

# Wasserstoff – unverzichtbares aber problematisches Kernelement der Energiewende



Wasserstoffproduktion historisch

Quelle: wikimedia; UK Imperial War Museums; Public Domain

*Das Titelbild zeigt, wie mühsam die Gewinnung und Verwendung von Wasserstoff historisch\* war .*

*Ich hoffe, wir schaffen das besser!*

*\* Gezeigt wird auf dem Foto die Gewinnung von Wasserstoff für die Füllung von Ballonen und Luftschiffen.*

# Zu meiner Person

## Dr. Michael Huber VDI

1974 Diplom und 1979 Promotion an der LMU München in Physikalischer Chemie beim Nobelpreisträger Prof. G. Ertl

Themen: Untersuchungen von Autoabgaskatalysatoren und NH<sub>3</sub>-Katalyse an Eisenoberflächen



1985 bis 1996 Mitbegründung mehrerer Firmen, die seitdem beratend tätig waren u. a. für Firmen der Maschinenbau-, Glas-, Metall-, Kunststoff-, Automobil-, Kraftwerks- und Elektroindustrie. 2005 größeres Projekt zu Energieerzeugung, Klimawandel und Energiewende.

Ab 2007 Dozent für Neue Werkstoffe, Neue Technologien und Regenerative Energien

***Ich bin bezüglich dieses Vortrags keinem Unternehmen, keinem Auftraggeber, keiner Partei und keinem Lobbyverband verpflichtet.***

# Welche Probleme müssen wir für Energiewende und CO2-Null lösen?

Aktueller Endenergieverbrauch ca.	2500 TWh
Regenerativ bislang ca.	470 TWh
Wasser-, Wind- und Solarstrom* ca.	43 %
EE-Strombedarf bis 2045 ca.	800 TWh bis 1000** TWh

*\*\*Bei den 1000 TWh muss der Strom für Wasserstoff enthalten sein.*

*\* Biogas und Biomasse ist nicht mehr steigerbar, sondern müssen sogar bis 2045 um 50% bis 90% reduziert werden*

Voraussetzungen sind massive Energieverbrauchs-Reduzierungen:

Verkehr ca.	- 80 %
Gebäudewärme ca.	- 80 %
Industrie	erheblich

# Energieverbrauchreduzierung in der Industrie geht nicht?

*BASF hat innerhalb von 10 Jahren die Produktion in Ludwigshafen verdoppelt und die CO<sub>2</sub>-Emissionen\* halbiert!*

*\*D.h. auch Energieeinsparung durch massive Einsparung fossiler Energieträger*

*Innerhalb ca. 10 Jahren könnte die gesamte Produktion der BASF in Deutschland auf CO<sub>2</sub>-frei umgestellt werden.*

*BASF investiert jetzt selbst 2 Mrd. in die Erzeugung von Windstrom und die Wasserstoff-Elektrolyse.*

## Wie das geht:

- Chemische Produktionsprozesse, die CO<sub>2</sub> freisetzen, werden umgestellt.
- Chemische Prozesse mit Wasserstoffbedarf werden auf EE-Wasserstoff umgestellt.
- Alle chemischen Prozesse mit Wärme direkt aus EE-Strom und/oder Kaskadennutzung der Abfallwärme.

# Impuls Statement

*Wasserstoff ist für die Energiewende unverzichtbar.*

*Die Erzeugung, Verteilung und Speicherung von Wasserstoff werden einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende auf dem Weg zu CO<sub>2</sub>-Null leisten müssen.*

*Wasserstoff ist eine **relativ kleine**,  
wenn auch unverzichtbare **Teillösung** der Energiewende!*

# Wofür brauchen wir für THG\*-Null Wasserstoff?

- **Stahlindustrie**

Direktreduktion des Eisenoxids mit Wasserstoff.

(Für Massenstahl in Deutschland fragwürdig, aber Deutschland ist weltweit technologisch noch führend bei der Produktion von Spezialstählen. Ca. 35% des Stahl in D stammt aus Recycling, und kann wirtschaftlich und energetisch günstig z. B. als Monierstahl verwendet werden).

- **Chemische Industrie**

Ersatz von fossilem Wasserstoff als Rohstoff für chemische Produkte.

Umstellung auf EE-Strom und EE-H<sub>2</sub> und Verzicht auf Erdgas, Erdöl oder Kohle basierte Rohstoffe

- **Prozesswärme in der Industrie**

Überall wo EE-Strom nicht induktiv oder resistiv das Erdgas ersetzen kann.

(Evtl. lässt sich die Wärme z. B. in der Glasindustrie oder Zementindustrie nicht (komplett) durch Strom erzeugen).

- **Für Rest(!)bereiche im Personen und Güterverkehr**

Min. 90% des Verkehrs müssen durch den direkten Einsatz von EE-Strom abgedeckt werden!

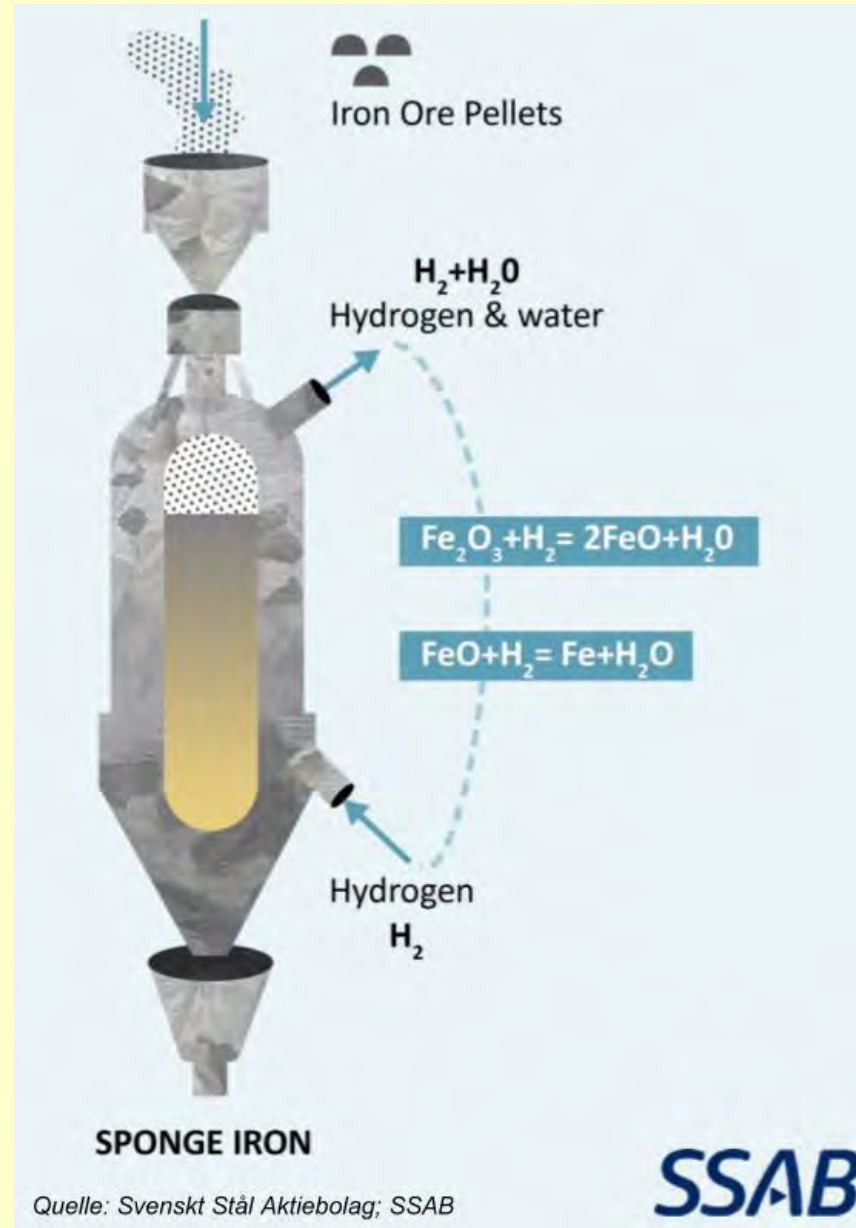
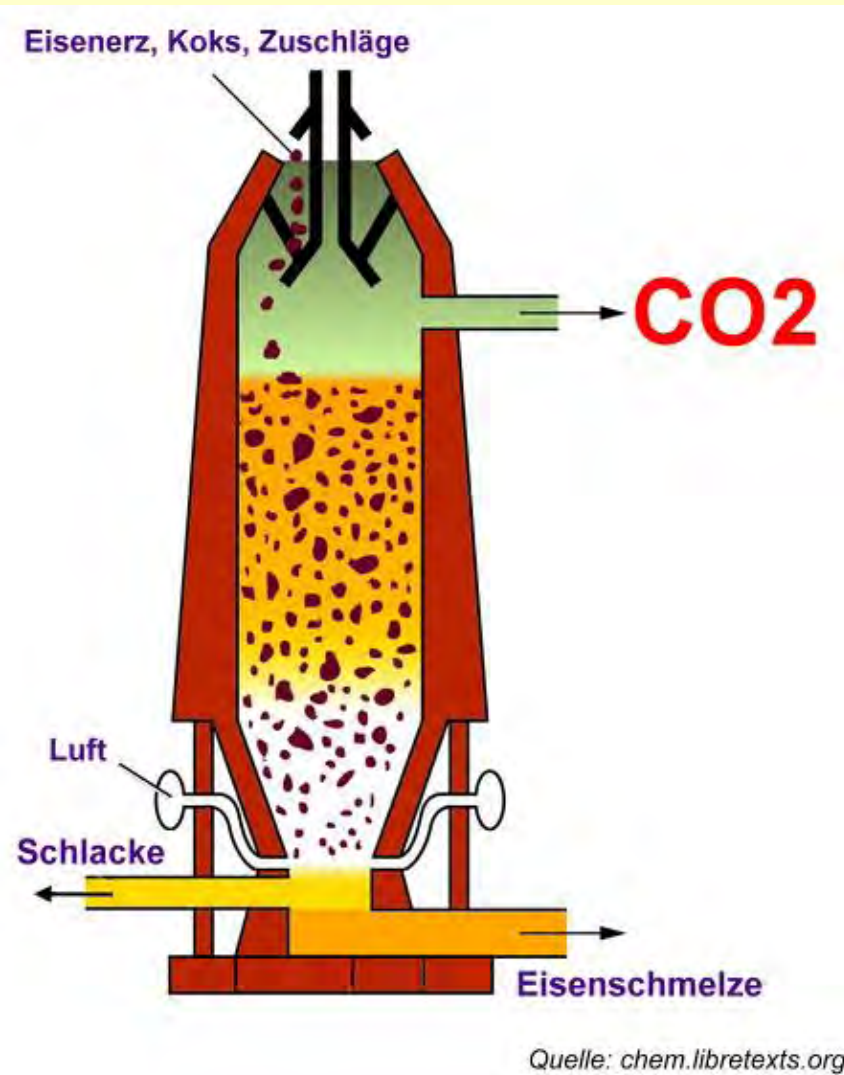
- **Als Speichermedium zur Überbrückung von EE-Stromschwankungen und Dunkelflauten**

Aus temporär überschüssigem EE-Strom muss Wasserstoff (Power-to-Gas, PtG) erzeugt werden.

Teils zur lokalen Speicherung zur späteren Verwendung bei Strommangel mittels Brennstoffzelle oder BHKW, teils zur Konvertierung in Methan zur Speicherung und nationalen Verteilung im ehemaligen Erdgasnetz zur Stromerzeugung in großen Gaskraftwerken bei längeren Dunkelflauten.

*\*Statt CO<sub>2</sub>-Null müssten wir von Treibhausgas-Null sprechen, da auch z. B. N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> erheblich zum Klimawandel beitragen!*

# Wasserstoff für die CO2-freie Stahlherstellung



Bei der **Direktreduktion von Eisenerz Pellets mit Wasserstoff** entstehen nur Wasser und Eisen-schwamm-Pellets.

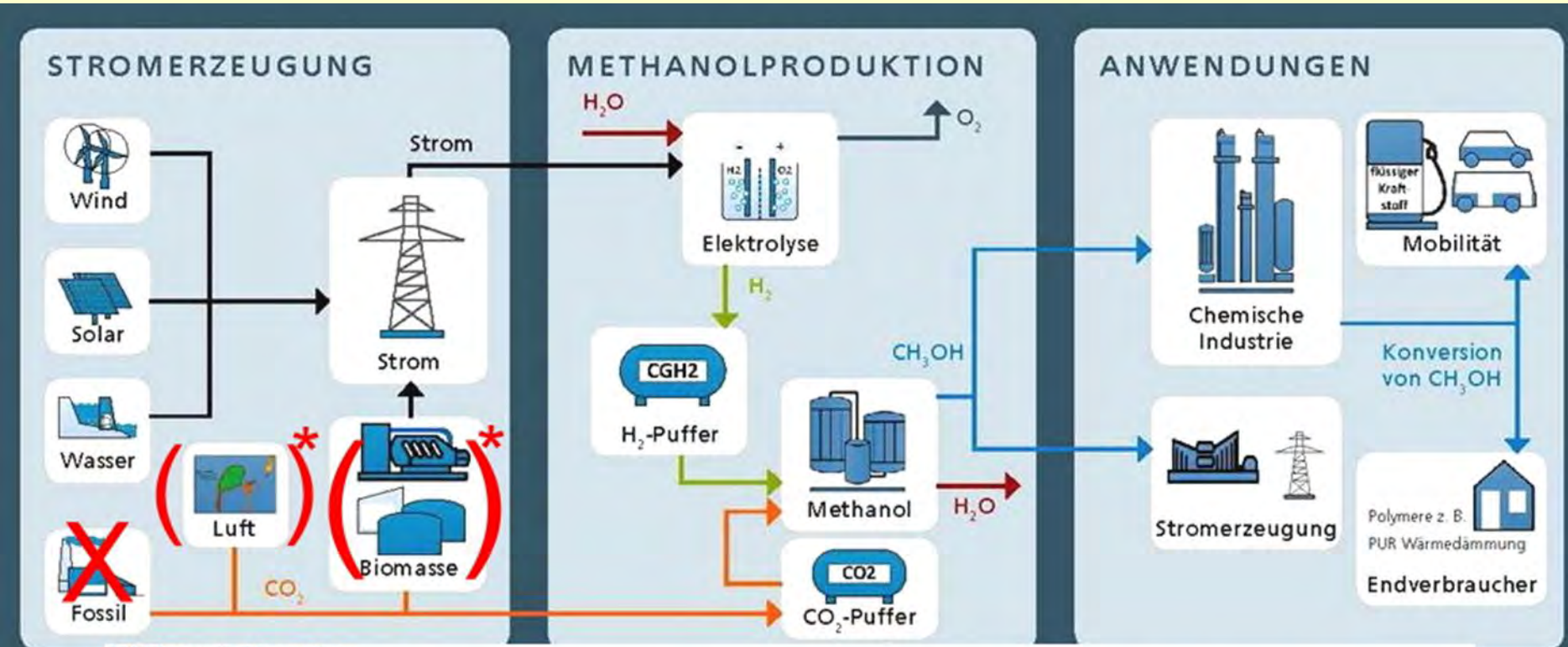
Diese Eisen-Pellets können dann (bevorzugt) mit Induktionsöfen weiter verarbeitet werden.

*Also prinzipiell  
CO<sub>2</sub>-frei!*

Die Stahlherstellung mit Reduktion des Eisenerz mit Kohle erzeugt ca. 8% der Treibhausgasemissionen in Deutschland.



# Wasserstoff für die Chemie-Industrie



Dazu wird mit EE-Strom Wasserstoff erzeugt und daraus zusammen mit CO<sub>2</sub> z. B. Methanol (CH<sub>3</sub>OH).

Mit Erneuerbarer-Energie kann man alles machen, sauberes Wasser, Arzneimittel, Treibstoffe (soweit noch nötig), Kunststoffe ja sogar Lebensmittel.

Abbildung unter Verwendung:  
Fraunhofer ISE; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/konversion-von-co2-und-h2-zu-methanol-als-nachhaltigem-chemischen-energiespeicher.html>

\* statt aufwändig CO<sub>2</sub> aus Luft (Gehalt nur 400 ppm) zu verwenden, sollten CO<sub>2</sub>-haltige Abfallgase genutzt werden. Biomasse sollte soweit überhaupt verfügbar, besser nicht zur Stromerzeugung sondern zur direkten stofflichen Konversion genutzt werden.

**Methanol z. B. aus EE-Wasserstoff und CO<sub>2</sub> kann als Ausgangsstoff Erdöl und Erdgas bei der Herstellung sämtlicher chemischer Stoffe voll ersetzen!**

# Ohne Wasserstoff-Erzeugung in Deutschland droht Deindustrialisierung!

## Beispiel Stahlindustrie:

Für Thyssen-Krupp gab es bereits 2 Übernahmeangebote, die Umwandlung in Vertriebs Tochter und Stilllegung der Stahlproduktion in Deutschland vorsahen. Verlagerung der Produktion nach Schweden bzw. Australien unter **Nutzung des dort vor Ort erzeugten Wasserstoffs**.

Bei Deutschlands Stahlindustrie geht es nicht um billigen Massenschl, sondern z. B. Salzgitter, Dillinger Hütte und Thyssen-Krupp sind nach wie vor **noch in der internationalen Spitzengruppe bei Spezialstählen**.

**Nicht nur die Arbeitsplätze wären weg, sondern auch das Knowhow!**

***Ohne nationale und lokale Wasserstoffherzeugung werden wir den Industriestandort Deutschland nicht halten!***

# Wieviel Wasserstoff brauchen wir wirklich?

## bis 2030

- Für Industrie (Stahl, Chemie etc.) ca. **7 Mio. t**
  - Rest-Güter-Lkw-Verkehr und Binnenschifffahrt ca. **3 Mio. t**
- Dafür nötige Wasserstoff Elektrolyseurleistung. ca. **40 GW**

## bis 2040

- für PtL (Flugverkehr) ca. **1,5 Mio. t**
- zur Notstromspeicherung ca. **3 – 6 Mio. t**
- also für zusätzliche Elektrolyseurleistung. ca. **20 – 30 GW**

***D. h. insgesamt ca. 60 GW bis 70 GW Elektrolyseurleistung bis 2040***

# Ist bis 2045 genug Strom für Wasserstoff verfügbar?

- **Windstrom** ca. **200 bis 300 GW** Peakleistung\* Erzeugung, derzeit ca. 62 GW
- **Solarstrom** ca. **500 GW** Peakleistung Erzeugung, derzeit ca. 52 GW
- **Netzleistung** ca. **140 GW** Spitzenverbrauch in 2045
- **Elektrolyseure** ca. **70 GW** Verbrauch in 2045

\* bei OffShore WEAs ist der geforderte Zubau bis zu 60% geringer im Vergleich zu OnShore WEAs

→ Bei Normalnachfrage und Erzeugungsleistung kann nur ein relativ geringer Teil des Stroms für die Erzeugung von Wasserstoff verwendet werden.

→ Nur temporär, wenn Wind und/oder Strom über ca. 140 GW Erzeugungsleistung kommen, kann Wasserstoff in größerem Maßstab erzeugt werden.

# Wie wird Wasserstoff bislang erzeugt ?

Klassisches Reforming:

Kokskohle + Sauerstoff + Wasser → Wasserstoff + CO<sub>2</sub>

Erdölderivate + Sauerstoff + Wasser → Wasserstoff + CO<sub>2</sub>

Modernes Dampfreformierung:

Erdgas + Wasser → Wasserstoff + CO<sub>2</sub>

*Nachteil es entsteht immer viel CO<sub>2</sub>!*

# Statt Elektrolyse – alternative Methoden der Wasserspaltung?

## **Altes Verfahren Lichtbogen-Pyrolyse (Kvaerner) bei über 3000 °C**

Nur theoretisch energieeffizienter als Elektrolyse, da hohe Abwärme Verluste.

→ unwirtschaftlich

## **Neues Verfahren Thermolyse im „Solarkocher“ bei über 3000 °C.**

Aufwand für Spiegelanlage und hochtemperaturfeste Materialien extrem hoch.

→ unwirtschaftlich

## **Plasmalyse (elektrische Entladungen) von Schmutzwasser**

In Pilotanlage gut möglich, erfordert für große Mengen H<sub>2</sub> eher zu große Anlagen

→ unwirtschaftlich\*

*\* für die Massenproduktion wahrscheinlich ungeeignet, aber Wasserstoff als Nebenprodukt der Abwasser- und Gülle-Aufbereitung erscheint sinnvoll!*

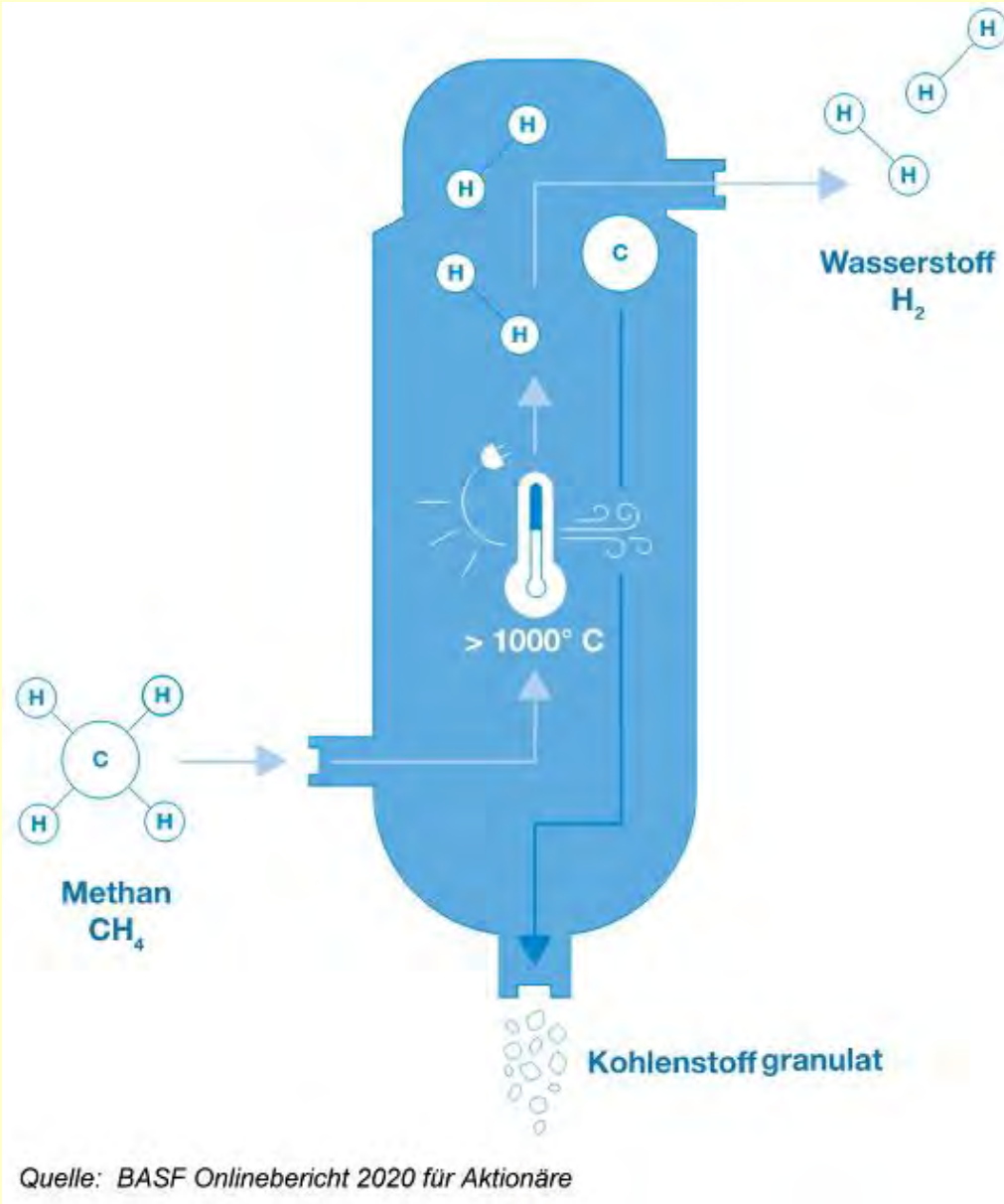
## **Wasserstoff von Algen im Bioreaktor (Photolyse)**

Erfordert wegen des geringen Wirkungsgrads (unter 1%) riesige Anlagen

→ unwirtschaftlich

*Im Lauf der nächsten 10 bis 15 Jahre könnten sich  
weitere brauchbare Lösungen entwickeln.*

# Alternativen zur Elektrolyse – Erdgas Pyrolyse ?



## Funktionsweise:

Fossiles Methan durchströmt einen auf über  $1000^\circ \text{C}$  erhitzten Reaktor. Das Methan zersetzt sich in Kohlenstoff und Wasserstoff. Der Wasserstoff strömt nach oben und kann abgeleitet werden. Der gebildete Kohlenstoff rieselt unten raus.

## Vorteile:

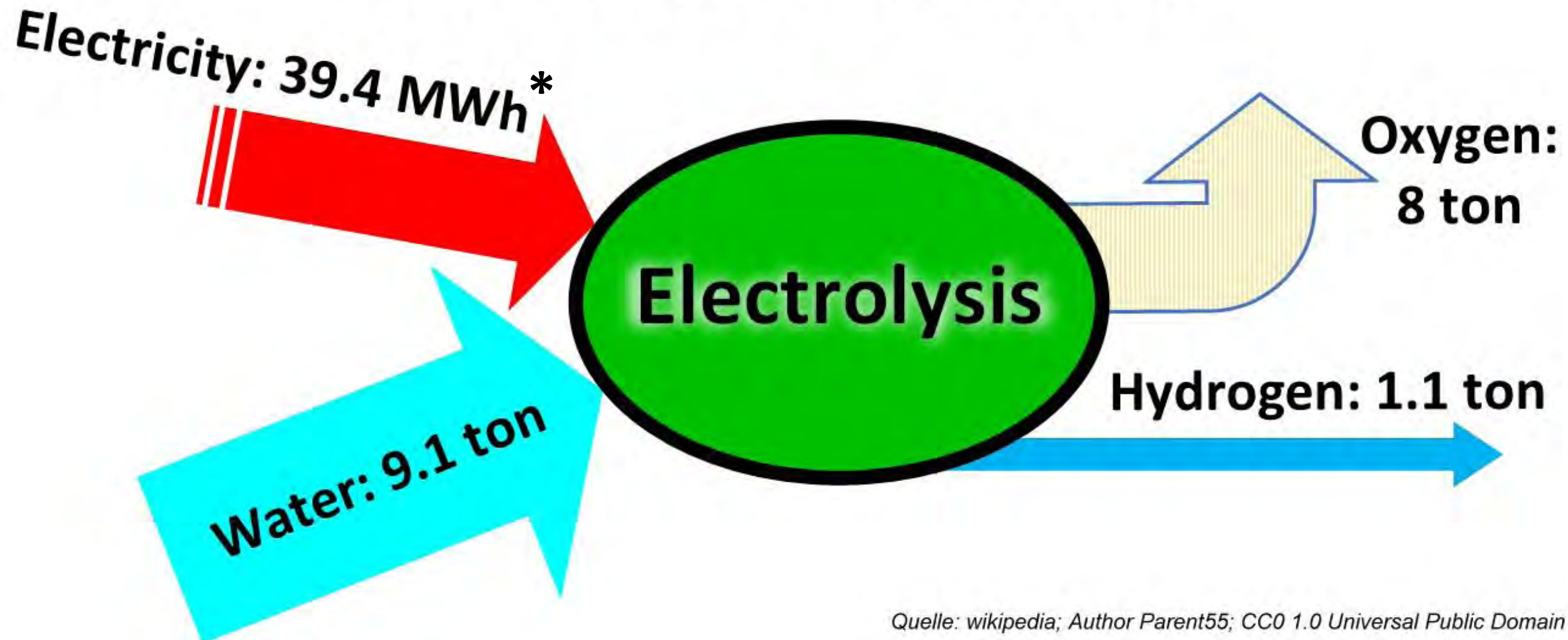
- Nur ca. 1/5 Energieverbrauch\* im Vergleich zur Elektrolyse. (\* ohne Abwärmeverluste)
- Es wird dabei kein  $\text{CO}_2$  freigesetzt.

## Nachteile:

- Der gebildete Kohlenstoff (relativ große harte Bröckel) ist weder für Carbonfasern, noch als Bodenzusatz im Ackerbau, noch als Reifenzusatz (Ersatz für Ruß) brauchbar.
- Die Förderung des Erdgases ist mit nicht **zu vernachlässigenden Methanemissionen** verbunden.
- **Da das Erdgas teuer gekauft werden muss und der Kohlenstoff nicht verkauft werden kann, ist das Verfahren bislang teurer als die Elektrolyse.**

# Wasserstoff durch Elektrochemische Zerlegung des Wassers

## No Greenhouse Gas Pollution



Quelle: wikipedia; Author Parent55; CC0 1.0 Universal Public Domain

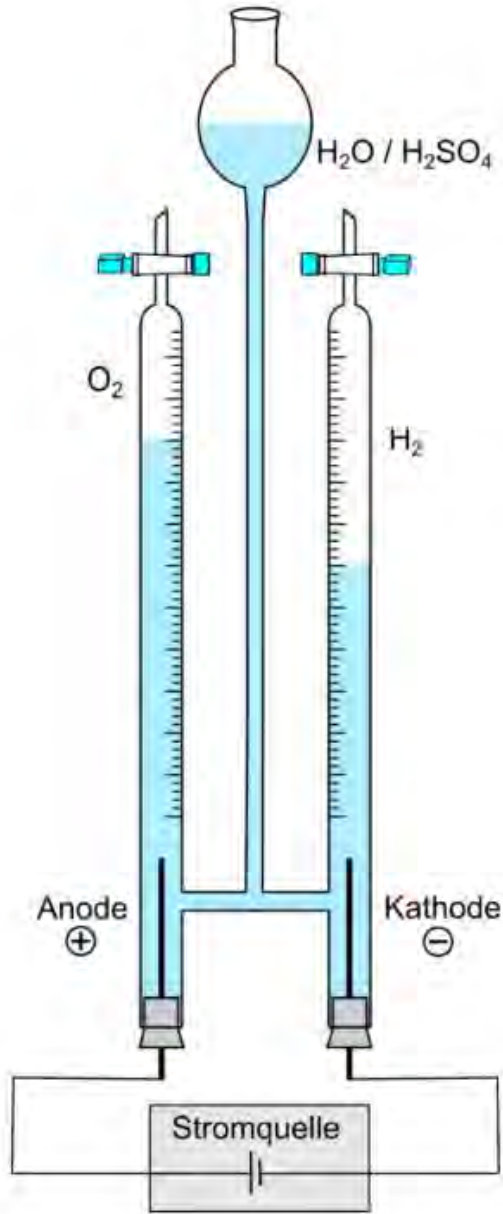
\* ca. 40 MWh für 1,1 t Wasserstoff ist der theoretische Wert, es kommt jedoch zu Verlusten deshalb ca. 50 kWh pro kg H<sub>2</sub>.



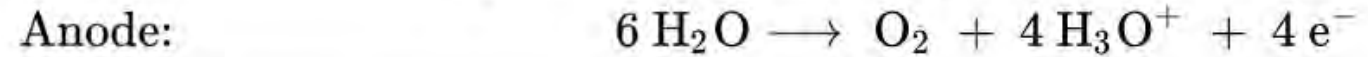
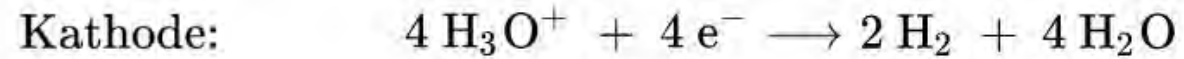
# Energetische und stoffliche Umsätze bei Wasserstoff-Elektrolyse oder Nutzung

1,4 kWh Strom	$\triangleq$	1,0 kWh Wasserstoff
50 kWh Strom	$\triangleq$	1,0 kg Wasserstoff
1 kg Wasserstoff	$\triangleq$	33,3 kWh Verbrennungswärme

# Die Elektrochemie der Wasserstoff-Elektrolyse



In saurer Lösung:



In alkalischer Lösung:

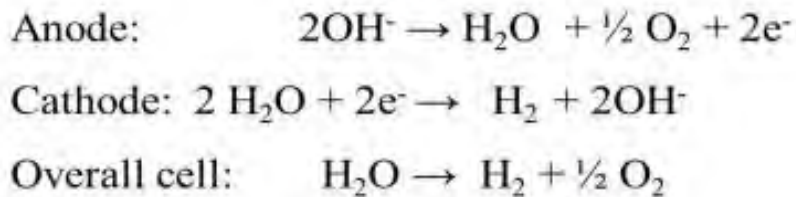
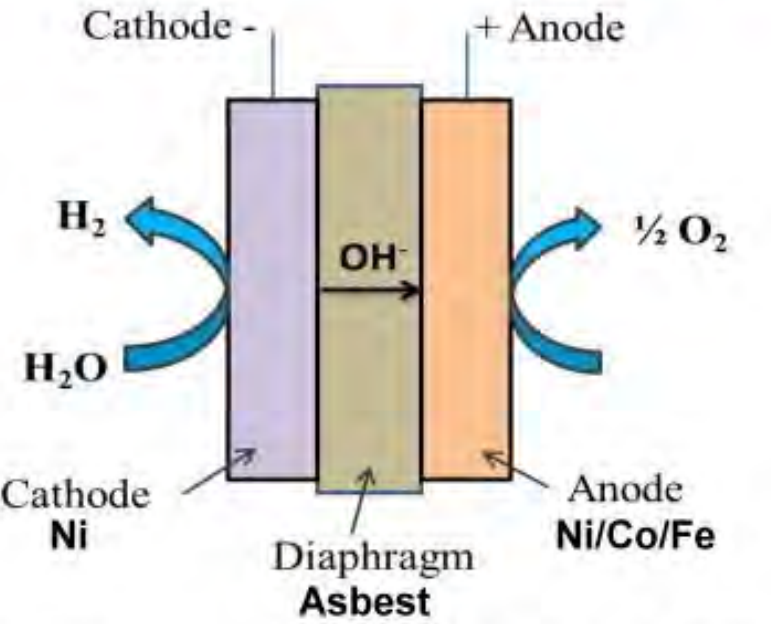


Die theoretische Zersetzungsspannung beträgt in reinem, neutralen (pH 7.00) Wasser 0,81 Volt. Es kommt jedoch je nach Elektrodenmaterial zu Überspannungen bis über 30 Volt. Mit Platinelektroden beträgt die Zersetzungsspannung nur ca. 1,1 Volt. In sauren oder basischen Lösungen ist die Zersetzungsspannung je nach Elektrodenmaterial ca. 0,66 Volt bis 1.5 Volt. Die Zersetzungsspannung hängt jedoch auch noch von der Stromdichte ab. Auch die Korrosionsbeständigkeit vieler Elektroden ist nicht gegeben.

Abbildung unter Verwendung: wikipedia; Roland.chem; CC0 Public Domain

# Wasserstoff-Elektrolyse – die verschiedenen Methoden

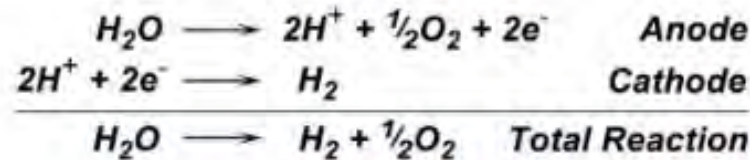
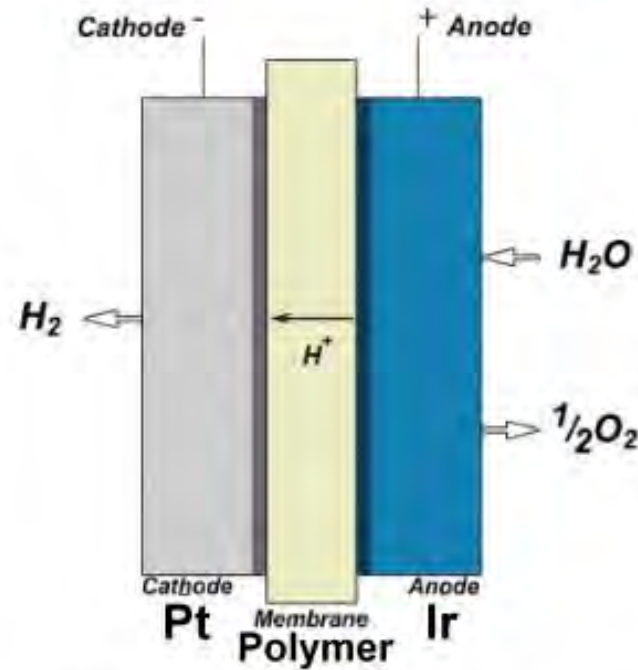
## Alkalische Elektrolyse



Betriebstemperatur 40 °C bis 90 °C

Quelle: Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review; S.Shiva KumarV.Himabindu; www.sciencedirect.com

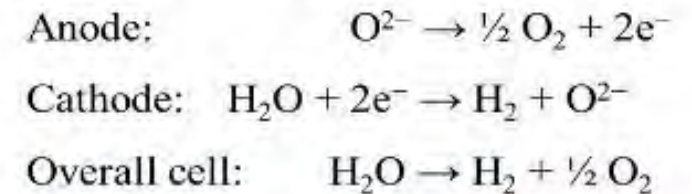
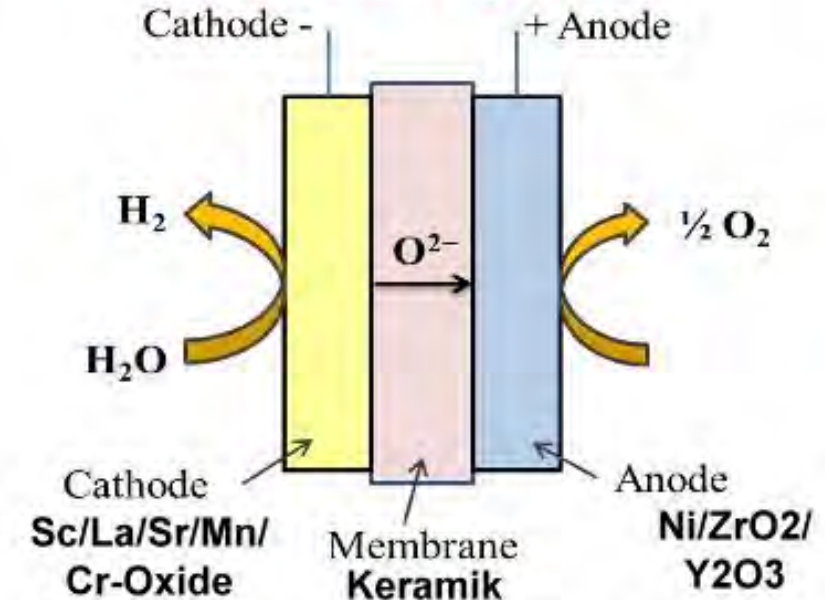
## PEM Elektrolyse



Betriebstemperatur 20 °C bis 100 °C

Quelle: wikipedia; Davidlfritz; CC BY-SA 3.0

## Hochtemperatur Elektrolyse



Betriebstemperatur 800 °C bis 900 °C

Quelle: Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review; S.Shiva KumarV.Himabindu; www.sciencedirect.com

# Vor- und Nachteile verschiedener Wasserstoff-Elektrolyseure

		<b>Alkali- Elektrolyse</b>	<b>PEM- Elektrolyse</b>	<b>Hochtemperatur Solid-Oxid- Elektrolyse</b>
<b>Wirkungsgrad in %</b>	2020	50 - 60	ca. 60	ca. 80
<b>Stromdichte</b>	in A/cm <sup>2</sup>	bis 0,5	ca. 2	bis 1,3
<b>Leistungsbereich in 2020 verfügbarer Anlagen</b>	in MW	bis 130	bis 6	0,02
<b>Temperaturbereich</b>	in °C	40 bis 90	20 bis 100	800 bis 900
<b>Teillastbereich</b>	in %	20-100	5-100	-
<b>Lastgradient</b>	in %/s	< 1	10	0,05
<b>Produktionsraten pro Zelle</b>	in Nm <sup>3</sup> /h	1000	460	5,7
<b>Lebensdauer</b>	in h	bis zu 90.000	bis zu 50.000	unbekannt

# Vor- und Nachteile verschiedener Wasserstoff-Elektrolyseure

**Alkali-Elektrolyseur:** Bezüglich des Teillastbereichs, des Lastgradienten und der Baugröße hat die bereits bewährte Alkali-Elektrolyse Nachteile. Aber bezüglich Haltbarkeit, Leistungsgröße verfügbarer Anlagen und der Produktionsraten ist es **kein Risiko, die nächsten ca. 10 Jahre vor allem in diese Technologie zu investieren.**

**PEM-Elektrolyseur:** Kompakter und variabler bezüglich Leistungsbereich ist die PEM Zelle. Doch der noch nötige Einsatz von extrem teuren Platin- und Iridium Elektroden ist problematisch. **Erst nach Ersatz durch billigere Elektroden und Skalierung auf größere Leistung** könnten sie für den Masseneinsatz interessant werden.

**Hochtemperatur Elektrolyse:** Bei hohen Temperaturen sinkt der Energiebedarf für die eigentliche Spaltung des Wassers und der Wirkungsgrad dafür steigt. **Aber woher kommt die Energie für das ständige Heizen der Anlage** (senkt das nicht den Gesamtwirkungsgrad?). Vielleicht kommt das Verfahren die nächsten 10 Jahre aus den Kinderschuhen.

# Energie- und Kosteneffizienz beim Einsatz von Wasserstoff

## Beispiel Stahlherstellung:

- ca. 500 kg Koks pro Tonne herkömmlichem Stahl
- ca. 5,7 MWh pro Tonne herkömmlichem Stahl
- ca. 1,7 t CO<sub>2</sub> pro Tonne herkömmlichem Stahl
- ca. 30 kg H<sub>2</sub> pro Tonne CO<sub>2</sub>-freiem Stahl mit Wasserstoff
- ca. 3,31 MWh pro Tonne CO<sub>2</sub>-freiem Stahl mit Wasserstoff
- ca. **58 Euro** Umwandlungskosten **pro Tonne CO<sub>2</sub>-armem Stahl mit Erdgas**
- ca. **290 Euro** Umwandlungskosten **pro Tonne CO<sub>2</sub>-freiem Stahl mit Wasserstoff**

*Wasserstoffstahl ist bzgl. Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Emission ideal. Aber unbezahlbar?*

# Nein! Mit staatlichen Investitionen gut machbar!

Begreift man ganz altmodisch **Infrastruktur – und damit auch die Energieversorgung als Grundlage einer florierenden Wirtschaft – als öffentliche bzw. Staatsaufgabe**, schaut das ganz anders aus:

- Der Wasserstoffstahl wird in D nur so teuer, wenn der Stahlhersteller **selbst in die nötige Wasserstoff-Erzeugung investieren** und mit einem schnellen **Return of Investment + üblicher Verzinsung** rechnen muss. Und dann auch noch den **EE-Strom zu den bislang marktüblichen Preisen teuer zukaufen** muss.
- Würde jedoch der **Strom unter 5 Cent/kWh zugeliefert und der Wasserstoff kostengünstig aus durch staatliche Investitionen (≠ Subventionen!) aufgebauten Elektrolyseuren**, kann der Stahl bereits jetzt zu ähnlichen Preisen wie mit Erdgas erzeugt werden.
- Schweden z. B. macht das vor und will mit billigem EE-Strom und EE-Wasserstoff bis 2030 seine Industrie auf CO<sub>2</sub>-frei umstellen. Nicht aus grünen Idealismus oder als grüne Diktatur (GRÜNE haben nur 4,5 % Wähler), sondern **weil sich Schweden Vorteile am Weltmarkt verspricht**.

# Energetische Verluste bei der Wasserstoffnutzung im Verkehr und zur Stromerzeugung

Verluste bei der **Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung**, Stand der Technik ca. **50%**

Verluste bei **Rückgewinnung von Strom aus Wasserstoff mit Brennstoffzellen**, Stand der Technik ca. 50%  
Gesamtverlust bezogen auf EE-Strom ca. **70%**

Verluste bei **Rückgewinnung von Strom aus Wasserstoff mit Gas-Dieselaggregaten**; Stand der Technik 50%  
Gesamtverlust bezogen auf EE-Strom ca. **75%**

Verluste beim **Einsatz in Verbrennungsmotoren von Fahrzeugen**, Stand der Technik weitere 60%  
Gesamtverlust bezogen auf EE-Strom Strom min. **80%**

Verluste beim **Einsatz in Fahrzeugen mit Brennstoffzelle und E-Motor**  
(Wasserstoff Elektrolyse 50%, Brennstoffzelle 50%, E-Motor 10%)  
Gesamtverlust bezogen auf EE-Strom ca. **75%**

Verluste beim **Einsatz von PtL als Synthetischer Sprit**; (PtG 50%, Wasserstoff zu PtL ca. 30%; V-Motor 60%)  
Gesamtverlust bezogen auf EE-Strom ca. **80%**

Verluste bei **"Not"strom aus Wasserstoff mit Gasturbinenkraftwerke oder GuD** (60% bei GWK, 40% bei GuD)  
Gesamtverlust bezogen auf EE-Strom bei GuD ca. **70%**

Hinweis: Dass in einem Teil der Beispiele die als Abwärme auftretenden Verluste z. B. als Fernwärme genutzt werden können, zählt nicht, wenn der Zweck des Imports oder der Zuleitung von Wasserstoff die Stromgewinnung vor Ort ist, um den Ausbau des Stromnetzes zu sparen.

*Hinweis zu den zugrunde gelegten Wirkungsgraden: Sie sind der aktuelle Stand der angewendeten Technik und nicht irgendwelche Werte, die vielleicht in 10 Jahren oder nie erreichbar sind.*



# Energetische Verluste bei direktem Einsatz von EE-Strom

## Energieverlust beim Stromtransport über 1000 km

im **HGÜ\*-Netz** (induktive und kapazitive Verluste entfallen)

**3% bis 6%**

im **AC\*-Netz**

**6% bis 10%**

*\* HGÜ Hochspannung Gleichstrom Übertragung arbeitet bei modernen Leitungen meist mit 2 x 550 kV  
Im AC-Netz wird für Fernübertragung in D und EU meist mit 380 kV gearbeitet.*

Energieverluste mit **Batteriespeichern**, (Aufladen inklusive Entladen) ca.

**10%**

Energieverluste mit **modernen Elektromotoren**

**5 % bis 10%**

Zum Vergleich

Energieverlust beim **Wasserstofftransport in Pipeline über 1000 km**

**> 10%**

*Direkte Verwendung und Ferntransport von Strom ist energetisch viel günstiger als Erzeugung, Ferntransport und Umwandlung von Wasserstoff in Nutzenergie.*

# Woher soll der Wasserstoff kommen?

**Der Wasserstoff kommt aus Nordafrika:** Doch da ist der lange **Transport relativ teuer** (was den Kostenvorteil der dortigen Produktion kompensiert) und die **Versorgungssicherheit (politisch instabile Region) ist nicht gegeben**. Aus beiden Gründen scheiterte übrigens Desertec 1.

## **Wasserstoff als Neokolonialismus?**

Die Nordafrikaner könnten den Strom und den Wasserstoff selbst für den Ausbau von eigener Industrie, zur Gewinnung von Trinkwasser für die Bevölkerung und die Landwirtschaft brauchen. Strom, Wasserstoff und Wasser in (Nord)Afrika selbst verwendet, würde auch die **Ursachen der Armutsmigration beseitigen**.

**Wasserstoff kommt aus Europa?** **Doch brauchen unsere Nachbarländer ihren Strom und den Wasserstoff nicht selbst?** Natürlich nichts gegen etwas EE-Strom oder Wasserstoff aus Norwegen oder den Niederlanden, wenn es dort Überschüsse gibt. Aber woher soll der Wasserstoff in großen Mengen kommen?

# Wäre Wasserstoff aus Nordafrika wirklich billiger und sicher?

Studien\* z. B. von VDI, DLR oder Frontier schlagen vor, den Wasserstoff oder dort produziertes PtL aus Nordafrika (NA) zu importieren. Hauptargument, in NA sei der Wasserstoff besonders wirtschaftlich zu produzieren. Denn WEA und PV hätten dort wesentlich höhere Effizienz. Ist das richtig? (\* Es gibt auch widersprechende Studien u. a. auch vom VDI).

**WEA:** Es gibt windreiche Gegenden in NA , aber **keine Vorteile gegenüber OffShore Anlagen in der Nordsee.**

**PV:** **Jahresenergie-Gesamtertrag ist ca. doppelt so hoch wie Mitteleuropa.** Allerdings reduzieren Staubprobleme und höhere Umgebungstemperaturen den Wirkungsgrad. Bestenfalls liegt der Gestehungspreis in NA bei ca. 2 Cent/kWh\* im Vergleich zu ca. 4 Cent/kWh\* in D. Das Argument in 10 Jahren gäbe es neue PV-Module, die den Gestehungspreis in NA auf 1,2 Cent/kWh senken würden, vergisst, dass PV-Strom damit auch in Europa billiger würde.

*\*Gestehungspreis bei neuen großen Anlagen.*

**Strom aus Solarthermie:** Ist inzwischen – wg. der hohen Anlagekosten – wesentlich teurer als aus PV.

**Elektrolyse des Wasserstoffs in NA:** Das Problem **mangelnden salzfreien Wassers in NA** ist bislang nicht geklärt, bzw. würde zusätzliche Kosten verursachen (Strom für Entsalzung). Übrigens, wohin mit dem giftigen Chlor?

**Transport des Wasserstoffs nach Deutschland:** Verflüssigung und Transport per Schiff kostet Energie und treibt die Kosten hoch. Per Gas-Pipeline liegt der **Energieverlust bei über 10% auf 1000 km.** Dazu sind alle ca. 40 km Verdichterstationen nötig (bei Erdgas nur alle 100 bis 250 km). Auch das macht den **H2-Ferntransport unwirtschaftlich.**

# Aus der Geschichte lernen wir?

Zur Erinnerung: Seinerzeit wollten uns die lieben Polen und Ukrainer die Pipeline für das Erdgas aus Russland sperren, um dadurch günstigere Gaspreise zu erpressen.

Das war übrigens der Grund für den Bau von Northstream I.

Und da sollen wir an eine politisch sichere Wasserstoff-Versorgung aus Nordafrika glauben?

# Kann das deutsche Erdgasnetz in ein Wasserstoffnetz umgewandelt werden?

Das deutsche Erdgasnetz besteht aus

**ca. 120.000 km Hochdrucknetz**

**ca. 390.000 km Feinverteilungsnetz**

Allein das schon lässt erahnen welcher Aufwand das wäre.

**Ein flächendeckender (!) Umbau in ein Wasserstoffnetz erscheint unwirtschaftlich:**

- **Höherer Reibungsverlust beim Wasserstofftransport** erfordert höhere Drücke (min 200 bar) im Vergleich zu Erdgas.
- Der **geringere Energieinhalt im Vergleich zu Erdgas** erfordert höhere Drücke (min 200 bar) im Vergleich zu Erdgas.
- Die **Transportverluste** (Reibungsverluste) steigen mit dem Druck und liegen bei 200 bar **über 10% pro 1000 km**.
- **Erdgasverdichter sind ungeeignet für Wasserstoff**, d. h. alle Verdichter müssten ausgetauscht werden.
- Wasserstoff erfordert bei 200 bar ca. alle 40 km Verdichter, d. h. im Vergleich zu Erdgas müsste die **Anzahl der Verdichter ca. verdreifacht werden**.

# Warum sind Wasserstoff-Pipelines aufwändiger als Erdgas-Pipelines?

## Problem Dichtheit von Wasserstoffpipelines:

- **Zündbereich** (in welchen Mischungsverhältnissen mit Luft) **viermal größer als bei Erdgas.**
- **Flammengeschwindigkeit** und damit die **Explosionskraft achtmal größer als bei Erdgas**
- **Zündenergie** nur 1/10 von Erdgas, also **extrem leicht entzündlich**

Vieler „Experten“ sagen, da sich Wasserstoff leichter entzünde als Erdgas, sei er sogar ungefährlicher. Denn bei Leckagen käme es zu schnellem Abbrennen ohne größere Explosionen. Wenn es allerdings bei Wasserstoff durch Ansammlungen zu einer Explosion kommt, sind wesentlich größere Schäden als mit Erdgas zu erwarten. **Zum Beispiel „deckelten“ in Fukushima 2 AKWs durch eine Wasserstoffexplosion ab.**

***Mit der Dichtheit der Leitungen und Armaturen muss deshalb bei Wasserstoff besonderer Aufwand getrieben werden.***

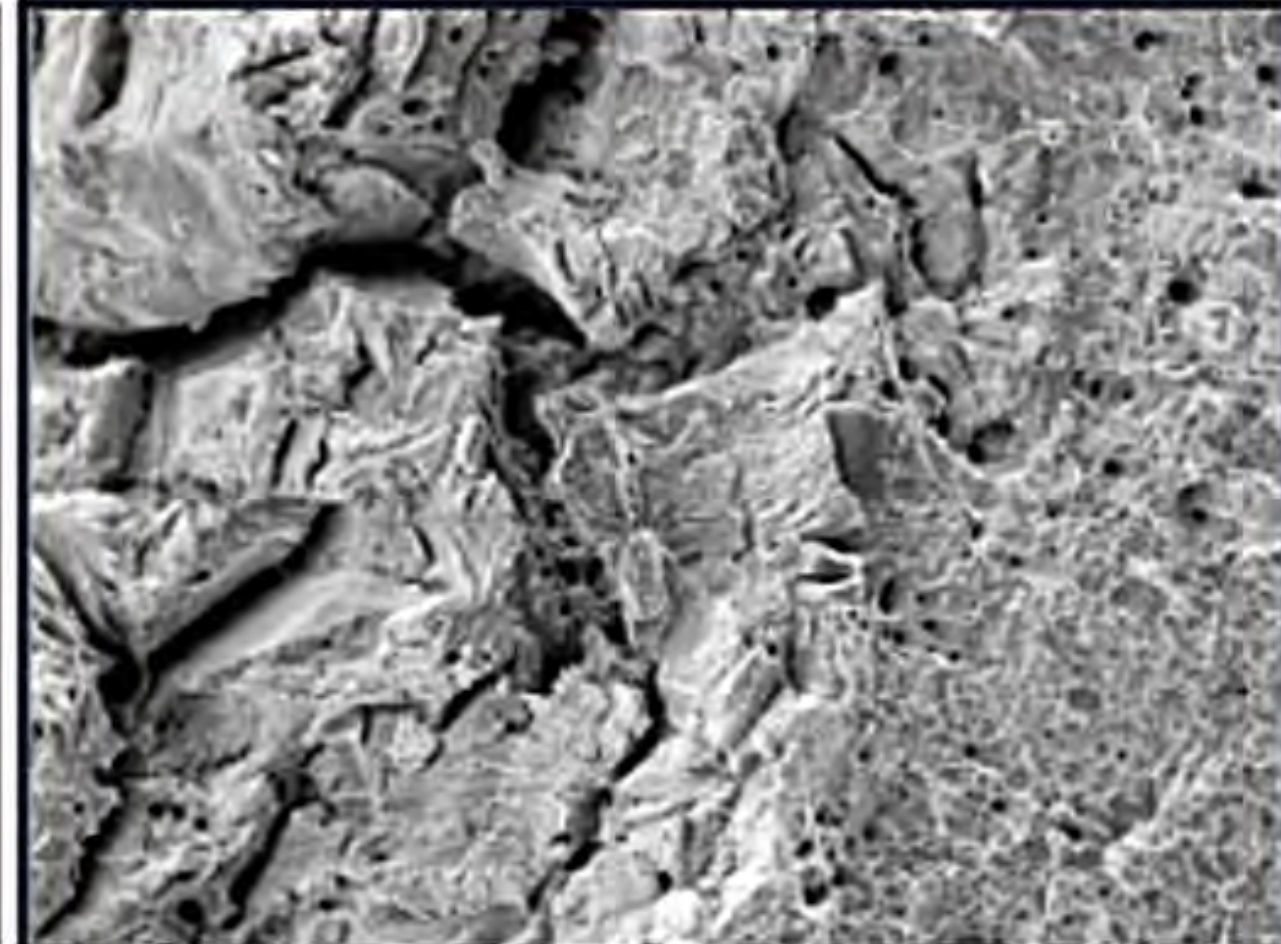
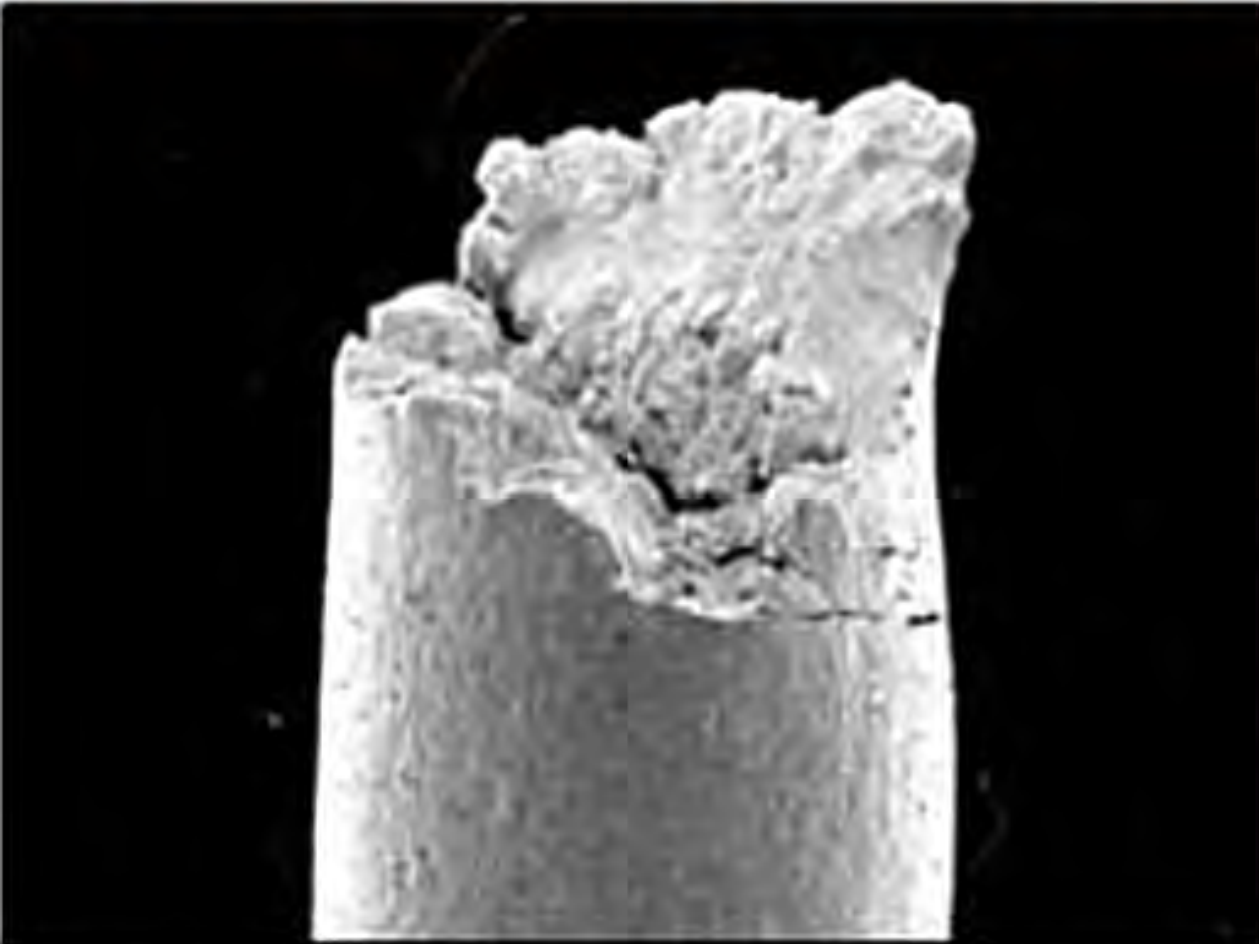
Und dann die Gretchen-Frage: Halten herkömmliche Erdgas-Pipelines den Wasserstoff dauerhaft aus?

# Gebräuchliche Erdgas-Leitungen sind sicher, sagen die Einen

- Im Ruhrgebiet z. B. gibt es **bereits ca. 240 km Wasserstoffpipelines** (für fossilen Wasserstoff).
- Diese Pipelines arbeiten z. T. **seit Jahrzehnten mit Drücken um die 20 bar bis maximal 40 bar**.
- Verwendete **Stahlsorte ist meist X70** ein niedrig legierter, „hochreiner“ Stahl, der auch bei modernen Erdgasleitungen verwendet wird.
- Einige Firmen verwenden allerdings (aus gutem Grund?) **hochlegierte, sehr teure, dauerhaft Wasserstoff feste Spezialstähle**.
- Untersuchungen an Rohrleitungen mit X70 ergaben – u. a. im Auftrag von Rohrhersteller Mannesmann – **mit Drücken bis ca. 80 bar „keine gefährlichen Versprödungserscheinungen“**.
- Das Problem: Diese **relativ kurzdauernden Untersuchungen lassen eigentlich keine Hochrechnung auf eine echte Dauerfestigkeit zu**.

Gebräuchliche Erdgas-Leitungen verspröden, sagt die Wissenschaft

## Durch Wasserstoff verursachter Sprödbruch von Stahl



Quelle: Dipl.-Ing. Stefan Zickler; Material Prüfungs Anstalt Universität Stuttgart; aus Vortrag beim VDI



# Erdgas-Leitungen verspröden und bekommen Risse mit H<sub>2</sub>, sagt die Wissenschaft

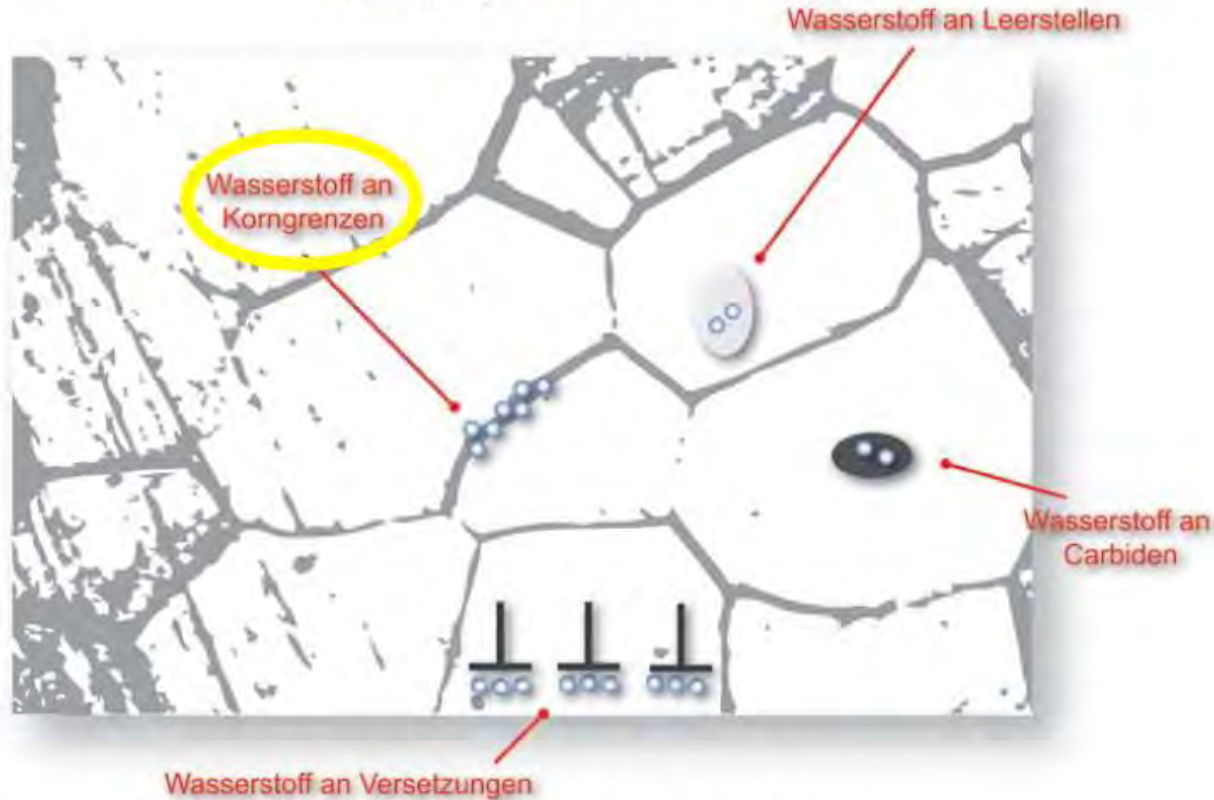
Dazu gab es bereits seit Jahrzehnten und bis heute immer wieder grundlegende, wissenschaftliche Untersuchungen, da das Thema Wasserstoff und Stahl auch bei Kohle- und Kernkraftwerken eine wichtige Rolle spielt. Seltsam, dass manche aktuelle Studien – je nachdem wer sie bestellt hat – bei der Auswertung dieser bekannten Veröffentlichungen zu recht unterschiedlichen Ergebnissen kommen. (Für mich, als ursprünglichen Forscher in Material Science und Surface Science ist dieses Thema ein „Leckerbissen“). Eine seriöse Auswertung aller Untersuchungen, wie die Studie des Forschungszentrums Jülich kommt zu den Ergebnissen:

- Bereits nur **wenige Prozent Wasserstoffzumischung** zu Erdgas können zu **Versprödungseffekten in X70 Rohren** führen.
- Die **Versprödung und Rissbildungsgeschwindigkeit hängt** dabei von der **Höhe des Gesamt-Drucks, den Druckschwankungen und den Temperaturen** im Rohr ab. (Weshalb X70 Rohre bei niederen Wasserstoff-Drücken scheinbar (!) dauerfest sind).
- Bei Aufbau eines **Wasserstoffnetzes müsste dieses mit bis zu 240 bar Druck** betrieben werden. (Um genug zu transportieren – Energiegehalt ist nur 1/3 von CH<sub>4</sub> – und um Verbrauchschwankungen auszugleichen).
- Bei diesen Drücken und Schwankungen treten bei **X70 mit Sicherheit relativ schnell Versprödung und Rissbildung** ein.
- Nur bestimmte **teure, hochlegierte Spezialstähle** sind gegen das Eindiffundieren von Wasserstoff geschützt (u. a. durch „Verstopfung“ der Korngrenzen, siehe nächste Folie) und so **kommt es zu keiner Versprödung und Rissbildung**.
- Die Jülich Studie empfiehlt als **preisgünstigere Lösung wasserstoffundurchlässige Innenrohre aus HD-PE** in X70 Rohren.

# Wie kommt es zu Wasserstoffversprödung und Rissbildung?

## Wie kommt der Wasserstoff in den Stahl

### Schädigungsmechanismen



Quelle: Manuel Piacenza, Jessica Füllbeck, Rebecca Janisch, Thomas Hammerschmidt;  
Interdisziplinäre Materialsimulation zu leichten Elementen in Eisen und Stahl  
Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulation (ICAMS) der Ruhr-Universität

- Die im Vergleich zu den Metallatomen winzigen **Wasserstoffatome** diffundieren (wandern) in die **Zwischengitterplätze** der einzelnen **Kristallite** („Körner“) des Stahlgefüges.
- Diese Wasserstoffatome wirken dann **wie „Bremssand“** auf die **elastische Verformung der Metalle**. Statt ein gewisses Maß an elastischer Verformung zu zulassen und danach unbeschadet die Ausgangsform rückzubilden, **bilden sich aufgrund des eindiffundierten Wasserstoffatome Mikrorisse**.
- Diese Mikrorisse wachsen nach und nach zu großen Rissen an, **was schließlich zum Bruch des Bauteils führt**. (Durch Wärmeausdehnung kommt es ja auch bei Rohrleitungen immer wieder zu Spannungen, die dann diese Brüche auslösen).
- Allerdings wandern nicht die Wasserstoffmoleküle ( $H_2$ ) in die Eisenkörner ein, sondern nur die Wasserstoffatome (H). Wasserstoffatome (H) sind aber in Wasserstoffgas nicht vorhanden, denn es bildet sich nicht an den oxidierten Stahloberflächen der Rohre. Deshalb erscheint (!) vielen „Wissenschaftlern“  $H_2$  unproblematisch für Stahlrohre.

Aber auch oxidierte („passivierte“) Stahloberflächen haben Korngrenzen, d. h. winzige Lücken zwischen den einzelnen Kristallen. **Entlang dieser Korngrenzen dringen die Wasserstoffmoleküle (Korngrenzendiffusion) ein** und kommen so an blanke Eisenkristalloberflächen, wo sie dissoziieren und als Atome in die Kristalle einwandern können. **Das wird in vielen aktuellen Studien „übersehen“.**

# Was schlagen Lobby freie Experten vor?

- **Weiternutzung des bestehenden Erdgasnetzes** (ca. 120.000 km Hochdrucknetz und ca. 390.000 km Feinverteilungsnetz) in einer Überbrückungsperiode für fossiles Erdgas (max. bis 2035) nutzen, aber dann für regeneratives Methan (sog. „Grünes“ Methan). (Das legen die alte Jülich Studie bzw. aktuelle Daten des DIW nahe).
- **Das „grüne“ Methan (CO<sub>2</sub>-frei aus Power-to-Gas) versorgt dezentrale Gaskraftwerke bei Dunkelflauten und EE-Schwankungen** und bis zu ihrer Ersetzung eine kleine Restmenge nicht schnell umstellbarer Heizungen.
- **Vorteil: Keinerlei Umstellungskosten für das Erdgasnetz** und Weiternutzung der bereits vorhandenen riesigen Erdgasspeicher zur Überbrückung größerer Dunkelflauten.
- „Nachteil“: **Das Geschäft der bisherigen Erdgasnetzbetreiber würde rein mengenmäßig auf max. 1/5 sinken.**
- **Jeweils abzuwägen:** Ist die Produktion von Wasserstoff am Ort der EE-Stromerzeugung und Zuleitung zum industriellen Verbraucher über Pipeline wirtschaftlicher, oder die Zuleitung von EE-Strom und Erzeugung des Wasserstoffs am Ort des Verbrauchs. Beispiel Versorgung der Chemiezentren in NRW, RP; BW, HE mit Wasserstoff. **Würden die Stromleitungen von den WEAs der Nordsee zu den Chemiestandorten ohnehin ausgebaut, wäre es wahrscheinlich kostengünstiger den Wasserstoff am Verbrauchsort zu erzeugen.**
- Prinzipiell sinnvoll erscheint unter diesen Aspekten der **Aufbau einiger separater Wasserstoff-Pipelines von ca. 100 km bis 300 km Länge.**

# Warum verfallen Erdgasversorger und Stromnetzbetreiber in einen Wasserstoff-Hype?

- **Wollen die Erdgasversorger weiter Geschäfte mit Ihrem Netz machen?** Im Vergleich zum heutigem „Umsatz“ über das Erdgasnetz mit fossilem Erdgas würde das Geschäft mit dieser Notfallversorgung verglichen mit heute auf ca. 20% sinken. **Deshalb die Idee, das Erdgasnetz in ein flächendeckendes Wasserstoffnetz umzuwandeln?**
- **Wollen die Erdgasversorger die Energiewende bremsen und dadurch ihren fossilen Erdgasabsatz verlängern?** Wenn sich dann herausstellt, dass diese Umwandlung des Erdgas- in ein Wasserstoffnetz nicht funktioniert, dann hätten sie – wenn die Politik den Ausbau anderer EE-Maßnahmen zu Gunsten des Wasserstoffs zurückstellt – **ihren fossilen Erdgasabsatz Absatz lässig um 10 bis 15 Jahre verlängert.**
- **Geht es um Abschöpfung von Forschungs- und Entwicklungsgeldern und Hoffnung auf Dauersubventionen?** Die bisherigen fossilen Erdgasversorger schöpfen schon jetzt Fördergelder für diverse Pilotprojekte ab. Und wenn die „bis zu 90%-ige“ Energieversorgung Deutschlands durch Wasserstoff nicht wirtschaftlich sein wird, dann **hofft man auf dauerhafte Subventionen.** (Das hat ja bei Kernkraft und fossilen Energien auch geklappt).
- **Wollen die Stromnetzbetreiber sich die Investitionen in den teuren Netzausbau sparen?** Sie plädieren inzwischen verstärkt für „Wasserstoff statt Strom“. **Denn im Interesse ihrer Share Holder müssen ihre Netzentgelte „auskömmlich“ bleiben (Zitat).**
- **Möchten Teile der Autoindustrie ihre Verbrenner möglichst lange weiterbauen** und hoffen sie **mit „Technologieoffenheit“ den Wandel zu E-Mobilität abzubremsen?** Witzigerweise hat dieselbe deutsche Fahrzeugindustrie Mühe Wasserstoff-Busse und Wasserstoff-Lkws in Großserie zu produzieren, China und Südkorea können das längst.

# Warum machen große Teile der Politik beim Wasserstoff-Hype mit?

*Teile der Politik wollen sich den großen Ausbau von Wind- und Solarenergie in Deutschland sparen und träumen von 60% bis zu 90% Abdeckung des Energiebedarfs durch importierten EE-Strom und grünen Wasserstoff\*.*

*\* z. B. geht Laschets NRW von 60% Wasserstoffimport aus.*

# Wie (un)wirtschaftlich ist Wasserstoff ?

- **Wasserstoff ist im Vergleich zu Strom immer wesentlich teurer:** **Selbst, wenn der Wasserstoff mit billigem Strom erzeugt wurde, wird er durch den Energieverlust bei Erzeugung und Transport als Energieträger teurer als Strom.** Wie mit regenerativem Strom zu 1,2 Cent/kWh (derzeitiger Gestehungspreis in D im besten Fall eher 4 Cent/kWh) Wasserstoff mit dem Energiegehalt von 1 kWh zu 2,2 Cent gemacht werden soll (wie in diversen Studien zu lesen) bleibt ein Rätsel.
- **Bei einem Wirkungsgrad der Wasserstoff-Elektrolyse von 70%** (derzeit eher noch 50%) gilt, **wir brauchen min. 1,4 kWh Strom für 1 kWh Wasserstoff.**
- **Für den Einkaufspreis, dürfen wir nicht den Gestehungspreis des EE-Stroms einsetzen,** (wie von vielen „Experten“ gemacht), rechnen wir mal lieber mit ca. 25% Aufschlag. **Der günstigste Gestehungspreis für EE-Strom in D liegt derzeit bei ca. 4 Cent/kWh, der billigste Gestehungspreis in Nordafrika bei ca. 2 Cent/kWh, in 10 Jahren vielleicht erreichbar 1,2 Cent/kWh.** Das ergibt je nach Strompreis folgende Kosten für 1 kWh Wasserstoff:

Einkaufspreis des EE-Stroms	5 Cent/kWh	2,5 Cent/kWh	1,5 Cent/kWh
Erzeugungspreis des Wasserstoffs	7 Cent/kWh	3,5 Cent/kWh	2,1 Cent/kWh

Berücksichtigt man noch den Return of Investment und eine Kapital-Verzinsung von z. B. 5 % und dann auch noch die Transportkosten, dann wird die **Verwendung von Wasserstoff im Vergleich zum direkten EE-Stromeinsatz zwei- bis dreimal so teuer.**

# Was ist notwendig und realistisch?

- Die **Erzeugung und der Verbrauch von EE-Wasserstoff muss absolut auf die Bereiche beschränkt werden**, in denen direkter EE-Strom Einsatz nicht möglich ist, sowie für die Notstromerzeugung.
- Dafür darf **nur ca. 10% des EE-Wasserstoffs importiert** werden, sonst **droht die Deindustrialisierung Deutschlands**.
- **Dafür müssen die Erzeugung von Wind- und Solarstrom, die Stromnetze, die Strom-, PtG- und Wärmespeicher rasant ausgebaut werden.**
- Das DIW sagt, für CO<sub>2</sub>-Null bis 2045 heißt das, **Versechsfachung der Ausbaugeschwindigkeit!**
- **Das Ziel einer schnellen Energiewende** – auch wenn das erhebliche Probleme beim Umbau der Industrie, Abbau und Schaffung neuer Arbeitsplätze bedeutet – **wird inzwischen auch eindeutig vom VDI geteilt** (→ Deutscher Ingenieurstag 2021)

*In der Hoffnung,  
dass wir endlich einen konsequenten und folgerichtigen  
Weg zur Energiewende und zu CO2-Null finden.*

*Danke!*



*Diesen Vortrag und ein ausführliches  
>> Dossier: Erdgas, Wasserstoff und Stromnetzausbau <<*

*Können sie bei mir als PDF anfordern*

*doc.hu @t-online.de*

# Hinweise zu Quellen, Daten und Fakten

Die Daten und Fakten unterscheiden sich in verschiedenen Studien oft um ein Vielfaches. Das kann daran liegen, dass bestimmte Daten gar nicht berechnet also vergessen wurden bzw. an mehreren Stellen gleichermaßen eingerechnet wurden, obwohl sie nur einmal wirken.

Dann gibt es natürlich auch im Interesse der Auftraggeber „Alternative Wahrheiten“ und ein „Übersehen“ oder sogar eine bewusste Unterschlagung von Daten und Fakten.

Ich habe mich jedenfalls bemüht – persönlich nur dem Klimaschutz und der Energiewende verpflichtet – nur auf wissenschaftlich-technische Seriosität geprüfte oder zumindest stimmige Daten zu verwenden.

***Bibliografischer Hinweis:*** Für diesen Vortrag wurden über 200 Studien, Gutachten, Fachartikel, Meldungen von Informationsdiensten, TV-Berichte etc. ausgewertet. Ich habe dazu eine ständig aktualisierte und erweiterte Datenbank mit über 6000 Dokumenten zu Umwelt, Klimawandel, Nachhaltigkeit, Landwirtschaft, Regenerative Energien, Energiewende usw. Allerdings kann ich bislang die Bibliografischen Daten der Dokumente noch nicht automatisch extrahieren. Weshalb ich wegen Arbeitsüberlastung zunächst keine genaue Literaturliste liefern kann. Ich bin aber inzwischen fast sicher, eine geeignete Literaturverwaltungs-Software, gefunden zu haben. Wahrscheinlich kann ich dann in ca. 1 Monat nachliefern.