www.dvgw.de

# $H_2$-Qualität und Kosten: Was ist das volkswirtschaftliche Optimum?

## Zentrale Erkenntnisse aus dem DVGW-Forschungsprojekt H2-Optimum

H2 Lunch & Learn, 12.11.2026, Online

Björn Munko, Leiter Gastechnologien und Energiesysteme, DVGW e. V.

# Ausgangslage und Motivation

- **Netze** und **Speicher** sind **Schlüsselelemente** der Wasserstoffwirtschaft**,** als Bindeglieder und Flexibilitätsoption zwischen Bereitstellung und Nutzung.
- Der transportierte oder gespeicherte Wasserstoff ($H_2$) kann entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der **Erzeugung** und dem **Import** bis hin zur **Nutzung** – **unterschiedliche Begleitstoffe** aufnehmen.
- Die **Gasbeschaffenheit variiert** entlang der Wertschöpfungskette, und verschiedene Pfade bringen jeweils spezifische Begleitstoffe mit sich.
- Gleichzeitig haben **Anwendungen** unterschiedliche Anforderungen an die Gasqualität.
- Jede Partei entlang der $H_2$ -Wertschöpfungskette muss daher Verantwortung hinsichtlich der **Einhaltung einer zu definierenden $H_2$-Beschaffenheit** übernehmen.
- **Gasaufbereitungsanlagen** werden somit an bestimmten Punkten der Wertschöpfungskette anzutreffen sein.
- Um den $H_2$-Hochlauf zu unterstützen, bedarf es einer **finanziell tragbaren und technisch sinnhaften Festlegung der $H_2$-Gasqualität in Gasnetzen.**

# Das Forschungsprojekt $H_2$-Optimum hat die Fragen zu zusätzlichen Kosten im Kontext der Gasqualität adressiert

## Zentrale Fragestellungen:

- Welche **zusätzlichen Kosten** entstehen durch die Einhaltung einer definierten Gasbeschaffenheit und die damit verbundene Aufbereitung?
- Welche **H2-Qualität** ist im Wasserstoffnetz aus technischer und volkswirtschaftlich ökonomischer Sicht das Optimum?

**$H_2$-Optimum** – ein Forschungsprojekt im Rahmen des DVGW-Innovationsprogramms Wasserstoff



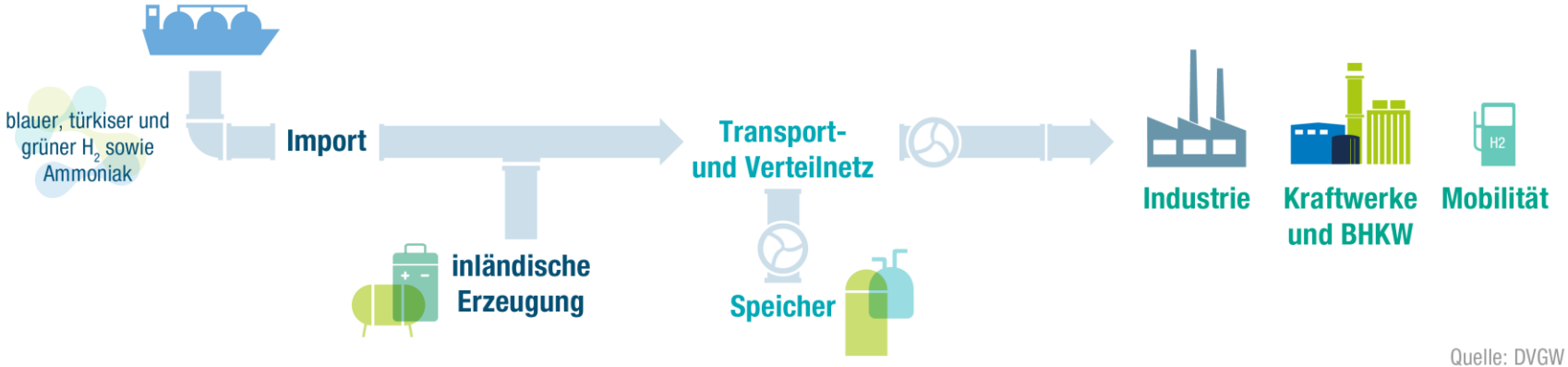

*Quelle: FNB Gas*

# Methodik und Umfang der Analyse

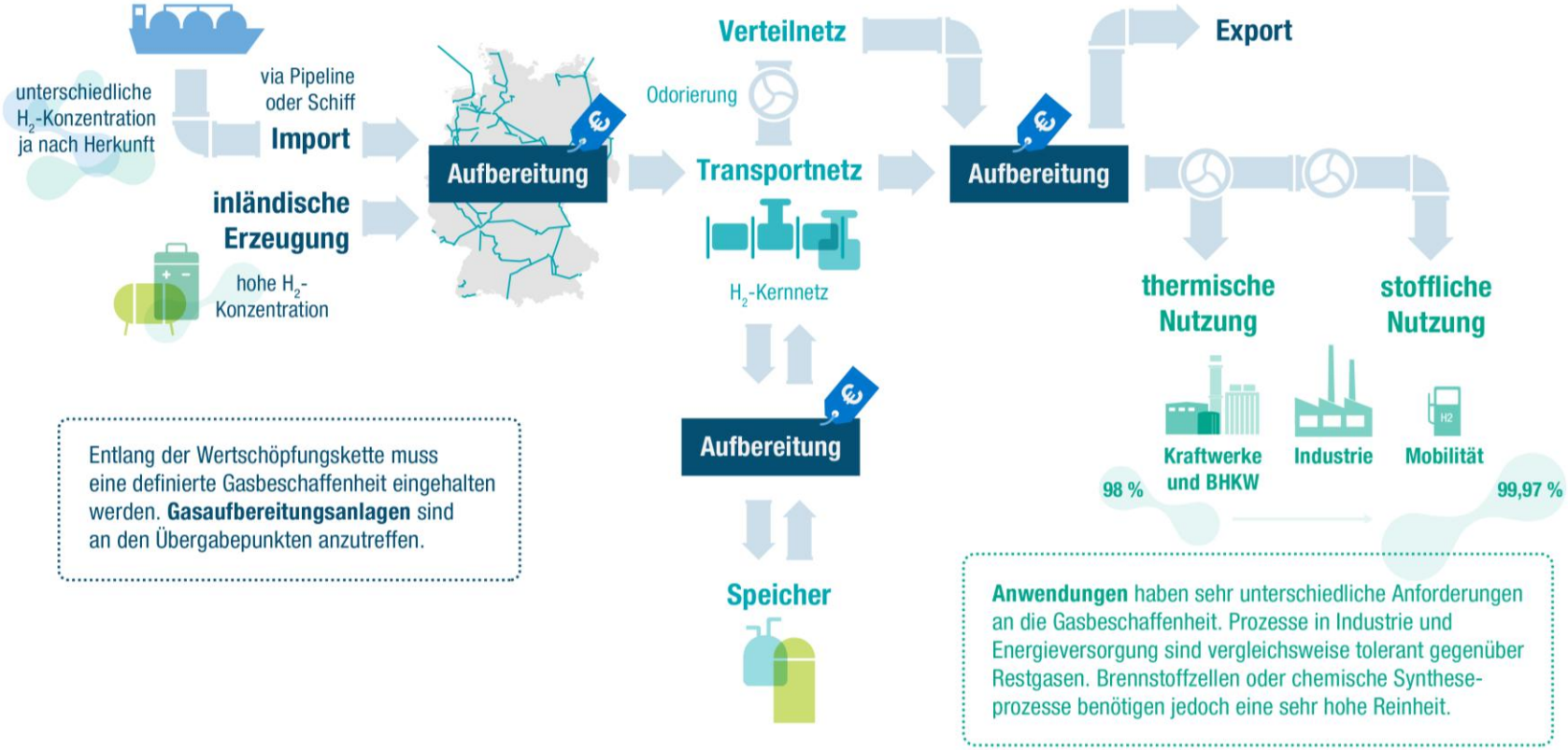
# Methodik und Umfang der Analyse

## Was wurde untersucht?

- modellgestützte techno-ökonomische Bewertung verschiedener $H_2$-Qualitätsstufen
- Bewertung des Aufbereitungsbedarfs für jede Stufe der Wertschöpfung sowie daraus resultierende jährliche Kosten (CapEx + OpEx)
- Verteilung der Kosten für Aufbereitung und Qualitätssicherung entlang der Wertschöpfungskette (Erzeugung/Import → Speicher →Transportnetz (FNB) → Verteilnetz (VNB) → Verbraucher)



# Methodik und Umfang der Analyse: Was wurde im Rahmen von H2-Optimum betrachtet?




Entlang der Wertschöpfungskette muss eine definierte Gasbeschaffenheit eingehalten werden. **Gasaufbereitungsanlagen** sind an den Übergabepunkten anzutreffen.

**Anwendungen** haben sehr unterschiedliche Anforderungen an die Gasbeschaffenheit. Prozesse in Industrie und Energieversorgung sind vergleichsweise tolerant gegenüber Restgasen. Brennstoffzellen oder chemische Synthese-prozesse benötigen jedoch eine sehr hohe Reinheit.

Quelle: DVGW

# Methodik und Umfang der Analyse: Eingangsgrößen und Datenbasis der Berechnungen

## Eingangsgrößen der Berechnungen:

- Herkunft und Zusammensetzung des $H_2$
- Verunreinigungen aus Transport und Speicher
- geeignete Aufbereitungsverfahren
- Betriebsstunden, Anlagenzahl und -größe
- CapEX und OpEX
- Aufteilung des $H_2$ auf verschiedene Anwender

## Datenbasis:

- Wasserstoff-Qualitätsniveaus gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 260 und europäischen Diskussionen
- Szenarien und Mengengerüste des Netzentwicklungsplans (NEP) für die Stützjahre 2037 und 2045 überführt in ein abstrahiertes Netzmodell

# Methodik und Umfang der Analyse: Betrachtete $H_2$-Qualitätsstufen und Gasbeschaffenheiten

98 99 99,5 99,97

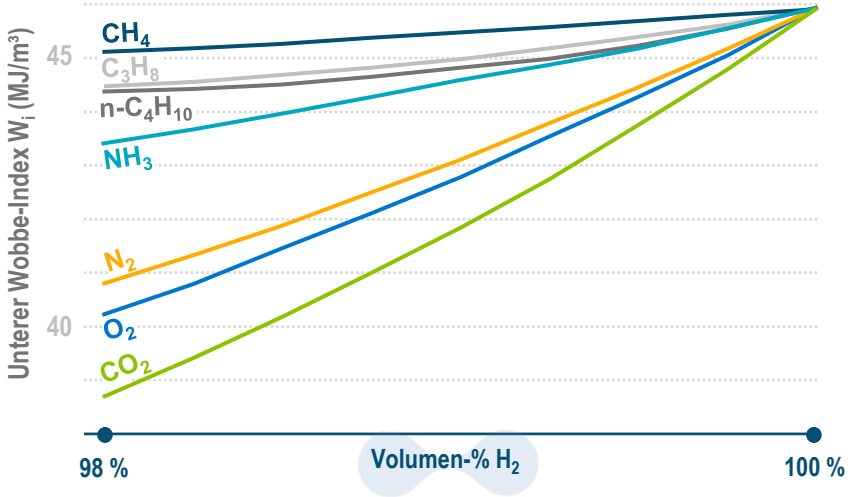
| | LOW | MEDIUM | HIGH | VERY HIGH |
|---|---|---|---|---|
| **$H_2$ in Mol-%** | **≥ 98** | **≈ 99** | **≥ 99,5** | **≥ 99,97** |
| **Begleitgase/ -stoffe** | • höherer max. Anteil an Begleitstoffe bis zu 2 Mol-%<br>• wenige spezifische Grenzwerte für einzelne Stoffe<br>• ohne zusätzliche Einschränkungen der brenntechnisch relevanten Gase | • Begrenzung von Inertgasen Stickstoff, Helium und Argon (< 300 ppm)<br>• spezifische Einschränkungen bei Kohlenwasserstoffen, $CO_2$ und CO<br>• mit spezifischen Einschränkungen bei weiteren kritischen Begleitstoffen | • spezifische Einschränkungen bei $CO_2$ und CO<br>• mit spezifischen Einschränkungen bei weiteren kritischen Begleitstoffen | • insgesamt sehr hohe Reinheit<br>• spezifische Begrenzung von Kohlenwasserstoffen, $CO_2$ und CO<br>• $CH_4$ in begrenztem Umfang (< 100 ppm)<br>• Begrenzung von Inertgasen (< 300 ppm)<br>• mit spezifischen Einschränkungen bei weiteren kritischen Begleitstoffen |
| **Grundlage** | DVGW-Arbeitsblatt G 260 2. Gasfamilie Gruppe A | Eigene Definition | HyNetwork Niederlande | DVGW-Arbeitsblatt G 260 2. Gasfamilie Gruppe D |

*Quelle: DVGW Projekts H2-Optimum; Details siehe Anhang 2 (Seite 27)*

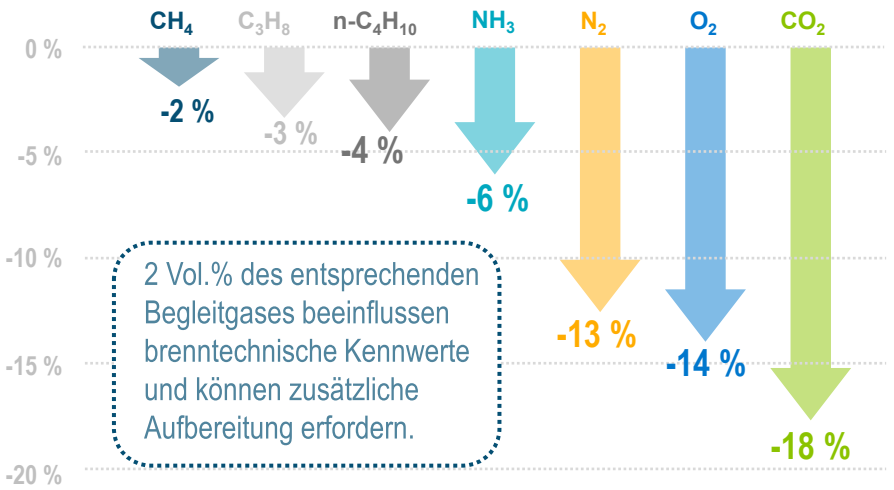
# Methodik und Umfang der Analyse: Warum Begleitstoffe? Einfluss von Inertgasen auf das Verbrennungsverhalten

- Der **Wobbe-Index** ist eine entscheidende Größe für die Festlegung der Anforderungen an die Gasbeschaffenheit. Er misst die Energieabgabe pro Volumeneinheit eines Gases, die durch eine Brennerdüse bei gleichem Druck fließt, und somit die Kompatibilität von Verbrauchsgeräten.
- Inertgase wie Stickstoff (N2) und CO2, aber auch Sauerstoff (O2) haben einen entscheidenden Einfluss und bereits 2 Vol.% **senken den Wobbe-Index** um bis zu 18 Prozent.

**Verhalten des unteren Wobbe-Index mit bis zu 2 Vol.% des jeweiligen Begleitgases**




**Prozentuale Reduktion des unteren Wobbe-Index mit 2 Vol.% des jeweiligen Begleitgases**

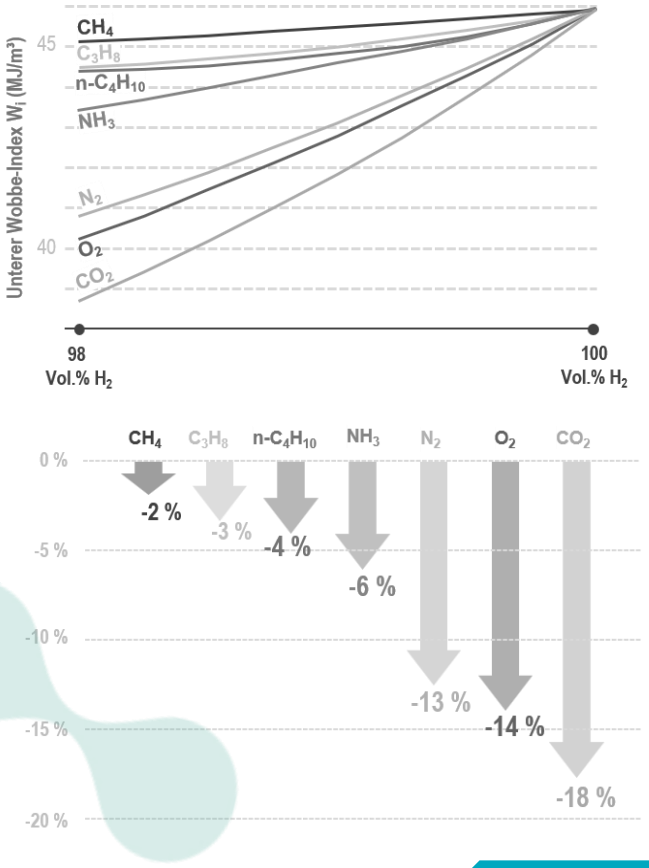



*Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum*

# Sowohl der Wasserstoffgehalt als auch die Begleitstoffe beeinflussen die technische Eignung

**Aus dem Einfluss bestimmter Begleitstoffe auf das Verbrennungsverhalten lässt sich schließen, dass:**

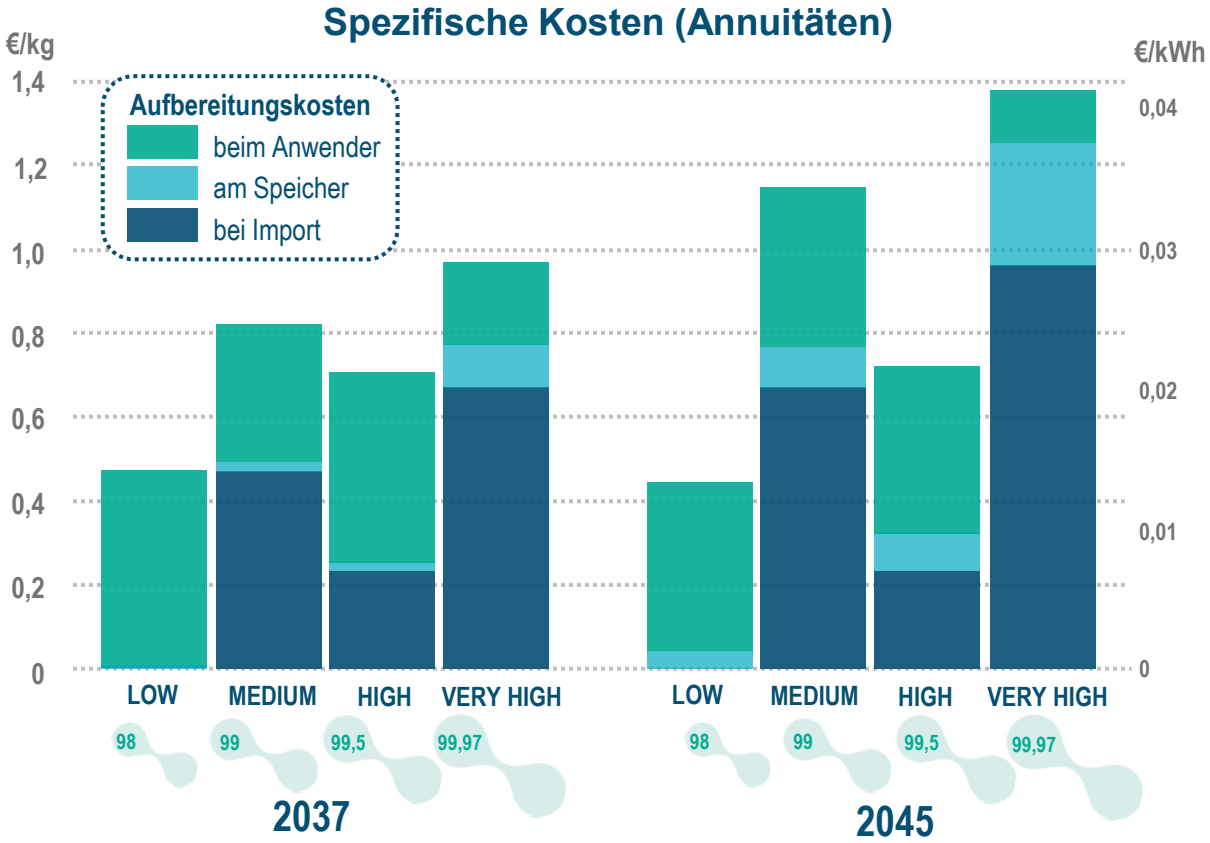
- nicht nur der $H_2$-Gehalt, sondern auch die Grenzwerte für Begleitstoffe die technische Eignung bestimmen,
- Inertgase wie Stickstoff ($N_2$) und $CO_2$, aber auch Sauerstoff ($O_2$) einen entscheidenden Einfluss haben,
- 2 Vol.% dieser Begleitgase **den Wobbe-Index** um bis zu 18 Prozent **senken** und zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich machen können,




Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum

# Ergebnisse

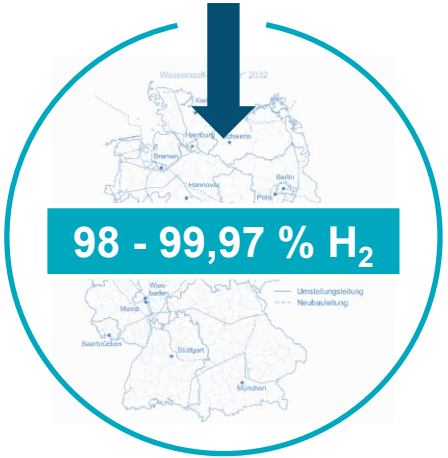
# Ein nationaler Alleingang erhöht die Kosten




## Importanforderung

**98 % $H_2$**

Aufbereitung




**höhere Anforderungen in Deutschland**

gemäß der definierten Qualitätsstufen

*Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum*

# Ein nationaler Alleingang erhöht die Kosten im Inland

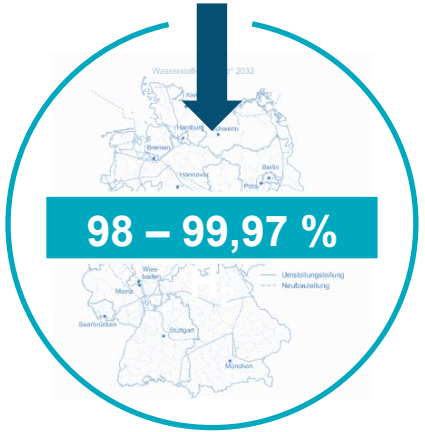
- **Unterschiedliche Qualitätsvorgaben** zwischen dem europäischem und dem nationalen $H_2$-Netz **erhöhen die Anforderungen**:
  - ➜ zusätzliche Aufbereitung und damit verbundene $H_2$-Verluste
  - ➜ auch Gasaufbereitungsanlagen an Grenz- und Übergabepunkten

  → **Daraus folgt:** je größer der Unterschied zwischen Importqualität und Anforderungen im Inland, desto höher die Aufbereitungs-kosten am Grenzübergang und im Netz.
- Eine **geringere Qualität** (≥ 98 %) ergibt die **geringsten Gesamt-kosten**, verlagert aber den Aufbereitungsbedarf zum Anwender.
- Bei **mittlerer Qualität** (≈ 99 %) fällt ein erhöhter Aufbereitungsbedarf im Vergleich zur nächsthöheren Qualitätsstufe an. Dies liegt an den **Begleitstoffen** und dem spezifischen Aufbereitungsbedarf.
- Eine netzweite **sehr hohe H2-Qualität** (≥ 99,97 %) erzeugt **hohe Mehrkosten** beim Import und an Speichern. Sie sollte deshalb lokal dort bereitgestellt werden, wo sie benötigt wird.

**Importanforderung**

**98 % $H_2$**

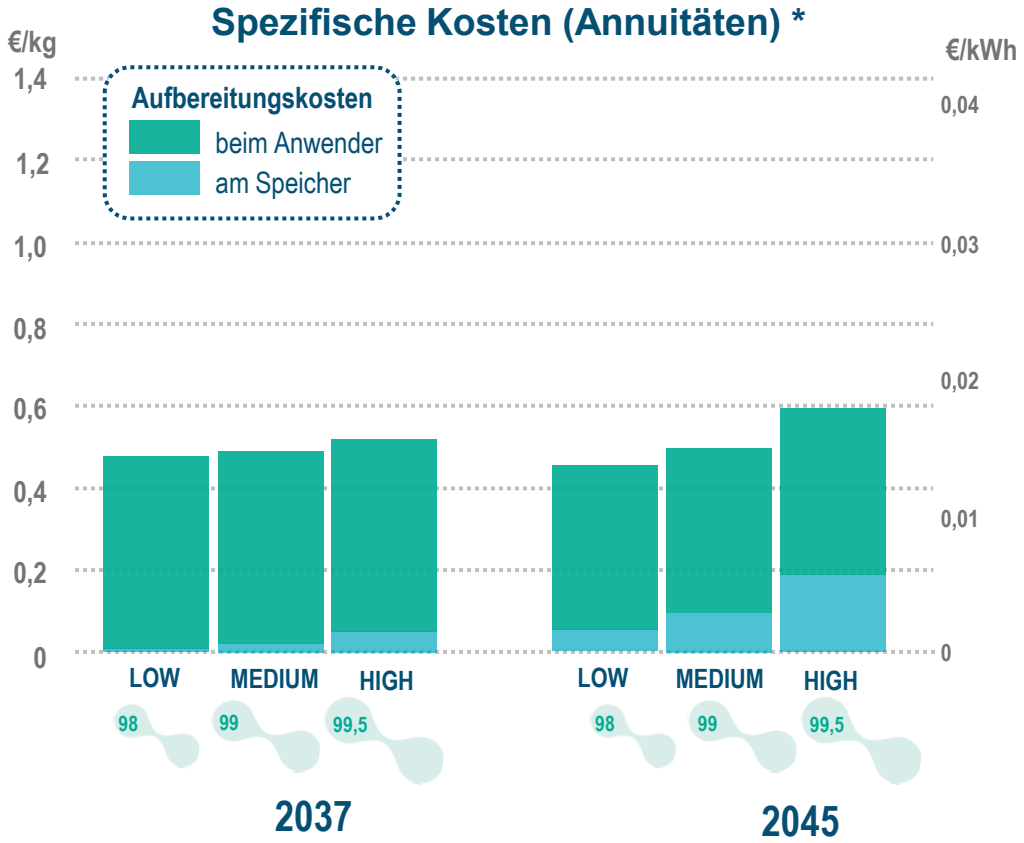
Aufbereitung

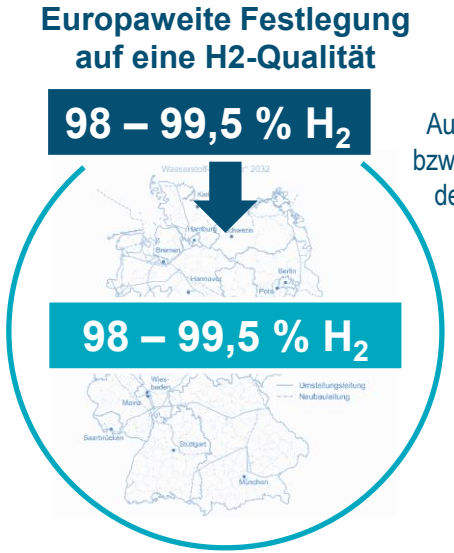



**höhere Anforderungen in Deutschland**
gemäß der definierten Qualitätsstufen

*Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum*

# Europäisch harmonisiert: Festlegung auf eine H2-Qualität erspart die Aufbereitung an Grenzübergängen




Keine Aufbereitung bzw. Kosten an der Grenze

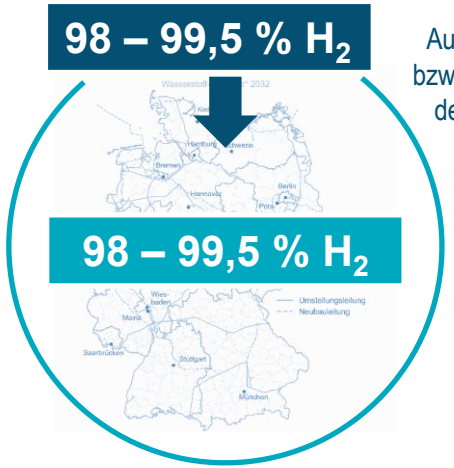
**gleiche Anforderungen in Europa und in Deutschland** gemäß der definierten Qualitätsstufen*

* sehr hohe Qualitätsstufe bei Importen nicht erreichbar
Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum

# Eine europäisch harmonisierte Gasbeschaffenheit senkt den Aufbereitungsaufwand und die systemischen Kosten

- **Gemeinsame Qualitätsstandards reduzieren die Aufbereitung** an Grenz- und Übergabepunkten und senkt somit die Gesamtkosten.
- Die **mittlere Qualität** (≈ 99 %) ist zu bevorzugen, da sie die Konzentration an Begleitstoffen begrenzt, technische Probleme reduziert und **kaum zur Kostenerhöhung** gegenüber der niedrigen Qualitätsstufe beiträgt.
- Durch die **Harmonisierung der Gasbeschaffenheit** im europäischen Kontext, die gezielte Begrenzung von Begleitstoffen und die dezentrale Nachreinigung entsteht ein **wirtschaftlicher Vorteil**.

**Europaweite Festlegung auf eine H2-Qualität**



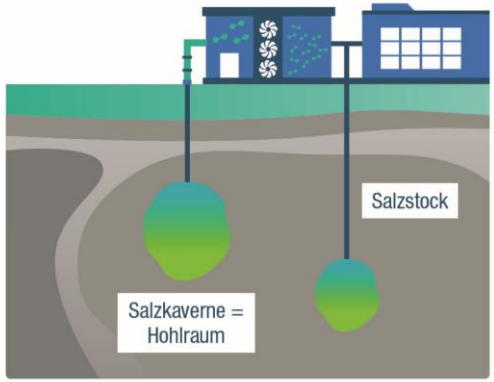

**gleiche Anforderungen in Europa und in Deutschland** gemäß der definierten Qualitätsstufen*

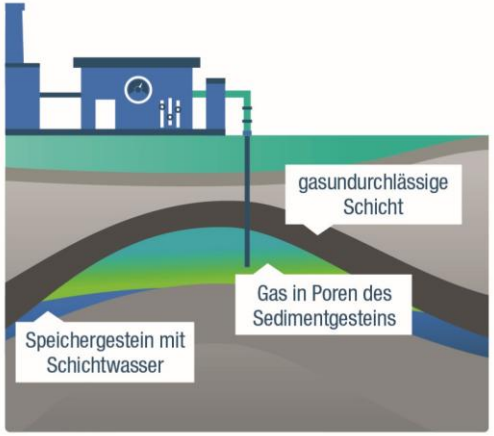
*Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum*

# Exkurs: Aufbereitungsbedarf und Kosten an Untergrundgasspeicher für Wasserstoff

# Die H2-Qualtiät variiert je nach Speichertyp

- Je nach Typ des Untergrundspeichers variiert die H2-Qualität nach der Ausspeicherung.
- Entscheidend ist das Umgebungsgestein (Salzkaverne oder Porenspeicher) und die vorherige Nutzung (z. B. ehemaliger Erdgas- oder Mineralölspeicher).



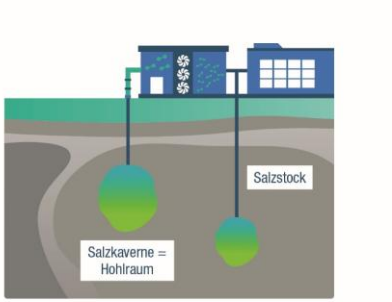

Quelle: DVGW

| | Kaverne | | Porenspeicher | |
|---|---|---|---|---|
| **Typ** | **Umrüstung und Neubau** *- best case -* | **Ehemalige Öl- / Dieselkaverne** *- worst case -* | **Lagerstätte / Aquifer** *- best case -* | *- worst case -* |
| erreichbare $H_2$-Konzentration vor Aufbereitung | **≥ 99 %** | *≤ 98 %* | **≥ 98 %** | *< 98 %* |

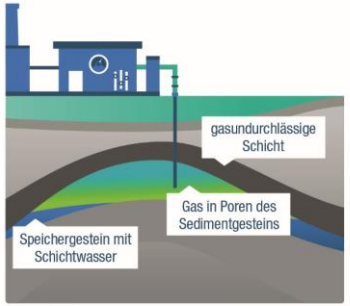
*Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum*

# Die H2-Qualtiät variiert je nach Speichertyp: Welche zusätzlichen Aufbereitungsschritte fallen an?

Grundsätzlich fallen zwei Aufbereitungsschritte an: die Trocknung bzw. Entwässerung und die Entschwefelung.
**Je nach $H_2$-Qualität nach der Ausspeicherung und Begleitstoffgehalt können weitere Schritte notwendig sein.**



Quelle: DVGW

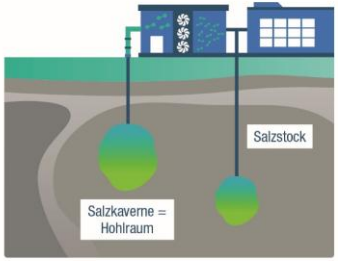



| Typ | | Kaverne: Umrüstung und Neubau *- best case -* | Kaverne: Ehemalige Öl-/Dieselkaverne *- worst case -* | Porenspeicher: Lagerstätte / Aquifer - best case - | Porenspeicher: Lagerstätte / Aquifer - worst case - |
|---|---|---|---|---|---|
| **Erforderliche Aufbereitungsschritte*** | LOW 98 | -- | *HC, evtl. Kühlung* | | |
| | HIGH 99,5 | bei Umrüstung ggf. anfangs PSA | *TSA* | PSA | *PSA* |
| | VERY HIGH 99,97 | PSA oder ggf. nur TSA, HC | *PSA, HC* | PSA, HC | *PSA, HC* |

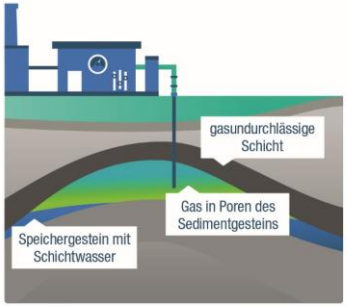
* Siehe Anhang 2 (Seite 28) für die Erläuterung der Aufbereitungsverfahren
Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum

# Zusätzlichen Aufbereitungsschritte erhöhen die Kosten

Je nach Art des Speichers und Höhe der $H_2$-Qualität **erhöhen sich der Aufbereitungsaufwand und die damit verbundenen Kosten** überproportional.



Quelle: DVGW

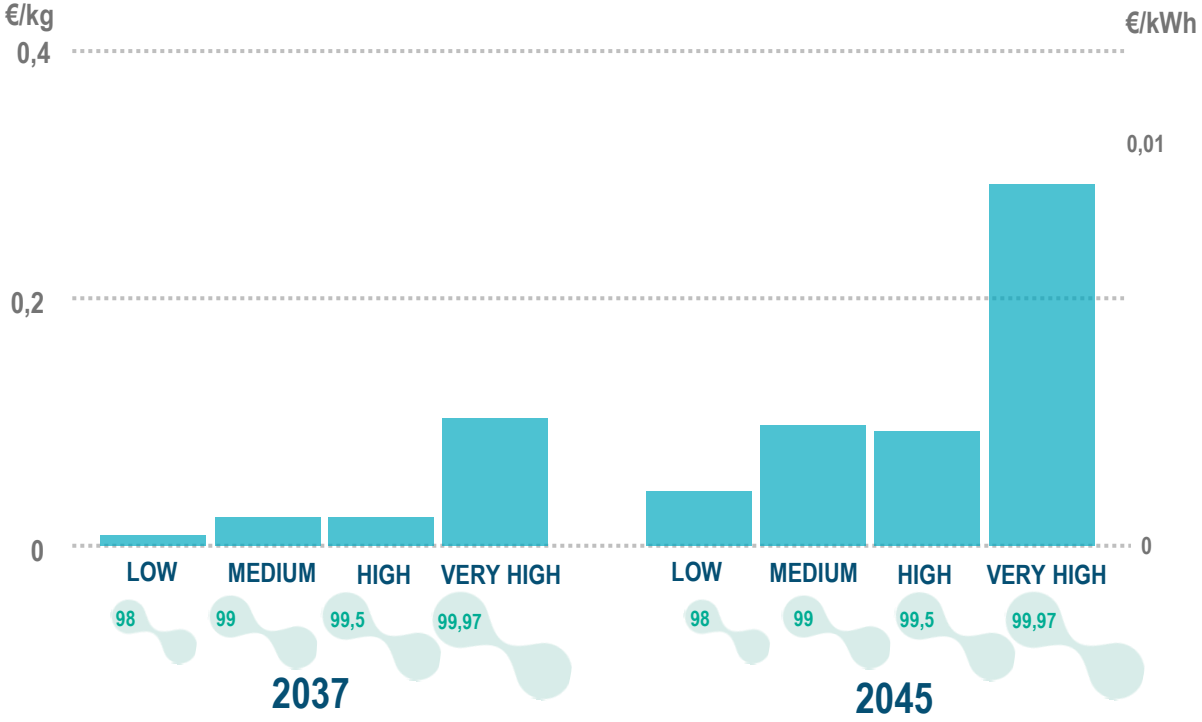



| Typ | | Kaverne: Umrüstung und Neubau *- best case -* | Kaverne: Ehemalige Öl-/Dieselkaverne *- worst case -* | Porenspeicher: Lagerstätte / Aquifer *- best case -* | Porenspeicher: Lagerstätte / Aquifer *- worst case -* |
|---|---|---|---|---|---|
| Qualitativer Kostenvergleich | LOW 98 | € | € | € | €€€ |
| | HIGH 99,5 | € | € | €€€ | €€€€ |
| | VERY HIGH 99,97 | €€€€€€ | €€€€€ | €€€€ | €€€€€ |

Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum

# Bei einer flächendeckenden sehr hohen H2-Qualität steigen die Mehrkosten im Fall der Speicher überproportional

## Spezifische Kosten (Anuitäten) am Speicher*

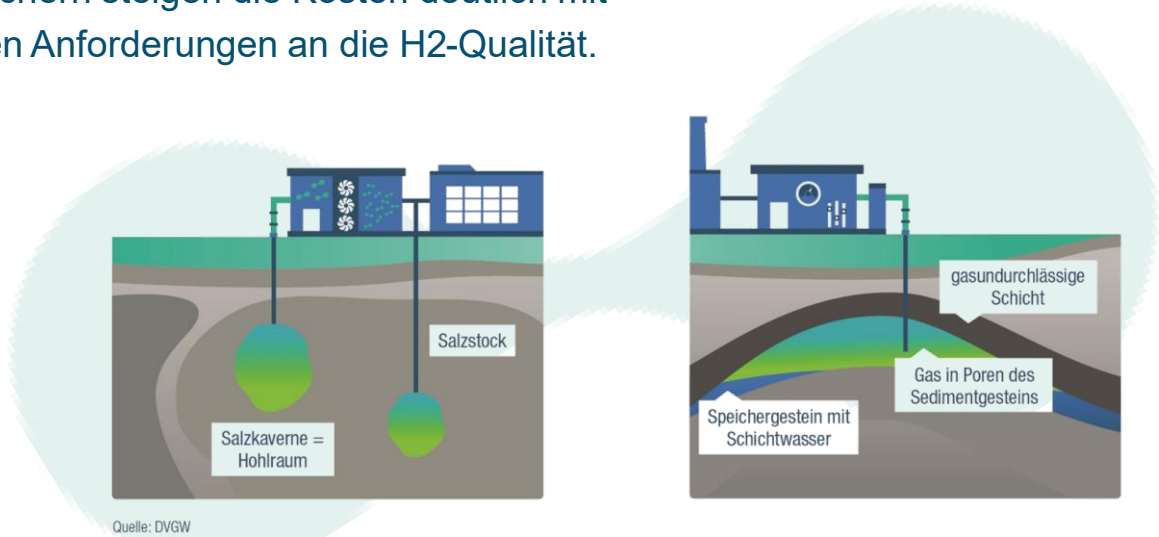



*Kosten am Speicher gemäß Szenario der Folie 12

Quelle: DVGW basierend auf Daten des Projekts H2-Optimum

# Besonderheiten der Untergrundspeicherung hinsichtlich H2-Beschaffenheit, Aufbereitung und Kosten

- Je höher die Anforderungen an die H2-Qualität sind, desto höher ist der Aufreinigungsbedarf. Dies gilt im Allgemeinen und insbesondere für Untergrundspeicher.
- Bei den Speichern steigen die Kosten deutlich mit zunehmenden Anforderungen an die H2-Qualität.
- Im Vergleich zur niedrigen Qualitätsstufe steigen bei der mittleren Qualität die Kosten vergleichsweise wenig. **Eine sehr hohe Qualität erhöht den Aufbereitungsaufwand an Speichern und die Kosten überproportional.**




Quelle: DVGW

# Fazit

# Nicht allein die $H_2$-Qualität ist entscheidend

## Die Kosten des Gesamtsystems können durch die Festlegung einer geeigneten Gasbeschaffenheit minimiert werden.

- **Begleitstoffe und deren Grenzwerte** bestimmen die Eignung von Anlagen, Komponenten und Anwendungen und damit den Aufbereitungsbedarf.
- Eine **europaweite harmonisierte Gasqualität reduziert systemische Mehrkosten** und verbessert die Handelsfähigkeit von $H_2$.
- **Mittlere Qualität reduziert mögliche technische Probleme** und den Zusatzaufwand beim $H_2$-Hochlauf zu nur leicht höheren Kosten.
- Sehr hohe **$H_2$-Qualität von ≥ 99,97 % ist aus volkswirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll**. Für sensible Anwendungen ist eine verbrauchernahe Feinreinigung zweckmäßiger.

### Die Festlegung der H2-Qualität

erfordert die gemeinsame Betrachtung von:

- Grenzwerten der einzelnen Begleitstoffe
- Auswirkung an Untergrundspeichern
- mögliche Import- und Erzeugungsqualitäten
- Aufwand bei lokaler Nachreinigung

# Nächste Schritte und Handlungsempfehlungen

**Die Kosten des Gesamtsystems können durch die Festlegung einer geeigneten Gasbeschaffenheit minimiert werden.**

## Technische Regelsetzung

- Die Gasbeschaffenheit wird in Regelwerken und Normen definiert.
- Die Ergebnisse von H2-Optimum in fließen in folgende Regelwerke ein:
  - Technische Regelsetzung Gasbeschaffenheit: DVGW-Arbeitsblatt G 260-1 (in Überarbeitung)
  - europäische Normung der Wasserstoffqualität (CEN TC/234 gas supply). Input über aktuell laufendes EISMEA Projekt (H2 Qual Net)

## Kosten

- H2-Optimum hat das **volkswirtschaftliche Optimum** bestimmt
- Die Kosten für die notwendige Aufreinigung entstehen bei einzelnen Akteuren
- **Es braucht einen politischen Rahmen zur Allokation bzw. Verteilung der Kosten auf das Gesamtsystem.**

# Quellen und weiterführende Informationen

## DVGW-Projekt H2-Optimum




31. Mai 2026

**H2-Optimum** (abgeschlossen)

$H_2$-Beschaffenheit, Aufbereitung, Messtechnik und volkswirtschaftliches Optimum (G 202439)

## DVGW-Kurzstudie Wasserstoffspeicher







## DVGW-Themenseite Wasserstoffspeicher

Zum DVGW-Projekt H2-Optimum

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



**Björn Munko**

bjoern.munko@dvgw.de

# ANHANG 1:
# Gasbeschaffenheit der betrachteten Qualitätsstufen

| Bezeichnung | Einheit | Gruppe A | Gruppe PBG | Gruppe D | Zwischengruppe |
|---|---|---|---|---|---|
| Wasserstoff ($H_2$) | mol-% | >= 98 | >= 99 | >=99.97 | >=99.5 |
| nicht-Wasserstoff-Gase gesamt | µmol/mol | 20,000.00 | 10,000.00 | 300.00 | 5,000.00 |
| Wasser ($H_2O$) allgemein | µmol/mol | 60.00 | 50.00 | 5.00 | 43.00 |
| Kohlenwasserstoffe gesamt langkettig | µmol/mol | - | 100.00 | 2.00 | - |
| Kohlenwasserstoffe gesamt kurzkettig | - | 20,000.00 | 500.00 | 2.00 | 5,000.00 |
| Kohlenwasserstoffkondensationspunkt | °C | - 2.00 | - 2.00 | - | - 2.00 |
| Methan ($CH_4$) | µmol/mol | 20,000.00 | 10,000.00 | 100.00 | 5,000.00 |
| Sauerstoff ($O_2$) MOP >= 16bar (gleitender 24h-Wert) | µmol/mol | 10.00 | 10.00 | 5.00 | 10.00 |
| Helium (He) | µmol/mol | - | 100.00 | 100.00 | - |
| Stickstoff ($N_2$) | µmol/mol | - | 100.00 | 100.00 | - |
| Argon (Ar) | µmol/mol | - | 100.00 | 100.00 | - |
| Summe Inertgase ($N_2$, He, Ar) | µmol/mol | 20,000.00 | 300.00 | 300.00 | 5,000.00 |
| Kohlenstoffdioxid ($CO_2$) | µmol/mol | 20,000.00 | 1,000.00 | 2.00 | 20.00 |
| Kohlenstoffmonoxid (CO) | µmol/mol | 1,000.00 | 0.10 | 0.20 | 20.00 |
| Gesamt-Schwefel und Schwefelverbindungen ($H_2S$-Basis) ohne Odorierung | µmol/mol | 4.20 | 3.00 | 0.00 | 3.00 |
| Gesamt-Schwefel und Schwefelverbindungen ($H_2S$-Basis) mit Odorierung | µmol/mol | 7.00 | - | 0.00 | 3.00 |
| Merkaptanschwefel (als Schwefel) | - | 6.00 | - | - | - |
| $H_2S$ und COS (als Schwefel) | - | 5.00 | - | - | - |
| Formaldehyd (HCHO) | µmol/mol | - | 10.00 | 0.20 | 10.00 |
| Methansäure (HCOOH) | µmol/mol | - | 10.00 | 0.20 | 10.00 |
| Ammoniak ($NH_3$) | µmol/mol | 13.00 | 10.00 | 0.10 | 10.00 |
| Halogenierte Verbindungen (Halogenionen-Basis) | µmol/mol | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| Nebel, Staub, Flüssigkeit | mg /kg | technisch frei | technisch frei | 1.00 | darf kein festes, flüssiges oder gasförmiges Material enthalten, das die Integrität oder den Betrieb von Rohren oder einem Gasgerät beeinträchtigen könnte |
| Quelle | | G260 | Vorschlag PBG | G260 | HyNetwork NL |

*Quelle: Abschlussbericht des DVGW- Projekts H2-Optimum*

- **Low = Gruppe A**
  - ≥ 98 Mol-% $H_2$
  - höherer Anteil an Begleitgasen
  - ohne zusätzliche Einschränkungen der brenntechnisch relevanten Begleitstoffe
- **Medium = Gruppe PBG**
  - ≥ 99 Mol-% $H_2$
  - mit spezifischen Einschränkungen einzelner Begleitstofffe
  - Begrenzung von Inertgasen, höheren Kohlenwasserstoffen und weiteren kritischen Begleitstoffen
  - $CH_4$ bleibt in begrenztem Umfang zulässig.
- **High = Zwischengruppe**
  - ≥ 99,5 Mol-% $H_2$
- **Very High = Gruppe D**
  - ≥ 99,7 Mol-% $H_2$

# ANHANG 2:
# Erläuterung der Aufbereitungsverfahren oder –schritte

| Aufbereitungsschritt / -verfahren | Zu entfernende Komponenten | | |
|---|---|---|---|
| **PSA**<br>**Pressure Swing Adsorption** | He<br>$N_2$<br>Ar | Methan - $CH_4$<br>$CO_2$<br>CO | Ammoniak - $NH_3$<br>Halogene |
| **HC**<br>**Höhere Kohlenwasserstoffe - Adsorption** | Formaldehyd - HCHO<br>Ameisensäure - HCOOH<br>lange Kohlenwasserstoffe | | |
| **TSA**<br>**Temperature Swing Adsorption** | $H_2O$<br>kurze Kohlenwasserstoffe | | |

Die **Kosten** (CapEx, OpEx) der Gasaufbereitung **werden in starkem Maße von den Kosten** der Wasserstoffverluste beim Einsatz **der PSA generiert**.