

Roadmap Gas 2050 – TP3

H₂-Readiness Gasanwendung

H. Dörr, P. Pietsch, A. Giese, F. Burmeister

GAT 2022

F. Burmeister

11.10.2022; Online

D3.0 Zusammenfassung der **wissenschaftlich-theoretischen Grundlagen**

D3.1 Meta-Studie: H₂-ready **mobile Anwendungen**

D3.2 Bewertungskriterien und **Versuchsprogramm** zur H₂-Verträglichkeit von Gasanwendungen

D3.3 Bewertung der **H₂-Verträglichkeit von Gasanwendungen** bis zu 50 Vol.-%

D3.4 **Kompensationsstrategien** für Gasanwendungen bei H₂-Zumischung

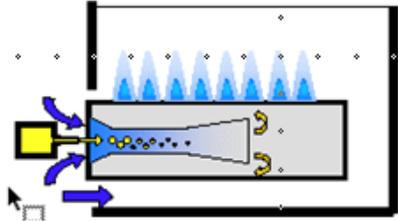
D3.5 Bewertung der **H₂-Verträglichkeit von Gasinstallationen** bis zu 100 Vol.-%

- Theoretischer Hintergrund
- Gasgeräteuntersuchungen
 - Messprogramm und Methodik
 - Auswahl Ergebnisse Haushaltsanwendungen
 - Industrieanwendungen
 - Fazit zu den bisherigen Untersuchungen
- Installationen
 - Hintergrund
 - Untersuchungen zu Materialien und Dichtheit von Verbindern
 - Gasströmungswächter
 - Fazit zu den bisherigen Untersuchungen
- Gesamtfazit

Theoretischer Hintergrund

Parameteranalyse | Wie kann ein H₂-Anteil im Gas die Anwendungstechnik beeinflussen?

H₂-Zumischung



Beeinflusst werden u.a.:

- L_{min}, H_s, W_s, Q



- $s_L = f(x_i, T, p, q), \lambda$



Die laminare, adiabate Flammengeschwindigkeit ist ein Stoffwert (folgt aus 1-D-Berechnung).

- Zündeinrichtungen
- Überwachungseinrichtungen

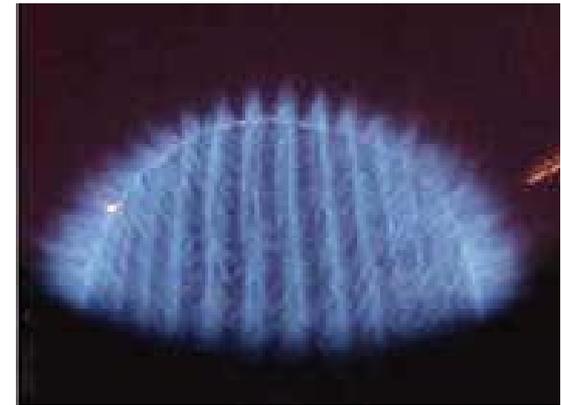
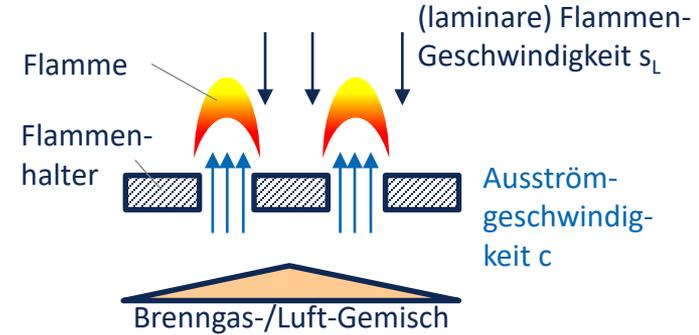
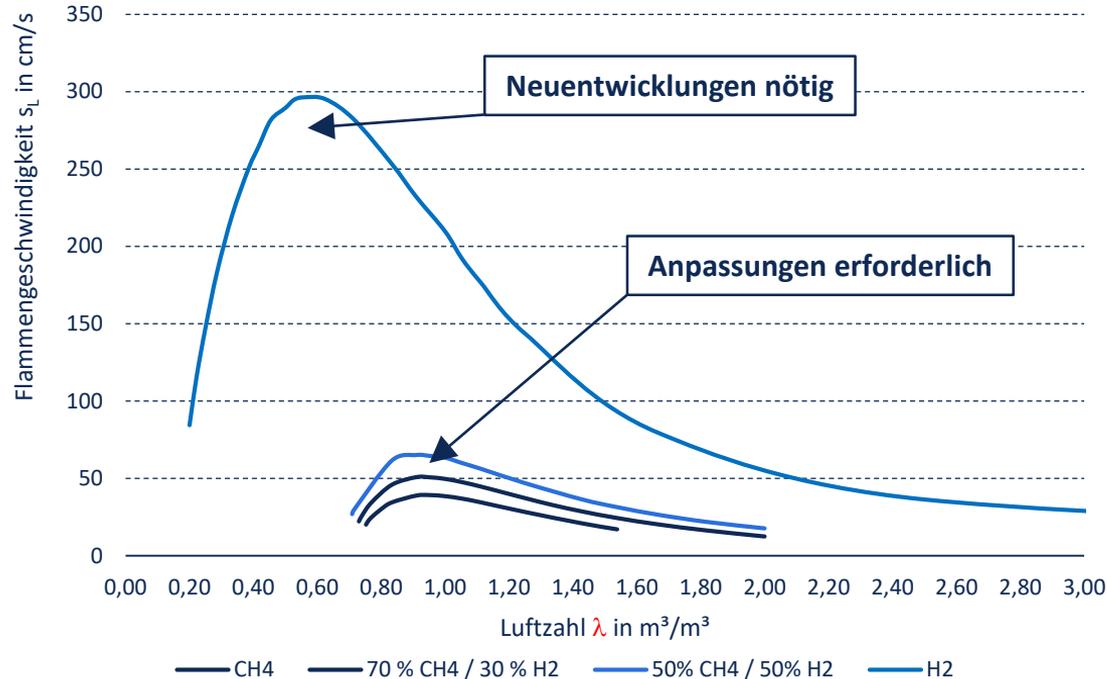
Es sind zu unterscheiden:

- Brenner ohne und mit Ventilator (Gebläseunterstützung)
- Voll- und teilvormischende Brenner
- 1-stufige und modulierende Brenner
- Regelungskonzepte

➤ H₂ hat einen Wobbe-Index entsprechend der **unteren Grenze** des H-Gas-Bandes.

Flammengeschwindigkeit s_L für CH_4 , H_2 und CH_4/H_2 -Gemische

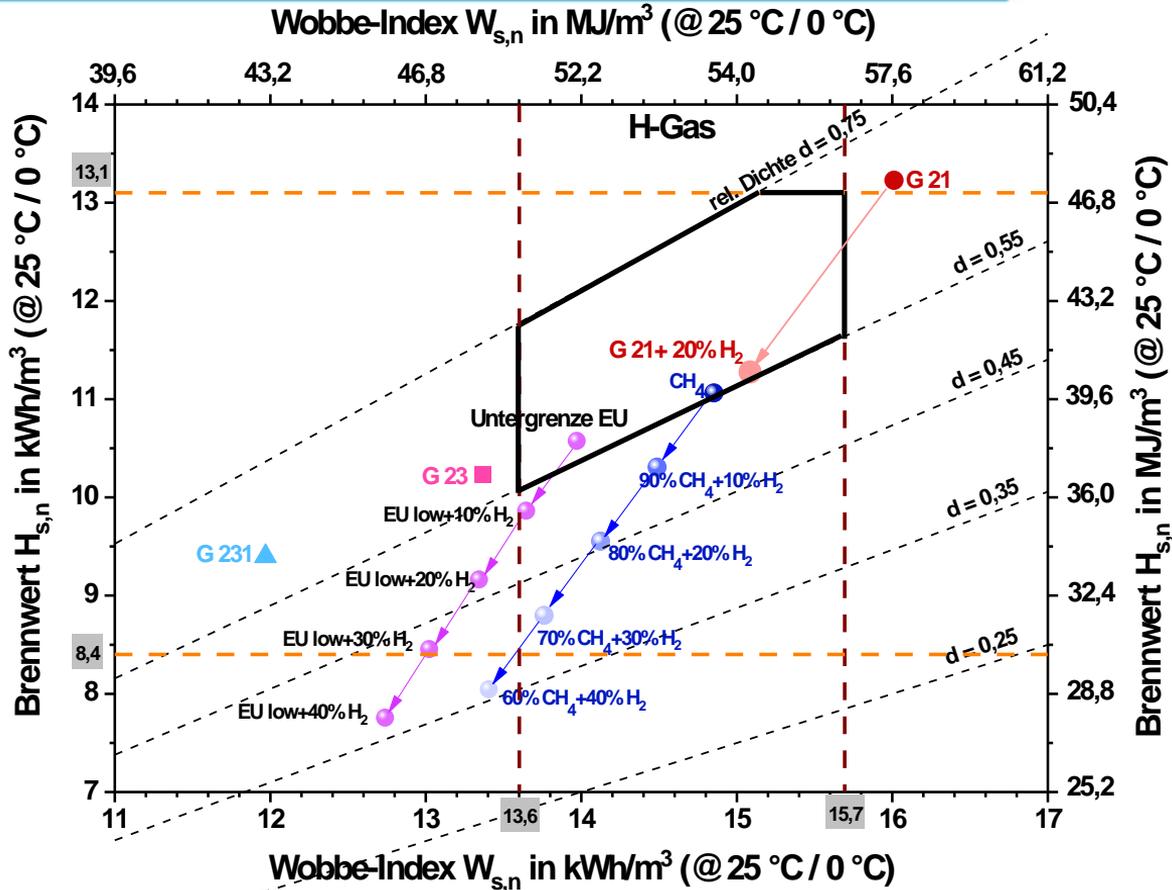
Die (laminare) Flammengeschwindigkeit im CH_4 / H_2 -Gemisch ändert sich wesentlich erst bei sehr großen H_2 -Anteilen.



Gasgeräteuntersuchungen

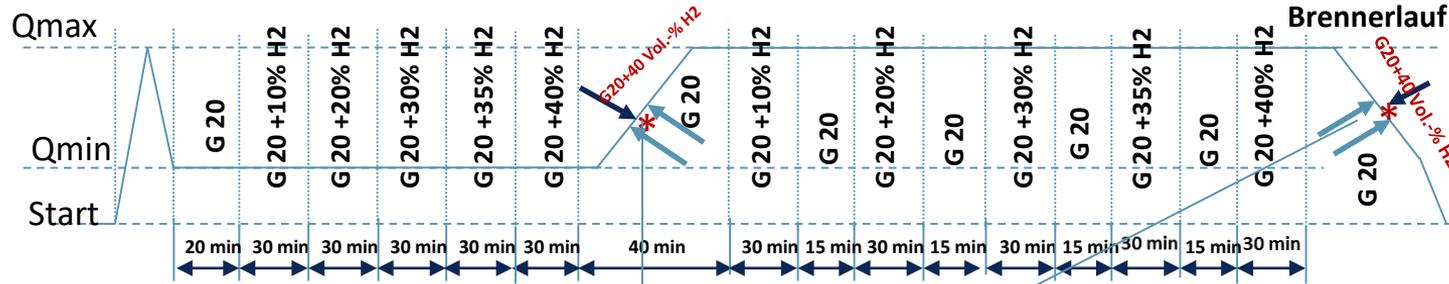
Messprogramm und Methodik

DVGW-F&E-Projekt Roadmap Gas 2050 | Einordnung der Testgase



- **Wesentliche Kennwerte** wie der Wobbe-Index $W_{s,n}$ und die relative Dichte d ändern sich (signifikant) durch die Zumischung von Wasserstoff
- Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde **bis zu 40 Vol.-% Wasserstoff** dem Gasmisch zugemischt

Brennerlauf mit Gaswechsel im stationären Betrieb und bei Leistungserhöhung/-reduktion



Zeitintervalle abhängig vom Erreichen des stationären Zustands und der Zeitdauer bis zum Vorhandensein der neuen Gasmischung (je nach Gerät und Mischanlage), ca. 2/3 Messzeit

ca. 1min
Evtl. kritisch bei Gaswechsel

Randbedingungen:

$T_{\text{Luft}} = T_{\text{Umgebung}}$; $p_{\text{Gas}} = 20 \text{ mbar}$

$T_{\text{VL}}/T_{\text{RL}}$: 80/60 °C und 50/30 °C

Testgase:

G 20 als Referenzgas

G 20 + H2 (10, 20, 30 und 40%)

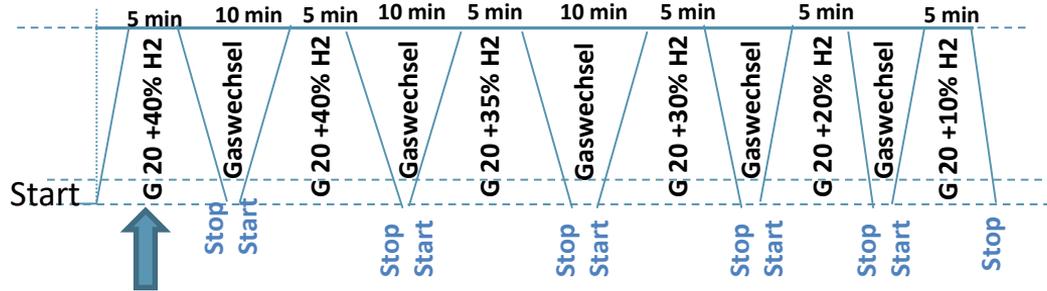
G 231 + H2 (10, 20, 30 und 40%)

G 23 + H2 (10, 20, 30 und 40%)

(EU-Low nur, wenn G23 Probleme zeigt)

EU-Low+H2 (10, 20, 30 und 40%)

Start- und Stop-Messung



Kaltstart mit gekühlter
Verbrennungsluft

(Kaltstart nur G 20 + 40 Vol.-% H₂)

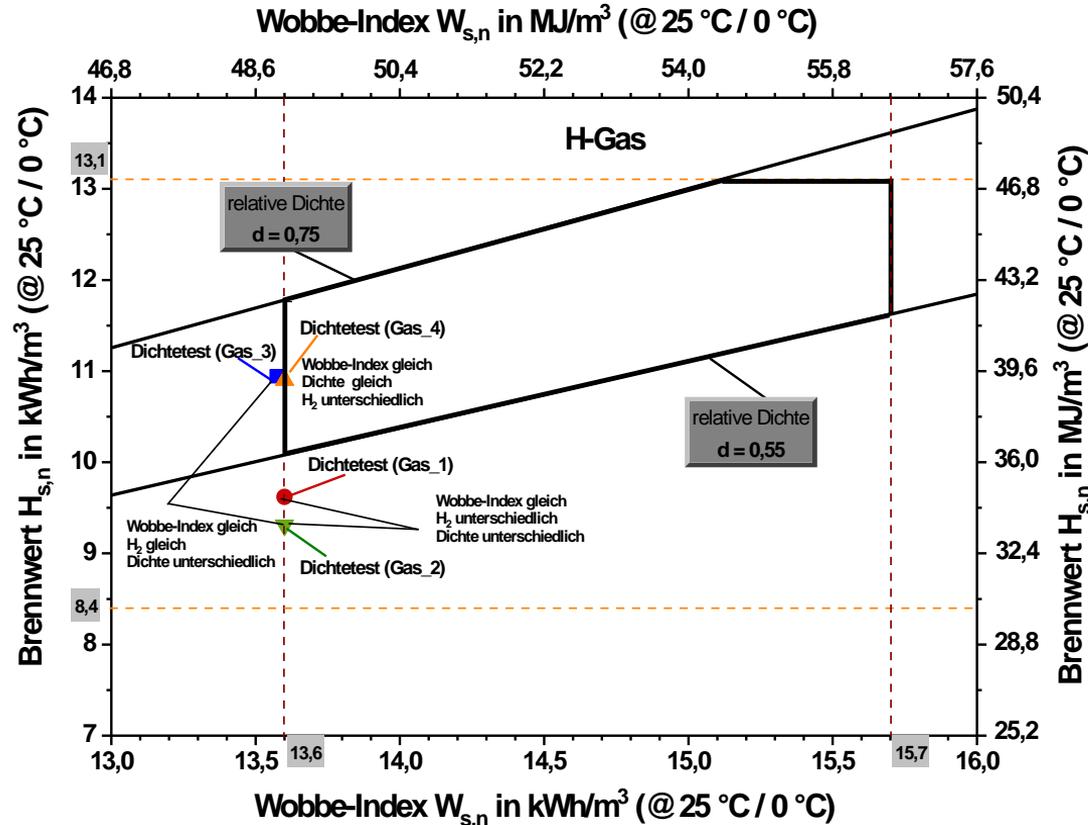
Randbedingungen:

$T_{\text{Luft}} = -15\text{ °C}$ $p_{\text{Gas}} = 20\text{ mbar}$

Worst-case-Start-Test

Das Gerät muss starten
und die Flamme muss
sich am Brenner
stabilisieren.

Einordnung der Gase für den „Dichtetest“ und der Einfluss der relativen Dichte



Grenzen DVGW Arbeitsblatt G 260 / März 2013

Die Testgase wurden so gemischt, dass die Effekte durch den H_2 -Anteil, den Wobbe-Index und die relative Dichte isoliert betrachtet werden können.

Gaskennwerte DIN EN ISO 6976
Referenzbedingungen:
(Verbrennung: 25 °C /
Volumen: 0 °C), $p = 1013,25$ mbar

	Dichtetest Gas_1	Dichtetest Gas_2	Dichtetest Gas_3	Dichtetest Gas_4
CH ₄	87,0	81,0	69,5	91,0
N ₂			10,0	
H ₂		10,0	10,0	
C ₃ H ₈			10,5	3,0
He	13,0	9,0		
CO ₂				6,0

Die ausgewählten Gasgeräte repräsentieren den Gasgerätebestand Deutschlands sehr gut, dazu wurde ein umfassender Abgleich mit Statistiken und Erkenntnissen aus laufenden Projekten (Forschung und Marktraumumstellung) vorgenommen.

- I_{2N}-Brennwertgeräte
- Brennwertgerät
- 1-stufiger Kessel
- 2 Geräte mit teilvormischenden Brennern
- mehrfach-Injektorbrenner, modulierend
- BHKW
- 300 kW-Kessel (Gebläse-Brenner)



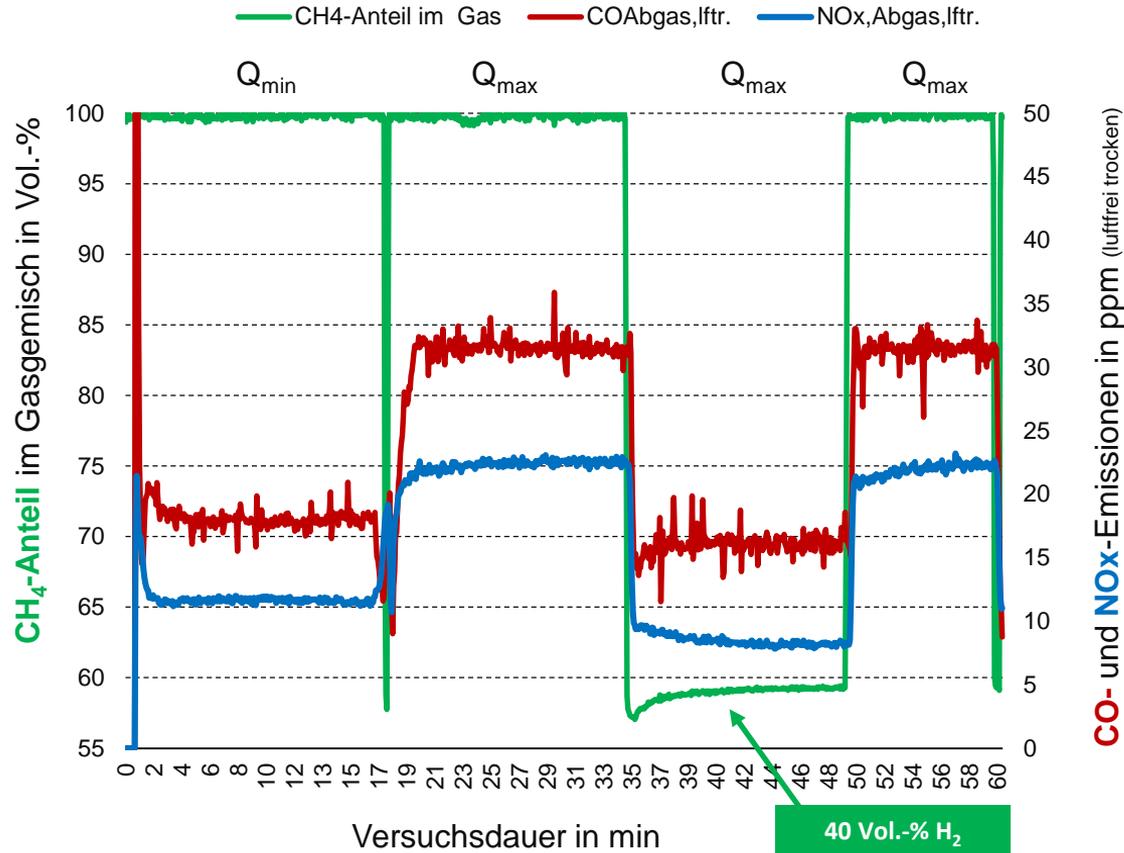
- Herd
- Gas-Grill
- Hockerkocher
- Brennstoffzelle
- Heizgerät
- Raumluftheizer



Gasgeräteuntersuchungen

Auswahl Ergebnisse Haushaltsanwendungen

DVGW-F&E-Projekt Roadmap Gas 2050 | Gasbrennwertgerät mit Verbrennungsregelung beim Gaswechsel bis zu 40 Vol.-% H₂



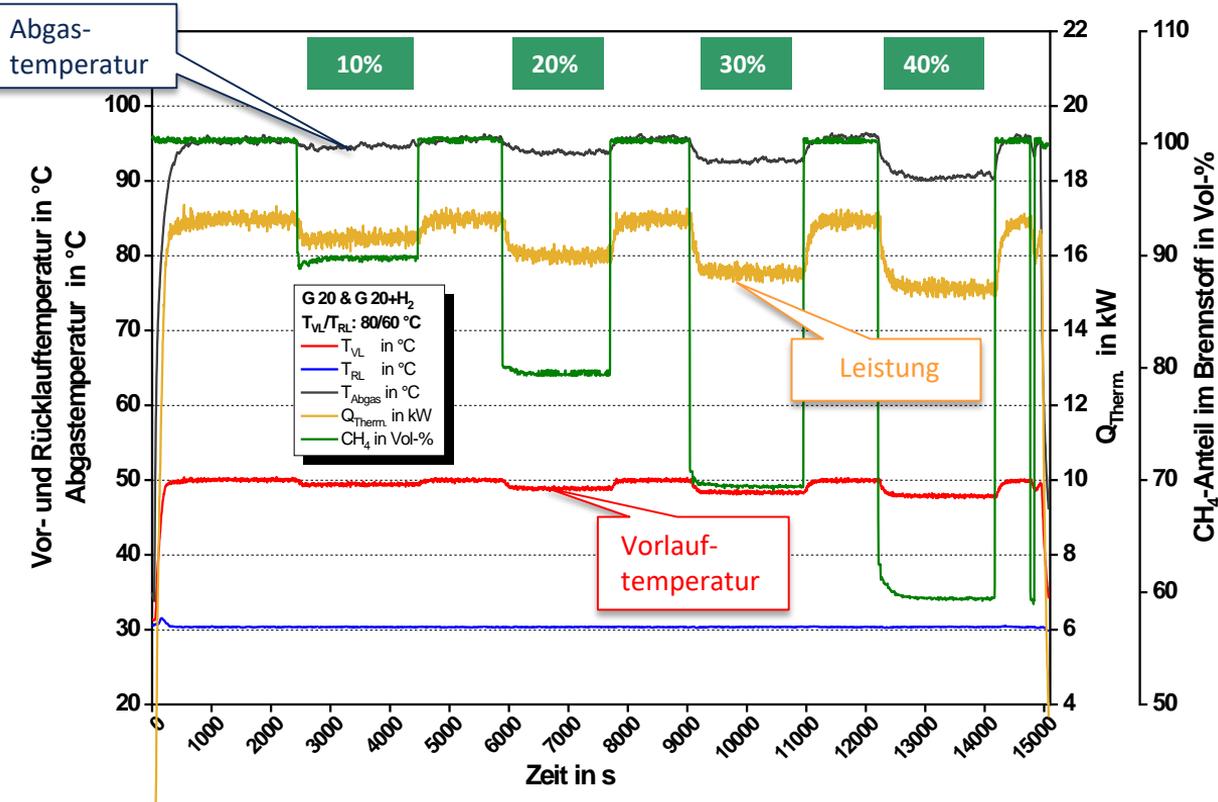
Gasbrennwertgerät mit Verbrennungsregelung:

➔ **Keine Einschränkungen bei der Betriebssicherheit mit bis zu 40 Vol.-% H₂**

- bei schnellem Gaswechsel von G 20 auf das CH₄-/H₂-Gemisch
- bei Unterschreiten der unteren Grenze für die relative Dichte mit $d = 0,5$ (Untergrenze zurzeit bei $d = 0,55$)

DVGW-F&E-Projekt Roadmap Gas 2050 | Einstufiger Kessel mit Injektorbrenner beim Gaswechsel bis zu 40 Vol.-% H₂

Test mit Gaswechsel, Beispiel: G 20 mit H₂



Einstufiger Kessel:

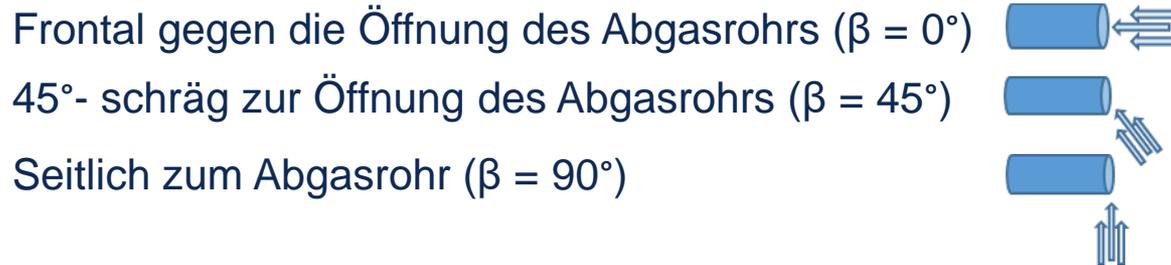
→ Keine Einschränkungen bei der Betriebssicherheit mit bis zu 40 Vol.-% H₂

- bei schnellem Gaswechsel von G 20 auf das CH₄-/H₂-Gemisch
- bei Unterschreiten der unteren Grenze für die relative Dichte mit $d = 0,5$ (Untergrenze aktuell $d=0,55$)

— **Aber ab 30 Vol.-% akustische Effekte**

Windtests nach DIN 15502

Unter den folgenden Prüfbedingungen musste die Flamme stabil brennen bzw. das Gerät in einen sicheren Zustand fahren:



Diese Positionen wurden jeweils mit dem Gasgemisch aus G 20 + 40 Vol.% H₂, minimaler und maximaler Wärmebelastung der Geräte und den Geschwindigkeiten von 1 m/s und 12,5 m/s getestet.

Die Messungen zeigen keine Beeinflussung, die auf H₂-Anteile zurückzuführen sind.

Gasgeräteuntersuchungen

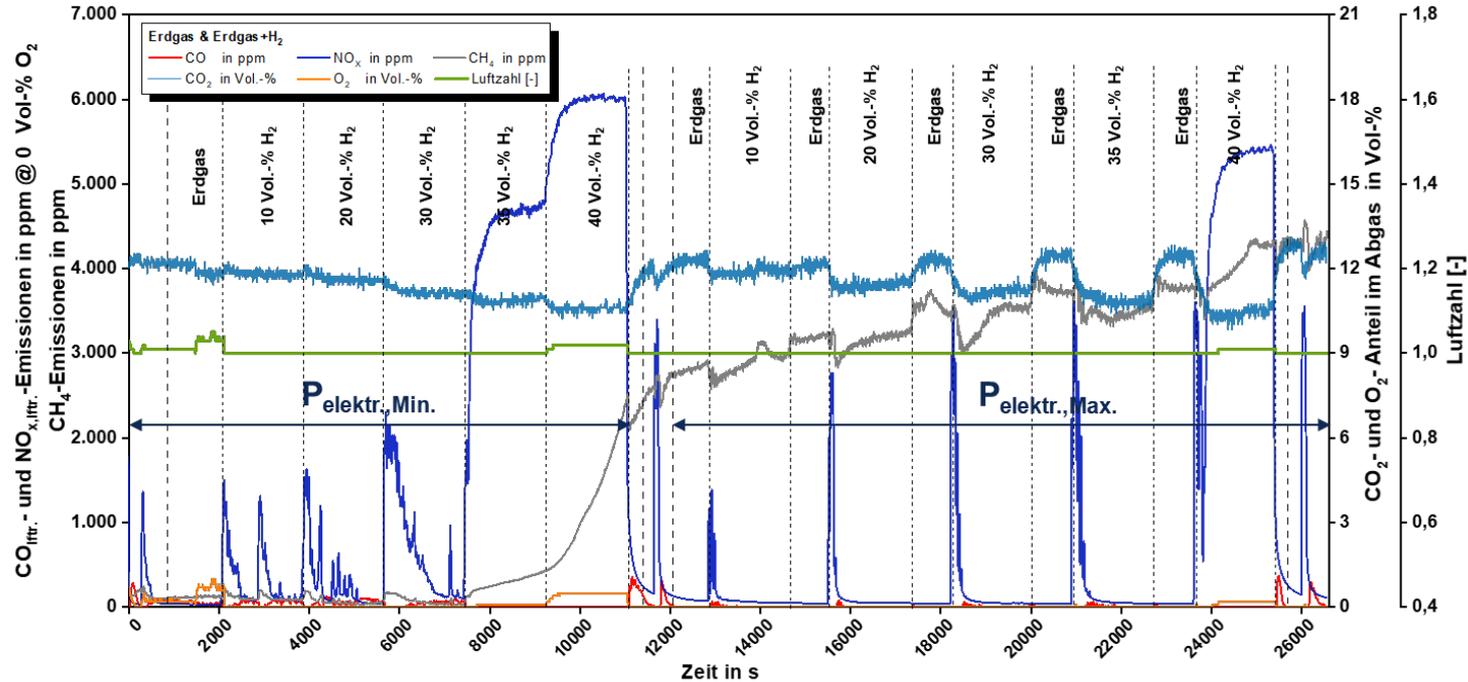
Fazit zu den bisherigen Untersuchungen



- Die Ergebnisse der durchgeführten Testreihen im Labor zeigen, dass die Geräte in gewartetem Werkzustand mit einem Anteil von 20 Vol.-% H₂ im Gasgemisch ohne Einschränkung der Betriebssicherheit funktionieren.
- Die Grenze der relativen Dichte könnte nach derzeitigem Untersuchungsstand auf 0,45 abgesenkt werden.
- Die finale Validierung erfolgt zurzeit im DVGW-F&E-Projekt H2-20 (Einspeisung von bis zu 20 Vol.-% H₂ in ein Verteilnetz)
- Ab ca. 2025 können Anwendungen für 100 % H₂ verfügbar sein

Industrieanwendungen

DVGW-F&E-Projekt Roadmap Gas 2050 | Testmessung an einem BHKW



Erklärung des Herstellers zu den hohen NO_x und C_xH_y Werten: Bei der Messung wird sichtbar, dass der Dreibege-Katalysator bei zu hoher H₂-Beimischung aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Somit können NO_x und Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) nicht mehr reduziert werden, da das notwendige CO zum Abbau fehlt.

Testmessung an einem 300 kW-Kessel

	Leistung	CO _{lfr.}	NO _{x,lfr.}	CO _{2,Gesamt}	O _{2,Gesamt}	Luftzahl λ
	in %	in ppm	in ppm	in Vol.-%	in Vol.-%	[-]
Erdgas	19	4,8	9,85	9,14	4,98	1,31
90% Erdgas/ 10% H2	19	4,9	7,65	8,46	5,70	1,37
80% Erdgas/ 20% H2	19	5,1	5,61	7,67	6,52	1,45
70% Erdgas/ 30% H2	19	5,6	4,76	7,34	6,89	1,49
60% Erdgas/ 40% H2	19	5,7	3,71	6,76	7,41	1,55
Erdgas	100	24,8	19,7	9,12	5,02	1,31
90% Erdgas/ 10% H2	100	18,6	15,6	8,49	5,69	1,37
80% Erdgas/ 20% H2	100	13,1	11,4	7,69	6,48	1,45
70% Erdgas/ 30% H2	100	11,6	10,3	7,41	6,75	1,47
60% Erdgas/ 40% H2	100	9,1	8,9	6,79	7,31	1,53

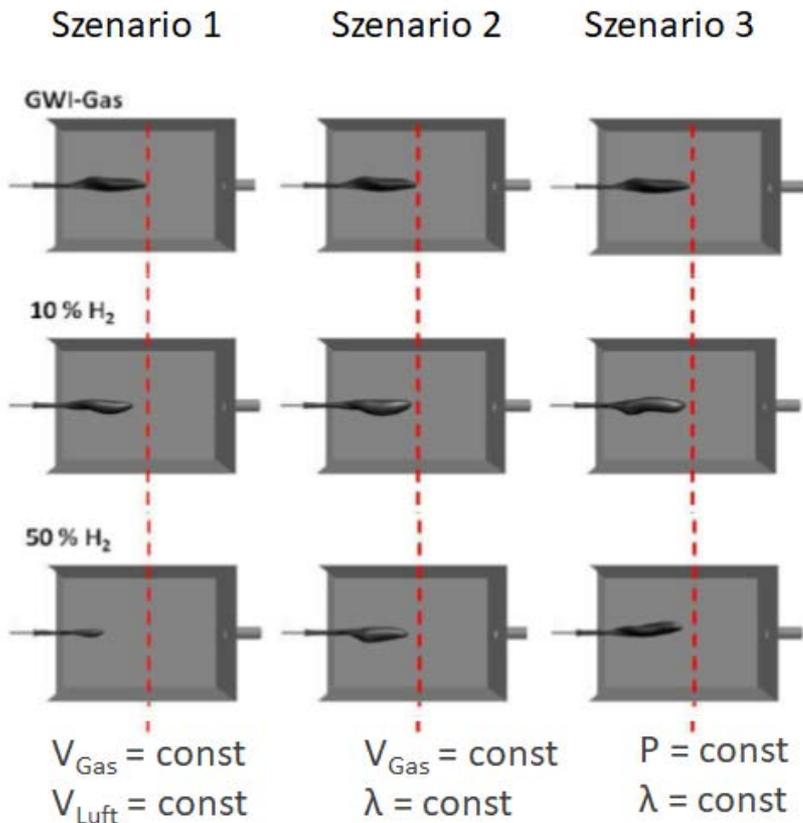
Gebläse-Brenner

➔ Funktionsfähig bis zu 40 Vol.-% H₂

- Die Luftzahl steigt auch bei Q_{min} nicht so stark an, dass die CO-Emissionen signifikant größer sind

abgeleitete Größen

Auswirkungen verschiedener H₂-Gehalte und Regelungsstrategien auf die Flammenform bei einem nicht-vorgemischten Industriebrenner



Im Szenario 1 bleiben die Volumenströme für Brenngas und Luft konstant, d. h. es handelt sich um ein komplett unreguliertes System.

Im Szenario 2 liegt zumindest eine Luftzahlregelung (z. B. anhand einer Rest-O₂-Messung im Abgas) vor.

Im Szenario 3 werden die Volumenströme von Brenngas und Luft unabhängig voneinander geregelt, d. h. Brennerleistung und Luftzahl bleiben unabhängig vom H₂-Gehalt des Brenngases konstant.

Dargestellt ist die Flammenform für den Betriebspunkt anhand einer CO-Isosfläche.

Die Ergebnisse zeigen: 20 Vol.-% H₂ sind im Industriebereich möglich unter entsprechenden Voraussetzungen



- Im Gewerbe- und Industriebereich sind die Anwendungen vielschichtiger.
- Hier wurde gezeigt, dass durch Kompensationsmaßnahmen/Regelungssysteme sowohl das Vorhandensein des Wasserstoffs als auch Schwankungen technisch begegnet werden kann, was allerdings mit Investitionen einhergeht.
- Die Untersuchungen zeigen, dass bei Industrieanwendungen - bis auf wenige Ausnahmen - eine Zumischungen bis 20 Vol.-% möglich ist.
- Auswirkungen auf die Produktqualität müssen noch untersucht werden.
- Ab 2030 können die ersten 100 Vol.-% H₂-Anwendungen verfügbar sein, aktuelle FuE-Vorhaben unterstützen dies.

Installationen

Untersuchungen zu Materialien und Dichtheit von Verbindern

Unter Berücksichtigung umfangreicher Datenwerke gab es für den Druck- und Temperaturbereich aus der TRGI keine Kontraindikation bezüglich der H₂-Reaktivitäten von metallischen Werkstoffen, Elastomeren oder Kunststoffen.

Eine Degradation von Kunststoffen oder Elastomeren durch Kontakt zu H₂ kann ebenfalls für die Druck- und Temperaturbereiche der TRGI ausgeschlossen werden. Es gibt aber durchaus einschränkende Verwendungsempfehlungen für manche Werkstoffe, die aber im Wesentlichen durch die Permeationseigenschaften von H₂ in den betreffenden Werkstoffen gegeben sind.

„Haupteinsatzgebiete von Elastomeren sind Dichtungen, wie z. B. O-Ringe oder Flachdichtungen, und Druckregelmembranen. Um ein Gefühl für die relativen Gasaustritte von H₂ bzw. CH₄ aufgrund von Permeation zu erhalten, sei eine beispielhafte Rechnung für einen O-Ring aus NBR mit der Shore-Härte 70 bei 293 K gemäß der Tabelle 2-3 gegeben, der vereinfacht angenommen quadratisch verpresst in seiner O-Ringnut sitzt. Die Stärke betrage 0,2 cm, die Dichtfläche sei mit 1 cm² und die Partialdruckdifferenz mit 1038,15 hPa (1013,25 hPa + 25 hPa Gasdruck, Annahme jeweils 100 % H₂ bzw. CH₄) angesetzt, dann würden pro Tag an dieser Dichtfläche **ca. $7 \cdot 10^{-4}$ cm³ H₂ statt ungefähr ca. $1,1 \cdot 10^{-4}$ cm³ CH₄** aufgrund von Permeation austreten. Bei 10 Vol.-% H₂ in CH₄ wären es eine Permeationsrate von $1,7 \cdot 10^{-4}$ cm³ pro Tag.“

Prüfung von Gewinde-, Press- und Schiebehülsenverbindern, Gassteckdosen/-Schlauchleitungen

- Die Leckageraten fallen wie bei den gezielt undichten Verbindungen für das Prüfgas H_2 erkennbar ca. 2- bis 3-fach höher aus als bei Stickstoff.
- Technisch dichte Systeme für Prüfluft bleiben auch bei der technisch dichten Einstufung, wenn eine Wasserstoffzumischung bis 10 Vol.-% bzw. sogar 100 % erfolgt.

Dementsprechend kann zusammenfassend die Aussage getroffen werden, dass alle geprüften Verbinder für die Nutzung mit beliebigen Wasserstoffanteilen im Erdgas geeignet sind.

Installationen

Gasströmungswächter

Auszug: Installationen, Gasströmungswächter (GS)-Prüfstand am Gas- und Wärme-Institut



Laminar-Flow-Element am GS-Prüfstand



Die Komponenten des GS-Prüfstandes:

Gasseitig

- Festanschluss: Druckluft aus der hauseigene Versorgung. Hiermit kann nach DIN 30652-1 (bzw. „ehemals“ DVGW VP 305-1) geprüft werden.
- Flaschenanschluss: G20, G20/H₂-Gemische und H₂ als Testgase
- Flaschenanschluss: Stickstoff zum Spülen der Leitung aus Sicherheitsgründen.

Messtechnik

- Zur Volumenstrommessung dient ein Laminar-Flow-Element (LFE) vom Typ Meriam Process Technologies 50MH10-01.25
- In Kombination mit dem LFE wird ein Differenzdruck-Manometer Halstrup Walcher P26 genutzt.
- Zur Temperaturmessung wird ein Messgerät mit Pt100 Temperatursensor verwendet.

Vergleich der Schließfaktoren im stationären Betrieb (Mittelwerte) (Betriebsdruck $p_{\min} = 15 \text{ mbar}$)

						Schließkriterien		Schließfaktoren f_s im stationären Betrieb						
		Nennweite DN	GS-Typ	p Hersteller	$\Delta p \leq$	$f_{s,\min}$	$f_{s,\max}$	$f_{s,\text{Luft, berechnet}}$	$f_{s,G 20, berechnet}$	$f_{s,G 20+10\%H2, berechnet}$	$f_{s,G 20+20\%H2, berechnet}$	$f_{s,G 20+30\%H2, berechnet}$	$f_{s,G 20+50\%H2, berechnet}$	$f_{s,H2, berechnet}$
		DN		in mbar	in mbar	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Hersteller A Muster 1	DN25 2,5	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,370	1,388	1,320	1,318	1,378	1,305	1,436
	DN25 4,0	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,325	1,311	1,321	1,318	1,310	1,315	1,352
	DN32 10,0	32	K	15	0,5	1,3	1,45	1,381	1,360	1,387	1,396	1,354	1,336	1,400
Hersteller A Muster 2	DN25 2,5	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,345	1,341	1,346	1,335	1,328	1,345	1,404
	DN25 4,0	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,332	1,318	1,308	1,304	1,302	1,311	1,372
	DN32 10	32	K	15	0,5	1,3	1,45	1,378	1,363	1,363	1,329	1,355	1,345	1,387
Hersteller B Muster 1	DN25 2,5	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,354	1,406	1,402	1,429	1,426	1,408	1,504
	DN25 4,0	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,369	1,378	1,383	1,398	1,368	1,401	1,483
	DN32 10,0	32	K	15	0,5	1,3	1,45	1,418	1,389	1,422	1,433	1,420	1,382	1,501
Hersteller B Muster 2	DN25 2,5	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,422	1,407	1,415	1,430	1,435	1,409	1,509
	DN25 4,0	25	K	15	0,5	1,3	1,45	1,386	1,368	1,417	1,406	1,400	1,433	1,478
	DN32 10	32	K	15	0,5	1,3	1,45	1,442	1,438	1,439	1,437	1,439	1,441	1,516

$$f_s = \frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_{\text{Nenn}}}$$

\dot{V}_s = Schließvolumenstrom in m^3/h

\dot{V}_{Nenn} = Nennvolumenstrom in m^3/h

Dichtheit von Bauteilen, Komponenten

Strömungsformen bei Leckagen:

laminar-viskose Strömung: $q_L \sim 1/\eta$, $Kn < 10$

η dyn. Viskosität, M Molekülmasse

molekulare Strömung: $q_L \sim M^{1/2}$, $Kn \geq 10$

Kn : Knudsen-Zahl

Datenbeispiel:

Mit einer charakteristischen Länge von ca. 1 mm => laminar-viskose Strömung

Mit einer charakteristischen Länge von ca. 1 μm => molekulare Strömung

Datenbeispiel:

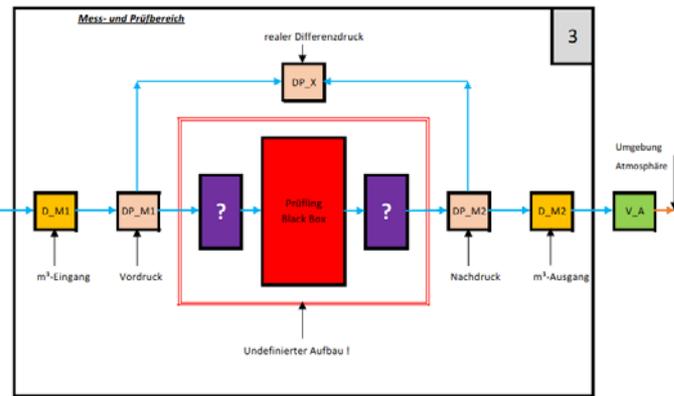
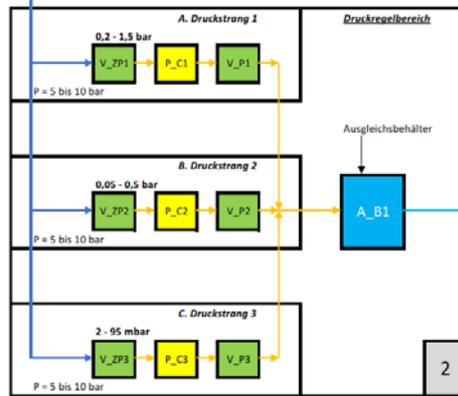
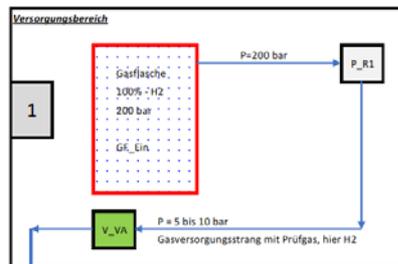
Bei molekularer Strömung ist der H_2 -Leckage-Volumenstrom ca. 3,8 mal so groß wie bei Luft

Bei laminar Strömung ist der H_2 -Leckage-Volumenstrom ca. 2 mal so groß wie bei Luft

Dichtigkeits-Teststand für Luft, G 20, Gemische und reinen H₂-Betrieb

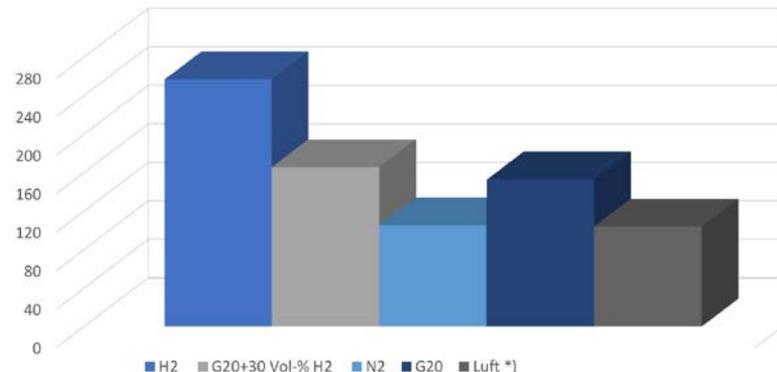
Ziel der Untersuchungen:

Durch die Messung mit Wasserstoff könnten die Umrechnungen von Luft als Prüfgas entfallen bzw. die Faktoren verifiziert werden.



Leckage-Raten bei 50 mbar

	Medium	Messergebnisse zu den Prüfleckdurchmessern			
		Prüfleck Ø 0,2 mm		Prüfleck Ø 0,3 mm	
		[Nml]	Verhältnis Luft	[Nml]	Verhältnis Luft
1.	H ₂	256,9	247,5%	3390,0	294,8%
2.	G20+30 Vol-% H ₂	165,5	159,4%	1715,2	149,1%
3.	N ₂	105,3	101,4%	1160,0	100,9%
4.	G20	152,8	147,2%	1690,0	147,0%
5.	Luft *)	103,8	100,0%	1150,0	100,0%



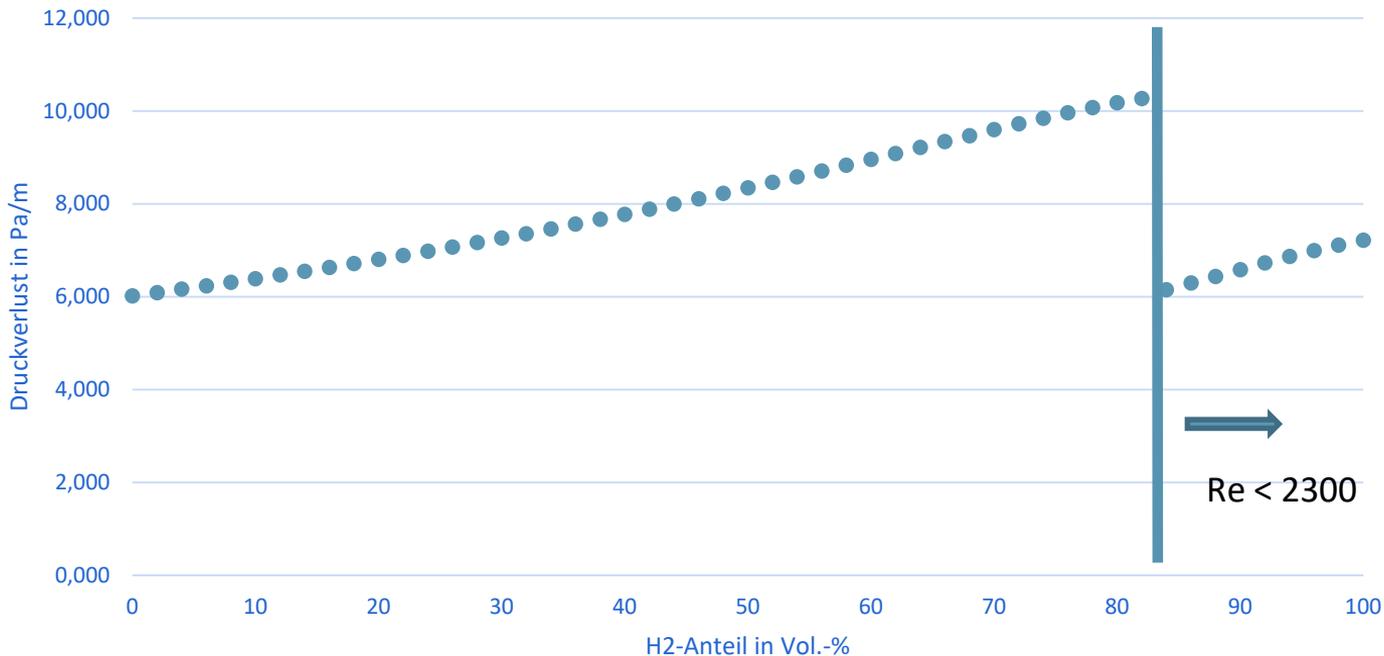
Volumen in ml in 10 Minuten,
Prüfdruck 50 mbar, Prüfleck Ø 0,2
mm

Hinweis: *) Synthetische Luft

1. H₂ - Wasserstoff 5.0 (Reinheit in % $\geq 99,999$)
2. G20+30 Vol-% H₂ - Wasserstoff 30,06 MOL. %
3. N₂ - Stickstoff
4. G20 - CH₄ Methan 2.5 (Reinheit in % $\geq 99,5$)
5. Synthetische Luft 5.0 (Hauptbestandteile: Sauerstoff 20,5 \pm 0,5 Vol.-%, Rest Stickstoff)

Der Druckverlust bei 100 % H₂ entspricht nach dem verwendeten Verfahren etwa dem von Gas mit einem 20 Vol.-%-H₂-Anteil.

Verifizierung!



Installationen

Fazit zu den bisherigen Untersuchungen



Die Ergebnisse zeigen: Die Installationen im TRGI-Bereich tolerieren eine Beimischung von 20 Vol.-% H₂



- Die Ergebnisse der durchgeführten Testreihen zeigen, dass die Bauteile im Bereich der TRGI mit einem Anteil von 20 Vol.-% H₂ im Gasgemisch funktionieren.
- Das aktive Sicherheitskonzept mit dem Gasströmungswächter funktioniert ohne Einschränkungen bis zu einem Anteil von mindestens 20 Vol.-% H₂ im Gasgemisch.
 - Für Metalle, Kunststoffe, Elastomere im TRGI-Bereich bestehen keine Kontraindikationen in Sachen Beständigkeit, die Permeation ist nur wenig größer
 - Technisch dichte Systeme für Prüfluft bleiben auch bei der technisch dichten Einstufung, wenn eine Wasserstoffzumischung bis 100 % erfolgt. Bei Undichtigkeiten ist die Leckage-Rate um bis zu 4 Mal größer.
 - Berechnungen nach TRGI zeigen, dass die Leitungsdimensionierung auch für 100 % Wasserstoff ausreichend sein könnte. Dies wird noch in der Praxis überprüft, ebenso die Schutzziele.

Gesamtfazit



- **Alle Ergebnisse der bisher durchgeführten Testreihen bestätigen, dass der Gerätebestand und Neugeräte sowie Bauteile im Bereich der TRGI mit einem Anteil von 20 Vol.-% H₂ im Gasgemisch funktionieren.**
- **Die relative Dichte könnte auf 0,45 abgesenkt werden.**
- **Anwendungen für 100 Vol.-% H₂ sind derzeit in der Entwicklung.**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Frank Burmeister

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

Hafenstrasse 101 | 45356 Essen

frank.burmeister@gwi-essen.de