

# Roadmap Gas 2050 – TP3

## H<sub>2</sub>-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: H<sub>2</sub>-ready **mobile Anwendungen**

D3.2 Bewertungskriterien und **Versuchsprogramm** zur H<sub>2</sub>-Verträglichkeit von Gasanwendungen

D3.3 Bewertung der **H<sub>2</sub>-Verträglichkeit von Gasanwendungen** bis zu 50 Vol.-%

D3.4 **Kompensationsstrategien** für Gasanwendungen bei H<sub>2</sub>-Zumischung

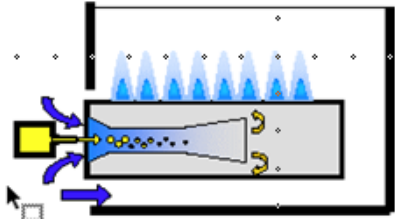
D3.5 Bewertung der **H<sub>2</sub>-Verträglichkeit von Gasinstallationen** bis zu 100 Vol.-%

- 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 H<sub>2</sub>-Anteil im Gas die Anwendungstechnik beeinflussen?

## H<sub>2</sub>-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

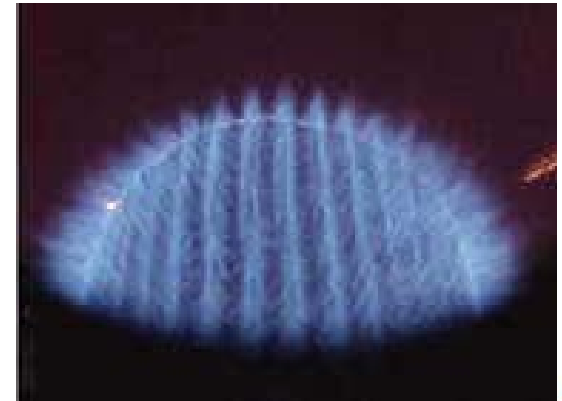
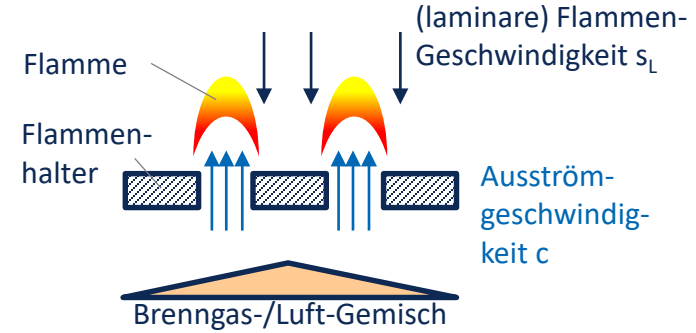
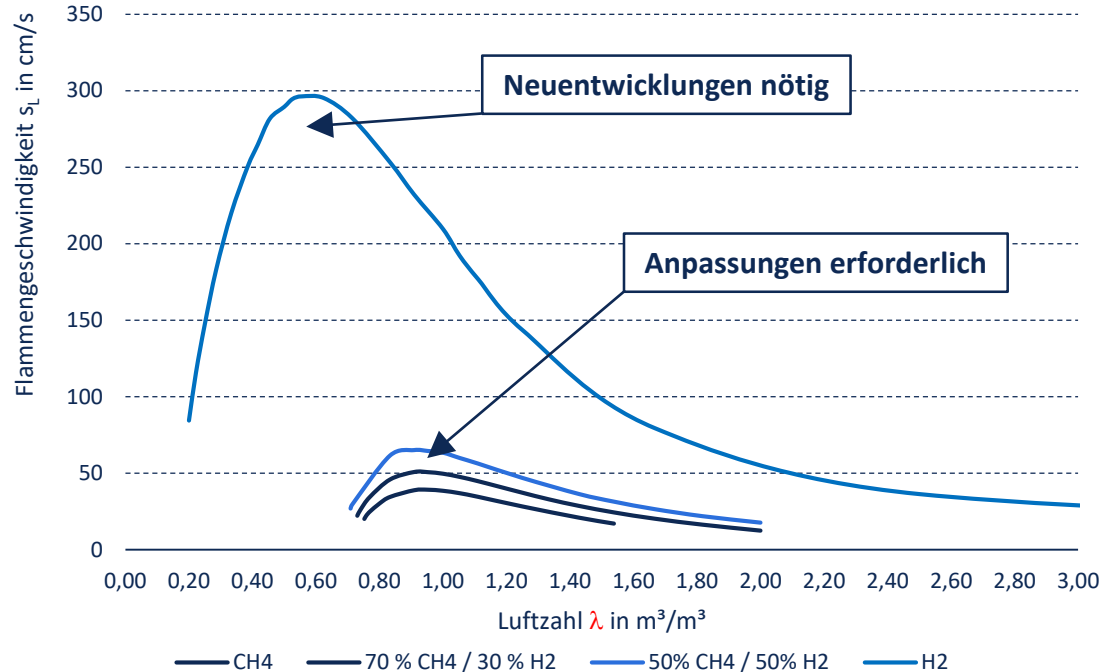
## Es sind zu unterscheiden:

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

➤ H<sub>2</sub> hat einen Wobbe-Index entsprechend der **unteren Grenze** des H-Gas-Bandes.

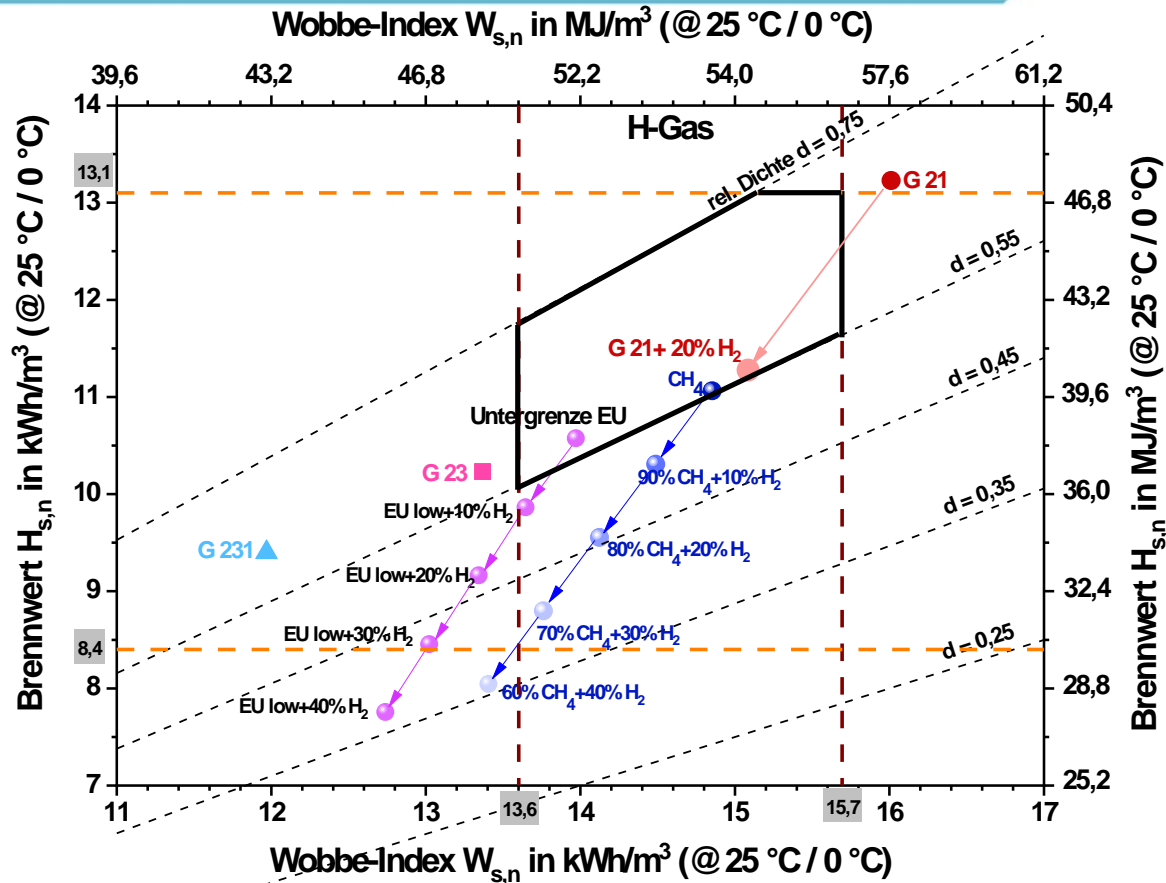
# Flammengeschwindigkeit $s_L$ für $\text{CH}_4$ , $\text{H}_2$ und $\text{CH}_4/\text{H}_2$ -Gemische

Die (laminare) Flammengeschwindigkeit im  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ -Gemisch ändert sich wesentlich erst bei sehr großen  $\text{H}_2$ -Anteilen.



# Gasgeräteuntersuchungen

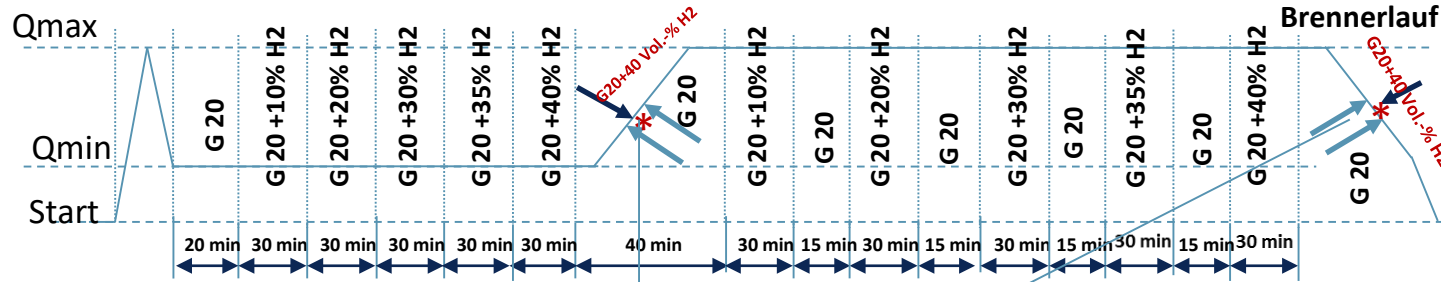
## Messprogramm und Methodik



- **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 + H<sub>2</sub> (10, 20, 30 und 40%)

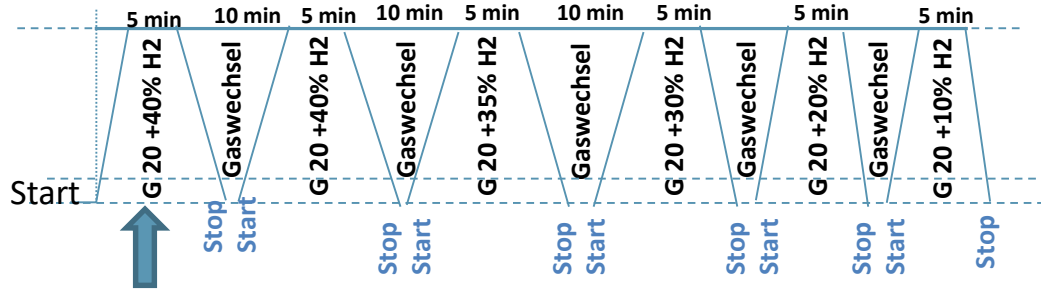
G 231 + H<sub>2</sub> (10, 20, 30 und 40%)

G 23 + H<sub>2</sub> (10, 20, 30 und 40%)

(EU-Low nur, wenn G23 Probleme zeigt)

EU-Low+H<sub>2</sub> (10, 20, 30 und 40%)

# Start- und Stop-Messung



Kaltstart mit gekühlter  
Verbrennungsluft

(Kaltstart nur G 20 + 40 Vol.-% H<sub>2</sub>)

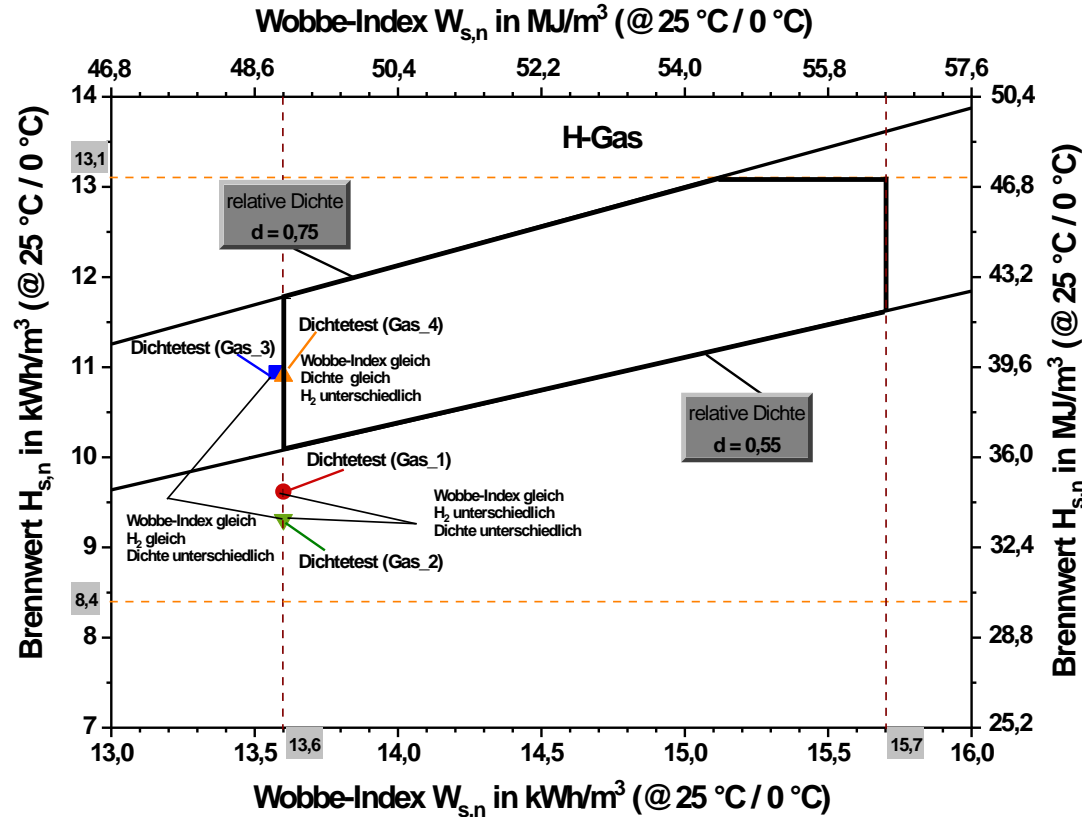
Randbedingungen:

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

## 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 <sub>4</sub>	87,0	81,0	69,5	91,0
N <sub>2</sub>			10,0	
H <sub>2</sub>		10,0	10,0	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>			10,5	3,0
He	13,0	9,0		
CO <sub>2</sub>				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<sub>2N</sub>-Brennwertgeräte
- Brennwertgerät
- 1-stufiger Kessel
- 2 Geräte mit teilvormischenden Brennern
- mehrfach-Injektorbrenner, modulierend
- BHKW
- 300 kW-Kessel (Gebläse-Brenner)



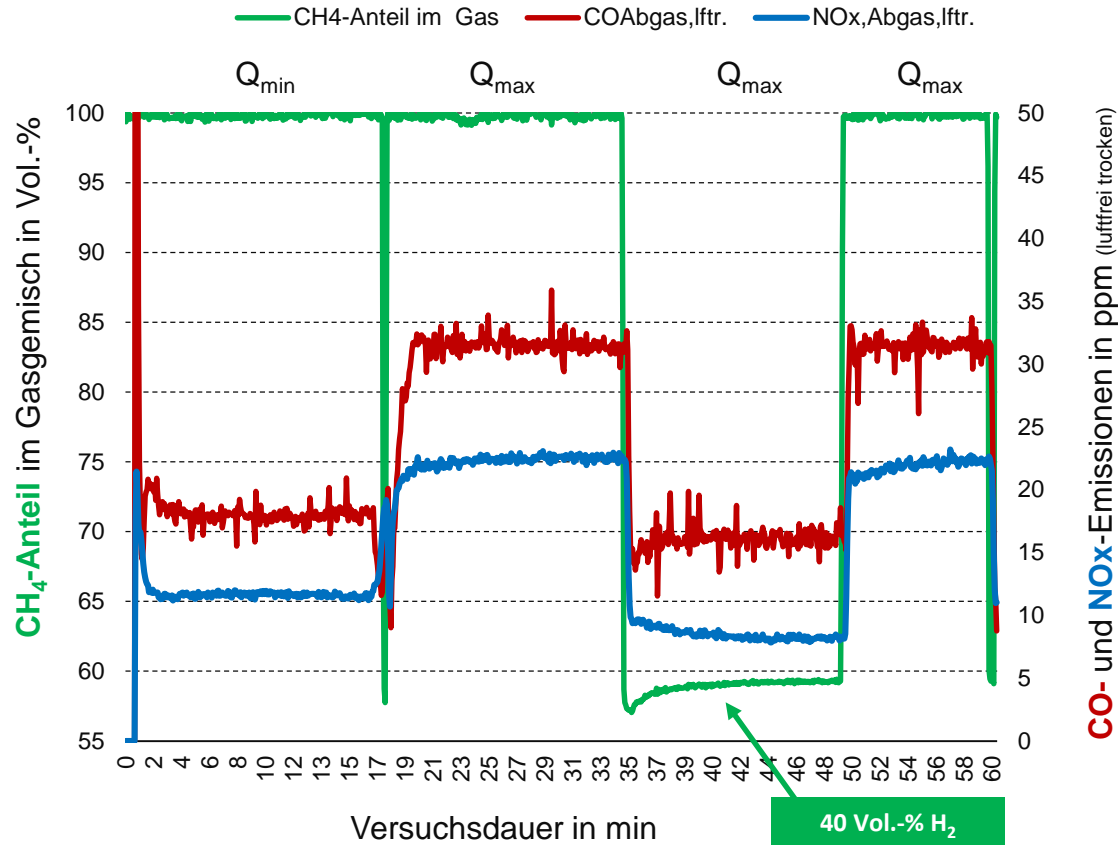
- Herd
- Gas-Grill
- Hockerkocher
- Brennstoffzelle
- Heizgerät
- Raumluftheizer



# Gasgeräteuntersuchungen

## Auswahl Ergebnisse Haushaltsanwendungen

# DVGW-F&E-Projekt Roadmap Gas 2050 | Gasbrennwertgerät mit Verbrennungsregelung beim Gaswechsel bis zu 40 Vol.-% H<sub>2</sub>



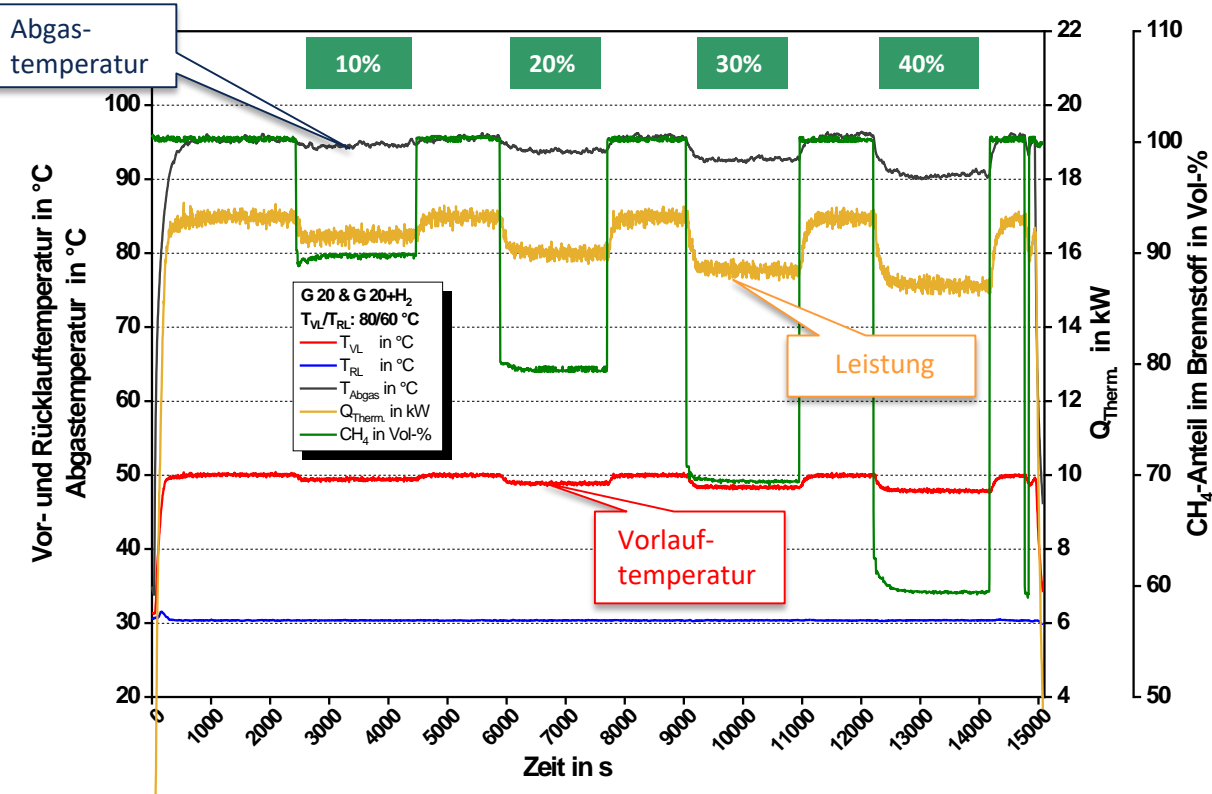
## Gasbrennwertgerät mit Verbrennungsregelung:

➔ **Keine Einschränkungen bei der Betriebssicherheit mit bis zu 40 Vol.-% H<sub>2</sub>**

- bei schnellem Gaswechsel von G 20 auf das CH<sub>4</sub>-/H<sub>2</sub>-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.-% H<sub>2</sub>

## Test mit Gaswechsel, Beispiel: G 20 mit H<sub>2</sub>



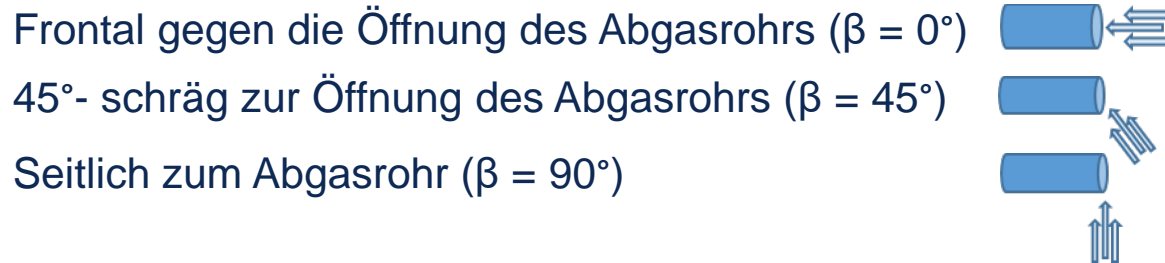
### Einstufiger Kessel:

→ Keine Einschränkungen bei der Betriebssicherheit mit bis zu 40 Vol.-% H<sub>2</sub>

- bei schnellem Gaswechsel von G 20 auf das CH<sub>4</sub>-/H<sub>2</sub>-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**

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.% H<sub>2</sub>, 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 H<sub>2</sub>-Anteile zurückzuführen sind.**



# Gasgeräteuntersuchungen

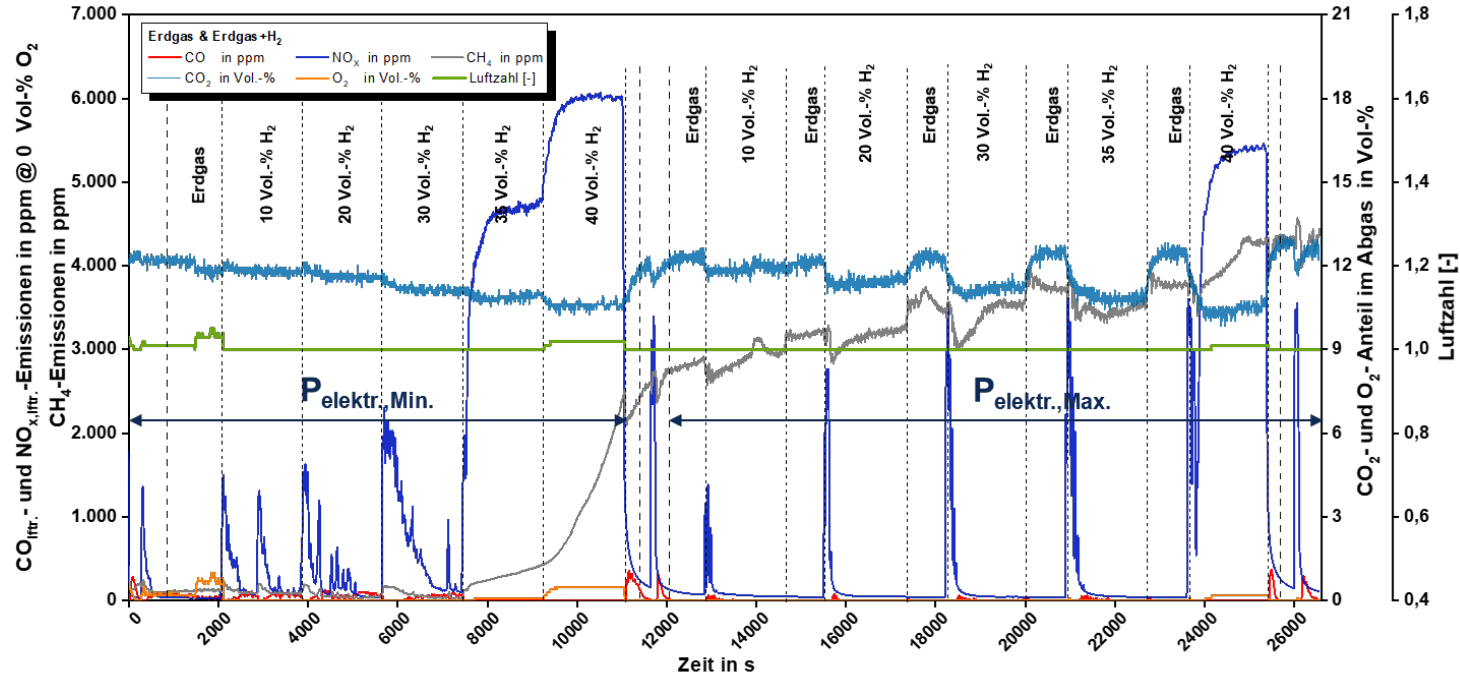
## Fazit zu den bisherigen Untersuchungen



- Die Ergebnisse der durchgeführten Testreihen im Labor zeigen, dass die Geräte in gewartetem Werkzustand mit einem Anteil von 20 Vol.-% H<sub>2</sub> 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.-% H<sub>2</sub> in ein Verteilnetz)
- Ab ca. 2025 können Anwendungen für 100 % H<sub>2</sub> verfügbar sein

# Industrieanwendungen

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



**Erklärung des Herstellers zu den hohen NO<sub>x</sub> und C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> Werten:** Bei der Messung wird sichtbar, dass der Dreibege-Katalysator bei zu hoher H<sub>2</sub>-Beimischung aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Somit können NO<sub>x</sub> und Kohlenwasserstoffe (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) nicht mehr reduziert werden, da das notwendige CO zum Abbau fehlt.

# Testmessung an einem 300 kW-Kessel

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

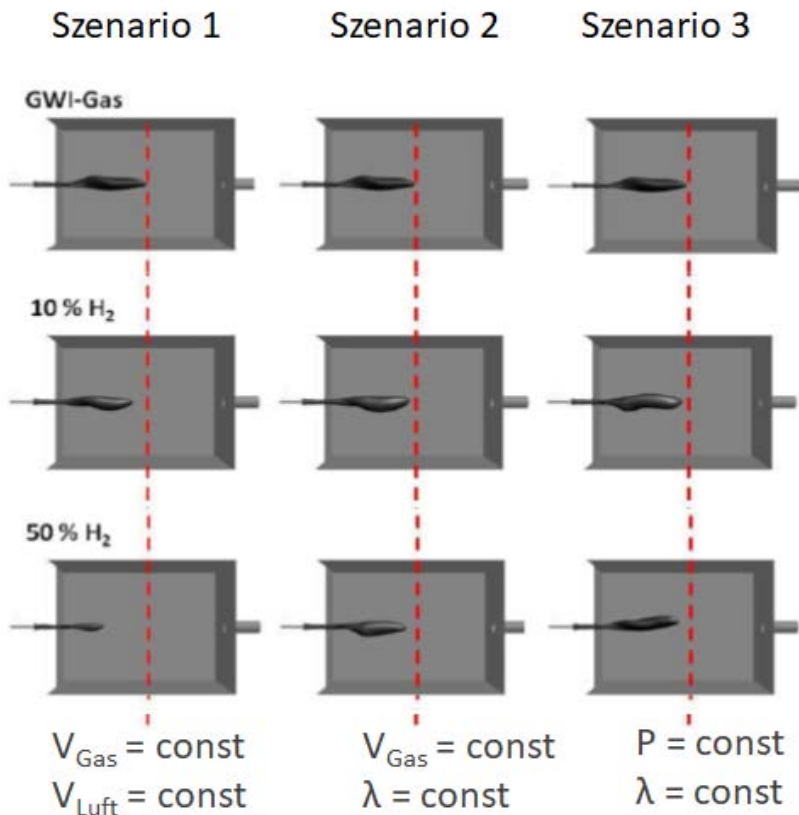
## Gebläse-Brenner

➔ Funktionsfähig bis zu 40 Vol.-% H<sub>2</sub>

- Die Luftzahl steigt auch bei Q<sub>min</sub> nicht so stark an, dass die CO-Emissionen signifikant größer sind

abgeleitete Größen

# Auswirkungen verschiedener H<sub>2</sub>-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-O<sub>2</sub>-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 H<sub>2</sub>-Gehalt des Brenngases konstant.

## Die Ergebnisse zeigen: 20 Vol.-% H<sub>2</sub> 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.-% H<sub>2</sub>-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 H<sub>2</sub>-Reaktivitäten von metallischen Werkstoffen, Elastomeren oder Kunststoffen.

Eine Degradation von Kunststoffen oder Elastomeren durch Kontakt zu H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub> bzw. CH<sub>4</sub> 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 cm<sup>2</sup> und die Partialdruckdifferenz mit 1038,15 hPa (1013,25 hPa + 25 hPa Gasdruck, Annahme jeweils 100 % H<sub>2</sub> bzw. CH<sub>4</sub>) angesetzt, dann würden pro Tag an dieser Dichtfläche **ca.  $7 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> statt ungefähr ca.  $1,1 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>** aufgrund von Permeation austreten. Bei 10 Vol.-% H<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub> wären es eine Permeationsrate von  $1,7 \cdot 10^{-4}$  cm<sup>3</sup> pro Tag.“

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

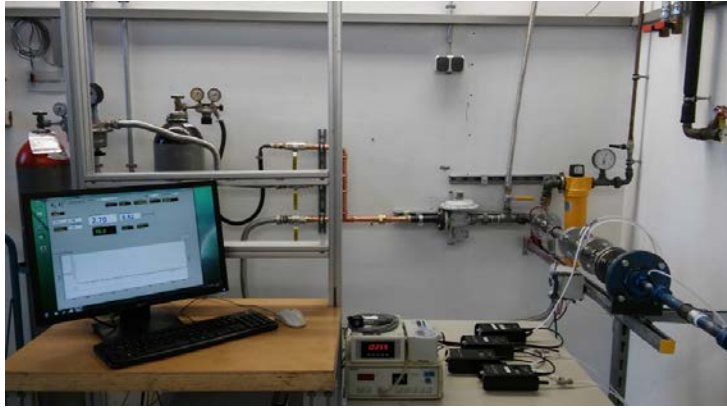
- Die Leckageraten fallen wie bei den gezielt undichten Verbindungen für das Prüfgas  $H_2$  erkennbar ca. 2- bis 3-fach höher aus als bei Stickstoff.
- Technisch dichte Systeme für Prüfluft bleiben auch bei der technisch dichten Einstufung, wenn eine Wasserstoffzumischung bis 10 Vol.-% bzw. sogar 100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

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

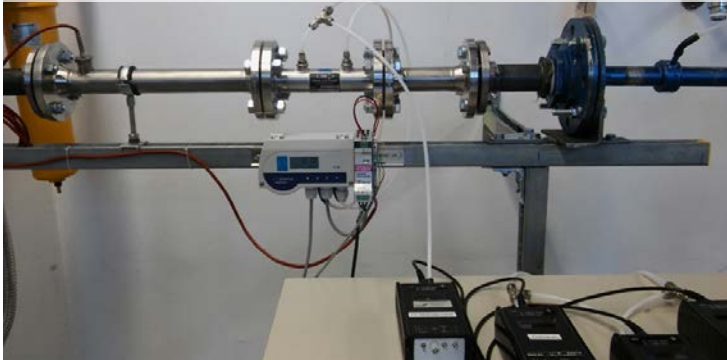
# Installationen

## 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/H<sub>2</sub>-Gemische und H<sub>2</sub> 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  $\text{m}^3/\text{h}$

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

Strömungsformen bei Leckagen:

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

$\eta$  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  $\mu\text{m}$  => molekulare Strömung

## Datenbeispiel:

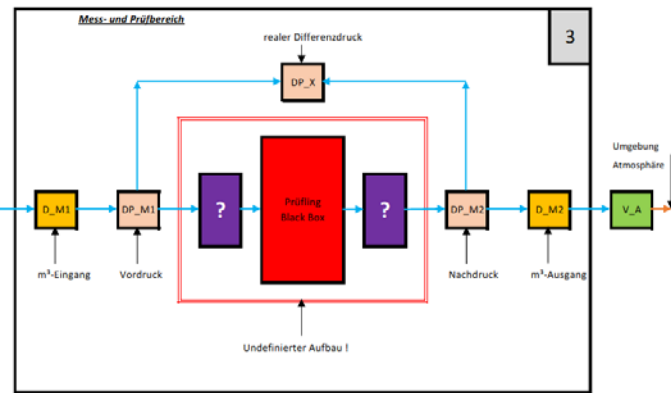
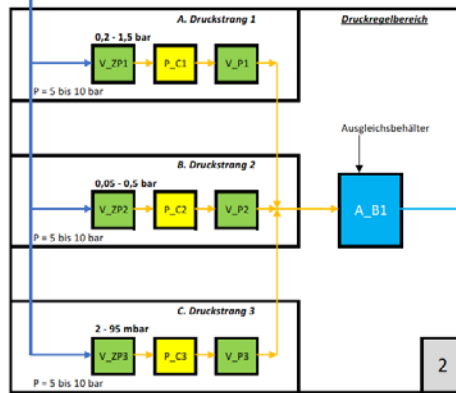
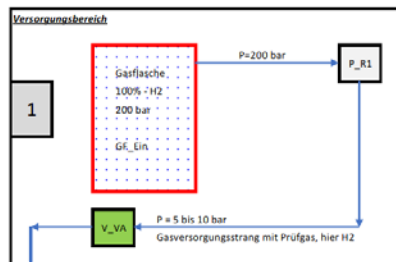
Bei molekularer Strömung ist der  $\text{H}_2$ -Leckage-Volumenstrom ca. 3,8 mal so groß wie bei Luft

Bei laminar Strömung ist der  $\text{H}_2$ -Leckage-Volumenstrom ca. 2 mal so groß wie bei Luft

# Dichtigkeits-Teststand für Luft, G 20, Gemische und reinen H<sub>2</sub>-Betrieb

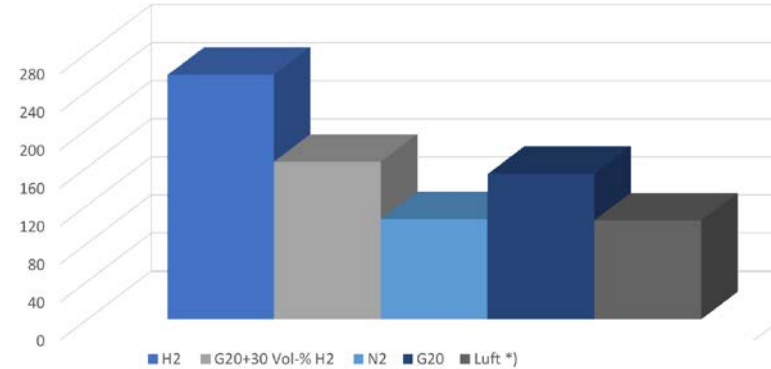
Ziel der Untersuchungen:

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 <sub>2</sub>	256,9	247,5%	3390,0	294,8%
2.	G20+30 Vol-% H <sub>2</sub>	165,5	159,4%	1715,2	149,1%
3.	N <sub>2</sub>	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

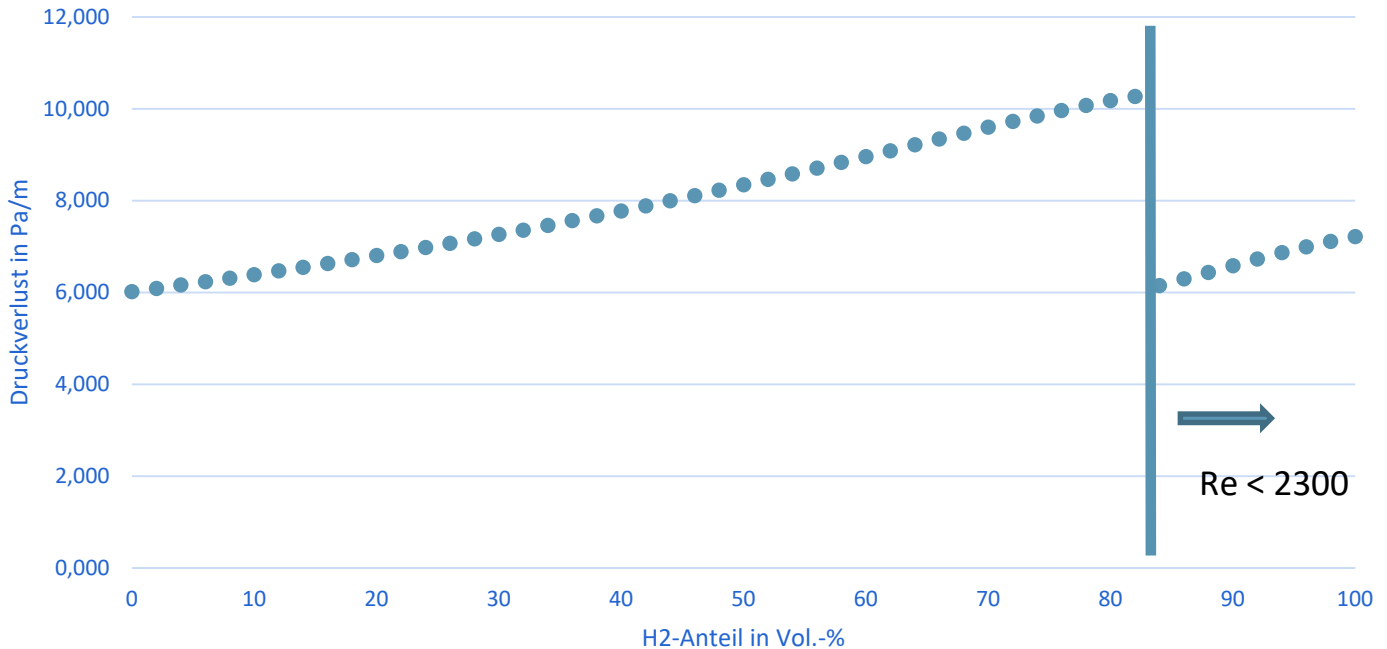
Hinweis: \*) Synthetische Luft

1. H<sub>2</sub> - Wasserstoff 5.0 (Reinheit in %  $\geq 99,999$ )
2. G20+30 Vol-% H<sub>2</sub> - Wasserstoff 30,06 MOL. %
3. N<sub>2</sub> - Stickstoff
4. G20 - CH<sub>4</sub> 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 % H<sub>2</sub> entspricht nach dem verwendeten Verfahren etwa dem von Gas mit einem 20 Vol.-%-H<sub>2</sub>-Anteil.

Verifizierung!



# Installationen

Fazit zu den bisherigen Untersuchungen



# Die Ergebnisse zeigen: Die Installationen im TRGI-Bereich tolerieren eine Beimischung von 20 Vol.-% H<sub>2</sub>



- Die Ergebnisse der durchgeführten Testreihen zeigen, dass die Bauteile im Bereich der TRGI mit einem Anteil von 20 Vol.-% H<sub>2</sub> im Gasgemisch funktionieren.
- Das aktive Sicherheitskonzept mit dem Gasströmungswächter funktioniert ohne Einschränkungen bis zu einem Anteil von mindestens 20 Vol.-% H<sub>2</sub> 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 Prülluft 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.-% H<sub>2</sub> im Gasgemisch funktionieren.**
- **Die relative Dichte könnte auf 0,45 abgesenkt werden.**
- **Anwendungen für 100 Vol.-% H<sub>2</sub> 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](mailto:frank.burmeister@gwi-essen.de)