



HOCHSCHULE LANDSHUT
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

Perspektiven von Wasserstoff Universallösung oder Energie für besondere Anlässe?

**Landshuter Energiegespräche
24.11.2022**

Prof. Dr. Josef Hofmann
Sprecher des Forschungsschwerpunkts Energie
Fakultät Maschinenbau



Curriculum Vitae Prof. Dr. Josef Hofmann

- seit 2009 Professor für Energie- und Umwelttechnik, Hochschule Landshut
- 2002 - 2004 Referent für Deponien und stellvertretender Referatsleiter „Altlasten“ Bayerisches Umweltministerium, München
- 1990 - 2002 und 2004 - 2009 Referent für Abfallwirtschaft Regierung von Niederbayern, Landshut (zuletzt Regierungsdirektor)
- 1990 Wissenschaftlicher Angestellter Max-Planck-Institut für Biochemie, Martinsried
- 1990 Promotion Technische Universität München
- 1987 - 1990 Wiss. Mitarbeiter Universität Konstanz
- 1981 - 1987 Studium Chemie-Diplom Technische Universität München
- *Tätigkeitsschwerpunkte in Lehre und Forschung:*
 - *Regenerative Energietechnik (Biogas, Chemische Energiespeicher)*
 - *Umwelttechnik (Schwerpunkte: Abfallwirtschaft, Abwasserreinigung)*
 - *Chemie*
 - *Laborleitung Energie- und Umwelttechnik*
 - *Sprecher des Forschungsschwerpunkts Energie an der Hochschule Landshut*



Gliederung

1. Ausgangssituation
2. Wasserstoff und seine Eigenschaften
3. Farbenlehre Wasserstoff
4. Herstellung
5. Speicherung
6. Anwendungsmöglichkeiten
7. Woher soll der Wasserstoff in Zukunft kommen?
8. Wo macht der Einsatz von Wasserstoff Sinn?
9. Perspektiven

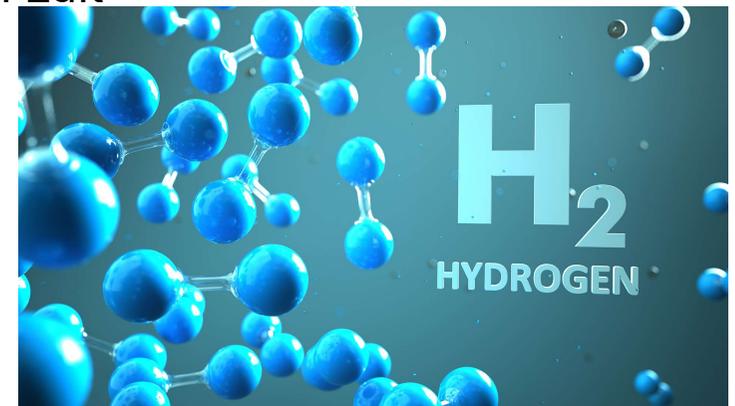
1. Ausgangssituation

- Massive Preissteigerungen bei fossilen Energieträgern in 2022 (Vergleichsjahr 2021):
 - Erdgas: bis zu 300%
 - Heizöl: bis zu 200%
- Verknappung der Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern durch Ukraine-Krieg
- Risiko für flächendeckenden Blackout im europäischen Stromnetz deutlich erhöht
- Deutlicher Anstieg der Treibhausgase in der Erdatmosphäre
→ Beschleunigung der Erderwärmung

Kann der Einsatz von Wasserstoff hier zur Problemlösung beitragen?

2. Wasserstoff und seine Eigenschaften

Siedepunkt:	- 252°C	Schmelzpunkt:	- 259°C
Dichte H ₂ (l):	70,79 g/l	Dichte H ₂ (g):	1,34 g/l
$\Delta H_{\text{Verdampfung}}$:	445,4 J/g	Rel. Oktanzahl:	<<100
Heizwert H ₂ (l):	2,36 kWh/l	Heizwert H ₂ (g):	3,0 kWh/Nm ³
Heizwert H ₂ gravimetrisch:		39,39 kWh/kg	
Zündbereich in Luft:		4 – 77 Vol.-% in Luft	
Zündtemperatur:		585°C	
Verbrennungstemperatur (Luft)		2.045°C	
Verbrennungstemperatur (O ₂)		> 3.000°C	
Gefahrstoffeigenschaften:			



Quelle Sicherheitsdaten: <http://www.dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp> [05.11.2022]

Bildquelle: <https://images.boersenmedien.com/images/a9e767fc-d5e4-4fea-9e27-9c18a2e47066.jpg> [05.11.2022]

3. Farbenlehre Wasserstoff

Grau

Herstellung
durch
Reformierung
von Erdgas

Freisetzung von
Kohlendioxid

Preis abhängig
vom
Erdgaspreis

Blau

Herstellung
durch
Reformierung
von Erdgas

Speicherung
von
Kohlendioxid in
Kavernen

Preis abhängig
vom
Erdgaspreis

Türkis

Herstellung
durch Pyrolyse
von Erdgas

Speicherung
des
Kohlenstoffs
oder Nutzung

Preis abhängig
vom
Erdgaspreis

Grün

Herstellung
durch
Elektrolyse von
Wasser mit
erneuerbaren
Strom

Nebenprodukt
Sauerstoff kann
genutzt werden.

Preis abhängig
vom Strompreis



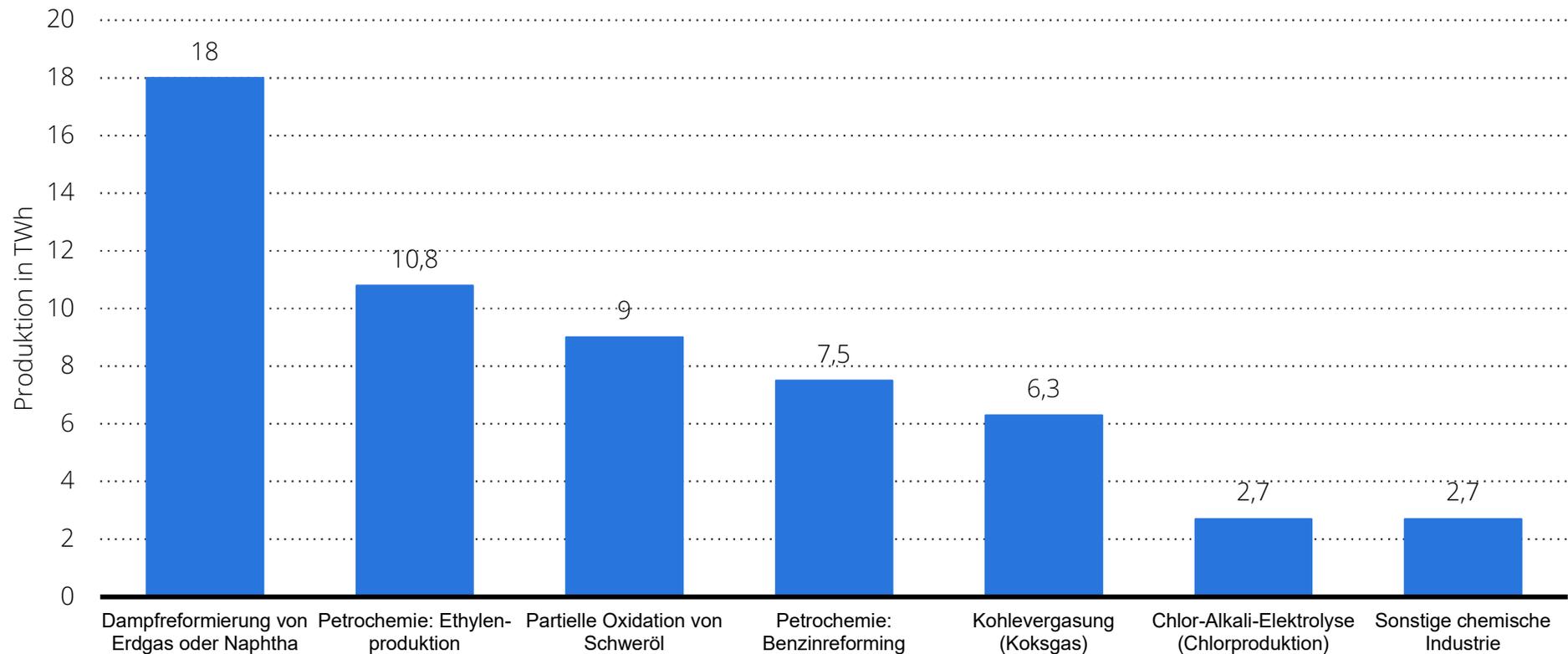
Quelle:

<https://www.stahleisen.de/wp-content/uploads/2021/03/H2.jpg>
[05.11.22]

4. Herstellung

- Fossile Wege zum Wasserstoff
- Regenerative Wege zum Wasserstoff
- Elektrolyse als Schlüsseltechnologie für grünen Wasserstoff
- Strombedarf und Stromkosten

Fossile Wege zum Wasserstoff



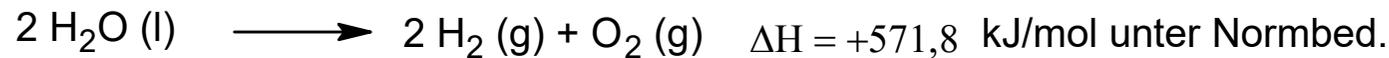
Hinweis(e): Deutschland

Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

Quelle(n): Prognos; [ID 1194793](#)

Regenerative Wege zum Wasserstoff

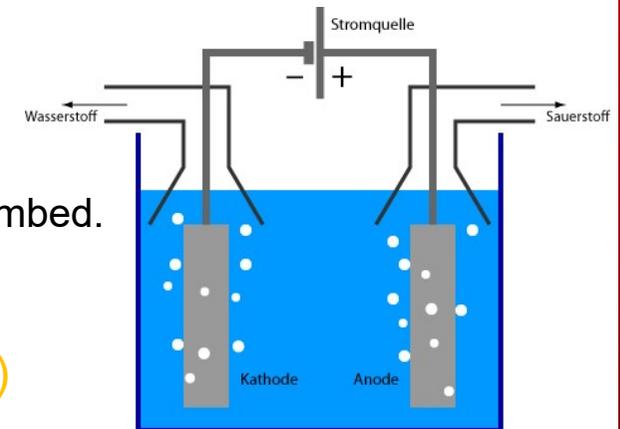
- Elektrolyse von Wasser (Stand der Technik)



- Vergasung von Biomasse (Stand der Technik)
- Reformierung von Biomethan aus Biogas (Stand der Technik)



- Weitere Möglichkeiten wie z.B.
 - Direkte thermische Spaltung von Wasser (Stand der Forschung und Entwicklung, Solarthermieanlage in Almeria, Spanien)
 - Dunkelfermentation aus Biomasse (Stand der Forschung und Entwicklung)
 - Photobiologische Herstellung (Stand der Forschung und Entwicklung)
 - Radiolyse von Wasser



Quelle: <https://www.energie-lexikon.info/elektrolyse.html> [22.11.22]



Elektrolyse als Schlüsseltechnologie für grünen Wasserstoff

- Elektrischer Strom aus Erneuerbaren Energien kann mit Hilfe der Elektrolyse von Wasser im chemischen Energieträger Wasserstoff gespeichert werden, z.B.:
 - Proton-Exchange-Membrane (PEM)-Elektrolyseur
 - Alkalischer Elektrolyseur (Kalilauge)
 - Solid-Oxid-Elektrolyseur
- Wirkungsgrade: bis zu maximal 84% Wirkungsgrad
(Quelle: <https://edison.media/energie/elektrolyseur-erreicht-rekord-wirkungsgrad/25226262/> [22.11.22])
- Theoretischer Strombedarf für 1 kg Wasserstoff (Heizwert: 39,39 kWh = 3,3 kg Benzin):
Rund 53 kWh (bei 74% elektrischer Wirkungsgrad)
Quelle: <https://www.gasag.de/magazin/neudenken/wie-viel-strom-fuer-1kg-wasserstoff> [22.11.22]



Quelle:
https://www.energynet.de/wp-content/uploads/2013/01/2012-11-23_hytec-2mw-stack-1a-1.jpg [22.11.11]

Strombedarf und Stromkosten

- Elektrischer Strom aus Erneuerbaren Energien lässt sich zwischen 4 €-Cent/kWh (Windenergie an der Küste) und 6 €-Cent/kWh (Photovoltaik in Bayern) herstellen.
- Für 1 kg Wasserstoff sind 53 kWh elektrischer Strom erforderlich.
→ Die Strombedarfskosten liegen somit zwischen 2,12 € und 3,18 €/kg Wasserstoff oder bei 5,38 bis 8,1 €-Cent/kWh Wasserstoff
- Die tatsächlichen Produktionskosten für 1 kg Wasserstoff liegen aber deutlich höher, da die Kosten für Stromtransport, Anschaffungs-, Wartungs- und Betriebskosten sowie Abschreibung des Elektrolyseurs sowie Speicherkosten noch berücksichtigt werden müssen.

5. Speicherung

Möglichkeiten:

- **Verflüssigung bei -253 °C**
Claude-Prozess: Verdichtung mit Abführung der entstehenden Wärme, Abkühlung mit flüssigem Stickstoff auf -196°C, Entspannung und gleichzeitige Abkühlung einer Teilmenge, Entspannung via Joule-Thomson-Ventil, benötigt ca. 30% des Energieinhalts des verflüssigten Wasserstoffs, Langzeitspeicherung möglich
- **Druckbehälter bis 700 bar**
 - Niederdruckspeicherung in Druckgasflaschen bis 30 bar
 - Hochdruckspeicherung (benötigt ca. 15% des Energiegehalts des komprimierten H₂)
- **Herstellung von Methanol aus Kohlendioxid und Wasserstoff (www.carbonrecycling.is)**
- **„Power to Gas“: Methanisierung von Kohlendioxid mit Wasserstoff**
- **Unterirdische Kavernen (Beimischung von ca. 10 bis 20 Vol.-% zu Erdgas möglich)**
- **Metallhydride (kleine Mengen, z.B. MgH₂, NaBH₄)**
- **Nanoröhrchen (in Entwicklung)**
- **Carbazol (N-Ethyl-Carbazol, C₁₄H₁₃N, in Anfängen der Entwicklung)**

Speicherung - Beispiele

Druckgasflaschenspeicher



Quelle: mcs Technologies

Kryogene Speicherung

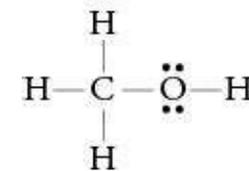
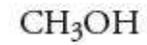


Quelle: Linde

Quelle: Linde



Methanol aus Wasserstoff und Kohlendioxid



Quelle:

<https://1malaysiabiolab.com/product/methanol/>
[22.11.22]

Speicherung in Form von Methanol

Kenngößen:

Schmelzpunkt: - 97,6 °C Siedepunkt: 64,7 °C

Dichte : 791 g/l

$\Delta H_{\text{Verdampfung}}$: 37,4 kJ/mol Rel. Oktanzahl: 106

Heizwert : 5,1 kWh/l bzw. 6,49 kWh/kg

Zündbereich in Luft: 6 - 50 Vol.-% in Luft

Zündtemperatur: 440 °C

MAK-Wert: 270 mg/m³

Gefahrstoffsymbole:



Sicherheitsdaten: <http://www.dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp>

Vor-/Nachteile der Speicherung in Methanol

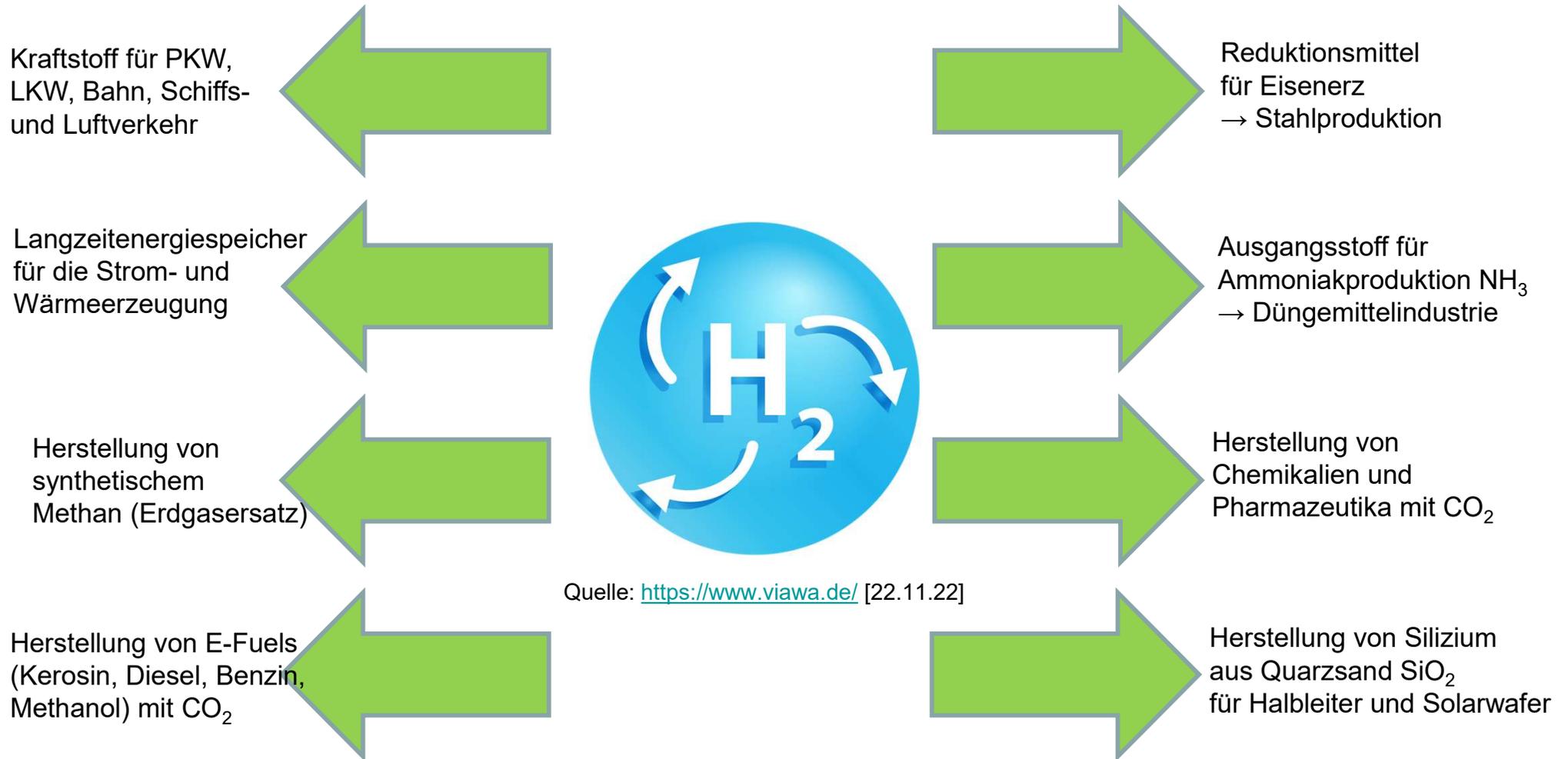
Vorteile:

- Einfache drucklose Speicherung in ortsfesten oder mobilen Tanks, da bei Umgebungstemperatur flüssig!
- Somit auch für dezentrale Energiespeicherung einsetzbar
- Gutes Speichermedium für Wasserstoff:
Durch Steam-Reforming vollständige Umsetzung zu Wasserstoff möglich:
$$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \quad \text{endotherme Reaktion!}$$
- Kann auch im Ottomotor eingesetzt werden
- Dimethylether aus Methanol als Dieselerersatz möglich

Nachteile:

- Energieverlust bei Methanolherstellung: ca. 25%
- Methanol ist giftig

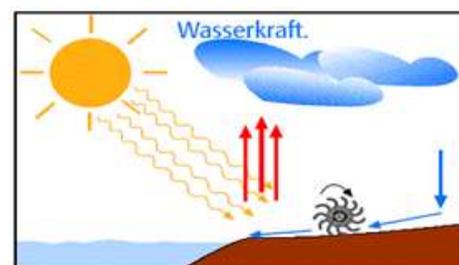
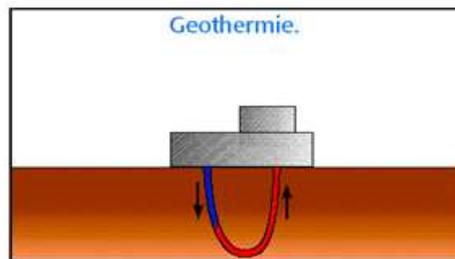
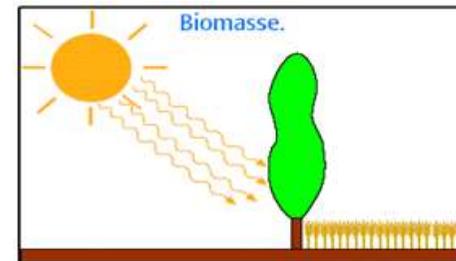
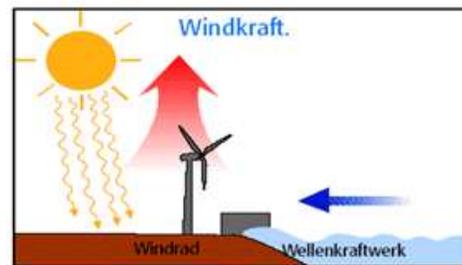
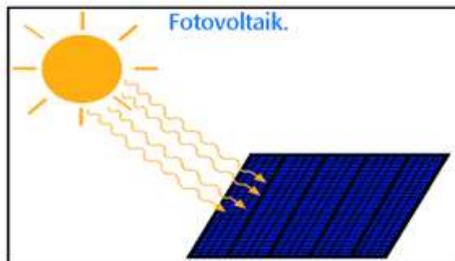
6. Anwendungsmöglichkeiten



7. Woher soll der Wasserstoff in Zukunft kommen?

**Grundsätzlich sollte Wasserstoff treibhausgasneutral hergestellt werden.
Daher sind vorrangig heimische erneuerbare Energieträger hierfür zu nutzen!**

Denkbare Quellen erneuerbarer Energien in Bayern:



Gibt es genügend erneuerbare Ressourcen für grünen Wasserstoff in Bayern?

Grundvoraussetzungen:

1. Energieeinspar- und Energieeffizienzpotenziale realisieren
2. Massiver Ausbau der erneuerbaren Energiebereitstellung aus Wind, Photovoltaik, Solarthermie und Geothermie (sowohl Strom-, Wärme- und Kraftstoffnutzung, wo sinnvoll)
3. Wirkungsgrade von Ketten aus der Nutzung von erneuerbaren Energie betrachten
4. Effizienteste Nutzung von Energie und CO₂-Einsparung sollte Vorrang haben
5. Technologieoffenheit: Keine Denkverbote durch Ideologie und politische Vorgaben!!
6. Neue Abhängigkeiten beim Import von Wasserstoff aus Ländern mit problematischer Menschenrechtssituation sowie Diktaturen vermeiden

Zielsetzung:

Möglichst großen Anteil der Energieversorgung aus heimischen erneuerbaren Ressourcen nachhaltig abdecken ⇒ Energieimportabhängigkeiten verringern!!

8. Wo macht der Einsatz von Wasserstoff Sinn?

Thesen:

1. Wasserstoff lässt sich im Sinne des Klimaschutzes am effizientesten dort einsetzen, wo der größte Einspareffekt für Treibhausgase erzielt wird.
2. Wasserstoff ist ein umweltneutraler chemischer Langzeitenergiespeicher, der im Bedarfsfall zur Stützung und zum Wiederaufbau des Stromnetzes einen großen Beitrag leisten kann.
3. Es sollte daher eine dezentrale Speicherinfrastruktur für resiliente kommunale Energiesysteme aufgebaut werden (z.B. Elektrolyseure auf Kläranlagen, Methanol aus Wasserstoff als flüssiger Energiespeicher)
4. Ein Einsatz im mobilen Anwendungsbereich macht dort am meisten Sinn, wo gespeicherte elektrische Energie in Akkumulatoren oder Redox-Flow-Systeme nicht oder nur schwer realisiert werden kann.

Wasserstoff im Bereich der Mobilität?

Prof. Dr. Volker Quaschning, HTW Berlin:

„Ein Wasserstoffauto benötigt zwei- bis dreimal soviel erneuerbaren Strom wie ein batterieelektrisches Auto. Darum wird der Betrieb auch mindestens doppelt bis dreimal so teuer bleiben“

Quelle: Volker und Cornelia Quaschning, Energierevolution Jetzt!, Hanser Verlag, 2. Auflage 2022

- PKW im Privatbereich: Eher „Stehzeug“ denn Fahrzeug (2h Fahren, 22h Stehen pro Tag)

Aber überlegenswert:

- PKW im gewerblichen Bereich: Kurze Tankzeiten (< 10 Minuten) bei Wasserstoff
- Brennstoffzellenfahrzeug für mobile Notstromversorgung geeignet
- Bei LKW und im Busbereich deutliche Vorteile bei Tankzeiten, Nutzlast und Reichweiten

Industrieanwendungen von Wasserstoff?

Prof. Dr. Volker Quaschning, HTW Berlin:

„Etwa vier Prozent der deutschen Kohlendioxidemissionen stammen aus der Stahlherstellung. Das ist fast so viel, wie der LKW-Verkehr ausstößt. Um diese Emissionen zu vermeiden, wird grüner Wasserstoff gebraucht“

Quelle: Volker und Cornelia Quaschning, *Energierevolution Jetzt!*, Hanser Verlag, 2. Auflage 2022

- Notwendigkeiten bei industriellen Anwendungen:
 - Ersatz von kohlenstoffbasierten Rohstoffen wie Erdgas, Rohöl und Kohle
 - Einstieg in eine dekarbonisierte Rohstoffversorgung
 - Ersatz von Erdgas bei der Herstellung von Wasserstoff durch erneuerbaren Wasserstoff
 - Somit Substitution von 57 TWh an Wasserstoff aus fossilen Quellen erforderlich!!
- **Problem: Derzeit nur rund 6 TWh an sogenanntem Überschussstrom in Deutschland vorhanden (Strom aus Abregelung von Windkraft- und PV-Anlagen pro Jahr)**

Wasserstoff zur Versorgung von Wohngebäuden?

Im Bereich der Wärmeversorgung:

- Großer Teil der Wohngebäude weist schlechte Werte beim Wärmebedarf auf (mehr als 100 kWh pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr)
- Dämmung von Wohngebäuden aufwändig und kostspielig
- Im Mietwohnungsbau wenig Anreiz für Vermieter, Heizwärmebedarf zu senken
- Renovierungsoffensive dringend erforderlich!
- Hohe Kostenintensität beim Heizen mit Wasserstoff

Im Bereich der Stromversorgung:

- **Idee:** Stromproduktion mit Photovoltaikanlagen und Wasserstoffherzeugung im Sommer
- Speicherung für Winterhalbjahr, Einsatz in Brennstoffzellen für Strom- und Wärmeversorgung
- Derzeit nur kleine Stückzahlen
- Hohe Investitionskosten
- Niedrige elektrische Leistungen ($0,5 - 3 \text{ kW}_{\text{elektrisch}}$)
- Zum Teil Probleme mit Standzeiten der Brennstoffzellenstacks

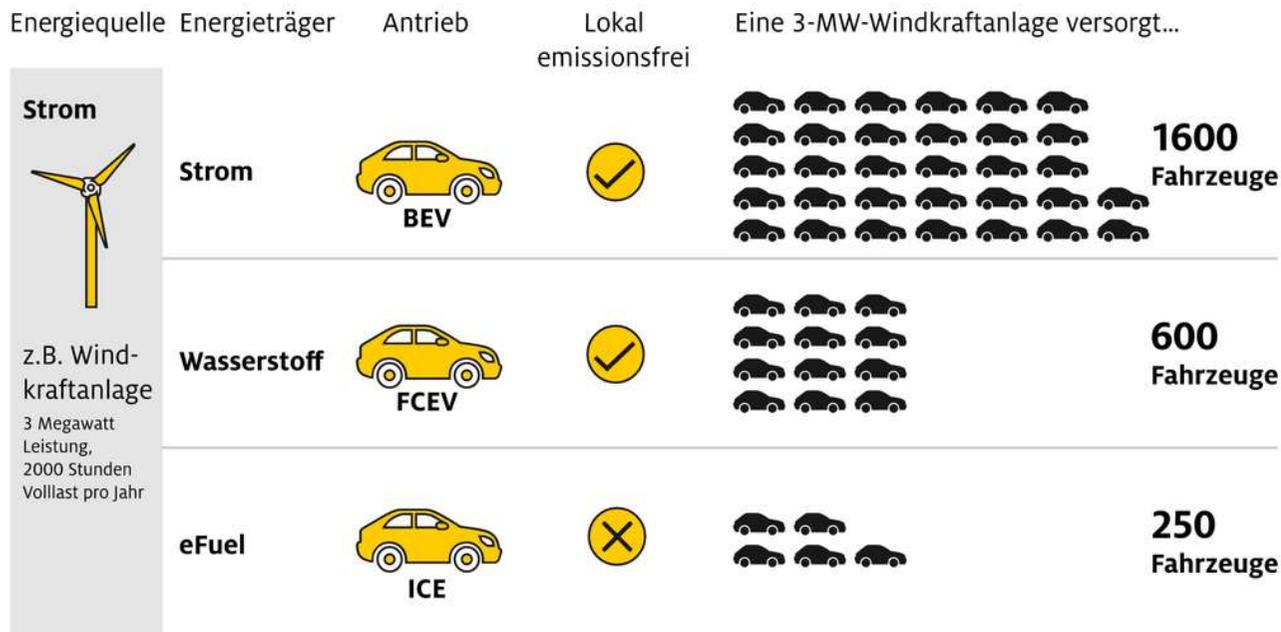
Wasserstoff in E-Fuels?

Ansatz:

Herstellung von gasförmigen Methan oder flüssigen Kraftstoffen aus Kohlendioxid und Wasserstoff

Probleme:

Wirkungsgradverluste bei der Umwandlung (Methanol \approx 25%, Methan \approx 35%)



Quelle: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/> [22.11.22]

9. Perspektiven

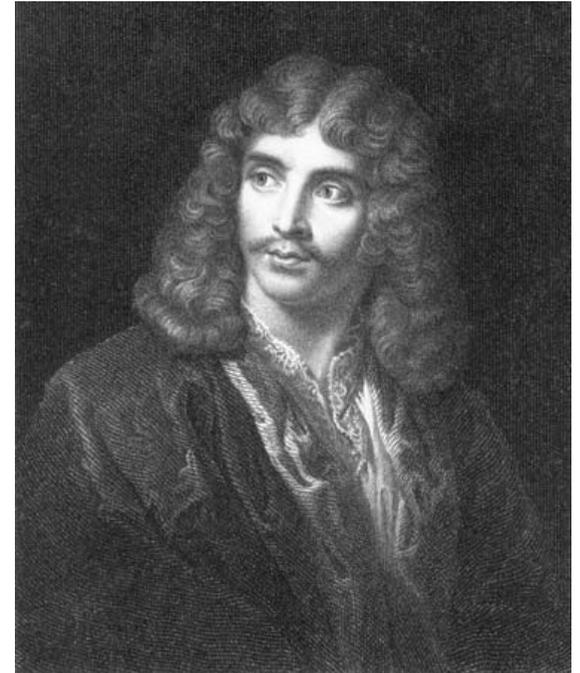
- Wasserstoff als „Champagner“ unter den Energiespeichermedien
- Bereitstellung mit Energiewandlungsverlusten und Kosten verbunden
- Erzeugung dort sinnvoll, wo Strom aus erneuerbaren Quellen im Überschuss vorhanden
- Nutzung des Koppelprodukts Sauerstoff aus der Elektrolyse auf Kläranlagen zur Abwasserreinigung, um Strombedarf für Druckluftbereitstellung zu reduzieren
- Abfälle wie etwa Klärschlamm, Holzabfälle oder andere nicht nutzbare Abfälle (z.B. Plastikmüll) zur Wasserstoffgewinnung über Vergasung nutzen, da Kostensenkungspotenziale vorhanden
- Nutzung von Wasserstoff dort, wo keine anderen effizienteren Energiespeicher möglich

Der Masterplan für eine gelungene Energiewende...



*„Wir sind nicht nur verantwortlich
für das, was wir tun,
sondern auch für das,
was wir nicht tun“.*

Moliere, französischer Dramatiker



... WIR BRAUCHEN
150 MILLIARDEN FÜR
NEUE KRAFTWERKE!!!

... NUTZT LIEBER
EUER HIRN UM
ENERGIE ZU SPAREN





HOCHSCHULE LANDSHUT

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

Prof. Dr. Josef Hofmann
Hochschule Landshut
Am Lurzenhof 1 · D-84036 Landshut

Tel.: +49 871 506-218

Fax: +49 871 506-9218

josef.hofmann@haw-landshut.de

www.haw-landshut.de

