

# MTZ

05 Mai 2024 | 85. Jahrgang

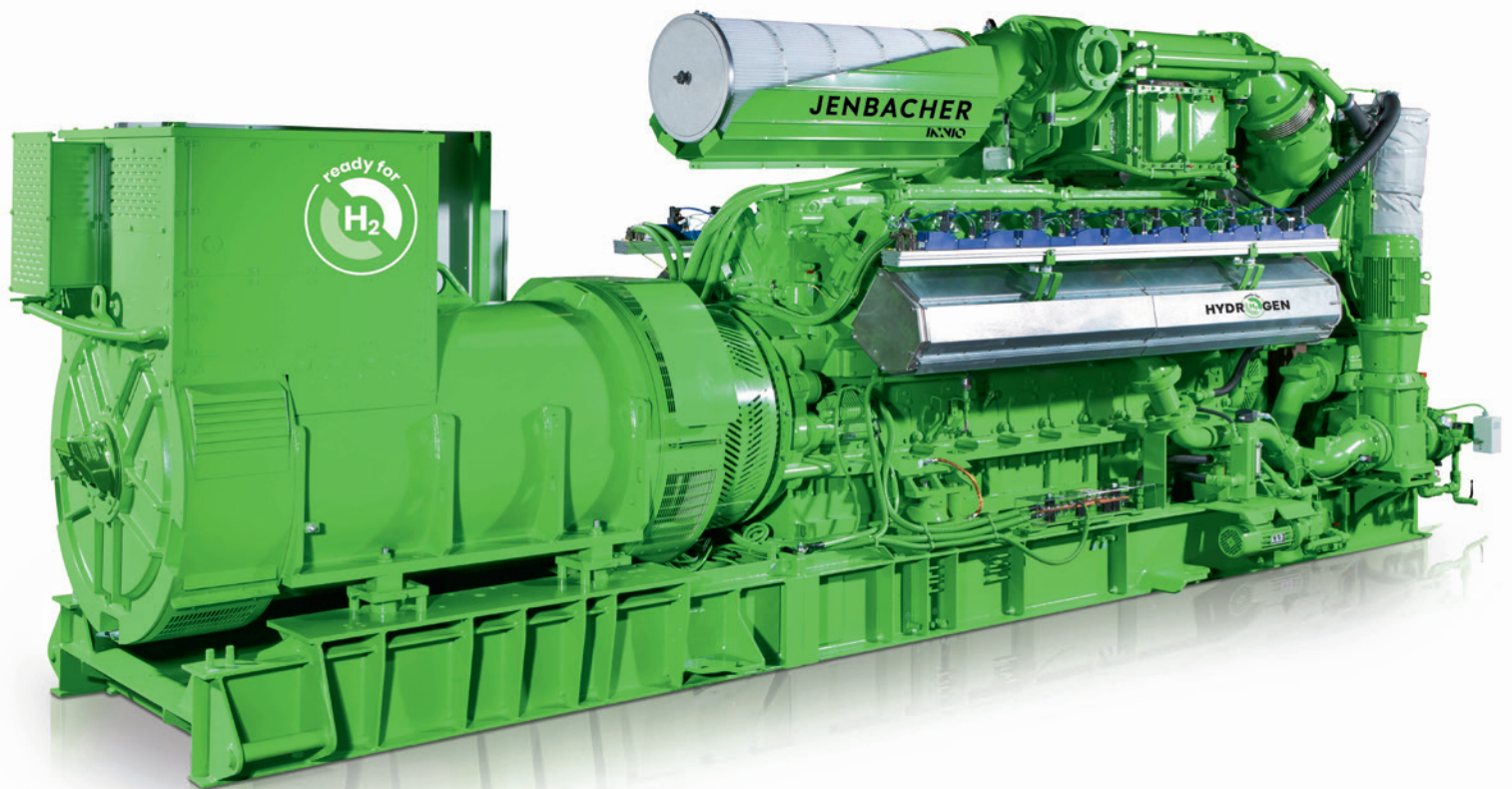
ZEITSCHRIFT FÜR ANTRIEBSTECHNIK

**Sonderdruck**

aus MTZ 05|2024

Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

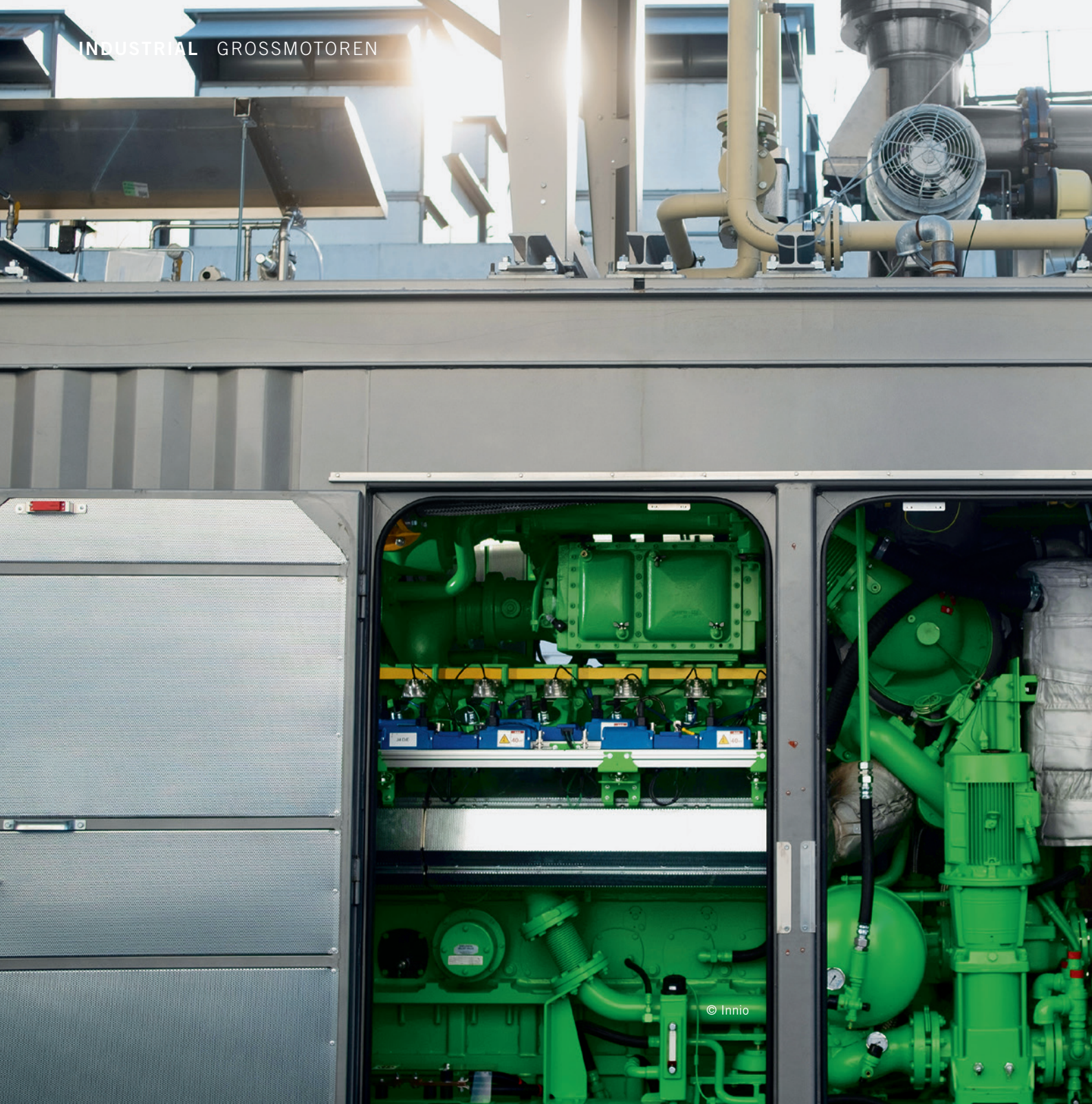


GROSSMOTOREN

# E-Fuels als Schlüsseltechnologie der Dekarbonisierung

JENBACHER | INNIO





VERFASST VON



**Matthias Veltman, M. Eng., MBA**  
ist Engineering Platform Leader für  
E-Fuels und Sondergase der  
Jenbacher Produktmarke der Innio  
Group in Jenbach (Österreich).



**Dr. techn. Dipl.-Ing.  
Stephan Laiminger**  
ist Chief Technologist der  
Jenbacher Produktmarke der Innio  
Group in Jenbach (Österreich).



**Dr. techn. Dipl.-Ing. Michael Url**  
ist Senior Engineer  
der Jenbacher Produkt-  
marke der Innio Group  
in Jenbach (Österreich).



**Dr. techn. Dipl.-Ing. Klaus Payrhuber**  
ist Product Manager Marketing &  
Strategic Product Development der  
Jenbacher Produktmarke der Innio  
Group in Jenbach (Österreich).



# E-Fuels als Schlüsseltechnologie der Dekarbonisierung

Natürlich vorkommender Wasserstoff und per Elektrolyse aus erneuerbarem Strom und Wasser erzeugter Wasserstoff können ohne weitere chemische Umwandlung als Kraftstoff in stationären Motoren genutzt werden. Zudem lassen sich daraus Ammoniak, Methanol oder langkettige Kohlenwasserstoffe gewinnen, die sich ebenfalls als E-Fuels eignen. In den Motoren der Innio Group ermöglichen sie eine CO<sub>2</sub>-neutrale beziehungsweise – bei Verwendung von Wasserstoff und Ammoniak – CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung und sind damit eine treibende Kraft bei der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energieträger.

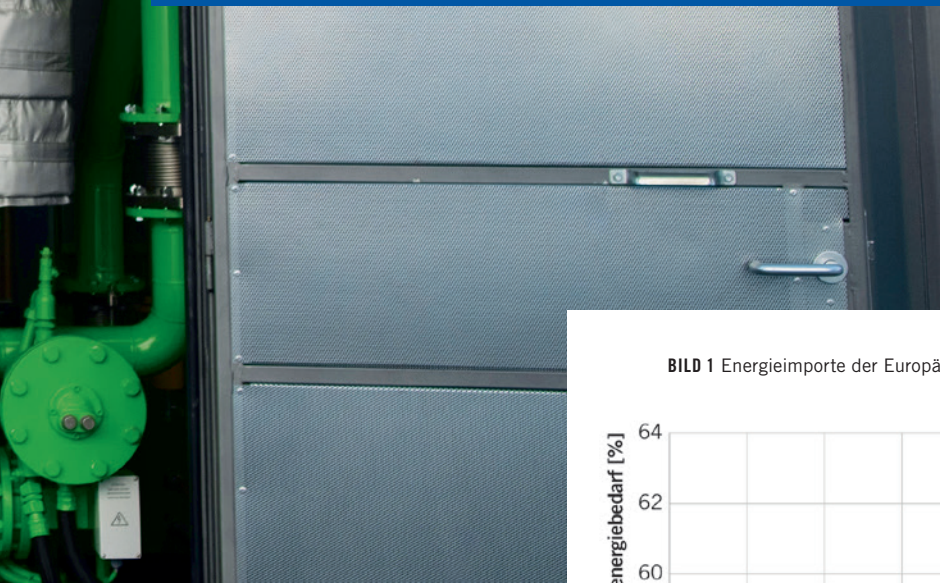
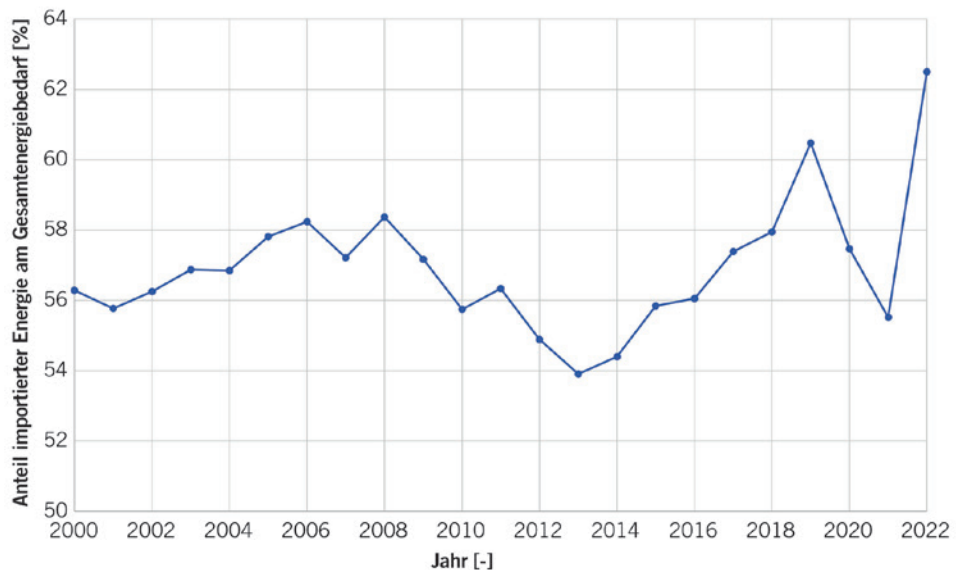


BILD 1 Energieimporte der Europäischen Union (© Innio)



■ Aktuell werden 50 bis 60 % der in der EU benötigten Energiemengen importiert [1], BILD 1. Um die vereinbarten Klimaziele zu erreichen, müssen diese zunehmend aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Da die Länder mit beständigem und hohem Sonnen- oder Windaufkommen zu weit entfernt liegen, um Strom mittels Hochspannungsleitungen zu transportieren, ist die Umwand-

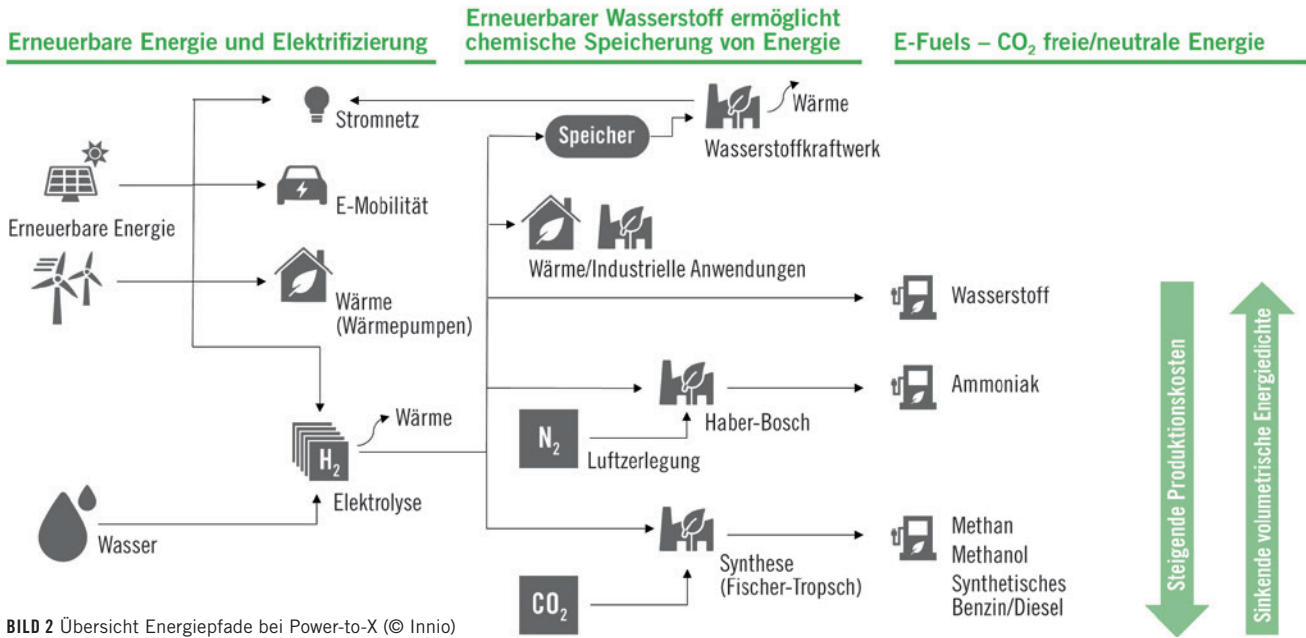


BILD 2 Übersicht Energiepfade bei Power-to-X (© Innio)

lung in chemische Energieträger mittels Power-to-X-Verfahren unausweichlich. Die verschiedenen Pfade zur Erzeugung von Wasserstoff, Ammoniak, Methan, Methanol oder langkettigen Kohlenwasserstoffen sind in BILD 2 dargestellt.

**THERMODYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN VON E-FUELS**

Dieser Beitrag beschränkt sich auf die E-Fuels Methan, Wasserstoff, Ammo-

niak und Methanol. Die Gegenüberstellung ihrer physikalischen Eigenschaften zeigt, dass Wasserstoff einen sehr hohen gravimetrischen Heizwert hat, seine volumetrische Energiedichte jedoch sehr gering ist, TABELLE 1. Dies bedeutet eine große Herausforderung für den Transport und die Tanksysteme für mobile Anwendungen, da größere Mengen Wasserstoff nur unter großem Druck oder unter tiefkalten Bedingungen in flüssiger Form sinnvoll gelagert

und transportiert werden können. Für größere Strecken wird Wasserstoff deshalb in Ammoniak oder Methanol überführt. Beide Stoffe können leicht verflüssigt werden und weisen unter den typischen Lagerbedingungen eine deutlich höhere volumetrische Energiedichte auf als verflüssigter Wasserstoff. Zudem zeigt TABELLE 1 die wesentlichen physikalischen Eigenschaften für die Beurteilung einer motorischen Nutzung von E-Fuels. Trotz unterschiedlichem volumetrischen

Physikalische Eigenschaft	Einheit	Methan (CH <sub>4</sub> )	Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Methanol (CH <sub>3</sub> OH)
Dichte (bei typischen Lagerbedingungen)	kg/Nm <sup>3</sup>	CNG: 192/ LNG 422	Druck 20,54/ kryogen 70,85	626	786,3
Heizwert	MJ/kg	50	120	18,8	19,5
Energiedichte (bei typischen Lagerbedingungen)	MJ/l	CNG: 9,6/ LNG: 21,1	Druck 2,46/ kryogen 8,5	11,78	15,33
Energieinhalt der Luft-Kraftstoff-Mischung (λ = 1/λ = 2/λ = 3)	MJ/m <sup>3</sup>	3,06/1,60/1,09	2,87/1,68/1,19	2,81/1,58/1,10	3,08/1,64/1,12
Zündverzug (λ = 1, T = 1200 K, ρ = 30 bar)	ms	1,33	0,11	~ 40	-
Laminare Flammgeschwindigkeit (λ = 1, T = 300 K, ρ = 1 bar)	m/s	0,37	2,1	0,067	0,42
Minimale Zündenergie	mJ	0,28	0,016	8	0,14
Selbstentzündungstemperatur	K	859	780	924	737
Zündgrenzen (λ/volumetrisch)	-/ Vol.-%	0,53-2,1/ 4,4-16,5	0,15-10,5/ 4,7-75	0,7-1,6/ 15-28	0,25-1,95/ 6,7-36

TABELLE 1 Physikalische Eigenschaften von E-Fuels (© Innio)

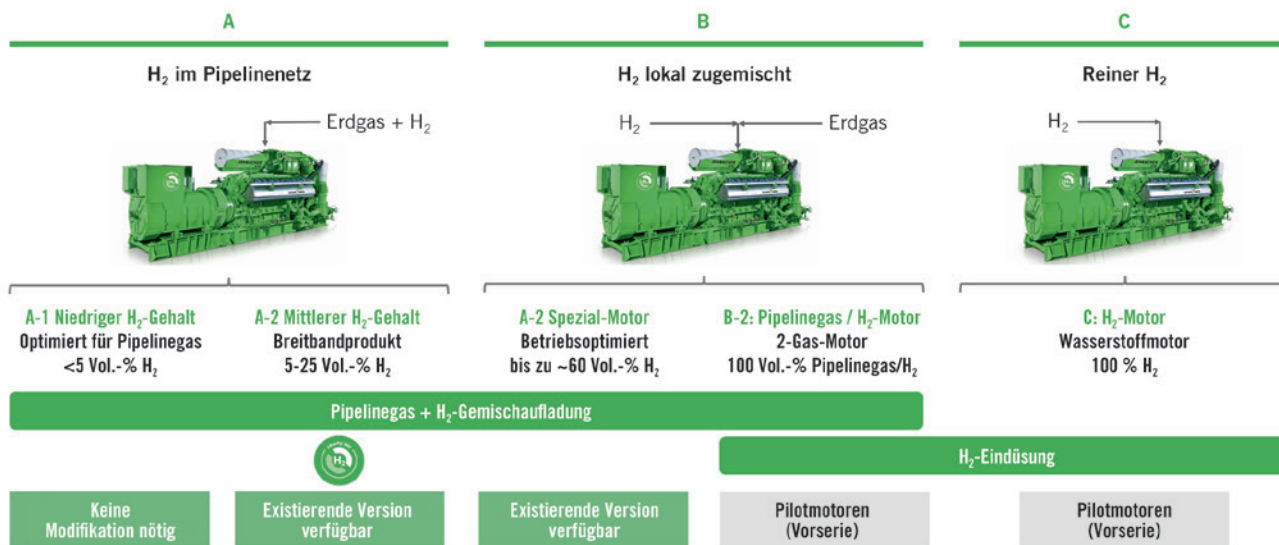


BILD 3 Wasserstoff-Produktportfolio von Jenbacher (© Innio)

Energiegehalt weisen sie alle eine akzeptable Energiedichte für die typischen Luft-Kraftstoff-Mischungen auf.

### NUTZUNG VON WASSERSTOFF IN MOTOREN

Es gibt unterschiedliche Anwendungsfälle für Wasserstoff in modernen Großmotoren: von der Beimischung in das bestehende Erdgasnetz bis hin zu einem Betrieb mit 100 % Wasserstoff. In **BILD 3** erfolgt zusätzlich eine Kategorisierung anhand der Wasserstoffkonzentration: Kategorie A beschreibt Motorsysteme, die eine Mischung aus Erdgas und maximal 25 Vol.-% Wasserstoff aus dem Netz beziehen. In Kategorie B erfolgt die Mischung von Wasserstoff und Erdgas lokal, und Kategorie C beschreibt einen Betrieb mit 100 % Wasserstoff. Die Motorsysteme unterscheiden sich insbesondere bei der Wahl des Kraftstoffsystems und in Abhängigkeit der Wasserstoffkonzentration.

Moderne Jenbacher-Erdgasmotorsysteme der Innio Group können ohne jegliche Modifikation mit bis zu 5 Vol.-% Wasserstoff betrieben werden, da dies die Brenneigenschaften von Erdgas nur unwesentlich beeinflusst. Die bestehende, für Erdgas optimierte, Motorsteuerung

kann diese Einflüsse kompensieren (Kategorie A-1). Steigt die Wasserstoffkonzentration über 5 bis auf maximal 25 Vol.-% an (Kategorie A-2), müssen ein Wasserstoffsensoren und eine entsprechende Kompensationssoftware nachgerüstet werden. Dies ist bei allen aktuellen Jenbacher-Motorvarianten möglich und kompensiert die durch die Wasserstoffbeimischung bedingte, schneller werdende Verbrennung, sodass die Motorbelastung und die Emissionen weiterhin innerhalb der zulässigen Werte bleiben [2].

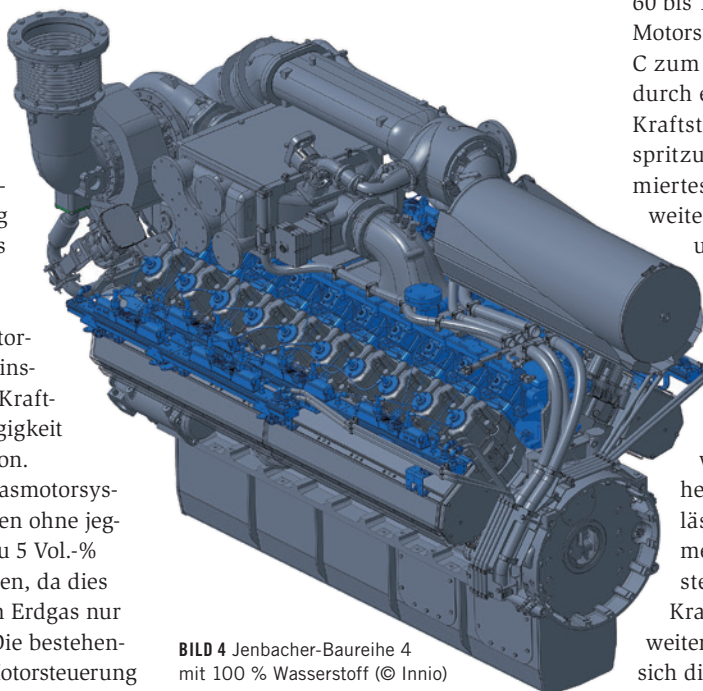


BILD 4 Jenbacher-Baureihe 4 mit 100 % Wasserstoff (© Innio)

Bei einer lokalen Zumischung von Wasserstoff sind zwei Szenarien zu unterscheiden: Bei Beimischungen von bis zu 60 Vol.-% Wasserstoff kommen Motorsysteme zum Einsatz, die speziell für die Verwendung von wasserstoffreichen Gasen optimiert wurden. Solche Jenbacher-Motoren sind bereits bei der Verwertung von Holz- und Synthesegasen im Einsatz. Die Innio Group verfügt über langjährige Erfahrungen auf diesem Gebiet.

Soll die Wasserstoffbeimischung 60 bis 100 Vol.-% betragen, kommen Motorsysteme der Kategorie B-2 und C zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch ein dediziertes Wasserstoff-Kraftstoffsystem mit Saugrohrinspritzung, ein auf Wasserstoff optimiertes Brennverfahren und ein weiterentwickeltes Motorsteuersystem mit zylinderdruckbasierter Steuerung aus. Wesentlicher Vorteil der Saugrohrinspritzung ist, dass Wasserstoff erst unmittelbar vor dem Eintritt in den Brennraum beigemischt wird, was ein wesentliches Sicherheitsmerkmal darstellt. Zudem lässt sich dabei die Kraftstoffmenge zylinderindividuell einstellen. Da das konventionelle Kraftstoffsystem des Erdgasmotors weiterverwendet werden kann, ergibt sich die Möglichkeit eines Dual-Fuel-



Betriebs, bei dem Wasserstoff und Erdgas direkt im Motor gemischt werden. Dies ermöglicht einen Betrieb mit variierendem Wasserstoffgehalt ohne zusätzliche externe Einrichtung zur Kraftstoffmischung sowie ein Umschalten von 100 % Wasserstoff auf 100 % Erdgas. Dadurch kann der Motorbetrieb auch bei schwankender Wasserstoffverfügbarkeit stets gewährleistet werden.

**BILD 4** zeigt einen Motor der Jenbacher-Baureihe 4 in der Dual-Fuel-Ausführung mit Saugrohr-Kraftstoffsystem und Zündsystem zur Verwendung mit 100 % Wasserstoff. Bei diesem Magerbrennverfahren wird die wesentlich schnellere Brennrate und die höhere Reaktivität von Wasserstoff durch einen entsprechend höheren Luftüberschuss und eine Anpassung des Zündzeitpunkts kompensiert, sodass sich die Brennraten dem konventionellen Erdgasbetrieb annähern. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist, dass bei entsprechend hohem Luftüberschuss auch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Motors deutlich vermindert werden.

### NUTZUNG VON AMMONIAK IN GROSSMOTOREN

Bei dem untersuchten Ammoniakbrennverfahren hat sich das Engineering Team für die Beimischung von Wasserstoff und die Verwendung einer Zündkerze zur sicheren Entzündung sowie zur Verbrennungsbeschleunigung entschieden. Wird Ammoniak katalytisch aufgespalten, entfällt die Notwendigkeit eines zweiten Kraftstoffs, was nicht nur die Infrastruktur und Logistik vereinfacht, sondern auch eine vollständige Dekarbonisierung ermöglicht.

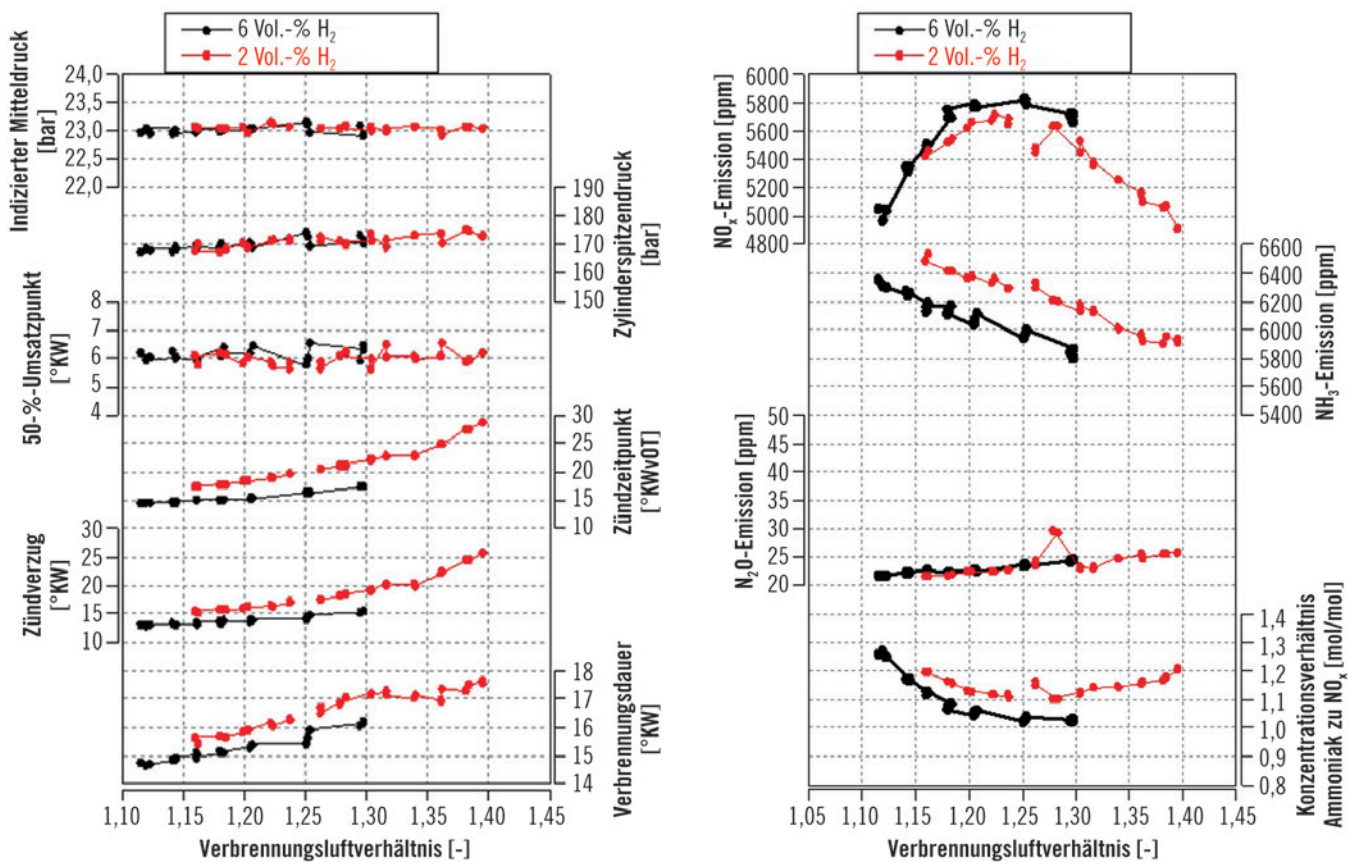
Das Konzept wurde in einem schnelllaufenden Viertakt-Einzyylinder-Versuchsmotor hinsichtlich des Einflusses des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses sowie unterschiedlicher Wasserstoffkonzentrationen und Zündzeitpunkte erfolgreich untersucht. Mit dem beschriebenen Technologiekonzept konnten indizierte Mitteldrücke von bis zu 25 bar bei einer minimalen Zumischung von 2 bis 6 % Wasserstoff erzielt werden. In **BILD 5** sind die wesentlichen Ergebnisse bei einem indizierten Mitteldruck

von 23 bar dargestellt. Eine Erhöhung des Wasserstoffanteils bei konstantem Luftüberschuss führt grundsätzlich zu einem kürzeren Zündverzug und einer schnelleren Umsetzung des Luft-Ammoniak-Gemischs im Brennraum. Während die Wasserstoffkonzentration nur einen geringen Einfluss auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen hat, zeigt sich ein starker Einfluss des Luftüberschusses.

Die beobachteten Ergebnisse sind sehr vielversprechend, da mit dem gewählten Konzept bei sehr geringem Wasserstoffanteil im Kraftstoff ein stabiler Motorbetrieb mit hoher Leistungsdichte möglich ist. Die beobachteten Emissionen von Ammoniak und Stickoxiden können mit einem handelsüblichen SCR-System behandelt werden [3].

### INVESTITIONSSICHERHEIT UND ZERTIFIZIERUNG

Im Oktober 2023 hat der TÜV Süd das Jenbacher-Wasserstoffmotorenkonzept für die Baureihen 4 und 6 im Betrieb mit 100 % Wasserstoff basierend auf dem Leitfaden „ $\text{H}_2$ -Readiness of Gas



**BILD 5** Ausgewählte Ergebnisse des Versuchsbetriebs mit Ammoniak und Wasserstoffbeimischung (© Innio)

Engine Power Plants“ auditiert und zertifiziert. Das verliehene Zertifikat berücksichtigt den aktuellen Stand der Technik bezüglich des Einsatzes von Wasserstoff und dessen Auswirkungen auf die Hauptkomponenten eines Motorkraftwerks. Neben Neuinstallationen schließt es auch das von der Innio Group entwickelte Konzept zur nachträglichen Umrüstung von Großmotoren auf den Betrieb mit 100 % Wasserstoff mit ein.

Diese Zertifizierung unterstreicht den Anspruch der Innio Group, ihren Kunden Motorsysteme zu bieten, die bereits heute für den Betrieb mit Wasserstoff gerüstet sind. Schöbn heute können alle Jenbacher-Baureihen für den Betrieb mit 25 Vol.-% Wasserstoff bezogen oder entsprechend nachgerüstet werden. Zu einem späteren Zeitpunkt kann eine nachträgliche Umrüstung auf den Betrieb mit 100 % Wasserstoff erfolgen. Dies bietet gerade bei den aktuellen Versorgungsunsicherheiten während des Wasserstoffhochlaufs eine entscheidende Investitionssicherheit.

## ZUSAMMENFASSUNG

Moderne Großmotoren können einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten – speziell im Betrieb mit grünem Wasserstoff und Ammoniak als vollständig CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen.

Wasserstoff hat hervorragende Brenneigenschaften und kann in modernen Motorsystemen sowohl gemischt mit Erdgas als auch in reiner Form eingesetzt werden. Zwar ermöglichen der

Ausbau des europäischen Wasserstoffnetzwerks und die Umwidmung von bestehenden Erdgasnetzen die flächendeckende Verteilung von Wasserstoff. Der interkontinentale Transport von Erdgas erfolgt heute immer öfter in flüssiger Form als LNG, für Wasserstoff ist dieser Transport allerdings wesentlich komplizierter und teuer. Aufgrund seiner sehr viel einfacheren Verflüssigung bietet sich für weitere Transportstrecken und größere Transportmengen jedoch Ammoniak an. Dieses hat zudem den Vorteil, dass für seine Synthese kein CO<sub>2</sub> benötigt wird.

Die Innio Group hat bereits Lösungen zur Nutzung von Wasserstoff und Ammoniak in Großmotoren entwickelt. Mit der Jenbacher-Baureihe 4 steht heute ein Motorsystem für den Einsatz von 100 % Wasserstoff zur Verfügung. Für die Nutzung von Ammoniak wurde ein erstes Konzept ohne Bedarf eines zusätzlichen Zündkraftstoffs erfolgreich an einem Forschungsmotor demonstriert, das in den kommenden Jahren weiter optimiert werden wird. Ab 2025 plant die Innio Group die Einführung weiterer Lösungen zur Nutzung von 100 % Wasserstoff mit größeren Motoren mit mehreren Megawatt Leistung. Ziel ist dabei auch, die spezifische Leistungsdichte von Wasserstoffmotoren an die von modernen Erdgasmotoren anzunähern, sodass bei einer späteren Umrüstung eines bestehenden Kraftwerks von Erdgas- auf Wasserstoffbetrieb keine größeren Kompromisse eingegangen werden müssen.

## LITERATURHINWEISE

- [1] European Union / Eurostat. Online: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_ind\\_id/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_id/default/table?lang=en), aufgerufen: 30. Januar 2024
- [2] Leroux, C.; Böwing, R.; Hochfilzer, B.; Zuschnig, A.; Behr, M.: Hydrogen in the Gas Network – Challenges and Solutions for High Performance Engines for Power Generation. 17. Internationale MTZ-Fachtagung „Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren“, Donaueschingen, 2022
- [3] Laiminger, S.; Payrhuber, K.; Kunz, A.; Wermuth, N.; Wimmer, A.: The role of gas engines in a future energy market with sustainable fuels. 30. CIMAC Congress, Busan, 2023

---

## DANKE

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das TransHyDE Projekt des Deutschen Bundesministeriums für Forschung und Bildung (BMBF), in dem mehr als 80 Partner aus Industrie, Forschung und Lehre Technologien für eine zukünftige Wasserstoff-Wirtschaft entwickeln. Die Innio Group ist Teil des Campfire-Bündnisses, das Technologien für auf Ammoniak basierende Energiesysteme erforscht.

---

## IMPRESSUM

Sonderausgabe 2024 in Kooperation mit  
INNIO Jenbacher GmbH & Co OG, Achenseestraße 1-3, 6200 Jenbach;  
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Postfach 1546, 65173  
Wiesbaden, Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754,  
USt-IdNr. DE81148419

## GESCHÄFTSFÜHRER:

Stefanie Burgmaier | Andreas Funk | Joachim Krieger

**DRUCK:** Print Produktion-Service W. Hiese GmbH,  
Tilsiter Weg 9, 61273 Wehrheim

**TITELBILD:** © INNIO Jenbacher GmbH & Co OG



# WASSERSTOFF



Ermöglicht Ihnen den Übergang zu einer grüneren Zukunft



**Wir sind bereit für H<sub>2</sub>.**  
Seien es auch Sie!

Wir bei INNIO\* Group entwickeln kontinuierlich flexible, skalierbare und resiliente Energielösungen, die Sie dabei unterstützen, Energie nachhaltig zu erzeugen und effizient zu managen.

Unsere Jenbacher\*-Motoren sind eine Investition in die Zukunft. Denn sie können mit einem Mix aus konventionellen Gasen und Wasserstoff oder auch mit 100% Wasserstoff betrieben werden, sobald genug davon zur Verfügung steht. Nehmen Sie Ihre „Ready for H<sub>2</sub>“\*\* Jenbacher Anlage jetzt in Betrieb und rüsten Sie sie später auf 100% Wasserstoff um. Damit investieren Sie in eine nachhaltige Energielösung, die schon heute funktioniert und eine grünere Zukunft beschleunigt!

Reden wir über Ihre Energietransformation.  
[jenbacher.com/de](https://jenbacher.com/de)

\* &  weisen auf eine Marke hin.

\*\* "Ready for H<sub>2</sub>" bedeutet, dass die Jenbacher Anlage grundsätzlich in Zukunft auf den Betrieb mit bis zu 100% Wasserstoff umgerüstet werden kann. Details wie Kosten und Zeitrahmen für eine solche Umrüstung können variieren und müssen individuell geklärt werden.

Jenbacher is part of the INNIO Group

**JENBACHER**

**ENERGY SOLUTIONS.**  
EVERYWHERE, EVERY TIME.