leistungsbereich 100 kW)

Neben der veränderten Reaktionskinetik, welche Flammengeschwindigkeit, -länge, -temperatur, Zündeigenschaften und Wärmeabstrahlung beeinflusst, werden weiter die Einflüssen auf folgende Parameter untersucht:

- Leistung und Effizienz (unmittelbarer Zusammenhang zu Flammentemperatur und Wärmeabstrahlung)
- Abgastemperatur und –zusammensetzung
- Kaltstartverhalten (bei BHKW) und Geräuschentwicklung [5]

2 Auswirkungen der Zumischung von Wasserstoff in den Brennstoff Erdgas und damit verbundene Gasbeschaffenheitsschwankungen

2.1 Rahmenbedingungen der Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz

Bis zum Jahr 2050 hat sich Deutschland und die Europäische Union darauf verständigt die Treibhausgasemission um 80 % bis 95 %, verglichen mit dem Niveau von 1990, zu senken. Gesetzt wurde das Gesamtziel mit den dazugehörigen Zwischenetappen 2020 und 2030, „ [...] um den globalen Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius über den vorindustriellen Niveau zu begrenzen.“ [3]

Die Wichtigkeit gasförmiger Energieträger in der Energiewende wurde in der Veröffentlichung des Dialogprozesses „Gas 2030“ bestätigt. Um auch im Gassektor CO₂-frei bzw. CO₂-neutral zu werden, ist die Substitution von fossilen Kohlenwasserstoffen durch, im besten Fall, grünen Wasserstoff notwendig. Da es sich hierbei um einen gesamtwirtschaftlichen Umbruch handelt, gilt es frühzeitig Impulse an den richtigen Stellen zu setzen.

Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfachs e. V. DVGW legt mit dem im Technischen Regelwerk enthaltenen Arbeitsblatt G 260 die Gasbeschaffenheit in der öffentlichen Versorgung fest. Die wichtigste Größe bei der Beschreibung der Beschaffenheit bzw. der Austauschbarkeit ist der Wobbe-Index. Stimmen die Wobbe-Indizes zweier unterschiedlicher Brenngase überein, ist die resultierende Wärmebelastung bei gleichem Fließdruck ähnlich oder sogar identisch. Weiter werden mit dem DVGW-Arbeitsblatt G 262 die Rahmenbedingungen zur energetischen Nutzung von erneuerbaren Gase und die Anforderungen, die insbesondere dann zu beachten sind, wenn die Gase in die öffentliche Gasversorgung übernommen werden, geregelt. Neben Klär- und Biogasen wird auch die Nutzung von Wasserstoff beschrieben [4, 6, 7].

„Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Wasserstoffgehalt in einstelligem Prozentbereich im Erdgas in vielen Fällen unkritisch ist, wenn die brenntechnischen Kenndaten entsprechend DVGW-Arbeitsblatt G260 eingehalten werden.“ [6]

Dabei gelten weitere Restriktionen für bestimmte Anwendungsfälle. Durch das „Deutsche Institut für Normung e. V.“ wurde u.a. in der DIN 51624 die Einspeisemenge auf zwei Volumenprozent begrenzt, wenn sich im Einzugsgebiet der Einspeisung Erdgastankstellen befinden. Hintergrund ist die Wasserstoffunverträglichkeit der Tanks von Erdgas-betriebenen Fahrzeugen. Zusätzlich muss eine Methan-Zahl von 70 oder höher gegeben sein, um das „Klopfen“ im Verdichtungstakt des Motors zu unterbinden [8]. Bei der Nutzung von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen treten bei Gasturbinen, welche mit schadstoffarmen Vormischbrennern arbeiten, verschiedene Probleme, vor allem an den Turbinenschaufeln im sensiblen Bereich der mageren Vormischverbrennung auf. Somit haben die Hersteller dieser Turbinen den Anteil von Wasserstoff auf fünf, teilweise auch auf nur ein Volumenprozent begrenzt. Nach dem derzeitigen Stand der Technik besitzen eine Vielzahl von Prozessgaschromatographen noch nicht die Fähigkeit Wasserstoff sicher zu detektieren, wobei herstellerseitig Bestrebungen bestehen die Chromatographen dahingehend weiterzuentwickeln. Weiterhin besteht in Untertageporenspeichern das Potential der H₂S-Produktion. Die Menge an Wasserstoff im Porenspeicher sollte minimiert werden, da dieser Nährmedium für sulfatreduzierende Bakterien ist [6].

Infolge der Richtlinien des DVGW-Arbeitsblatts G260 ist die Menge an Wasserstoff, der in das Erdgasnetz eingespeist werden kann, begrenzt. So ist beispielsweise der Anteil für die Bezugsgebiete von Erdgas der Qualität Russland H auf 4 Vol.-%, wie in der Abbildung 1 sichtbar ist, begrenzt. Bei einer weiteren Erhöhung des Anteils von Wasserstoff würde die relative Dichte des Gemischs unter den Grenzwert von 0,55 sinken.

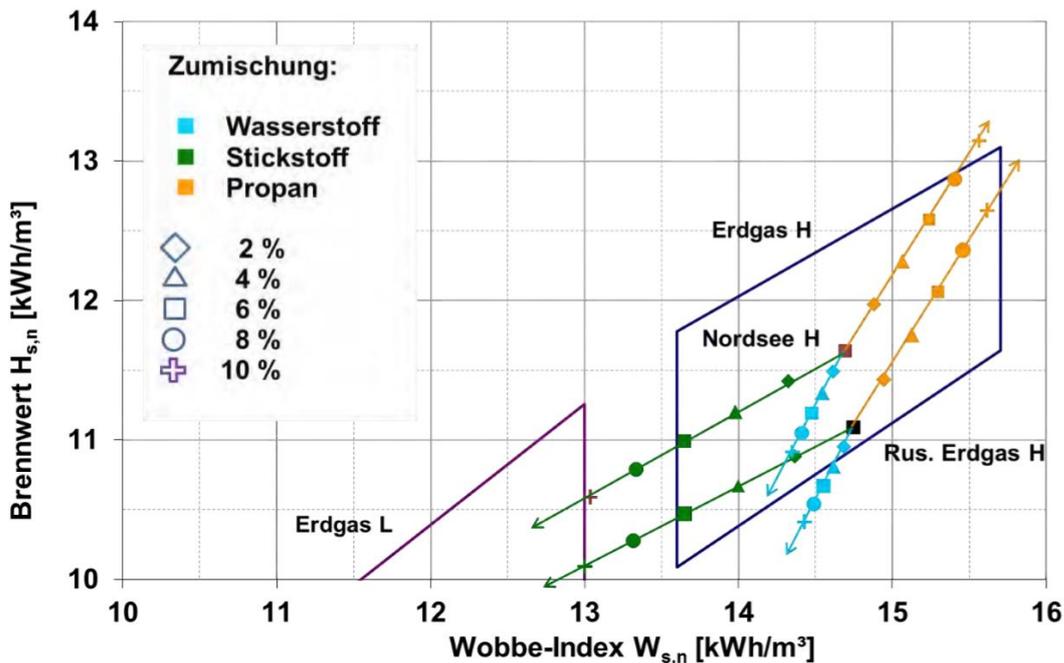


Abbildung 1: Einfluss der Zumischung von Wasserstoff, Stickstoff und Propan auf den Brennwert und Wobbe-Index verschiedener Gase (Nordsee H, Russ. Erdgas H) [6]

Die größte Herausforderung für die Verwendung von Wasserstoff ist die hohe Fluktuation der Einspeisung. Wenn der Wasserstoff auf Basis regenerativer Energiequellen CO₂-neutral bzw. CO₂-frei hergestellt wird, so erfolgt die Produktion vor allem in Abhängigkeit von Überschussstrom aus Wind- und Solarkraftwerken. Da diese hohen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, kann nicht von einem konstanten Wasserstoffanteil im Erdgasnetz ausgegangen werden. Seit der Liberalisierung des Gasmarktes im Jahr 2011 sind die Abnehmer von Gas aus dem Erdgasnetz zunehmenden Schwankungen ausgesetzt. Bisher sind diese hauptsächlich durch die Einspeisung von Biogas und den kurzfristigen und kostenorientierten Gashandel entstanden. Die so auftretenden Schwankungen im Wobbe-Index bleiben im unteren einstelligen Prozentbereich. Eine Vielzahl von Prozessen kann mit dieser Schwankungsbreite umgehen [9]. Zusätzlich können die Bestrebungen einen in Europa flächendeckenden Gashandel mit gleichbleibender Beschaffenheit und Grenzwerten auszubauen dazu führen, dass es regional nicht nur zu einer Gasumstellung, sondern eben auch damit einhergehend zu Schwankungen kommt. Die sogenannte H-Gas-Harmonisierung soll durch den Abbau nationaler Regelungen in der Gasbeschaffenheit einen europaweiten Handel ohne Beschränkungen möglich machen [7, 8]. Nur wenige sehr spezialisierte Prozesse sind darauf angewiesen in Echtzeit mit den Analysen der Verteilnetzbetreiber ihre Betriebsparameter anzupassen. Dazu gehört unter anderem die Glasindustrie, welche in enger Zusammenarbeit mit F&E-Abteilungen steht, um eine schnelle Kompensation zu ermöglichen [7].

Mit einer Zunahme der eingespeisten regenerativen Gase, wie sie in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu erwarten ist, werden die Schwankungen zunehmen und die Anforderungen an die Anlagenbetreiber, sowie die Hersteller weiter wachsen. Dabei gelten die Grenzwerte meist für Haushaltsgeräte. Großtechnische Anlagen müssen in der Regel separat untersucht werden, da es sich überwiegend um Unikate handelt, welche speziell für die jeweilige Anwendung konzipiert und hergestellt wurden [9].

2.2 Brennverhalten bei Wasserstoff-Zumischung

2.2.1 Gegenüberstellung der brenntechnischen und reaktionskinetischen Kennwerte

An den physikalisch-chemischen Eigenschaften lassen sich die Unterschiede der Brenngase deutlich erkennen. Wasserstoff ist das leichteste und häufigste Element im Universum. Die Dichte im Vergleich zu Methan oder Erdgas beträgt nur etwa ein Zehntel. Daher besitzt Wasserstoff den höchsten massebezogenen Energiegehalt aller Brenngase und ist zweieinhalb Mal so groß, wie der von Methan. Volumetrisch erreicht Wasserstoff nicht einmal ein Drittel des Heiz- oder Brennwertes von Erdgas. So ist davon auszugehen, dass bei konstanter Anlagenleistung der Volumenstrom bei wasserstoffangereicherterem Brenngas zunehmen wird. Oder anders gesagt, nimmt die Leistung, durch den geringeren Energiegehalt ab, wenn keine Anpassung des Volumenstroms erfolgt [10, 11].

Tabelle 1: Kennwerte für Wasserstoff, mit einer Reinheit von 99,9 Vol.-% oder höher und Erdgas der Qualität Russland H, wie es am Standort vorliegt [8, 10, 12–14]

	Einheit	Wasserstoff	Erdgas Russland H
Brennwert	kWh/m ³	3,54 ^[10]	11,24 ^[14]
Heizwert	kWh/m ³	2,995 ^[10]	10,13 ^[14]
unterer Wobbe-Index	kWh/m ³	11,359 ^[10]	13,37 ^[14]
oberer Wobbe-Index	kWh/m ³	13,427 ^[10]	14,82 ^[14]
Normdichte	kg/m ³	0,08989 ^[10]	0,743 ^[14]
relative Dichte	[-]	0,0695 ^[10]	0,575 ^[14]
Methanzahl	[-]	0 ^[10]	91 ^[14]
Untere Zündgrenze	Vol.-%	4 ^[10]	4 ^[14]
Obere Zündgrenze	Vol.-%	77 ^[10]	17 ^[14]
Luftbedarf (bei 21 Vol.-% O₂)	m ³ Luft / m ³ Gas	2,38 ^[10]	9,71 ^[14]
Sauerstoffbedarf	m ³ O ₂ / m ³ Gas	0,5	2,04
Zündtemperatur gemäß DIN 51794 ^[12]	°C	560	595 (Methan) 570 ... 670 ^[14]
Zündverzugszeit ^[8]	ms	0,04613	46,16
Mindest-Zündenergie ^[12]	mJ	0,017	0,29
laminare Flammgeschwindigkeit ^[8]	cm/s	200	38,39
maximale laminare Flammgeschwindigkeit	cm/s	360 (bei 40 Vol.-%) ^[12] 346 ^[10]	35 ... 0,45 ^[14] 43 ^[10]
Flammentemperatur in Luft ^[12]	°C	2050	1950
Diffusionskoeffizient in Luft	m ² /s	6,84*10 ⁻⁵	1,9*10 ⁻⁵

In Tabelle 1 ist Wasserstoff dem am Standort zur Verfügung stehenden Erdgas der Qualität Russland H gegenüber gestellt. In einzelnen Fälle wurde der Vergleich zu reinem Methan hergestellt. Dabei wurden die in [14] aufgeführten Bereiche durch einen konkreten Zahlenwert für Methan erweitert. Neben dem volumenbezogenen Heiz- und Brennwert ist auch der Wobbe-Index aufgeführt. Er ist die wichtigste Größe in Bezug auf die Austauschbarkeit von gasförmigen Brennstoffen.

In den Tabellen 2 und 3 sind ausgewählte Kenndaten für Brenngasgemische von 1 bis 50 Vol.-% Wasserstoff aufgelistet. Dabei fällt auf, dass sowohl Heiz- und Brennwert, aber auch die Dichte im Normzustand sowie die relative Dichte unter großen Einfluss der Wasserstoffzumischung stehen. Bei der errechneten Größe Wobbe-Index wird ein Einfluss durch das Verhältnis aus dem Energiegehalt (Heiz- und Brennwert) zu der Wurzel der relativen Dichte scheinbar kompensiert.

$$W_{s,n} = \frac{H_{s,n}}{\sqrt{d}}$$

Formel 1 [10] S. 57

$$W_{i,n} = \frac{H_{i,n}}{\sqrt{d}}$$

Formel 2 [10] S. 57

$W_{s,n}$... oberer Wobbe-Index

$W_{i,n}$... unterer Wobbe-Index

$H_{s,n}$... Brennwert

$H_{i,n}$... Heizwert

d ... relative Dichte (aus Dichte des Gases zu Dichte von Luft $\rho_{\text{Luft}}=1,293 \text{ kg/m}^3$ nach DIN 1306)

Bei einem Wasserstoffanteil von 40 Vol.-%, wie er in der Zielstellung des Projektes vermerkt ist, beträgt die Abweichung des Heizwertes vom anliegenden russischen H-Gas zum Gemisch bereits 28,17 %. Bei derselben Zumischrate weicht die relative Dichte um 35,13 % ab. Dagegen beträgt die Änderung des Wobbe-Index nur 0,06 %. Auch [8] hinterfragt inwiefern der Wobbe-Index als Kenngröße der Austauschbarkeit noch Gewicht hat, wenn die Zumischraten von Wasserstoff in das Erdgasnetz zunehmen. Hier werden die nicht unerheblichen Auswirkungen auf beispielsweise die Brenngeschwindigkeit, Zündenergie oder Verbrennungstemperatur nicht mit einbezogen.

Tabelle 2: Ausgewählte brenntechnische und reaktionskinetische Eigenschaften von Erdgas Russland H, Wasserstoff und derer Gemische - Teil 1 [8, 10, 12–14]

Gemisch	Anteil Erdgas	Anteil Wasserstoff	Heizwert		Brennwert		unterer Wobbeindex		oberer Wobbe-Index	
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[MJ/m³]	[kWh/m³]	[MJ/m³]	[kWh/m³]	[MJ/m³]	[kWh/m³]	[MJ/m³]	[kWh/m³]
1	100	0	36,468	10,130	40,464	11,240	48,132	13,370	53,352	14,820
2	99	1	36,211	10,059	40,187	11,163	48,060	13,350	53,302	14,806
3	98	2	35,954	9,987	39,910	11,086	47,987	13,330	53,252	14,792
4	97	3	35,697	9,916	39,632	11,009	47,915	13,310	53,202	14,778
5	96	4	35,441	9,845	39,355	10,932	47,842	13,290	53,151	14,764
6	95	5	35,184	9,773	39,078	10,855	47,770	13,269	53,101	14,750
7	90	10	33,899	9,417	37,692	10,470	47,408	13,169	52,851	14,681
8	85	15	32,615	9,060	36,306	10,085	47,046	13,068	52,600	14,611
9	80	20	31,331	8,703	34,920	9,700	46,684	12,968	52,349	14,541
10	75	25	30,047	8,346	33,534	9,315	46,322	12,867	52,098	14,472
11	70	30	28,762	7,990	32,148	8,930	45,960	12,767	51,848	14,402
12	65	35	27,478	7,633	30,762	8,545	45,598	12,666	51,597	14,332
13	60	40	26,194	7,276	29,376	8,160	45,236	12,566	51,346	14,263
14	50	50	23,625	6,563	26,604	7,390	44,512	12,365	50,845	14,124
15	0	100	10,782	2,995	12,744	3,540	40,892	11,359	48,337	13,427

Tabelle 3: Ausgewählte brenntechnische und reaktionskinetische Eigenschaften von Erdgas Russland H, Wasserstoff und derer Gemische - Teil 2 [8, 10, 12–15]

Gemisch	Anteil Erdgas	Anteil Wasserstoff	Normdichte	Relative Dichte	untere Zündgrenze	obere Zündgrenze	Mindest-O ₂ -Bedarf	Mindest-Luftbedarf	Methanzahl linear interpoliert	Methanzahl Tool FpprEN 16726-Methode	Methanzahl Tool GDC-Methode
	[Vol.-%]	[Vol.-%]			[kg/m³]	[kg/m³] (ρ Luft = 1,293 kg/m³) DIN 1306				[Vol.-%]	
1	100	0	0,743	0,575	4,0	17,000	2,040	9,710	91,000	90,000	92,100
2	99	1	0,736	0,570	4,0	17,134	2,025	9,637	90,090	89,900	91,200
3	98	2	0,730	0,565	4,0	17,269	2,009	9,563	89,180	88,900	90,300
4	97	3	0,723	0,560	4,0	17,407	1,994	9,490	88,270	87,900	89,400
5	96	4	0,717	0,555	4,0	17,547	1,978	9,417	87,360	87,000	88,600
6	95	5	0,710	0,550	4,0	17,689	1,963	9,344	86,450	86,100	87,700
7	90	10	0,678	0,524	4,0	18,437	1,886	8,977	81,900	81,500	83,600
8	85	15	0,645	0,499	4,0	19,250	1,809	8,611	77,350	77,100	79,600
9	80	20	0,612	0,474	4,0	20,138	1,732	8,244	72,800	72,800	75,500
10	75	25	0,580	0,449	4,0	21,113	1,655	7,878	68,250	68,900	k.A.
11	70	30	0,547	0,423	4,0	22,186	1,578	7,511	63,700	64,800	k.A.
12	65	35	0,514	0,398	4,0	23,375	1,501	7,145	59,150	60,900	k.A.
13	60	40	0,482	0,373	4,0	24,698	1,424	6,778	54,600	56,700	k.A.
14	50	50	0,416	0,322	4,0	27,851	1,270	6,045	45,500	48,300	k.A.
15	0	100	0,08989	0,0695	4,0	77,000	0,500	2,380	0,000	0,000	0,000

2.2.2 Beeinflussung der Flammgeschwindigkeit

„Die Flammgeschwindigkeit u (auch Zünd- oder Verbrennungsgeschwindigkeit) ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Verbrennungsreaktion in einem Brenngas-Luftgemisch. Sie hängt von der Brenngaszusammensetzung, vom Mischungsverhältnis mit Luft oder Sauerstoff und von Druck und Temperatur ab. [...] H_2 erreicht mit [rund] 3,5 m/s die höchste maximale Flammgeschwindigkeit bei nicht vorgewärmtem Gemisch, was in der hohen Diffusionsgeschwindigkeit von H_2 begründet ist. Andere Bestandteile, wie CO , CH_4 und schwere Kohlenwasserstoffe C_nH_m erreichen nur Werte unter oder um 0,4 m/s, In technischen Brenngasen wird die Flammgeschwindigkeit bei höheren H_2 -Gehalten stark von diesem Bestandteil beeinflusst. Inerte Bestandteile, wie CO_2 oder N_2 , verringern die Flammgeschwindigkeit.“ [10]

Die Flammgeschwindigkeit ist eine fundamentale sicherheitstechnische Kenngröße. Je größer die Verbrennungsgeschwindigkeit, desto wahrscheinlicher ist der Übergang von der Deflagration zur Detonation, sowie der Rückschlag der Flamme in das Leitungssystem der feuerungstechnischen Anlage. Die Geschwindigkeit ist im hohen Maße abhängig von der Ausgangstemperatur, bei welcher das Gemisch gezündet wird. Dennoch besteht die Möglichkeit der theoretischen Berechnung [16]. Die zugrundeliegende

Verbrennungsrechnung findet sich in entsprechender Fachliteratur wieder und soll im Folgenden nicht näher erläutert werden.

Als grundlegender Verbrennungsparameter ist die Geschwindigkeit der Verbrennung wichtig, sowohl für die numerische Verbrennungssimulation und chemische Reaktionskinetik als auch die Flammenstabilität. Wasserstoff besitzt die höchste Reaktivität aller Elemente im Universum. Diese Zunahme der Reaktivität hat stabilisierende Auswirkungen auf die Flammen von niederkalorischen Gasen. Die Flammenstabilisierung durch Wasserstoff findet in ausgewählten Gasturbinen Anwendung. Bei der Zumischung von Wasserstoff kommt es zu einer erheblichen Zunahme der Verbrennungsgeschwindigkeit. Unter Zumischung von höheren Kohlenwasserstoffen weist die laminare Brenngeschwindigkeit einen 20-40 % geringeren Anstieg auf. Da eine Zumischung von beispielsweise Ethan oder Propan den Anteil an emittierten CO_2 erhöht, kommt eine Kompensation der Geschwindigkeitszunahme auf diesem Weg nicht in Frage [17].

In [17] wird die laminare Brenngeschwindigkeit mit einem Heat Flux Brenner untersucht. Als Brenngas wird ein Gemisch aus Methan und Wasserstoff verwendet. Durch die Abwesenheit anderer Gasbegleitstoffe beschränken sich die Ergebnisse ausschließlich auf den Verbrennungsmechanismus der für die Verbrennungseffekte maßgeblichen Gase. Neben den Versuchsergebnissen sind in Abbildung 2 die Ergebnisse von vier weiteren, analogen Untersuchungen aufgeführt. Auch hier wurde die laminare Brenngeschwindigkeit mit der Heat Flux Methode ermittelt. Zu sehen ist die Abhängigkeit der Brenngeschwindigkeit bei zunehmendem Wasserstoffanteil und bei den drei Äquivalenzverhältnissen $\Phi_{\text{Black}}=0,7$, $\Phi_{\text{Red}}=1,1$ und $\Phi_{\text{Blue}}=1,5$. Dabei ist die Abweichung der einzelnen Studien voneinander gering.

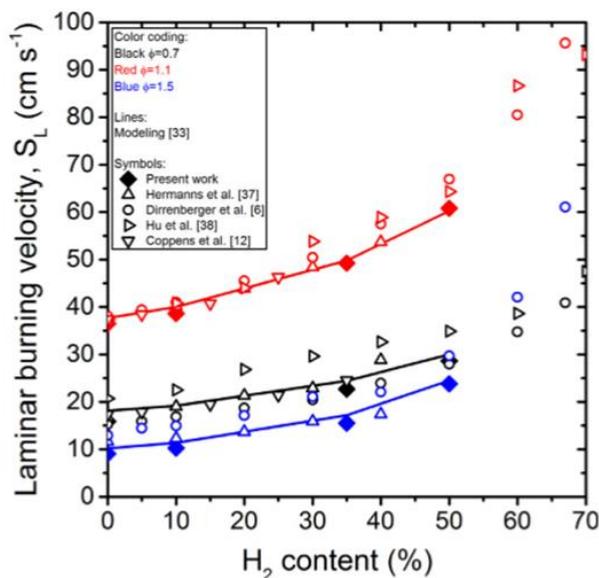


Abbildung 2: Vergleich der laminaren Brenngeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils bei unterschiedlichen Stöchiometrischen Verhältnissen [16]

In Abbildung 3 sind die laminaren Brenngeschwindigkeiten von den Gemischen aus Methan mit Luft und Wasserstoff mit Luft gegenüber gestellt. Weiterhin werden die laminaren Flammgeschwindigkeiten für Gemische ab 50 Vol.-% Wasserstoff angegeben [18].

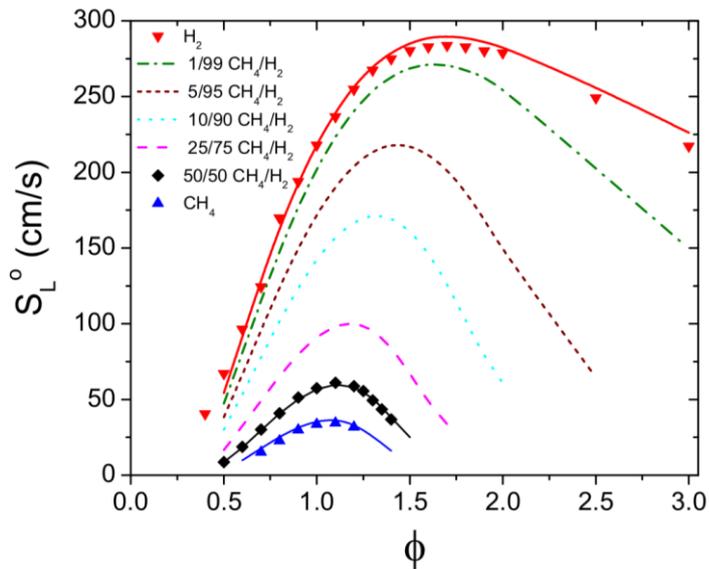


Abbildung 3: Laminare Brenngeschwindigkeit von Methan, Wasserstoff und Gemischen mit mind. 50 Vol.-% Wasserstoff im Gemisch (Tein = 300 K, p = 1 atm) [17]

Das Maximum erreicht das Brennstoff-Luft-Gemisch mit 100 % Methan bei einem stöchiometrischen Verhältnis von circa $\Phi = 1,1$ ($\lambda = 0,9$). Mit stark steigenden Wasserstoffanteilen verschiebt sich das Maximum immer weiter in den brennstoffreicheren Bereich. Bei der Verbrennung unter den gegebenen Bedingungen erreicht reiner Wasserstoff seine maximale laminare Brenngeschwindigkeit bei einem Äquivalenzverhältnis von rund $\Phi = 1,7$ ($\lambda = 0,59$). Ursächlich kann die hohe Reaktivität von Wasserstoff genannt werden. [8]

In Tabelle 4 sind die von [8] ermittelten laminaren Brenngeschwindigkeiten bei den dazugehörigen Wasserstoffanteilen angegeben. Die Bestimmung der Werte erfolgte mit dem Reaktionsmechanismus GRI 3.0 des „Gas Research Institute“ [19]. Dies ist „ein mittelgroßer Standard-Reaktionsmechanismus für die Methan-Verbrennung, der aus 53 Spezies und 325 Elementarreaktionen besteht.“ [8] S. 5.

Tabelle 4: Laminare Brenngeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brennstoffgemisch (bei $\lambda = 1$, Tein = 300K, p = 1 bar) [8]

Anteil H ₂ in Vol.-%	s _L in cm/s
0	38,39
1	38,63
2	38,87
5	39,64
10	40,92
25	45,95
50	60,06
100	200

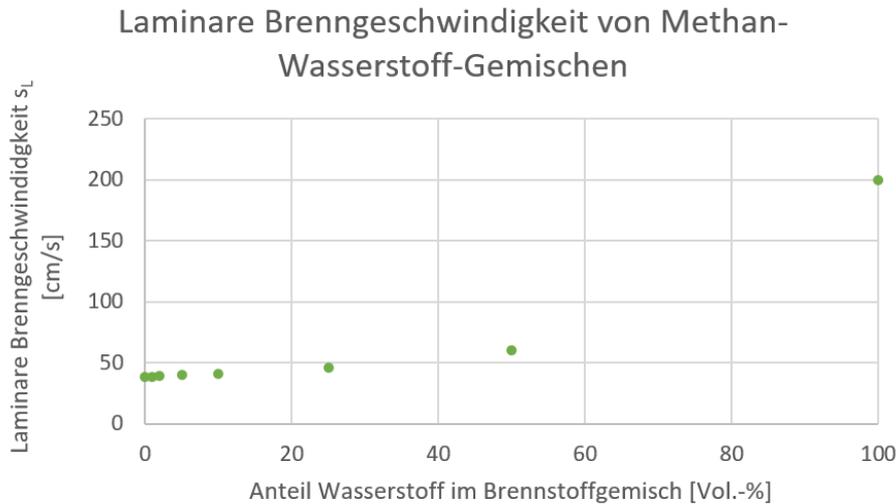


Abbildung 4: Laminare Brenngeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brennstoffgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 300\text{K}$, $p = 1 \text{ bar}$)

In der Abbildung 4 wurden die Werte aus Tabelle 4 graphisch dargestellt. Anhand der acht Messwertpaare lässt sich bereits ein exponentieller Zusammenhang mit steigendem Wasserstoffanteil erkennen. Bei geringen Zumischraten von Wasserstoff in ein Gemisch aus Methan und Wasserstoff sind die Auswirkungen auf die laminare Flammgeschwindigkeit moderat. Die Ergebnisse sind mit denen in Abbildung 3 vergleichbar [17]. Damit kann festgehalten werden, dass bei einem linearen Anstieg der Wasserstoffkonzentration die Flammgeschwindigkeit exponentiell zunimmt.

2.2.3 Beeinflussung der Zündeigenschaften

„Als Zündung bezeichnet man den zeitabhängigen Prozess, bei dem ausgehend von Reaktanden eine Reaktion stattfindet bis sich eine stationär brennende Flamme ausgebildet hat oder bis das System vollständig zu den Produkten reagiert ist.“ [20]

Die Zündung von Brennstoff-Luft-Gemischen kann nur innerhalb der Zündgrenzen stattfinden. Dabei unterscheidet man zwischen der unteren und der oberen Zündgrenze. Unterschritten wird die untere Zündgrenze bei zu großem Sauerstoffüberschuss oder Brennstoffmangel. Die obere Zündgrenze reagiert dementsprechend entgegengesetzt. Bei Brennstoffüberschuss oder Luftmangel kann das Gemisch nicht zünden. Auch bei Fremdzündung setzt, je nach Größe der Zündenergie, nur eine Reaktion in direkter Umgebung des Funkens ein. Eine Flammenfortpflanzung im Gemisch findet jedoch nicht statt. Die Zündgrenzen des Gemischs werden nicht nur durch die Komponenten bestimmt [20]. Zusätzliche Einflussfaktoren sind die Zündenergie selbst, der Vordruck des Gemisches, die Ausgangstemperatur und die relative Feuchte des Brennstoff-Luft-Gemisches. [16] Dabei verengen sich die Zündgrenzen wenn die Feuchte im Gas zunimmt.

In Tabelle 1 sind die Zündgrenzen von Wasserstoff und dem am Standort anliegenden russischen H-Gas angegeben. In Tabelle 3 sind die oberen und unteren Zündgrenzen der Brennstoffgemische aufgeführt. Da sowohl bei Wasserstoff als auch bei dem anliegenden Erdgas die untere Zündgrenze bei 4 Vol.-% liegt, entfällt die Berechnung für das Gemisch. Bei der oberen Zündgrenze wird auf die Formel von Le Chatelier zurückgegriffen:

$$Z = \frac{a + b + c + \dots}{\frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C} + \dots}$$

Formel 3 [20] S. 224

Z ... Zündgrenze des Gemischs

a, b, c ... Konzentration der Komponenten

A, B, C ... unteren bzw. oberen Zündgrenzen [20] S. 224

Bei moderaten Zumischungen von Wasserstoff ist eine geringe Steigerung der oberen Zündgrenze zu verzeichnen. Mit steigenden Anteilen findet eine zunehmende Aufweitung des Zündbereiches infolge der Wasserstoffzumischung statt. Bei alleiniger Verwendung von Wasserstoff liegt die obere Zündgrenze bei 77 Vol.-% Brenngas im Oxidator Luft. Der ausgedehnte Zündbereich stellt ein sicherheitstechnisches Risiko dar. Allerdings ist in der Praxis eher die untere Zündgrenze von Bedeutung, da die notwendige Zündenergie im Störfall vorhanden, jedoch die Zündfähigkeit erst bei Erreichen der unteren Zündgrenze gegeben. Da sich diese nicht voneinander unterscheiden gelten diesbezügliche analoge Sicherheitsvorkehrungen, wie sie aus dem Umgang mit Erdgas bekannt und bewährt sind.

In den Zündtemperaturen unterscheiden sich die Brenngase kaum voneinander. Gemäß DIN 51794 besitzt Wasserstoff eine Selbstzündtemperatur von 560 °C und das reine Methan liegt bei 595 °C [12]. Die Orientierungswerte für das Erdgas Russland-H geben einen Bereich der Zündtemperatur von 570 °C bis 670 °C an [14].

Große Verschiedenheit besteht in den jeweils benötigten Zündenergien. Der Unterschied beträgt eine Dezimalstelle. Während bei Wasserstoff bereits eine Energie von 0,017 mJ für die Ausbildung einer sich selbst stabilisierenden Flammenfront ausreicht, benötigt Erdgas eine Energiemenge von 0,29 mJ. Beide Gase und auch deren Mischungen können, wenn sie sich in den entsprechenden Zündgrenzen befinden, bereits von weichen Zündquellen energetisch aktiviert werden. Darunter zählen die „...Funken von elektrischen Schaltern, Relais, Motoren, aneinanderschlagende Metallen sowie elektrostatische Funkenentladungen...“ [16] 92f.. Weiter beziffert [16] die elektrostatische Entladung des menschlichen Körper auf 10 mJ, wonach auch so eine Zündung von brennfähigem Gemisch erfolgen kann.

Die Kombination aus hoher Reaktivität, weiten Zündgrenzen und geringer Mindestzündenergie veranlasst zu erhöhter Vorsichtigkeit im Umgang mit Wasserstoff.

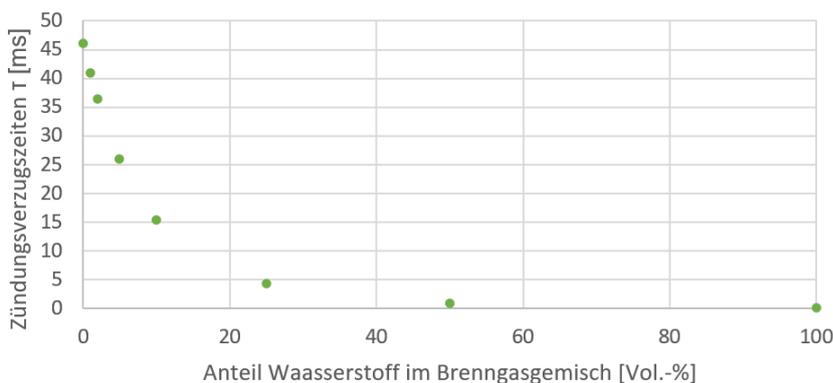
Neben der maßgeblichen Auswirkung der Flammengeschwindigkeit auf die Reaktionskinetik, wird diese auch durch stark von der Zündungsverzugszeit beeinflusst. *„Sie ist ein Maß für die Neigung eines Brennstoffs zur Selbstzündung, wenn Druck und insbesondere Temperatur es erlauben.“* [8] S. 5

In [8] wurde mit dem Reaktionsmechanismus GRI 3.0 neben der laminaren Brenngeschwindigkeit für Methan, Wasserstoff und deren Gemische auch die Zündungsverzugszeit simuliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 aufgelistet und in Abbildung 5 veranschaulicht.

Tabelle 5: Zündungsverzugszeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brenngasgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 1200\text{K}$, $p = 1 \text{ bar}$) [8]

Anteil H ₂ in Vol.-%	τ in ms
0	46,16
1	41,01
2	36,48
5	25,95
10	15,367
25	4,296
50	0,9325
100	0,04613

Zündungsverzugszeiten von Methan-Wasserstoff-Gemischen

Abbildung 5: Zündungsverzugszeit in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils im Brenngasgemisch (bei $\lambda = 1$, $T_{\text{ein}} = 1200\text{K}$, $p = 1 \text{ bar}$)

Vergleichbar mit dem Verlauf der laminaren Brenngeschwindigkeit, stellt sich auch bei der Zündverzugszeit ein exponentieller Zusammenhang, hier fallend, ein. Dabei steigt der Einfluss nicht erst bei großen Zumischraten an, sondern bereits geringen Mengen an Wasserstoff haben enorme Auswirkungen auf die Verzugszeit. Bereits bei einem Volumenanteil von 5 % verkürzt sich die Zündungsverzugszeit um rund 44 %. Im direkten Vergleich von Methan und Wasserstoff besitzt der Wasserstoff nur ein Promille der Verzugszeit von Methan.

2.2.4 Neigung wasserstoffhaltiger Brenngase zum Übergang von Deflagration in Detonation

„Bei der Ausbreitung einer Reaktionsfront wird unterschieden, ob die Ausbreitung durch Diffusion von Radikalen und Wärmeleitung (Deflagration) oder durch Zündung aufgrund einer Druckwelle (Detonation) aufrechterhalten wird.“ [20] S. 266. Dabei gelten Deflagration und Detonation als Explosion, bzw. ist die

Explosion die Initialisierung der Vorgänge [10, 16]. Die genannten Brenngeschwindigkeiten aus 2.2.2 gelten für eine kontrollierte laminare Verbrennung, wo hingegen bei unkontrollierter Zündung sich eine Explosion einstellt. Ob es sich nachfolgend um eine Deflagration oder um einen Übergang zur Detonation handelt, hängt stark von herrschenden Bedingungen ab.

Die ermittelten laminaren Brenngeschwindigkeiten sind in realen Verbrennungsvorgängen nur bedingt vorhanden, da sich hier oft turbulente Strömungsvorgänge einstellen. Folgend ist auch die Brenngeschwindigkeit höher. Im Bereich der Deflagration liegt die maximale Brenngeschwindigkeit bei der isobaren Schallgeschwindigkeit im Abgas (Wasserstoff: 975 m/s, Methan: 890 m/s, $\lambda = 1$). Wenn diese Geschwindigkeit überschritten wird, kann der Übergang zur Detonation stattfinden. Die der Flammenfront vorauslaufende Druckwelle führt zur Zündung des Brennstoff-Luft-Gemisches, wobei die Detonationsgrenzen stark geometrie- und konzentrationsabhängig sind. Damit sich eine Detonation einstellen kann, muss sich das brennbare Gemisch in einer stark begrenzten oder abgeschlossenen Geometrie befinden oder direkt gezündet werden [12].

2.2.5 Einfluss auf den Löschabstand

Bei dem Löschabstand handelt es sich laut Literaturangaben um die Distanz von einer stattfindenden Reaktion zu einer festen Wand [10, 20]. Dabei findet unterhalb des Löschabstands Wärmeabgabe im hohen Maß von der Flamme an die Wand statt. Resultierend reicht die lokale Temperatur nicht mehr für eine Zündung bzw. eine Fortsetzung der Verbrennungsreaktion aus. Das sogenannte Quenching der Flamme erfolgt auch beim Eindringen in Spalten kleiner als der Löschabstand. Anwendung findet diese Eigenschaft beispielsweise in Form einer Flammensperre oder bei früheren Grubenlampen in möglicherweise Methan-haltiger Luft unter Tage. Unter Normbedingungen und einer Luftzahl von $\lambda = 1$ beträgt dieser Abstand für Methan 2 mm. Wasserstoff besitzt dagegen einen Löschabstand, der rund ein Drittel kleiner ist als von Methan, also 0,7 mm [20]. In der Praxis wirkt sich der geringere Löschabstand eher positiv auf die Verbrennung, insbesondere auf die motorische Verbrennung aus. Hier findet eine Ausbreitung der Verbrennungsreaktion bis in die Zwischenräume von Kolben und Zylinder statt, womit ein vollständigerer Ausbrand ermöglicht wird [21].

2.2.6 Beeinflussung der Strahlung

Die Strahlung, welche bei der Verbrennung von Erdgas oder Wasserstoff emittiert wird, unterscheidet sich stark. Maßgeblich für die Unterschiede ist die Abwesenheit von Kohlenstoffverbindungen bei der Verbrennung von Wasserstoff. Die bei der Verbrennung beider Gase auftretenden Emissionsstrahlenbänder sind für Methan in der Abbildung 6 und für Wasserstoff in der Abbildung 7 dargestellt. Der Bereich der sichtbaren emittierten elektromagnetischen Strahlung erstreckt sich im Bereich von 380 nm bis 780 nm [12], [22], [23]. In diesem Wellenlängenbereich ist, wie die Abbildung 6 zeigt, bei Methan eine Vielzahl verschiedener Spektren erkennbar. Dabei tritt in Punkt B der Abbildung 6 die maximale Intensivität auf. Hierbei handelt es sich um die Strahlung der CH-Radikale [22]. Damit erhält die Flamme ihre typische blaue Färbung [23]. Im visuell wahrnehmbaren Bereich emittiert Wasserstoff beinahe ausschließlich bei einer Wellenlänge von 590 nm. In der Verbrennung ist dies durch eine orange Färbung zu erkennen. Zurückführen lässt sich die Färbung auf den Wasserdampf, welcher sich bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff bildet. Bei beiden Spektralanalysen ist im ultravioletten Bereich ein Ausschlag bei Wellenlängen von etwas über 300 nm erkennbar. Hier findet die Emission von elektromagnetischer Strahlung der OH-Radikale statt. Für die sicherheitstechnische Betrachtung ist dieser Peak von größerer Relevanz, da er bei beiden Flammen detektiert werden kann. So kann über einen optischen Zugang mit einer UV-Kamera eine Überwachung der Flamme auch bei Brennstoffgemischen erreicht werden (s.a. Abschnitt 2.2.9).

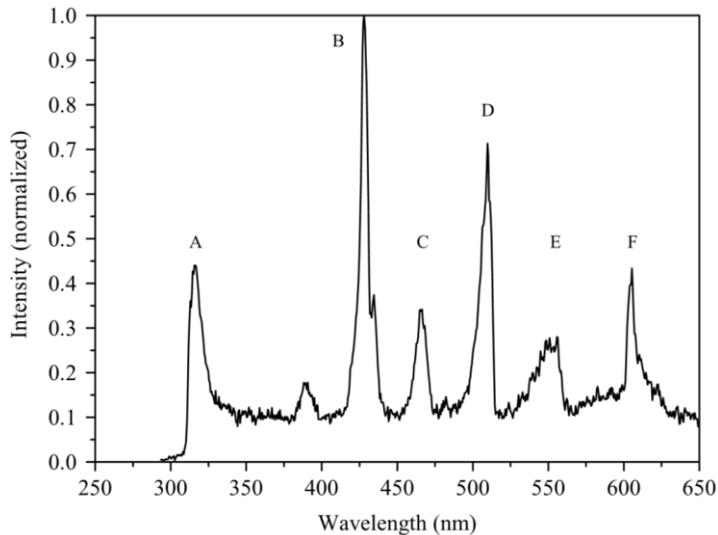


Abbildung 6: Emissionsspektrum einer Wasserstoffflamme für die relevanten Wellenlängen [12]

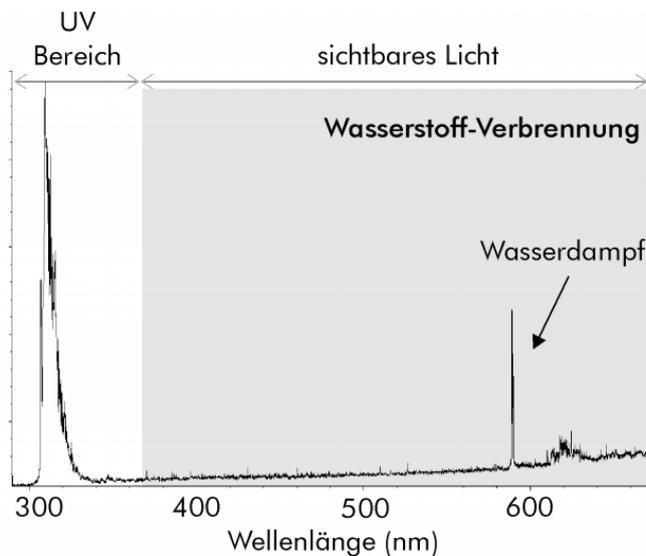


Abbildung 7: Emissionsspektrum einer Methanflamme aus einem Bunsenbrenner

„Bei Brenngasen mit gleichem Wobbe-Index wird auch bei sehr unterschiedlicher Zusammensetzung im Brenner der gleiche Energiestrom umgesetzt, d. h. die Wärmelastung \dot{Q}_B des Gerätes bleibt unverändert.“ [10].

Die Wärmebelastung infolge der Verbrennung lässt sich zu großen Teilen auf die Wärmestrahlung von Kohlenstoff-Verbindungen zurückführen. Da bei Wasserstoff dieser Anteil nicht vorhanden ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Belastung der Brennkammer anders sein wird. Mit Wasserstoff erfolgt die Wärmeübertragung vorwiegend über konvektive Prozesse. Die in den Prozess eingetragene Wärme kann folglich nicht mehr durch Wärmestrahlung an das Brenngut übertragen werden.

In [24] wurde dies experimentell untersucht. Der Wasserstoffanteil im Brenngas belief sich bei dem Versuchen auf bis zu 50 Vol.-%. Nach Auswertung der Ergebnisse könnte festgestellt werden, dass sich der

Wärmeeintrag nicht verändert. Zu erwähnen ist, dass hier eine Kompensation sowohl der Leistung, als auch durch der Luftzahl vorgenommen wurde.

Neben der experimentellen Untersuchung wurde ebenfalls eine numerische Simulation in [24] durchgeführt. Für die quaderförmige Brennkammer, mit Ein- und Austritt an den jeweils gegenüberliegenden Seiten, wurde vom Gas- und Wärme-Institut Essen das lokal anliegende Erdgas mit einem Gasmisch von 50 Vol.-% Wasserstoff verglichen. Für die Untersuchung der Strahlungswärmestromdichte wurde das modellierte Szenario 3 mit einer vollumfänglichen Kompensation von Leistung und Luftzahl herangezogen. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 mit aufgeklappten Brennkammerwänden dargestellt.

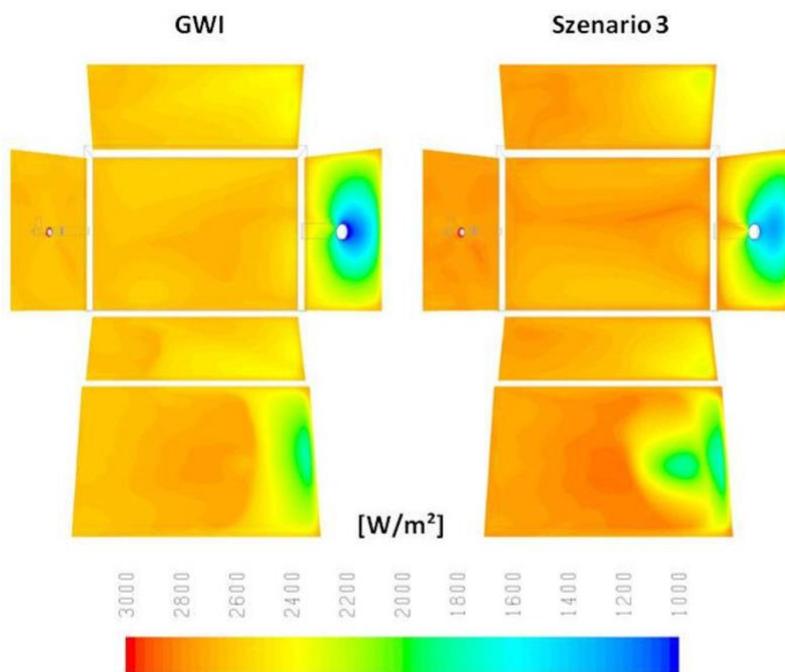


Abbildung 8: Strahlungswärmestromdichte für Erdgas und ein Brenngasgemisch mit 50 Vol.-% Wasserstoff [24]

In der Darstellung wird sichtbar, dass auch bei hohen Anteilen Wasserstoff mit der entsprechenden Kompensation keine Beeinträchtigung der Wärmeübertragung festzustellen ist. Die leicht erhöhte Wärmestromdichte im Szenario 3 gegenüber dem GWI-Erdgas ist Folge der etwas höheren Temperaturen, die für die Brennkammer ermittelt wurden. Findet eine Kompensation nicht statt, wird zusätzliche Verbrennungsluft mit in die Brennkammer eingebracht und die Leistung sinkt aufgrund der Heiz- bzw. Brennwertabnahme infolge der H_2 -Zumischung. Deutlich wird dies, wenn in die Betrachtung das modellierte Szenario 1 aus [24] einbezogen wird, bei dem keine Kompensation erfolgt. In Abbildung 9 ist die Wärmestromdichte \dot{q} unter den genannten Bedingungen abgebildet. \dot{Q}_{th} steht dabei für die eingebrachte thermische Brennerleistung und \dot{Q}_W entspricht dem Wandwärmestrom.

Die Auswirkungen ohne Kompensation sind deutlich zu erkennen. Aufgrund des geringeren Heizwertes von Wasserstoff sinkt auch der Energiegehalt des Gemischs. Da der Volumenstrom für eine konstante Brennerleistung nicht erhöht wird, ist bereits der Energieeintrag geringer. Zusätzlich sinkt der Luftbedarf bei der Wasserstoffzumischung. Wenn das Äquivalenzverhältnis zu reinem Erdgas nicht geändert wird, gelangt mehr Verbrennungsluft in die Brennkammer, welche nicht an der Verbrennung beteiligt ist, somit zu einer Temperatursenkung und infolge zu einer geringeren Wärmestromdichte führt.

Mit Kompensation steigt beim Wasserstoff-Gemisch die Verbrennungstemperatur. Das macht sich auch im

Wärmestrom bemerkbar. Insbesondere im hinteren Bereich ist eine höhere Wärmestromdichte zu erkennen, da der Anteil an konvektiver Wärmeübertragung zusammen mit dem Wasserstoffanteil steigt. [24] Dabei kann es bei einigen Prozessen zu lokalen Temperaturüberhöhungen kommen, welche sich auf das zu behandelnde Gut und auf die Abgaszusammensetzung auswirken.

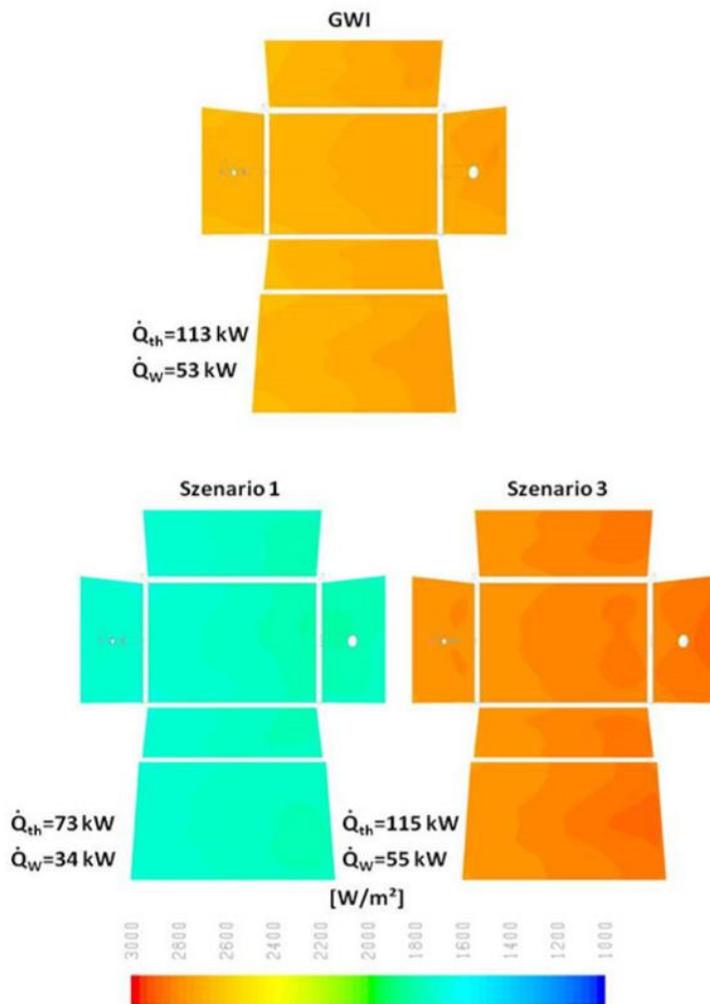


Abbildung 9: Verteilung der Wärmestromdichte, Brennerleistung und Brennkammerwandwärmestrom [24]

2.2.7 Beeinflussung der Flammgeometrie

Wie im Abschnitt 2.2.2 dargestellt wurde, hat die Wasserstoffzumischung in Erdgas reaktionskinetische Auswirkungen auf die Flammengeschwindigkeit. Zudem ist Wasserstoff sehr reaktiv und bewirkt eine Verkürzung der sich ausbildenden Flamme. Allerdings ist die Abnahme der Flammenlänge nicht ausschließlich auf die Reaktionskinetik zurückzuführen. Bei einer stattfindenden Kompensation „... führt u.a. die Änderung des Brennerimpulses, eine Verdrallung der Gas- und Luftströme, die Vermischung von Gas und Luft und auch Rückströmungen in der Brennkammer zu Veränderungen der Flammenlänge.“ [24] S. 85.

Wie sich die Zumischung von Wasserstoffanteilen bis 50 Vol.-% auf die Flammenbeschaffenheit auswirkt hat [24] mit der Untersuchung der CO-Konzentration nachgewiesen und graphisch dargestellt (s. Abbildung 10). Dabei wird ersichtlich, dass eine moderate Zumischung bis 10 Vol.-% nur geringe Auswirkungen auf Form und

Länge hat. Findet, wie in Szenario 1 von [24] beschrieben, keine Leistungs- und Luftzahl-Kompensation statt, so nehmen bei weiter steigendem Wasserstoffanteil sowohl der Flammendurchmesser als auch die Flammenlänge markant ab. Wie in der Abbildung 10 sichtbar ist, halbiert sich die Flammenlänge bei 50 % Wasserstoffzumischung.

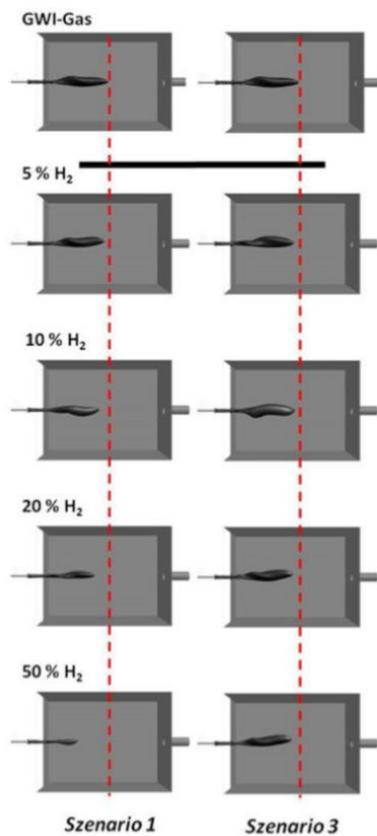


Abbildung 10: Isofläche der trockenen CO-Konzentration aller Betriebspunkte; Vergleich der unkompensierten (Szenario 1) und kompensierter (Szenario 3) Leistung und Luftzahl [24]

Vom Wasserstoff wird nicht nur die Länge der Flamme beeinflusst, sondern auch der Sitz der Flamme gegenüber dem Brenner. Aufgrund der höheren Reaktivität und größeren Brenngeschwindigkeit sitzt die Flammenwurzel näher an der Brennermündung. Dabei kann es zu einer kritischen Temperaturerhöhung des Materials kommen. Je nach Anwendungsfall können Quenchvorgänge der Flamme, oder lokale Temperaturüberhöhungen am Brenner oder der Brennkammer auftreten. Dies ist besonders bei Anlagen der Fall, wo durch eine bestimmte Brenner- bzw. Brennkammergeometrien gezielt die Flammenform beeinflusst oder eine Flammenstabilisierung herbeigeführt werden soll.

Umgekehrt kann es bei der Abnahme des Wasserstoffanteils, welche bei fluktuierender Einspeisung eintreten kann, auch zum Abheben der Flamme und folglich zum Erlöschen der Verbrennungsreaktion kommen. Tritt aufgrund der trägeren Reaktionskinetik und langsameren laminaren Brenngeschwindigkeit von Methan ein Abheben der Flamme von der Brennermündung ein, so kann auch dies zu einem Ausfall der im Abschnitt 2.2.8 dargestellten Flammenüberwachungssysteme kommen.

Auch in [25] wurde die Auswirkung der Wasserstoffzumischung auf die Flammenlänge untersucht. Die hierbei resultierenden Ergebnisse sind in der Abbildung 11 dargestellt und stehen der intuitiven Annahme und den Ergebnissen der CO-Isoflächen von [24] gegenüber. Bei einer Zumischung bis 20 Vol.-% Wasserstoff in ein Erdgas ist hier eine Zunahme der Flammenlänge zu verzeichnen. Bei höheren Zumischraten bis 50 Vol.-% ist, wie in [24] dargestellt, wieder die zu erwartende Längenabnahme der sichtbaren Flamme erkennbar.

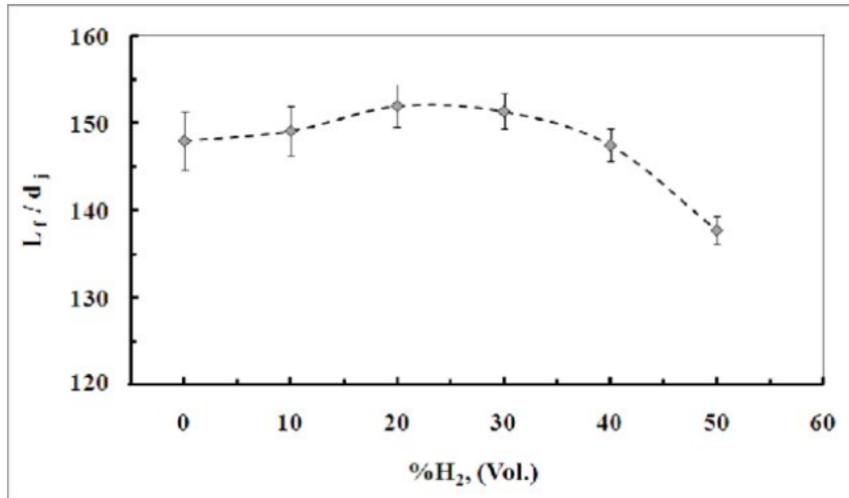


Abbildung 11: Normalisierte Flammenlänge (L_f/d_j - Flammenlänge/Düsendurchmesser) in Abhängigkeit der Wasserstoffkonzentration von 0 - 50 Vol.-% mit zusätzlicher Angabe der Schwankungsbreite [25]

Als Ursachen für die Längenzunahme im unteren Bereich des Wasserstoffanteils sind der nähere Sitz der Flammenwurzel an der Brennmündung und die Flammenstabilisierung infolge der Wasserstoffzumischung genannt. Damit sinkt die Fluktuation in der vertikalen Flammenausbreitung. Bei einer angegebenen Reynoldszahl (Re) von ca. 4000 ist mit Wasserstoffzumischung eine Tendenz hin zu einer laminaren Verbrennung zu vermuten. Folglich nimmt die Länge der Flamme zu. Weiter wird aufgeführt, dass die Auswirkung auf die Flammentemperatur bei geringen Zumischraten höher ist, als der Anstieg der Reaktivität. Damit ist der Auftrieb auf die an der Reaktion beteiligten Teilchen größer, was zu einer Verlängerung der Flamme führt [25].

Grundsätzlich wird sowohl in [25] als auch [24] dargestellt, dass ohne Leistungs- und Luftzahl-Kompensation eine Abnahme der Flammenlänge bei Zunahme des Wasserstoffanteils bis 50 Vol.-% stattfindet.

2.2.8 Flammentemperatur

In [25] wurde, neben dem visuellen Erscheinungsbild und der Länge der Flamme, auch auf die Temperaturverteilung in Abhängigkeit des Wasserstoffanteils in Brenngasgemisch eingegangen. Die Ergebnisse der dazu durchgeführten Messungen sind in Abbildung 12 dargestellt. Neben Temperaturverteilung und vertikaler Ausdehnung ist auch deutlich zu erkennen, wie sich die Flamme mit steigender Wasserstoff-Konzentration weiter an den Brennermund zurückzieht. [25]

Für jedes Gasgemisch wurden drei Ebenen ausgewählt an denen der radiale Temperaturverlauf dargestellt ist. Wie im Abschnitt 2.2.7 aufgeführt wurde, nimmt die Flammenlänge zu, womit auch die untersuchten Ebenen proportional angehoben werden. Bei höheren Anteilen verschieben sich die untersuchten Niveaus näher an die Brennermündung. In dem radialen Temperaturprofil ist erkennbar, dass der turbulente Charakter der Erdgasflamme sich in einer fluktuierenden Kurve abbildet. Durch die Zunahme der Reaktivität bei steigenden Wasserstoffanteilen ist ein weicherer Verlauf der Kurve erkennbar. Zudem steigt die maximale Temperatur, welche bei der Verbrennung in der Flamme gemessen wurde. Die Temperaturerhöhung ist in allen drei untersuchten Ebenen zu verzeichnen. Die Temperaturspitzen gewogen sich mit zunehmender Flammenlänge immer näher an die Brennerachse.

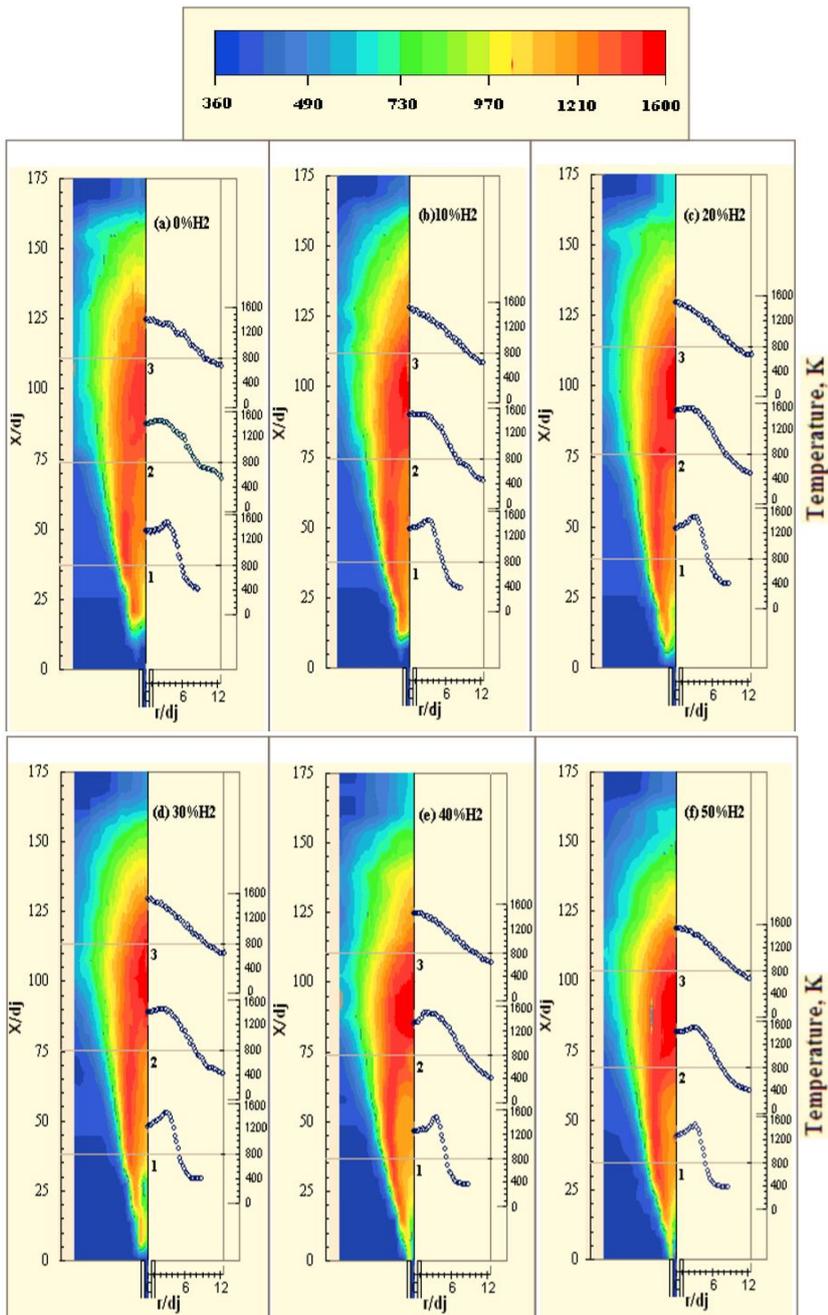


Abbildung 12: Temperaturfeld der Gemisch-Flamme von 0 - 50 Vol.-% Wasserstoffanteil im Erdgas (links) und radiales Temperaturprofil (rechts) brennernahe (1), mittig in der Flamme (2) und weit vom Brenner entfernt (3) [25]

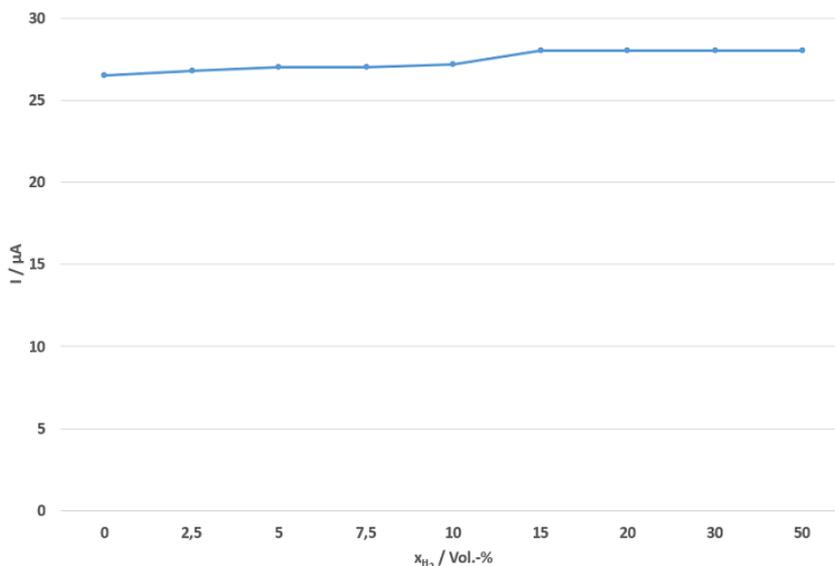
2.2.9 Flammenüberwachung

Wie im Abschnitt 2.2.7 beschrieben, ändert sich durch die Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas sowohl der Abstand der Flamme zum Brennermund als auch die Flammenlänge. Dies hat nicht nur Folgen für die eigentliche Verbrennungsführung, sondern wirkt sich auch auf bestehende Flammenüberwachungssysteme aus. Bei dem am häufigsten eingesetzten Verfahren, der Ionisationsstromüberwachung, ist die Position der Überwachungselektrode in der Flamme entscheidend für eine sichere Funktionsweise des Verfahrens.

Weitere Überwachungssysteme erfassen die aus der Verbrennungszone ausgehende elektromagnetische Strahlung in verschiedenen Frequenzbereichen. Diese erfordern einen optischen Zugang zur Flamme, der durch die dargestellten Veränderungen der Flamme ebenfalls beeinträchtigt werden kann.

Bei der Ionisationsstromüberwachung wird zwischen den im Bereich der Flamme befindlichen Elektroden und dem angeschlossenen Feuerungsautomat ein Stromfluss ermöglicht. Dabei wird der Effekt genutzt, dass die an der Verbrennung beteiligten Moleküle des Brenngases und der Reaktionsprodukte in elektrische Ladungsträger, Ionen und Elektronen aufgespaltet werden und damit einen Stromfluss ermöglichen. Dieser kann in ein Signal umgewandelt werden, das als Indikator für das Existenz einer Flamme verwendet werden kann.

Sowohl bei den am DBI, als auch bei den in [24] durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich bei einer Zumischung von bis zu 50 Prozent Wasserstoff zum Erdgas keine wesentlichen Veränderungen des Ionisationsstromes ergeben. Mit zunehmenden Wasserstoffanteil steigt gemäß Abbildung 13 der Ionisationsstrom etwas an. Die Ionisationsstrommessung im Flammenbereich wird vor allem bei häuslichen Vormisch-Brennern, aber auch beim überwiegenden Anteil industrieller Brenner zur Flammenüberwachung eingesetzt [7], [26].



[26]

Abbildung 13: Ionisationsstrom als Funktion des H₂-Anteils, Erdgas/H₂, Szenario 3, T_{Ofen} = 700 °C [24]

Eine neben der Flammenionisation ebenfalls weit verbreitete Technologie ist die UV-Flammenüberwachung. Bei der Überwachung mit Ultraviolett-Detektoren wird die von der Flamme ausgehende ultraviolette Strahlung mit einer Wellenlänge von kleiner 400 nm erfasst und elektronisch ausgewertet. Dazu wird ein direkter optischer Zugang zur Flamme benötigt, da sich der Flammenwächter außerhalb des Brennergehäuses befindet. Durch die dargestellten Veränderungen der Flammgeometrie bei der Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas können somit ebenfalls Beeinträchtigungen bei der Flammenüberwachung eintreten, die ggf. durch eine exakte Positionierung der UV-Sonde beseitigt werden können. Auch das UV-Flammenüberwachungssystem wurde am DBI auf die Einsetzbarkeit bei einer Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas getestet. Dabei wurden an einem Ofen mit Rekuperatorbrenner bei Zumischraten von bis zu 40 Prozent keine Beeinträchtigungen in der Betriebsweise der UV-Überwachung festgestellt, sodass auch hier eine Funktionalität gewährleistet werden kann.

Bei den in [26] durchgeführten Untersuchungen wurden die Emissionsspektren, die bei der Verbrennung von Erdgas mit einer Zumischung von Wasserstoff bis 40 Prozent auftreten, untersucht. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die bei der Verbrennung abgegebene Chemilumineszenz-Strahlung maßgeblich vom

eingesetzten Brennstoff abhängig ist. Die ermittelten Emissionsspektren sind in der Abbildung 14 für Wasserstoff-Zumischungen von 10 %, 20% und 40 % zum Erdgas dargestellt. Es wird sichtbar, dass mit steigender Wasserstoffzumischung die Intensität der UV-Strahlung abnimmt. Die Ursache dafür besteht darin, dass die im ultravioletten Wellenlängenbereich emittierte Strahlung auf den in der Reaktionszone kurzzeitig gebildeten OH-Radikalen beruht. Diese Moleküle können über verschiedene Reaktionspfade gebildet werden, wobei der Bildungspfad über ein kohlenstoffhaltiges Zwischenprodukt vorherrschend ist. Durch den abnehmenden Kohlenstoffanteil im Brenngas nimmt auch der Anteil der strahlungsemitterenden Moleküle ab und führt zu einer Verringerung der relativen Strahlungsintensität. Diese kann aber durch Erhöhung der Sensitivität bzw. der Signalverstärkung angepasst werden [24].

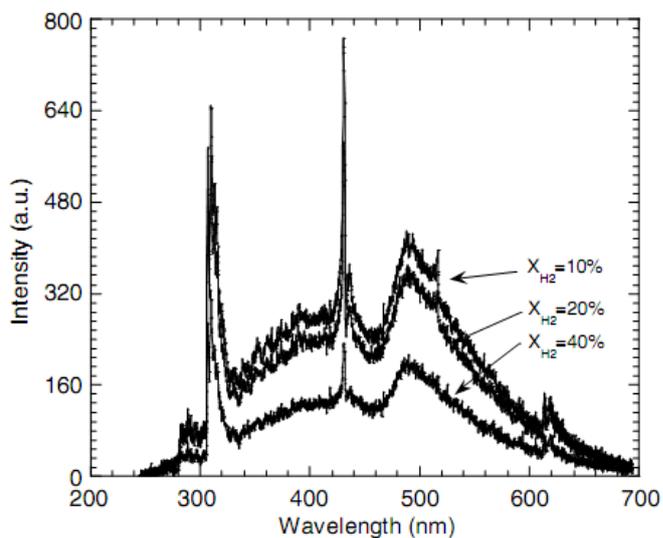


Abbildung 14: Emissionsspektren verschiedener Erdgas- / Wasserstoffgemische [26]

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass durch die UV-Flammenüberwachung bei der betrachteten Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas eine sichere Detektion der Flamme möglich ist und auch diese Methode der Flammenüberwachung einsetzbar ist

2.2.10 Negativer Joule-Thomson-Effekt

Ein weiterer wichtiger Unterschied in der Handhabung von Wasserstoff und Methan/Erdgas liegt im Verhalten bei Expansion oder Verdichtung. Diese Eigenschaft hat größeren Einfluss in der Versorgungskette, sollte aber nicht vernachlässigt werden.

Der Joule-Thomson-Effekt beschreibt die Temperaturänderung in Abhängigkeit der Änderung des Druckes. Im Regelfall gilt, dass sich Gase bei der Entspannung abkühlen und umgekehrt. Das ist auch für Methan und Erdgas anwendbar. Wasserstoff dagegen verhält sich anders. Hier kommt der negative Joule-Thomson-Effekt größtenteils zum Tragen.

In [27] wird die Auswirkung einer Entspannung von 700 bar und 0 °C auf 690 bar mit einem Temperaturanstieg auf 0,5 °C beziffert. Somit lässt sich der Temperaturanstieg pro bar auf 0,05 K abschätzen. Im Rahmen der Untersuchung in [28] wird ein Temperaturanstieg von 0,03 K pro bar angegeben. Hier sinkt der Referenzdruck allerdings bei einer Entspannung von 200 bar auf 1 bar mit einer gesamten Erwärmung von 6 K. Schlussfolgernd bedeutet dies für [28], dass bei einer aktuell möglichen Einspeisung von 10 Vol.-% die Vorwärmleistung betroffener Regelstationen auf 86 % herabgesetzt werden kann.

2.2.11 Auswirkungen der Wasserstoffzumischung auf die akustische Belastung

Aufgrund der höheren Reaktivität und der schneller Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff bzw. der dementsprechende Beeinflussung des Gemisches, ist eine Neigung hin zu einer turbulenten Strömung und schneller Verbrennung zu verzeichnen. Außerdem treten durch die Zumischung von niederkalorischem Wasserstoff zum Erdgas (ca. 33% des Heizwertes von Erdgas H) entsprechend höhere Volumenströme des Gemisches in den Armaturen und Leitungen auf. Diese Effekte können dazu führen, dass sowohl Strömungsgeräusche, als auch bei der Verbrennung entstehende Geräusche bei Wasserstoffzugabe zunehmen. In [29] wurden sowohl von einer Erdgasflamme, als auch einer Erdgas-Wasserstoffflamme gleicher Leistung und Luftzahl, Schalleistungsdichtespektren von turbulenten Vormischflammen ermittelt. Wie in der Abbildung 15 sichtbar wird, ist der Schalleistungspegel bei Wasserstoffzumischung gegenüber dem reiner Erdgasbetrieb im niedrigeren Frequenzbereich (< 1 kHz) erhöht.

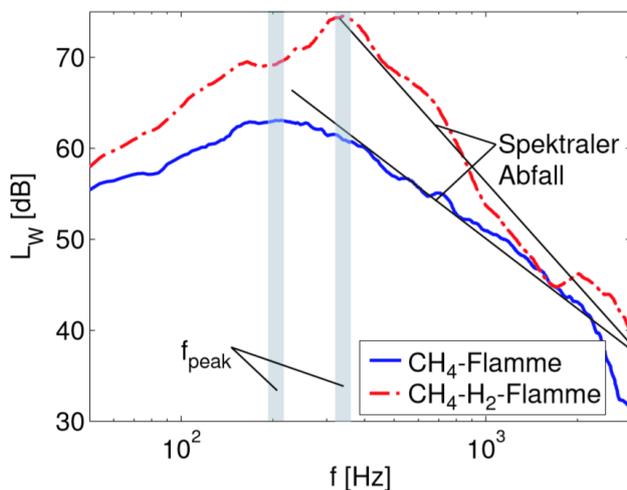


Abbildung 15: Typische Lärmspektren turbulenter Flammen [29]

Da es sich um sehr komplexe Zusammenhänge handelt, lässt sich keine allgemeine Aussage zum Maß der Zunahme der Lärmemission treffen. Eine Betrachtung muss anlagenspezifisch erfolgen.

Bei den am DBI durchgeführten Versuchen wurden die Einflüsse von Wasserstoff auf die Flamme eines Gebläsebrenners demonstriert. Dabei wurden Wasserstoffvolumenanteile von bis zu 99 Prozent untersucht. Neben der Änderung des Flammenbildes und -sitzes wurde zudem eine deutlich höhere Lärmbelastung wahrzunehmen. Die hier quantitative getroffene Aussage gilt es bei der experimentellen Untersuchung qualitativ zu belegen.

2.2.12 Änderung der Abgaszusammensetzung

Hintergrund der Zumischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz ist die Reduktion kohlenstoffhaltiger Emissionen. Dies kann durch die schrittweise Substitution mit Wasserstoff und der Implementierung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft geschehen. Wenn der Brennstoff Methan, als Hauptbestandteil von Erdgas durch den kohlenstofffreien Brennstoff Wasserstoff ersetzt wird, ist von einer Reduktion an emittieren Kohlenstoffdioxid auszugehen. Zudem ist auch eine Abnahme der Kohlenstoffmonoxid-Emissionen wahrscheinlich. Mit steigender Verbrennungstemperatur besteht aber die Wahrscheinlichkeit vom Anstieg der thermisch gebildeten Stickstoffoxide NO und NO₂. Eine weitere Änderung der Abgaszusammensetzung durch die Wasserstoffzumischung besteht in der Zunahme des Wasser- bzw. Wasserdampfanteils im Abgas.

3 Durchführung von experimentellen Untersuchungen

Um eine prinzipielle Wasserstoffverträglichkeit der Gasgeräte nachweisen zu können, wurden die Geräte bei den experimentellen Untersuchungen zunächst mit Erdgas H und danach mit unterschiedlichen Erdgas-Wasserstoffgemischen betrieben. Dabei erfolgten die Untersuchungen an den unterschiedlichen Technologien zunächst mit statischen Zumischraten von Wasserstoff, wobei bei zwei Geräten Wasserstoffanteile von 10, 20, 30 und 40 Prozent realisiert werden konnten. Die in stationären Betriebsphasen ermittelten mittleren Leistungen stellen Mittelwerte aus den in 10 Sekundenraster aufgezeichneten Messdaten dar und wurden über einem Zeitraum von mindestens 15 Minuten ausgewertet.

Danach wurden die Geräte im laufenden Betrieb mit unterschiedlichen, volatilen Gasmischungen beaufschlagt und basierend auf den aufgezeichneten Messdaten Auswertungen erstellt. Diese Ergebnisse sollen ebenfalls in diesem Abschnitt zusammengestellt werden.

Für die Durchführung der Messungen wurde ein bereits im Rahmen von Monitoringaufgaben bei zahlreichen Feldversuchen bewährtes Messkonzept verwendet. Dabei kamen als zentrales Element Datenerfassungssysteme mit Vorortdisplay (Fabrikate: Ahlborn und Eurotherm) zum Einsatz, welche eine zeitlich sehr hochauflösende Erfassung der Messdaten erlaubten. Zusätzlich wurden die Messdaten auf einem PC zu Kontrollzwecken visualisiert, archiviert und ausgewertet. Die Abbildung 16 zeigt eine Zusammenstellung der erfassten Messgrößen in einem Messstellenplan, die zusätzlich in einer Messstellenübersicht in der Tabelle 6 aufgelistet sind. Dem Gaszähler sind weitere Komponenten wie Gasmischanlage, Gasdruckregler und Gasdrucksensor vorgeschaltet, die in diesem Zusammenhang nicht dargestellt wurden. Der gemessene Gasdruck wurde im Rahmen der thermischen Gasabrechnung, die gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 685 erfolgte, für die entsprechenden Berechnungen verwendet.

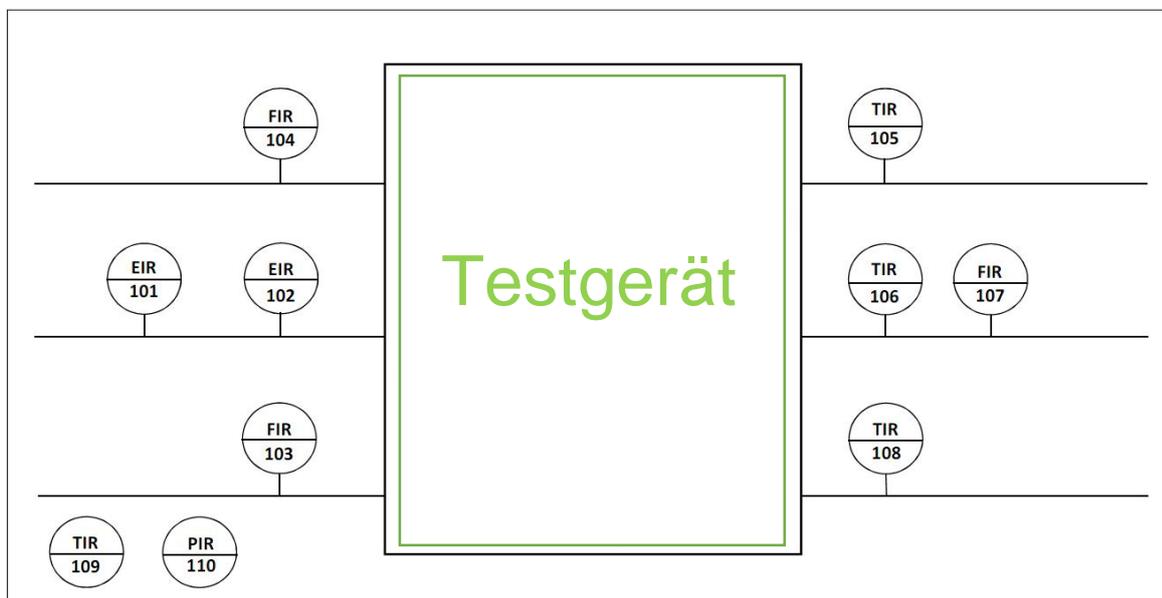


Abbildung 16: Messstellenplan zur Bilanzierung der Testgerätes

Bei den durchgeführten Abgasanalysen wurde mobile Abgasmesstechnik (Fabrikate: MRU, ECOM) eingesetzt, die auch eine kontinuierliche Aufzeichnung der Messdaten erlaubten. Zusätzlich erfolgten am BHKW Messungen mit einem FTIR-Spektrometer (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer), dass eine

Erfassung von Messgrößen wie z.B. Formaldehyd ermöglichte.

Tabelle 6: Messstellen zur Erfassung aller erforderlichen Anlagendaten für eine vollständige Energiebilanz

Nr.	Messstellen-Nr.	Messgröße	Einheit
1	101	Elektrische Leistung Bezug	kWh
2	102	Elektrische Leistung Einspeisung (bei KWK)	kWh
3	103	Volumenstrom Erdgas	m ³ /h
4	104	Volumenstrom Prozesswasser	m ³ /h
5	105	Temperatur Vorlauf Heizkreis	°C
6	106	Temperatur Rücklauf Heizkreis	°C
7	107	Volumenstrom Heizkreis	m ³ /h
8	108	Temperatur (Analyse) Abgas (stichprobenartig)	°C
9	109	Temperatur Aufstellraum	°C
10	110	Luftdruck	mbar

3.1 Blockheizkraftwerk mit Gas-Ottomotor (Leistungsbereich 20 kW_{el})

Im Rahmen der durchgeführten Gerätetests wurde ein Blockheizkraftwerk mit V4-Gas-Ottomotor im Leistungsbereich 20 kW_{el} gemäß den vom Hersteller angegebenen Aufstell- und Betriebsbedingungen installiert und mit den in Abschnitt 3 genannten Gasgemischen betrieben. Während der im Folgenden dargestellten Untersuchungen arbeitete das Gerät mit Nennleistung. Bei den Untersuchungen, die zunächst mit stationären Zumischungsraten erfolgten, wurde das BHKW jeweils über eine ausreichend lange Zeitdauer mit dem jeweiligen Gasgemisch betrieben (Einschwingphase), bis stationäre Messdaten verfügbar waren und zur Auswertung verwendet werden konnten. Im Abschnitt 3.1.4 wurden volatile Änderungen des Wasserstoffanteils im Brenngas betrachtet, die sowohl sprunghaft als auch kontinuierlich erfolgten.

3.1.1 Leistung und Effizienz

In diesem Abschnitt sollen zunächst die im stationären Betrieb des BHKW ermittelten Leistungen bei statischen Wasserstoffanteilen von 0, 10, 20, 30 und 40 Prozent dargestellt und beurteilt werden. Diese sind in der Tabelle 7 für die betrachteten Wasserstoffanteile dargestellt. Das BHKW arbeitete bei den Messungen mit einer Rücklauftemperatur von ca. 68 °C, sodass die dargestellten, mittleren Wärmeleistungen gut miteinander vergleichbar sind.

Es wird sichtbar, dass die benötigte Brennstoffleistung, die aus dem jeweils bezogenem Volumenstrom und dem jeweiligen Heizwert der Gasmischung ermittelt wurde, bei ansteigendem Wasserstoffanteil um ca. 5 % ansteigt. Die abgegebene Wärmeleistung verhält sich ähnlich und erreicht bei 40 % Wasserstoff-Zumischung einen Anstieg von ca. 2 %. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass der Verbrennungsprozess im Zylinder, aufgrund der höheren Zündgeschwindigkeit von Wasserstoff, schneller abläuft und die frei werdende thermische Energie zu einem erhöhten Wärmeaustausch im Zylinder führen kann, wodurch diese

Leistungszunahme resultiert. Die etwas niedrigere Wärmeleistung im Erdgasbetrieb kann auf eine noch nicht abgeschlossene Vorwärmung der Anlage zurückgeführt werden. Die ausgekoppelte elektrische Leistung wird von der Anlage geregelt und war an den 5 Messpunkten weitestgehend konstant.

Tabelle 7: Gemessene mittlere Leistungen bei unterschiedlicher Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil	Brennstoffleistung	Stromeinspeisung	Wärmeleistung
Vol.-%	kW	kW	kW
0	62,35	21,88	44,26
10	62,45	21,89	45,34
20	63,00	21,88	45,64
30	63,81	21,89	45,64
40	65,14	21,90	46,15

Aus den in Tabelle 7 dargestellten Leistungen wurden Nutzungsgrade beim Betrieb mit den dargestellten Gasmischungen ermittelt. Diese sind in der Tabelle 8 ebenfalls als Mittelwerte für die betrachteten Gasmischungen dargestellt. Wie bereits aus dem Anstieg der Brennstoffleistung und der konstanten elektrischen Leistungsabgabe vermutet werden konnte, sinkt der elektrische Nutzungsgrad mit zunehmendem Wasserstoffanteil im Mischgas, wobei eine Verminderung von bis zu ca. 1,5 Prozent ermittelt werden konnte.

Der ermittelte elektrische Nutzungsgrad liegt bereits im Erdgasbetrieb etwa 2,5 Prozent über den Herstellerangaben und deutet in Verbindung mit der etwas zu niedrig gemessenen Brennstoffleistung (Vergleich zu Herstellerangaben) auf Messfehler bei der Gasmengenmessung hin. Dieser Messfehler wird auch beim thermischen Nutzungsgrad sichtbar, der zwar ca. 2 Prozent unter den Herstellerangaben liegt, sich aber auf zumindest anteilige Brennwertnutzung bezieht. Eine Brennwertnutzung wird bei den vorliegenden Messergebnissen aufgrund der hohen Rücklauftemperatur von 68 °C nicht eingetreten sein. Der etwas niedrigere thermische Nutzungsgrad im Erdgasbetrieb deutet, trotz einer ca. einstündigen Warmlaufphase des Gerätes, auf eine nicht abgeschlossene Vorwärmphase hin, bei der noch Wärme intern zwischengespeichert wird und zu einer niedrigeren Effizienz führt.

Die in der Tabelle 8 dargestellten Nutzungsgrade des BHKWs zeigen, dass bei Zumischung von Wasserstoff ein Rückgang des elektrischen Nutzungsgrades auftritt. Der thermische Nutzungsgrad steigt bei Zumischraten von 10 % und 20 % geringfügig an und fällt danach wieder um etwa denselben Wert. Aus der Veränderung beider Nutzungsgrade resultiert, ausgehend vom Betrieb mit 10 % bis zu einem Wasserstoffanteil von 40 %, eine Verringerung des Gesamtnutzungsgrades von etwa 3 Prozent.

Tabelle 8: Ermittelte Nutzungsgrad bei unterschiedlicher Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil	elektr. Nutzungsgrad	therm. Nutzungsgrad	Gesamtnutzungsgrad
Vol.-%	%	%	%
0	35,1	71,0	106,1
10	35,1	72,6	107,7
20	34,7	72,5	107,2
30	34,3	71,5	105,8
40	33,6	70,9	104,5

In der Abbildung 17 sind die bei einer Messung ermittelten Verläufe der zugeführten Brennstoffleistung und der ermittelten Nutzungsgrade bei statischen Änderungen des Wasserstoffanteils im Bereich von 0 bis 40 % dargestellt. Diese widerspiegeln die in der Tabelle 7 dargestellten Brennstoffleistungen und in der Tabelle 8 eingetragenen Nutzungsgrade bei den jeweiligen Wasserstoffanteilen im Brenngas.

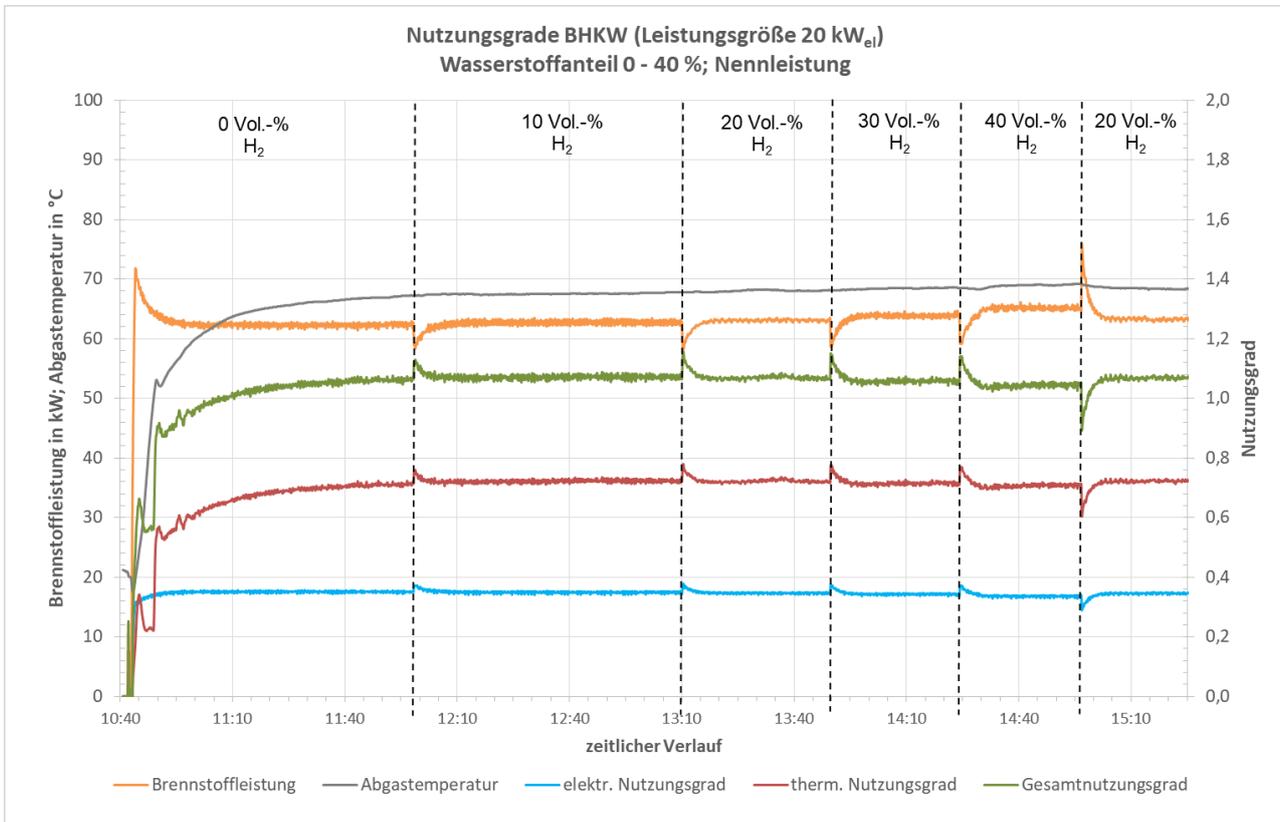


Abbildung 17: Verlauf von Brennstoffleistung und Nutzungsgraden bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen

In der Abbildung 17 wird sichtbar, dass bei Steigerung des Wasserstoffanteils im Brenngas kurze Einschwingphasen auftreten, bei denen die Brennstoffleistung kurzzeitig, durch die Verringerung des Heizwertes des Gasgemisches absinkt. Die Regelung des BHKW benötigt danach eine gewisse Zeit um mit einer Erhöhung des Gasbezuges darauf reagieren zu können. Bei den Nutzungsgraden ist ein kurzzeitiger Anstieg sichtbar, der rechnerisch aus der verringerten Brennstoffleistung resultiert. Bei Reduzierung des Wasserstoffanteils sind entgegengesetzte Einschwingphasen sichtbar.

3.1.2 Abgastemperatur und -zusammensetzung

Während der im Abschnitt 3.1.1 dargestellten Untersuchungen wurden auch Messungen der Abgastemperatur und der -zusammensetzung durchgeführt. Die Abgastemperatur, die extern nach dem Schalldämpfungsmodul gemessen wurde, ist in der Abbildung 17 während des Versuchsbetriebes dargestellt. Diese zeigt mit zunehmenden Wasserstoffanteil im Brenngas (0 % auf 40 %) einen geringen Anstieg um ca. 2 K und sinkt bei Verringerung des H₂-Anteils von 40 % auf 20 % um etwa 0,8 K ab. Dieser Effekt kann mit der höheren Verbrennungstemperatur von Wasserstoff begründet werden, die zu einer verstärkten Aufheizung von Zylinder und Kolben führt. Damit steigt die abgegebene Wärmeleistung und Heizkreistemperatur. Da bei dem verwendeten Prüfstand die Regelung der Wärmeabführung nur durch die vom BHKW angesteuerte Umwälzpumpe erfolgen konnte, traten während der betrachteten Versuchsdurchführung, aufgrund der dargestellten Änderungen der Wärmeleistung (s. Abschnitt 3.1.1), Schwankungen der Rücklauf­temperatur im Kühlkreis des BHKW von bis zu 2 K auf, womit die beschriebenen Veränderungen der Abgastemperatur erklärt werden können.

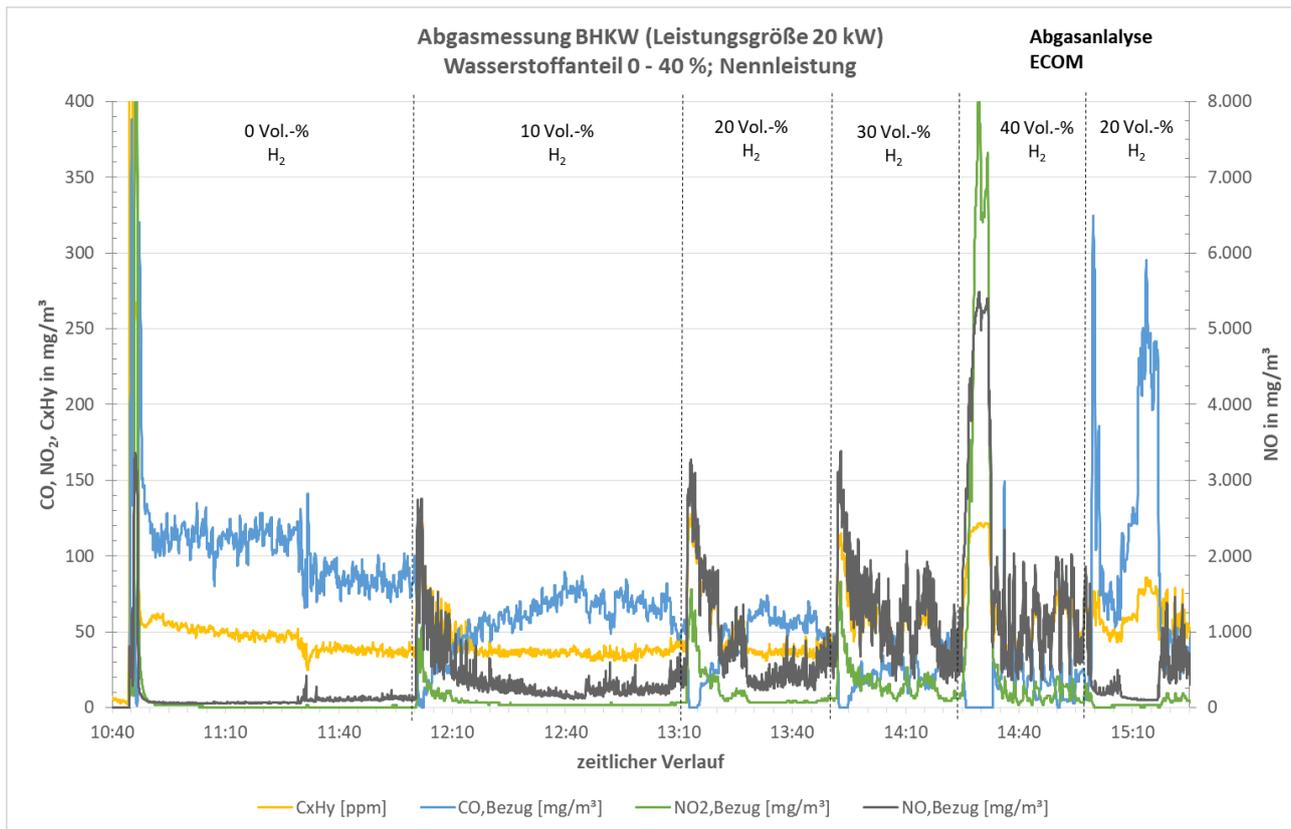


Abbildung 18: Verlauf der Abgasemissionen bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen

Die Abgaszusammensetzung wurde während des Versuchsbetriebes aufgezeichnet und ist in der Abbildung 18 für die Abgaskomponenten CO, NO, NO₂ und C_xH_y dargestellt. Da die Bewertung des Abgases bei BHKW unter 50 MW Leistung nach der TA Luft erfolgt, sind die dargestellten Werte auf 5 Vol.-% Restsauerstoff im Abgas berechnet und wurden in mg/m³ angegeben. Bei der Messung konnte zumeist kein Sauerstoff im Abgas gemessen werden. Grund dafür ist die integrierte Verbrennungsregelung, wobei über eine Lambdasonde die Sauerstoffkonzentration im Abgas gemessen und über den Stellmotor die Verbrennungsluftzufuhr geregelt wird. Diese regelt auf ein stöchiometrisches Luftverhältnis (Lambda) von eins.

Die nach den beim Kaltstart des BHKW mit Erdgas kurzzeitig auftretenden Emissionsspitzen, insbesondere von Stickoxyden und Kohlenwasserstoffen, sinken mit steigender Abgas- und damit Katalysatortemperatur durch die katalytische Abgasbehandlung in den typischen Wertebereich ab. Beim Wechsel der Zumischraten von Wasserstoff treten erneut Emissionsspitzen, insbesondere von Stickoxyden auf, wobei diese vor allem als Stickstoffmonoxyd vorliegen. Diese werden durch die Lambdaregelung reduziert, bleiben aber mit steigendem Wasserstoffanteil im Erdgas auf zunehmend hohem Niveau und überschreiten bereits bei 10 Vol.-% Wasserstoff den Grenzwert der TA Luft von 250 mg/m³. Bei der Umstellung auf 40 Vol.-% Wasserstoff im Brennstoffgemisch musste die Lambdaregelung durch Erreichen der Endstellung der Stelleinrichtung kurzzeitig vom Hersteller deaktiviert werden, sodass für eine Dauer von ca. 4 Minuten eine Sauerstoffkonzentration im Abgas von bis zu 0,3 Vol.-% gemessen werden konnte. Dabei traten auch die im oben abgebildeten Diagramm sichtbaren, sehr hohen NO und NO₂-Emissionswerte auf. Durch eine Nachjustierung der Stelleinrichtung konnte diese wieder in Betrieb genommen werden, sodass niedrigere Stickstoffoxyd- und Kohlenwasserstoffemissionen gemessen werden konnten.

Aus der Abbildung 18 kann auch entnommen werden, dass die Emission von Kohlenmonoxyd bei Wasserstoffzumischung tendenziell abnimmt. Dies kann damit begründet werden, dass der Anteil von kohlenstoffhaltigen Brenngasbestandteilen abnimmt. Im Zeitraum mit deaktivierter Lambdaregelung bzw. nach der Erhöhung des Wasserstoffanteils wird sichtbar, dass der vorhandene Sauerstoffüberschuss ausreicht um das vorhandene CO in CO₂ katalytisch umzusetzen.

Die ebenfalls im Diagramm eingetragenen Kohlenwasserstoffbestandteile im Abgas kommen insbesondere durch den Methanschluß zustande, der bei Gasmotoren durch unvollständige Verbrennung auftritt. Die am BHKW gemessenen Werte sind mit durchschnittlich 50 mg/m³ vergleichsweise sehr niedrig.

3.1.3 Kaltstartverhalten und Geräusentwicklung

Für die Untersuchung des Kaltstartverhaltens wurde das BHKW für kurze Dauer mit dem zu untersuchenden Gasgemisch (0 bis 40 % Wasserstoffanteil) beaufschlagt, bis sichergestellt werden konnte, dass sich bei erneutem Start ausschließlich das betreffende Gasgemisch in der Zuleitung und Armaturen des BHKW befindet. Nach erfolgter Abkühlung der Anlage auf Raumtemperatur erfolgte ein Start des Gerätes, wobei die für eine Bilanzierung benötigten Daten sekundlich aufgezeichnet wurden.

Beim Vergleich der ermittelten Ergebnisse konnten nur geringe Unterschiede im Startverhalten festgestellt werden. Diese betreffen insbesondere den Anstieg der Vorlauftemperatur und der damit verbundenen Differenz zur Rücklauftemperatur. Insbesondere bei Wasserstoffanteilen von 20 - 40 % konnten nach zwei Minuten Betrieb Temperaturdifferenzen von mehr als 20 K festgestellt werden. Diese betragen bei Erdgasbetrieb bzw. bei 10 % Wasserstoffzumischung lediglich etwa 10 K. Dieser Effekt kann auch mit dem erhöhten Wärmeaustausch im Zylinder begründet werden, der zu einer schnelleren Erwärmung des Motors führen kann.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Geräusentwicklung der Anlage bei Nennleistung gemessen. Dabei wurde der Schalldruckpegel in einem Abstand von einem Meter, in 2/3 der Gerätehöhe in Anlehnung an die DIN 45635 Teil 1 (Geräuschmessung an Maschinen) durchgeführt. Da das Gerät nicht in einer speziellen schallsolierten Umgebung betrieben wurde, konnte gemäß der Norm nur die Genauigkeitsklasse 3 bei den Messungen erreicht werden. Die ermittelten Schallpegel sind in der Tabelle 9 abgebildet. Es ist ersichtlich, dass die Geräusentwicklung mit zunehmenden Wasserstoffanteil im Brenngas zunimmt. Dabei konnte zunächst bei 10 % Wasserstoffzumischung eine geringfügige Abnahme um ca. 1 dB (A) an 2 Seiten des Gerätes gemessen werden. Insbesondere bei 30 und 40 % Wasserstoffzumischung wurde ein Anstieg der gemessenen Schalldruckpegel erfasst. Im Vergleich zum reinen Erdgasbetrieb konnte bei 40 % Wasserstoffanteil ein Anstieg des Schalldruckpegels von ca. 2 bis 3 dB(A) ermittelt werden. Dieser kann mit dem veränderten Verbrennungsverhalten von Wasserstoff bzw. den erhöhten Strömungsgeräuschen in der Gasarmatur (s. Schallpegel linke Seite) begründet werden.

Tabelle 9: Gemessene Schallpegel am BHKW bei unterschiedlicher Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil im Erdgas in Vol.-%	0	10	20	30	40
Schallpegel in dB (A) Frontseite	55	54	55	56	57,3
Schallpegel in dB (A) linke Seite (Gasanschluss)	59	58	60	60,5	62,4
Schallpegel in dB (A) rechte Seite	54	54,5	54,5	54,8	56

3.1.4 Verhalten bei dynamischer Änderung des Wasserstoffanteils

Nachdem im Abschnitt 3.1.1 das Betriebsverhalten des BHKW anhand diskontinuierlicher Änderungen des Wasserstoffanteils im Brenngas untersucht wurde, sollen hier Ergebnisse von durchgeführten Untersuchungen bei dynamischen Änderungen des Wasserstoffanteils betrachtet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das BHKW sowohl mit sprunghafter, als auch kontinuierlicher Veränderung des Wasserstoffanteils im Brenngas betrieben. Dabei wurden Energiebezug und -abgabe aufgezeichnet und resultierende Nutzungsgrade ermittelt. Diese Ergebnisse sind in dem in der Abbildung 19 dargestellten Diagramm eingetragen. Zusätzlich wurden im oberen Teil des Diagramms die jeweiligen Volumenanteile des zugemischten Wasserstoffs eingefügt.

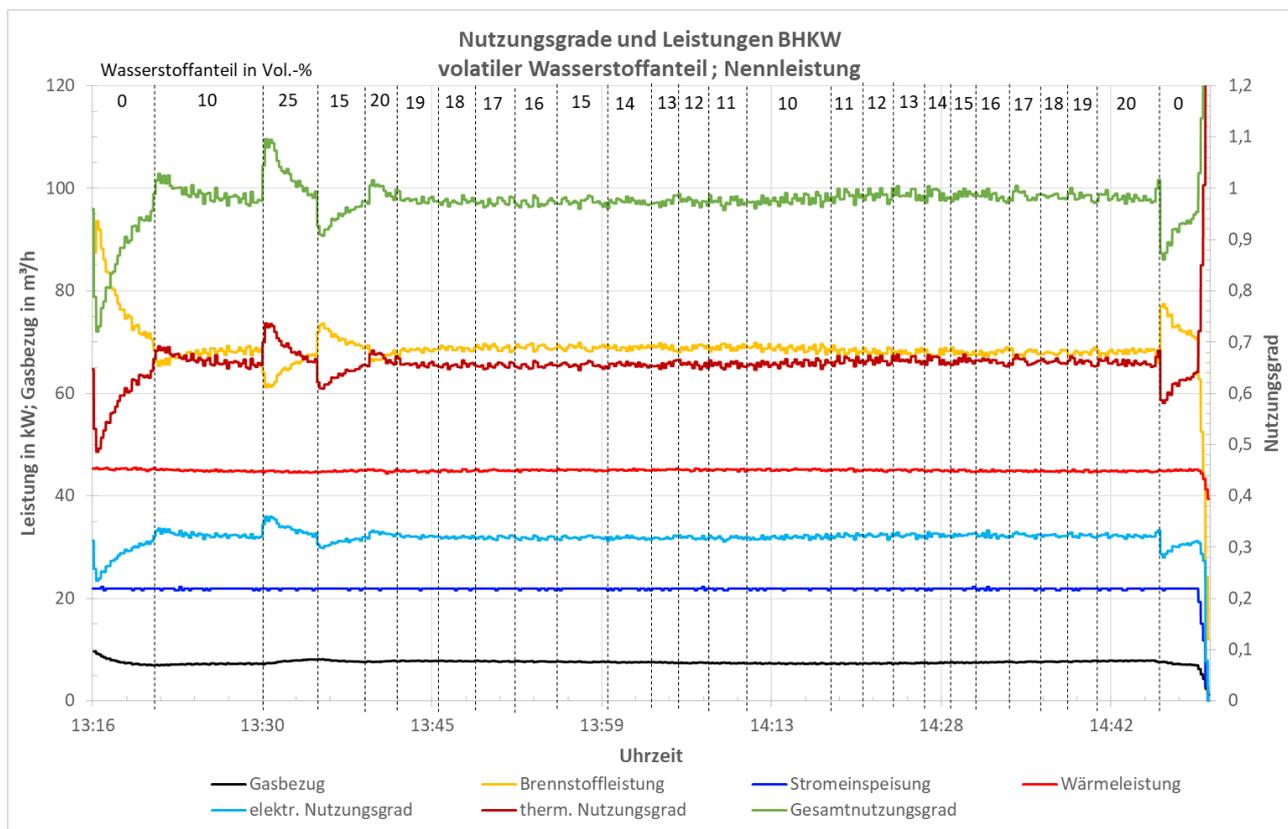


Abbildung 19: Verlauf von Leistungen und Nutzungsgraden bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei sprunghaften Änderungen des Wasserstoffanteils zu Beginn der Messung ähnliche Effekte wie bei den in der Abbildung 17 dargestellten Messergebnissen auftreten. Bei geringen Änderungen der Zumischung im Prozentbereich sind die resultierenden Schwankungen der Brennstoffleistung gering und resultieren auch aus dem Messprinzip der Gasmengenmessung (Balgen-gaszähler). Abschließend kann eingeschätzt werden, dass je kleiner die Veränderung des Wasserstoffanteils ausfällt, desto besser kann sich die Regelung des BHKW an die geänderte Gasbeschaffenheit anpassen. Das BHKW besitzt folglich eine Regelung, die eine Kompensation von Leistung und Luftzahl ermöglicht.

3.2 Gas-Brennwertgerät mit Gebläsebrenner (Leistungsbereich 20 kW)

Neben dem Blockheizkraftwerk mit Gas-Ottomotor wurde ein Gas-Brennwertgerät (BWK) mit Gebläsebrenner für die Durchführung von experimentellen Untersuchungen verwendet und mit den in Abschnitt 3 genannten Gasgemischen betrieben. Die Messungen erfolgten zunächst insbesondere bei Nennlast mit stationären Zumischungsraten von Wasserstoff. Dabei wurde das Brennwertgerät über eine ausreichend lange Zeitdauer mit dem jeweiligen Gasgemisch betrieben (Einschwingphase), bis stationäre Messdaten verfügbar waren und zur Auswertung verwendet werden konnten. Bei den anschließend durchgeführten Messungen erfolgten sowohl sprunghafte als auch kontinuierliche Änderungen des Wasserstoffanteils im Brenngas. Diese Ergebnisse sind im Abschnitt 3.2.4 dargestellt.

3.2.1 Leistung und Effizienz

Auch bei diesem Gerät sollen zunächst die im stationären Betrieb ermittelten Leistungen bei statischen Wasserstoffanteilen von 0, 10, 20, 30 und 40 Prozent dargestellt und beurteilt werden. Diese sind in der Tabelle 10 für die betrachteten Wasserstoffanteile dargestellt. Das Brennwertgerät arbeitete bei den Messungen mit einer Rücklauftemperatur von $50\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$, sodass die dargestellten, mittleren Wärmeleistungen und Nutzungsgrade gut miteinander verglichen werden können.

Es ist ersichtlich, dass die benötigte Brennstoffleistung, die aus dem jeweils bezogenem Volumenstrom und dem jeweiligen Heizwert des Gasgemisches ermittelt wurde, bis zu einem Wasserstoffanteil von 20 Vol.-% zunächst relativ konstant bleibt und mit weiter steigender Zumischung um bis zu 2 kW abnimmt. Die erzeugte Wärmeleistung sinkt mit zunehmenden Wasserstoffanteil kontinuierlich und erreicht bei maximaler Wasserstoffzumischung nur noch 78 Prozent der Leistung bei Erdgasbetrieb. Aus Brennstoff- und Wärmeleistung wurde der thermische Nutzungsgrad berechnet und ebenfalls in der Tabelle 10 eingefügt. Dieser sinkt insbesondere bis zu 20 Vol.-% Wasserstoffanteil aufgrund der abnehmenden Wärmeleistung um bis zu 13,5 Prozent und verändert sich danach durch die ebenfalls sinkende Brennstoffleistung nur geringfügig.

Tabelle 10: Mittlere Leistungen und berechneter Nutzungsgrad bei steigender Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil	Brennstoffleistung	Wärmeleistung	therm. Nutzungsgrad
Vol.-%	kW	kW	%
0	23,14	22,30	96,4
10	23,11	20,75	89,8
20	23,17	19,20	82,9
30	22,35	18,29	81,8
40	21,08	17,50	83,0

Die während einer Versuchsperiode mit statischen Änderungen des Wasserstoffanteils im Bereich von 0 bis 40 Vol.-% aufgezeichneten Verläufe von Energiebezug und -abgabe, Heizkreistemperaturen und ermittelten thermischen Nutzungsgrad sind in der Abbildung 20 dargestellt. Die daraus berechneten mittleren Leistungen und Nutzungsgrade für die jeweilige Zumischrate von Wasserstoff wurden bereits in der Tabelle 10 zusammengefasst.

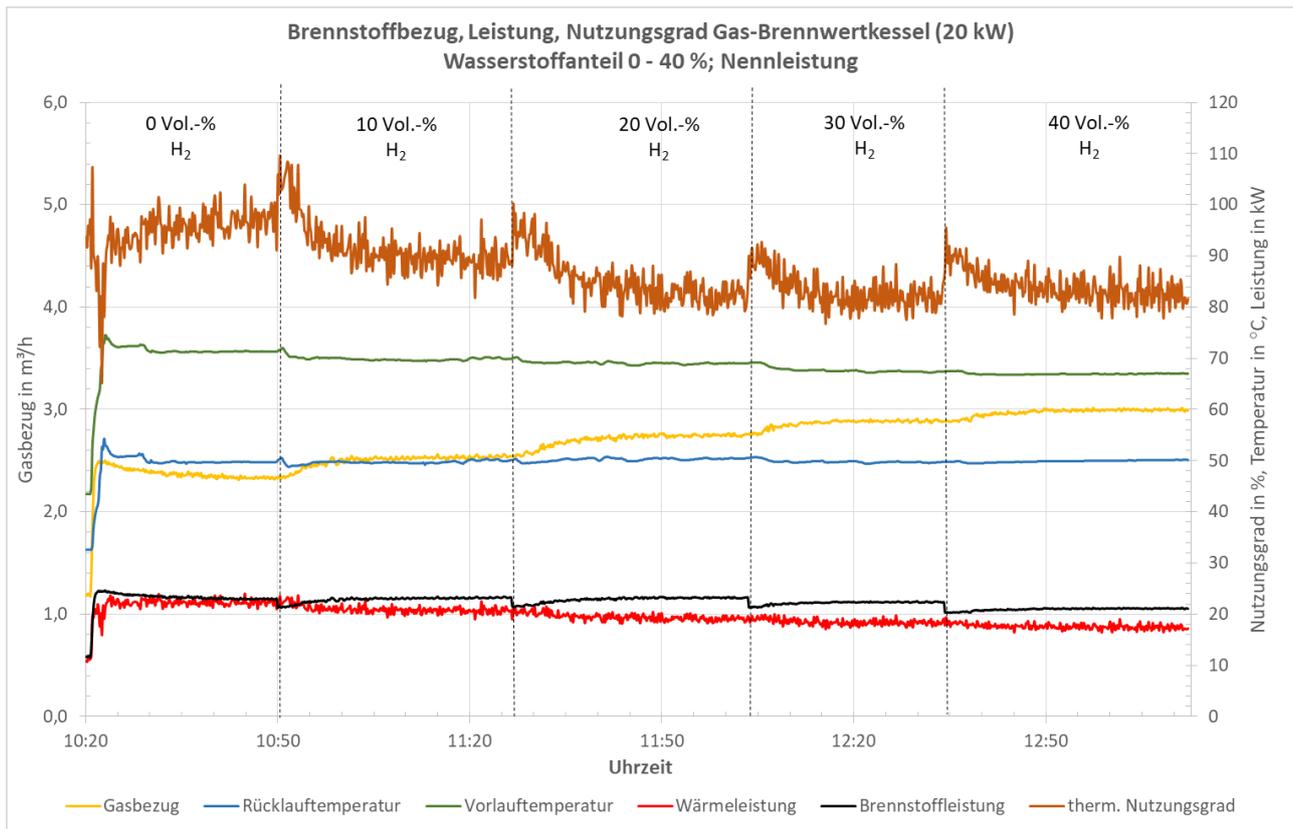


Abbildung 20: Verlauf von Messdaten und Kenngrößen bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen im Brenngas

Im Diagramm wird sichtbar, dass der Gasbezug durch die Zumischung von Wasserstoff ansteigt, die resultierende Brennstoffleistung aber aufgrund des geringeren Brenn- bzw. Heizwertes von Wasserstoff abnimmt. Da das Brennwertgerät nicht auf die Veränderung der Gasbeschaffenheit reagieren kann, nimmt die erzeugte Wärmeleistung um bis zu 20 Prozent ab, was auch im Rückgang der Vorlauftemperatur bei weitestgehend konstanter Rücklauftemperatur sichtbar wird. Damit sinkt, wie auch in der Abbildung 20 erkennbar ist, der thermische Nutzungsgrad. Eine wesentliche Ursache dafür besteht auch im Verbrennungsluftverhältnis (λ), das aufgrund der nicht vorhandenen Regelung mit zunehmenden Wasserstoffanteil ansteigt und den resultierenden Abgasvolumenstrom vergrößert.

3.2.2 Abgastemperatur und –zusammensetzung

Neben dem Luftverhältnis sind weitere mittlere Abgaskenngrößen in der Tabelle 11 zusammengestellt. Auch diese zeigen, wie bereits im Abschnitt 3.2.1 erwähnt, dass eine Verdünnung des Abgases auftritt, die sich in der Zunahme des Restsauerstoffanteils und in einer Verringerung des CO₂-Anteils im Abgas äußern. Des Weiteren erfolgt eine Verminderung der Abgasemissionen (CO, NO_x), die ebenfalls aus der Verdünnung des Abgases resultieren und die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte einhalten. Die starke Abnahme der CO-Emissionen kann außerdem auf die Verringerung des Kohlenstoffanteils im Brenngas zurückgeführt werden.

In der Tabelle 11 ist zusätzlich die Abgastemperatur eingefügt, die eine Abnahme von 6 K bei zunehmenden Wasserstoffanteil aufweist. Diese kann einerseits mit der Verdünnung des Abgases, andererseits mit der Abnahme der Wärmeleistung des Gerätes begründet werden.

Tabelle 11: Mittelwerte von Abgaskenngrößen bei steigender Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil	Luftverhältnis	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	Abgas-temperatur
Vol.-%	-	Vol.-%	Vol.-%	mg/m ³ (unv.)	mg/m ³ (unv.)	°C
0	1,36	5,52	8,91	134,82	23,64	75,6
10	1,46	6,65	8,25	67,92	12,87	74,7
20	1,60	7,87	7,57	32,83	14,13	72,9
30	1,71	8,73	7,06	19,57	16,28	71,0
40	1,83	9,49	6,63	11,40	17,65	69,7

3.2.3 Geräusentwicklung

Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurde die Geräusentwicklung des Brennwertgerätes beim Betrieb mit Erdgas und bei den betrachteten Wasserstoffanteilen gemessen. Die Messungen erfolgten wie beim BHKW in einem Abstand von einem Meter, in 2/3 der Gerätehöhe in Anlehnung an die DIN 45635 Teil 1, wobei aufgrund der Geräteinstallation Messungen nur an der Frontseite und der rechten Geräteseite möglich waren. Die Ergebnisse der Messungen, die jeweils bei Nennleistung durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 12 dargestellt.

Sie zeigen, dass keine wesentlichen Änderungen der Geräusentwicklung während der stichprobenartig durchgeführten Messungen festgestellt werden konnten. Mit Hilfe des eingesetzten Schallpegelmessgerätes konnte mit zunehmenden Wasserstoffanteil eine geringe Abnahme des Schallpegels im Bereich von 1 – 2 dB(A) an beiden Geräteseiten gemessen werden.

Tabelle 12: Gemessene Schallpegel am Brennwertkessel bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen

Wasserstoffanteil im Erdgas in Vol.-%	0	10	20	30	40
Schallpegel in dB (A) Frontseite	58,2	57,4	58,5	57,0	57,3
Schallpegel in dB (A) Rechte Seite	57,4	56,7	56,5	55,7	55,5

3.2.4 Verhalten bei dynamischer Änderung des Wasserstoffanteils

Am Gas-Brennwertgerät erfolgten, ähnlich wie beim BHKW, Untersuchungen bei dynamischen Änderungen des Wasserstoffanteils. Diese erfolgten zunächst mit sprunghafter, danach mit kontinuierlicher Veränderung des Wasserstoffanteils im Brenngas.

Dabei wurden Energiebezug und -abgabe aufgezeichnet und resultierende Nutzungsgrade ermittelt. Diese Ergebnisse sind in dem in der Abbildung 21 abgebildeten Diagramm eingetragen. Zusätzlich wurden im oberen Teil des Diagramms die jeweiligen Volumenanteile des zugemischten Wasserstoffs eingefügt.

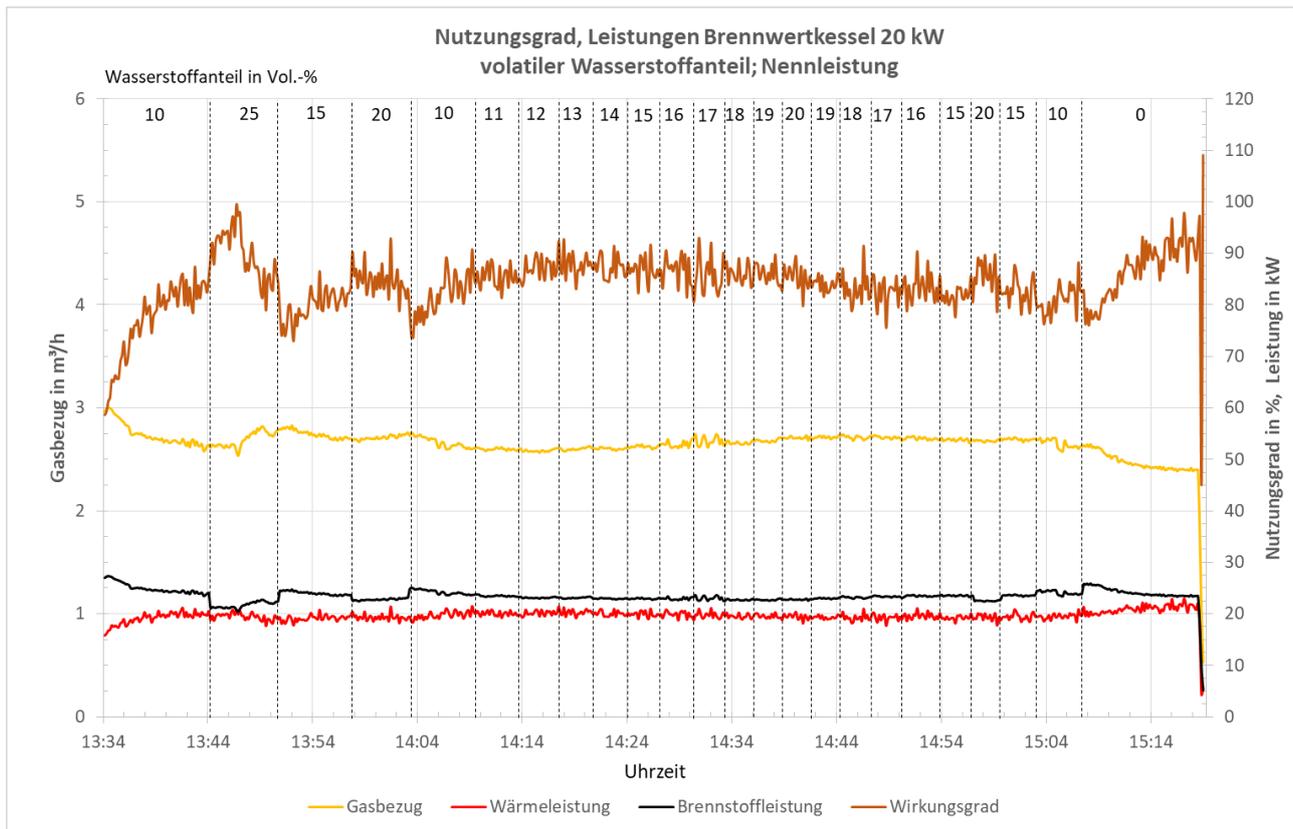


Abbildung 21: Verlauf von Leistungen und Nutzungsgrad bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen

Im Diagramm ist erkennbar, dass sich bei größeren sprunghaften Änderungen des Wasserstoffanteils der berechnete Nutzungsgrad des Gerätes aufgrund der veränderten Brennstoffleistung ebenfalls sprunghaft ändert. Die Veränderung der Wärmeleistung erfolgt, wie auch bereits in der Abbildung 20 sichtbar war, dagegen relativ träge und wirkt sich bei konstanter Rücklaufemperatur in der sich langsam ändernden Vorlaufemperatur des Heizkreises aus. Bei den untersuchten volatilen Änderungen des Wasserstoffanteils im Brenngas, die insbesondere im Bereich zwischen 10 und 20 Prozent durchgeführt wurden, reagierte das Gerät sehr träge, sodass diese nur in längeren tendenziellen Änderungen der Systemparameter sichtbar wurden.

Abschließend kann eingeschätzt werden, dass das Brennwertgerät bei volatiler Wasserstoffzumischung von bis 40 Vol.-% sicher funktioniert. Da dieser Gerätetyp Änderungen der Gasbeschaffenheit nicht kompensieren kann, erfolgt keine entsprechende Nachregelung der Brennstoffmenge und die abgegebene Wärmeleistung sinkt. Es handelt sich folglich nicht um ein selbstkalibrierendes Brennwertgerät („N“-Gerät). Zusätzlich erhöhen sich die Abgasverluste, da die erforderliche Verbrennungsluftmenge, die bei zunehmender Wasserstoffzumischung sinkt, nicht kompensiert werden kann. Das steigende Luftverhältnis führt zu einer Verdünnung des Abgases, sodass die gemessenen Abgasemissionswerte gegenüber dem Betrieb mit Erdgas abnehmen.

3.3 Gas-Brennwertgerät mit Matrixbrenner (Leistungsbereich 100 kW)

Im Rahmen des Projektes wurde des Weiteren ein Gas-Brennwertgerät mit Matrixbrenner im Leistungsbereich 100 kW untersucht. Die Untersuchungen konnten mit Wasserstoffanteilen im Brenngas von bis zu 10 Prozent durchgeführt werden.

3.3.1 Leistung und Effizienz

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen wurden bei diesem Gas-Brennwertgerät bei statischen Wasserstoffanteilen von 0, 4, 6 und 10 Prozent durchgeführt. Dabei wurde das Gerät mit 60 % der Nennleistung, d.h. mit einer Wärmeleistung von ca. 60 kW betrieben. Die im stationären Betrieb ermittelten mittleren Leistungen und Nutzungsgrade sind in der Tabelle 13 dargestellt. Das Brennwertgerät arbeitete bei den durchgeführten Messungen mit einer Rücklauftemperatur von $14\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$, sodass die dargestellten, mittleren Wärmeleistungen und Nutzungsgrade miteinander vergleichbar sind.

Tabelle 13: Mittlere Leistungen und berechneter Nutzungsgrad bei steigender Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil	Brennstoffleistung	Wärmeleistung	therm. Nutzungsgrad
Vol.-%	kW	kW	%
0	60,27	62,96	104,46
4	61,97	63,06	101,77
6	63,69	62,98	98,88
10	65,95	62,70	95,07

Bei der in der Tabelle 13 dargestellten mittleren Brennstoffleistung wird sichtbar, dass bei zunehmenden Wasserstoffanteil im Brenngas die vom Gerät bezogene Brennstoffleistung ansteigt. Ausgehend von Erdgas bis zu einem Wasserstoffanteil von 10 Vol.-% beträgt diese Zunahme ca. 9,5 Prozent. Die bei dieser Zumischungsrate ermittelte mittlere Wärmeleistung ändert sich nur geringfügig gegenüber der bei Erdgasbetrieb ermittelten Wärmeleistung. Es ist außerdem sichtbar, dass der berechnete thermische Nutzungsgrad aufgrund der steigenden Brennstoffleistung stetig sinkt. Bei der betrachteten maximalen Wasserstoffzumischung verringert sich der Nutzungsgrad um etwa 9,5 Prozent.

Die in der Tabelle 13 dargestellten mittleren Leistungen und Nutzungsgrade für die jeweilige Zumischrate von Wasserstoff wurden aus Messdaten einer Versuchsperiode ermittelt. Die während dieser Versuchsperiode mit statischen Änderungen des Wasserstoffanteils im Bereich von 0 bis 10 Vol.-% aufgezeichneten Verläufe von Energiebezug und -abgabe, Heizkreistemperaturen und ermittelten thermischen Nutzungsgrad sind in der Abbildung 22 dargestellt. Im Diagramm wird sichtbar, dass bei Steigerung des Wasserstoffanteils im Brenngas eine Erhöhung des Gasbezugs und damit, durch Verringerung des Heizwertes des Gasgemisches, auch der Brennstoffleistung auftritt. Die Regelung des Brennwertgerätes reagiert folglich auf den geringeren Energiegehalt des Brenngases und kann die eingestellte Wärmeleistung weiterhin bereitstellen. Bei der Umstellung des Brenngases auf Erdgas ist aufgrund der größeren Änderung des Energiegehaltes des Brenngases die Einschwingphase besser erkennbar, in der die Regelung auf die kurzzeitig höhere Brennstoffleistung reagiert.

In der Abbildung 22 wird auch die Verringerung des thermischen Nutzungsgrades bei zunehmenden Wasserstoffanteil sichtbar. Die Ursache dafür besteht im Verbrennungsluftverhältnis (λ), das aufgrund der nicht vorhandenen λ -Regelung mit zunehmenden Wasserstoffanteil ansteigt und den daraus resultierenden Abgasvolumenstrom vergrößert. Diese Problematik ist insbesondere in den im Abschnitt 3.3.2 dargestellten Abgaszusammensetzung erkennbar.

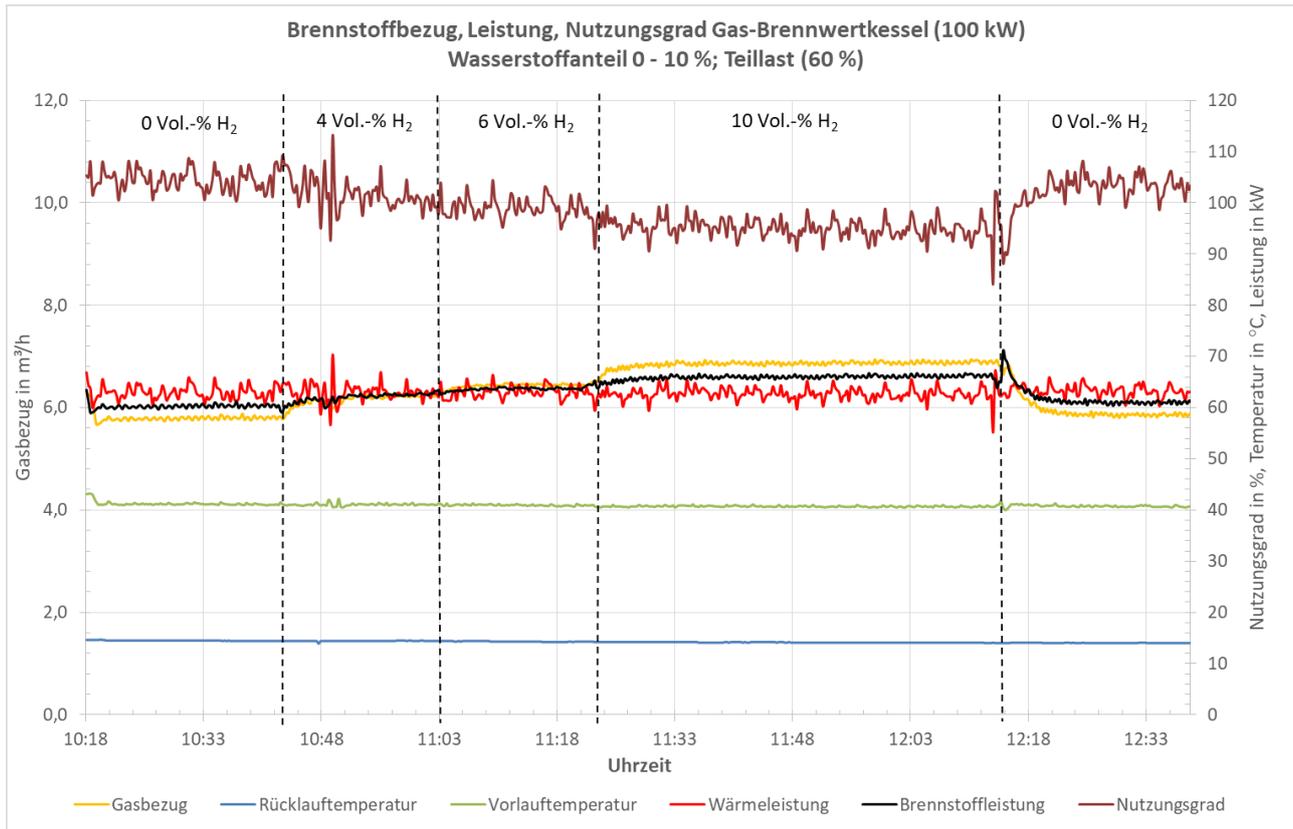


Abbildung 22: Verlauf von Messdaten und Kenngrößen bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen im Brenngas

3.3.2 Abgastemperatur und –zusammensetzung

Neben dem Verbrennungsluftverhältnis sind weitere mittlere Abgaskenngrößen in der Tabelle 14 zusammengestellt. Auch diese zeigen, wie bereits im Abschnitt 3.3.1 erwähnt, dass eine Verdünnung des Abgases auftritt, die in der Zunahme des Restsauerstoffanteils und in einer Verringerung des CO₂-Anteils im Abgas sichtbar werden. Außerdem erfolgt eine Verminderung der Abgasemissionen (CO, NO_x), die ebenfalls aus der Verdünnung des Abgases resultieren und die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte einhalten. Die Abnahme der CO-Emissionen resultiert außerdem aus der Verringerung des Kohlenstoffanteils im Brenngas.

In der Tabelle 14 wurde zusätzlich die Abgastemperatur eingefügt, die mit zunehmenden Wasserstoffanteil geringfügig ansteigt. Dieses Ergebnis kann mit der höheren Verbrennungstemperatur von Wasserstoff begründet werden, die trotz zunehmender Verdünnung des Abgases zu einer erhöhten Aufheizung des Verbrennungsraumes führt.

Tabelle 14: Mittelwerte von Abgaskenngrößen bei steigender Wasserstoffzumischung

Wasserstoffanteil	Luftverhältnis	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	Abgas-temperatur
Vol.-%	-	Vol.-%	Vol.-%	mg/m ³ (unv.)	mg/m ³ (unv.)	°C
0	1,29	6,17	7,90	22,26	16,28	36,9
4	1,31	6,59	7,46	17,56	11,95	37,3
6	1,32	6,86	7,20	14,96	9,89	37,7
10	1,35	7,28	6,81	12,05	6,88	38,1

3.3.3 Geräusentwicklung

Auch bei diesem Brennwertgerät wurde Messungen der Geräusentwicklung beim Betrieb mit Erdgas und bei einem Wasserstoffanteil von 10 % gemessen. Die Messungen erfolgten ebenfalls in Anlehnung an die DIN 45635 Teil 1. Die Ergebnisse der Messungen, die jeweils bei 60 % der Nennleistung durchgeführt wurden, sind in der Tabelle 15 dargestellt.

Sie zeigen, dass keine wesentlichen Änderungen der Geräusentwicklung während der stichprobenartig durchgeführten Messungen festgestellt werden konnten.

Tabelle 15: Gemessene Schallpegel am Brennwertkessel bei unterschiedlichen Wasserstoffanteilen

Wasserstoffanteil im Erdgas in Vol.-%	0	10
Schallpegel in dB (A) Frontseite	59,2	58,9
Schallpegel in dB (A) Linke Seite	58,7	58,6
Schallpegel in dB (A) Rechte Seite	58,6	58,8

Anhand der Messergebnisse kann eingeschätzt werden, dass das Brennwertgerät bei volatiler Wasserstoffzumischung bis 10 Vol.-% sicher funktioniert. Da diese Zumischraten bereits durch das bestehende DVGW-Arbeitsblatt G 260 zugelassen sind, sollten auch keine sicherheitsrelevanten Einschränkungen in der Betriebsweise feststellbar sein.

Dennoch konnte der Einfluss des zugemischten Wasserstoffes auf Leistung, Effizienz und Abgasemissionen dieses Gerätes ermittelt und beurteilt werden. Dabei wurde festgestellt, dass durch die im Gerät eingesetzte Regelung eine Kompensation der Brennstoffmenge erfolgt, sodass die angeforderte Wärmeleistung auch bei sinkenden Heiz- bzw. Brennwert des Brenngases bereitgestellt werden kann. Da die Regelung nicht auf den geringeren Verbrennungsluftbedarf bei Wasserstoffzumischung reagieren kann, erhöht sich das Luftverhältnis bei der Verbrennung, d.h. der Abgasverlust steigt und führt zu einer Verschlechterung des thermischen Nutzungsgrades des Gerätes. Die dadurch ansteigende Abgasmenge hat eine Verdünnung des Abgases zur Folge, sodass die Abgasemissionen gegenüber dem Betrieb mit Erdgas abnehmen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten praxisnahen Untersuchungen wurde der Betrieb von drei unterschiedlichen, handelsüblichen Gerätetechnologien mit Wasserstoffanteilen im Brenngas von bis zu 40 Prozent untersucht. Auf die Untersuchung der im Projektvorschlag erwähnten Mikro-KWK-Anlage mit Stirling-Motor (Leistungsbereich 1 kW_{el}) wurde verzichtet, da derartige Geräte nicht mehr auf dem Markt angeboten werden und davon auszugehen ist, dass sich nur wenige Geräte im Bestand befinden.

Bei den Untersuchungen konnten keine sicherheitsrelevanten Probleme festgestellt werden. Basierend auf den festgestellten Veränderungen von Leistung und Effizienz konnte ermittelt werden, dass bei der untersuchten Gerätetechnik folgende Regelungsstrategien zum Einsatz kommen:

- ohne Kompensation von Leistung und Luftzahl (Brennwertgerät Leistungsbereich 20 kW),
- mit Kompensation der Leistung, ohne Kompensation der Luftzahl (Brennwertgerät Leistungsbereich 100 kW),
- mit Kompensation von Leistung und Luftzahl (BHKW).

Bei den betrachteten Anlagen handelte es sich um Geräte, die sich im Bestand von DBI-GTI befinden und für die Untersuchungen eingesetzt werden konnten. Wie im Projekt festgestellt werden konnte, reagieren die unterschiedlichen Technologien, insbesondere durch den Einsatz verschiedener Regelungskonzepte, unterschiedlich auf die Zumischung von Wasserstoff. Folglich sind weitere Gerätetests und Untersuchungen erforderlich, um das Verhalten der im Bestand befindlichen Gerätetechnik bei Zumischung von Wasserstoff abbilden zu können.

Anhand der durchgeführten Abgasmessungen konnte nachgewiesen werden, dass durch die Zumischung von Wasserstoff und der damit verbundenen Senkung des Kohlenstoffanteils im Brenngas, eine Verringerung der CO₂-Emissionen auftritt und damit ein erster Schritt zur Dekarbonisierung der von Heiztechnologien verursachten Treibhausgasemissionen möglich wird.

Literaturverzeichnis

- [1] BRAUN, Helge: *Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030 : Fassung nach Klimakabinett.* 20.09.2019
- [2] BMWi: *Dialogprozess Gas 2030 : Überblick zu Förderinstrumenten zur Gründungs- und Wachstumsfinanzierung.* Erste Bilanz. Oktober 2019
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT ; NATURSCHUTZ ; BAU UND REAKTORSICHERHEIT ; WWW.BMUB.BUND.DE: *Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.* November 2016
- [4] DVGW REGELWERK: *DVGW G 260 (A) : Gasbeschaffenheit.* Technische Regeln - Arbeitsblatt. März 2013
- [5] GASWIRTSCHAFTLICHER BEIRAT DER DBI-GTI GGMBH FREIBERG: *Untersuchungen des Verhaltens von Bestandsanlagen (Heiz- und KWK-Geräte) unter hohen, volatilen Wasserstoffmengen (0-40 Vol.-%) im Erdgas" : Projektvorschlag für GWB.* 2019
- [6] DVGW REGELWERK: *DVGW G262 (A) : Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung.* Technische Regeln - Arbeitsblatt. September 2011
- [7] PROF. DR. HARTMUT KRAUSE, DR. MATTHIAS WERSCHY, STEFFEN FRANKE, DBI GAS- UND UMWELTECHNIK GMBH, FREIBERG: *Untersuchungen der Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsänderungen auf industrielle und gewerbliche Anwendungen : Abschlussbericht DVGW-Förderkennzeichen G 1/06/10.* Abschlussbericht. April 2014
- [8] LEICHER, Jörg ; GIESE, Anne: *Einfluss von Gasbeschaffenheitsänderungen auf den Glasherstellungsprozess : Auswirkungen auf Verbrennungsvorgänge und die Glasherstellung.* Teil 5: Wasserstoff im Erdgas
- [9] WERSCHY, Matthias: *Auswirkungen der Wassestoffeinspeisung ins Erdgasnetz, Gasverwendungssektor Industrie*
- [10] CERBE, Günter (Hrsg.); LENDT, Benno (Hrsg.); BRÜGGEMANN, Klaus (Mitarb.); DEHLI, Martin (Mitarb.); GRÖSCHL, Frank (Mitarb.) : *Grundlagen der Gastechnik : Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung.* 8., vollständig überarbeitete Auflage. München : Hanser, 2017
- [11] EGGENSCHWILER, Michael: *Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie für eine nachhaltige Zukunft : Kompendium zum 25-jährigen Jubiläum der Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg e.V. ; [H2 - 25.* Oberkrämer : Hydrogeit-Verl. Geitmann, 2014
- [12] PROF. DR. BERNHARD DROSTE ; DR. ANDREAS EDER ; PROF. DR. WINFRIED KARL ; DR. MARTIN KESTEN ; DR. FRANK MUSIOL ; JÜRGEN ROHDE ; DR. GUSTAV SAUER ; RALF SZAMER ; HANS-PETER ZIEGLER: *Anwendung der Wasserstoff-Technologie : des Arbeitskreises Wasserstofftechnologie der SFK.* Eine Bestandsaufnahme. Mai 2002
- [13] BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG; Volkmar Schröder (Mitarb.); Enis Askar (Mitarb.); Temir Tashqin (Mitarb.); Abdel Karmin Habib (Mitarb.) : *Sicherheitstechnische Eigenschaften von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen : Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 2539.* Berlin, 09.2016
- [14] HÖCHER, Thomas; TEMPEL, Matthias (Mitarb.): *Orientierungswerte Monatsmittel Mai 2018 : Nicht für Abrechnungszwecke verwendbar.* monatsdurchschnittswerte typischer Erdgase im Netz der ONTRAS Gastransport GmbH. 05.2018
- [15] DANISH GAS TECHNOLOGY CENTRE: *Methane Number Calculator : Methane Number Calculator of natural*

gas mixtures. URL <https://mz2016.dgc.dk/>

- [16] WINTER, Carl-Jochen (Hrsg.); NITSCH, Joachim (Hrsg.): *Wasserstoff als Energieträger : Technik, Systeme, Wirtschaft*. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 1989
- [17] NILSSON, Elna J.K. ; VAN SPRANG, Astrid ; LARFELDT, Jenny ; KONNOV, Alexander A.: *The comparative and combined effects of hydrogen addition on the laminar burning velocities of methane and its blends with ethane and propane*. In: *Fuel* 189 (2017), S. 369–376
- [18] DONOHOE, Nicola ; HEUFER, Alexander ; METCALFE, Wayne K. ; CURRAN, Henry J. ; DAVIS, Marissa L. ; MATHIEU, Olivier ; PlichTA, Drew ; MORONES, Anibal ; PETERSEN, Eric L. ; GÜTHE, Felix: *Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures*. In: *Combustion and Flame* 161 (2014), Nr. 6, S. 1432–1443
- [19] GREGORY P. SMITH, DAVID M. GOLDEN, MICHAEL FRENKLACH, NIGEL W. MORIARTY, BORIS EITENEER, MIKHAIL GOLDENBERG, C. THOMAS BOWMAN, RONALD K. HANSON, SOONHO SONG, WILLIAM C. GARDINER, JR., VITALI V. LISSIANSKI, AND ZHIWEI QIN: *GRI-Mech 3.0* : http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/. URL <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/version30/text30.html>
- [20] JOOS, Franz: *Technische Verbrennung : Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen : mit 65 Tabellen*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [21] DR.-ING. JÖRG NITZSCHE; Dipl.-Ing. Burkhard Lohöfener (Mitarb.): *Auswirkungen von Wasserstoff auf die Emission von Erdgas-BHKW vor dem Hintergrund der TA Luft Novellierung : Abschlussbericht*. Freiberg, 14.12.2017
- [22] LUX, Johannes ; HAIDN, Oskar: *Flame Stabilization in High-Pressure Liquid Oxygen/Methane Rocket Engine Combustion*. In: *Journal of Propulsion and Power* 25 (2009), Nr. 1, S. 15–23
- [23] PROF. DR. GUENTER GAUGLITZ ; DR. HEIDI LÖBERT: *Einführung in die Spektroskopie : Das elektromagnetische Spektrum und dessen Spektralbereiche*. URL <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/spektroskopie/grundlagen/einfuehrung.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/spektroskopie/grundlagen/spektroskopiearten.vscml.html> – Überprüfungsdatum 2019-11-04
- [24] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR VERBRENNUNGSFORSCHUNG E.V.; Dr.-Ing. Tim Nowakowski (Mitarb.): *Untersuchung der Auswirkung von Wasserstoff-Zumsichung ins Erdgasnetz auf industrielle Feuerungsprozesse in thermoprozesstechnischen Anlagen : Schlussbericht*. zu IGF-Vorhaben Nr. 18518 N / 1. 01.12.2014. - 30.04.2017
- [25] SHERIHAN EL-GHAFOUR: *POLLUTANT EMISSIONS CONTROL UTILIZING HYBRID FUEL AND AIR NOZZLE-CASCADING TECHNIQUES*. Unpublished
- [26] BALLESTER, J. et al.: *Chemiluminescence monitoring in premixed flames of natural gas and its blends with hydrogen*. In: *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009) (2009), S. 2983–2991
- [27] KRIEG, Dennis: *Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2012. Jülich : Forschungszentrum Jülich, 2012 (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt 144)
- [28] GERT MÜLLER-SYRING ; MARCO HENEL: *Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen : Abschlussbericht DVGW Förderkennzeichen G1-02-12*. Abschlussbericht. Februar 2014
- [29] JOHANN GEORG WÄSLE: *Vorhersage der Lärmemission turbulenter Vormischflammen*. München, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen. Dissertation. 2007-08-14