

Jetzt
kaufen auf
shop.wvgw.de

Als Print oder
PDF-Download

Deutscher Verein des
Gas- und Wasserfaches e.V.



www.dvgw-forschung.de

Roadmap Gas 2050: Bewertung der H₂-Verträglichkeit von Gasanwendungen bis zu einer Grenze von 40 Vol.-%

Deliverable 3.3

Dr.-Ing. Frank Burmeister, Dipl.-Ing. Eren Tali,
Dipl.-Ing. Sabine Feldpausch-Jägers
Gas- und Wärme-Institut Essen e. V., Essen
Dipl.-Ing. Frank Erler, Dipl.-Ing. Philipp Pietsch
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig/Freiberg
Dr. Holger Dörr
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Karlsruhe



Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1-3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

**Roadmap Gas 2050:
Bewertung der H₂-Verträglichkeit von
Gasanwendungen bis zu einer Grenze von
40 Vol.-%**

Deliverable 3.3

Mai 2023

DVGW-Förderkennzeichen G 201824

Zusammenfassung

Im Teilprojekt 3 der Roadmap Gas 2050 wurde die H₂-Readiness älterer und neuer Gasgeräte in zahlreichen Tests mit Gasgemischen mit H₂-Gehalten von 10 – 40 Vol.-% untersucht.

Im Berichtsteil „Bewertung der H₂-Verträglichkeit von Gasanwendungen bis zu einer Grenze von 40 Vol.-%; Deliverable 3.3“ werden die Messergebnisse der Untersuchungen zur H₂-Verträglichkeit bis 40 Vol.-% der am GWI untersuchten 10 Gasgeräte, der 5 am DBI und der 5 am EBI untersuchten Geräte ausführlich zusammengestellt. Es wurden die folgenden Geräte einem umfangreichen Messprogramm unterzogen:

- Gerät 1: atmosphärischer Heizkessel mit Injektor-Brenner, einstufig, Neugerät
- Gerät 2: atmosphärisches Gas-Wandheizgerät, Mehrfach-Injektor-Brenner, gebraucht
- Gerät 3: atmosphärisches Gas-Wandheizgerät, teilvormischender Brenner, gebraucht
- Gerät 4: Brennwertgerät, I₂N-Gerät, gebraucht
- Gerät 5: atmosphärisches Gas-Wandheizgerät, teilvormischender Brenner, gebraucht
- Gerät 6: atmosphärischer Heizkessel mit Injektor-Brenner, modulierend, gebraucht
- Gerät 7: Brennwertgerät, 2-stufig, gebraucht
- Gerät 8: Brennwertgerät, I₂N-Gerät, Neugerät
- Gerät 9: Brennwertgerät, I₂N-Gerät, gebraucht
- Gerät 10: Brennwertkessel mit Gebläsebrenner, neu
- Gerät 11: Hockerkocher mit teil-vorgemischten Injektor-Brenner, gebraucht
- Gerät 12: SOFC-Brennstoffzelle, I₂ELL / I₂N- Gerät, gebraucht
- Gerät 13: Brennwertgerät, II₂N₃P-Gerät, gebraucht
- Gerät 14: Brennwertgerät, II₂N₃P-Gerät, gebraucht
- Gerät 15: gasmotorisches Blockheizkraftwerk, I₂ELL -Gerät, gebraucht
- Gerät 16: Brennwertgerät, II₂N₃P-Gerät, gebraucht
- Gerät 17: Gasgrill, neu
- Gerät 18: Kochmulde, neu
- Gerät 19: Brennwertgerät, II₂N₃P-Gerät, gebraucht
- Gerät 20: Raumheizer, gebraucht

Es werden die Testgase und deren Gas-Kennwerte, das Versuchsprogramm und die getesteten Gasgeräte vorgestellt. Die Gasgeräte wurden jeweils zunächst mit verschiedenen Referenzgasen sowie 4 Geräte mit Dichtetestgasen untersucht, um die Funktionalität an der unteren Grenze der relativen Dichte des H-Gas-Bereichs des DVGW-Arbeitsblattes G 260 zu überprüfen. Anschließend erfolgten umfangreiche Messungen zur Funktionstauglichkeit mit Wasserstoff-Zumischungen von 10 – 40 Vol.-% sowie Start/Stopp-Versuche.

Zur Erfassung von möglichen Unterschieden in den Laboren der einzelnen Institute wurde ein sogenannter Round Robin Test, ein Laborleistungstest zur externen Qualitätssicherung für Messverfahren, durchgeführt. Er zeigte maximale Abweichung von 5 % bei der Erfassung der Emissionen, ansonsten stimmten die Messwerte weitgehend überein.

Die zusammengefassten Kern-Ergebnisse bei Maximallast und T_{VL}/T_{RL} von 50/30 °C zeigen die folgenden Tabellen:

Tabelle 1-1: Wesentliche Ergebnisse der Geräte 1-4

| Q _{Max} 50/30 °C | | Gerät 1 | | | | | | | | Gerät 2 | | | | | | | | Gerät 3 | | | | | | | | Gerät 4 | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|----------|--------|--------------------|------|------|------|---------|----------------|------|-------|--------------------|------|----------|-----|---------|----------------|------|--------|--------------------|------|------|------|---------|----------------|------|-------|--------------------|-----|-----|----|
| Dichtegrenze d = 0,55 | G21 + 20 Vol.-% H2 | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| relative Dichte d = 0,45 | G20 + 20 Vol.-% H2 | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Referenzgase | | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | EU low | Dichtegase 1 2 3 4 | | | | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | Dichtegase 1 2 3 4 | | | | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | EU low | Dichtegase 1 2 3 4 | | | | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | Dichtegase 1 2 3 4 | | | |
| Emissionen | CO, ppm | 0 | 0 | 55 | 2 | 28 | 17 | 4 | 37 | 1625 | 184 | 18 | 21 | 23 | 22 | 35 | 28 | 244 | 64 | 193 | 106 | 158 | 105 | 97 | 125 | 40 | 27 | 33 | 33 | 31 | 27 | 31 | 35 |
| Akkustik | | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Luftzahl | | -8% | -2% | 11% | 4% | 7% | 8% | 7% | 10% | -8% | -2% | 10% | 21% | 8% | 7% | 3% | 6% | -10% | 3% | 13% | 6% | 10% | 7% | 6% | 4% | -4% | 1% | -1% | -2% | -1% | 4% | -1% | |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 1% | 0% | -2% | 0% | -2% | -2% | -1% | 0% | 5% | 4% | -1% | -1% | 2% | -1% | 5% | 0% | 1% | 0% | -7% | 0% | -3% | -2% | -1% | -1% | 1% | 2% | 1% | 1% | -1% | 0% | 1% | 1% |
| H2-Verträglichkeit | Zumischung zu bis Vol.-% H2 | G 20 | | G 231 | | G 23 | | G 20 | | G 231 | | G 23 | | G 20 | | G 231 | | G 23 | | G 20 | | G 231 | | G 23 | | | | | | | | | |
| | | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | | |
| Emissionen | CO | 0 | 0 | Ausbrand | | 69 | 127 | 29 | 14 | 17 | 17 | 13 | 9 | 37 | 33 | Ausbrand | | 145 | 101 | 23 | 17 | 25 | 19 | 23 | 16 | | | | | | | | |
| Leistung | ca. | -6% | -11% | nicht | | -15% | -20% | -6% | -11% | -24% | -27% | -15% | -20% | -6% | -12% | nicht | | -15% | -21% | -6% | -11% | -6% | -12% | -5% | -11% | | | | | | | | |
| Luftzahl | Δ zu G 20 | 6% | 12% | erreicht | | 18% | 26% | 6% | 13% | 27% | 35% | 17% | 27% | 8% | 18% | erreicht | | 20% | 31% | 8% | 14% | 7% | 16% | 8% | 17% | | | | | | | | |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 0% | 1% | | | 0% | 0% | 0% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | | | | -1% | 0% | 0% | 1% | 1% | 2% | 1% | 3% | | | | | | | | |
| Volumenstrom | Δ zu G 20 | 10% | 23% | | | 6% | 19% | 10% | 22% | 4% | 16% | 7% | 19% | 10% | 23% | | | 7% | 19% | 10% | 23% | 26% | 38% | 18% | 29% | | | | | | | | |
| Akkustik | | ab 30 Vol.-% H2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start/Stopp mit 40 Vol.-% H2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 1-2: Wesentliche Ergebnisse der Geräte 5-9 (für Gerät 10, Gebläsebrenner siehe Kapitel 15)

| Q _{Min} 50/30 °C | | Gerät 5 | | | | | | | | Gerät 6 | | | | | | | | Gerät 7 | | | | | | | | Gerät 8 | | | | | | | | Gerät 9 | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|-------------|----------------|-------|-------|------|----------------|-------|-------|---------|----------------|-------|-------|------|----------------|-------|-------|---------|----------------|-------|-------|------|----------------|------|-------|---------|----------------|------|-------|--|--|--|--|---------|--|--|--|--|--|--|--|
| Dichtegrenze d = 0,55 | G21 + 20 Vol.-% H2 | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| relative Dichte d = 0,45 | G20 + 20 Vol.-% H2 | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Referenzgase | | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H2 | G 23 | G 231 | | | | | | | | | | | | |
| Emissionen | CO, ppm | 56 | 62 | 97 | 195 | 16 | 19 | 50 | 72 | 13 | 21 | 53 | 98 | 11 | 11 | 13 | 12 | 6 | 6 | 6 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Akkustik | | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Luftzahl | | -9% | -5,0% | 6% | 14% | -9% | 0% | 8% | 16% | -9% | -2% | 12% | 25% | 4% | 2% | -3% | -3% | 5% | 4% | 2% | 1% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 5% | 4,0% | -1% | -1% | 6% | 5% | -1% | -1% | 4% | 4% | -1% | -1% | 1% | 1% | -1% | 0% | 1% | -2% | -2% | -1% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| H2-Verträglichkeit | Zumischung zu bis Vol.-% H2 | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Emissionen | CO | 86 | 85 | 126 | 118 | 34 | 39 | 77 | 79 | 40 | 53 | 117 | 133 | 9 | 8 | 9 | 8 | 4 | 4 | 53 | 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leistung | ca. | -8% | -13% | -22% | -25% | -6% | -13% | -25% | -29% | -4% | -9% | -21% | -24% | 0% | 0% | 0% | 1% | -8% | -15% | -25% | -29% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Luftzahl | Δ zu G 20 | 7% | 15% | 22% | 28% | 5% | 12% | 22% | 27% | 7% | 15% | 32% | 40% | 3% | 4% | 2% | 4% | 13% | 25% | 49% | 58% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 0% | 0% | -1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 2% | 1% | 3% | 1% | 3% | 1% | 2% | 0% | 2% | 0% | 2% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Volumenstrom | Δ zu G 20 | 8% | 22% | 7% | 20% | 10% | 22% | 2% | 13% | 10% | 24% | 5% | 18% | 14% | 35% | 34% | 57% | 8% | 17% | 2% | 11% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Akkustik | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start/Stopp mit 40 Vol.-% H2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 1-3: Wesentliche Ergebnisse der Geräte 11-15

| | | Gerät 11 | | | | Gerät 12 | | | | Gerät 13 | | | | Gerät 14 | | | | Gerät 15 | | | |
|--|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------|------|--------|-------------|-------------|-------|--------|-------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Dichtegrenze d = 0,55 | G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | - | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | |
| relative Dichte d = 0,45 | G 20+ 20 Vol.-% H ₂ | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | |
| Referenzgase | | G 231 | G 23 | EU-low | Dichte-gase | G 231 | G 23 | EU-low | Dichte-gase | G 231 | G 23 | EU-low | Dichte-gase | G 231 | G 23 | EU-low | Dichte-gase | G 231 | G 23 | EU-low | Dichte-gase |
| Emissionen | CO, ppm | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - |
| | CH ₄ im Abgas | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - | | - | - | - |
| Akustik | | unauff. | - | - | - | unauff. | - | - | - | unauff. | - | - | - | unauff. | - | - | - | unauff. | - | - | - |
| Luftzahl | Änderung um ca. | 18% | - | - | - | 8% | - | - | - | 10% | - | - | - | -33% | - | - | - | 0% | - | - | - |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | - | - | - | - | -8% ¹⁾ | - | - | - | -1% | - | - | - | 5% | - | - | - | 1,5% ¹⁾ | - | - | - |
| H ₂ -Verträglichkeit Zumischung zu bis Vol.-% H ₂ | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | |
| | | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% |
| Emissionen | CO, ppm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | CH ₄ im Abgas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leistungsänderung | | -7% | -13% | -5% | -9% | -2% ²⁾ | 2% ²⁾ | 6% ²⁾ | 12% ²⁾ | -9% | -16% | -6% | -11% | -6% | -11% | -4% | -6% | 3% ²⁾ | 6% ²⁾ | 1% ²⁾ | 4% ²⁾ |
| Luftzahl | Änderung um ca. | 17% | 32% | 9% | 21% | -3% | -6% | -3% | -3% | 10% | 28% | 12% | 20% | 10% | 23% | 4% | 13% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 4,0% ³⁾ | 4,8% ³⁾ | - | - | -1,3% ¹⁾ | -8,5% ¹⁾ | -5,3% ¹⁾ | -6,9% ¹⁾ | 2,9% | 2,6% | -0,3% | 0,6% | 1,9% | -0,1% | 1,2% | 1,2% | 0% ¹⁾ | -3,2% ¹⁾ | -0,5% ¹⁾ | -3,9% ¹⁾ |
| Akustik | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start/Stop mit 40 Vol.-% H ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1) η_{el}

2) Q_{th} (P_{el} = konstant)

3) gemäß DIN EN 30-2-1

Tabelle 1-4: Wesentliche Ergebnisse der Geräte 16-20

| Q _{min} | | Gerät 16 | | | | Gerät 17 | | | | Gerät 18 groß | | | | Gerät 18 klein | | | | Gerät 19 | | | | Gerät 20 | | | |
|--|---------------------------------|-------------|----------------------------|------|-------|-------------|----------------------------|-------|-------|---------------|----------------------------|-------|-------|----------------|----------------------------|------|-------|-------------|----------------------------|------|-------|----------|----------------------------|-------|-------|
| Dichtegrenze d = 0,55 | G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | unauffällig | | | | unauffällig | | | | | | | | | | | | unauffällig | | | | | | | |
| relative Dichte d = 0,45 | G 20 + 20 Vol.-% H ₂ | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | | | | |
| Referenzgase | | G 21 | G 21 + 20 % H ₂ | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H ₂ | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H ₂ | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H ₂ | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H ₂ | G 23 | G 231 | G 21 | G 21 + 20 % H ₂ | G 23 | G 231 |
| Emissionen | CO, ppm | 10 | 5 | 2 | 3 | 129 | 152 | | 310 | | | | 827 | | | | 2079 | | | 0 | 1 | 47 | | 66 | |
| Akkustik | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Luftzahl | Δ zu G 20 | -6% | -2% | 9% | 22% | -8% | 0% | | 15% | | | | | | | | 7% | | | 11% | 2% | -33% | | 17% | |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 21% | 52% | 2% | 2% | | | | | | | | | | | | | | | -2% | 1% | | | | |
| H ₂ -Verträglichkeit Zumischung zu bis Vol.-% H ₂ | | G 20 | | G 23 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 231 | | G 20 | | G 23 | | G 20 | | G 23 | | G 20 | | G 231 | |
| | | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% | 20% | 40% |
| Emissionen | CO, ppm | 10 | 5 | 21 | 2 | 221 | 50 | 448 | 507 | 423 | 553 | 1440 | 1393 | 563 | 1043 | 1514 | 1764 | 0 | 0 | | | 54 | 45 | 67 | 52 |
| Leistung | ca. | -7% | -14% | -6% | -12% | -2% | -9% | -8% | -13% | 5% | -2% | -16% | -16% | -7% | -10% | | | -8% | -11% | | | -4% | -8% | -9% | -12% |
| Luftzahl | Δ zu G 20 | 8% | 17% | 9% | 16% | 19% | 28% | 32% | 39% | | | 10% | 56% | 33% | 43% | 25% | 36% | 7% | 9% | | | 6% | 44% | 9% | 18% |
| Wirkungsgrad | Δ zu G 20 | 0% | 1% | 0% | 0% | | | | | | | | | | | | | 6% | | | | | | | |
| Akkustik | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start/Stop mit 40 Vol.-% H ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Der Einfluss von Windanströmung auf die Funktionalität einiger Geräte sowie sicherheitstechnische Untersuchungen nach DIN 15502-2-1 wurden bei der Verbrennung von 60 % Methan-40 % H₂-Gasgemischen an mehreren Geräten getestet.

Die Auswirkungen von H₂-Zumischungen auf Wärmebelastung, Emissionen und Luftzahl von Gasheizgeräten wurde ausführlich ausgewertet und graphisch dargestellt sowie tabellarisch zusammengefasst, beispielhaft hier die Werte der am GWI untersuchten Gasgeräte mit atmosphärischen Brennern für die Messung bei Maximallast und der Temperaturpaarung T_{Vl}/T_{RL} von 50/30 °C.

Tabelle 1-5: Atmosphärische Geräte

| Q _{Max} 50/30 °C | | Gerät 1 | | | | Gerät 2 | | | | Gerät 3 | | | | Gerät 5 | | | | Gerät 6 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|-------------|-----------------------------------|----------|--------|-----------------------|-----|------|------|-------------|---------------------------------|------|------|-----------------------|-------|----------|------|-------------|---------------------------------|------|------|------|---------------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Dichtegrenze d = 0,55 | G21 + 20 Vol.-% H ₂ | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | |
| relative Dichte d = 0,45 | G20 + 20 Vol.-% H ₂ | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | |
| Referenzgase | | G21 | G21 + 20 % H ₂ | G23 | EU low | Dichtegase 1 2 3 4 | | | | G21 | G21 + 20 % H ₂ | G23 | G231 | Dichtegase 1 2 3 4 | | | | G21 | G21 + 20 % H ₂ | G23 | G231 | G21 | G21 + 20 % H ₂ | G23 | G231 | | | | | | | | |
| Emissionen | CO, ppm | 0 | 0 | 55 | 2 | 28 | 17 | 4 | 37 | 1625 | 184 | 18 | 21 | 23 | 22 | 35 | 28 | 244 | 64 | 193 | 106 | 158 | 105 | 97 | 125 | 410 | 64 | 18 | 38 | 339 | 70 | 11 | 17 |
| Akkustik | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | unauffällig | | | | | | | | | | | | | | | |
| Luftzahl | | -8% | -2% | 11% | 4% | 7% | 8% | 7% | 10% | -8% | -2% | 10% | 21% | 6% | 7% | 3% | 6% | -10% | 3% | 13% | 6% | 10% | 7% | 6% | 4% | -10% | -2% | 8% | 17% | -10% | -1% | 9% | 18% |
| Wirkungsgrad | Δ zu G20 | 1% | 0% | -2% | 0% | -2% | -2% | -1% | 0% | 5% | 4% | -1% | -1% | 2% | -1% | 5% | 0% | 1% | 0% | -7% | 0% | -3% | -2% | -1% | -1% | 5% | 4% | -1% | -1% | 5% | 5% | -1% | -2% |
| Verträglichkeit Zumischung zu bis Vol.-%H ₂ | | G20 | | G231 | | G23 | | G20 | | G231 | | G23 | | G20 | | G231 | | G23 | | G20 | | G231 | | G20 | | G231 | | G20 | | G231 | | | |
| Emissionen | CO | 0 | 0 | Ausbrand | | 69 | 127 | 29 | 14 | 17 | 17 | 13 | 9 | 37 | 33 | Ausbrand | | 145 | 101 | 22 | 16 | 21 | 28 | 9 | 10 | 14 | 21 | | | | | | |
| Leistung | ca. | -6% | -11% | nicht | -15% | -20% | -6% | -11% | -24% | -27% | -15% | -20% | -6% | -12% | nicht | -15% | -21% | -6% | -10% | -20% | -24% | -6% | -13% | -25% | -28% | | | | | | | | |
| Luftzahl | Δ zu G20 | 6% | 12% | erreicht | | 18% | 26% | 6% | 13% | 27% | 35% | 17% | 27% | 8% | 18% | erreicht | | 20% | 31% | 7% | 16% | 24% | 33% | 7% | 15% | 24% | 31% | | | | | | |
| Wirkungsgrad | Δ zu G20 | 0% | 1% | | | 0% | 0% | 0% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | | | -1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 0% | 0% | -1% | 0% | 0% | -1% | 0% | | | |
| Volumenstrom | Δ zu G20 | 10% | 23% | | | 6% | 19% | 10% | 22% | 4% | 16% | 7% | 19% | 10% | 23% | | | 7% | 19% | 10% | 25% | 7% | 20% | 9% | 21% | 3% | 14% | | | | | | |
| Akkustik | | | ab 30 Vol.-% H ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Start/Stopp mit 40 Vol.-%H ₂ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Die Detail-Ergebnisse sind ausführlich in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Testreihen im Labor zeigen, dass die Geräte in gewartetem Werkzustand mit einem Anteil von 20 Vol.-% H₂ im Gasgemisch ohne funktionale Einschränkung bzw. der Betriebssicherheit funktionieren.

Die Grenze der relativen Dichte könnte nach derzeitigem Untersuchungsstand abgesenkt werden. Erst bei 30 % haben sich bei einem Geräte-Typ akustische Effekte eingestellt. Dies sind thermo-akustische Schwingungen, die sich in einer Geräuschbildung äußern und eine Komfort-Einschränkung darstellen.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Testgase und deren Kennwerte..... | 2 |
| 3 | Getestete Geräte..... | 8 |
| 4 | Untersuchungsprogramm..... | 9 |
| 5 | Ergebnisse von Gerät 1..... | 10 |
| 5.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 10 |
| 5.2 | Referenzmessung mit G 21..... | 11 |
| 5.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 12 |
| 5.4 | Referenzmessung mit G 231..... | 13 |
| 5.5 | Referenzmessung mit G 23..... | 14 |
| 5.6 | Referenzmessung mit EU low | 15 |
| 5.7 | Dichtetest..... | 16 |
| 5.8 | Gesamtdarstellung der Messwerte unter Verwendung der Referenzgase | 18 |
| 5.9 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 23..... | 21 |
| 5.10 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 23..... | 26 |
| 5.11 | Zusammenfassung Gerät 1 | 32 |
| 6 | Ergebnisse von Gerät 2..... | 34 |
| 6.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 34 |
| 6.2 | Referenzmessung mit G 21..... | 35 |
| 6.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 36 |
| 6.4 | Referenzmessung mit G 231..... | 37 |
| 6.5 | Referenzmessung mit G 23..... | 38 |
| 6.6 | Dichtetest..... | 39 |
| 6.7 | Gesamtdarstellung der Messwerte mit den Referenzgasen..... | 42 |
| 6.8 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20, G 23, G 231 | 46 |
| 6.9 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20, G 231, G 23 | 53 |
| 6.10 | Zusammenfassung Gerät 2..... | 56 |
| 7 | Ergebnisse von Gerät 3..... | 58 |
| 7.1 | Referenzmessung mit G 20 und G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | 58 |
| 7.2 | Referenzmessung mit G 231 und G 23 | 59 |
| 7.3 | Referenzgas EU low..... | 60 |
| 7.4 | Dichtetest..... | 61 |
| 7.5 | Gesamtdarstellung der Messwerte der Referenzgase | 63 |
| 7.6 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 23..... | 70 |
| 7.7 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 23..... | 77 |
| 7.8 | Zusammenfassung Gerät 3..... | 80 |
| 8 | Ergebnisse von Gerät 4..... | 82 |
| 8.1 | Referenzmessung mit G 20 und G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | 82 |
| 8.2 | Referenzmessung mit G 231..... | 83 |
| 8.3 | Referenzmessung mit G 23 und EU low..... | 84 |
| 8.4 | Dichtetest..... | 85 |
| 8.5 | Gesamtdarstellung der Messwerte der Referenzgase | 87 |

| | | |
|------|---|-----|
| 8.6 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 93 |
| 8.7 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 100 |
| 8.8 | Zusammenfassung Gerät 4 | 103 |
| 9 | Ergebnisse von Gerät 5..... | 105 |
| 9.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 105 |
| 9.2 | Referenzmessung mit G 21 | 106 |
| 9.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 107 |
| 9.4 | Referenzmessung mit G 23..... | 109 |
| 9.5 | Referenzmessung mit G 231 | 110 |
| 9.6 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase | 111 |
| 9.7 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 114 |
| 9.8 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 121 |
| 9.9 | Zusammenfassung Gerät 5 | 123 |
| 10 | Ergebnisse von Gerät 6 | 125 |
| 10.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 125 |
| 10.2 | Referenzmessung mit G 21 | 126 |
| 10.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 127 |
| 10.4 | Referenzmessung mit G 23..... | 129 |
| 10.5 | Referenzmessung mit G 231 | 130 |
| 10.6 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase | 131 |
| 10.7 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 134 |
| 10.8 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 144 |
| 10.9 | Zusammenfassung Gerät 6 | 147 |
| 11 | Ergebnisse von Gerät 7 | 149 |
| 11.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 149 |
| 11.2 | Referenzmessung mit G 21 | 150 |
| 11.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 151 |
| 11.4 | Referenzmessung mit G 23..... | 153 |
| 11.5 | Referenzmessung mit G 231 | 154 |
| 11.6 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase | 155 |
| 11.7 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 158 |
| 11.8 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 165 |
| 11.9 | Zusammenfassung Gerät 7 | 168 |
| 12 | Ergebnisse von Gerät 8 | 170 |
| 12.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 170 |
| 12.2 | Referenzmessung mit G 21 | 172 |
| 12.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 173 |
| 12.4 | Referenzmessung mit G 23..... | 174 |
| 12.5 | Referenzmessung mit G 231 | 175 |
| 12.6 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase | 176 |
| 12.7 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 180 |
| 12.8 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 187 |
| 12.9 | Zusammenfassung Gerät 8 | 190 |
| 13 | Ergebnisse von Gerät 9 | 192 |
| 13.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 192 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 13.2 | Referenzmessung mit G 21 | 193 |
| 13.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 194 |
| 13.4 | Referenzmessung mit G 23 | 195 |
| 13.5 | Referenzmessung mit G 231 | 196 |
| 13.6 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase | 197 |
| 13.7 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 201 |
| 13.8 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 208 |
| 13.9 | Zusammenfassung Gerät 9 | 211 |
| 14 | Ergebnisse von Gerät 10 | 214 |
| 14.1 | Tests mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu Erdgas H | 214 |
| 15 | Round Robin Test | 219 |
| 16 | Ergebnisse der Windtests nach DIN EN 15502-2-1 | 224 |
| 16.1 | Untersuchungsprogramm | 224 |
| 16.1.1 | Ergebnisse der Windtests von Gerät 3 | 225 |
| 16.1.2 | Ergebnisse der Windtests von Gerät 4 | 225 |
| 16.1.3 | Ergebnisse der Windtests von Gerät 7 | 227 |
| 16.1.4 | Ergebnisse der Windtests von Gerät 8 | 229 |
| 16.1.5 | Ergebnisse der Windtests von Gerät 9 | 230 |
| 17 | Ergebnisse der Untersuchungen nach DIN EN 15502-2-1 | 231 |
| 17.1 | Untersuchungsprogramm und Versuchsdurchführung | 231 |
| 17.2 | Ergebnisse von Gerät 1 | 234 |
| 17.3 | Ergebnisse von Gerät 2 | 237 |
| 17.4 | Ergebnisse von Gerät 3 | 239 |
| 17.5 | Ergebnisse von Gerät 4 | 243 |
| 17.6 | Ergebnisse von Gerät 7 | 248 |
| 17.7 | Zusammenfassung | 251 |
| 18 | Auswirkungen von H ₂ -Zumischungen auf Wärmebelastung, Emissionen und Luftzahl von Gasheizgeräten | 254 |
| 18.1 | Auswirkungen der H ₂ -Zumischung auf die Gaseigenschaften der Erdgasgemische | 254 |
| 18.2 | Auswirkungen von H ₂ -Zumischungen zu G 20, G 231 und G 23 auf Wärmebelastung und Wobbe-Index bei den Geräten 1 bis 9 | 255 |
| 18.2.1 | Untersuchungen mit Testgasen aus Methan/H ₂ | 255 |
| 18.2.2 | Untersuchungen mit Testgasen aus G 231/H ₂ | 256 |
| 18.2.3 | Untersuchungen mit Testgasen aus G 23/H ₂ | 258 |
| 18.3 | Abhängigkeit des Sauerstoffanteils im Abgas vom H ₂ -Anteil im Brenngas bei NT- und Heizwertgeräten und Gas-Brennwertgeräten | 259 |
| 18.4 | Verläufe der CO- und NO _x -Emissionswerte sowie Gesamtluftzahlen von Heizwertgeräten bei der Verbrennung von Brenngasen mit unterschiedlichen H ₂ -Anteilen | 262 |
| 18.4.1 | Untersuchungen der Heizwertgeräte mit Testgasen aus Methan/H ₂ | 263 |
| 18.4.2 | Untersuchungen der Heizwertgeräte mit Testgasen aus G 231/H ₂ | 264 |
| 18.4.3 | Untersuchungen mit Testgasen aus G 23 und Wasserstoff | 265 |
| 18.5 | Verläufe der CO- und NO _x -Emissionswerte sowie Luftzahlen bei Gas-Brennwertgeräten | 266 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 18.5.1 | Untersuchungen mit Testgasen aus Methan und Wasserstoff..... | 266 |
| 18.5.2 | Untersuchungen mit Testgasen aus G 231 und Wasserstoff..... | 268 |
| 19 | Zusammenfassung der Ergebnisse der Geräte 1 bis 10 | 270 |
| 19.1 | Ergebnisse von Gerät 1..... | 270 |
| 19.2 | Ergebnisse von Gerät 2..... | 271 |
| 19.3 | Ergebnisse von Gerät 3..... | 272 |
| 19.4 | Ergebnisse von Gerät 4..... | 274 |
| 19.5 | Ergebnisse von Gerät 5..... | 275 |
| 19.6 | Ergebnisse von Gerät 6..... | 276 |
| 19.7 | Ergebnisse von Gerät 7..... | 278 |
| 19.8 | Ergebnisse von Gerät 8..... | 279 |
| 19.9 | Ergebnisse von Gerät 9..... | 280 |
| 19.10 | Ergebnisse von Gerät 10 | 282 |
| 20 | Zusammenfassung | 283 |
| 21 | Ergebnisse von Gerät 11 | 294 |
| 21.1 | Messungen mit bis zu 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu Erdgas H (G 20)..... | 294 |
| 21.2 | Messungen mit bis zu 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 231..... | 301 |
| 21.3 | Start-Stopp-Messungen bei H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 307 |
| 21.4 | Wirkungsgradbestimmung..... | 309 |
| 21.5 | Zusammenfassung Gerät 11 | 311 |
| 22 | Ergebnisse von Gerät 12 | 312 |
| 22.1 | Voreinstellungen der Anlage vor dem Betrieb mit Wasserstoff | 312 |
| 22.2 | Referenzmessung mit G 20..... | 313 |
| 22.3 | Referenzmessung mit G 21 | 314 |
| 22.4 | Referenzmessung mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | 316 |
| 22.5 | Referenzmessung mit G 231 | 318 |
| 22.6 | Gesamtdarstellung der Messwerte mit den Referenzgasen..... | 320 |
| 22.7 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 323 |
| 22.8 | Zusammenfassung Gerät 12 | 334 |
| 23 | Ergebnisse von Gerät 13 | 335 |
| 23.1 | Referenzmessung mit G 20 und G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | 335 |
| 23.2 | Referenzmessung mit G 231 | 342 |
| 23.3 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 348 |
| 23.4 | Auswertung der Start/Stopp-Messungen | 354 |
| 23.5 | Zusammenfassung Gerät 13 | 357 |
| 24 | Ergebnisse von Gerät 14 | 358 |
| 24.1 | Referenzmessung mit G 20 und G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | 358 |
| 24.2 | Referenzmessung mit G 231 | 365 |
| 24.3 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 372 |
| 24.4 | Auswertung der Start/Stopp-Messungen | 379 |
| 24.5 | Zusammenfassung Gerät 14 | 381 |
| 25 | Ergebnisse von Gerät 15 | 383 |
| 25.1 | Voreinstellungen der Anlage vor dem Betrieb mit Wasserstoff | 383 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 25.2 | Referenzmessung mit G 20..... | 383 |
| 25.3 | Referenzmessung mit G 21..... | 386 |
| 25.4 | Referenzmessung mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ | 389 |
| 25.1 | Referenzmessung mit G 231..... | 391 |
| 25.2 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 397 |
| 25.3 | Auswertung der Start/Stopp-Messungen..... | 404 |
| 25.4 | Zusammenfassung Gerät 15..... | 406 |
| 26 | Ergebnisse von Gerät 16..... | 408 |
| 26.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 408 |
| 26.2 | Referenzmessung mit G 21..... | 410 |
| 26.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs..... | 411 |
| 26.4 | Referenzmessung mit G 23..... | 413 |
| 26.5 | Referenzmessung mit G 231..... | 414 |
| 26.6 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase..... | 415 |
| 26.7 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20..... | 419 |
| 26.8 | Diskussion und Zusammenfassung Gerät 16..... | 420 |
| 27 | Ergebnisse von Gerät 17..... | 422 |
| 27.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 422 |
| 27.2 | Referenzmessung mit G 21..... | 423 |
| 27.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs..... | 424 |
| 27.4 | Referenzmessung mit G 231..... | 425 |
| 27.5 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase..... | 426 |
| 27.6 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 426 |
| 27.7 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20..... | 430 |
| 27.8 | Diskussion und Zusammenfassung Gerät 17..... | 432 |
| 28 | Ergebnisse von Gerät 18..... | 433 |
| 28.1 | Großer Brenner..... | 433 |
| 28.1.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 433 |
| 28.1.2 | Referenzmessung mit G 231..... | 434 |
| 28.1.3 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase..... | 435 |
| 28.1.4 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 436 |
| 28.1.5 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 440 |
| 28.2 | Kleiner Brenner..... | 441 |
| 28.2.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 441 |
| 28.2.2 | Referenzmessung mit G 231..... | 442 |
| 28.2.3 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase..... | 443 |
| 28.3 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 443 |
| 28.3.1 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231..... | 449 |
| 28.4 | Zusammenfassung Gerät 18..... | 450 |
| 29 | Ergebnisse von Gerät 19..... | 451 |
| 29.1 | Referenzmessung mit G 20..... | 452 |
| 29.2 | Referenzmessung mit G 231..... | 453 |
| 29.3 | Referenzmessung mit G 23..... | 454 |
| 29.4 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase..... | 455 |
| 29.5 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 23..... | 457 |

| | | |
|------|--|-----|
| 29.6 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 23 | 462 |
| 29.7 | Diskussion und Zusammenfassung Gerät 19 | 462 |
| 30 | Ergebnisse von Gerät 20 | 463 |
| 30.1 | Referenzmessung mit G 20 | 464 |
| 30.2 | Referenzmessung mit G 21 | 465 |
| 30.3 | Test mit G 21 + 20 Vol.-% H ₂ an der Grenze des H-Gas-Bereichs | 466 |
| 30.4 | Referenzmessung mit G 231 | 467 |
| 30.5 | Gesamtdarstellung der Mittelwerte der Referenzgase | 468 |
| 30.6 | Gaswechsel mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 und G 231 | 468 |
| 30.7 | Startversuche mit 10 - 40 Vol.-% H ₂ -Zumischung zu G 20 | 473 |
| 30.8 | Diskussion und Zusammenfassung zu Gerät 20 | 475 |
| 31 | Zusammenfassung | 475 |
| 32 | Literaturverzeichnis | 478 |
| 33 | Abbildungsverzeichnis | 479 |
| 34 | Tabellenverzeichnis | 498 |