

Brennstoffzellen – die Zukunft der KWK?

Marco Zobel

09.11.2021

BHKW-/KWK-Jahreskonferenz 2021 in Magdeburg

DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme



Wissen für Morgen



Agenda

- Kurzvorstellung Institut
- Einführung Technologie
- Mischgase und Wasserstoff
- Marktübersicht Systeme und Entwicklungen
- Trends und mobile Plattformen
- Zusammenfassung

Institut für Vernetzte Energiesysteme

Personal: etwa 170 Personen

Gebäude A, Oldenburger Forschungs-Campus

- 125 Arbeitsplätze, 6 VE-Gruppen & DLR TT
- 1520m² Laborfläche

Gebäude B, Oldenburger Innenstadt

- 75 Arbeitsplätze, 3 VE-Gruppen & ADM/OBM
- Hochleistungs-Simulationsrechner

Gebäude C, Stuttgarter Forschungs-Campus

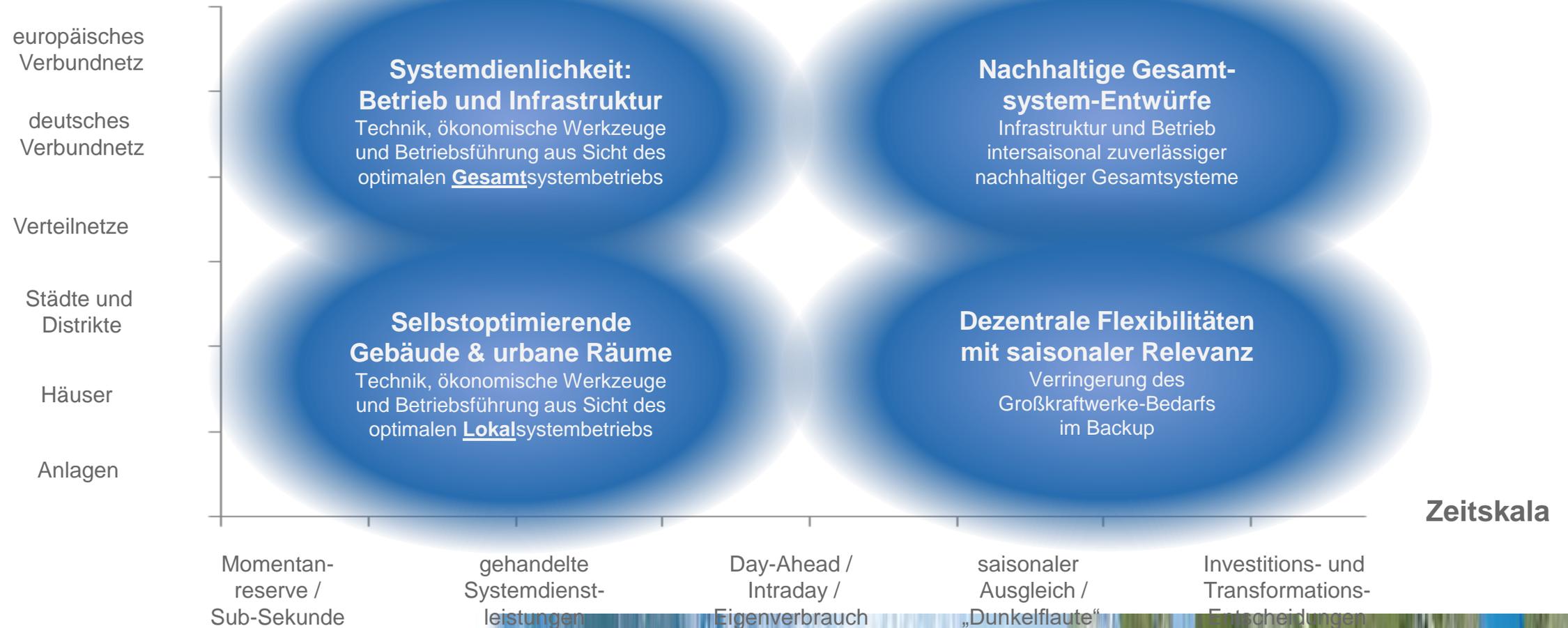
- 40 Arbeitsplätze, 3 VE-Gruppen
- Hochleistungs-Simulationsrechner

Technologietransfer: über 150 Industriepartner in laufenden Projekten



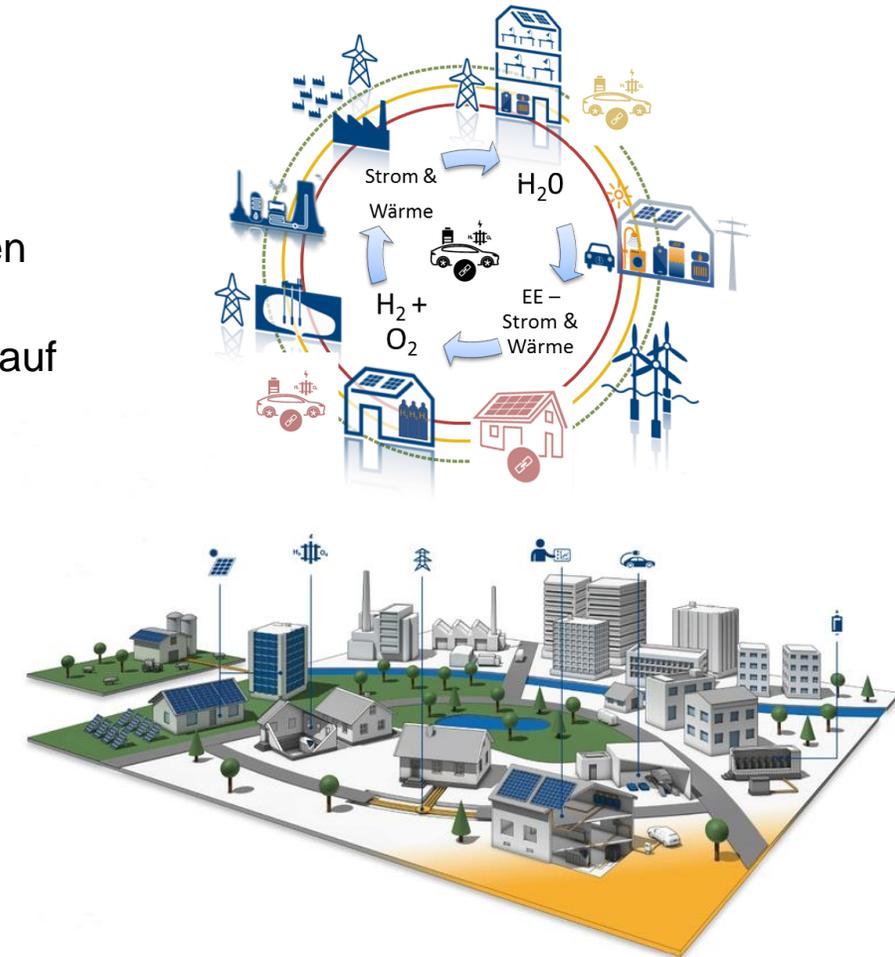
Fokus-Themen des Instituts für Vernetzte Energiesysteme

Räumliche Ausdehnung



Wasserstoff-Forschung im Institut VE

- **Kavernen:** Umnutzung von Erdgaskavernen (Methan zu Wasserstoff)
- **Gasnetz:** Transformation der Gas(netz)infrastruktur von der Kaverne bis zum Hausanschluss (Erdgas => Wasserstoff); offene Gasnetzmodelle; H₂-Reinheiten
- **H₂-Systemintegration:** Systemische Integration von Wasserstofftechnologien auf allen Ebenen des Energiesystems (Gebäude, Distrikt, Gewerbe, Stromnetze)
- **Sektorenkopplung:** flexible Rückverstromung durch Sektorenkopplung, z. B. durch Stromnetzeinbindung rückspeisefähiger BZ-Fahrzeuge und BZ-KWK
- **Systemanalyse:** Technikbewertung, Systemmodellierung, Szenarien und Transformationsstrategien für den Gassektor (Erdgas und H₂) als Teil des Gesamtenergiesystems
- **Marktdesign:** Anreizinstrumente für die Markteinführung von grünem H₂



Agenda

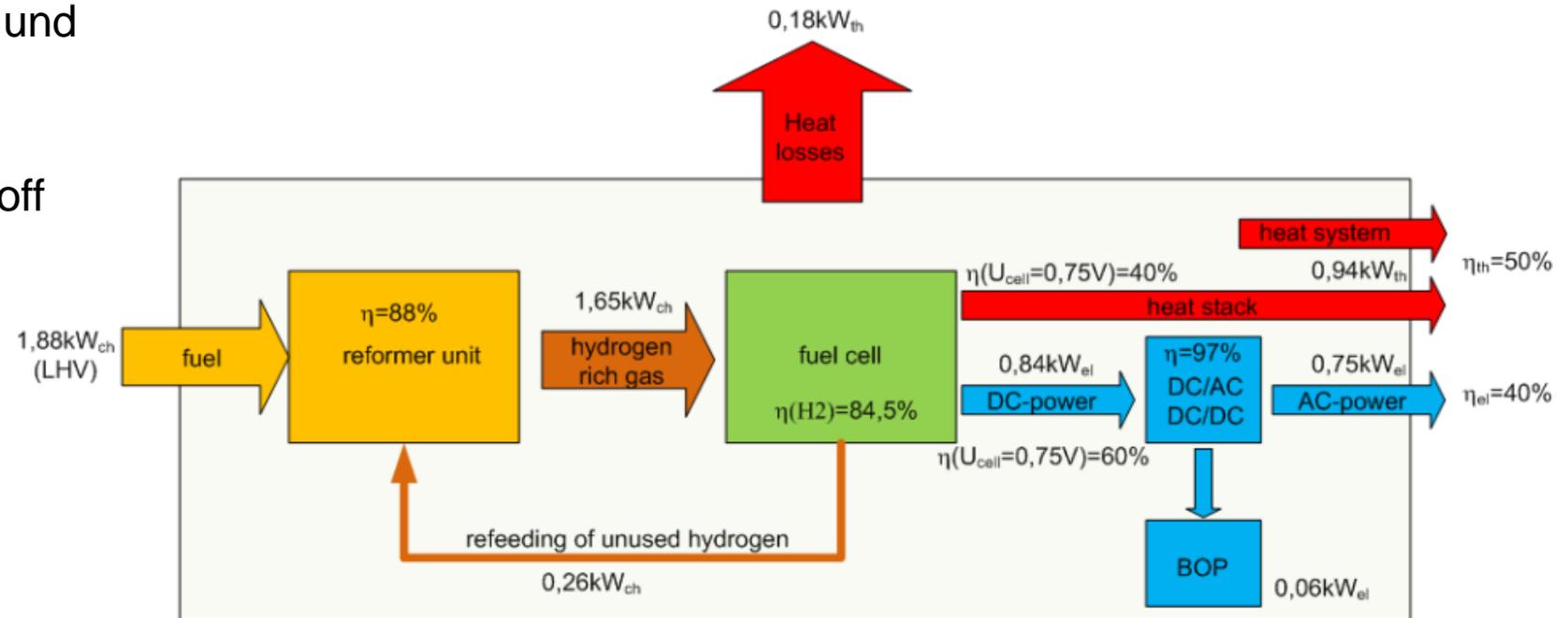
- Kurzvorstellung Institut
- **Einführung Technologie**
- Mischgase und Wasserstoff
- Marktübersicht Systeme und Entwicklungen
- Trends und mobile Plattformen
- Zusammenfassung

Brennstoffzellentypen

Technologie	Elektrolyt	Arbeits- temperatur	Anmerkung
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Kalilauge (KOH) bzw. alkalische Membran	80°C / 40°C	Raumfahrt, CO ₂ -freie Brennstoffe erforderlich
PEMFC (Polymer-Elektrolyt-Membran Fuel Cell)	Protonenleitende Membran	65°C / <100°C	stationär, PkW, Lkw, U-Boot
HT-PEMFC (High Temperatur PEMFC)	Phosphorsäure	160°C	stationär
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Phosphorsäure	200°C	stationär
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Alkalikarbonat- schmelzen	650°C	stationär
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid	700-800°C	stationär

Warum Brennstoffzellen-BHKWs?

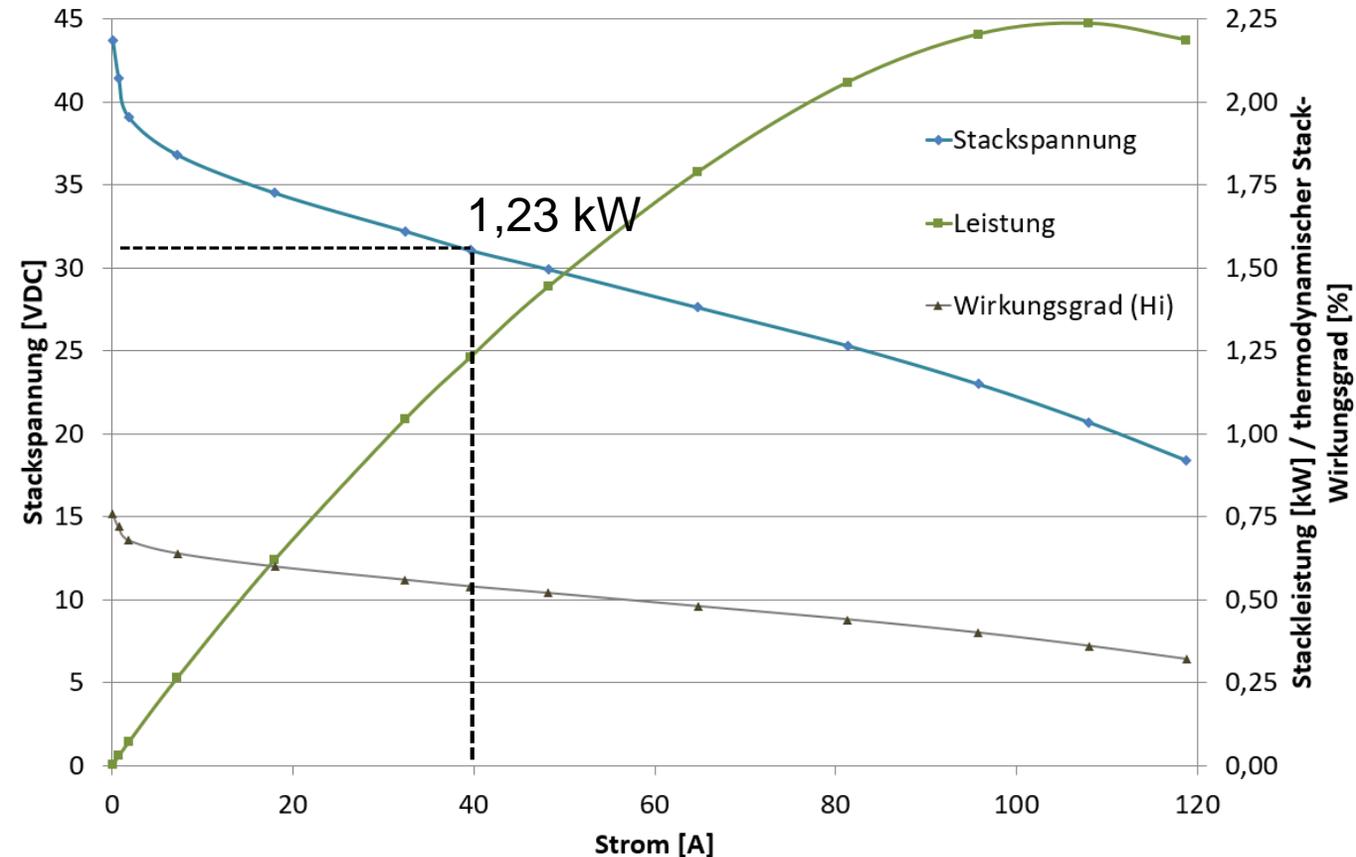
- Hohe elektrische Wirkungsgrade und Steigerungspotenzial
- Direkte Versorgung mit Wasserstoff erhöht zusätzlich die Effizienz
- Geringe NO_x -Emissionen



DLR-VE: Energieflüsse und Effizienzen PEM-KWK-System

Elektrische Wirkungsgrade von Brennstoffzellen - Einführung

- Stackwirkungsgrad abhängig von:
 - Technologie und Arbeitspunkt
 - Brennstoffen
- Bsp. PEM-Stackmodul mit $P_{\text{Nenn}} = 1,23 \text{ kW}_{\text{el}}$
 - 46 Zellen (31 VDC @ 40 A / $U_{\text{zelle}} = 0,68 \text{ VDC}$)
 - $\eta_{\text{Stack_rea}}(H_2) = 0,54$
- Die Auslegung des Arbeitspunktes ist ein Kompromiss aus Leistungsdichte und Investitionskosten.



Elektrische Wirkungsgrade von Brennstoffzellen - Potenziale

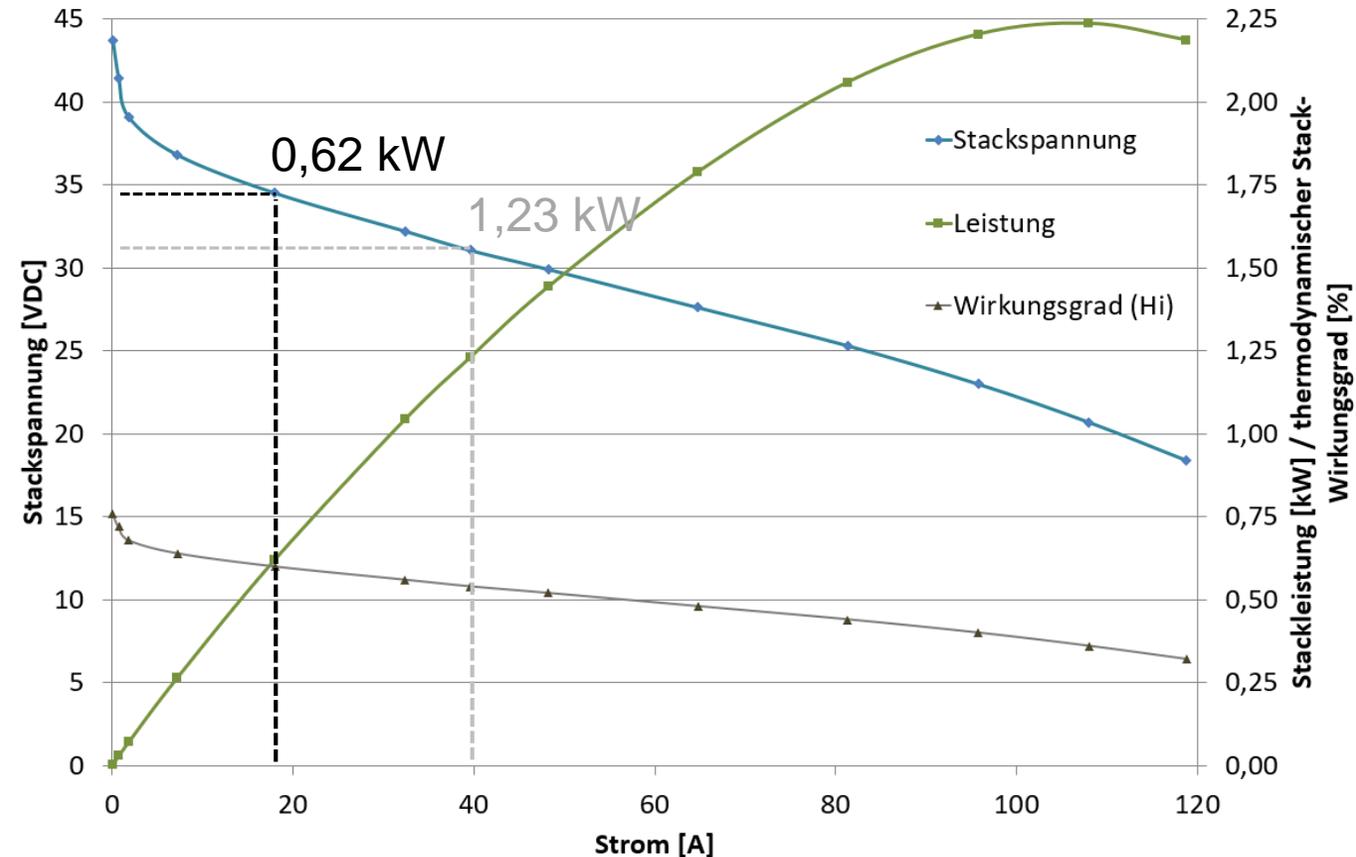
- Veränderung Arbeitspunkt:

- 34,5 VDC @ 18 A = 0,62 kW_{el}
mit $\eta_{\text{Stack_rea}}(H_i)=0,6$
- $\eta_{\text{Stack_rev}}(H_i)=0,78$ @ 45,1 VDC
(Klemmspannung ohne Stromfluss)
- $\eta_{\text{Stack_the}}(H_i)=0,94$ @ 57,5 VDC
(theoretisch erreichbar)

➤ In Summe würden zwei Stacks benötigt!

- Stellgrößen:

- Reduzierung Überspannungsverluste
- Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff



Wirkungsgrade und Gesamtsystembetrachtung Brennstoffzellen-BHKW

• Vorteile:

- Höhere elektrische Wirkungsgrade möglich (Stromaggregate)
- Effizienzgewinn bei Umstellung auf Wasserstoff-Versorgung
- Je nach Brennstoffzellentyp: Dynamischer Betrieb mit schnellen Start/Stopps möglich
- „Sektorenkoppler“

Nachteile:

- Je nach Brennstoffzellentyp: Dynamischer Betrieb mit schnellen Start/Stopps nicht möglich
- Reinheitsanforderungen Erdgas/ Wasserstoff
- Effizienzsystem (CAPEX hoch /Vollbenutzungsstunden gering??)



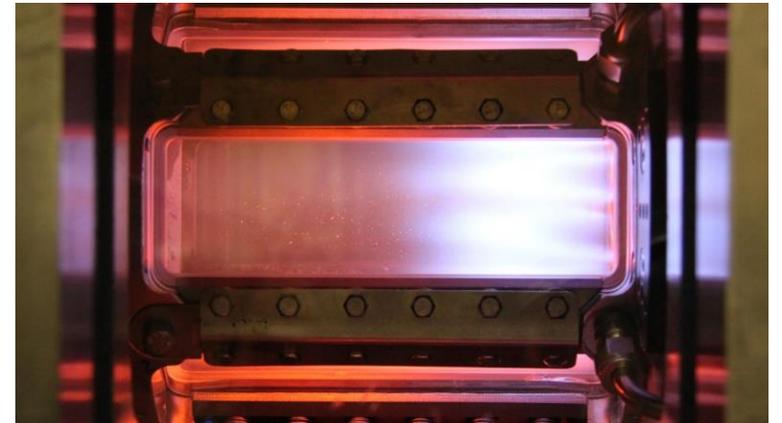
DLR-VE_ KWK-Testplattform

Agenda

- Kurzvorstellung Institut
- Einführung Technologie
- **Mischgase und Wasserstoff**
- Marktübersicht Systeme und Entwicklungen
- Trends und mobile Plattformen
- Zusammenfassung

Systembetrieb mit Mischgasen

- Hinsichtlich der Umstellung von Erdgas auf einen „Mischgasbetrieb“ mit Wasserstoff werden unterschiedliche Szenarien und Zeitskalen diskutiert.
- Zumischung von Wasserstoff:
 - 10% H₂ bereits heute möglich (Commitment der Heizungsindustrie)
 - 20% teilweise möglich
 - 30% Next Generation
- „Problemstellen“
 - Gasbrenner
 - Verbrennungsregelung (Anpassung Luftzahl)
 - Flammenüberwachung
 - In Analogie zu Heizgeräten
 - Reine Brennstoffzellenmodule sind bereits H₂-tauglich



DLR-IV:FLOX®-Brenner

BZ-BHKW-Systembetrieb mit Wasserstoff

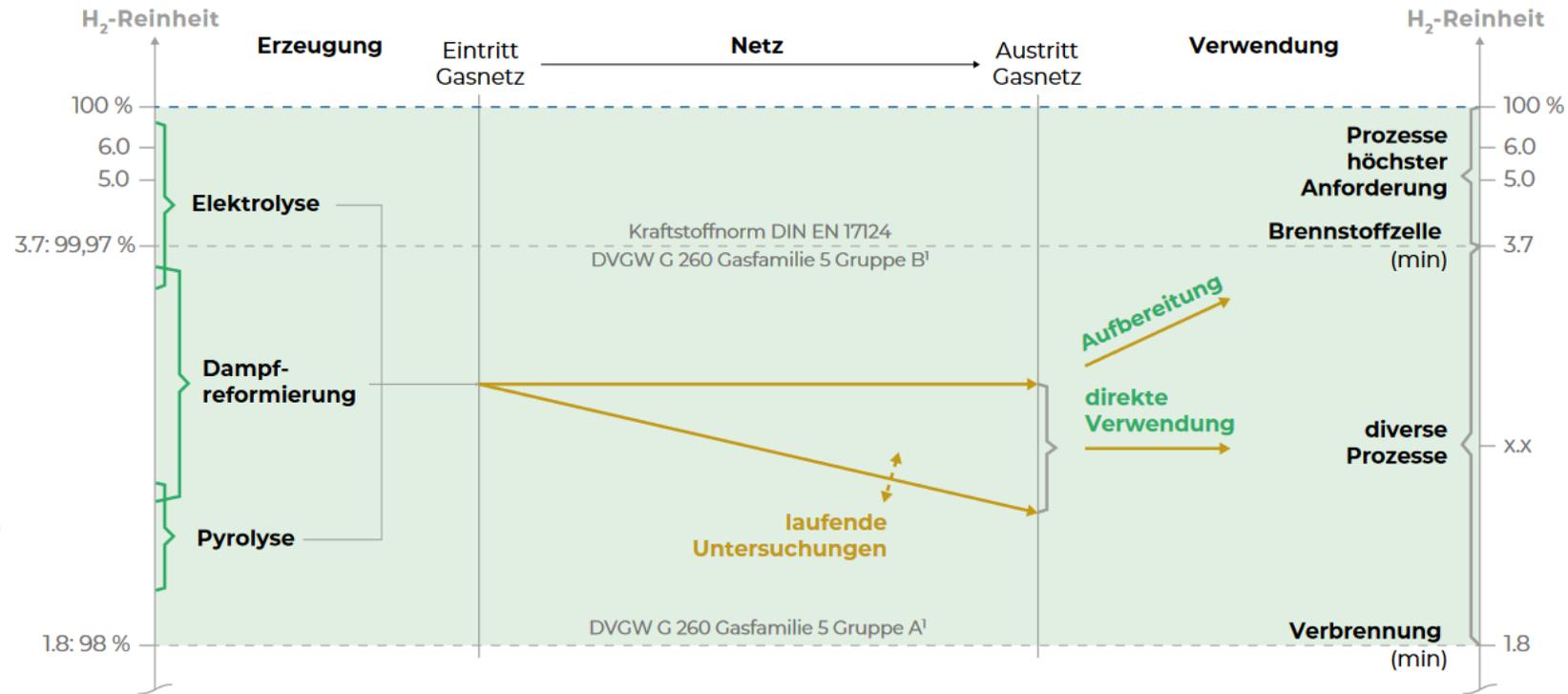
- Bei Einsatz von reinem Wasserstoff entfallen:
 - Gasreinigung und -aufbereitung (Reformer)
 - Managementsysteme thermischer Prozesswärme
- Begleitstoffe und Verunreinigungen:
 - Verändern die Brenneigenschaften
 - Wirken reversibel leistungsreduzierend (z.B. CO)
 - Wirken irreversibel leistungsreduzierend (z.B. S, NH₃)
- Spezifische Grenzwerte dürfen daher nicht überschritten werden.
- Definition in DIN EN 17124 (H₂-Reinheit für PEM-BZ PkW)
 - z.B.CO 0,2 ppm, Gesamtschwefel 0,004 ppm! und O₂ 5 ppm
 - Hier wäre wieder eine Aufreinigung notwendig!



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pyrit_01.jpg

Wasserstoffreinheiten: DVGW G260:2021-09

- Festlegung 5. Gasfamilie:
 - Gruppe A ≥ 98 Vol% H_2
 - Gruppe B $\geq 99,97$ Vol% H_2
- Gruppe B nur mittels Elektrolyse erreichbar
- Beeinflussung der Reinheit durch Transport und Verteilung sowie Speicherung nicht eindeutig geklärt.



Quelle: Nationaler Wasserstoffrat. Wasserstofftransport. Positionspapier. 2021

Agenda

- Kurzvorstellung Institut
- Einführung Technologie
- Mischgase und Wasserstoff
- **Marktübersicht Systeme und Entwicklungen**
- Trends und mobile Plattformen
- Zusammenfassung

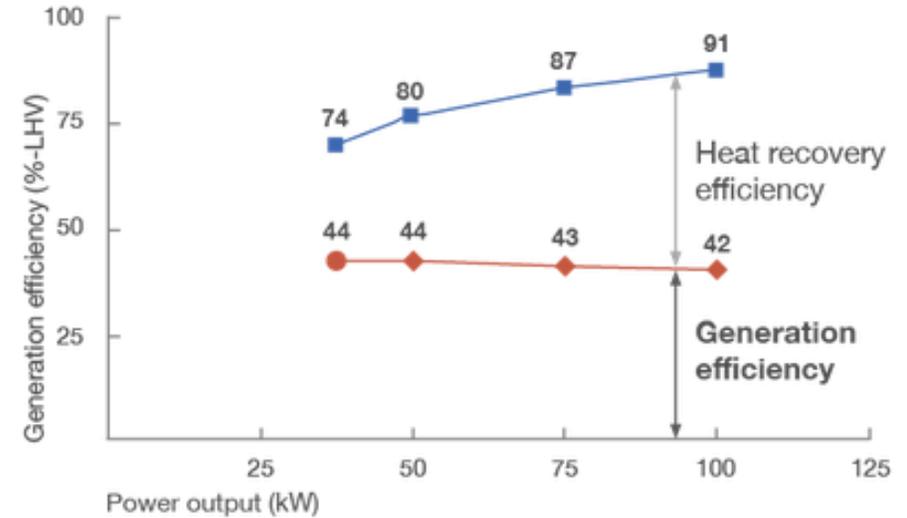
Marktüberblick Brennstoffzellen- μ KWK

- Erdgasbetrieb
- Leistungsklassen:
 - 0,2 bis 0,75 kW_{el}
 - 1,5 kW_{el}
 - 5 kW_{el}
- Einsatz:
 - Einfamilienhaus
 - Mehrfamilienhaus
 - Gewerbe

SOFC	Buderus (BlueGEN)	SOLIDpower (Bluegen BG-15)	Aisin Seiki (Ene Farm type S)
			
	source: www.erdgas.info	source: www.erdgas.info	source: www.aisin.co.jp
PEMFC	Remeha (eLecta)	SenerTec (Dachs 0.8)	Freudenberg (NEX 2400)
			
	source: www.erdgas.info	source: www.erdgas.info	source: www.erdgas.info
	Viessmann (Vitovalor PT2)	Panasonic	inhouse engineering (inhouse5000+)
			
	source: www.erdgas.info	source: www.panasonic.com/jp	source: www.inhouse-engineering.de

Brennstoffzellen-Kraftwerke: Fuji Electric Co., Ltd.

- Seit 1973 ca. 100 PAFC-Anlagen
- Ab 2009 Verkauf des Typs FP-100i
- 10 Anlagen in Deutschland
- Auch als Wasserstoff-Anlage verfügbar



Elektrische Leistung	100 kW
Spannung	400 VAC
Frequenz	50 Hz
Wärmeauskopplung	~ 54 kW auf 62 °C ~ 54 kW auf 92 °C*
Energieeffizienz	> 90%
Brandschutz	Schutz für Raumgrößen bis zu mehreren 1.000 m³
Energieträger	Erdgas
Betriebsmodus	Vollautomatisch, Netzbetrieb
Dimension (BxLxH)	2,2 m x 6,5 m x 3,4 m
Gewicht	15,5 t im Betrieb

Brennstoffzellen-Kraftwerke: US-amerikanische Aktivitäten

- FuelCell Energy, Inc. / Danbury
 - SureSource 1500 1,4 MW_{el} η_{el} =47% (H_i)
 - SureSource 3000 2,8 MW_{el} η_{el} =47% (H_i)
 - SureSource 4000 3,7 MW_{el} η_{el} =60% (H_i)



<https://www.fuelcellenergy.com/products/ SureSource 1500>



<https://www.fuelcellenergy.com/products/ SureSource 3000>

Brennstoffzellen-Kraftwerke: US-amerikanische Aktivitäten

- Doosan Fuel Cell America, Inc. / Connecticut
 - PAFC, PureCell® Modell 400 NG
 - $440 \text{ kW}_{\text{el}}$ $\eta_{\text{el}}=43\%$ (H_i)
 - 80 Anlagen in 2016

 - Südkorea (Seosan):
 - $50,2 \text{ MW}_{\text{el}}$
 - PureCell® Modell Hydrogen $\eta_{\text{el}}=50\%$ (H_i)



<https://fuelcellworks.com/news/south-korea-work-begins-on-worlds-largest-hydrogen-fuel-cell-power-plant-commissioned/>



www.doosanfuelcell.com/en/fuel-cell-news-and-resources/doosan-fuel-cell-photos.do



<http://www.doosanfuelcellamerica.com/datafile/news/20190806/886718234.jpg>

Brennstoffzellen-Kraftwerke: US-amerikanische Aktivitäten

- Bloom Energy
 - Südkorea - Hwasung
 - SOFC-Stromversorgung mit 50 kW_{el}-Modulen
 - 19,8 MW_{el} / Versorgung für 43.000 Haushalte
 - Südkorea – Paju
 - 8,1 MW_{el} / Versorgung für 18.000 Haushalte
 - Südkoreanischer Markt:
 - ca. 300 MW_{el} installierte Brennstoffzellen-Leistung (Stand: 2020)
 - PM 25/10/2021: SK ecoplant beteiligt sich mit 500 Mio. US-\$ an Bloom Energy und will 500 MW BZ-Leistung erwerben (Umsatzvolumen 4,5 Mrd. US-\$ bis 2024)*

*

<https://www.bloomenergy.com/news/bloom-energy-and-sk-ecoplant-expand-highly-successful-power-generation-partnership-and-invest-to-establish-market-leadership-in-the-hydrogen-economy>



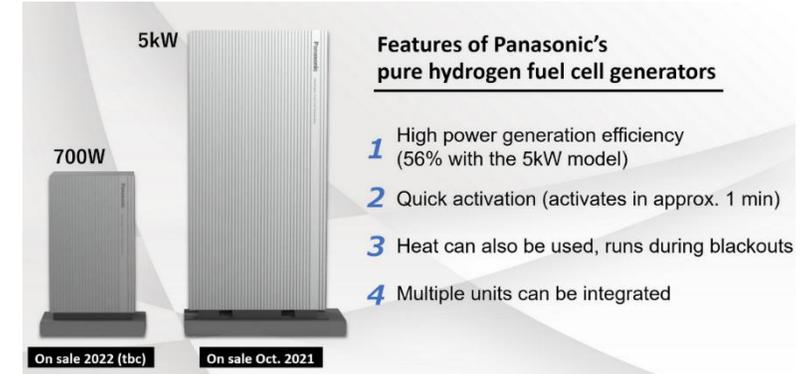
<https://www.bloomenergy.com/sites/default/files/korea-1-sm.jpg>



<http://www.bloomenergy.com/newsroom/photo-gallery/>

Entwicklungen Brennstoffzellensysteme

- H₂-PEMFC-Systeme Panasonic
 - 0,7 und 5 kW_{el}
 - Markteinführung 2021/2022
- SOFC-System Bosch
 - 10 kW_{el} mit $\eta_{el}=60\%$ (H_i)
 - Erdgas und H₂
 - Markteinführung 2024
- Weitere Aktivitäten in Deutschland, Asien und USA



<https://news.panasonic.com/global/stories/2020/84116.html> (22.09.2021)



https://assets.bosch.com/media/global/research/research_experts/success_stories/

Agenda

- Kurzvorstellung Institut
- Einführung Technologie
- Mischgase und Wasserstoff
- Marktübersicht Systeme und Entwicklungen
- **Trends und mobile Plattformen**
- Zusammenfassung

Synergien und Markterweiterung

• Ausgangslage:

- Systemintegratoren setzen häufig ausgereifte KWK-Module anderer Hersteller ein.
- Segment μ KWK -> japanische BZ-Plattformen
- Nutzbare sowie taugliche Massen- und Serienprodukte für stationäre Anwendungen in der kW-Leistungsklasse waren bisher nicht verfügbar.
- BZ-Module aus dem mobilen Anwendungssektor geeignet bei entsprechender Lebensdauer (Lkw, Busse)

• Trends:

- Zunahme Produkte und Hersteller
- Hyundai XCIENT: 1.600 Lkw in 2025
- Toyota: 100 Sora Busse? Lkw in Kooperation mit Hino
- Daimler-Volvo, Cummins
- Markterweiterungen sind geplant



<https://www.hyundai.news/eu/articles/press-releases/xcient-fuel-cell-trucks-surpass-million-kilometre-benchmark.html>



<https://www.daimler.com/innovation/drive-systems/hydrogen/start-of-testing-genh2-truck-prototype.html>



<https://nikolamotor.com/tre-fcev>



<https://www.toyota-europe.com/startyourimpossible/sora-bus>

Toyotas neuer Weg

- Pressemitteilung 23.02.2021: Vertrieb des kompletten Brennstoffzellenmoduls an Systemintegratoren inkl. Erweiterung der Anwendungsfelder (Lkw, Busse, Züge, Schiffe und BHKWs).
- Modul ist in vier Varianten verfügbar:
 - vertikal/horizontal mit 60/80 kW_{el}
 - Basiert auf Plattform des Mirai
 - Als Doppelpack im Sora eingesetzt
 - Doppelpack auch im Toyota-Hino Truck mit Modulproduktion in Kentucky ab 2023
- Bereits in 09/2019 entwickelte Toyota ein stationäres BHKW mit 100 kW_{el} und wurde im Werk Honsha/Tokyo betrieben.

Toyota FC stack

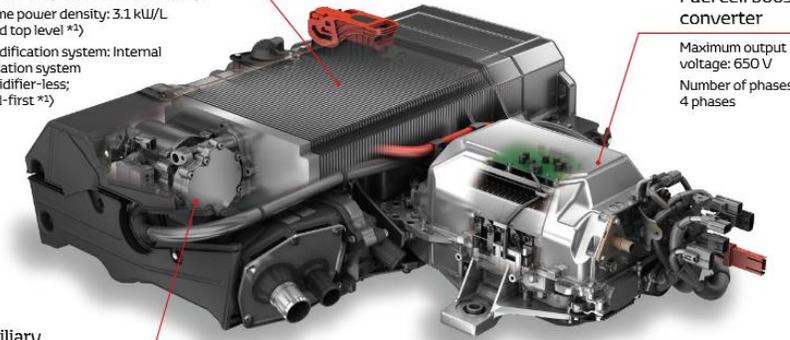
Type: Polymer electrolyte fuel cell
 Maximum output: 114 kW (155 DIN hp)
 Volume power density: 3.1 kW/L
 (world top level ^{*1})
 Humidification system: Internal circulation system (humidifier-less; world-first ^{*2})

Fuel cell boost converter

Maximum output voltage: 650 V
 Number of phases: 4 phases

Auxiliary components

Hydrogen circulating pump, etc.



^{*1} November 2014; Toyota data

https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota%20Mirai%20FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf

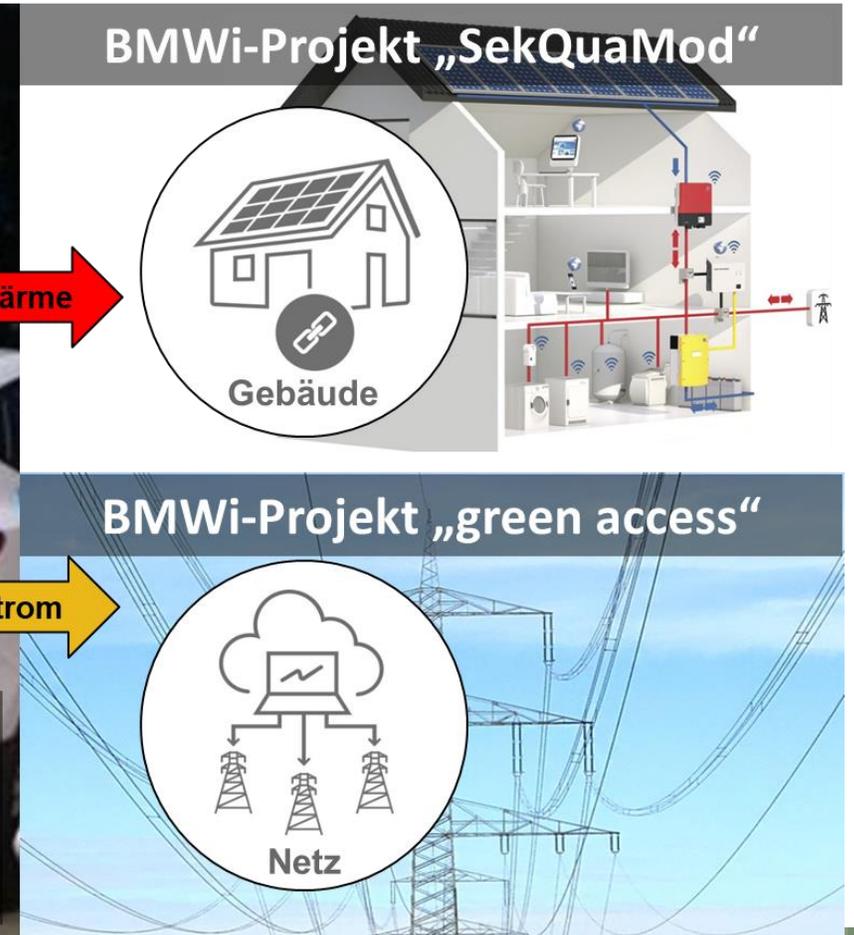
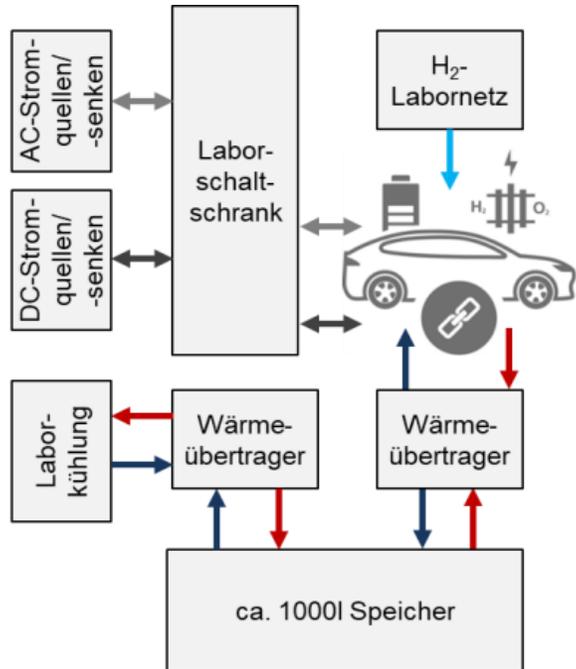


<https://global.toyota/en/newsroom/corporate/29246629.html>



<https://global.toyota/en/newsroom/corporate/34009225.html>

Dezentrale H₂-Rückverstromung: BZ-Fahrzeuge im KWK-Modus



Agenda

- Kurzvorstellung Institut
- Einführung Technologie
- Mischgase und Wasserstoff
- Marktübersicht Systeme und Entwicklungen
- Trends und mobile Plattformen
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Brennstoffzellenbasierte KWK erzielt höchste Wirkungsgrade bei geringsten Emissionen.
- Einsatz von Mischgasen und reinem Wasserstoff ist möglich bzw. sogar ausdrücklich gewünscht.
- Einführung neuer Plattformen für Wasserstoffbetrieb via Markterweiterungen findet statt.
- Brennstoffzellen allein sind nicht die Zukunft der KWK, aber ein essentieller Bestandteil.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

- **Kontakt Daten:**

E-Mail: Marco.Zobel@DLR.de

Phone: +49 441 99906-360

Website: www.DLR.de/VE

