



ready for  
**HYDR** $H_2$ **GEN**

# Herausforderungen und Lösungen für die Energiewende



- / Nuklear- und Kohleausstieg
- / Wachsender Strombedarf (E-Mobilität, Wärmepumpen, Erzeugung grünen H<sub>2</sub>)



- ✓ Ausbau der Erneuerbaren
- ✓ Sektor-Integration
- ✓ Steigerung der Energieeffizienz



- / Volatilität der erneuerbaren Energien („Kalte Dunkelflaute“)
- / Herausforderung Netzstabilität



- ✓ Flexible, regelbare Kraftwerke (idealerweise KWK)
- ✓ Chemische Speicherung der erneuerbaren Energie



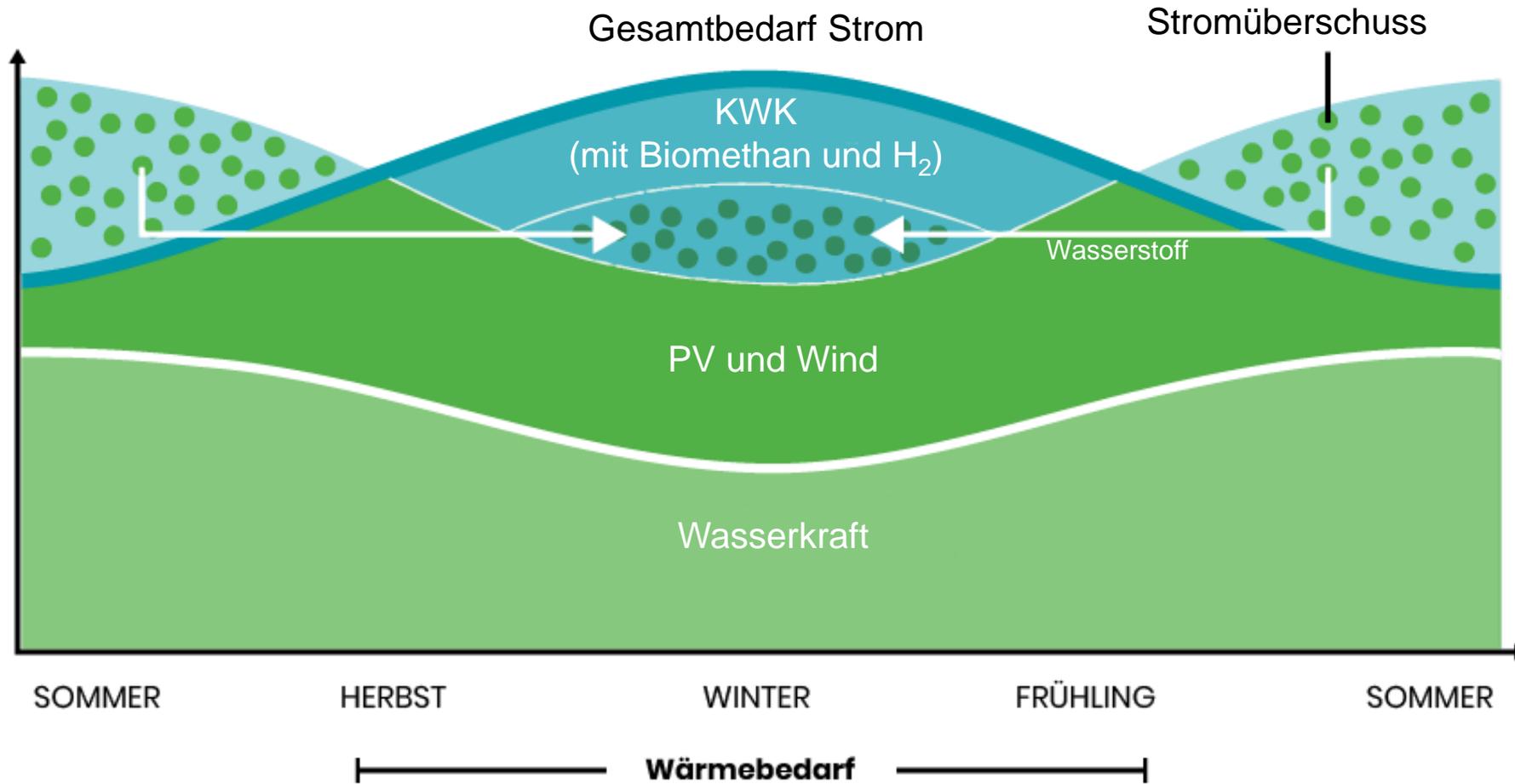
- / Umstellung der Infrastruktur und Verbraucher auf erneuerbare Energieträger



- ✓ Flexible Verbraucher für schwankende Wasserstoffbeimischung im Gasnetz
- ✓ Sicherstellung der Umrüstbarkeit auf erneuerbare Gase (inkl. H<sub>2</sub>)

# Versorgungssicherheit und Vermeidung einer kalten Dunkelflaute

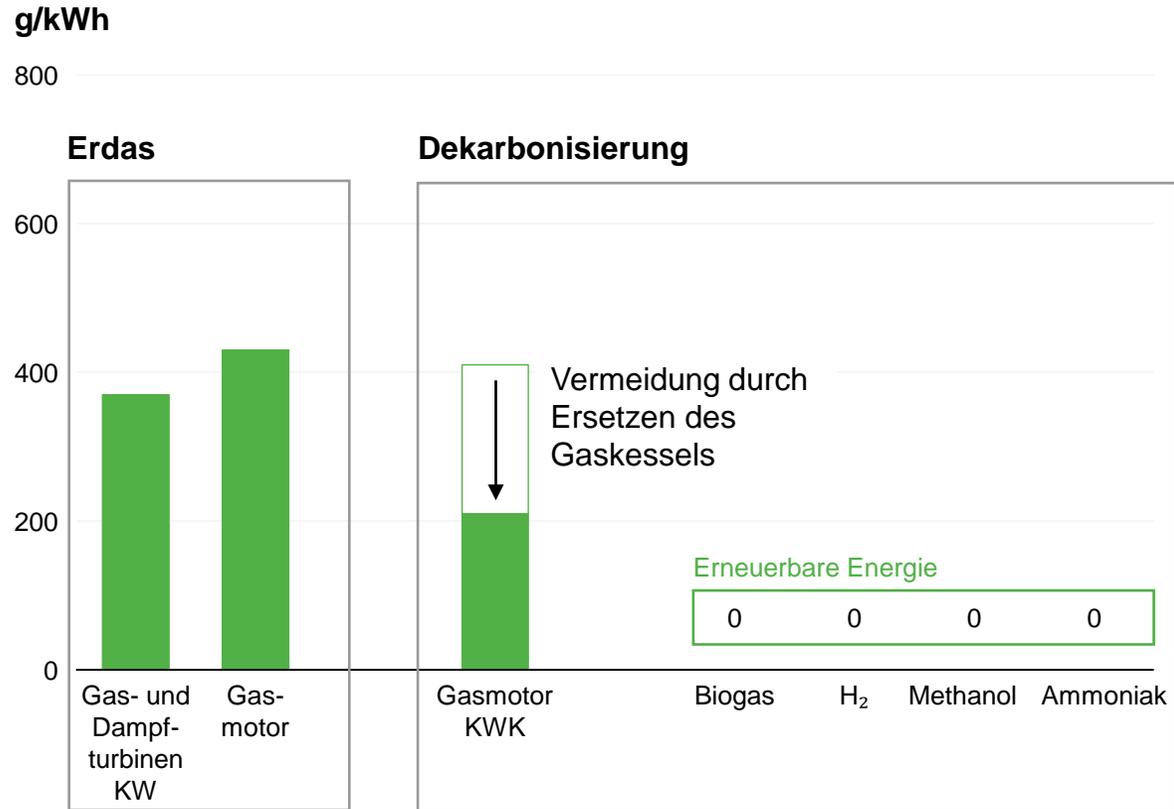
Beispiel Österreich oder Schweiz



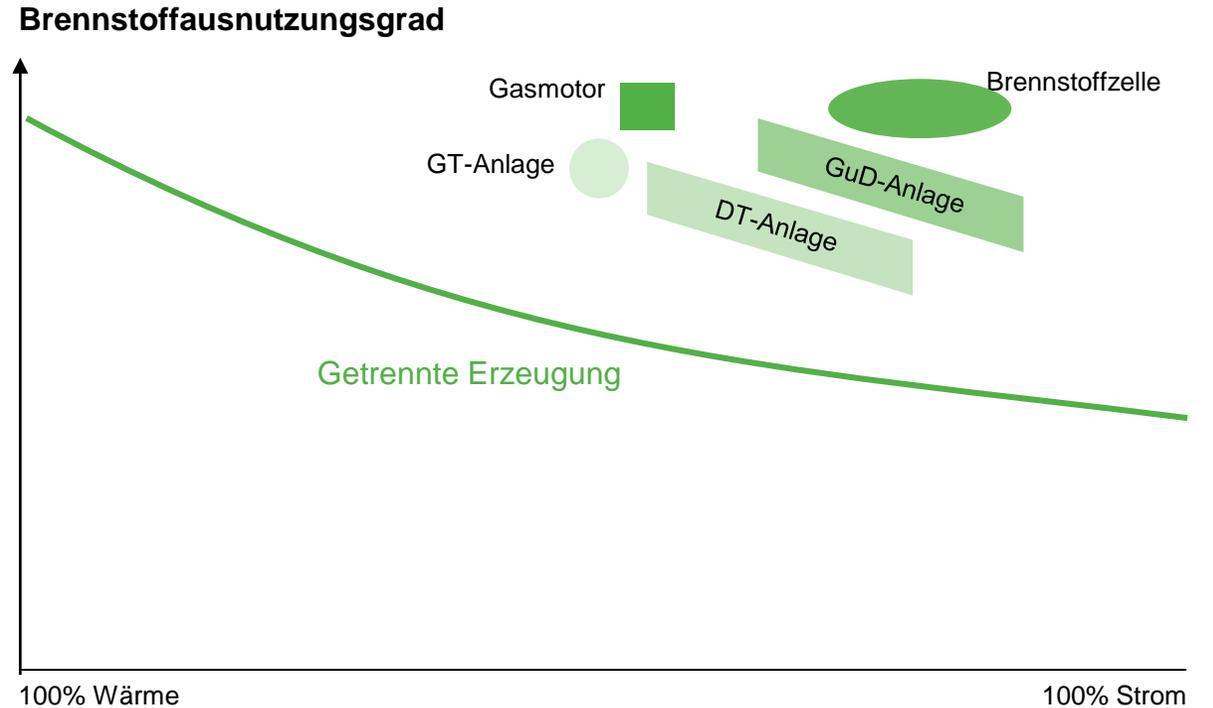
# Konventionelles Gas als Brücke – Biogas, Biomethan und grüner Wasserstoff in Zukunft

## KWK mit dem höchste Brennstoffnutzungsgrad

### CO<sub>2</sub> Emissionen ohne CO<sub>2</sub> Speicherung

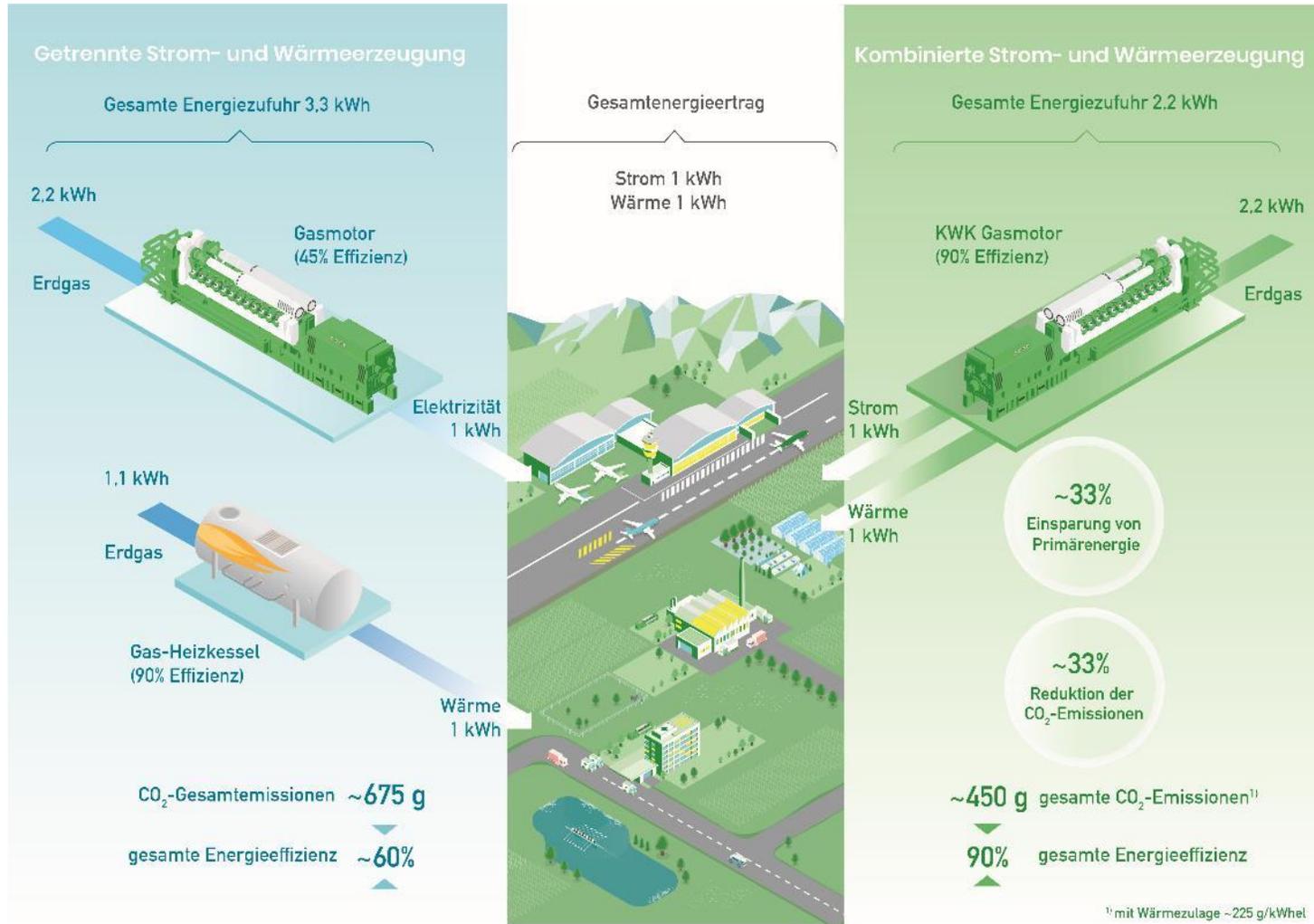


### KWK Effizienz



# KWK ... eine erfolgreiche Sektorkopplung von Strom und Wärme

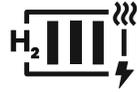
## Energieeffizienz für sichere, bezahlbare und klimafreundliche Energieerzeugung



- **Dezentrale Anlagen** sparen Leitungsverluste und Leitungsneubau
- Flexibler Betrieb bei kleineren Anlagen mit **Startzeiten von <5 Minuten**
- **Flexible** dezentrale Anlagen werden idealerweise an Orten gebaut, wo auch die Abwärme genutzt werden kann
- **KWK** sollte immer Vorrang haben. Beim Bau und Betrieb einer Anlage
- Die Nutzung der Abwärme führt zu Brennstoffnutzungsgraden von bis zu ~95% ... bis zu **~33% Brennstoffeinsparung**
- Flexible dezentrale Anlagen laufen nur dann, wenn es zu wenig erneuerbaren Strom gibt
- Abwärme der KWK ist ein Nebenprodukt
- Konventionelles Gas kann durch **Biomethan** oder **Wasserstoff** kurz, mittel oder langfristig ersetzt werden

# Energiewende benötigt Technologieoffenheit

Hoher Gesamtwirkungsgrad, geringe Kosten, hohe Flexibilität und Umrüstbarkeit



## Kriterien

| Kriterien                                | Brennstoffzelle        |  | H <sub>2</sub> Gasmotor |   | Turbine                      |   |  |   |
|--|------------------------|--|-------------------------|---|------------------------------|---|--|---|
|  | PEM                    | SOFC   |                         |   |                              |   |  |   |
| Umrüsten auf H <sub>2</sub>              | N/A                    | ○  | N/A                     | ○ | Ja                           | + | Ja                                     | + |
| Investition Erdgas Neuanlage/kW          |                        | 1-5 kW: >20.000 EUR/kW *<br>1+ MW: ~5.000 EUR/kW | -                       |   | 750–1.000 EUR/kW *           | + | 700–800 EUR/kW GuD Kraftwerke *        | + |
| Investition Umrüstung/kW                 | N/A                    | ○  | N/A                     | ○ | <25% der Gesamtanlagenkosten | + | < 20% der Gesamtanlagenkosten **       | + |
| Gesamtwirkungsgrad (KWK)                 | ~70 %                  | -  | ~88 %                   | + | 85–95 %                      | + | 80–85 %                                | + |
| Schnell-Kaltstart zur Netzstabilisierung | < 1 min                | +  | > 5 h<br>Ziel: < 1 h    | - | 2–5 min                      | ~ | >25 min                                | ~ |
| Lastflexibilität                         | Hoch                   | +  | Gering                  | - | Hoch                         | + | Mittel                                 | ~ |
| Brennstoffflexibilität                   | Nein (Umwandler nötig) | -  | Mittel                  | ~ | Hoch                         | + | Hoch                                   | + |
| Standzeiten                              | 10–20k BH              | -  | < 40k BH                | ~ | >60k BH                      | + | > 50k BH                               | + |
| Stromgrenzkosten (KWK) EUR/MWh           | Hoch                   | -  | Hoch                    | - | Niedrig                      | + | Niedrig (bei schwieriger Wärmenutzung) | ~ |



**Jenbacher Gasmotoren  
sind „Ready for H2“**

# INNIO Jenbacher Erfahrung mit Wasserstoff & Wasserstoffgemischen



Prozess-  
gas



>95% H<sub>2</sub> energetisch  
im Brenngas



CO<sub>2</sub>  
neutral



Koksgas (Profusa)  
IBN 1998

Prozessgas (Krems)  
IBN 1996

Biomassevergasung (Mutsu)  
IBN 2003

Reiner Wasserstoff  
2021+

H<sub>2</sub>: ~50-70Vol%  
CH<sub>4</sub>: ~20-25Vol%  
LHV: ~5 kWh/m<sup>3</sup>

H<sub>2</sub>: ~15-17 Vol%  
CH<sub>4</sub>: ~1.5 Vol%  
LHV: ~0.5 kWh/m<sup>3</sup>

H<sub>2</sub>: ~30-40 Vol%  
CO: ~25-30 Vol%  
LHV: ~2.5 kWh/m<sup>3</sup>

H<sub>2</sub>: ... 100 Vol%  
Nat. Gas oder Inerts  
LHV: ~3 kWh/m<sup>3</sup>

Kommerzieller Betrieb  
(Herausforderung: variierende Gasqualität)

Zukunft

~250MW installierte Leistung mit synthetischen Gasen / Prozessgasen ... 90 Projekte in 28 Länder

# Ready for Hydrogen – was heißt das?



## JENBACHER INNIO

“Ready for H<sub>2</sub>” heißt, dass Jenbacher\* Motoren mit bis zu 20 Vol.-% Wasserstoff in Pipelinegas betrieben und auf 100% H<sub>2</sub>-Betrieb umgerüstet werden können.

Ein “Ready for H<sub>2</sub>” ausgelegtes Jenbacher\* Motoren-Kraftwerk kann somit zukünftige H<sub>2</sub>-Umrüstkosten reduzieren.

Die KWK Anlagen der **Baureihe 4** sind bereits heute als H<sub>2</sub>-Motoren verfügbar

# INNIO Jenbacher Lösungen für Gasmotoren mit Erdgas und Wasserstoff

A

H<sub>2</sub> im Pipelinenetz

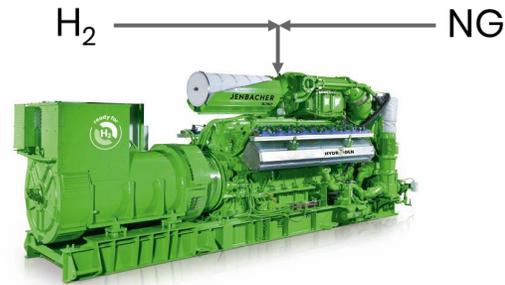


**A-1: Niedriger H<sub>2</sub> Gehalt**  
Optimiert für Erdgas  
<5%v H<sub>2</sub>

**A-2: Mittlerer H<sub>2</sub> Gehalt**  
Breitbandprodukt  
5-20 %v H<sub>2</sub>

B

H<sub>2</sub> lokal zugemischt

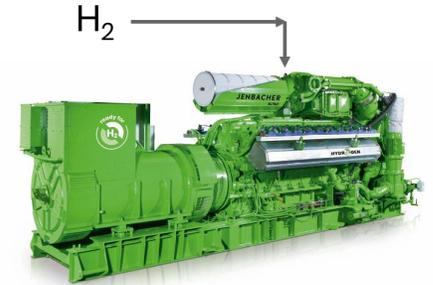


**B-1: Spezial-Motor**  
Betrieboptimiert  
bis zu ~60%v H<sub>2</sub>

**B-2: Erdgas / H<sub>2</sub> Motor**  
2-Gas Motor  
100%v Erdgas / H<sub>2</sub>

C

Reiner H<sub>2</sub>



**C: H<sub>2</sub>-Motor**  
Wasserstoff-Motor  
100% H<sub>2</sub>

Konventionelles Gas+H<sub>2</sub> Gemischaufladung



Keine  
Modifikationen nötig

Existierende Version  
verfügbar

Existierende Version  
verfügbar

Wasserstoff-Eindüsung

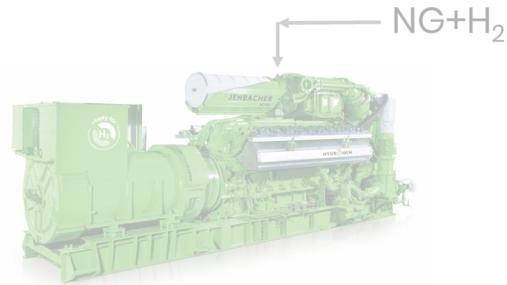
Pilotmotoren  
(Vorserie)

Pilotmotoren  
(Vorserie)

# INNIO Jenbacher Lösungen für Gasmotoren mit Erdgas und Wasserstoff

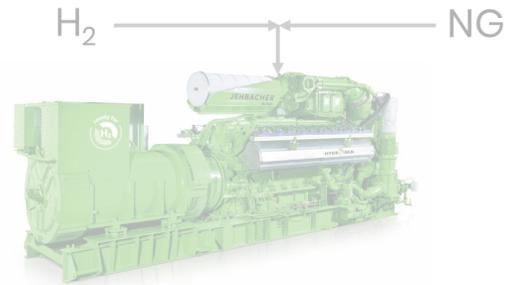
A

H<sub>2</sub> im Pipelinenetz



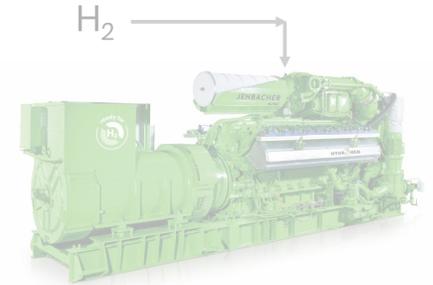
B

H<sub>2</sub> lokal zugemischt



C

Reiner H<sub>2</sub>



**A-2: Mittlerer H<sub>2</sub> Gehalt**  
Breitbandprodukt  
5-20 %v H<sub>2</sub>

Konventionelles Gas + H<sub>2</sub> Gemischaufladung



Existierende Version  
verfügbar

**B-1: Spezial-Motor**  
Betriebsoptimiert  
bis zu ~60 %v H<sub>2</sub>

**B-2: Erdgas / H<sub>2</sub> Motor**  
2-Gas Motor  
100 %v konventionelles Gas / H<sub>2</sub>

Wasserstoff-Eindüsung

Existierende Version  
verfügbar

Pilotmotoren  
(Vorserie)

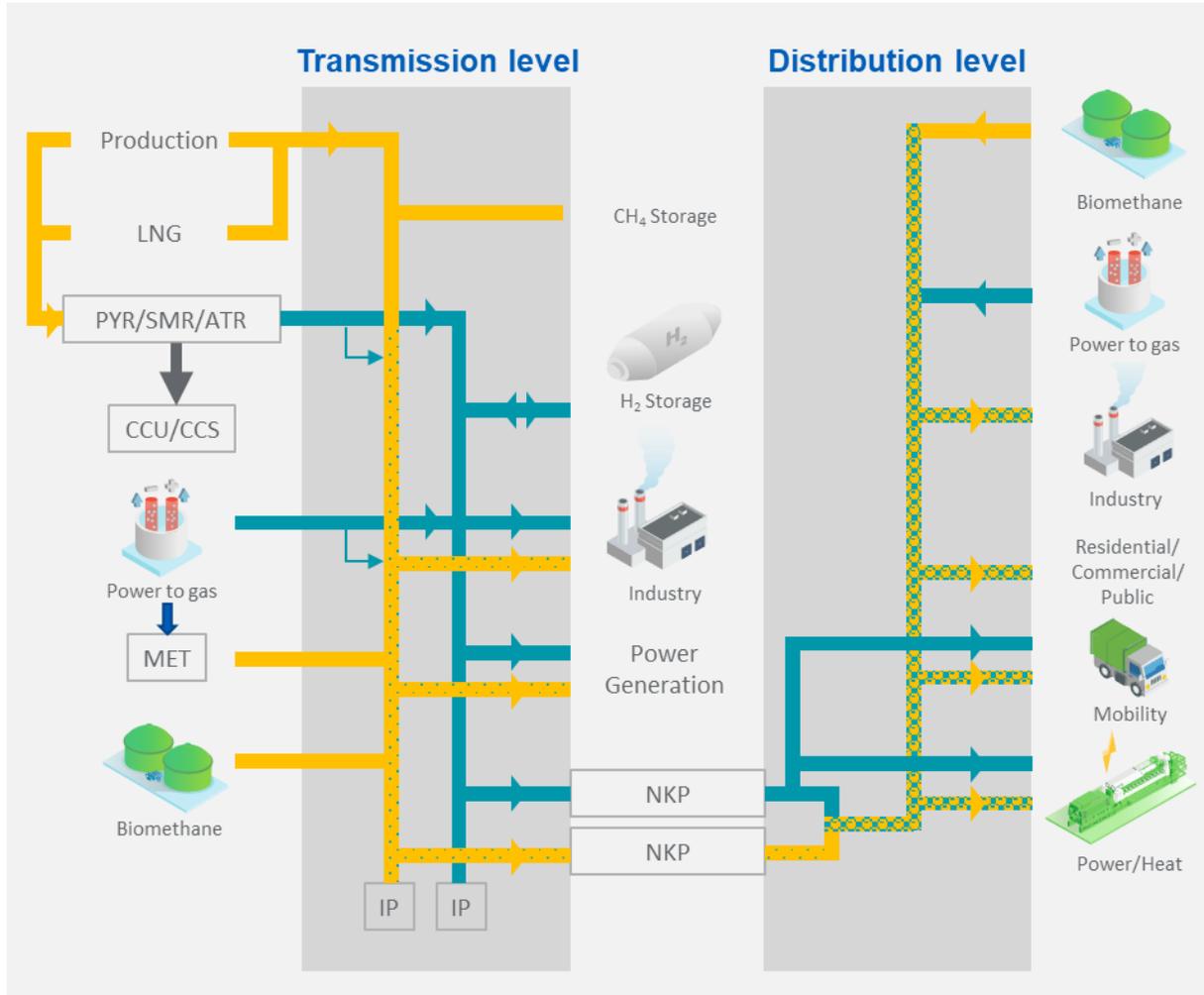
**C: H<sub>2</sub> Motor**  
Wasserstoff-Motor  
100% H<sub>2</sub>

Pilotmotoren  
(Vorserie)

Keine  
Modifikationen nötig

# Ready for Hydrogen – Hintergrundinformationen

Wasserstoff zugemischt im Gasnetz oder eigenes Wasserstoff-Leitungsnetz



kurzfristig

Gas+H<sub>2</sub>



langfristig

H<sub>2</sub>



# H<sub>2</sub> Zumischung zum Pipelinenetz – Validierung im Werk Jenbach

## H<sub>2</sub> Trailer Station für Prüfstände in Jenbach

### Validierungsgegenstand



### Simulation des Wasserstoffanteils im Pipelinenetz



### H<sub>2</sub> Trailer Station zur Versorgung der Prüfstände

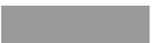


Investition in H<sub>2</sub> Infrastruktur am Standort Jenbach für erforderliche Produktentwicklung

# “Ready for H2” – INNIO Jenbacher\* Produktportfolio (als Alternative ab 2022)

## Verfügbare Produkte heute und zukünftig

### Elektrische Leistung (kWel)

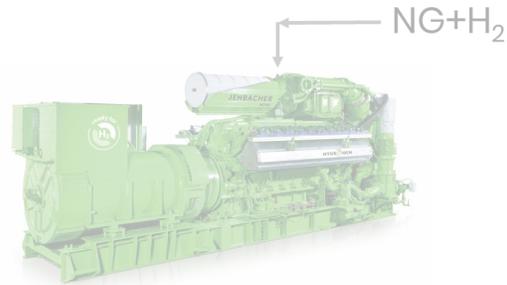
| Generatorleistung @ 50Hz & Erdgas   | A                                    |                              | B  | C     |
|---|--------------------------------------|------------------------------|--|-------|
|   | H <sub>2</sub> im Pipelinenetz       | Erdgas/H <sub>2</sub> -Motor | H <sub>2</sub> -Motor  |       |
| 0    1.000    2.000    3.000    4.000    5.000    [...]    10.000   | <5%v    <20%v <sup>2)</sup> optional | 0-100 %(vol)                 | 100%   |       |
| <b>Baureihe 9</b>  J920 FleXtra            | ✓                                    | ✓                            |  25   | 2025+ |
| <b>Baureihe 6</b>  J612   J616   J620   J624 | ✓                                    | ✓                            |  60   | 2025+ |
| <b>Baureihe 4</b>  J412   J416   J420        | ✓                                    | ✓                            |  100  | ✓     |
| <b>Baureihe 3</b>  J312   J316   J320       | ✓                                    | ✓                            |  60  | 2025+ |
| <b>Baureihe 2</b>  J208                    | ✓                                    | ✓                            |  60 | 2025+ |

<sup>2)</sup> Vorbehaltlich notwendiger Anpassungen zur Zertifizierung der gasgeführten Einzelkomponenten - u.U. ist für einzelne Komponenten eine Anpassung des Wartungsplanes erforderlich

# INNIO Jenbacher Lösungen für Gasmotoren mit Erdgas und Wasserstoff

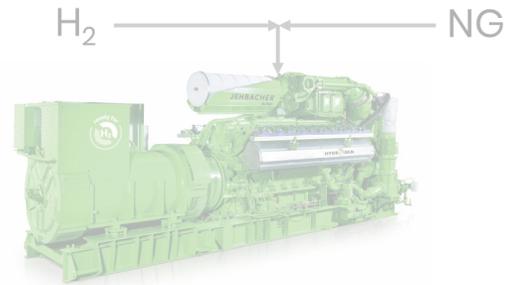
A

H<sub>2</sub> im Pipelinenetz



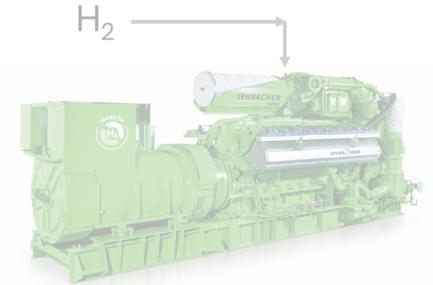
B

H<sub>2</sub> lokal zugemischt



C

Reiner H<sub>2</sub>



**A-2: Mittlerer H<sub>2</sub> Gehalt**  
Breitbandprodukt  
5-20 %v H<sub>2</sub>

**B-1: Spezial-Motor**  
Betriebsoptimiert  
bis zu ~60 %v H<sub>2</sub>

**B-2: Erdgas / H<sub>2</sub> Motor**  
2-Gas Motor  
100 %v konventionelles Gas / H<sub>2</sub>

**C: H<sub>2</sub> Motor**  
Wasserstoff-Motor  
100% H<sub>2</sub>

Konventionelles Gas + H<sub>2</sub> Gemischaufladung



Keine  
Modifikationen nötig

Existierende Version  
verfügbar

Existierende Version  
verfügbar

Pilotmotoren  
(Vorserie)

Pilotmotoren  
(Vorserie)

Wasserstoff-Eindüsung

# H<sub>2</sub>-Motor – Demonstration einer Umrüstung vor Ort

Umbau 2020 – HWN Othmarschen: Erster MW Motor der im Feld von Erdgas- auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet wurde

| J416                       | Erdgas<br>(Auslegung 2019)                           | 20%v H <sub>2</sub><br>Zumischung<br>(nach Umbau)    | 100% H <sub>2</sub> Betrieb<br>(nach Umbau)   |
|----------------------------|--|--|---|
| Elektrische Leistung       | 999 kW   | 999 kW   | >600 kW                                       |
| Elektrischer Wirkungsgrad  | 42%  | ~42%   | ~40%  |
| Gesamtwirkungsgrad         | 93.5%  | ~93.5%   | ~93%  |
| H <sub>2</sub> Verbrauch   |  |  | ~45 kg/h<br>~75 g/kWh <sub>el</sub>           |
| NO <sub>x</sub> Emissionen | <250 mg/Nm <sup>3</sup><br>@ 5%O <sub>2</sub>        | <250 mg/Nm <sup>3</sup><br>@ 5%O <sub>2</sub>        | <100 mg/Nm <sup>3</sup><br>@ 5%O <sub>2</sub> |
| CO <sub>2</sub> Emissionen | 481 g/kWh <sub>el</sub><br>216 g/kWh <sub>el</sub> * | 447 g/kWh <sub>el</sub><br>201 g/kWh <sub>el</sub> * | 0 g/kWh <sub>el</sub><br>(-100%)              |

\* CO2 Emissionen berechnet mit Wärme-Bonus



## Technologie:

- Port Injection (erf. H<sub>2</sub>-Druck: 8+bar)
- Individuelle Zylindersteuerung
- Wastegate für Turbolader

# H2-Motor – Baureihe 4 (Vorserien-Motor)

| H2 <100mg/Nm <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> @5%O <sub>2</sub> | J412-H2 | J416-H2 | J420-H2 |
|---|---------|---------|---------|
| Elektrische Leistung*) (kW)                                 | 600     | 800     | 1000    |
| Thermische Leistung*) (kW)                                  | 690     | 920     | 1150    |
| Elektrischer Wirkungsgrad*)                                 | 40+%    | 40+%    | 40+%    |
| Brennstoffnutzungsgrad*)                                    | 86%     | 86      | 86%     |
| H2 Bedarf (kg/h)  | 45      | 60      | 75      |
| H2 Bedarf (Nm <sup>3</sup> /h)                              | 500     | 667     | 833     |

## Technologie:

- Zylinder selektive Saugrohrenblasung (Port Injection: erf. H2-Druck: 8+bar)
- Individuelle Zylindersteuerung
- Wastegate für Turbolader



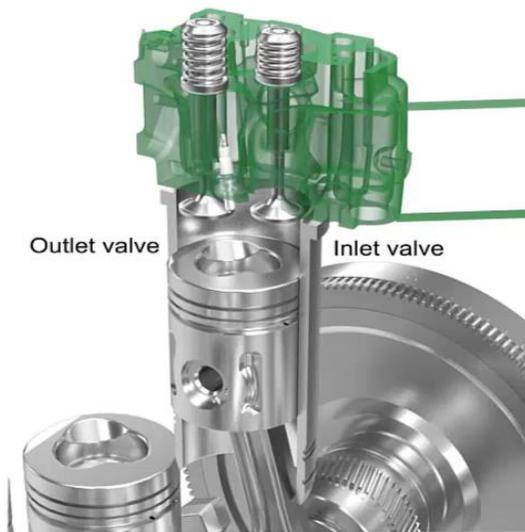
Alternativ kann ein “Dual Fuel Motor” – 100% konventionelles Gas / 100% H2 – angeboten werden

**H<sub>2</sub>-Motoren-Entwicklung**

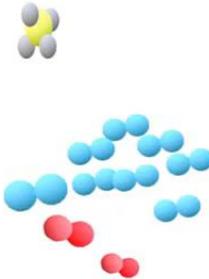
# Unterschiede zwischen konventionellem Gas- und H2-Motor

## Brenngasdosierung & Abgasemissionen

### Konventionelles Gas

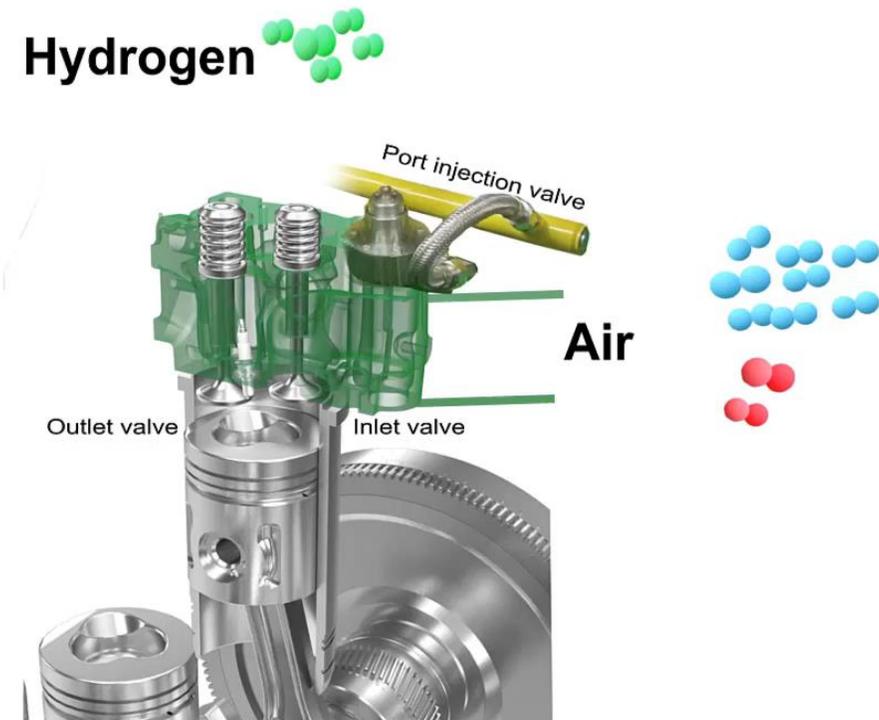


Natural Gas



Air

### Wasserstoff



Hydrogen

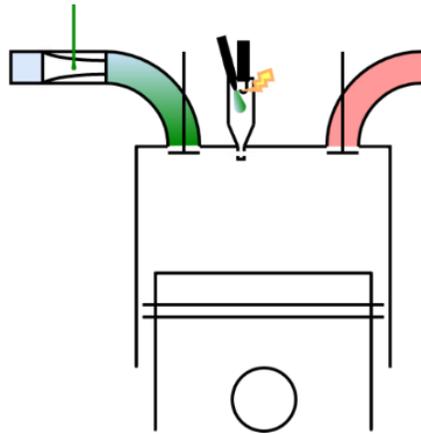


Air

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

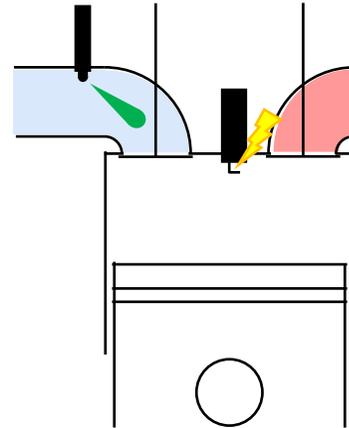
Für konv. Gas & konv. Gas / H<sub>2</sub> - Anwendungen

**Central Gas Mixing (CGM)**



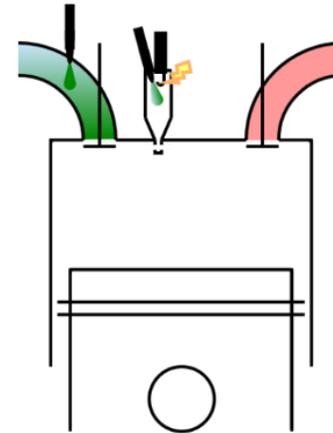
NG / H<sub>2</sub> Mischungen  
(für flexible Gasnetze)

**Port Fuel Injection (PFI) open chamber**



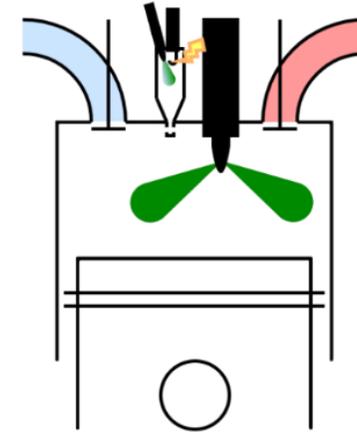
100 % H<sub>2</sub> in PFI  
(Baureihe 4)

**Port Fuel Injection (PFI) Pre-chamber**



Vorkammer für  
größere Brennräume

**Direct Fuel Injection (DFI)**



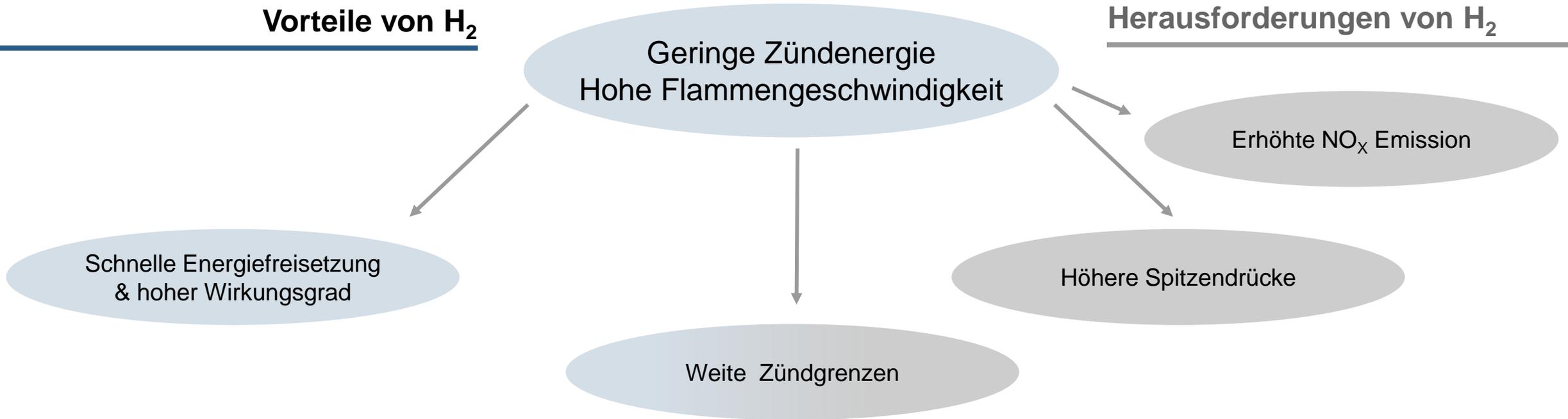
Erhöhung der  
Leistungsdichte

Verschiedene Konzepte sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

# Einfluss der Wasserstoffeigenschaften auf motorische Prozesse

## Vorteile von H<sub>2</sub>

## Herausforderungen von H<sub>2</sub>

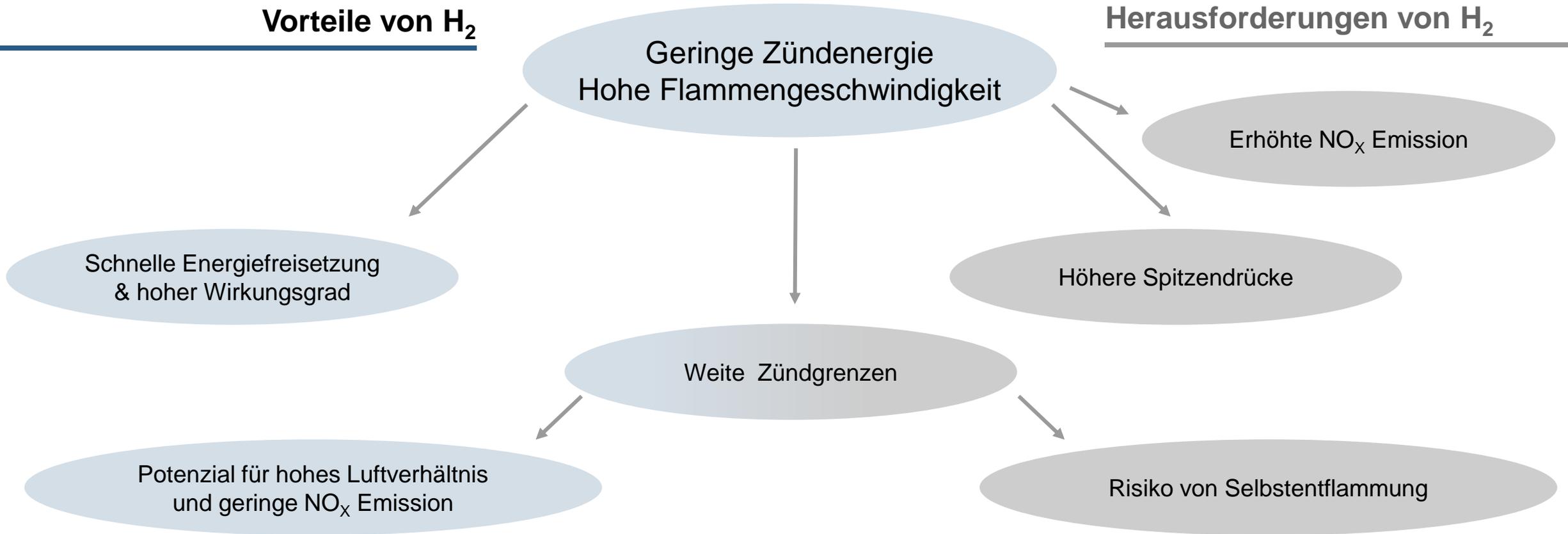


Die vorteilhaften Eigenschaften von Wasserstoff sind gleichzeitig die größten Herausforderungen bei der Entwicklung des Brennverfahrens.

# Einfluss der Wasserstoffeigenschaften auf motorische Prozesse

## Vorteile von H<sub>2</sub>

## Herausforderungen von H<sub>2</sub>

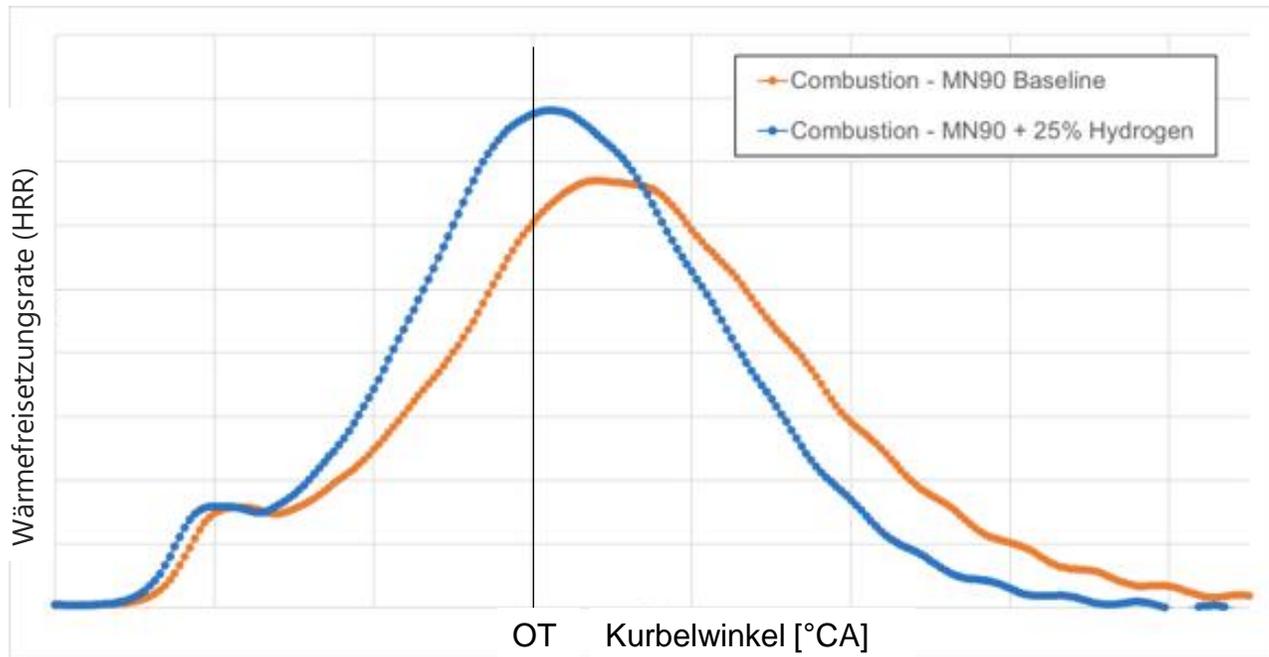


Die vorteilhaften Eigenschaften von Wasserstoff sind gleichzeitig die größten Herausforderungen bei der Entwicklung des Brennverfahrens.

# Erkenntnisse durch Erprobung von H<sub>2</sub> Zumischung

## Zentrale Zumischung

### H<sub>2</sub> Zumischung ohne Anpassung der Betriebsparameter



H<sub>2</sub> Zumischung zu konventionellem Gas bei **konstanten** Motorparametern führt zu:

- schnellere Verbrennung
- Erweiterte Zündgrenzen (Magergrenze)
- höhere Spitzendrücke (= Belastung für den Motor)
- höhere NO<sub>x</sub> Emission, reduzierte CO & HC Emissionen

Eine unkontrollierte Zumischung von H<sub>2</sub> zum Pipelinenetz veränderte die Verbrennungslage und die daraus resultierenden Belastungen für den Motor.

Eine geeignete Motorsteuerung kann durch gezielte Eingriffe die Effekte kompensieren.

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

Ziel: Erhöhung der Leistungsdichte

## Zielgrößen

Homogenität des H<sub>2</sub> / Luft-Gemischs im Brennraum

Hohe Luftverhältnisse zur Reduzierung von NO<sub>x</sub> Emissionen, Steigerung des Wirkungsgrades und Verminderung des Risikos für Selbstentflammungen

Vermeidung von lokalen „hot spots“ im Brennraum

Vermeidung von Schmieröleintrag in den Brennraum

Genauere Einstellung des Betriebspunktes

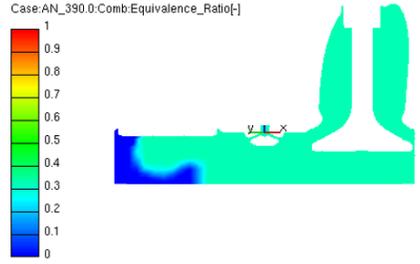
## Optimierungsschritte

- Untersuchung der Gemischbildung via 3D-CFD und Entwicklung verbesserter Konstruktionsvarianten
- Auslegung des Ladungswechsels und der Abgasturboaufladung mit 1D-Performancesimulation
- Zylinderkopfkühlung, Materialentwicklung
- Entwicklung der Core Power Unit (Kolbengruppe)
- Weiterentwicklung von Regelungsalgorithmen

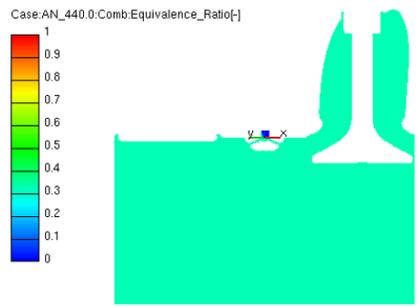
Evaluierung der Optimierungsschritte am Einzylinder-Forschungsmotor → Finale Validierung am Mehrzylindermotor

# Untersuchung der Vorentflammungsneigung

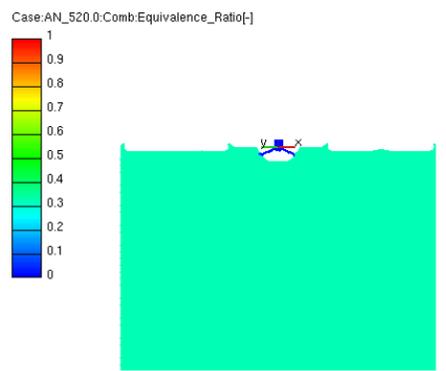
## Zentrale Gemischbildung



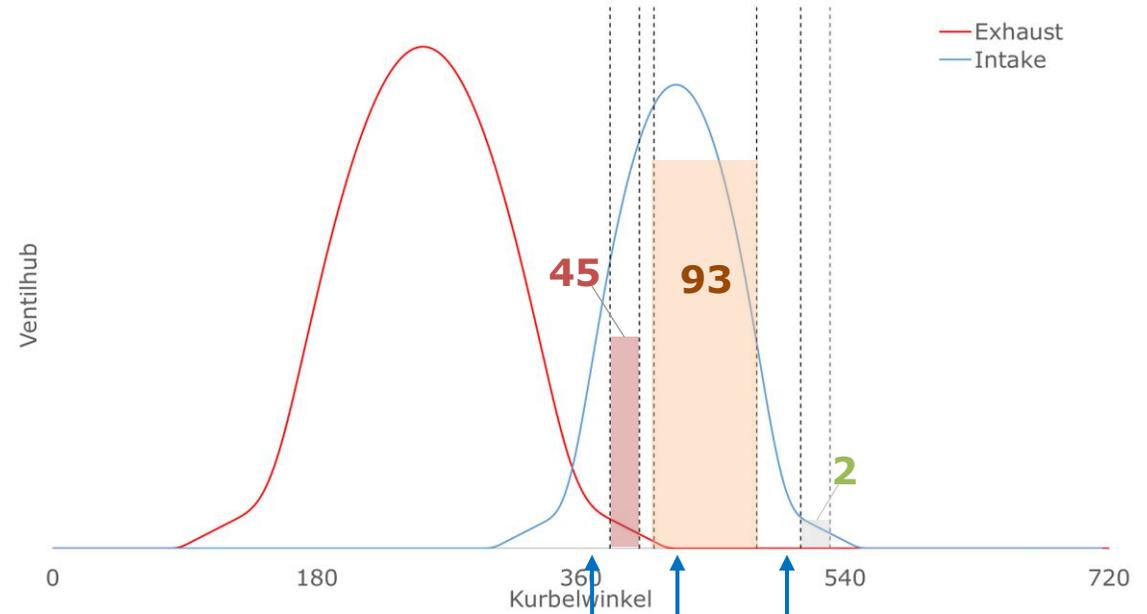
①



②

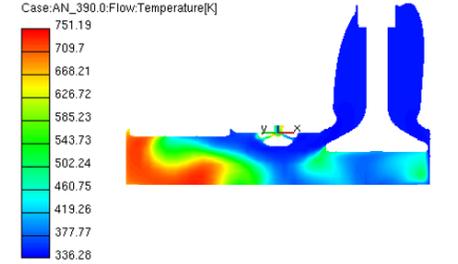


③

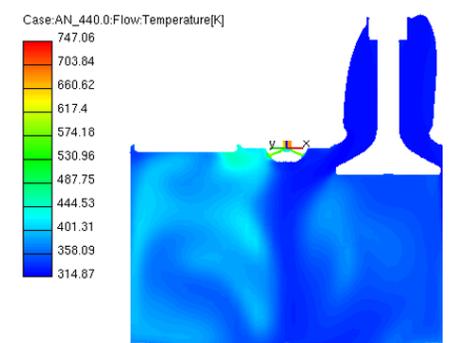


Luftverhältnis

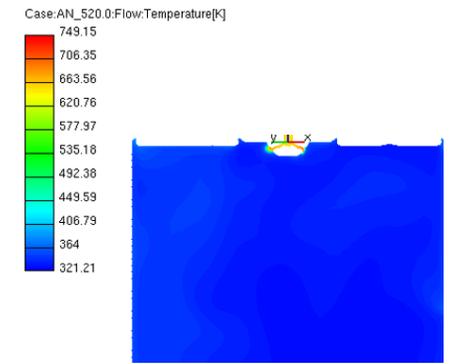
Temperatur



①



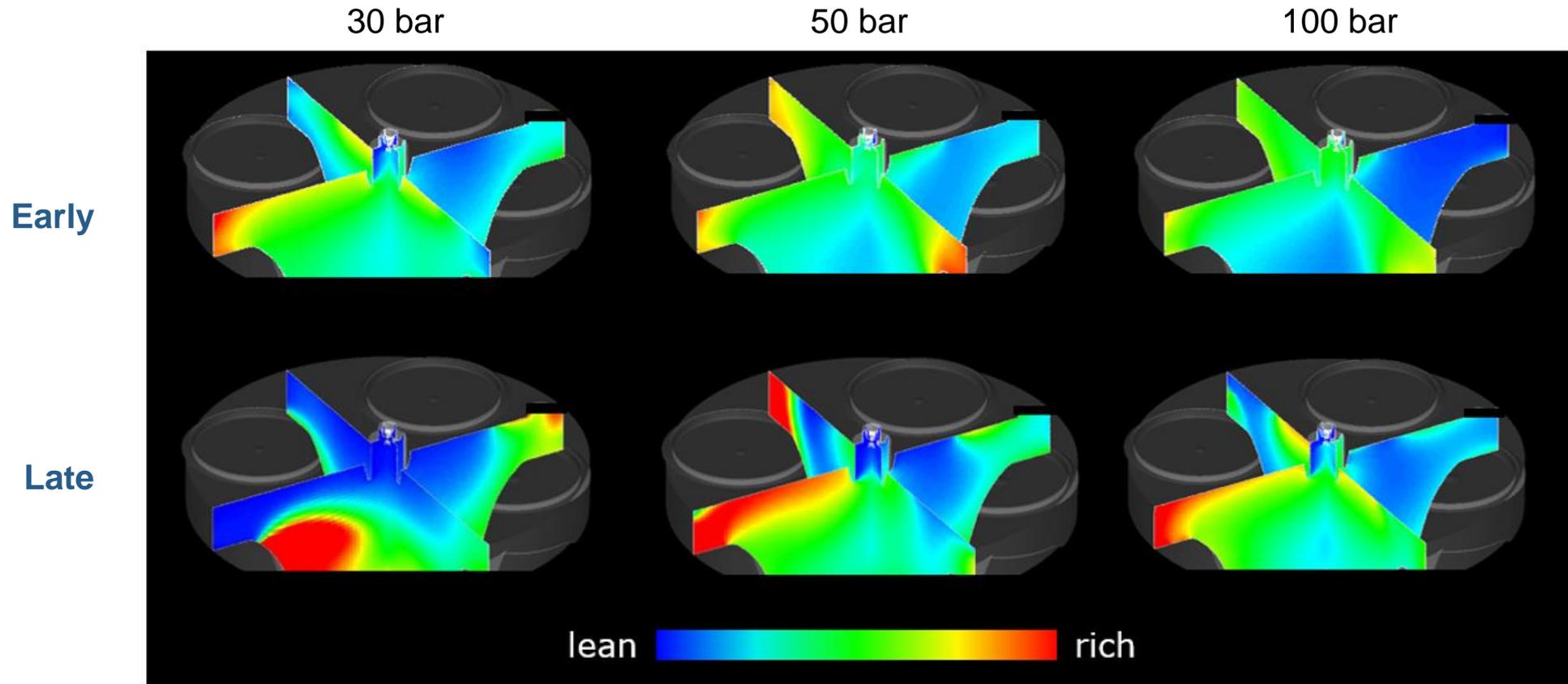
②



③

# Untersuchung der Gemischbildung

## Direkteinblasung



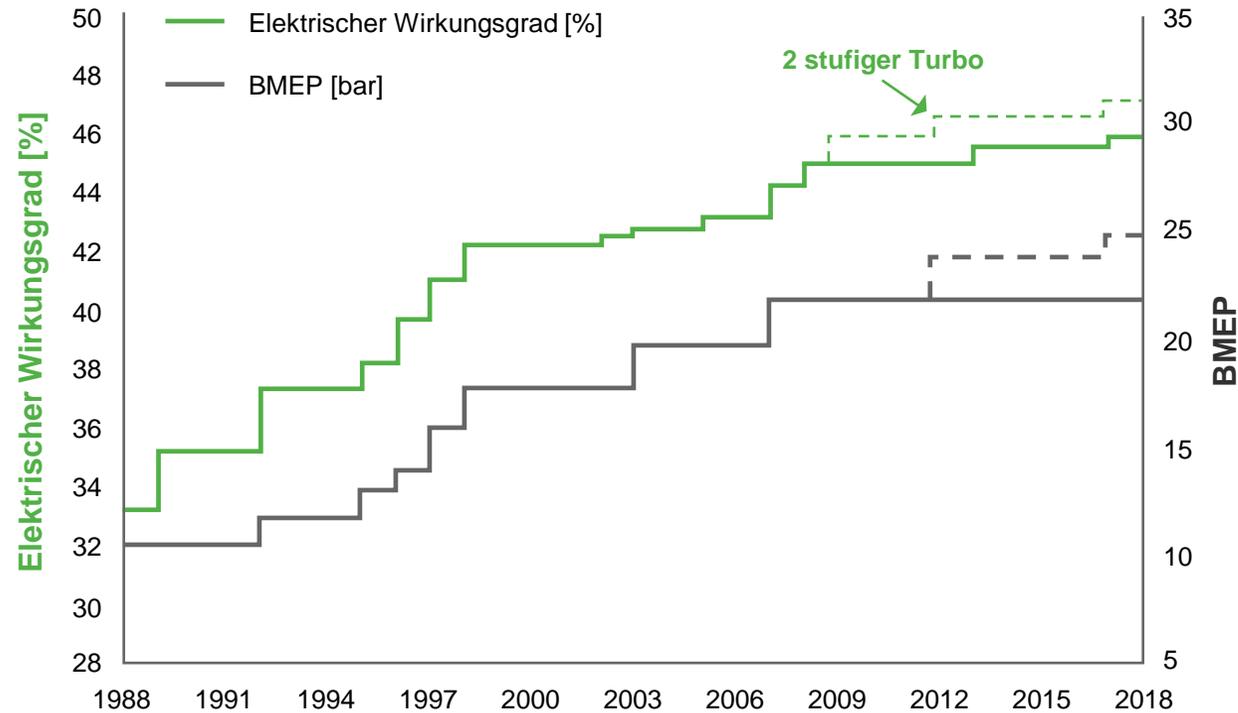
Optimierung der Einspritzstrategien, Düsengeometrie, Brennraum- und Kolbengeometrie notwendig zur Vermeidung von wasserstoffreichen Zonen im Brennraum.

# Der Weg zu CO<sub>2</sub> freien Motoren

## Gasmotor BR 6 ... 30 Jahre Entwicklung

Leistung/Zyl. 2.5 x

Wirkungsgrad 33 -> 47%

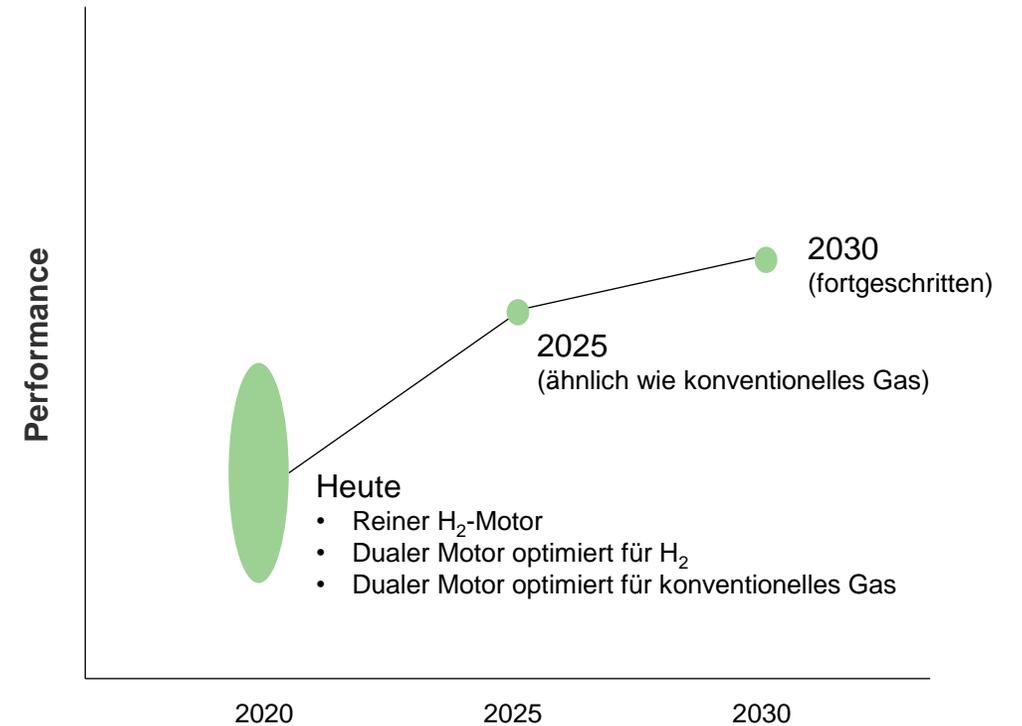


## H2-Motoren Entwicklung in den nächsten Jahren

Gasmotor  
möglich für H<sub>2</sub> Betrieb



Spezieller H2-Motor



**JENBACHER**

**INNIO**