

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

#8 Chemische Energiespeicher Teil a – Grundlagen

#8 Chemical Energy Storage part a – Basics

Vorlesung #8a

| Lecture #8a



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Chemical Energy Storage

Content ⇒ Learning objectives

- Chemical storage materials (C-H-O)
⇒ Introduction to the subject of chemical storage
- Chemical composition of storage materials, paths of Power-to-X technologies, Fischer-Tropsch synthesis
⇒ Basic understanding of the elementary basic chemical reactions in electrochemical conversion; Application and working with the ternary C-H-O diagram
- Hydrogen; hazards, energy densities; Possibilities of storing hydrogen as well as their gravimetric and volumetric energy densities and reverse conversion
⇒ Understanding of the storage options and their advantages and disadvantages for the later selection; Overview of the different usage and reconversion paths

Chemische Energiespeicher

Inhalt ⇒ Lernziele

- Chemische Speichermaterialien (C-H-O)
⇒ Heranführung an das Thema chemische Speicher
- Chemische Zusammensetzung von Speichermaterialien, Pfade von Power-to-X Technologien, Fischer-Tropsch-Synthese
⇒ Grundverständnis für die elementaren chemischen Grundreaktionen bei der elektrochemischen Umwandlung; Anwendung und Arbeiten mit dem ternären C-H-O Diagramm
- Wasserstoff; Gefahren, Energiedichten; Möglichkeiten Wasserstoff zu Speichern sowie deren gravimetrische und volumetrische Energiedichten und Rückumwandlung
⇒ Verständnis der Speicheroptionen sowie deren Vor- und Nachteile für die spätere Auswahl; Übersicht über die verschiedenen Nutzungs- und Rückumwandlungspfade

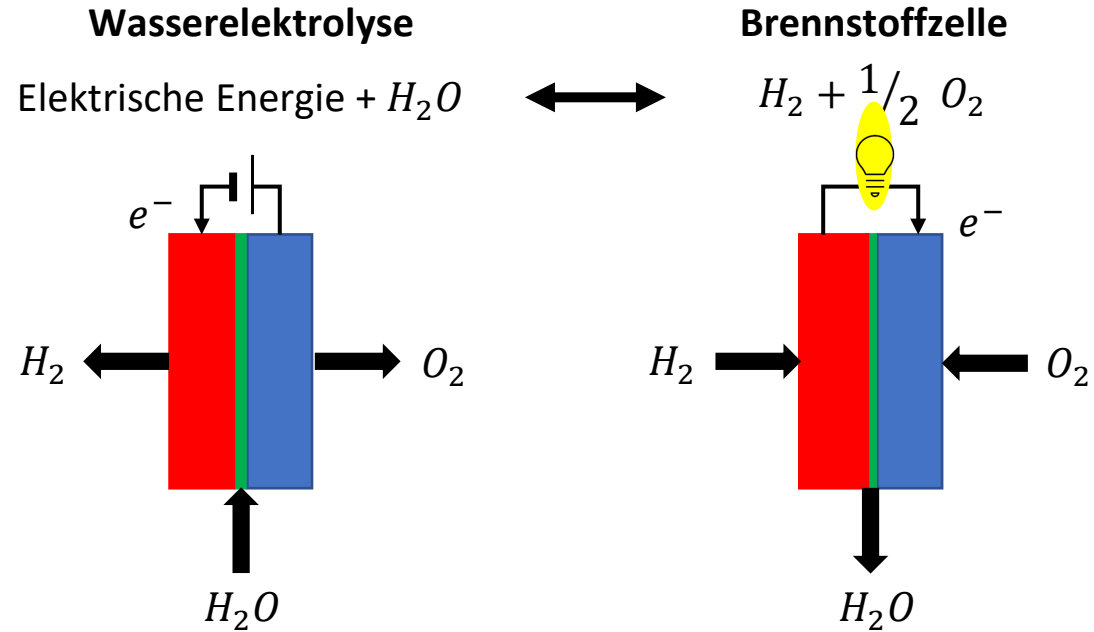
1. Chemical Energy Storage
 Overview – e.g. electrolysis–fuel cell

Charge:
 Splitting water into hydrogen and oxygen by electrolysis of water in an electrochemical cell (electrolyser)

Storage:
 Storage of the hydrogen gas and possibly of the oxygen gas (gas tank, compressed gas tank)

Discharge:
 Oxidation of hydrogen and reduction of oxygen to water in an electrochemical cell (fuel cell)

1. Chemische Energiespeicher
 Übersicht – am Beispiel Elektrolyse-Brennstoffzelle



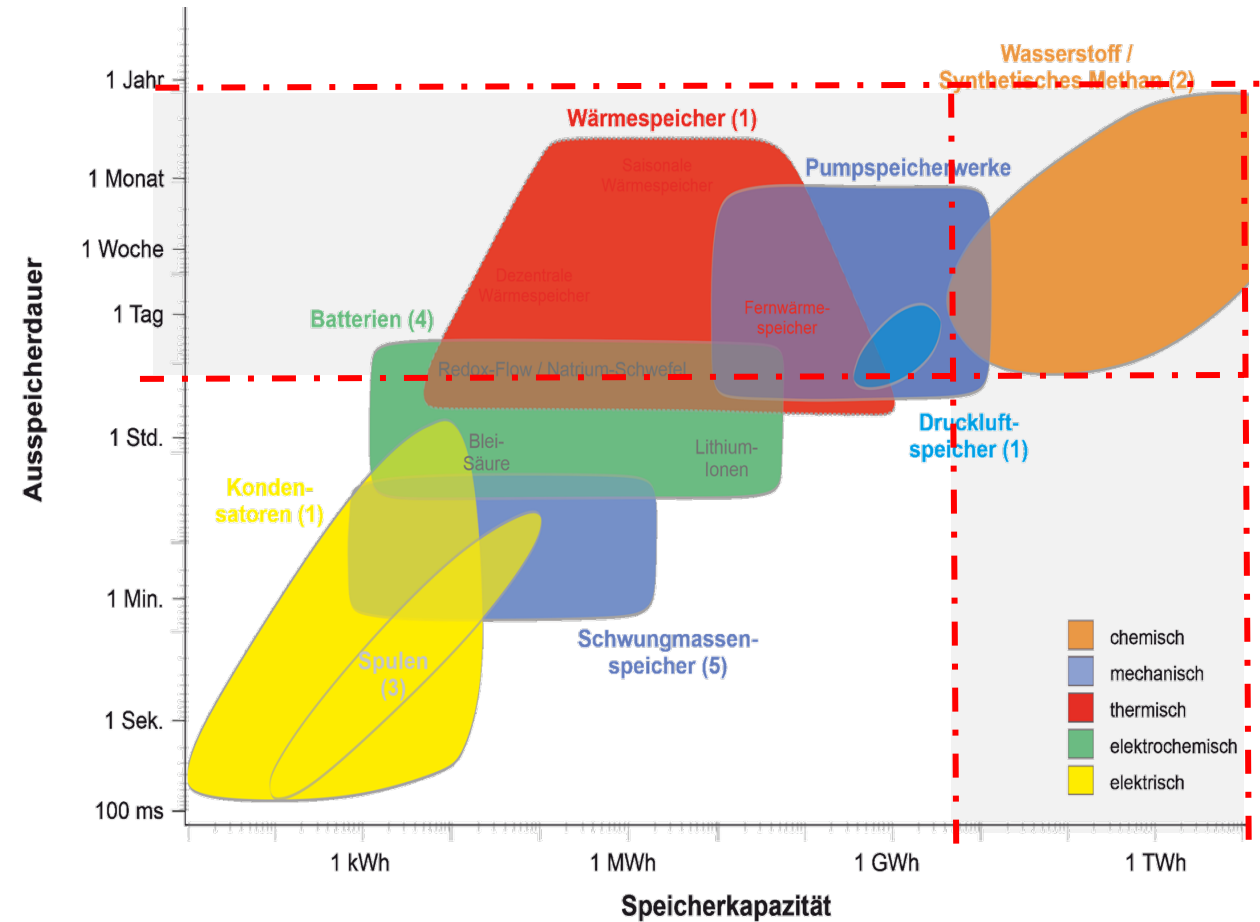
Einspeicherung	Speicherung	Ausspeicherung
Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch Wasserelektrolyse in einer elektrochemischen Zelle (Elektrolyseur)	Speicherung des Wasserstoffs und evtl. des Sauerstoffs in einem (Druck-)Gastank, Flüssiggastank oder als Folgeprodukt (z.B. Methanol)	Oxidation von Wasserstoff und Reduktion von Sauerstoff zu Wasser in einer elektrochemischen Zelle (Brennstoffzelle)

1. Chemical Energy Storage
1.1 Classification according to storage performance and capacity

- Seasonal storage
- Monthly storage
- Weekly storage
- Daily storage
- Hourly storage
- Storage for minutes
- Storage for seconds

1. Chemische Energiespeicher

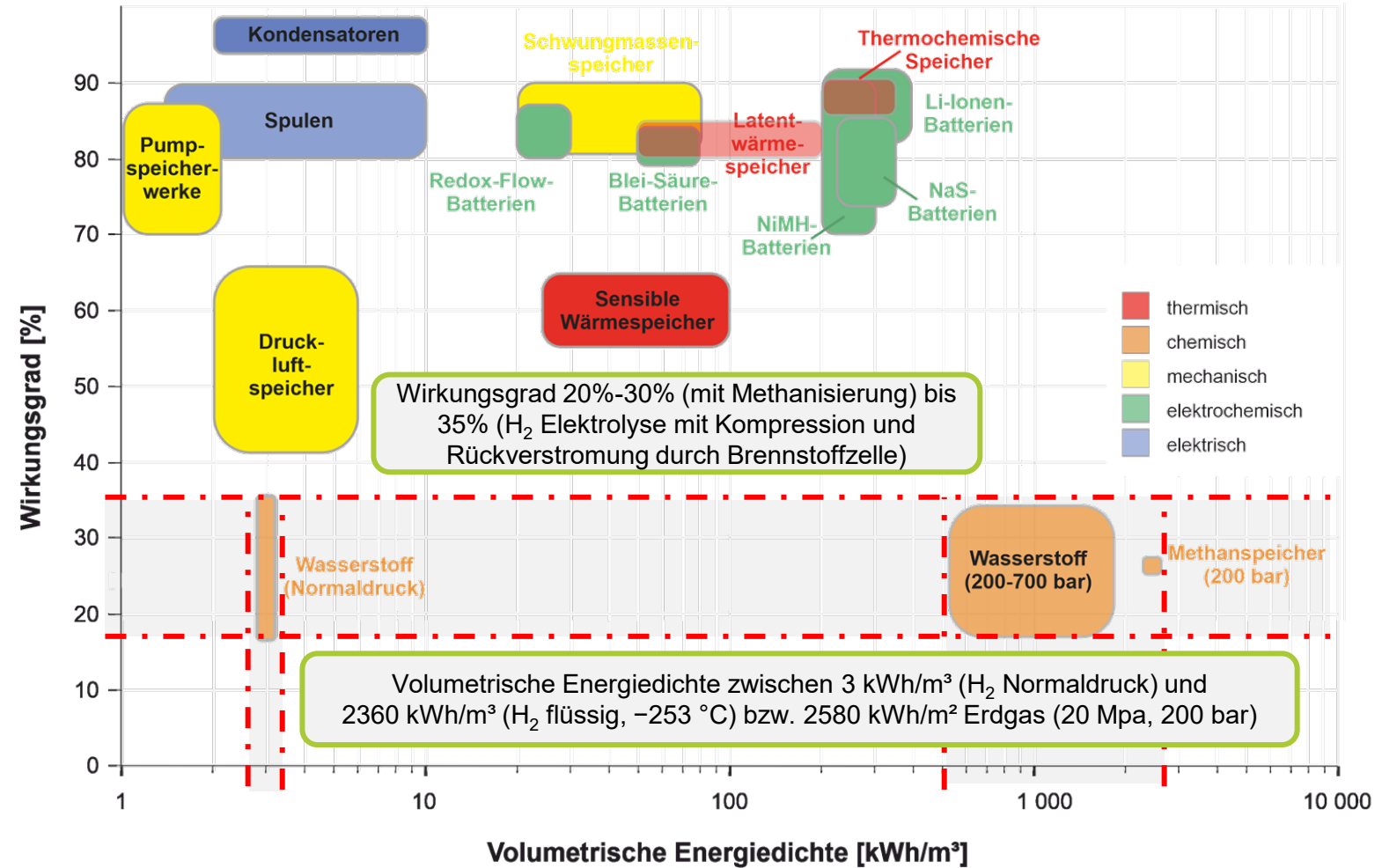
1.1 Klassifizierung hinsichtlich Ausspeicherzeit und Speicherkapazität



1. Chemical Energy Storage
 1.1 Classification according to efficiency and volumetric energy density

1. Chemische Energiespeicher

1.1 Klassifizierung nach Wirkungsgrad und volumetrischer Energiedichte



1. Chemical Energy Storage

1.2 Hydrogen basics

Hydrogen is the element with the lowest density - liquid hydrogen weighs only 70.8 g/L. Its melting point is $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ (14.02 K), the boiling point $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ (21.15 K).

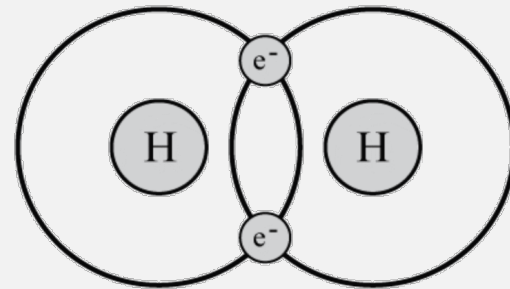
Hydrogen is poorly soluble in water and other solvents.

- Hydrogen is the most common chemical element in the Sun and the large gas planets Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune, which combine over 99.99% of the mass of the solar system. Hydrogen makes up 75% of the total mass or 93% of all atoms in the solar system.
- On Earth, the mass fraction is about 0.03%. Moreover, in contrast to the occurrences in space, the terrestrial hydrogen is predominantly bound, mostly in the form of water.
- In this form, it covers more than two thirds of the earth's surface. The total water resources of the earth amount to approximately 1.386 billion km^3 .
- In the earth's atmosphere, hydrogen is mainly present as gaseous water (water vapor).
- The amount of molecular hydrogen in the atmosphere is only 0.55 ppm.

1. Chemische Energiespeicher

1.2 Grundlagen zum Wasserstoff

Wasserstoff als Kernbaustein der chemischen Energiespeicherung



Wasserstoff ist das Element mit der geringsten Dichte - flüssiger Wasserstoff wiegt nur 70,8 g/L.

Sein Schmelzpunkt liegt bei $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ (14,02 K), der Siedepunkt bei $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ (21,15 K).

Wasserstoff ist in Wasser und anderen Lösungsmitteln schlecht löslich.

- Wasserstoff ist das häufigste chemische Element in der Sonne und den großen Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun, die über 99,99 % der Masse des Sonnensystems in sich vereinen. Wasserstoff stellt 75 % der gesamten Masse beziehungsweise 93 % aller Atome des Sonnensystems.
- Auf der Erde ist der Massenanteil etwa 0,03 %. Außerdem liegt der irdische Wasserstoff im Gegensatz zu den Vorkommen im All überwiegend gebunden, zumeist in Form von Wasser vor.
- In dieser Form bedeckt er über zwei Drittel der Erdoberfläche. Die gesamten Wasservorkommen der Erde belaufen sich auf circa 1,386 Milliarden km^3 .
- In der Erdatmosphäre liegt Wasserstoff hauptsächlich als gasförmiges Wasser (Wasserdampf) vor.
- Die Häufigkeit von molekularem Wasserstoff in der Atmosphäre beträgt nur 0,55 ppm.

H2 Molekül, Juergenjosephjansen, CC-BY-SA 4.0† <https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Hydrogen?uselang=de#/media/File:H2-.gif>

1. Chemical Energy Storage

1.2 Basics

The C-H-O system as the basis of chemical energy storage

- Most chemical energy storage consist of the components hydrogen, carbon, oxygen.
- Visualization in a ternary diagram enables a good overview, classification and representation of processes
- The ternary (molar) C-H-O diagram as the basis of chemical energy storage

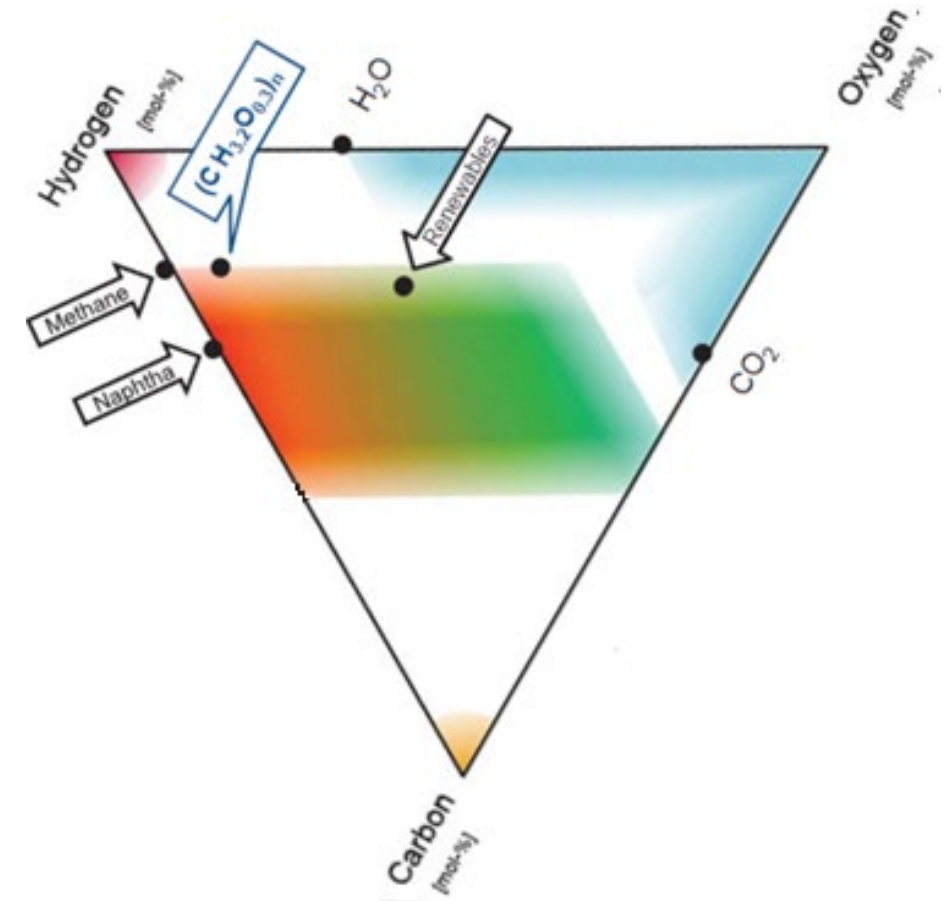
1. Chemische Energiespeicher

1.2 Grundlagen zum C-H-O-System

Das C-H-O-System als Grundlage der chemischen Energiespeicherung

- Die meisten chemischen Energiespeicher bestehen aus den Komponenten Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff.
- Darstellung in einem ternären Diagramm ermöglicht eine gute Übersicht, Einordnung und Darstellung von Prozessen

=> Das ternäre (molare) C-H-O-Diagramm als Grundlage der chemischen Energiespeicherung



STERNER, STADLER (Hrsg.), „Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration

1. Chemical Energy Storage

1.2 Basics

- Only easily possible with molar diagrams (with wt % conversion via molar mass)
- Pure substances in the corners
- Two-component mixtures always on the edge
- Scaling always runs perpendicular to tip
- The three percentages must always add up to 100%

Example:

- 20 mol% carbon
- 50 mol% hydrogen
- 30 mol% oxygen

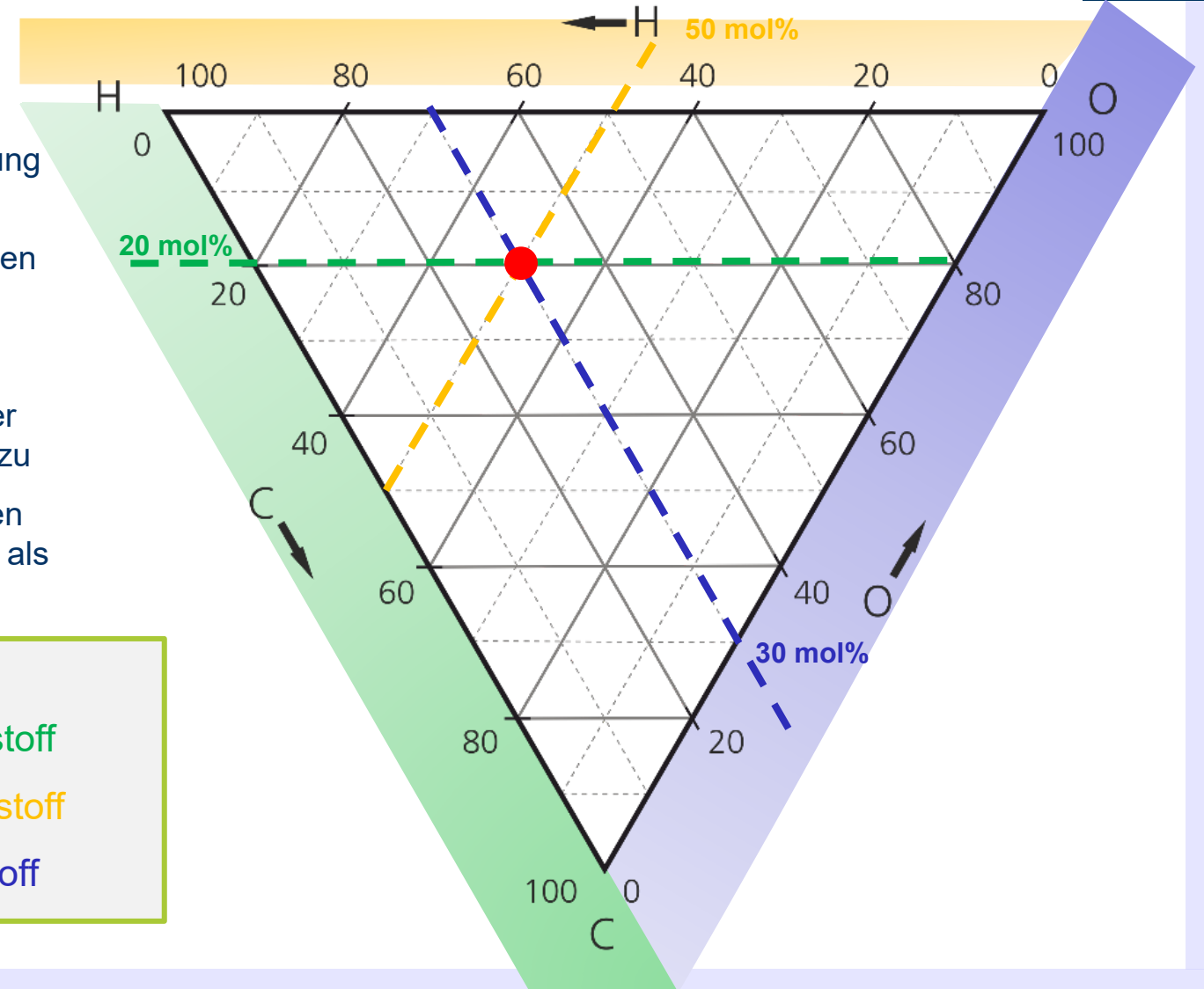
1. Chemische Energiespeicher

1.2 Grundlagen – Ternäre Diagramm

- Nur bei molaren Diagrammen leicht möglich (bei gew% Umrechnung via Molmasse)
- Reinstoffe in den Ecken
- Zweistoffmischungen immer auf der Kante
- Skalierung läuft immer senkrecht auf Spitze zu
- Die drei Prozentzahlen müssen immer 100% als Summe ergeben

Beispiel:

- 20 mol% Kohlenstoff
- 50 mol% Wasserstoff
- 30 mol% Sauerstoff



1. Chemical Energy Storage

1.2 Basics

The C-H-O system as the basis of chemical energy storage

Educts to be drawn in as pure substance

- Methane CH_4
- Hydrogen H_2

Simplified educts

- Longer-chain hydrocarbons (gasoline, diesel, waxes, etc.) are simplified as CH_2 (infinite hydrocarbon chain)
- Coal $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}$
- Biomass CH_2O as simplification of $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (sugar)

1. Chemische Energiespeicher

1.2 Grundlagen

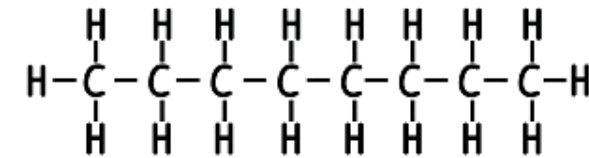
Das C-H-O-System als Grundlage der chemischen Energiespeicherung

Edukte, die als Reinstoff einzuzichnen sind

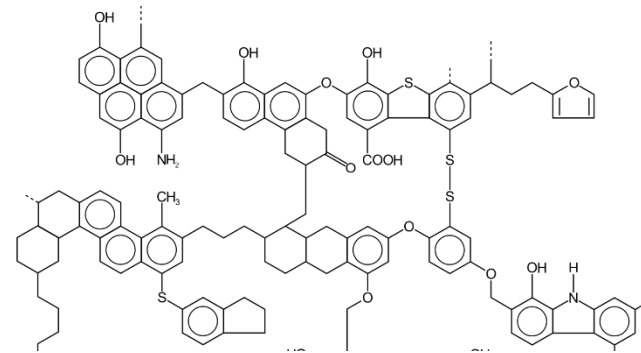
- Methan CH_4
- Wasserstoff H_2

Simplifizierte Edukte

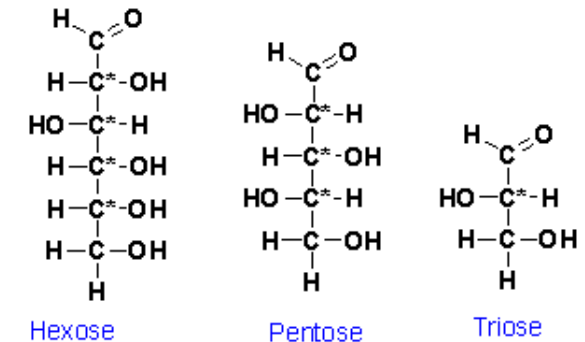
- Längerkettige Kohlenwasserstoffe (Benzin, Diesel, Wachse etc.) werden vereinfacht als CH_2 bezeichnet (unendliche KW-Kette)



- Kohle $\text{C}_6\text{H}_2\text{O}$



- Biomasse CH_2O als Vereinfachung von $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (Zucker)



1. Chemical Energy Storage

1.2 Basics

The C-H-O system as the basis of chemical energy storage

Examples for reaction educts (storage media) or products (end products) in the C-H-O system

Storage media (educts):

- Hydrogen H_2
- Methane CH_4
- Long chain hydrocarbons, gasoline, diesel etc.: $-CH_2-$
- Biomass CH_2O
- Coal C_6H_2O

End products

- Water H_2O
- Carbon dioxide CO_2

1. Chemische Energiespeicher

1.2 Grundlagen

Das C-H-O-System als Grundlage der chemischen Energiespeicherung

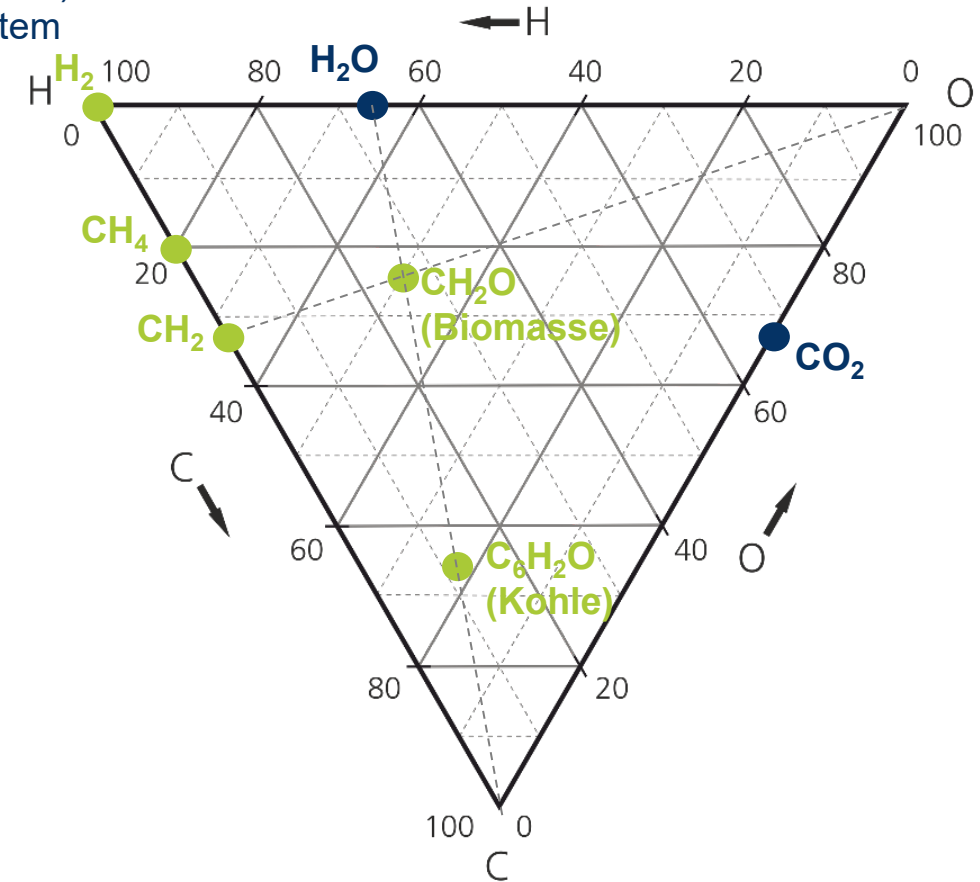
Beispiele für Reaktions-Edukte (Speichermedien) oder –Produkte (Endprodukte) im C-H-O System

Speichermedien (Edukte):

- Wasserstoff: H_2
- Methan: CH_4
(20 mol% C + 80 mol% H)
- Langkettige Kohlenwasserstoffe, Benzin, Diesel etc.: $-CH_2-$
(33,3 mol% C + 66,6 mol% H)
- Biomasse: CH_2O
(25 mol% C + 50 mol% H + 25 mol% O)
- Kohle: C_6H_2O
(66,6 mol% C + 22,2 mol% H + 11,1 mol% O)

End-Produkte

- Wasser: H_2O
(66,6 mol% H + 33,3 mol% O)
- Kohlendioxid: CO_2
(33,3 mol% C + 66,6 mol% O)



1. Chemical Energy Storage

1.2 Basics

The C-H-O system as the basis of chemical energy storage

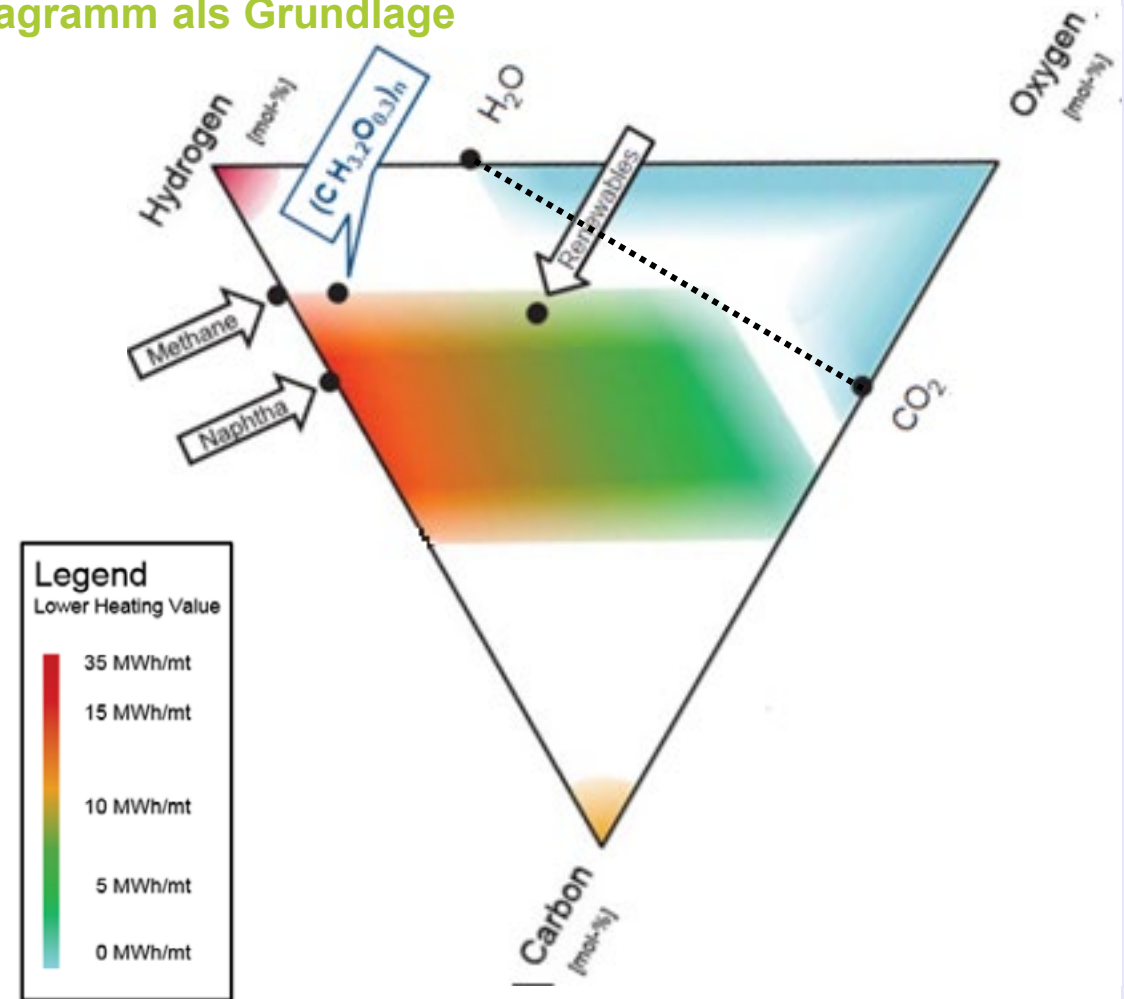
- The energy content and thus the storage potential of a substance increase, the closer it is to the HC axis of the hydrocarbons
- The energy content decreases with increasing oxidation and close to oxygen
- From the imaginary line of H₂O and CO₂ on, there are practically only combustion end products (no usable energy content).

1. Chemische Energiespeicher

1.2 Grundlagen

Das ternäre (molare) C-H-O-Diagramm als Grundlage

- Der Energiegehalt und damit das Speicherpotenzial eines Stoffes steigen, je näher er sich an der HC-Achse der Kohlenwasserstoffe befindet
- Der Energiegehalt sinkt mit zunehmender Oxidation und Nähe zum Sauerstoff
- Ab der gedachten Linie von H₂O und CO₂ liegen praktisch nur noch Verbrennungsendprodukte vor (kein nutzbarer Energieinhalt)



STERNER, STADLER (Hrsg.), „Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration

1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Example: Power-to-Fuels (electricity to hydrocarbons)

1. Electrolysis of H₂O to H₂ (and O₂)
2. H₂ is mixed with CO₂ to convert gas
3. CO₂ is reduced to CO by means of hydrogen and H₂O is condensed out
4. CO is mixed with H₂ to synthesis gas
5. Fischer-Tropsch synthesis to hydrocarbons "CH₂" (separation of H₂O)

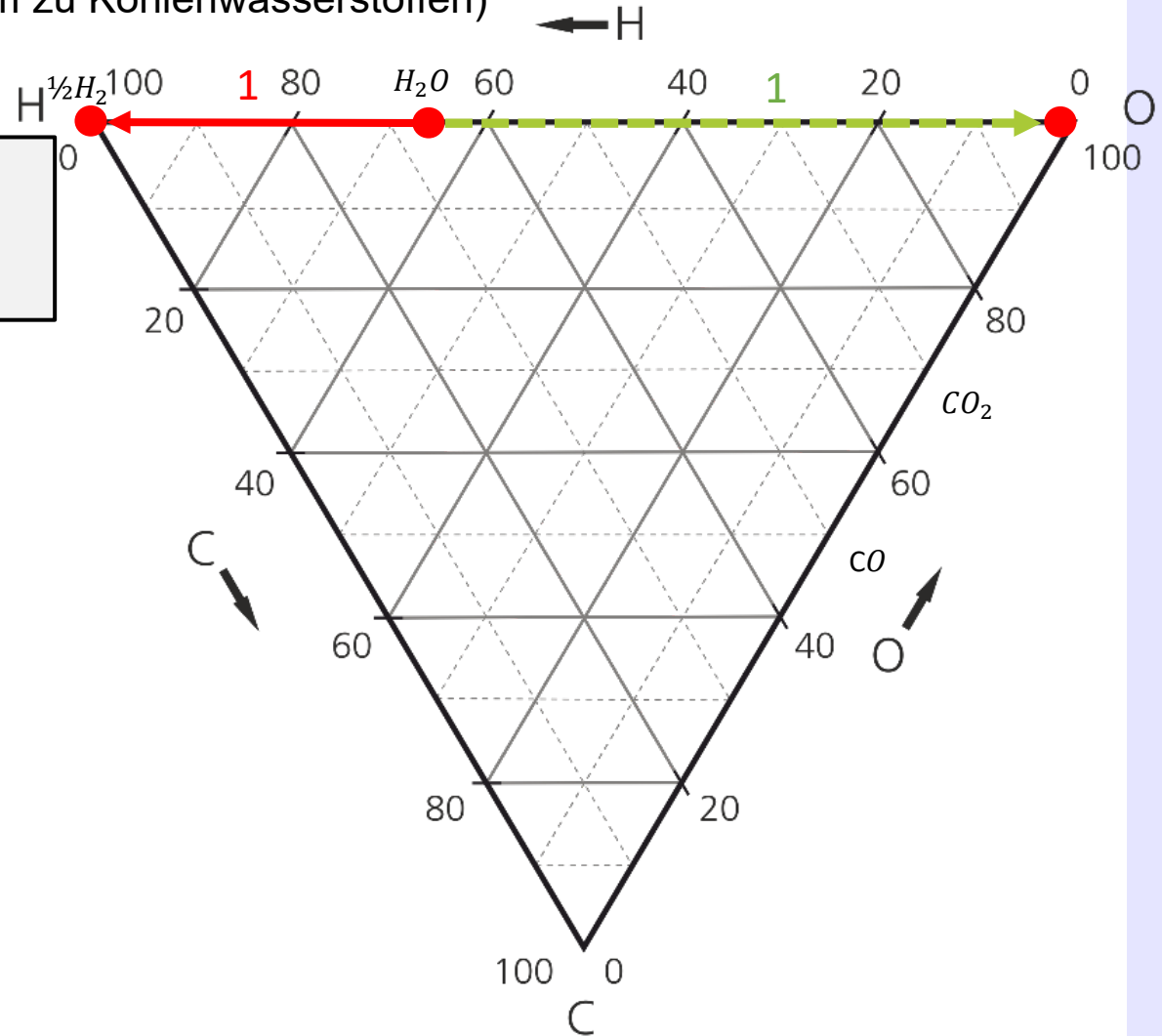
1. Chemische Energiespeicher

1.3 Chemische Konversionspfade

Beispiel: Power-to-Fuels (Strom zu Kohlenwasserstoffen)

Startpunkt H₂O
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]

1. **Elektrolyse von H₂O zu H₂**
(und O₂)
[C-H-O : 0-2-0 : 0% - 100% - 0%]
[C-H-O : 0-0-1 : 0% - 0% - 100%]



1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Example: Power-to-Fuels (electricity to hydrocarbons)

1. Electrolysis of H₂O to H₂ (and O₂)
2. H₂ is mixed with CO₂ to convert gas
3. CO₂ is reduced to CO by means of hydrogen and H₂O is condensed out
4. CO is mixed with H₂ to synthesis gas
5. Fischer-Tropsch synthesis to hydrocarbons "CH₂" (separation of H₂O)

1. Chemische Energiespeicher

1.3 Chemische Konversionspfade

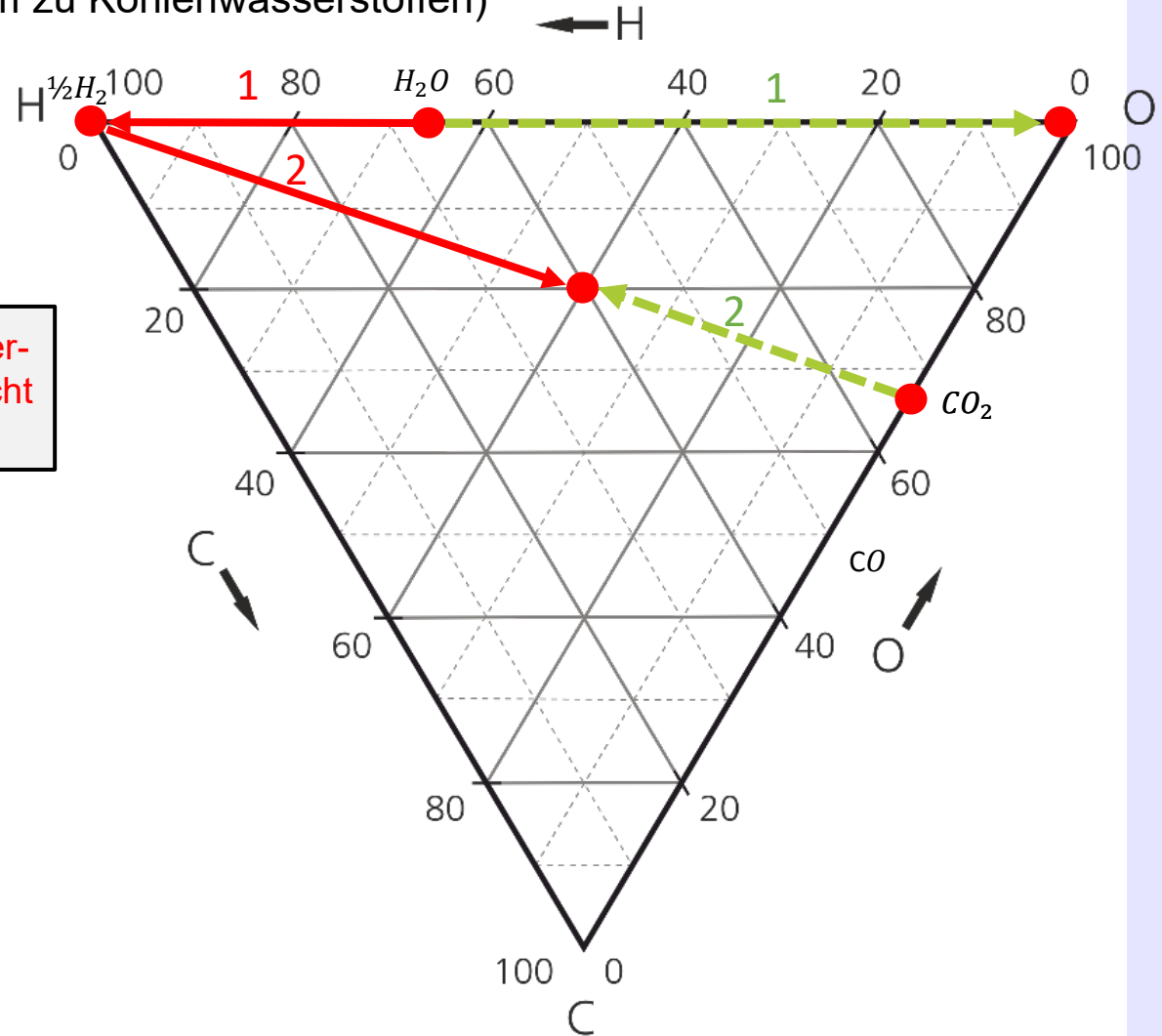
Beispiel: Power-to-Fuels (Strom zu Kohlenwasserstoffen)

Startpunkt H₂O

[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]

1. **Elektrolyse von H₂O zu H₂**
(und O₂)
[C-H-O : 0-2-0 : 0% - 100% - 0%]
[C-H-O : 0-0-1 : 0% - 0% - 100%]

2. **H₂ wird mit CO₂ (1:1) zu Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) gemischt**
[C-H-O : 1-2-2 : 20% - 40% - 40%]



1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Example: Power-to-Fuels (electricity to hydrocarbons)

1. Electrolysis of H₂O to H₂ (and O₂)
2. H₂ is mixed with CO₂ to convert gas
3. CO₂ is reduced to CO by means of hydrogen and H₂O is condensed out
4. CO is mixed with H₂ to synthesis gas
5. Fischer-Tropsch synthesis to hydrocarbons "CH₂" (separation of H₂O)

1. Chemische Energiespeicher

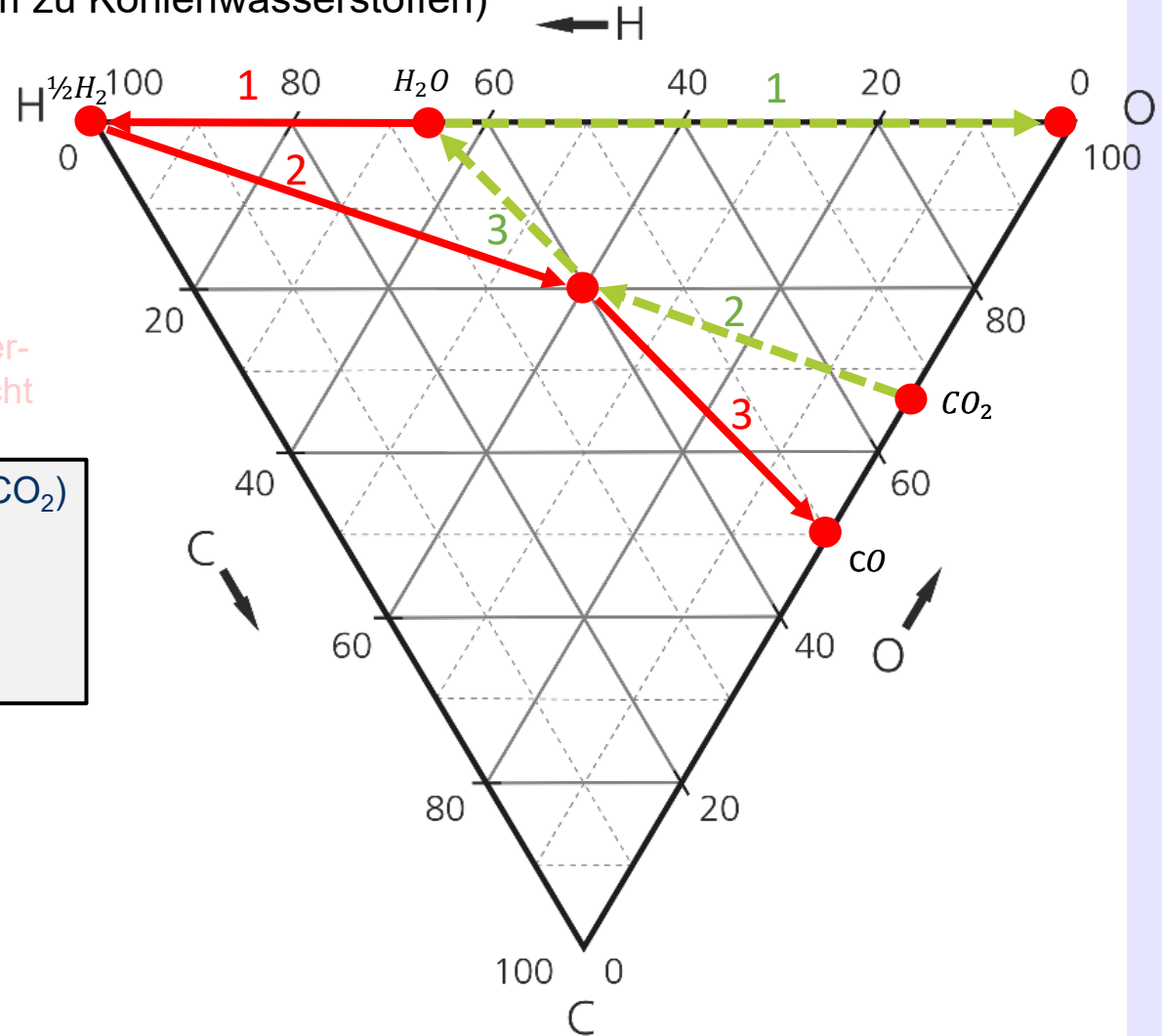
1.3 Chemische Konversionspfade

Beispiel: Power-to-Fuels (Strom zu Kohlenwasserstoffen)

Startpunkt H₂O
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]

1. **Elektrolyse von H₂O zu H₂ (und O₂)**
[C-H-O : 0-2-0 : 0% - 100% - 0%]
[C-H-O : 0-0-1 : 0% - 0% - 100%]
2. **H₂ wird mit CO₂ (1:1) zu Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) gemischt**
[C-H-O : 1-2-2 : 20% - 40% - 40%]

3. **Das Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) wird zu CO reduziert und H₂O auskondensiert**
[C-H-O : 1-0-1 : 50% - 0% - 50%]
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]



1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Example: Power-to-Fuels (electricity to hydrocarbons)

1. Electrolysis of H₂O to H₂ (and O₂)
2. H₂ is mixed with CO₂ to convert gas
3. CO₂ is reduced to CO by means of hydrogen and H₂O is condensed out
4. CO is mixed with H₂ to synthesis gas "CH₂" (separation of H₂O)

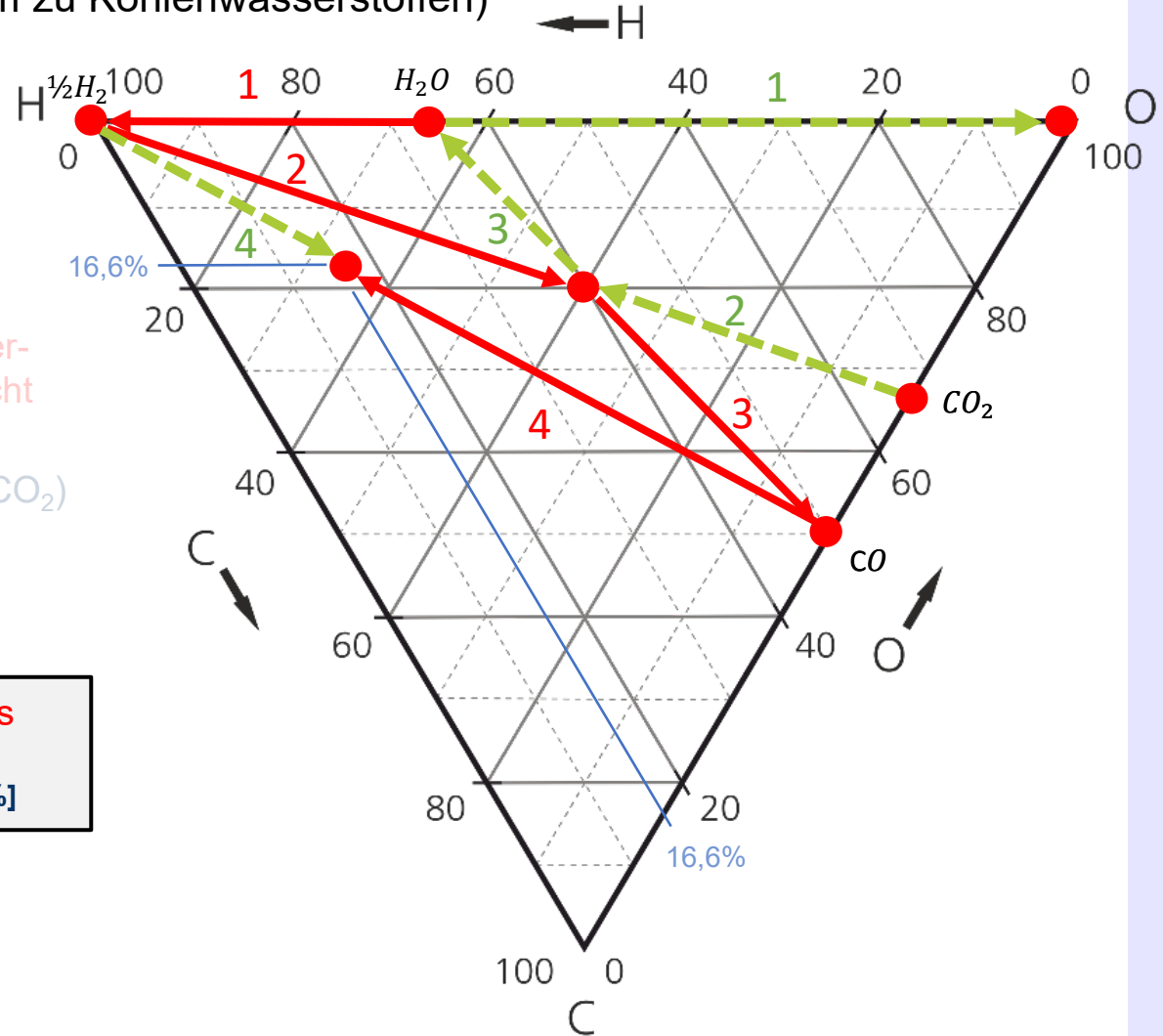
1. Chemische Energiespeicher

1.3 Chemische Konversionspfade

Beispiel: Power-to-Fuels (Strom zu Kohlenwasserstoffen)

Startpunkt H₂O
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]

1. **Elektrolyse von H₂O zu H₂ (und O₂)**
[C-H-O : 0-2-0 : 0% - 100% - 0%]
[C-H-O : 0-0-1 : 0% - 0% - 100%]
2. **H₂ wird mit CO₂ (1:1) zu Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) gemischt**
[C-H-O : 1-2-2 : 20% - 40% - 40%]
3. **Das Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) wird zu CO reduziert und H₂O auskondensiert**
[C-H-O : 1-0-1 : 50% - 0% - 50%]
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]
4. **CO wird mit H₂ zu Synthesegas gemischt (1:2)**
[C-H-O : 1-4-1 : 16,6% - 66,6% - 16,6%]



1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Example: Power-to-Fuels (electricity to hydrocarbons)

1. Electrolysis of H₂O to H₂ (and O₂)
2. H₂ is mixed with CO₂ to convert gas
3. CO₂ is reduced to CO by means of hydrogen and H₂O is condensed out
4. CO is mixed with H₂ to synthesis gas
5. Fischer-Tropsch synthesis to hydrocarbons "CH₂" (separation of H₂O)

1. Chemische Energiespeicher

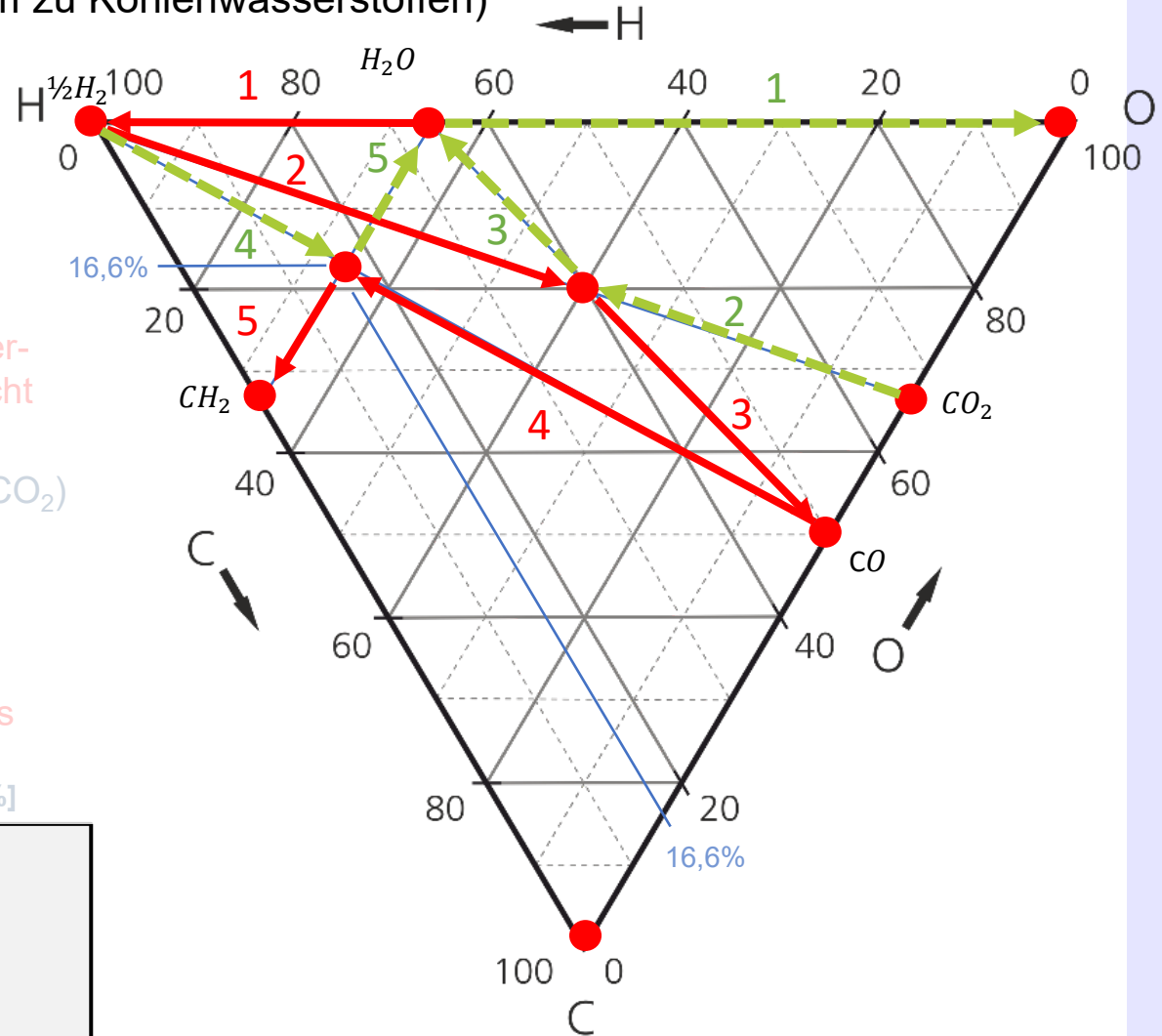
1.3 Chemische Konversionspfade

Beispiel: Power-to-Fuels (Strom zu Kohlenwasserstoffen)

Startpunkt H₂O

[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]

1. **Elektrolyse von H₂O zu H₂**
(und O₂)
[C-H-O : 0-2-0 : 0% - 100% - 0%]
[C-H-O : 0-0-1 : 0% - 0% - 100%]
2. **H₂ wird mit CO₂ (1:1) zu Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) gemischt**
[C-H-O : 1-2-2 : 20% - 40% - 40%]
3. **Das Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) wird zu CO reduziert und H₂O auskondensiert**
[C-H-O : 1-0-1 : 50% - 0% - 50%]
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]
4. **CO wird mit H₂ zu Synthesegas gemischt (1:2)**
[C-H-O : 1-4-1 : 16,6% - 66,6% - 16,6%]
5. **Fischer-Tropsch-Synthese zu Kohlenwasserstoffen „CH₂“ (Abscheidung von H₂O)**
[C-H-O : 1-2-0 : 33,3% - 66,6% - 0%]
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]



1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Example: Power-to-Fuels (electricity to hydrocarbons)

1. Electrolysis of H₂O to H₂ (and O₂)
2. H₂ is mixed with CO₂ to convert gas
3. CO₂ is reduced to CO by means of hydrogen and H₂O is condensed out
4. CO is mixed with H₂ to synthesis gas
5. Fischer-Tropsch synthesis to hydrocarbons "CH₂" (separation of H₂O)

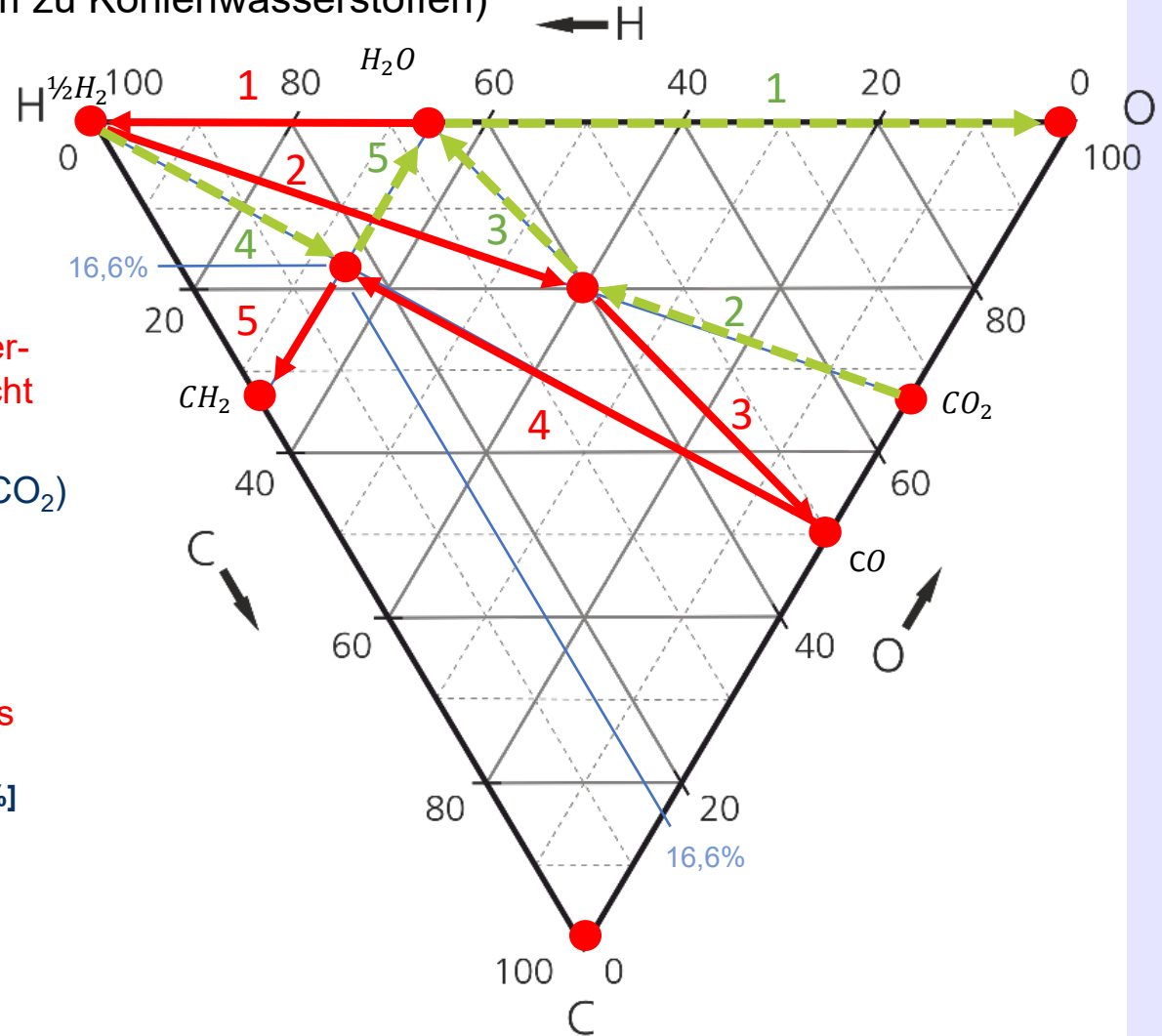
1. Chemische Energiespeicher

1.3 Chemische Konversionspfade

Beispiel: Power-to-Fuels (Strom zu Kohlenwasserstoffen)

Startpunkt H₂O
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]

1. **Elektrolyse von H₂O zu H₂**
(und O₂)
[C-H-O : 0-2-0 : 0% - 100% - 0%]
[C-H-O : 0-0-1 : 0% - 0% - 100%]
2. **H₂ wird mit CO₂ (1:1) zu Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) gemischt**
[C-H-O : 1-2-2 : 20% - 40% - 40%]
3. **Das Konvertierungsgas (H₂ + CO₂) wird zu CO reduziert und H₂O auskondensiert**
[C-H-O : 1-0-1 : 50% - 0% - 50%]
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]
4. **CO wird mit H₂ zu Synthesegas gemischt (1:2)**
[C-H-O : 1-4-1 : 16,6% - 66,6% - 16,6%]
5. **Fischer-Tropsch-Synthese zu Kohlenwasserstoffen „CH₂“ (Abscheidung von H₂O)**
[C-H-O : 1-2-0 : 33,3% - 66,6% - 0%]
[C-H-O : 0-2-1 : 0% - 66,6% - 33,3%]



1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Fischer-Tropsch synthesis

- Polymerization process for the production of hydrocarbons (gaseous, liquid, solid) from synthesis gas (H_2+CO)
- $CO+2H_2 \leftrightarrow [-CH_2-]+H_2O$, Alcohols, alkenes, etc. can also be formed
- Chain growth probability α influences distribution of the products.
- The weight fraction W_n of hydrocarbon molecules with n carbon atoms is calculated according to:
$$W_n = n \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot \alpha^{(n-1)}$$
- Chain growth probability α depends on catalyst and ambient conditions

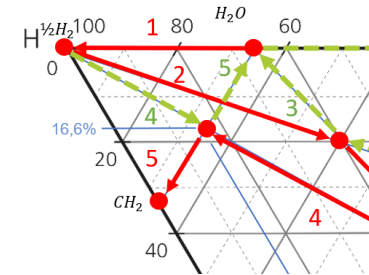
1. Chemische Energiespeicher
1.3 Chemische Konversionspfade

Fischer-Tropsch-Synthese

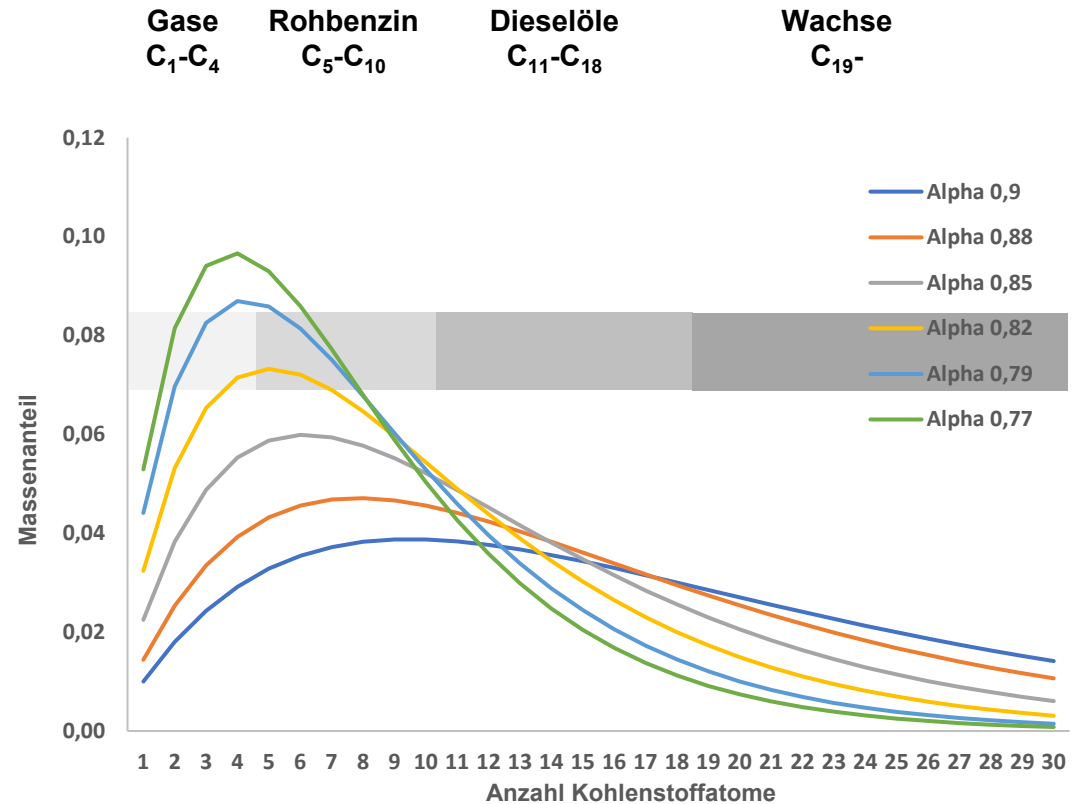
- Polymerisationsverfahren zur Gewinnung von Kohlenwasserstoffen (gasf., flüssig, fest) aus Synthesegas (H_2+CO)
- $CO+2H_2 \leftrightarrow [-CH_2-]+H_2O$, ebenso können Alkohole, Alkene etc. entstehen
- Kettenwachstumswahrscheinlichkeit α beeinflusst Verteilung der Produkte.
- Der Gewichtsanteil W_n der Kohlenwasserstoffmoleküle mit n Kohlenstoffatomen berechnet sich nach:

$$W_n = n \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot \alpha^{(n-1)}$$

- Kettenwachstumswahrscheinlichkeit α ist abhängig von Katalysator und Umgebungsbedingungen



④ Synthesegas $2H_2 + CO$



1. Chemical Energy Storage

1.3 Chemical conversion path: Interim Conclusion

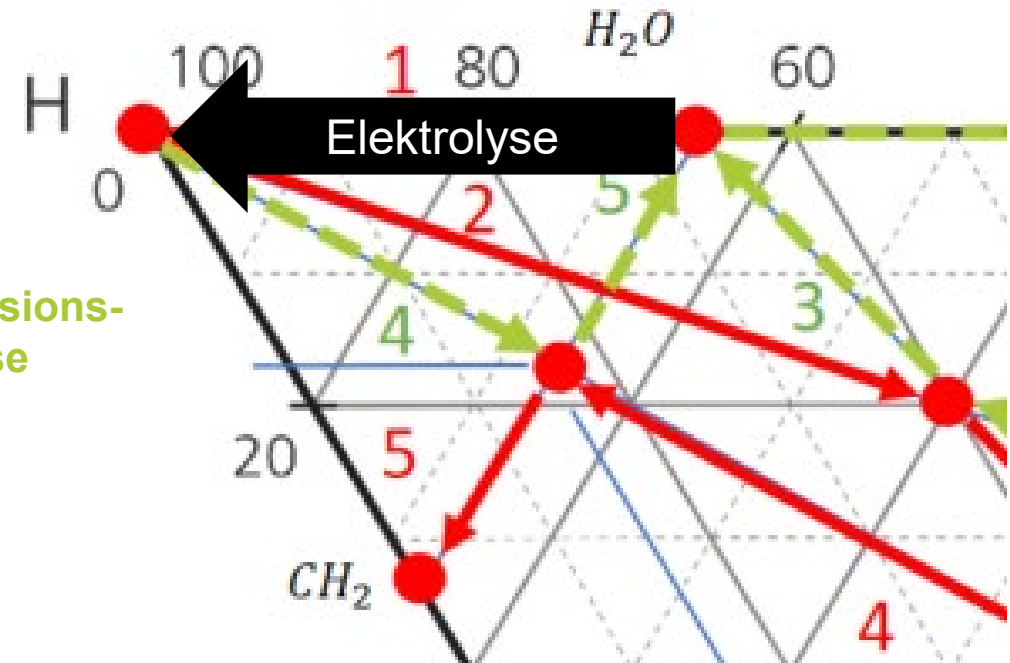
- All important reactions can be found in the C-H-O system
- Products are hydrogen or hydrocarbons (including alcohols etc.)
- Products can be used as fuels, chemicals, space heating, etc. ("sector-wide energy storage")
- Products can also be converted back into electricity, only then genuine electrical storage ("sectoral energy storage")
- **The main reaction in all conversion paths is water electrolysis and thus hydrogen as the first (intermediate) product**

1. Chemische Energiespeicher

1.3 Chemische Konversionspfade: Zwischen-Fazit

- Alle wichtigen Reaktionen sind im C-H-O-System zu finden
- Produkte sind Wasserstoff bzw. Kohlenwasserstoffe (inkl. Alkohole etc.)
- Produkte können als Treibstoffe, Chemikalien, zur Raumbeheizung etc. genutzt werden („sektorübergreifender Energiespeicher“)
- Produkte können auch wieder in Strom gewandelt werden, nur dann echte elektrische Speicher („sektoraler Energiespeicher“)

- ✓ **Hauptreaktion bei allen Konversionspfaden ist die Wasserelektrolyse und damit Wasserstoff als erstem (Zwischen-)Produkt**



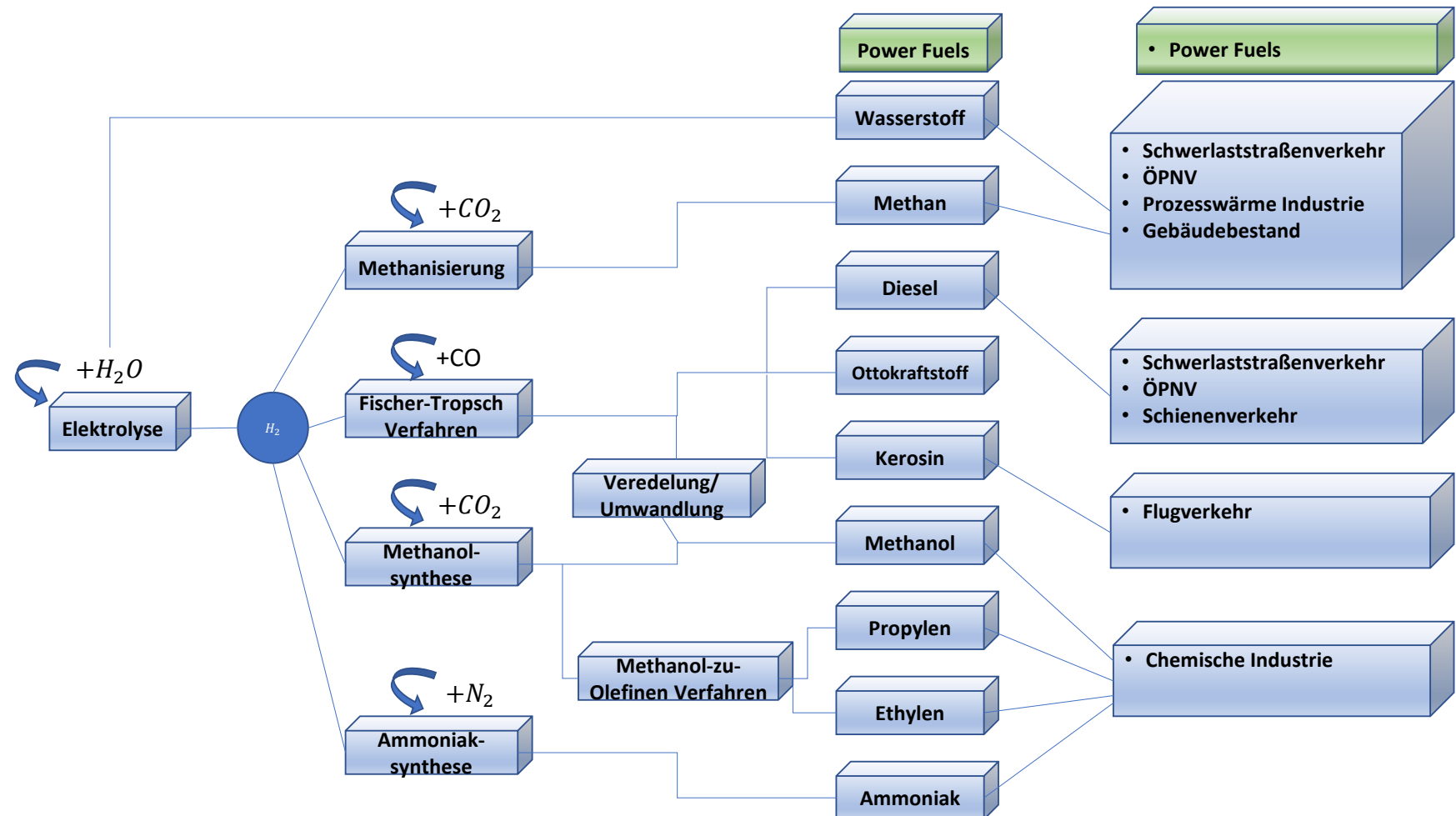
1. Chemical Energy Storage
1.3 Chemical conversion paths

Further conversion routes to products of the energy and chemical industries

1. Chemische Energiespeicher

1.3 Chemische Konversionspfade

Weitere Umwandlungsrouten zu Produkten der Energie- und Chemiewirtschaft



1. Chemical Energy Storage
1.4 Hydrogen as an Energy Source / Storage

Illustration of the storage densities

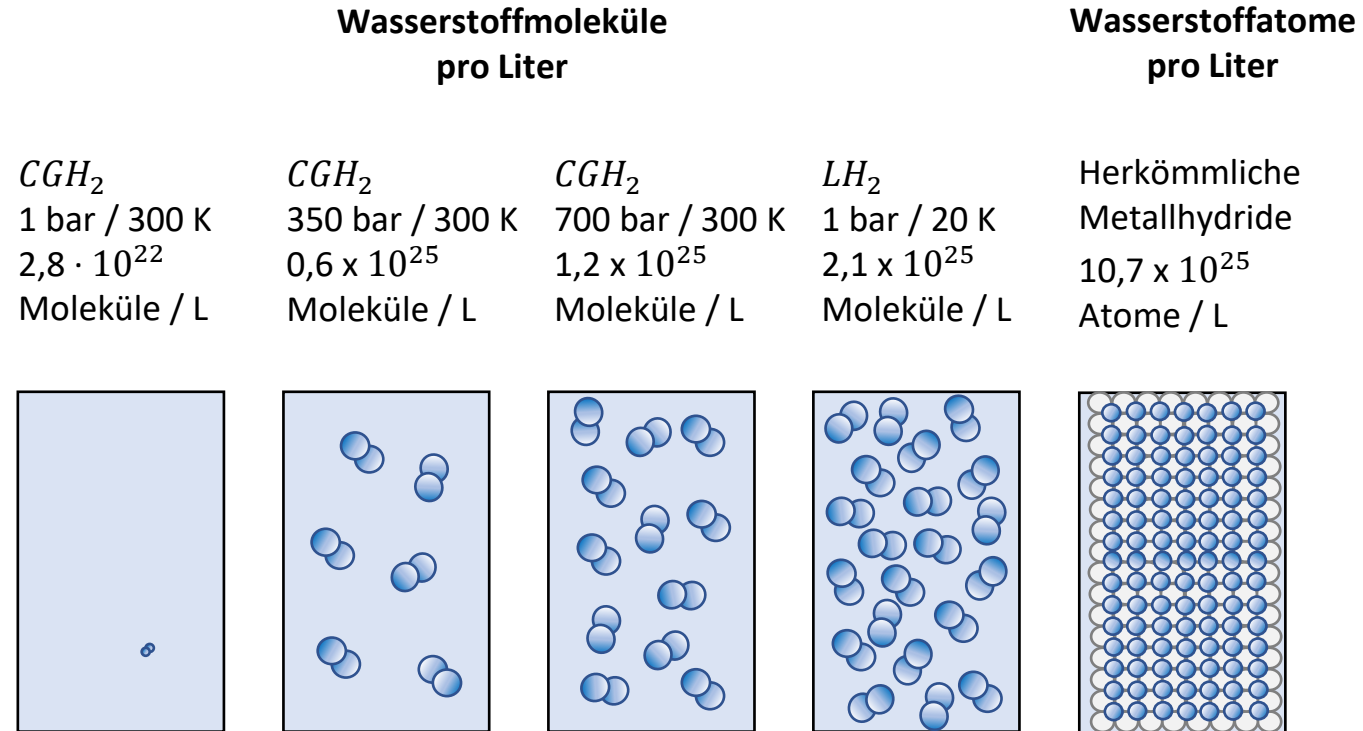
Hydrogen molecules per litre

Hydrogen atoms per litre

1. Chemische Energiespeicher

1.4 Wasserstoff als Energieträger und –speicher – Druck-/Flüssigspeicher

Veranschaulichung der Speicherdichten



Grafik angelehnt an: Helmolt R, Eberle U. Fuel cell vehicles: Status 2007. J Power Sources 2007;165: 833–43.

1. Chemical Energy Storage

 1.4 Hydrogen as an Energy Source / Storage
 Energy densities in comparison

1. Chemische Energiespeicher

1.4 Wasserstoff als Energieträger und –speicher – Energiedichten im Vergleich

Energieträger	Gravimetrische Speicherdichten	Volumetrische Speicherdichten
Wasserstoff	33,3 kWh/kg	(Normaldruck) 3 kWh/m ³
		(20 MPa / 200 bar): 530 kWh/m ³
		(70 MPa / 700 bar): 1855 kWh/m ³
		(flüssig, -253 °C): 2360 kWh/m ³
Erdgas	13,9 kWh/kg	(20 MPa / 200 bar): 2580 kWh/m ³
Benzin	11,6 kWh/kg	9300 kWh/m ³
Diesel	11,8 kWh/kg	9800 kWh/m ³
LOHC (liquid organic hydrogen carrier)	1,93 kWh/kg	1860 kWh/m ³
bspw.: N-Ethylcarbazol:		

1. Chemical Energy Storage

1.4 Hydrogen as an Energy Source / Storage

Liquid storage (1)

- Highest density and thus energy density
- High cooling effort
- "Boil-off losses"

Pressurised storage (2)

- Density and energy density increase with pressure (but no longer linear)
- High compression effort
- Heavy pressure tanks reduce practical energy density

1. Chemische Energiespeicher

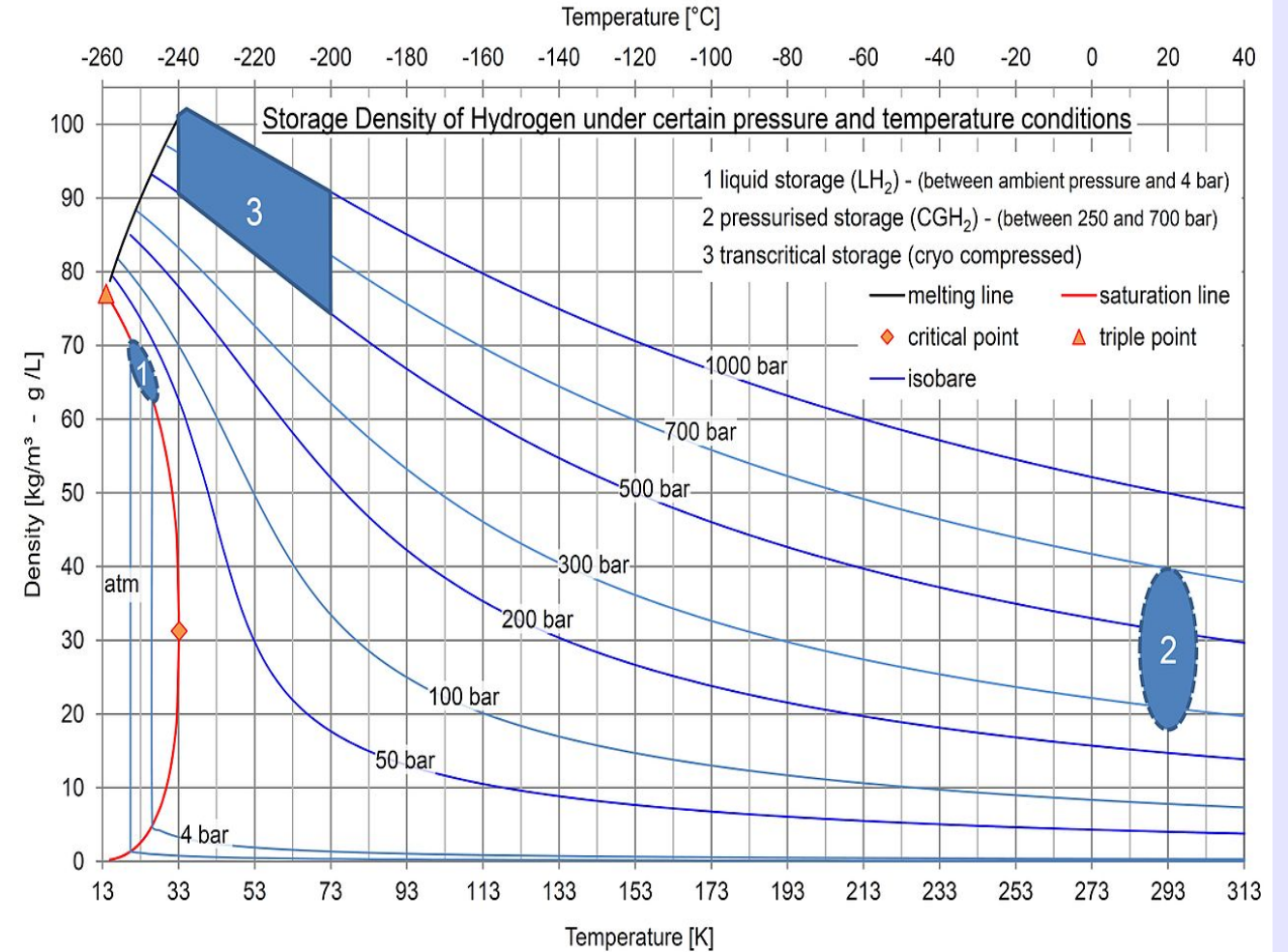
1.4 Wasserstoff als Energieträger und –speicher – Druck-/Flüssigspeicher

Flüssigspeicher (1)

- Höchste Dichte und damit Energiedichte
- Hoher Kühlaufwand
- „Boil-off losses“

Druckspeicher (2)

- Dichte und Energiedichte steigt mit Druck (aber nicht mehr linear)
- Hoher Kompressionsaufwand
- Schwere Drucktanks senken praktische Energiedichte



Storage Density of Hydrogen under certain pressure and temperature conditions, Moritz Kuhn, CC-BY-SA 4.0+ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Storage_Density_of_Hydrogen.jpg

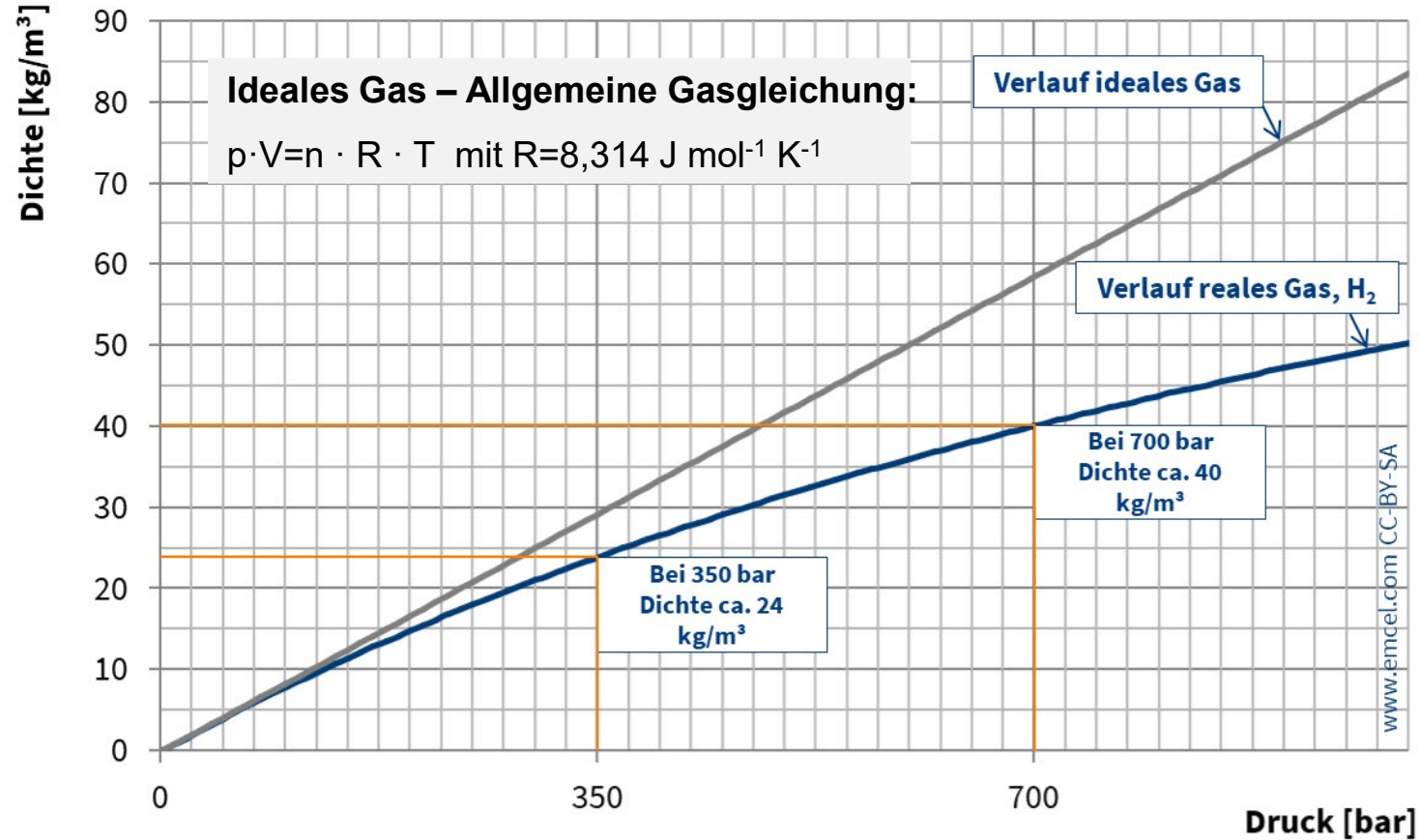
1. Chemical Energy Storage
 1.4 Hydrogen as an Energy Source / Storage

Pressure storage: Storage densities of hydrogen compared to ideal gas

1. Chemische Energiespeicher

1.4 Wasserstoff als Energieträger und –speicher – Druck-/Flüssigspeicher

Druckspeicher: Speicherdichten von Wasserstoff im Vergleich zu idealem Gas



EMCEL GmbH , CC-BY-SA <https://emcel.com/de/warum-fasst-ein-wasserstofftank-bei-700-bar-nicht-doppelt-so-viel-wie-bei-350-bar/>

1. Chemical Energy Storage

1.4 Hydrogen as an Energy Source / Examples

Hydrogen tank Toyota Mirai

- Second tank system made of fiber-reinforced nylon6
- 700 bar, 122 liters, 87.5 kg weight
- 5kg hydrogen capacity
- Stored energy: $5 \text{ kg} \times 33 \text{ kWh/kg} = 165 \text{ kWh}$
- The range of the fuel cell vehicle is about 38 L tank of a "normal" combustion engine vehicle

Vol./grav. Energy density

Gravimetric energy density: 1780 Wh/kg

Volumetric energy density: 1350 Wh/L

For comparison Tesla battery

Gravimetric energy density: 260 Wh/kg

Volumetric energy density: 665 Wh/L

1. Chemische Energiespeicher

1.4 Wasserstoff als Energieträger und –speicher – Beispiele für Speicherbehälter



Hydrogen tanks for the Toyota Mirai.,
Whoisjohngalt, CC-BY-SA 4.0†
https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_tank#/media/File:Hydrogen_tanks_for_Toyota_Mirai.png

Wasserstofftank Toyota Mirai

- Zweitanksystem aus faserverstärktem Nylon6.
- 700 bar, 122 Liter, 87,5 kg Gewicht
- 5kg Wasserstoffkapazität
- Gespeicherte Energie: $5 \text{ kg} \times 33 \text{ kWh/kg} = 165 \text{ kWh}$
- Die Reichweite des Brennstoffzellenfahrzeugs entspricht etwa 38 L Tank eines "normalen" Verbrennungsmotor-Fahrzeugs

Vol./grav. Energiedichte

- Gravimetrische Energiedichte: 1780 Wh/kg
- Volumetrische Energiedichte: 1350 Wh/L

Zum Vergleich Tesla-Batterie

- Gravimetrische Energiedichte: 260 Wh/kg
- Volumetrische Energiedichte: 665 Wh/L

1. Chemical Energy Storage

1.4 Hydrogen as an Energy Source / Storage

Storage of hydrogen by means of LOHC

To absorb H_2 , the dehydrated form of LOHC reacts with the H_2 in a hydrogenation reaction (exothermic, 150-200°C, 30-50 bar, catalyst). This forms a compound that can be stored or transported at ambient conditions. If H_2 is needed again, the now hydrogenated, hydrogen-rich form of LOHC is dehydrogenated, releasing H_2 from the LOHC again (endothermic, 250-320°C, catalyst).

Problems:

Heat required for H_2 recovery

Aging of the LOHC and the catalysts

Examples:

N-ethylcarbazole:

Up to 5.8 wt% hydrogen can be stored in hydrogenated N-ethylcarbazole, corresponding to a formal energy content of 1.9 kWh/kg. Dehydrogenation occurs at temperatures of about 200 to 230 °C.

Dibenzyltoluene:

To circumvent the high melting temperature of N-ethylcarbazole, dibenzyltoluene can be used. This substance is currently already used as a heat transfer oil. Temperatures of approx. 300 °C are required for dehydrogenation.

1. Chemische Energiespeicher

1.4 Wasserstoff als Energieträger und –speicher – LOHC

Speicherung von Wasserstoff mittels LOHC (engl.: *liquid organic hydrogen carrier*)

Zur Aufnahme von H_2 reagiert die dehydrierte Form des LOHCs in einer Hydrierungsreaktion (exotherm, 150-200°C, 30-50 bar, Katalysator) mit dem H_2 . Dabei wird die eine Verbindung gebildet, die bei Umgebungsbedingungen gelagert beziehungsweise transportiert werden kann. Wird H_2 wieder benötigt wird die nun hydrierte, wasserstoffreiche Form des LOHCs dehydriert, wobei H_2 wieder aus dem LOHC freigesetzt wird (endotherm, 250-320°C, Katalysator).

Probleme:

- Wärme zur H_2 Rückgewinnung notwendig
- Alterung des LOHC und der Katalysatoren

Beispiele:

▪ N-Ethylcarbazol:

In hydriertem N-Ethylcarbazol können bis zu 5,8 Gew-% Wasserstoff gespeichert werden, was einem formalen Energiegehalt von 1,9 kWh/kg entspricht. Die Dehydrierung erfolgt bei Temperaturen von ca. 200 bis 230 °C.

▪ Dibenzyltoluol:

Um die hohe Schmelztemperatur von N-Ethylcarbazol zu umgehen, kann Dibenzyltoluol verwendet werden. Dieser Stoff wird gegenwärtig bereits als Wärmeträgeröl eingesetzt. Zur Dehydrierung sind Temperaturen von ca. 300 °C nötig.

1. Chemical Energy Storage
1.5 Hydrogen risks - explosion hazard

A low lower explosion limit (LEL) and high upper explosion limit (UEL) result in a very wide ignition range.

However, detonation only occurs between 18% and 59%.

=> Oxyhydrogen reaction !

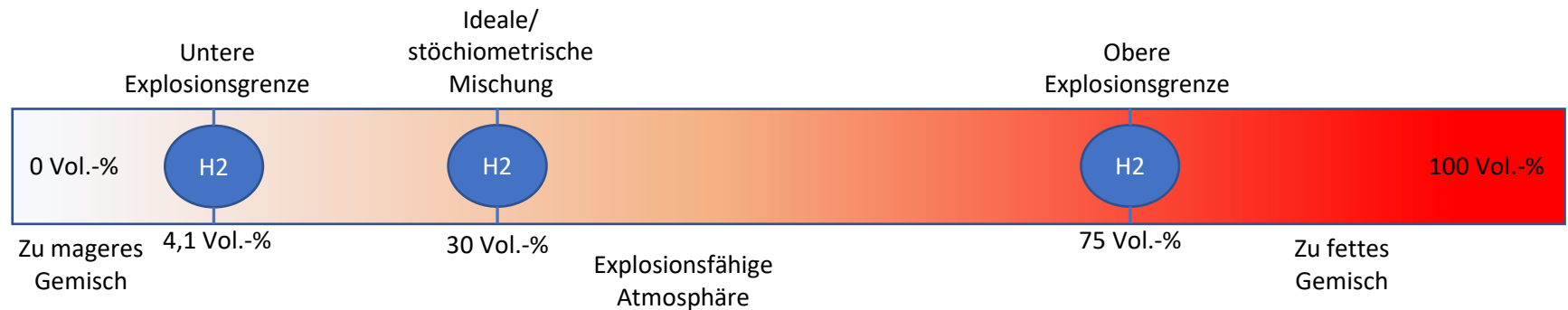
1. Chemische Energiespeicher
1.5 Wasserstoff Risiken – Explosionsgefahr

Eine niedrige untere Explosionsgrenze (UEG) und hohe obere Explosionsgrenze (OEG) ergeben einen sehr breiten Zündbereich

Eine Detonation tritt aber nur zwischen 18% und 59% auf.

=> Knallgasreaktion !

Substanz	UEG in Vol.-%	Stöch. in Vol.-%	OEG in Vol.-%
Wasserstoff	4,1	30	75
Propan	1,7	4,0	9,5
Methan (Erdgas)	4,4	9,5	16,5



1. Chemical Energy Storage

1.5 Hydrogen risks - explosion hazard

In 1937, the airship "Hindenburg" crashed in Lakehurst (USA; New Jersey), taking off from Frankfurt after a trans-Atlantic flight.

Of the 97 people on board, 62 survived the disaster.

This was a fire (!) of hydrogen, in an explosion no one would have survived.

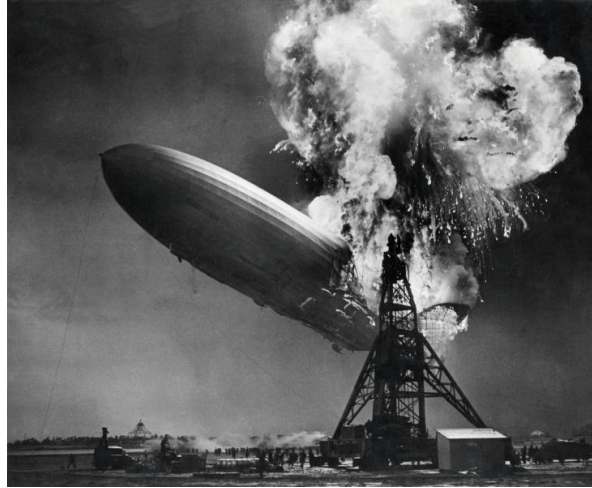
Comparison with methane or gasoline/diesel

Similar properties compared to methane, but a larger explosion range with air. At the same time, hydrogen volatilizes more quickly than methane.

Compared to gasoline/diesel, a leakage, for example, is much less dangerous, as a test in 2003 (Michael Swain of the University of Miami) showed: The hydrogen car emitted a very short, violent jet flame, the gasoline car burned out completely.

1. Chemische Energiespeicher

1.5 Wasserstoff Risiken – Explosionsgefahr



Das brennende Luftschiff, Sam Shere, Public Domain†

https://de.wikipedia.org/wiki/LZ_129#/media/Datei:Hindenburg_disaster.jpg

Vergleich mit Methan oder Benzin/Diesel

- Im Vergleich zu Methan ähnliche Eigenschaften, jedoch einen größeren Explosionsbereich mit Luft. Zugleich verflüchtigt sich Wasserstoff schneller als Methan
- Im Vergleich zu Benzin/Diesel ist bspw. eine Leckage deutlich weniger gefährlich wie ein Test 2003 (Michael Swain von der University of Miami) ergab: Das Wasserstoffauto emittierte sehr kurz eine heftige Stichflamme, das Benzinauto brannte vollständig aus.

<https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/wasserstoffauto-brennstoffzelle-co2-neutral-batterie-lithium/>]

1937 verunglückte das Luftschiff »Hindenburg« in Lakehurst (USA; New Jersey), nach einem Transatlantikflug von Frankfurt startend.

Von den 97 Personen an Bord überlebten 62 Menschen die Katastrophe.

Hierbei handelte es sich um einen Brand (!) von Wasserstoff, bei einer Explosion hätte niemand überlebt.



Das Feuer schießt, über den Axialsteg kommend, aus dem Bug des Luftschiffs, Murray Becker, Public Domain†

https://de.wikipedia.org/wiki/LZ_129#/media/Datei:Hindenburg_disaster_1937.jpg

1. Chemical Energy Storage

1.6 Hydrogen Assessment

Advantages – Disadvantages

Advantages

- Water as a raw material is available in abundance
- Production can be sustainable, as long as sustainable electricity is used
- Clean "combustion", only water is produced
- Very high gravimetric energy density
- High conversion efficiency in a fuel cell
- Can be used flexibly in the electricity, traffic and heat sectors

Disadvantages

- Hydrogen can diffuse easily as the smallest atom
- Hydrogen embrittlement on metal (tank, pipes) and seals
- Explosive (wide ignition range)
- Lower volumetric energy density than other hydrocarbons
- High conversion losses during production (losses 20-50%)
- Can only be mixed with natural gas to a limited extent due to different physical properties (e.g. different flame speed), since consumers would otherwise need adapted burners, turbines, etc.

1. Chemische Energiespeicher

1.5 Wasserstoff Bewertung – Vor- und Nachteile

Vorteile

- Ausgangsstoff Wasser reichlich vorhanden
- Erzeugung kann nachhaltig erfolgen, sofern nachhaltiger Strom eingesetzt wird
- Saubere „Verbrennung“, es entsteht nur Wasser
- Sehr hohe gravimetrische Energiedichte
- Hoher Wandlungswirkungsgrad in einer Brennstoffzelle
- Flexibel einsetzbar im Strom-, Verkehrs- und Wärmesektor

Nachteile

- Wasserstoff kann als kleinstes Atom leicht diffundieren
- Wasserstoffversprödung an Metall (Tank, Leitungen) und Dichtungen
- Explosionsfähig (weiter Zündbereich)
- Geringere volumetrische Energiedichte als andere Kohlenwasserstoffe
- Hohe Wandlungsverluste bei der Erzeugung (Verluste 20-50%)
- Kann Erdgas wegen anderer physikalischer Eigenschaften nur begrenzt beigemischt werden (z.B. andere Flammgeschwindigkeit), da die Verbraucher ansonsten angepasste Brenner, Turbinen etc. benötigen

1. Chemical Energy Storage







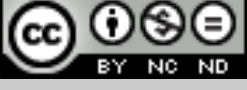
1.6 Summary

1. Chemical storage units are particularly suitable for long-term storage or for highly compact, mobile applications due to their high energy density.
2. Chemical energy storage consists mainly of carbon, hydrogen and possibly oxygen.
3. The C-H-O diagram allows conversion pathway considerations and comparison of different chemical storage media
4. Fischer-Tropsch synthesis can be used to produce longer-chain hydrocarbons from hydrogen or synthesis gas, which are easier to store as liquids.
5. Electrolysis is the most important conversion reaction for chemical storage media.
6. Hydrogen is the most environmentally friendly and first (i.e., fewer conversion steps with losses) chemical energy storage.
7. The low volumetric energy density of hydrogen is significantly increased by compression to 700 bar or liquefaction at -253°C.
8. Hydrogen is explosive and has a wide ignition range
9. Hydrogen can also be "bound" and transported/stored using organic liquids, but at the expense of efficiency, since recovery requires heat.

1. Chemische Energiespeicher

1.6 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Chemische Speicher eignen sich vor allem für langfristige Speicherung oder auch für hochkompakte, mobile Anwendungen aufgrund der hohen Energiedichte
2. Chemische Energiespeicher bestehen vor allem aus Kohlenstoff, Wasserstoff und evtl. Sauerstoff
3. Das C-H-O Diagramm ermöglicht Umwandlungspfadbetrachtungen und Vergleich verschiedener chemischer Speichermedien
4. Mittels Fischer-Tropsch-Synthese kann aus Wasserstoff bzw. Synthesegas längerkettige Kohlenwasserstoff erzeugt werden, die als Flüssigkeit einfacher zu speichern sind.
5. Die Elektrolyse ist die wichtigste Umwandlungsreaktion für chemische Speicher
6. Wasserstoff ist der umweltfreundlichste und erste (d.h. weniger Umwandlungsschritte mit Verlusten) chemische Energiespeicher.
7. Die geringe volumetrische Energiedichte von Wasserstoff wird durch Verdichtung bis 700 bar oder Verflüssigung bei -253°C deutlich erhöht.
8. Wasserstoff ist explosiv und hat einen breiten Zündbereich
9. Wasserstoff lässt sich auch mittels organischer Flüssigkeiten „binden“ und transportieren/speichern, jedoch auf Kosten der Effizienz, da die Wiedergewinnung Wärme benötigt.

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA
Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



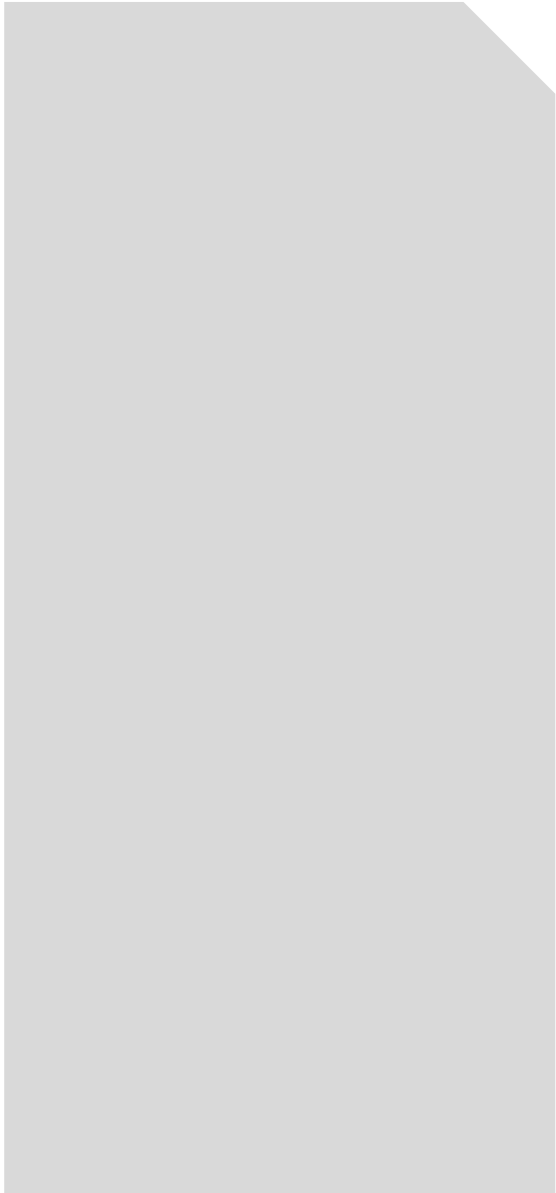
INNOVATION DURCH KOOPERATION

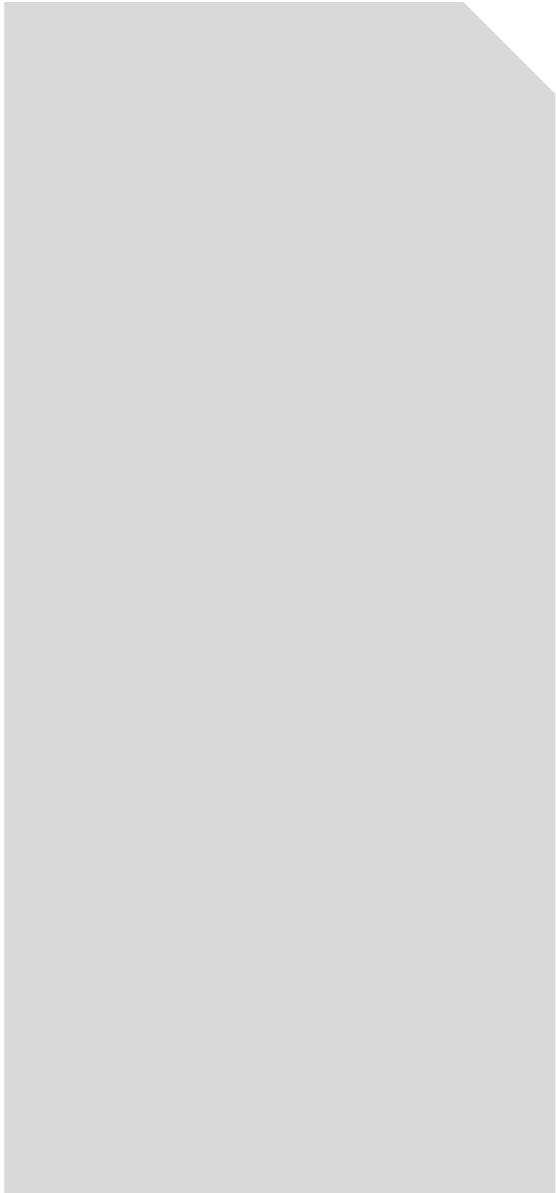
Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0





Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

**#8 Chemische Energiespeicher Teil b –
 Wasser-Elektrolyse**

**#8 Chemical Energy Storage part b –
 Water-Electrolysis**

Vorlesung #8b

| Lecture #8b



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Chemical Energy Storage**Content ⇒ Learning objectives**

- Basic functionality of water electrolysis
⇒ Introduction to the technology of water electrolysis
- Hofmann's decomposition apparatus (including half-cell reactions)
⇒ Basic understanding of the basic structure and operation of water electrolysis and the chemical reactions taking place
- Electrolysis efficiencies; thermoneutral voltage; Influence of heat coupling on efficiency
⇒ Basic understanding of the chemo-physical relationships and possibilities for increasing efficiency.

Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse**Inhalt ⇒ Lernziele**

- Grundsätzliche Funktionsweise der Wasser-Elektrolyse
⇒ Heranführung an die Technologie der Wasser-Elektrolyse
- Hofmann'scher Zersetzungsapparat (inkl. Halbzellreaktionen)
⇒ Grundverständnis für den prinzipiellen Aufbau und Betrieb einer Wasser-Elektrolyse sowie der ablaufenden chemischen Reaktionen
- Wirkungsgrade der Elektrolyse; thermoneutrale Spannung; Einfluss von Wärmeeinkopplung auf den Wirkungsgrad
⇒ Grundverständnis für die chemo-physikalischen Zusammenhänge und Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung.

2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

2.1 Basics

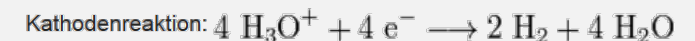
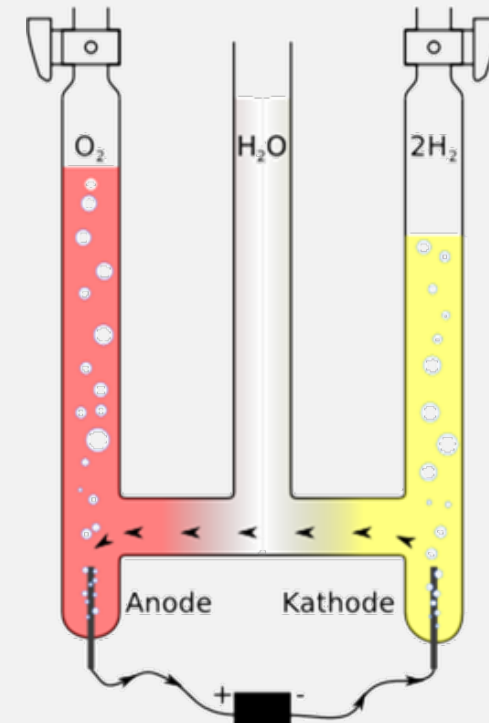
„Hofmannscher-Zersetzungsapparat“

- Apparatus for the electrolytic decomposition of aqueous solutions (August Wilhelm Hofmann 1818-1892)
- filled with dilute sulfuric acid because of electrical conductivity
- Apply a DC voltage to the platinum or carbon electrodes
- Gas evolution at cathode and anode, while the water is decomposed into its two components oxygen and hydrogen.
- At the cathode, the oxonium ions, which are formed by protolysis of the added acid, reduced to hydrogen and oxidized at the anode, the water to oxygen and oxonium ions.

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.1 Grundlagen – Hofmannscher-Zersetzungsapparat

- Gerät zur elektrolytischen Zerlegung von wässrigen Lösungen (AUGUST WILHELM HOFMANN 1818–1892)
- mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt wg. elektrischer Leitfähigkeit
- Anlegen einer Gleichspannung an den Platin- oder Kohlelektroden
- Gasentwicklung an Kathode und Anode, dabei wird das Wasser in seine beiden Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt.
- An der Kathode werden die Oxonium-Ionen, welche durch Protolyse der zugesetzten Säure entstanden sind, zu Wasserstoff reduziert und an der Anode das Wasser zu Sauerstoff und zu Oxonium-Ionen oxidiert.



Hofmannscher Elektrolyseapparat, IIVQ, CC-BY-SA 3.0† https://de.wikipedia.org/wiki/Hofmannscher_Wasserzersetzungapparat#/media/Datei:Hofmann_voltameter.svg

2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

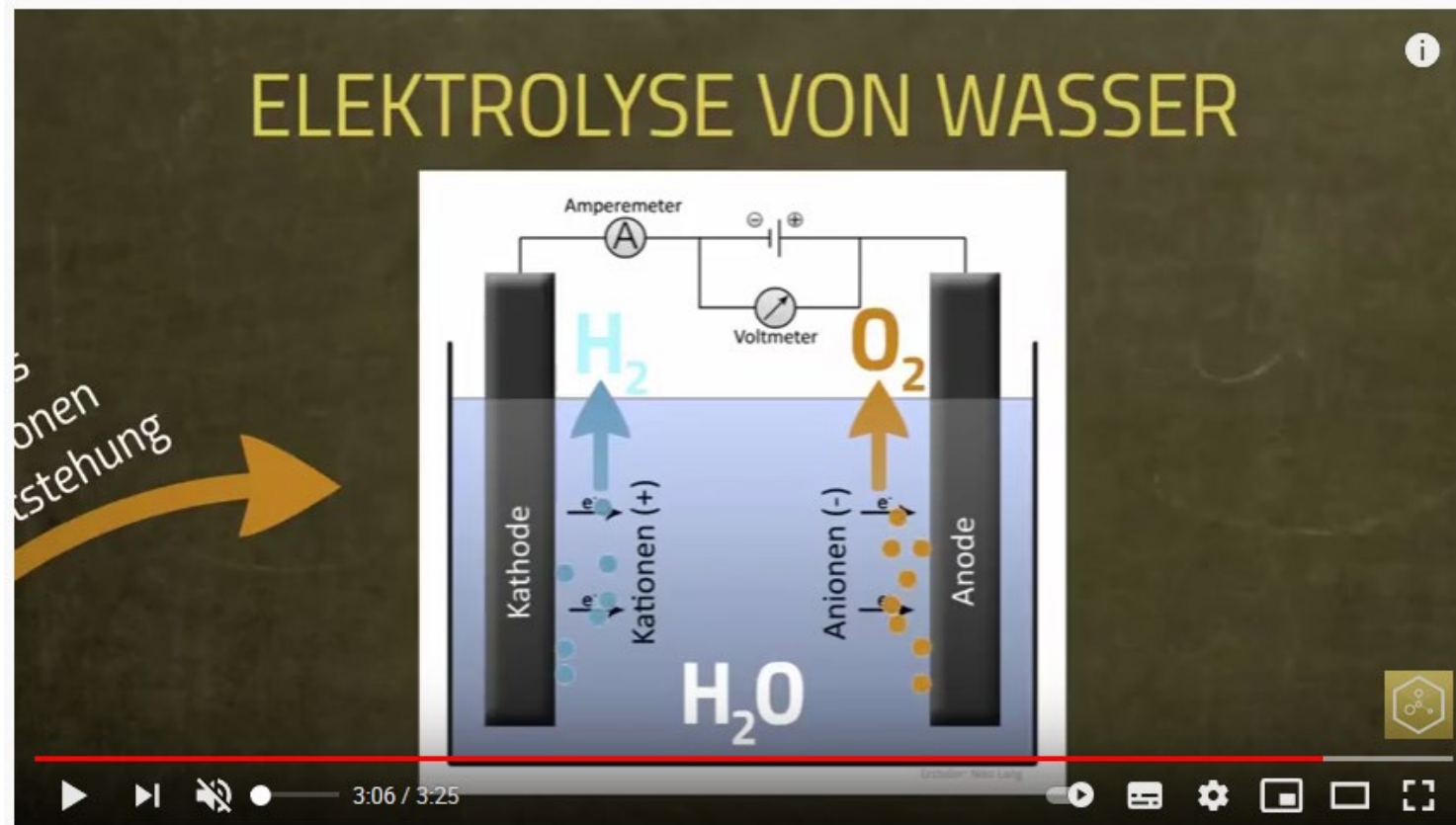
2.1 Basics

Video

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.1 Grundlagen

VIDEO: „Elektrolyse“ [0:00 – 3:25]



<https://youtu.be/EzBAGN2Jx7Y>

2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

2.2 Thermodynamics of electrolysis

- Water electrolysis is endothermic
- The ΔH reaction enthalpy of water electrolysis thus describes the energy required to split water. This amount of energy must be provided in part from electrical energy and in part it can be provided from heat
- The required electrical energy corresponds to the change in Gibbs energy ΔG (but assumes gaseous components)
- The difference between the reaction enthalpy and the Gibbs energy can be applied as thermal energy $T\Delta S$ (but mostly the energy is applied electrically as well).
- At **standard conditions** (25°C, 1 bar, i.e. liquid water) is
 $\Delta H_{25^\circ\text{C}} = 285.8 \text{ kJ/mol}$ und
 $\Delta G = 237.2 \text{ kJ/mol}$
- At **100°C and complete evaporation** is
 $\Delta H_{100^\circ\text{C}} = 242.6 \text{ kJ/mol}$ und
 $\Delta G = 225.1 \text{ kJ/mol}$.
- For the **energy content of hydrogen**, the lower heating value (no water vapor condensation!) is usually specified, which in this case corresponds to
 $\Delta H_{100^\circ\text{C}} = 242.6 \text{ kJ/mol} = 10.8 \text{ MJ/Nm}^3 = 3.0 \text{ kWh/Nm}^3 = 120 \text{ MJ/kg} = 33.3 \text{ kWh/kg}$

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

- Die Wasserelektrolyse verläuft endotherm
- Die **Reaktionsenthalpie ΔH** der Wasserelektrolyse beschreibt die insgesamt benötigte Energie zur Wasserspaltung. Diese Energiemenge muss zu einem Teil aus elektrischer Energie und zu einem anderen Teil kann sie auch aus Wärme bereitgestellt werden
- Die benötigte **elektrische Energie** entspricht der Änderung der Gibbs-Energie ΔG (setzt aber gasförmige Komponenten voraus)
- Die Differenz zwischen der Reaktionsenthalpie und der Gibbs-Energie **kann** als Wärmeenergie $T\Delta S$ aufgebracht werden (**zumeist** wird die Energie aber elektrisch mit aufgebracht). **$\Delta H = \Delta G + T\Delta S$ (Gibbs-Helmholtz-Gleichung)**
- Bei **Standardbedingungen** (25°C, 1 bar, d.h. flüssigem Wasser) beträgt
 $\Delta H_{25^\circ\text{C}} = 285,8 \text{ kJ/mol}$ und $\Delta G_{25^\circ\text{C}} = 237,2 \text{ kJ/mol}$.
- Bei **100°C und vollständiger Verdampfung** beträgt
 $\Delta H_{100^\circ\text{C}} = 242,6 \text{ kJ/mol}$ und $\Delta G_{100^\circ\text{C}} = 225,1 \text{ kJ/mol}$.
- Für den **Energieinhalt von Wasserstoff** wird im Regelfall der Heizwert (keine Wasserdampfkondensation!) angegeben, dies entspricht hier
 $\Delta H_{100^\circ\text{C}} = 242,6 \text{ kJ/mol} = 10,8 \text{ MJ/Nm}^3 = 3,0 \text{ kWh/Nm}^3 = 120 \text{ MJ/kg} = 33,3 \text{ kWh/kg}$

2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

2.2 Thermodynamics of electrolysis

- The electrical energy required to split the water is equal to the Gibbs enthalpy ΔG . This is equal to the necessary voltage U multiplied by the charge Q .
- Q is again the product of the passing electron number and the Faraday constant F .
- This results in molar ($n=1$) calculation ($z=2$; number of electrons transferred) for the voltage U_{rev} is *
- However, the actual energy to be applied is - due to entropy - ΔH and thus the so-called "thermoneutral decomposition voltage" U_{th} is *

*See formula on the right side

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

- Die für die Spaltung des Wassers benötigte elektrische Energie entspricht der Gibbs-Enthalpie ΔG . Diese ist gleich der notwendigen Spannung U multipliziert mit der Ladung Q .

$$W_{el} = \Delta G = U \cdot Q$$

- Q ist wiederum das Produkt aus übergehender Elektronenzahl und der Faraday-Konstante F .

$$\Delta G = U \cdot n \cdot z \cdot F$$

- Daraus ergibt sich molar ($n=1$) gerechnet ($z=2$; übergehende Elektronenzahl) für die Spannung bei 25°C:

$$U_{rev,l} = \frac{\Delta G_{25^\circ C}}{z \cdot F} = \frac{237,2 \text{ kJ mol}^{-1}}{2 \cdot 96486 \text{ As mol}^{-1}} = 1,23 \text{ V}$$

- Die tatsächlich aufzubringende Energie ist jedoch - wg. der Entropie - ΔH und somit gilt für die so genannte „thermoneutrale Zersetzungsspannung“ U_{th} (ebenfalls molar gerechnet, d.h. $n=1$) bei 25°C

$$U_{th} = \frac{\Delta H_{25^\circ C}}{z \cdot F} = \frac{285,9 \text{ kJ mol}^{-1}}{2 \cdot 96486 \text{ As mol}^{-1}} = 1,48 \text{ V}$$

2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

2.2 Thermodynamics of electrolysis

- This results in the maximum recoverable electrical (!) energy related to the total energy used (electrical + thermal) for liquid water (25°C)
- Or the maximum recoverable electrical (!) energy related to the total energy used (electrical + thermal) with gaseous water (100°C)

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

- Hieraus resultiert die maximal wiedergewinnbare elektrische (!) Energie bezogen auf die gesamt eingesetzte Energie (elektrisch + thermisch) bei flüssigem Wasser (25°C) $\eta_{rev,l}$

$$\frac{\Delta G_{25^\circ C}}{\Delta H_{25^\circ C}} = \frac{237,2 \text{ kJ mol}^{-1}}{285,8 \text{ kJ mol}^{-1}} = 0,83 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta U_{rev,l,25^\circ C}}{\Delta U_{th,25^\circ C}} = \frac{1,23 \text{ V}}{1,48 \text{ V}} = 0,83$$

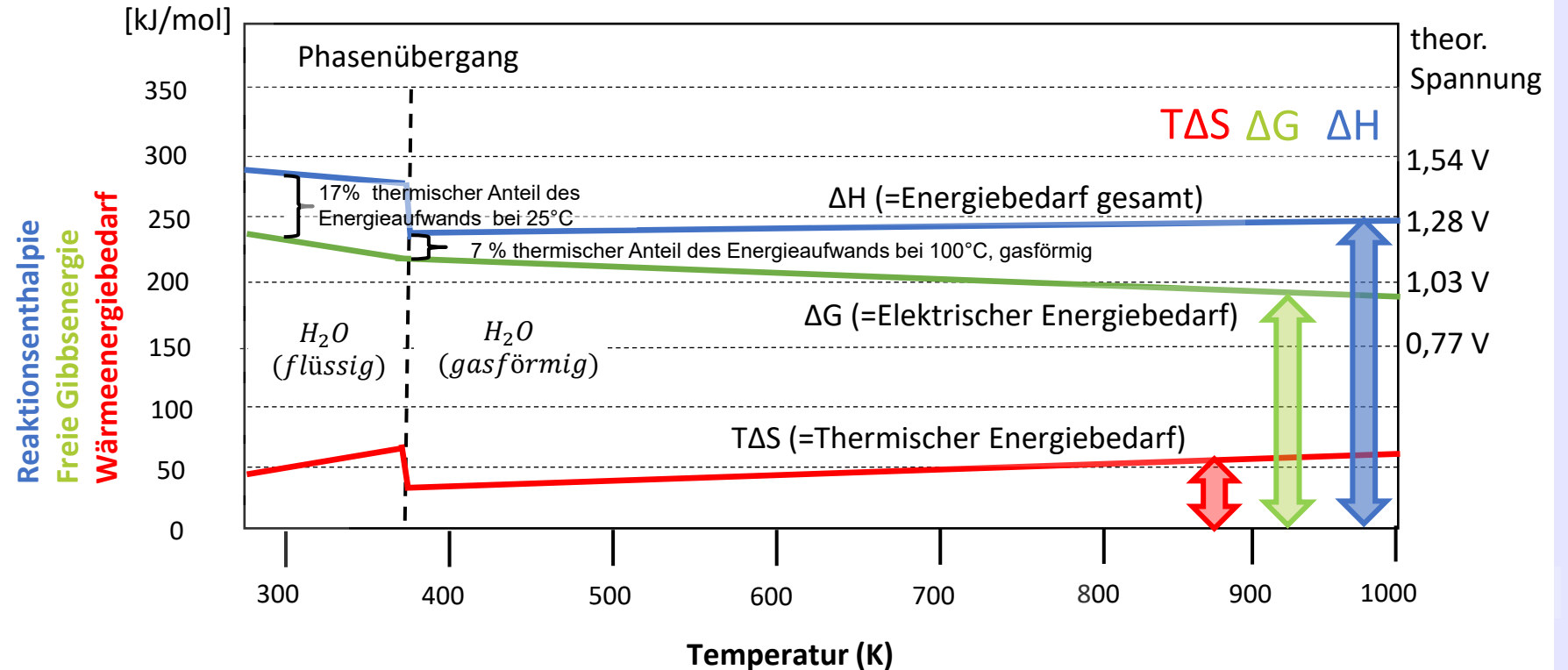
- Bzw. die maximal Wiedergewinnbaren elektrischen (!) Energie bezogen auf die gesamt eingesetzte Energie (elektrisch + thermisch) bei gasförmigen Wasser (100°C) $\eta_{rev,g}$

$$\frac{\Delta G_{100^\circ C}}{\Delta H_{100^\circ C}} = \frac{225,1 \text{ kJ mol}^{-1}}{242,6 \text{ kJ mol}^{-1}} = 0,93 \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta U_{rev,l,100^\circ C}}{\Delta U_{th,100^\circ C}} = \frac{1,17 \text{ V}}{1,26 \text{ V}} = 0,93$$

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

Temperaturabhängigkeit der Enthalpien



2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

2.2 Thermodynamics of electrolysis

Temperature dependence of enthalpies

- The figure shows the temperature dependence of the total energy to be applied (ΔH) or the purely electrical energy (ΔG) as well as the energy requirement ($T\Delta S$) to be provided thermally at normal pressure. The abrupt changes at 100 °C are due to the change of the H_2O state from liquid to gaseous, which reduces the thermal energy demand and thus also the total energy demand.
- The total energy requirement is almost constant above 100°C, but the electrical energy requirement decreases with a simultaneous increase in the proportion that can also be provided thermally. This results in the higher (electrical) efficiency of high-temperature electrolyzers that use "HT waste heat"
- In practice, the voltage of an electrolytic cell is significantly higher than the minimum cell voltage. On the one hand, this is due to the overvoltage between the anode and cathode. On the other hand, the ohmic resistance of the cell (electrolytes, separator and electrodes) causes a further voltage loss.

Let U be the applied voltage

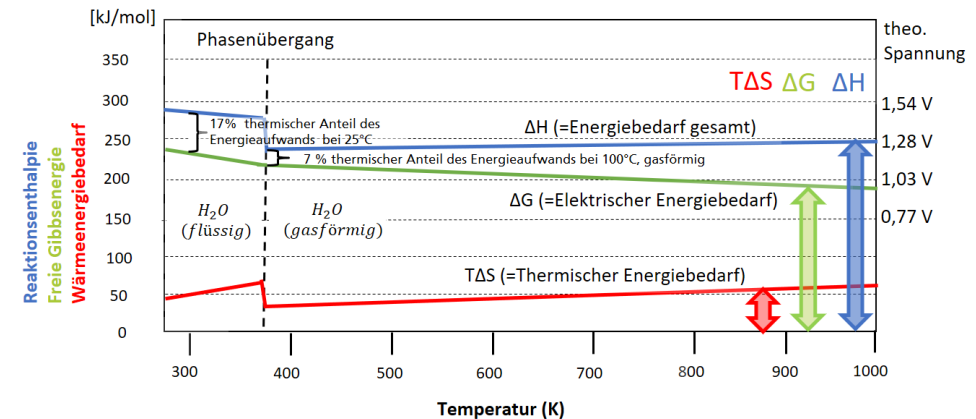
- If $U \geq U_{th}$ (i.e., the applied electrical energy is greater than ΔH), electrolysis occurs at constant temperature ($U = U_{th}$) or with heat removal ($U > U_{th}$).
- If $U_{th} < U \leq U_{rev}$ (i.e., the applied electrical energy is greater than ΔG but smaller ΔH) then electrolysis is possible by supplying heat.
- If $U < U_{rev}$ (i.e., the applied electrical energy is lower than ΔG) no splitting of H_2O can occur.

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

Temperaturabhängigkeit der Enthalpien

- Die Abbildung zeigt die Temperaturabhängigkeit der insgesamt aufzubringenden Energie (ΔH) bzw. der rein elektrischen Energie (ΔG) sowie des auch thermisch bereitzustellenden Energiebedarfs ($T\Delta S$) bei Normaldruck. Die sprunghafte Änderungen bei 100 °C sind auf die Änderung des H_2O -Zustandes von flüssig zu gasförmig zurückzuführen, wodurch sich der thermische Energiebedarf und damit auch der Gesamtenergiebedarf vermindern.
- Der Gesamtenergiebedarf ist oberhalb von 100°C nahezu konstant, jedoch sinkt der elektrische Energiebedarf bei gleichzeitigem Anstieg des auch thermisch bereitstellbaren Anteils. Hierdurch entsteht die höhere (elektrische) Effizienz von Hochtemperaturelektrolyseuren, die „HT-Abwärme“ nutzen
- In der Praxis ist die Spannung einer Elektrolysezelle deutlich höher als die Mindest-Zellspannung. Dies liegt zum einen an der Überspannung zwischen der Anode und Kathode. Zum anderen ruft der Ohmsche Widerstand der Zelle (Elektrolyte, Separator und Elektroden) einen weiteren Spannungsverlust hervor.



U sei die angelegte Spannung

- Wenn $U \geq U_{th}$ (d.h. die zugeführte elektrische Energie größer ΔH) ist, erfolgt die Elektrolyse bei konstanter Temperatur ($U = U_{th}$) bzw. unter Wärmeabfuhr ($U > U_{th}$).
- Wenn $U_{th} < U \leq U_{rev}$ (d.h. die zugeführte elektrische Energie größer ΔG aber kleiner ΔH) ist, dann ist die Elektrolyse durch Zufuhr von Wärme möglich.
- Wenn $U < U_{rev}$ (d.h. die zugeführte elektrische Energie kleiner ΔG ist, kann keine Spaltung von H_2O auftreten.

2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage
2.2 Thermodynamics of electrolysis

Influence of pressure and temperature on the reversible cell voltage

Higher current density means:

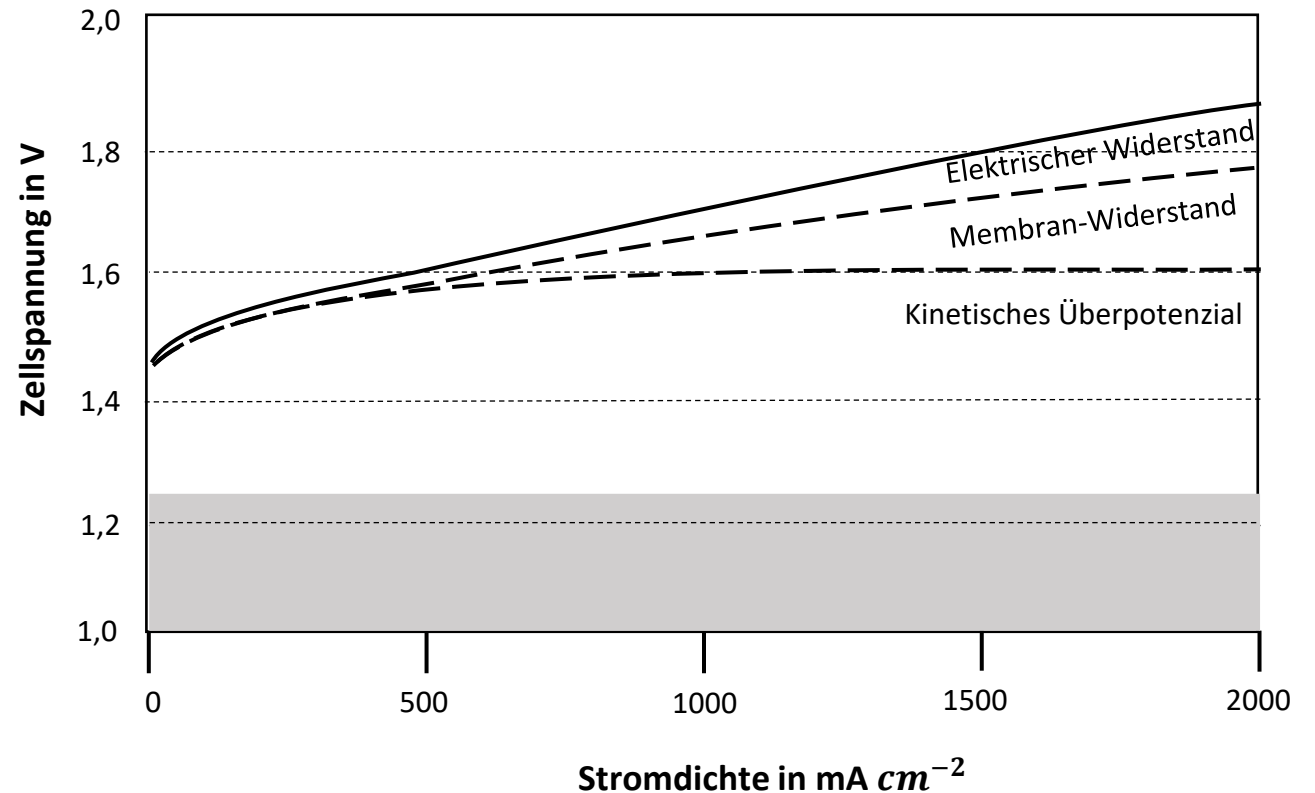
- More turnover per area
- Higher losses at the anode, cathode and ohmic losses which manifest in higher cell voltage, i. lower efficiency
- Optimization problem!

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse
2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

Einfluss von Stromdichte, Druck und Temperatur auf die reversible Zellspannung

Höhere Stromdichte bedeutet:

Mehr Umsatz pro Fläche, aber auch höhere Verluste und damit geringere energetische Effizienz -> **Optimierungsproblem!**



2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage
2.2 Thermodynamics of electrolysis

Influence of pressure and temperature on the reversible cell voltage

Higher pressure means

- Higher reversible cell voltage necessary, i.e. lower efficiency, but at the same time less gas compression work required
-> optimization problem!

Higher temperature means

- Lower reversible cell voltage necessary, i.e. higher (electrical) efficiency, but at the same time faster aging and thus service life
-> optimization problem!

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse
2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

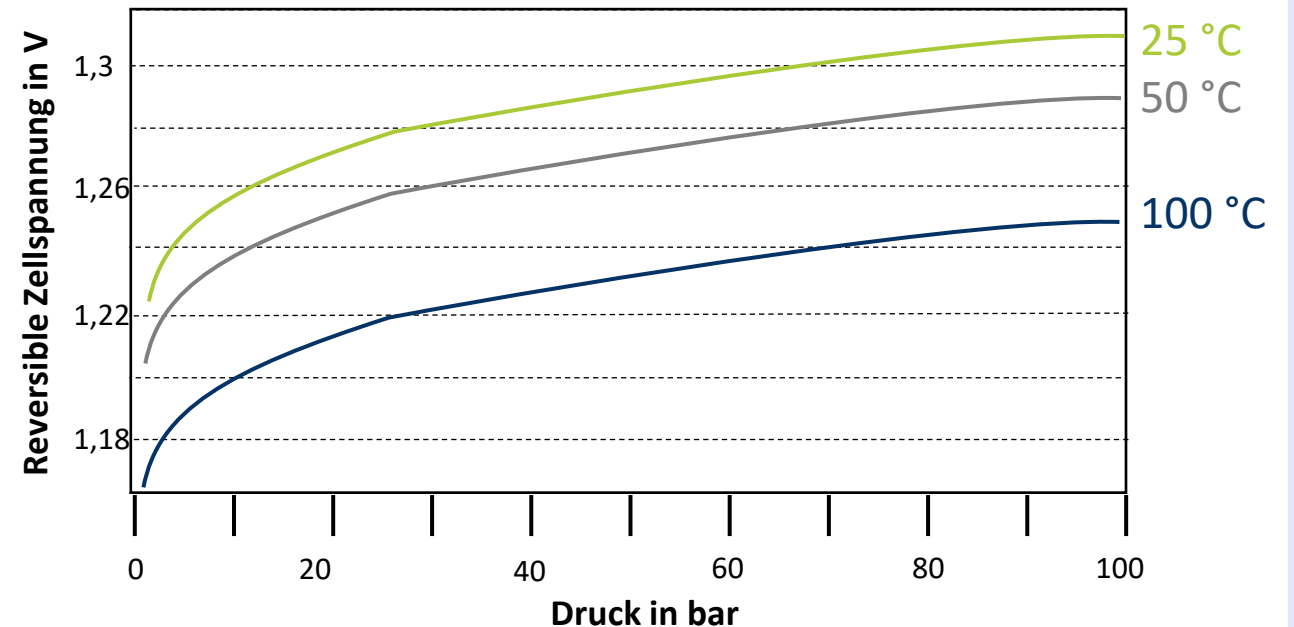
Einfluss von Stromdichte, Druck und Temperatur auf die reversible Zellspannung

Höherer Druck bedeutet

Höhere reversible Zellspannung notwendig, d.h. **geringerer Wirkungsgrad**, aber zugleich **weniger Gas-Kompressionsarbeit** erforderlich
-> **Optimierungsproblem!**

Höhere Temperatur bedeutet

Geringere reversible Zellspannung notwendig, d.h. **höherer (elektrischer) Wirkungsgrad**, aber zugleich **schnellere Alterung** und damit Lebensdauer -> **Optimierungsproblem!**



2. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

2.2 Thermodynamics of electrolysis

Efficiency of an electrolyser

The electrical energy required to produce 1 Nm³ of hydrogen defines the efficiency of an electrolyzer. In a modern high-pressure electrolyzer, for example, this energy requirement is 4.8 kWh per Nm³ at a pressure of 12 bar. This gives an efficiency of 62.5% - based on the lower heating value of hydrogen of 33.3 kWh/kg or 3 kWh/Nm³).

Calculation:

1 Nm³ \triangleq 3 kWh, with energy input of 4.8 kWh this corresponds to an efficiency of 62.5 %.

The reference to the heating value and not the calorific value results from the fact that the difference, the enthalpy of condensation, can only be recovered thermally and does not provide any contribution to the fuel cell for reconversion of electricity.

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.2 Thermodynamik der Elektrolyse

Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs

Der elektrische Energiebedarf zur Herstellung von 1 Nm³ Wasserstoff definiert den Wirkungsgrad einen Elektrolyseurs. In einem modernen Hochdruck-Elektrolyseur liegt dieser Energiebedarf beispielsweise bei 4,8 kWh pro Nm³ bei einem Druck von 12 bar. Damit liegt der Wirkungsgrad bei 62,5 % - bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff von 33,3 kWh/kg bzw. 3 kWh/Nm³).

Rechnung:

1 Nm³ \triangleq 3 kWh, bei Energieeinsatz von 4,8 kWh entspricht das einem Wirkungsgrad von 62,5 %.

$$\eta_{\text{energetisch}} = \frac{\Delta H_{\text{Nutzen}}}{\Delta H_{\text{Aufwand}}} = \frac{\Delta H_{100^{\circ}\text{C}}}{\Delta H_{\text{Aufwand}}} = \frac{3 \text{ kWh} / \text{Nm}^3}{4,8 \text{ kWh} / \text{Nm}^3} = 0,625$$

Der Bezug auf den Heizwert und nicht den Brennwert ergibt sich daraus, dass die Differenz, die Kondensationsenthalpie, ja nur thermisch zurückgewonnen werden kann und keinen Beitrag für die Brennstoffzelle zur Rückverstromung liefert.

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.3 Beispiel

VIDEO: „How to make a mini Hydrogen Generator“ [0:00 – 4:13]



<https://youtu.be/G7s49h-krsc>

2. Chemical Energy Storage – Water-Electrolysis








2.4 Summary

1. In water electrolysis, from one mole of water, one mole of hydrogen (H_2) and $\frac{1}{2}$ mole of oxygen (O_2) are produced, 2 electrons pass.
2. In Hofman's decomposition apparatus, oxygen is produced at the anode and hydrogen at the cathode (in double quantity)
3. The energy for water electrolysis comes from electrical energy and possibly thermal energy. The warmer the water, the less electrical energy (lower voltage) is required.
4. Higher current densities lead to lower electrical efficiencies, as does higher pressure
5. The real cell voltage required is higher than the ideal one due to overvoltages, ohmic losses, etc.

2. Chemische Energiespeicher – Wasser-Elektrolyse

2.4 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Bei der Wasser-Elektrolyse entsteht aus einem Mol Wasser, ein Mol Wasserstoff (H_2) und $\frac{1}{2}$ Mol Sauerstoff (O_2), 2 Elektronen gehen über.
2. Im Hofmanschen-Zeretzungsapparat entsteht an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff (in doppelter Menge)
3. Die Energie zur Wasser-Elektrolyse entstammt elektrischer Energie und evtl. thermischer Energie. Umso Wärmer das Wasser, desto weniger elektrische Energie (geringere Spannung) ist notwendig.
4. Höhere Stromdichten führen zu geringeren elektrischen Wirkungsgraden, ebenso höherer Druck
5. Die real benötigte Zellspannung ist höher als die ideale, da Überspannungen, ohmsche Verluste etc. auftreten.

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA
Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



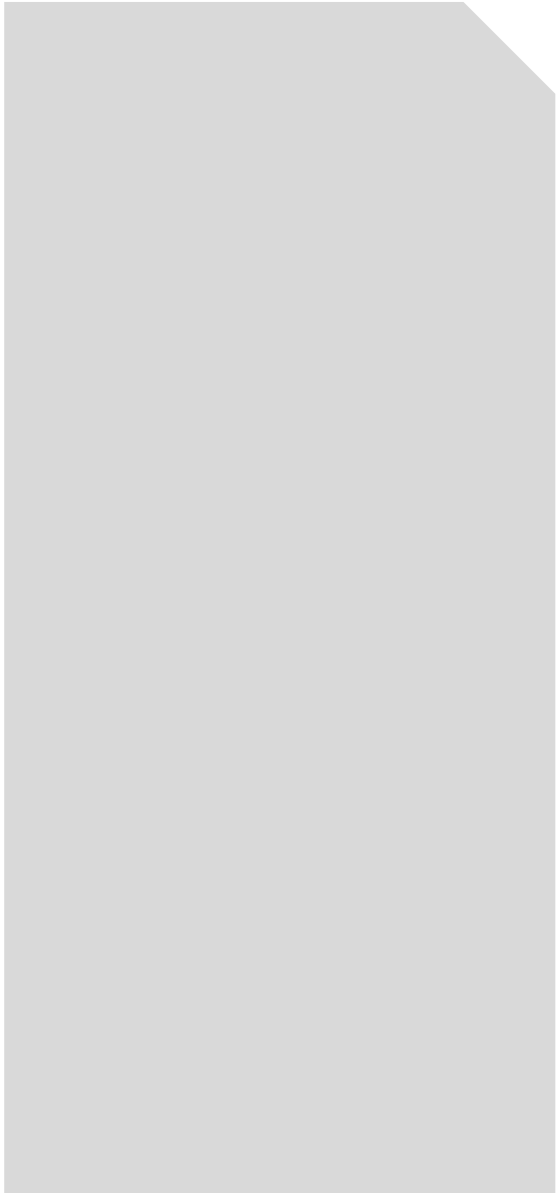
INNOVATION DURCH KOOPERATION

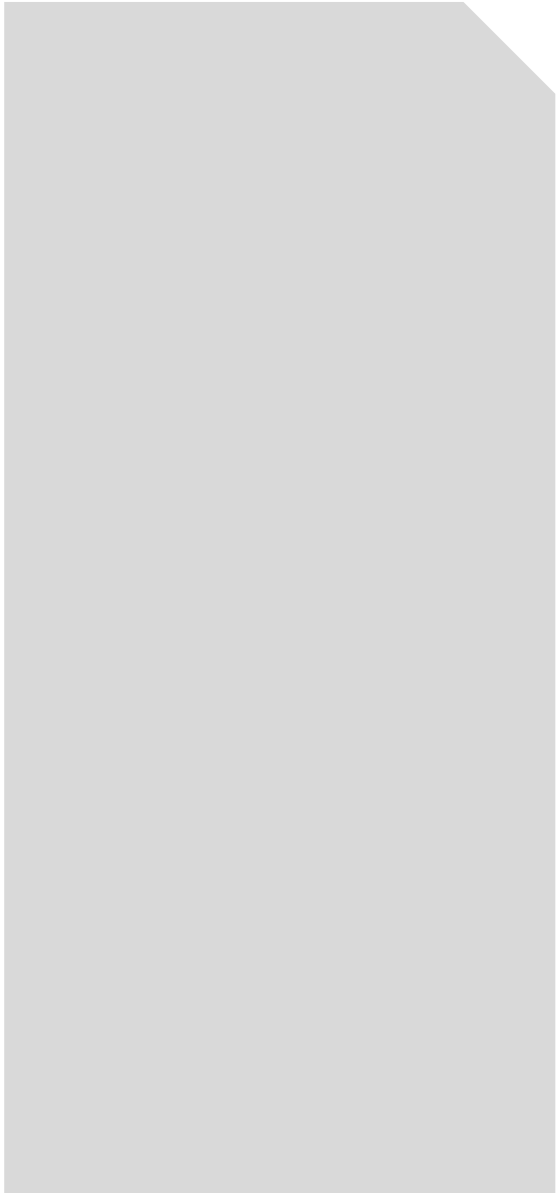
Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0





Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

**#8 Chemische Energiespeicher Teil c –
 Technologien**

**#8 Chemical Energy Storage part c –
 Technologies**

Vorlesung #8c

| Lecture #8c



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen




Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Chemical Energy Storage**Technologies****Content**  **Learning objectives**

- Basic possibilities of generating hydrogen, technologies, relevance and costs
⇒ Introduction to the topic of hydrogen as an energy carrier/storage
- Electrolysis Cells: Alkaline Electrolysis, Acid Electrolysis, High Temperature Electrolysis; Construction; Chemical reaction; components; Advantages and disadvantages,
⇒ Basic understanding of the various water electrolysis technologies, the difference in structure and the resulting technical and economic consequences
- Evaluation of the efficiency chain from power-to-hydrogen or power-to-methane
⇒ Basic understanding of embedding in the overall energy system

Chemische Energiespeicher - Technologien**Inhalt** ⇒ **Lernziele**

- Grundsätzliche Möglichkeiten der Erzeugung von Wasserstoff, Technologien, Relevanz und Kosten
⇒ **Heranführung an das Thema Wasserstoff als Energieträger/-speicher**
- Elektrolysezellen: Alkalische Elektrolyse, Saure Elektrolyse, Hochtemperatur Elektrolyse; Aufbau; Chemische Reaktion; Komponenten; Vor- und Nachteile,
⇒ **Grundverständnis für die verschiedenen Wasser-Elektrolyse-Technologien, die Verschiedenheit des Aufbaus und der daraus resultierenden technischen und ökonomischen Konsequenzen**
- Bewertung der Wirkungsgradkette von Power-to-Hydrogen oder Power-to-Methan
⇒ **Grundverständnis für die Einbettung in das Gesamtenergiesystem**

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.1 Basics hydrogen production - production today

- Fossil raw materials (natural gas, gasoline, heavy oil, coal) (70%) „Steam Reforming“
- Chemical processes (as a by-product) (25%): Ethylene production
- Chlor-alkali electrolysis (5%) Chlorine production
- Water electrolysis (<1%)
- Biomass gasification
- Thermal H₂O splitting (Protolysis: Research)

Hydrogen prices today: approx.
1-1.5 €/kg (fossil generation)

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.1 Grundlagen Wasserstoffherzeugung – Produktion heute

- | | |
|--|------------------|
| ➤ Fossile Rohstoffe (Erdgas, Benzin, Schweröl, Kohle)
„Steam Reforming“: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{CO}$ | (70%) |
| ➤ Chemische Prozesse (als Nebenprodukt)
Ethylen-Herstellung: $\text{C}_2\text{H}_6 \Rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$ | (25%) |
| ➤ Chlor-Alkali-Elektrolyse
Chlor-Herstellung: $2 \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{NaOH} + \text{Cl}_2 + \text{H}_2$ | (5%) |
| ➤ Wasser-Elektrolyse | (< 1%) |
| ➤ Biomassevergasung | |
| ➤ Thermische H₂O-Spaltung (Protolyse: Forschung) | |

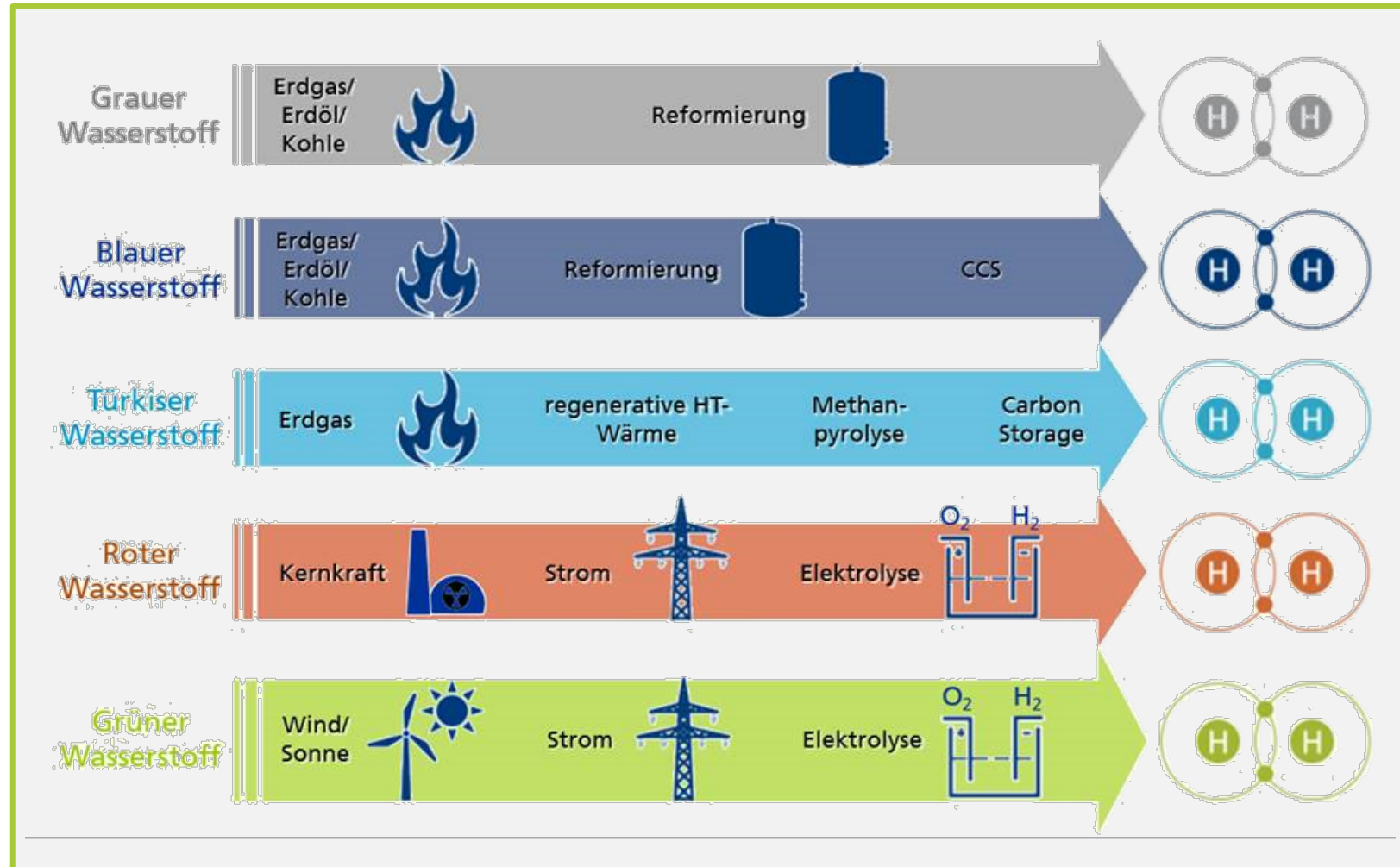
Wasserstoffpreise 2021: ca. 1-1,5 €/kg (fossile Erzeugung)

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.1 Basics hydrogen production - "color theory"

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.1 Grundlagen Wasserstofferzeugung – „Farbenlehre“



3. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

3.1 Basics Hydrogen production – Technical water electrolysis

Usual water electrolysis process

Today three methods for water electrolysis have been developed:

- Alkaline electrolysis - AEL
- Acid Electrolysis (Proton Exchange Membrane) - PEM-EL
- High temperature electrolysis - HTEL, or Solid Oxide Electrolysis – SOEL

Two variants each

- Atmospheric electrolysis
- Pressure electrolysis (up to 30 or 60 bar usual)

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.1 Grundlagen Wasserstofferzeugung – Technologien zur Wasser-Elektrolyse

Heute gibt es drei Haupttechnologien zur Wasserelektrolyse:

- **Alkalische Elektrolyse – AEL**
(Variante mit Membran: AEM)
- **Saure Elektrolyse (Proton Exchange Membrane) - PEM-EL**
- **Hochtemperatur Elektrolyse – HTEL, Solid Oxide Electrolysis – SOEL**

Jeweils 2 Varianten

- **Atmosphärische Elektrolyse**
- **Druckelektrolyse** (bis 30 oder 60 bar üblich)

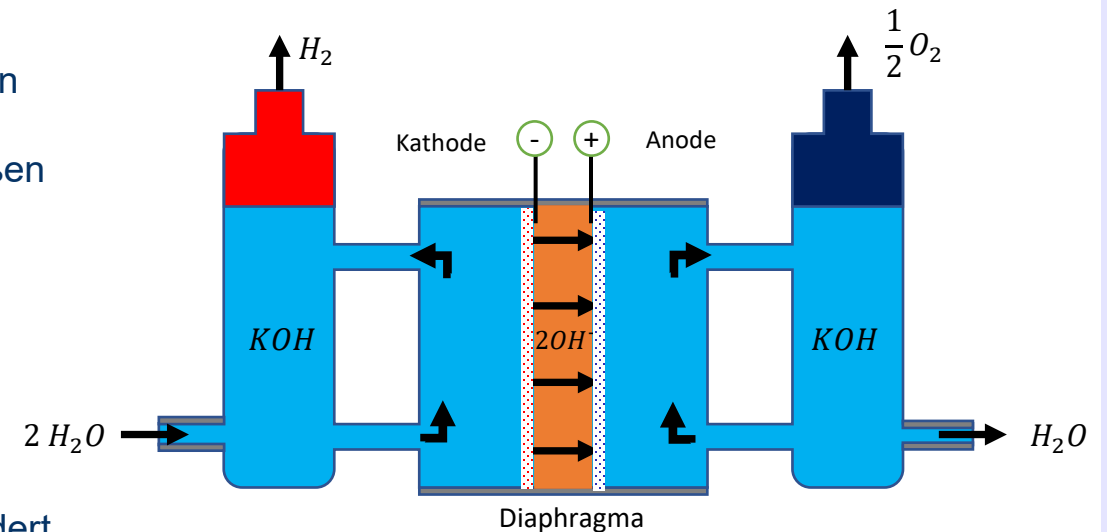
3. Chemical Energy Storage Technologies

3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - principle of operation

- **Structure:**
Water with 20-40 wt.% KOH (conductivity) circulates through two half cells separated by ion-conducting (OH-) but gas-tight diaphragm. Porous electrodes, e.g. made of titanium with catalyst (Ni/Co/Fe or ruthenium, iridium oxide) with large surfaces, lie close to the porous diaphragm
- **Operating parameters:**
70-90°C; 1 bar or 30-60 bar
Current density: 0.25-0.45 A/cm²
Efficiency 60-68%
- **Cell size up to 3 m²**, several hundred cells in series as stack
- Connected load per module between 5 kW and 3.4 MW
- State of the technology for decades

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) - Funktionsprinzip

- **Aufbau:**
Durch **zwei Halbzellen**, die durch ionenleitende (OH⁻), aber gasdichtes Diaphragma getrennt sind zirkuliert Wasser mit 20-40 Gew.% KOH (Leitfähigkeit).
Poröse **Elektroden** bspw. aus Titan mit **Katalysator** (Ni/Co/Fe oder Ruthenium-, Iridium-Oxid) mit großen Oberflächen liegen dicht an dem **porösen Diaphragma**
- **Betriebsparameter:**
70-90°C; 1 bar oder 30-60 bar
Stromdichte: 0,25-0,45 A/cm²
Wirkungsgrad 60-68%
- **Zellgröße bis 3 m²**, mehrere Hundert Zellen in Serie als Stack
- Anschlussleistung pro Modul zwischen 5 kW und 3,4 MW
- Seit Jahrzehnten Stand der Technik



Kathodenreaktion	Ladungs-träger	Anodenreaktion
$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$

3. Chemical Energy Storage Technologies

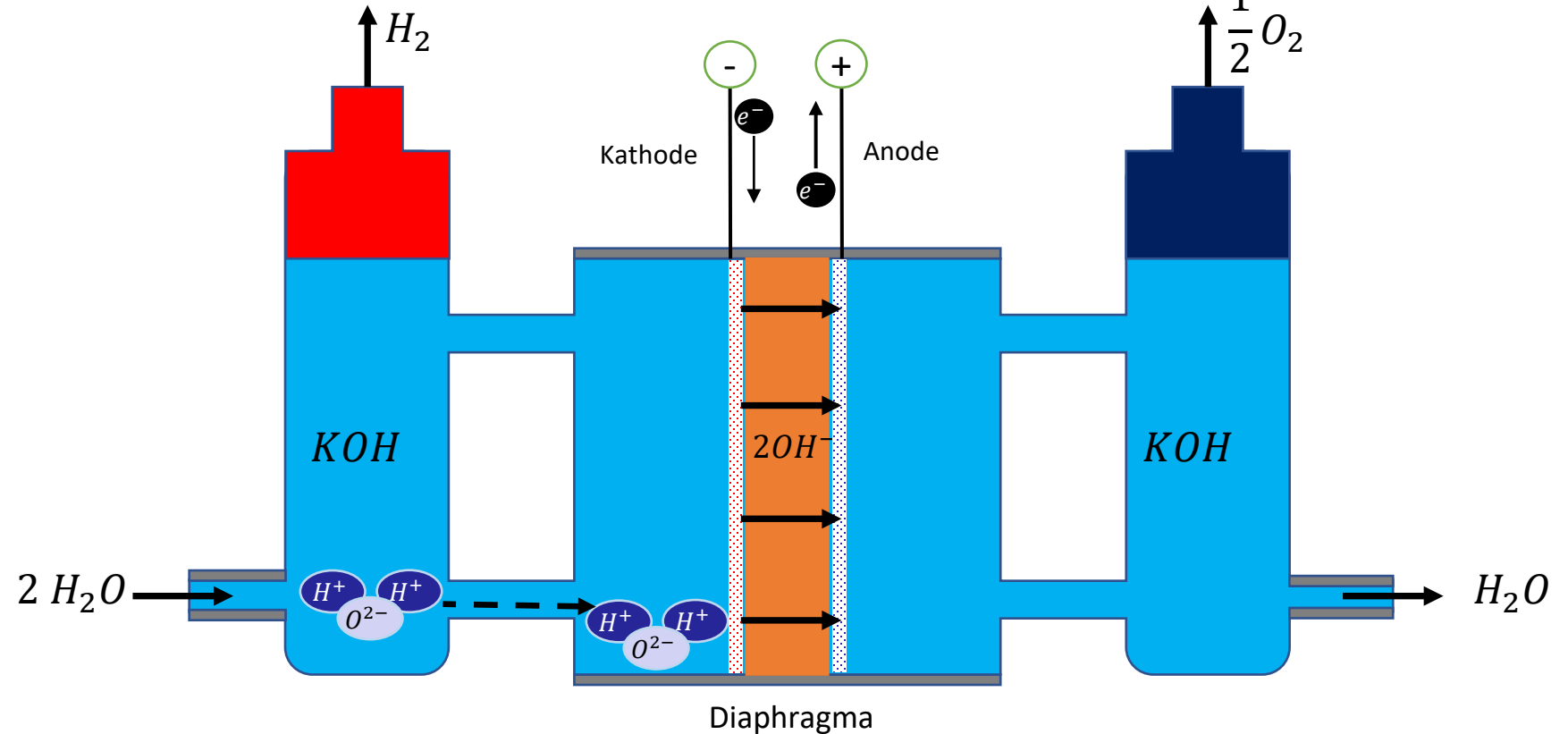
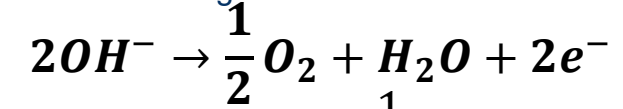
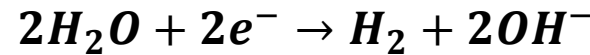
3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



3. Chemical Energy Storage Technologies

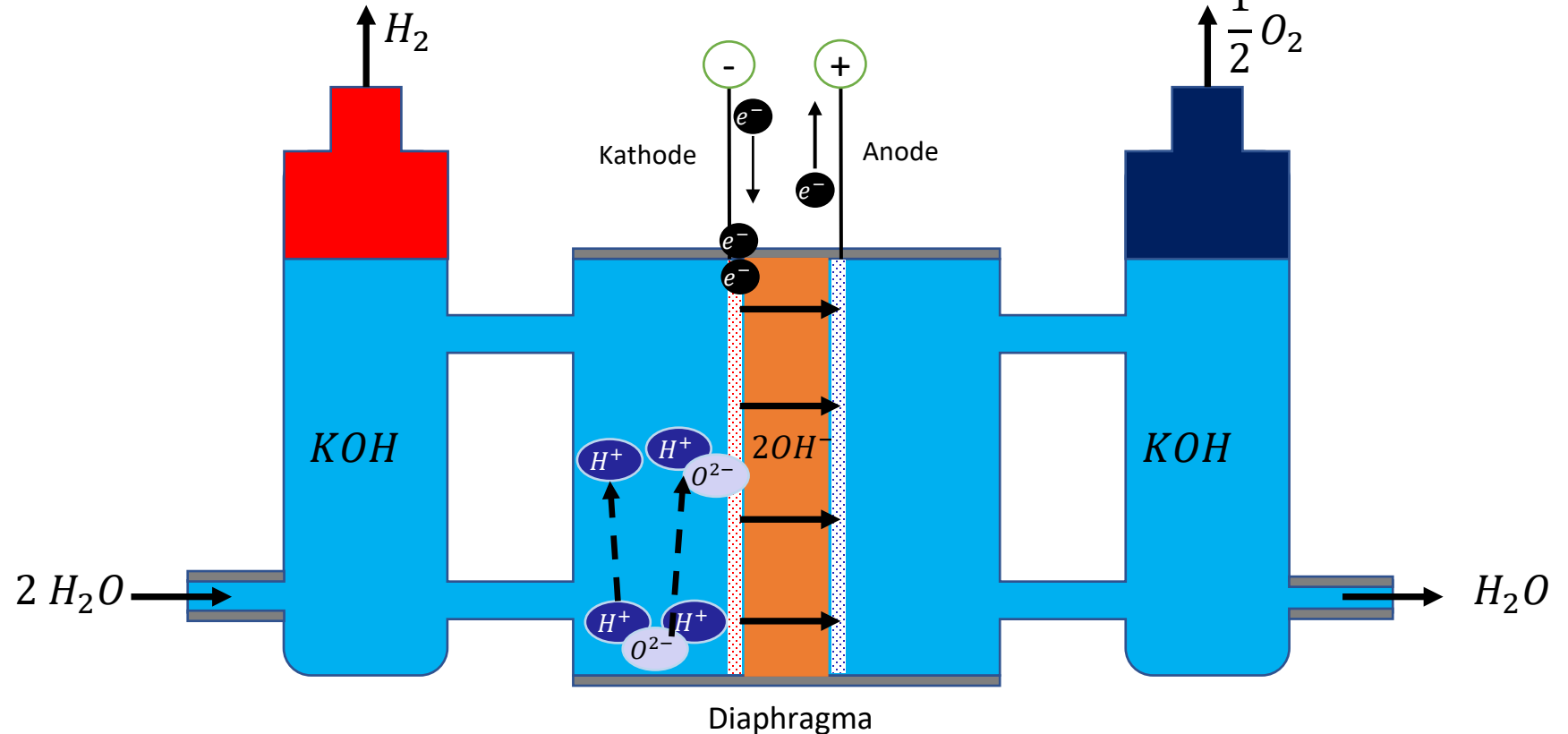
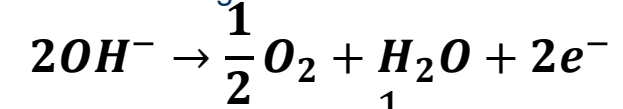
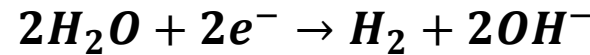
3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



3. Chemical Energy Storage Technologies

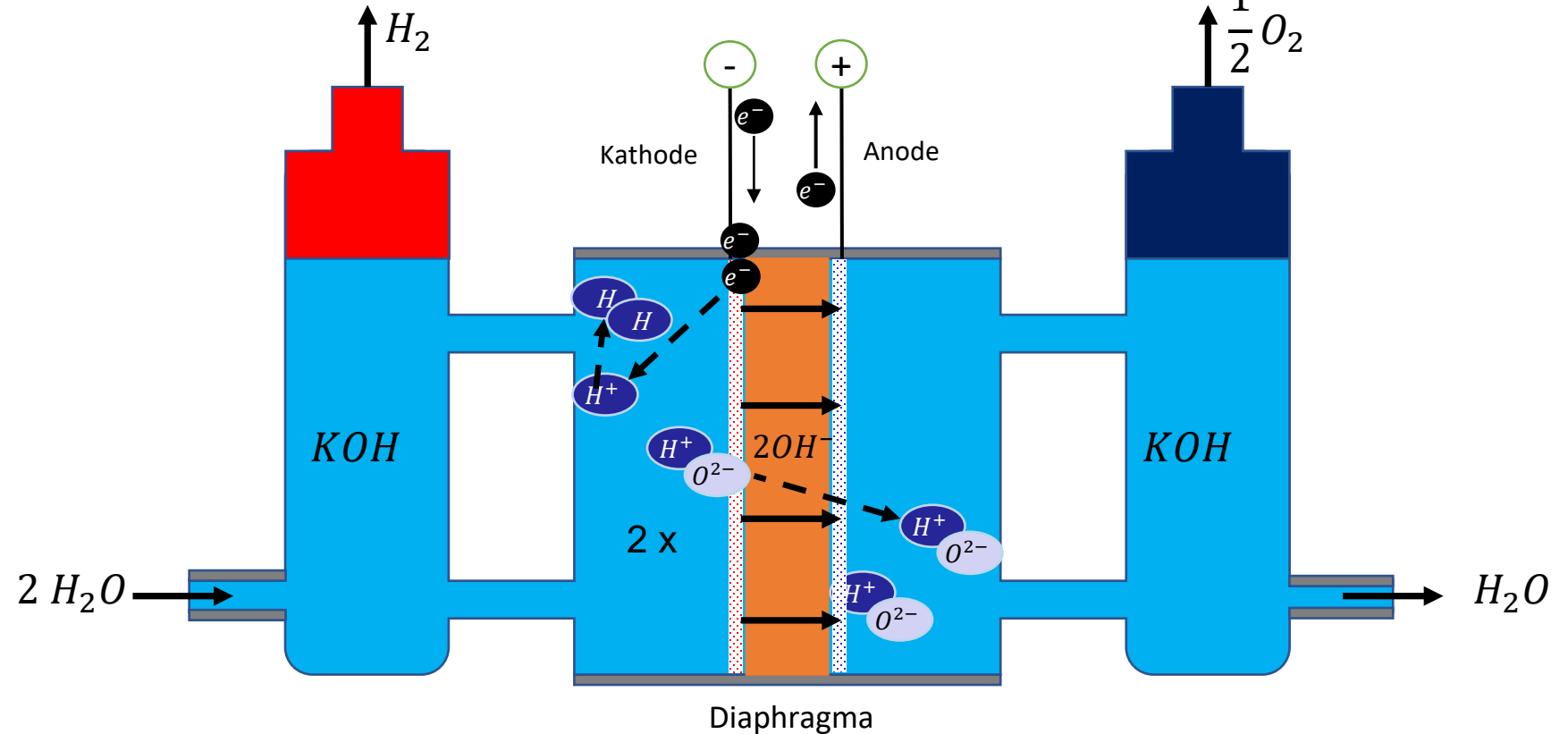
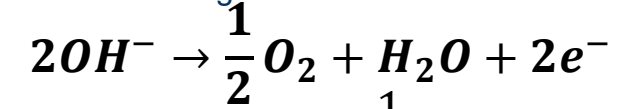
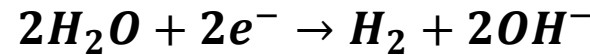
3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



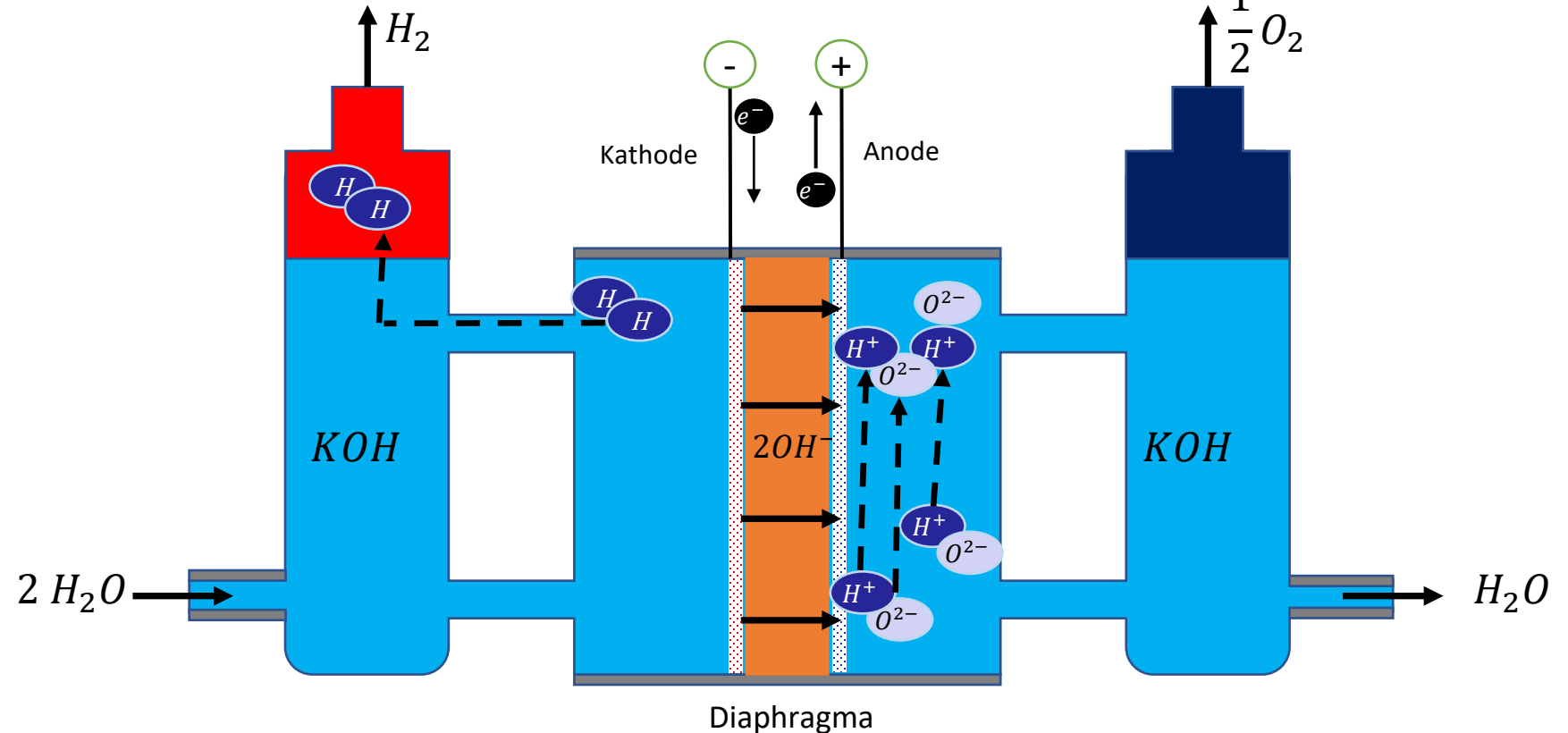
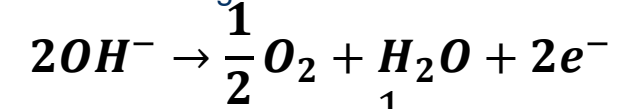
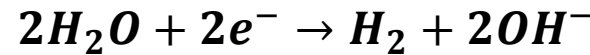
3. Chemical Energy Storage Technologies

3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



3. Chemical Energy Storage Technologies

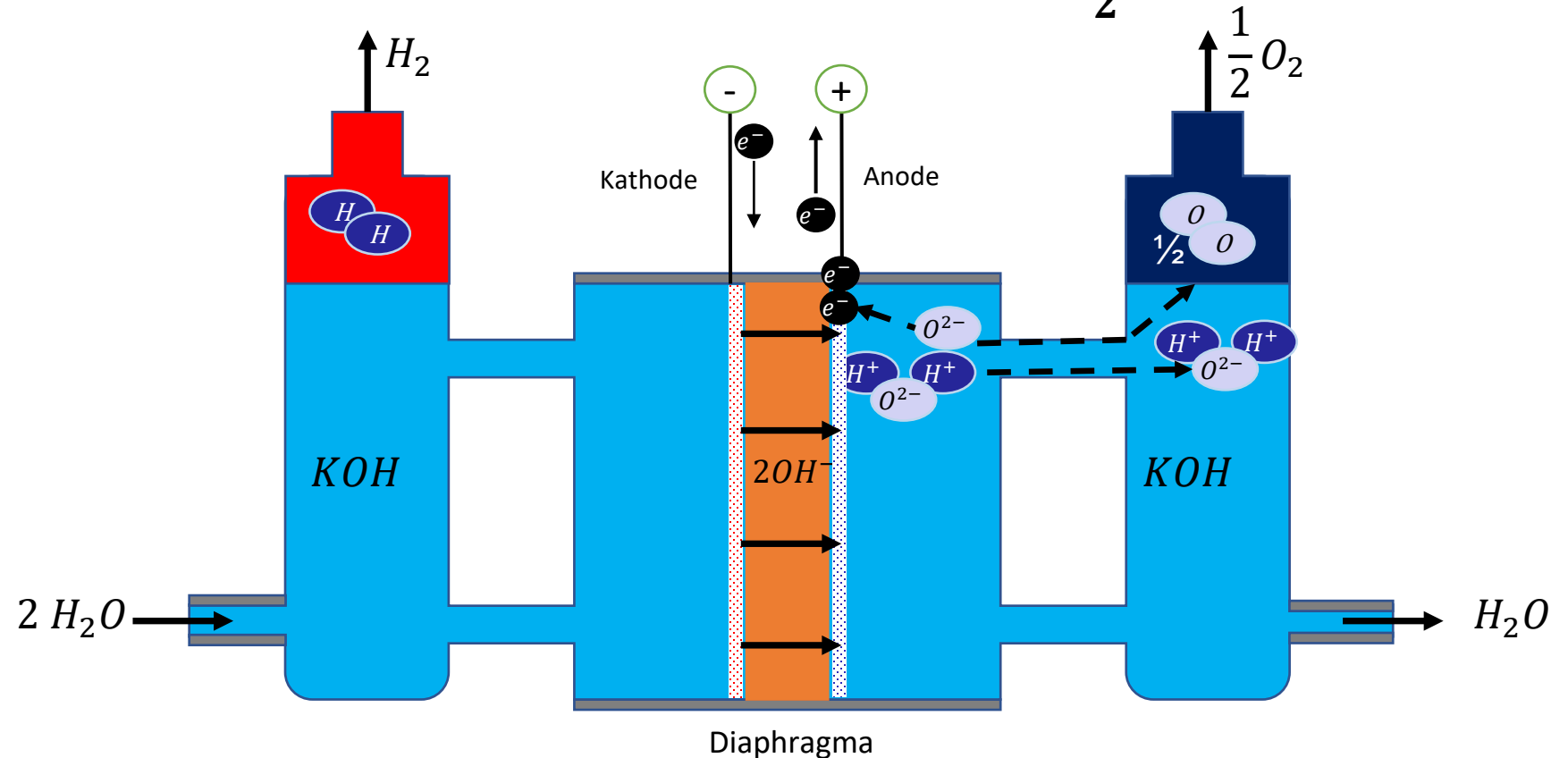
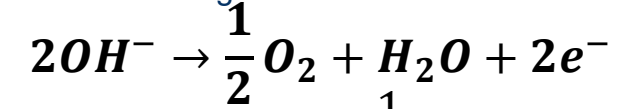
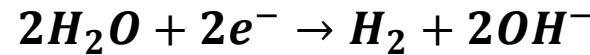
3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



3. Chemical Energy Storage Technologies

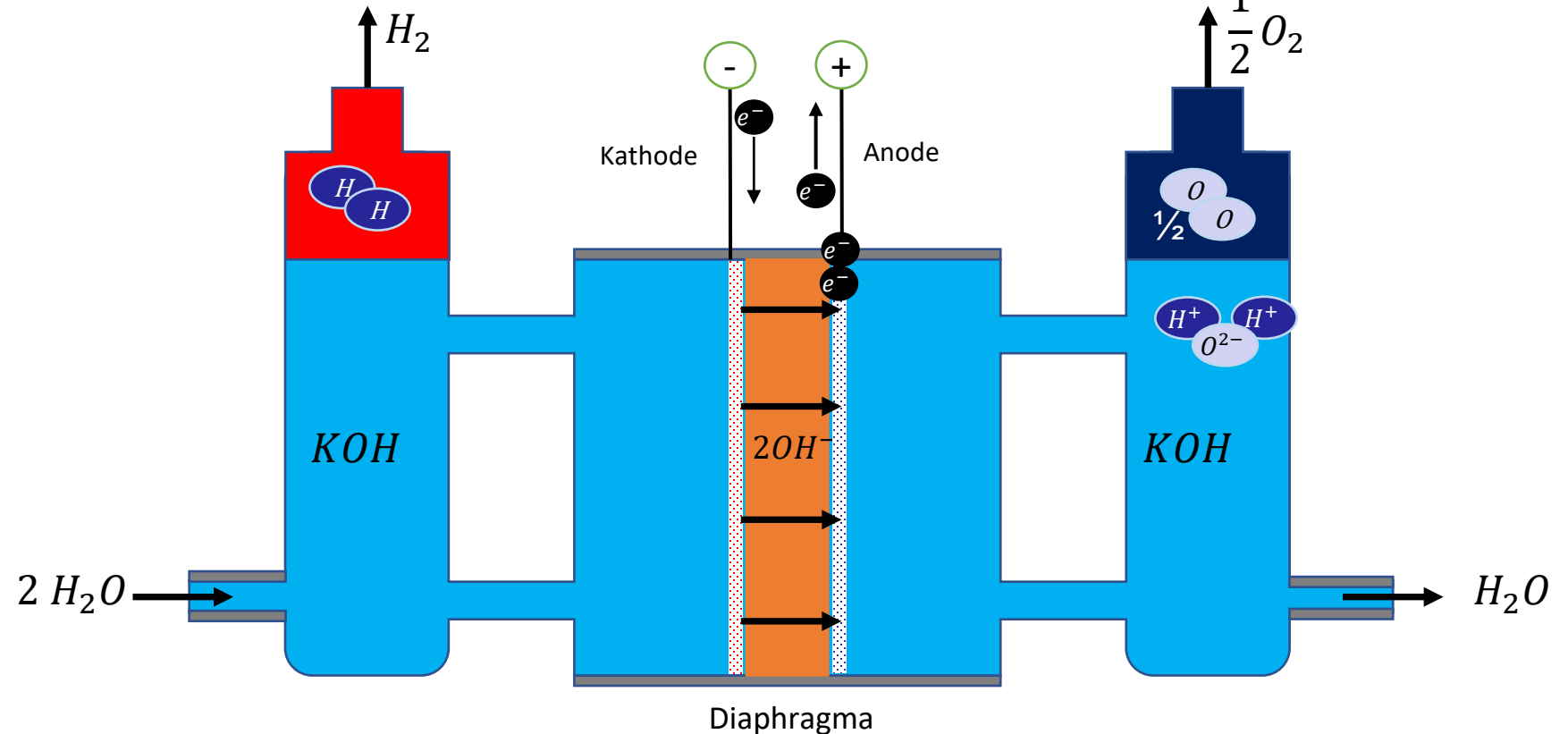
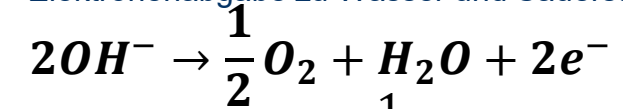
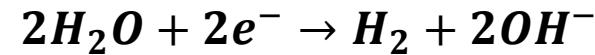
3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



3. Chemical Energy Storage Technologies

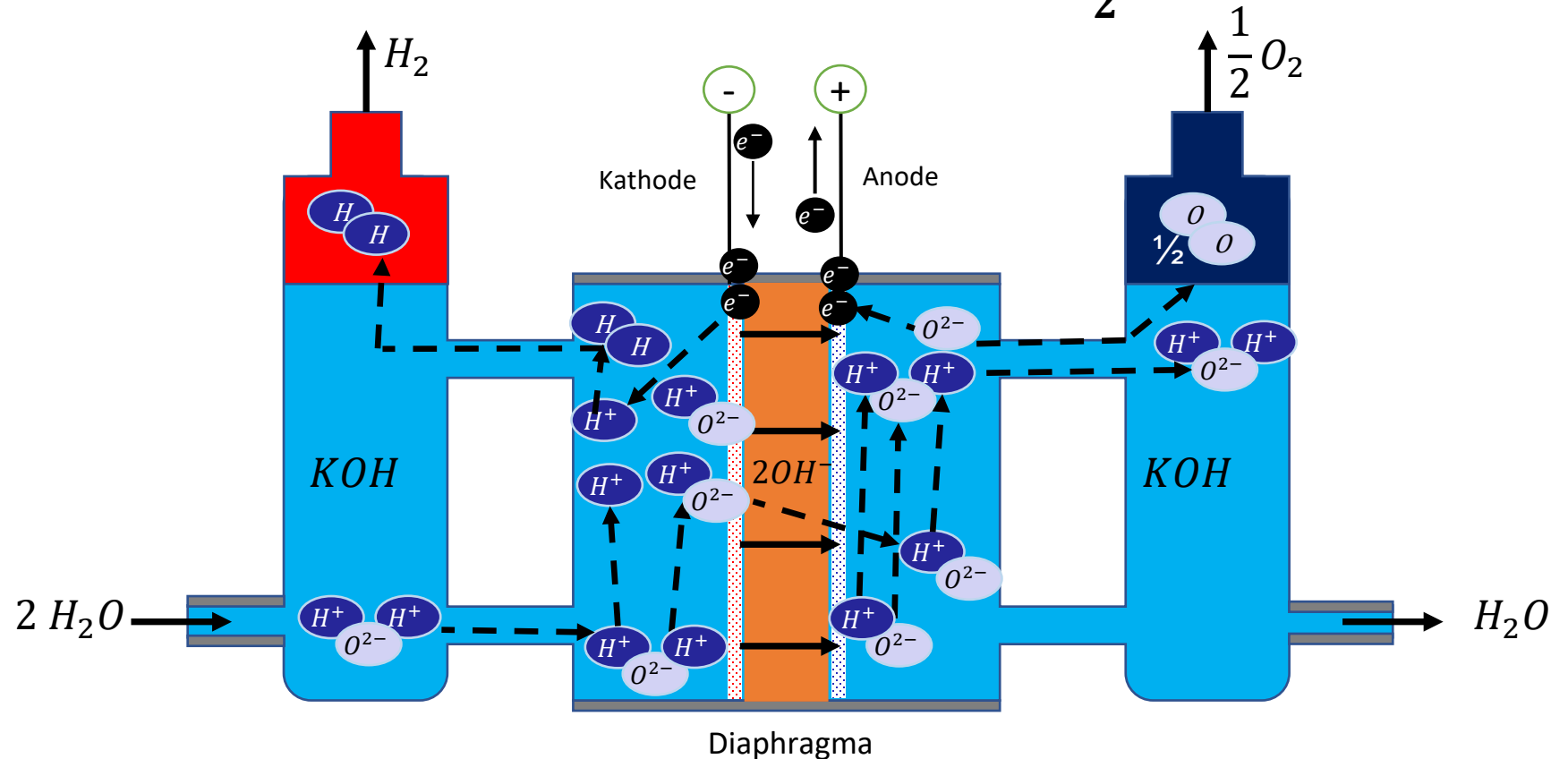
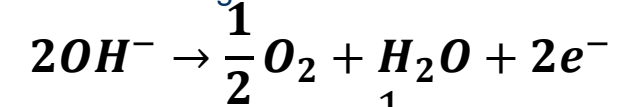
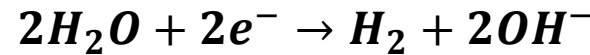
3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - Chemical reaction

- Cathode- and anode-side water supply (with KOH)
- Cathode: water is split into atomic hydrogen, which then reacts with 2 electrons to form H₂, and hydroxide ion
- Hydroxide ion moves through the diaphragm
- Anode: Two hydroxide ions react to give off electrons to form water and oxygen

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Chemische Reaktion

- Kathoden- und Anodenseitige Wasserzufuhr (mit KOH)
- **Kathode:** Wasser wird in atomaren Wasserstoff, der mit 2 Elektronen dann zu H₂ reagiert, und Hydroxid-Ion aufgespalten
- Hydroxid-Ion wandern durch das Diaphragma
- **Anode:** Zwei Hydroxid-Ionen reagieren unter Elektronenabgabe zu Wasser und Sauerstoff



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.2 Alkaline electrolysis (AEL) - realized plants

ELB Electrolysis technology

28 electrolyzers a 76a m_N³/h H₂ for fertilizer production (Zimbabwe)

Total capacity of 21,000m_N³/h H₂, installed in 1972 - 1974

Audi / EWE e-gas plant Werlte (2011)

3 stacks à 2 MW

Current density: 0.3 A/cm²

Cell area: 3 m²

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
3.2 Alkalische Elektrolyse (AEL) – Realisierte Anlagen



28 Elektrolyseure a 760 m_N³/h H₂ für die Düngemittelherstellung (Zimbabwe)
Gesamtkapazität von 21.000 m_N³/h H₂, installiert in den Jahren 1972 – 1974



Audi / EWE e-gas Anlage Werlte (2011)
3 Stacks à 2 MW
Stromdichte: 0,3 A/cm²
Zellfläche: 3 m²

Wasserelektrolyse und Synthesegasprozesse, TU Clausthal Andreas Lindermeir,

https://www.efzn.de/fileadmin/documents/Niedersaechsische_Energetage/Vortr%C3%A4ge/2017/Lindermeir_Turek.pdf

Abbildung/Foto von CC BY-SA ausgenommen. Alle Rechte bei den jeweiligen Inhaber:innen.
Sketch/picture excluded from CC BY-SA. All rights with the respective owner.

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.3 Alkaline membrane electrolysis (AEMEL) - operating principle

Structure:

- Water circulates through two half-cells separated by ion-conducting (OH⁻), membrane, similar to PEM electrolysis
- Bipolar plates with channels supply water (anode) and remove product gases
- In contrast to the AEL, very flat structure, i.e. anode and cathode close together.
- Water (de-ionized) is available both with KOH and without (poorer conductivity) as input material
- The catalysts are both Ni/Mo and Ni/Co/Fe as a cheaper solution possible

Operating parameters:

- 50-70°C; 35 bar; efficiency approx. 60%
- Current density: 0.5-1 A/cm² (higher due to tighter construction)
Cell size approx. DIN A4, <100 cells in series as stack
- Connected load per module 2.4 kW
In development

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.3 Alkalische Membran-Elektrolyse (AEMEL) - Funktionsprinzip

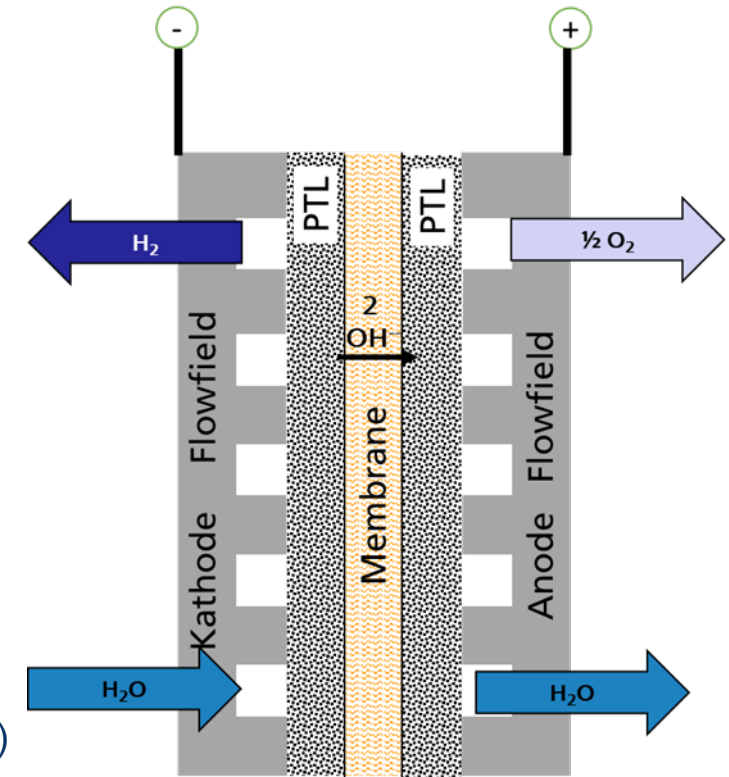
Aufbau:

- Durch ähnlich der PEM-Elektrolyse durch **zwei Halbzellen**, die durch ionenleitende (OH⁻), Membran getrennt sind zirkuliert Wasser
- **Bipolare Platten** mit Kanälen führen Wasser (Anode) zu bzw. Produktgase ab
- Im Gegensatz zur AEL sehr flacher Aufbau, d.h. Anode und Kathode dicht beieinander.
- Wasser (de-ionisiert) ist sowohl mit KOH als auch ohne (schlechtere Leitfähigkeit) als Einsatzstoff
- Die Katalysatoren sind sowohl Ni/Mo und Ni/Co/Fe als kostengünstigere Lösung möglich

Betriebsparameter:

- 50-70°C; 35 bar; Wirkungsgrad ca. 60%
- **Stromdichte: 0,5-1 A/cm²** (höher wg. engerem Aufbau)
Zellgröße ca. DIN A4, <100 Zellen in Serie als Stack
- Anschlussleistung pro Modul 2,4 kW

In der Entwicklung



Kathodenreaktion	Ladungs-träger	Anodenreaktion
$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.3 Alkaline membrane electrolysis (AEMEL) - Realized Plants

- Hydrogen production rate
- Outlet pressure
- Hydrogen purity (direct) – (impurity)
- Average dew point and impurities with dryer - material volume share
- Operational power consumption (at standard conditions)
- Electricity consumption in standby
- Standard power connection
- Water consumption
- Water purity requirement
- Water inlet pressure
- Ambient temperature
- ambient humidity - non condensing
- Measurement
- Module weight (without water)
- Control and monitoring - fully automatic with Enapter EMS, Modbus

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.3 Alkalische Membran-Elektrolyse (AEMEL) - Realisierte Anlagen

Wasserstoff Produktionsrate	500 NL/hr 1,0785 kg/24 hr
Ausgangsdruck	Bis zu 35 bar
Wasserstoffreinheit (direkt)	~ 99,9% (Unreinheiten: ~ 1.000 ppm H ₂ O)
Wasserstoffreinheit (mit Trockner)	> 99,999% Stoffmengenanteil
Durchschnittl. Taupunkt und Unreinheiten mit Trockner	< -70°C, konform mit ISO14687 (H ₂ O < 5 ppm, O ₂ < 5 ppm)
Operativer Stromverbrauch (bei Standardkonditionen)	2,4 kW
Stromverbrauch in Standby	15 W
Standard Stromanschluss	AC 200-240 V, 50/60 Hz
Wasserverbrauch	0,4 L/hr
Anforderung an Wasserreinheit	< 20 µS/cm (bei 25°C)
Wasser Eingangsdruck	1 - 4 bar
Umgebungstemperatur	5 - 45°C
Umgebungsfeuchtigkeit	20 - 95%, nicht kondensierend
Abmessung (B x T x H)	W x D x H in mm = 482 x 594 x 310 (7U)
Modulgewicht (ohne Wasser)	55 kg
Steuerung und Monitoring	Voll automatisch mit Enapter EMS, Modbus



Elektrolyseur, Enapter https://handbook.enapter.com/electrolyser/el21/downloads/Enapter_Datasheet_EL21_DE.pdf

3. Chemical Energy Storage

Technologies

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEMEL)

Structure

- Electrodes (catalysts: platinum, iridium, ruthenium) are firmly connected on both sides of a proton-conducting membrane (PEM) to form a unit: MEA (Membrane Electrode Assembly) or CCM (Catalyst Coated Membrane).
- A GDL (Gas Diffusion Layer) or PTL (Porous Transport Layer) is applied to electrodes, which conducts electricity and allows water or gas to diffuse.
- Bipolar plates with channels supply water (anode) and remove product gases.

Operating parameters:

- 50-80°C; 20-50 bar Current density: 1-2 A/cm² Efficiency >64-68%.
- Cell size < 1 m², many cells in series as stack

Modules with some MW power commercially available

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEMEL)

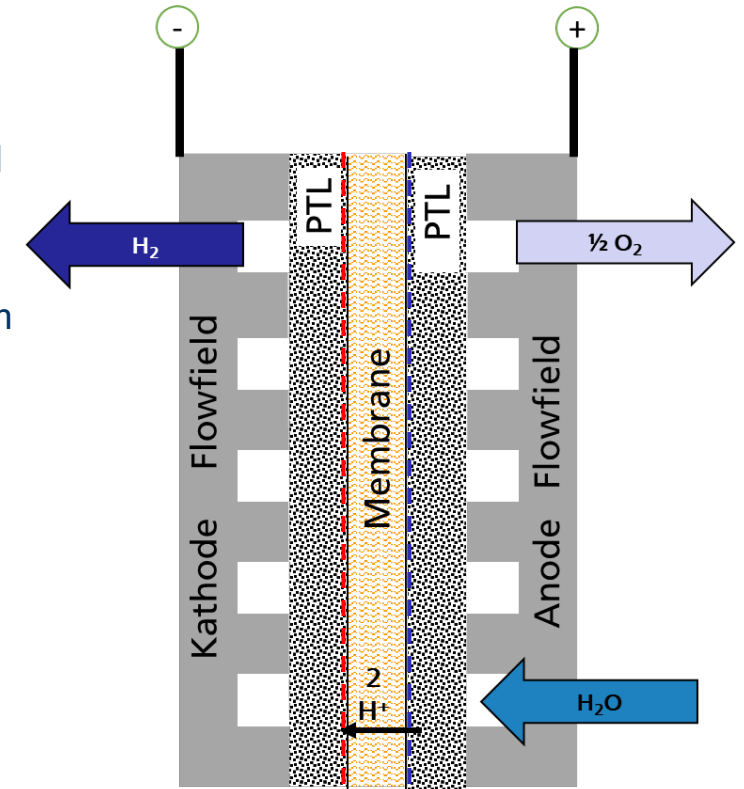
Aufbau

- Auf einer **protonenleitenden Membran** (PEM) sind beidseitig Elektroden (Kat: Platin, Iridium, Ruthenium) fest verbunden zu einer Einheit: MEA (Membrane Electrode Assembly) oder auch CCM (Catalyst Coated Membrane)
- Auf **Elektroden** liegt eine GDL (Gas-Diffusion-Layer) oder auch PTL (Porous Transport Layer) auf, die Strom leitet und Wasser bzw. Gas diffundieren lässt.
- **Bipolare Platten** mit Kanälen führen Wasser (Anode) zu bzw. Produktgase ab

Betriebsparameter:

- 50-80°C; 20-50 bar Stromdichte: 1-2 A/cm² Wirkungsgrad >64-68%
- **Zellgröße < 1 m²**, viele Zellen in Serie als Stack

Module mit einigem MW Leistung kommerziell verfügbar



Kathodenreaktion	Ladungs-träger	Anodenreaktion
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	H^+	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$

3. Chemical Energy Storage Technologies

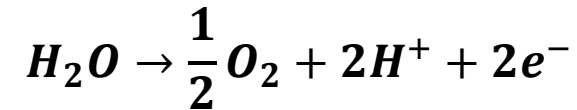
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – chemical reaction

- Water supply only on the anode side
- **Anode:** Water is split into oxygen, two protons and two electrons
- The two protons move from the anode through the membrane to the cathode
- **Cathode:** The two protons move from the anode through the membrane to the cathode and react with two electrons to form H₂

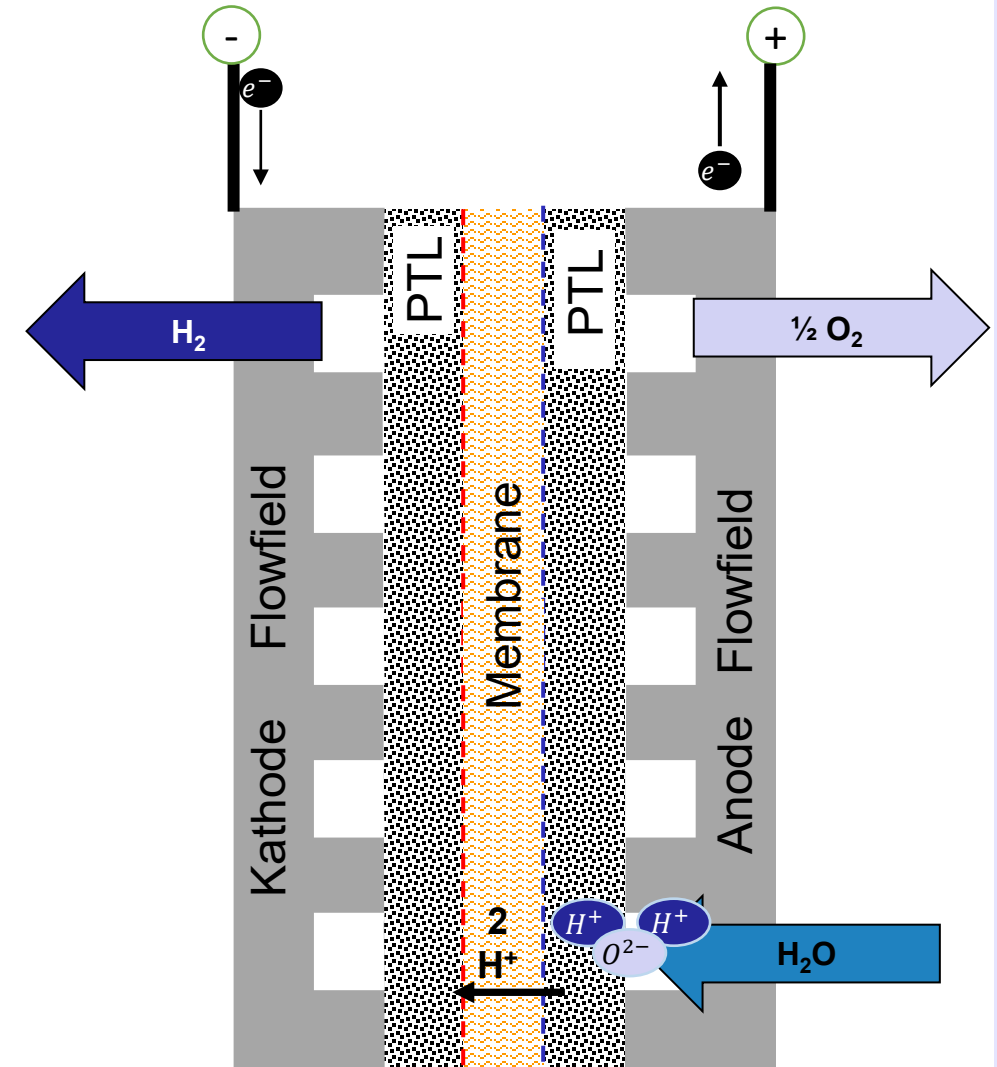
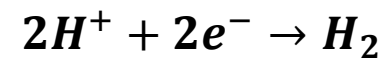
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Chemische Reaktion

- Wasserzufuhr nur Anodenseitig
- **Anode:** Wasser wird in Sauerstoff und zwei Protonen sowie zwei Elektronen aufgespalten



- Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode**
- **Kathode:** Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode** und reagieren mit zwei Elektronen zu H₂



3. Chemical Energy Storage Technologies

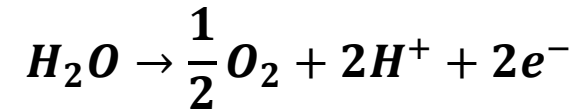
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – chemical reaction

- Water supply only on the anode side
- **Anode:** Water is split into oxygen, two protons and two electrons
- The two protons move from the anode through the membrane to the cathode
- **Cathode:** The two protons move from the anode through the membrane to the cathode and react with two electrons to form H₂

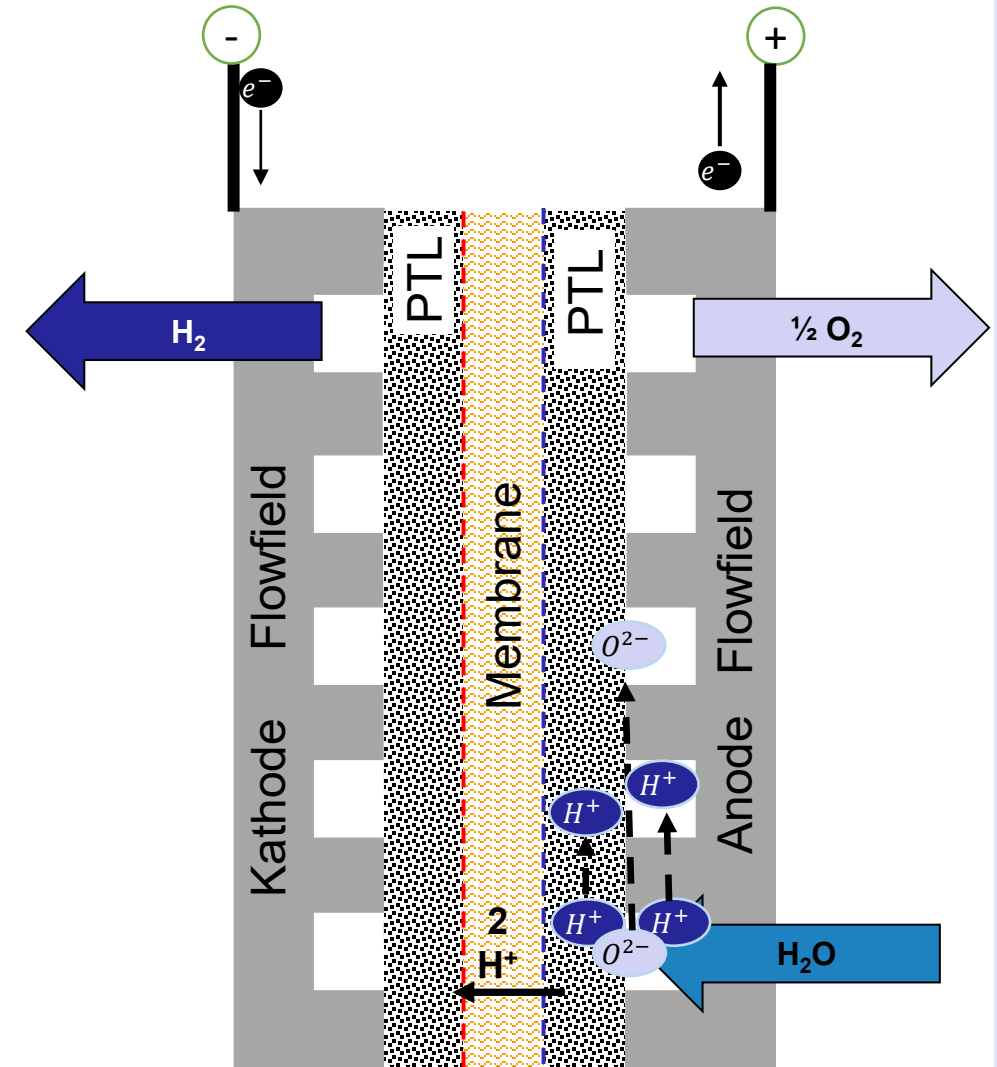
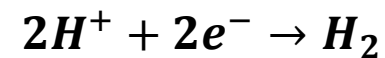
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Chemische Reaktion

- Wasserzufuhr nur Anodenseitig
- **Anode:** Wasser wird in Sauerstoff und zwei Protonen sowie zwei Elektronen aufgespalten



- Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode**
- **Kathode:** Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode** und reagieren mit zwei Elektronen zu H₂



3. Chemical Energy Storage Technologies

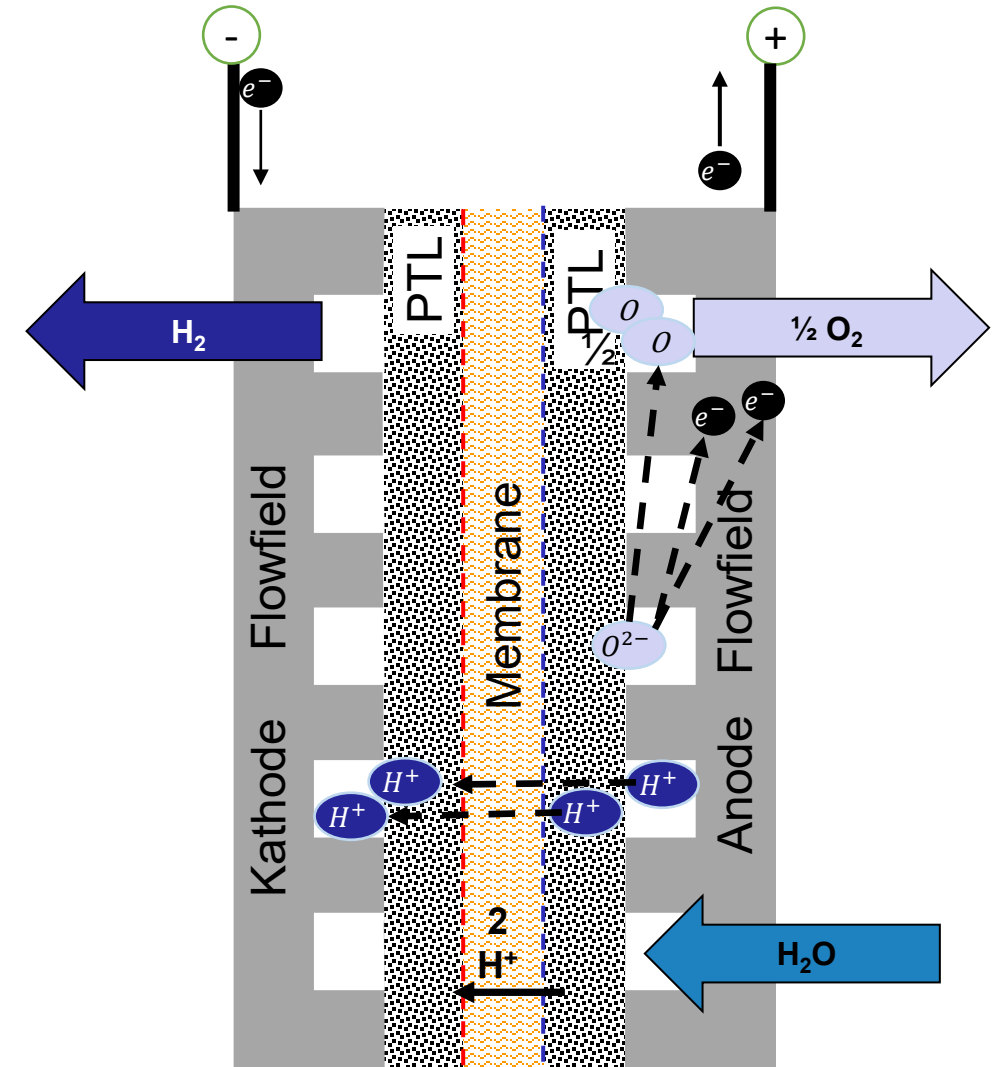
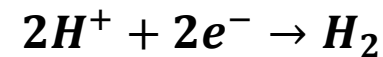
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – chemical reaction

- Water supply only on the anode side
- **Anode:** Water is split into oxygen, two protons and two electrons
- The two protons move from the anode through the membrane to the cathode
- **Cathode:** The two protons move from the anode through the membrane to the cathode and react with two electrons to form H₂

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Chemische Reaktion

- Wasserzufuhr nur Anodenseitig
 - **Anode:** Wasser wird in Sauerstoff und zwei Protonen sowie zwei Elektronen aufgespalten
- $$H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^-$$
- Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode**
 - **Kathode:** Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode** und reagieren mit zwei Elektronen zu H₂



3. Chemical Energy Storage Technologies

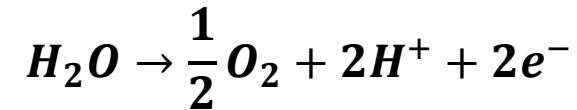
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – chemical reaction

- Water supply only on the anode side
- **Anode:** Water is split into oxygen, two protons and two electrons
- The two protons move from the anode through the membrane to the cathode
- **Cathode:** The two protons move from the anode through the membrane to the cathode and react with two electrons to form H₂

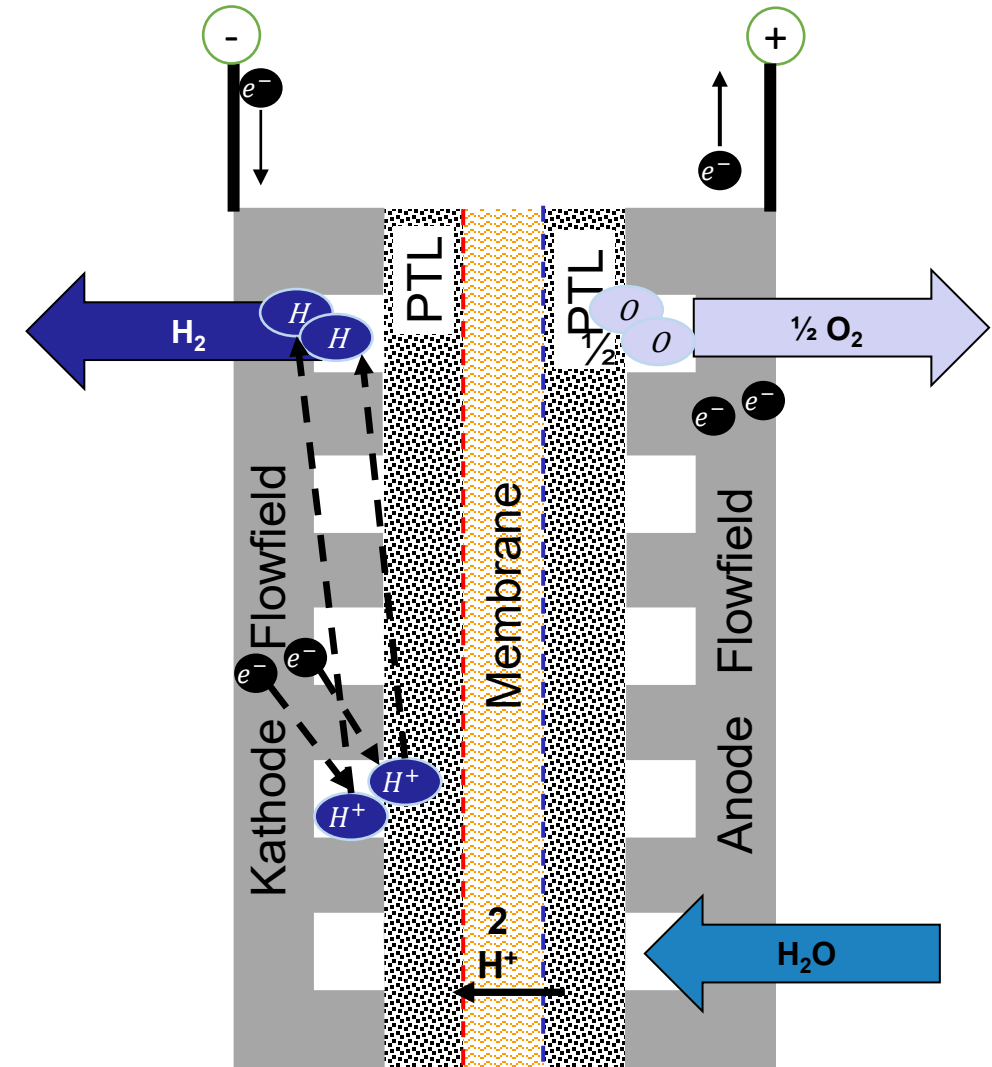
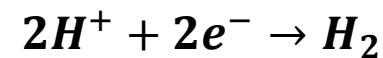
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Chemische Reaktion

- Wasserzufuhr nur Anodenseitig
- **Anode:** Wasser wird in Sauerstoff und zwei Protonen sowie zwei Elektronen aufgespalten



- Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode**
- **Kathode:** Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode** und reagieren mit zwei Elektronen zu H₂



3. Chemical Energy Storage Technologies

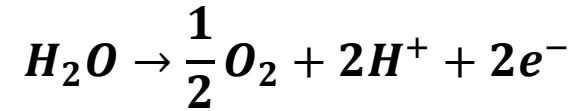
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – chemical reaction

- Water supply only on the anode side
- **Anode:** Water is split into oxygen, two protons and two electrons
- The two protons move from the anode through the membrane to the cathode
- **Cathode:** The two protons move from the anode through the membrane to the cathode and react with two electrons to form H₂

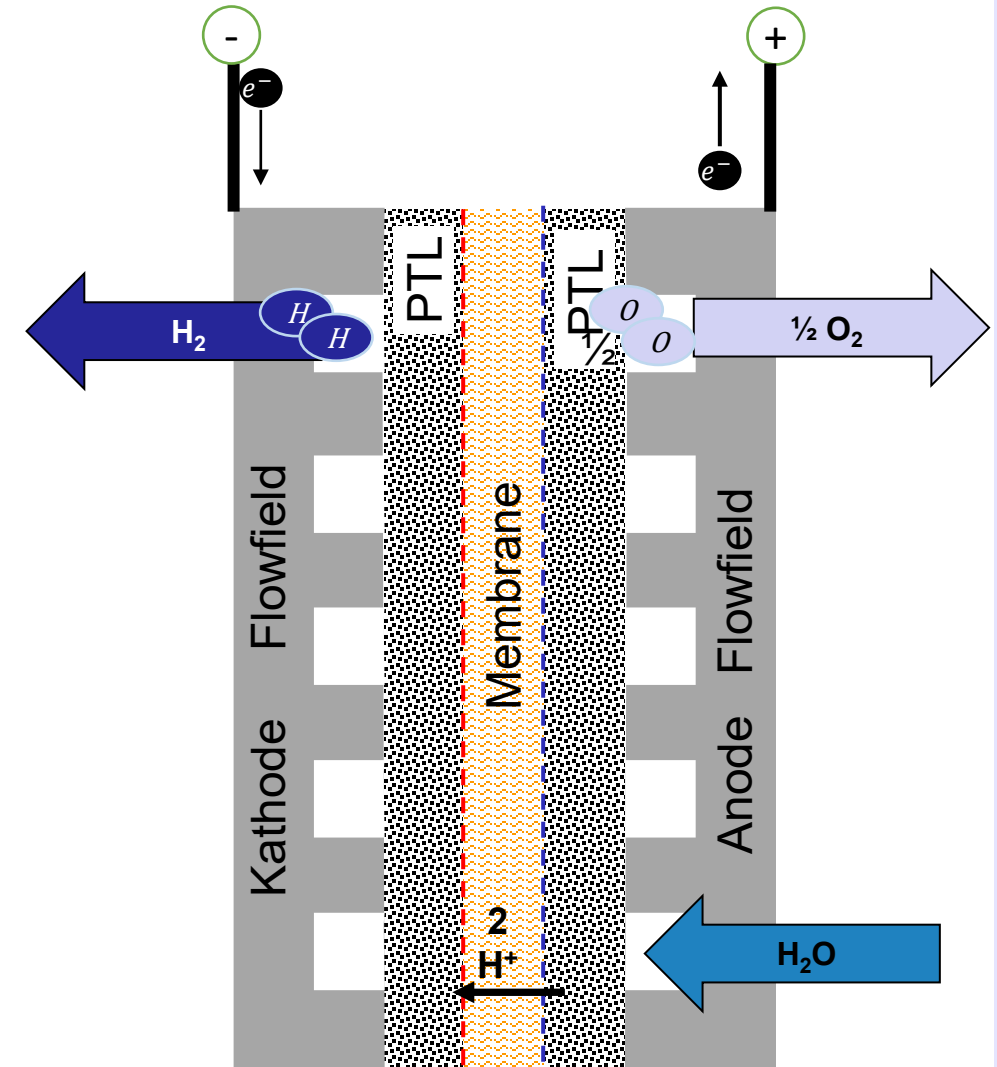
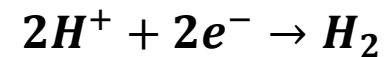
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Chemische Reaktion

- Wasserzufuhr nur Anodenseitig
- **Anode:** Wasser wird in Sauerstoff und zwei Protonen sowie zwei Elektronen aufgespalten



- Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode**
- **Kathode:** Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode** und reagieren mit zwei Elektronen zu H₂



3. Chemical Energy Storage Technologies

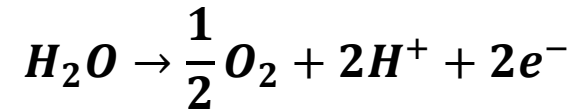
3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – chemical reaction

- Water supply only on the anode side
- **Anode:** Water is split into oxygen, two protons and two electrons
- The two protons move from the anode through the membrane to the cathode
- **Cathode:** The two protons move from the anode through the membrane to the cathode and react with two electrons to form H₂

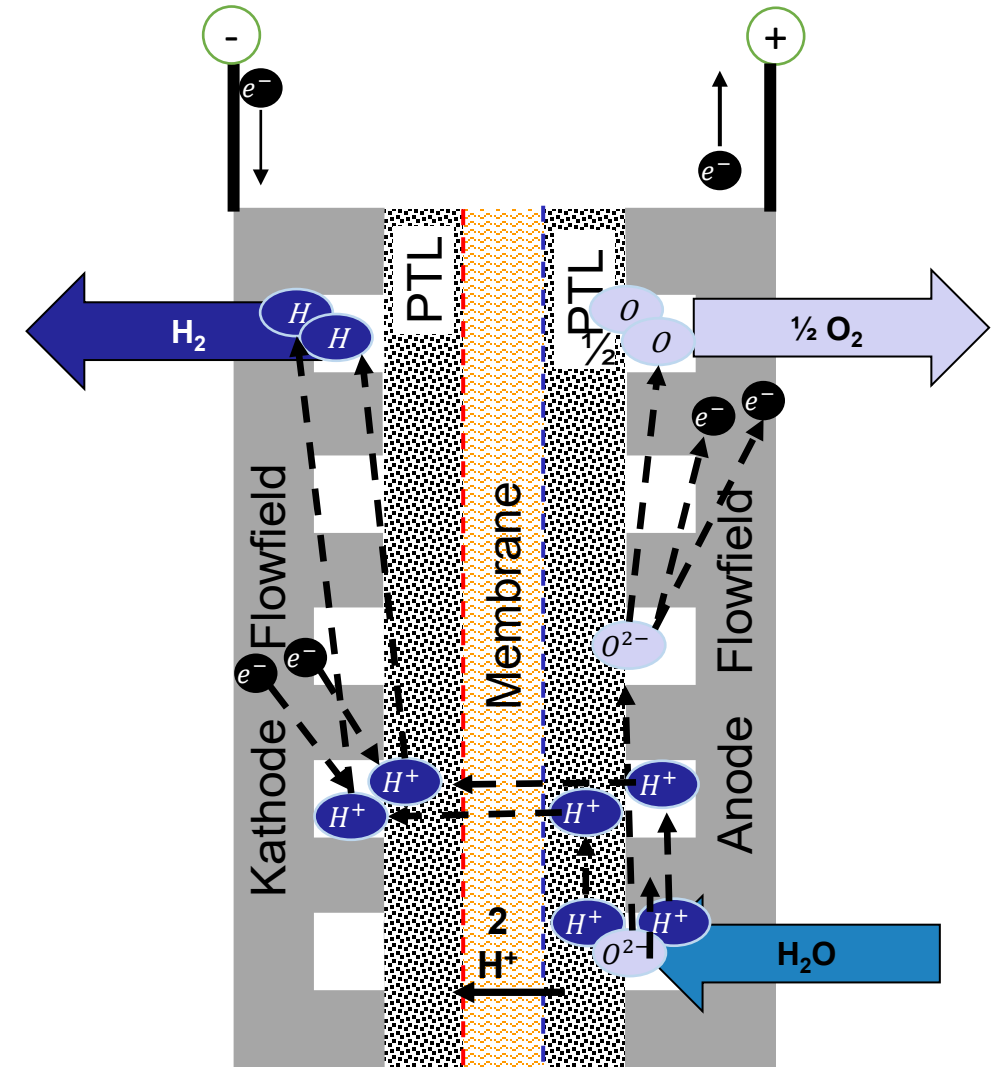
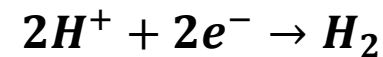
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Chemische Reaktion

- Wasserzufuhr nur Anodenseitig
- **Anode:** Wasser wird in Sauerstoff und zwei Protonen sowie zwei Elektronen aufgespalten



- Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode**
- **Kathode:** Die beiden Protonen wandern von der Anode durch die Membrane zur **Kathode** und reagieren mit zwei Elektronen zu H₂



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Structure in detail

Layer structure of the PEM electrolyzer

Layers and their electrical, fluidic, reactive, and ionic conductivity properties.

[Green: property present; red: property blocked]

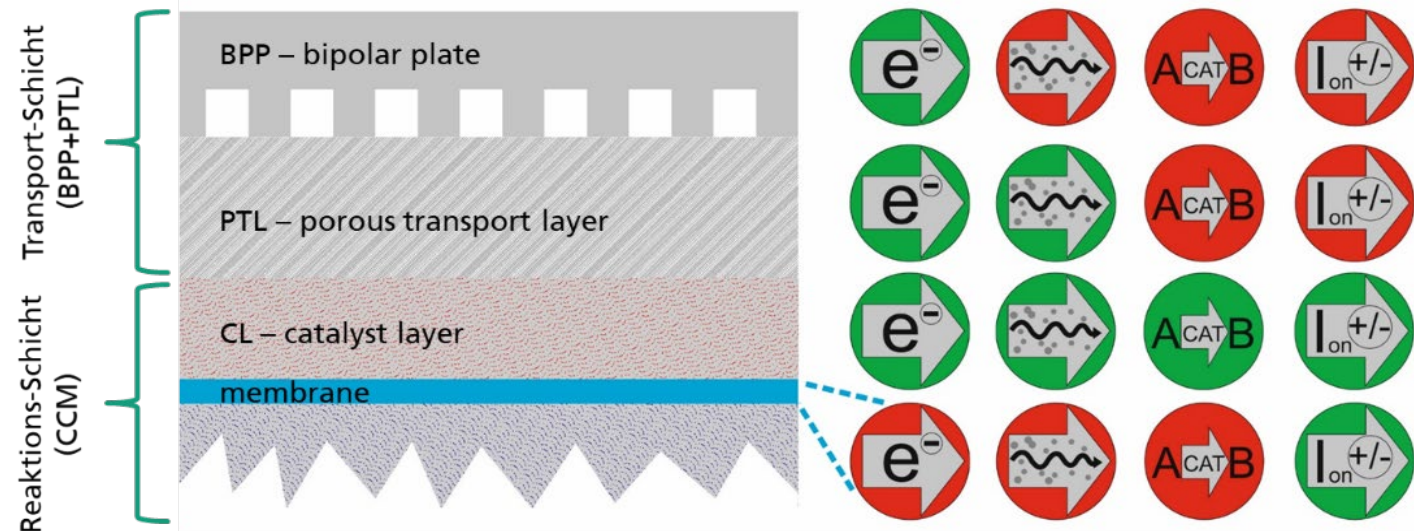
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Aufbau im Detail

Schichtenaufbau des PEM-Elektrolyseurs

Schichten und ihre elektrischen, fluidtechnischen, reaktiven und ionenleitfähigen Eigenschaften.

[grün: Eigenschaft vorhanden; rot: Eigenschaft geblockt.]



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Realized plants

Siemens Silyzer 200

- Stack performance 1.25 MW
- Pressure up to 35 bar
- H₂- Production 22g Nm³h⁻¹
- Purity > 99,5 %
- Overall dimensions 6.3 x 3.1 x 3.0 m
- System efficiency 65 – 70 %

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.4 Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) – Realisierte Anlagen



www.industry.siemens.com

Siemens Silyzer 200

- Stackleistung 1,25 MW
- Druck bis 35 bar
- H₂-Produktion 225 Nm³ h⁻¹
- Reinheit > 99,5%
- Gesamtabmessungen 6,3 x 3,1 x 3,0 m
- Systemwirkungsgrad 65 – 70%

Wasserelektrolyse und Synthesegasprozesse, TU Clausthal Andreas Lindermeir,

https://www.efzn.de/fileadmin/documents/Niedersaechsische_Energetage/Vortr%C3%A4ge/2017/Lindermeir_Turek.pdf

Abbildung/Foto von CC BY-SA ausgenommen. Alle Rechte bei den jeweiligen Inhaber:innen.
Sketch/picture excluded from CC BY-SA. All rights with the respective owner.

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL - SOEL Solid Oxide Electrolyzer)

Structure

- Part of the fission energy is provided by high temperature heat at 700-1000°C. Cell tension decreases by more than 0.5 V to less than 1 V. Only 2.6 kWh/Nm³ H₂ is required.
- Both half cells are separated by an O₂-conducting solid electrolyte to which electrodes are attached on both sides.
- Electrodes based on nickel and perovskite ceramics
- Reversible operable (as fuel cell)

Operating parameters

- 700-1000°C; 1-15 bar
- Current density: 0.3-1 A/cm²
- Efficiency 76-80% (purely electrical, heat not included)

In development

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL – SOEL Solid Oxid Electrolyzer)

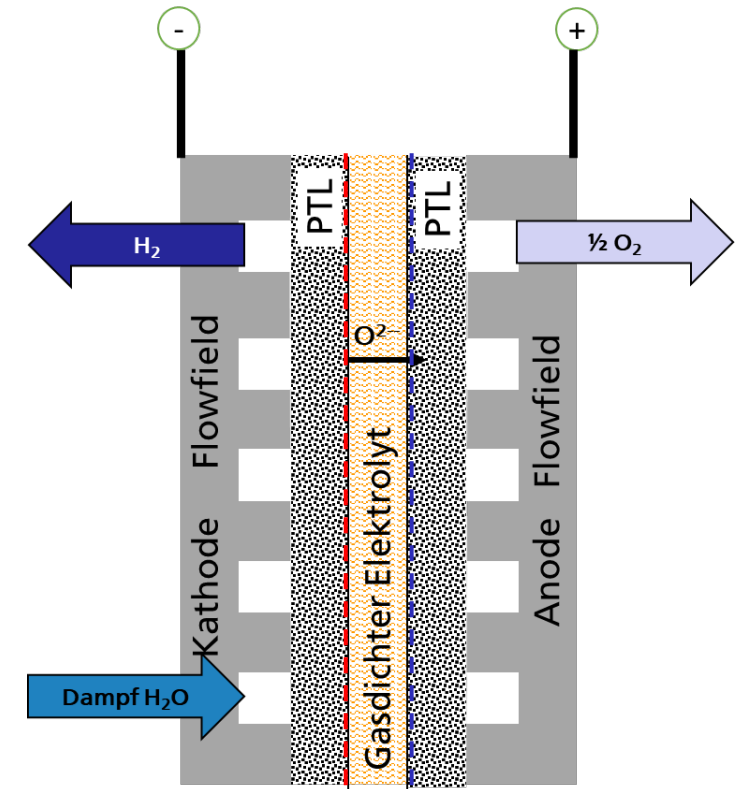
Aufbau

- Teil der Spaltungsenergie wird durch Hochtemperaturwärme bei 700-1000°C bereitgestellt. Die Zellspannung sinkt um mehr als 0,5 V auf unter 1 V. Es werden nur 2,6 kWh/Nm³ H₂ benötigt.
- Beide Halbzellen sind durch einen O₂-leitenden Festelektrolyten getrennt an denen beidseitig Elektroden aufgebracht sind.
- Elektroden auf Basis von Nickel und Perowskit-Keramiken
- **Reversibel betreibbar (als Brennstoffzelle)**

Betriebsparameter

- 700-1000°C; 1-15 bar
- Stromdichte: 0,3-1 A/cm²
- Wirkungsgrad 76-80% (rein elektrisch, Wärme nicht eingerechnet)

In der Entwicklung



Kathodenreaktion	Ladungsträger	Anodenreaktion
$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$	O^{2-}	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2e^-$

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL) – chemical reaction

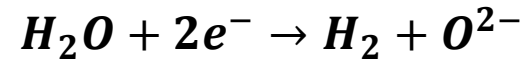
Cathode: On the cathode side, superheated steam is supplied, which reacts with two electrons to form hydrogen and O^{2-} ions.

Anode: O^{2-} diffuses through the electrolyte to the anode where it reacts to release oxygen.

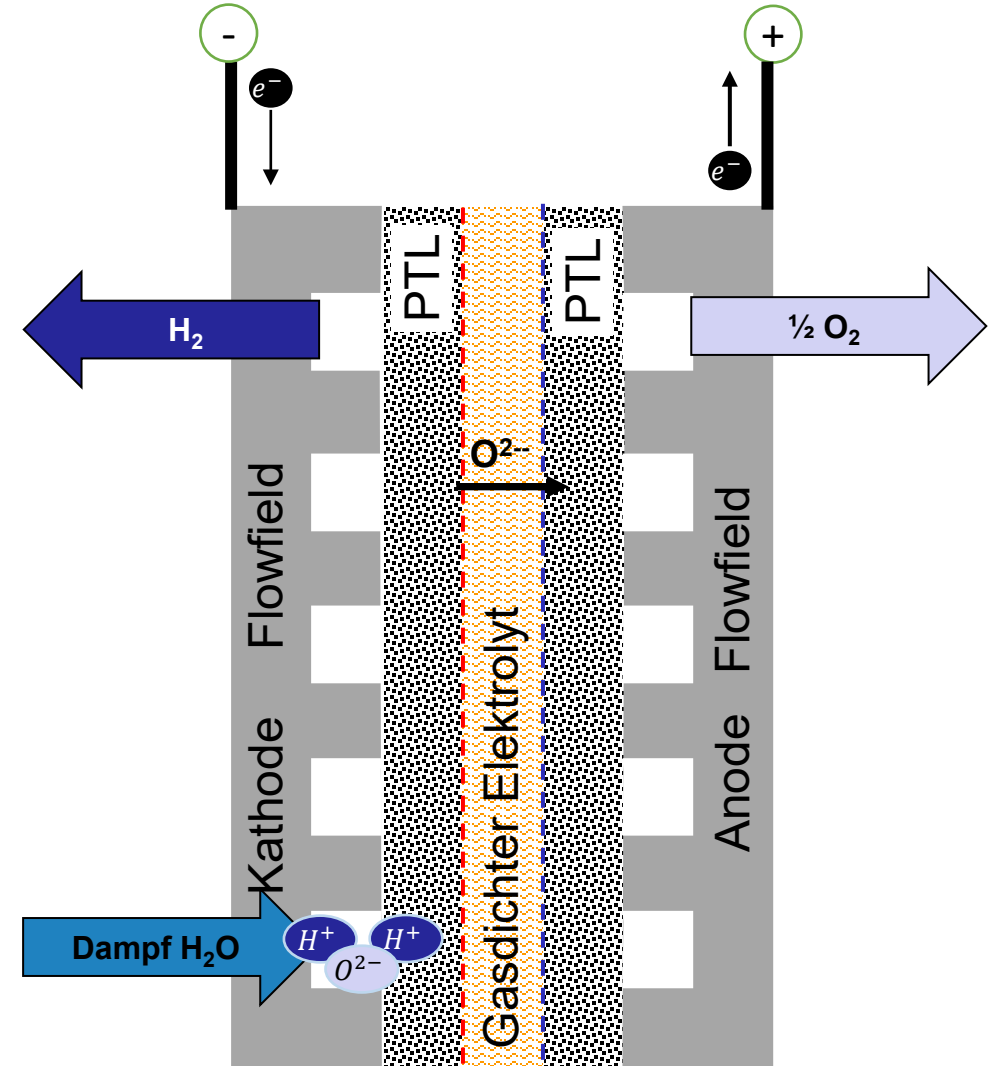
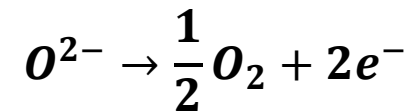
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) – Chemische Reaktionen

- **Kathode:** Kathodenseitig wird überhitzter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O^{2-} Ionen reagiert.



- **Anode:** O^{2-} diffundiert durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL) – chemical reaction

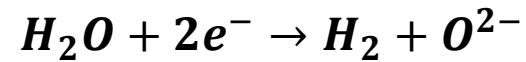
Cathode: On the cathode side, superheated steam is supplied, which reacts with two electrons to form hydrogen and O^{2-} ions.

Anode: O^{2-} diffuses through the electrolyte to the anode where it reacts to release oxygen.

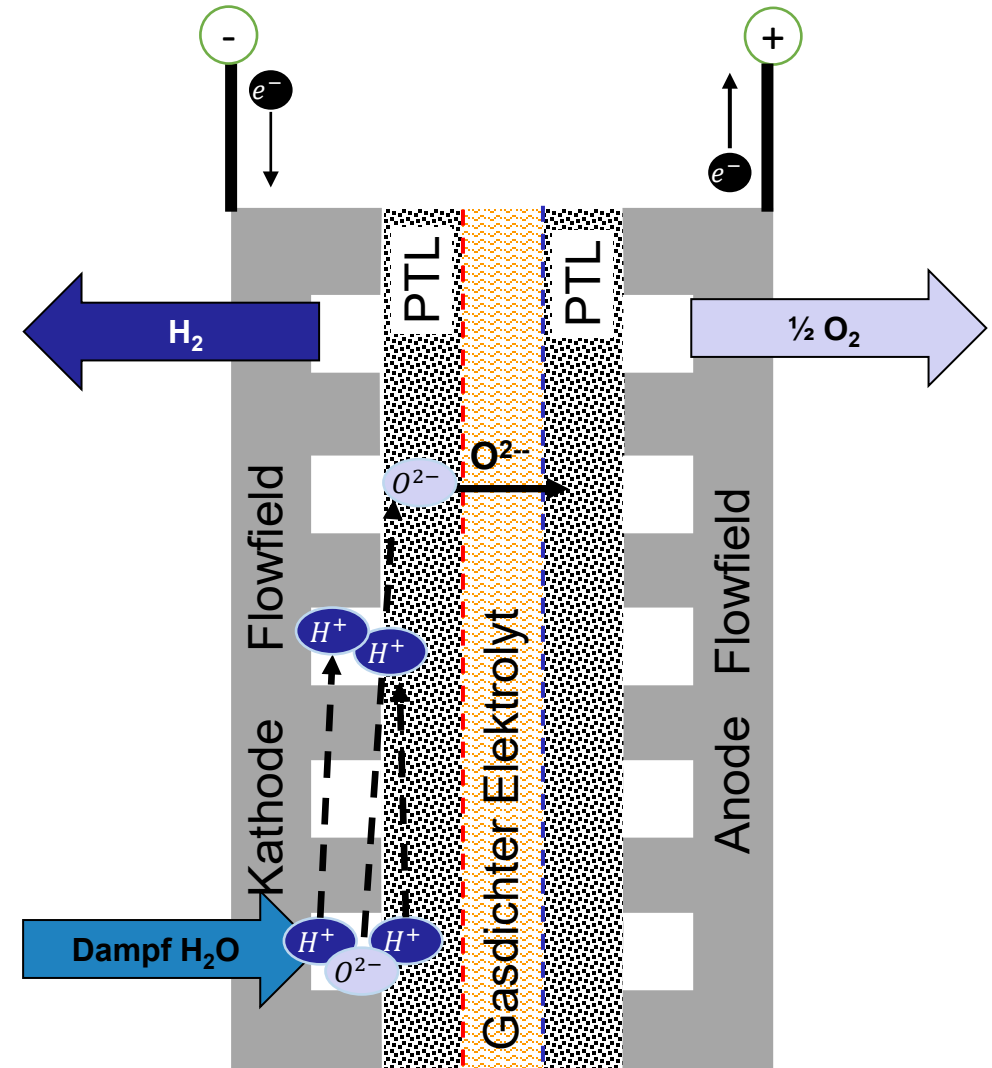
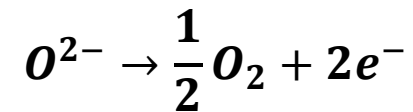
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) – Chemische Reaktionen

- **Kathode:** Kathodenseitig wird überhitzter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O^{2-} Ionen reagiert.



- **Anode:** O^{2-} diffundiert durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL) – chemical reaction

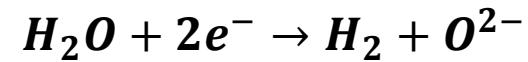
Cathode: On the cathode side, superheated steam is supplied, which reacts with two electrons to form hydrogen and O^{2-} ions.

Anode: O^{2-} diffuses through the electrolyte to the anode where it reacts to release oxygen.

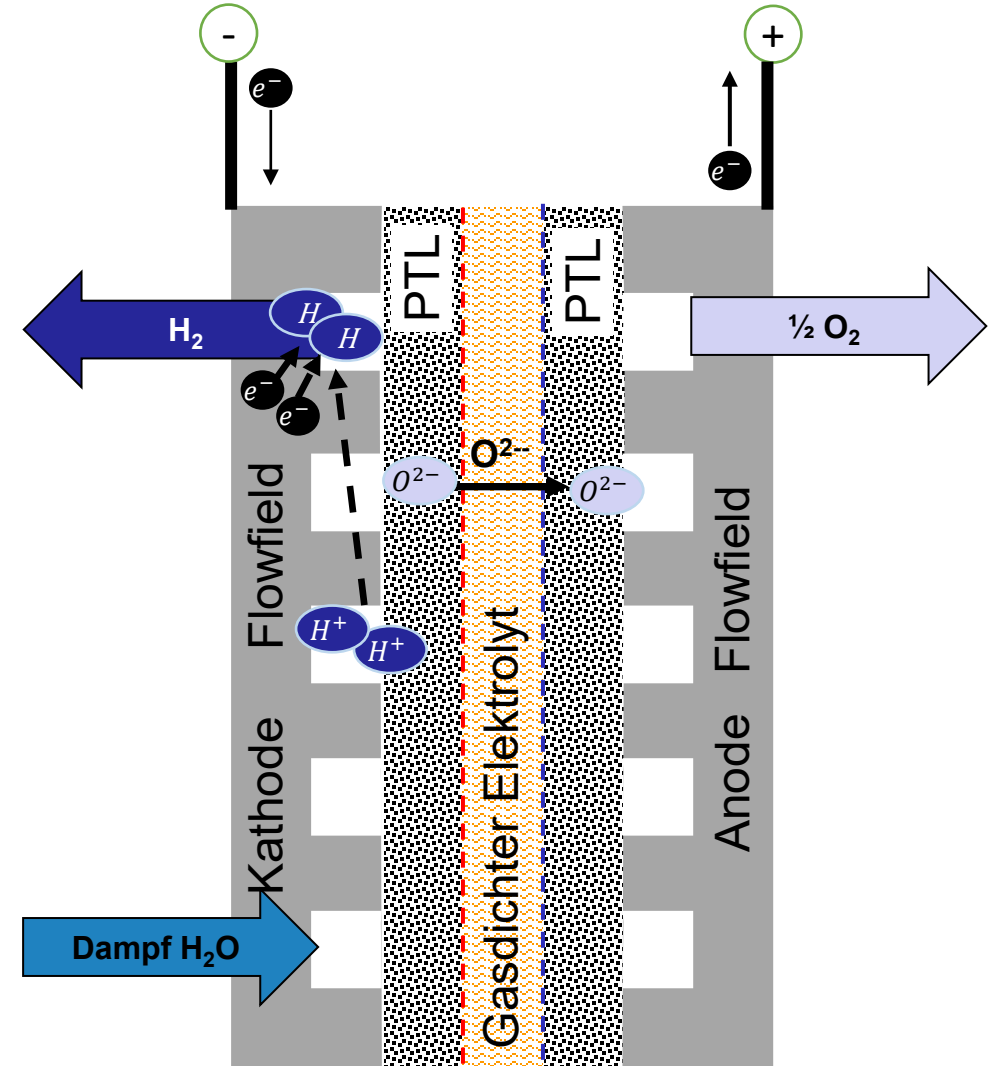
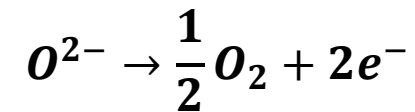
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) – Chemische Reaktionen

- **Kathode:** Kathodenseitig wird überhitzter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O^{2-} Ionen reagiert.



- **Anode:** O^{2-} diffundiert durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL) – chemical reaction

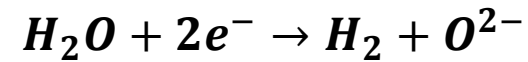
Cathode: On the cathode side, superheated steam is supplied, which reacts with two electrons to form hydrogen and O^{2-} ions.

Anode: O^{2-} diffuses through the electrolyte to the anode where it reacts to release oxygen.

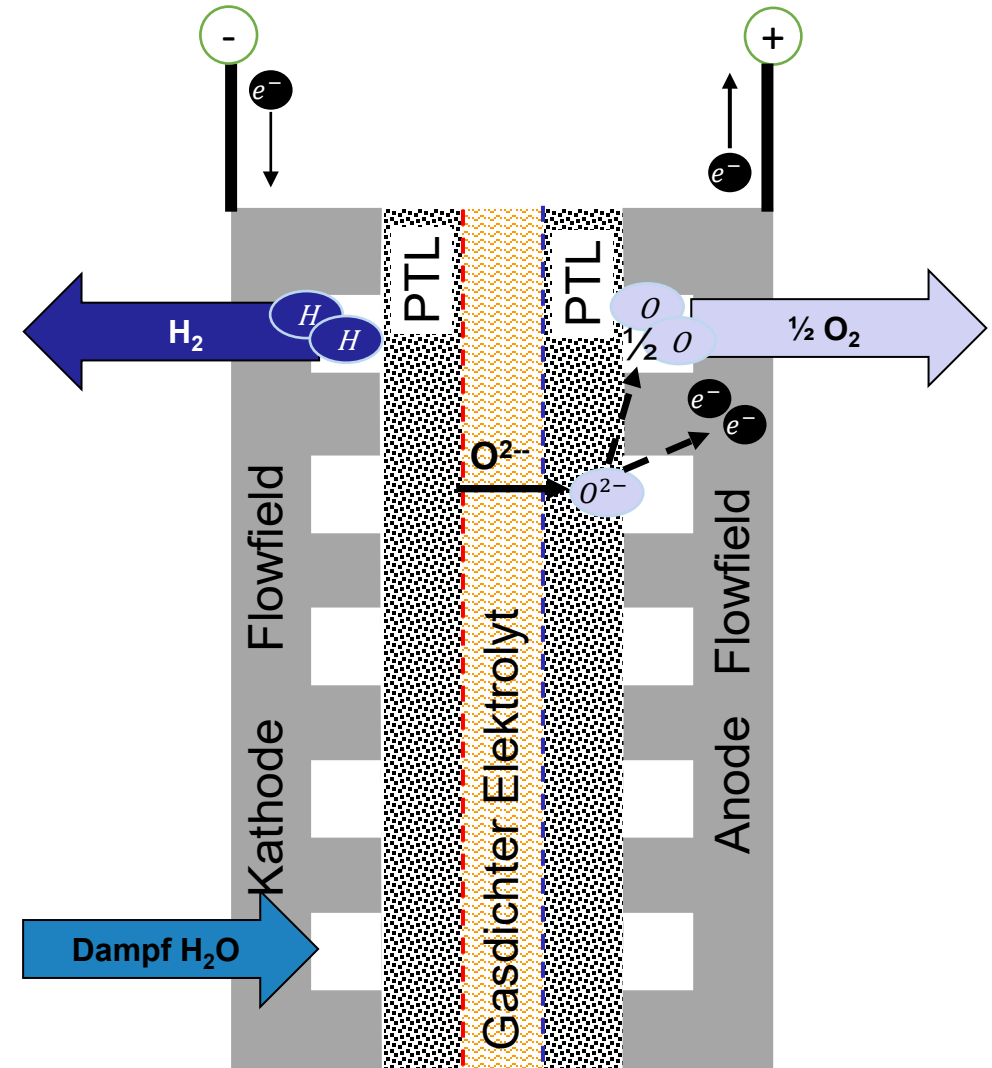
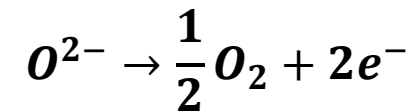
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) – Chemische Reaktionen

- **Kathode:** Kathodenseitig wird überhitzter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O^{2-} Ionen reagiert.



- **Anode:** O^{2-} diffundiert durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL) – chemical reaction

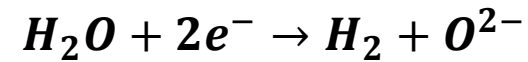
Cathode: On the cathode side, superheated steam is supplied, which reacts with two electrons to form hydrogen and O^{2-} ions.

Anode: O^{2-} diffuses through the electrolyte to the anode where it reacts to release oxygen.

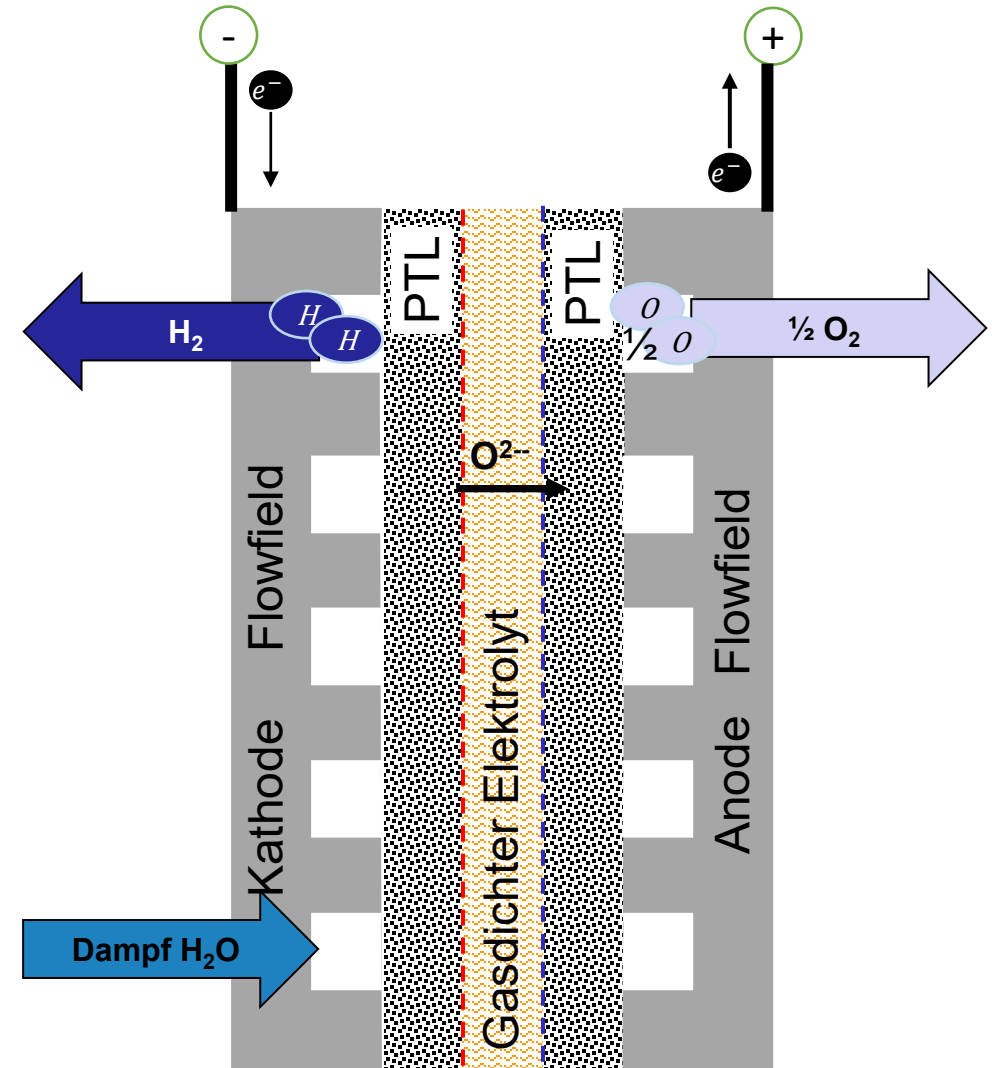
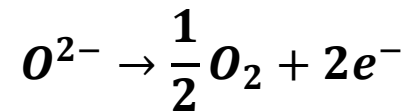
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) – Chemische Reaktionen

- **Kathode:** Kathodenseitig wird überhitzter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O^{2-} Ionen reagiert.



- **Anode:** O^{2-} diffundiert durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.



3. Chemical Energy Storage Technologies

3.5 High Temperature Electrolysis (HTEL) – chemical reaction

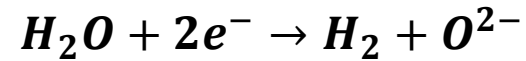
Cathode: On the cathode side, superheated steam is supplied, which reacts with two electrons to form hydrogen and O^{2-} ions.

Anode: O^{2-} diffuses through the electrolyte to the anode where it reacts to release oxygen.

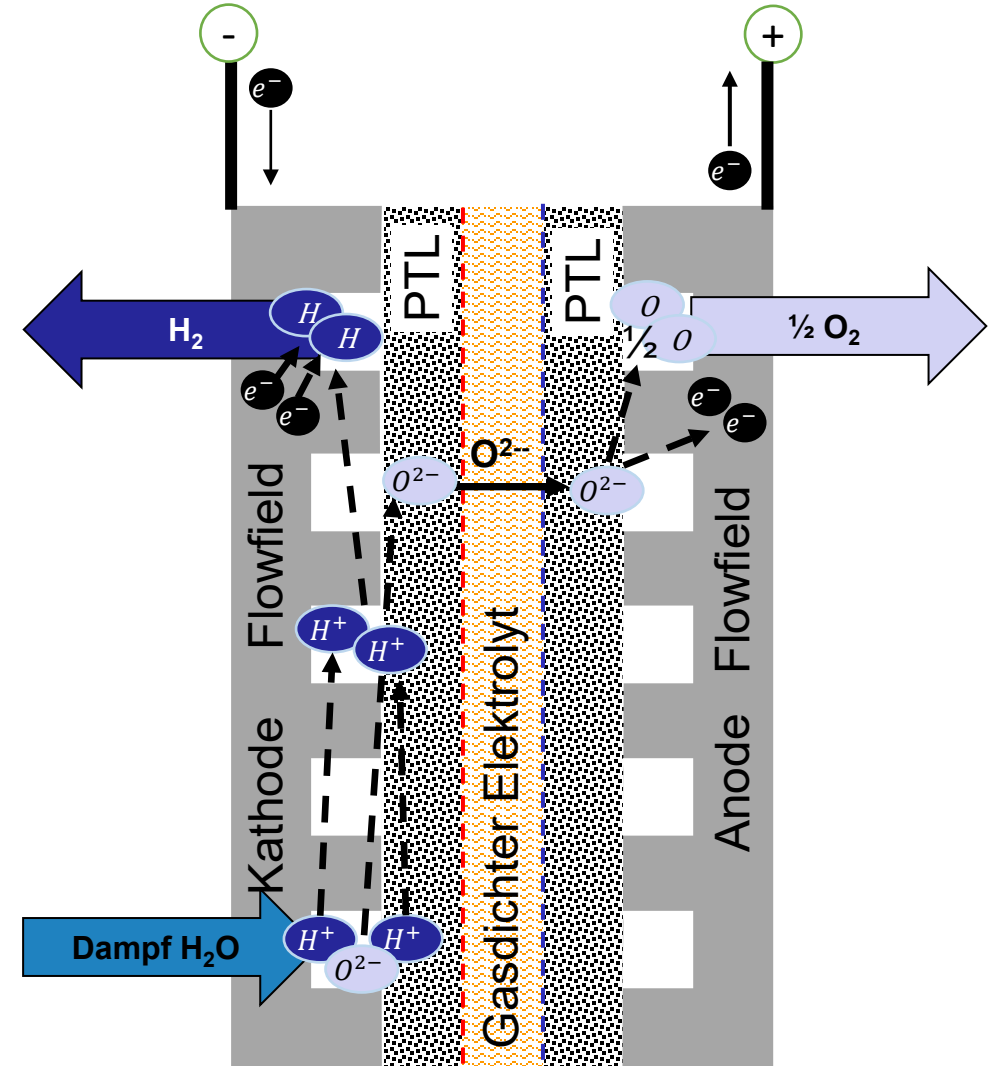
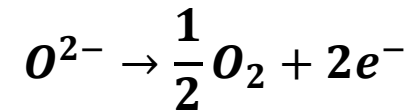
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.5 Hochtemperatur-Elektrolyse (HTEL) – Chemische Reaktionen

- **Kathode:** Kathodenseitig wird überhitzter Wasserdampf zugeführt, der mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und O^{2-} Ionen reagiert.



- **Anode:** O^{2-} diffundiert durch den Elektrolyten zur Anode, wo sie unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff reagieren.

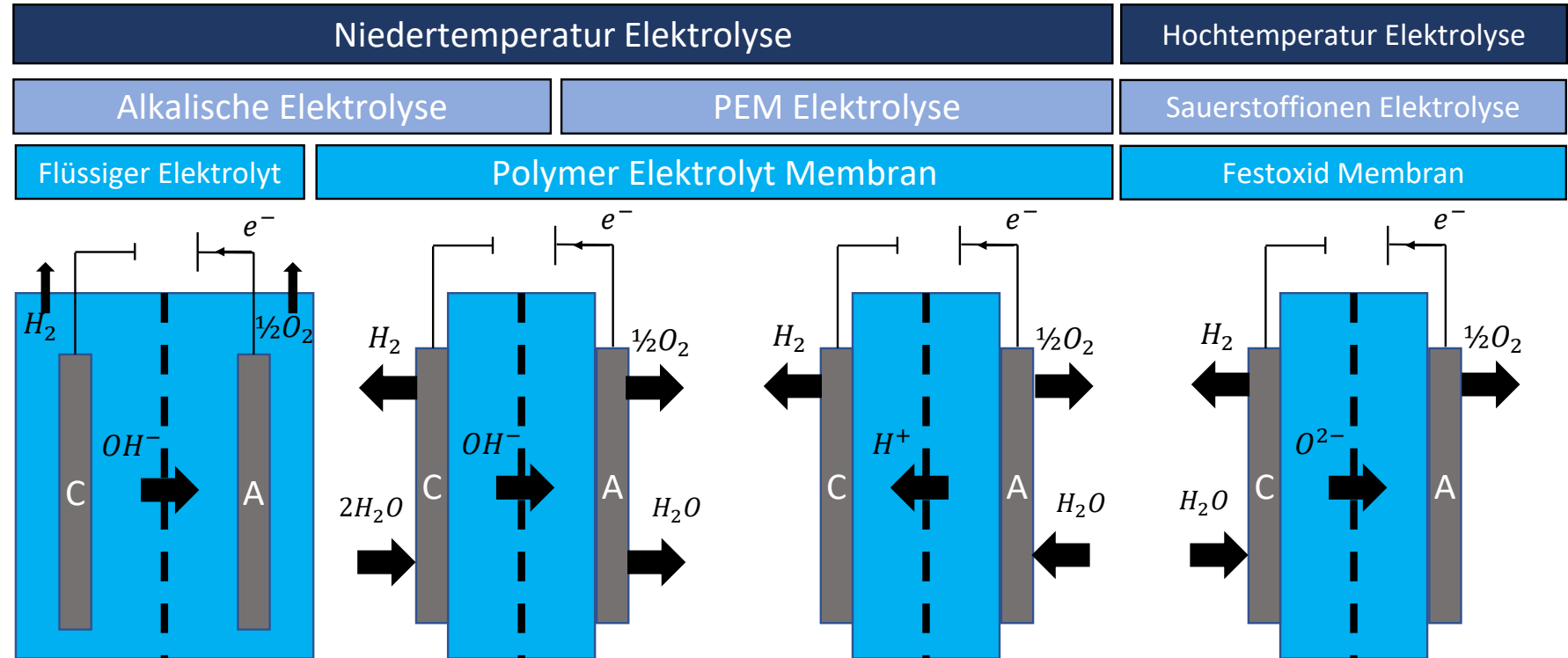


3. Chemical Energy Storage Technologies
 3.6 Electrolyzer technologies - comparison of the structure

Overview of the operating principles
 Mnemonic for electrolysis (equivalent to secondary cell charging): OPA: Oxidation - positive pole - anode

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
 3.6 Elektrolyseur-Technologien – Vergleich des Aufbaus

Übersicht der Funktionsprinzipien



Eselsbrücke für Elektrolyse (entsprechend Ladevorgang bei Sekundärzellen):
 OPA: Oxidation-Pluspol-Anode
 (Wichtig: Oxidation=Erhöhung der Oxidationszahl)

3. Chemical Energy Storage
Technologies

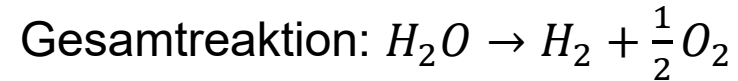
 3.6 Electrolyzer technologies - comparison
of the structure

Overview of the operating principles

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.6 Elektrolyseur-Technologien – Vergleich des Aufbaus

Übersicht der Funktionsprinzipien



Verfahren	Temperatur	Kathodenreaktion	Ladungsträger	Anodenreaktion
AEL	70-90 °C	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$
AEMEL	50-70 °C	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	OH^-	$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$
PEMEL	50-80 °C	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	H^+	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$
SOEL	650-850 °C	$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$	O^{2-}	$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$

3. Chemical Energy Storage
Technologies

 3.6 Electrolyzer technologies - comparison
of the technologies

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.6 Elektrolyseur-Technologien – Technologie-Vergleich

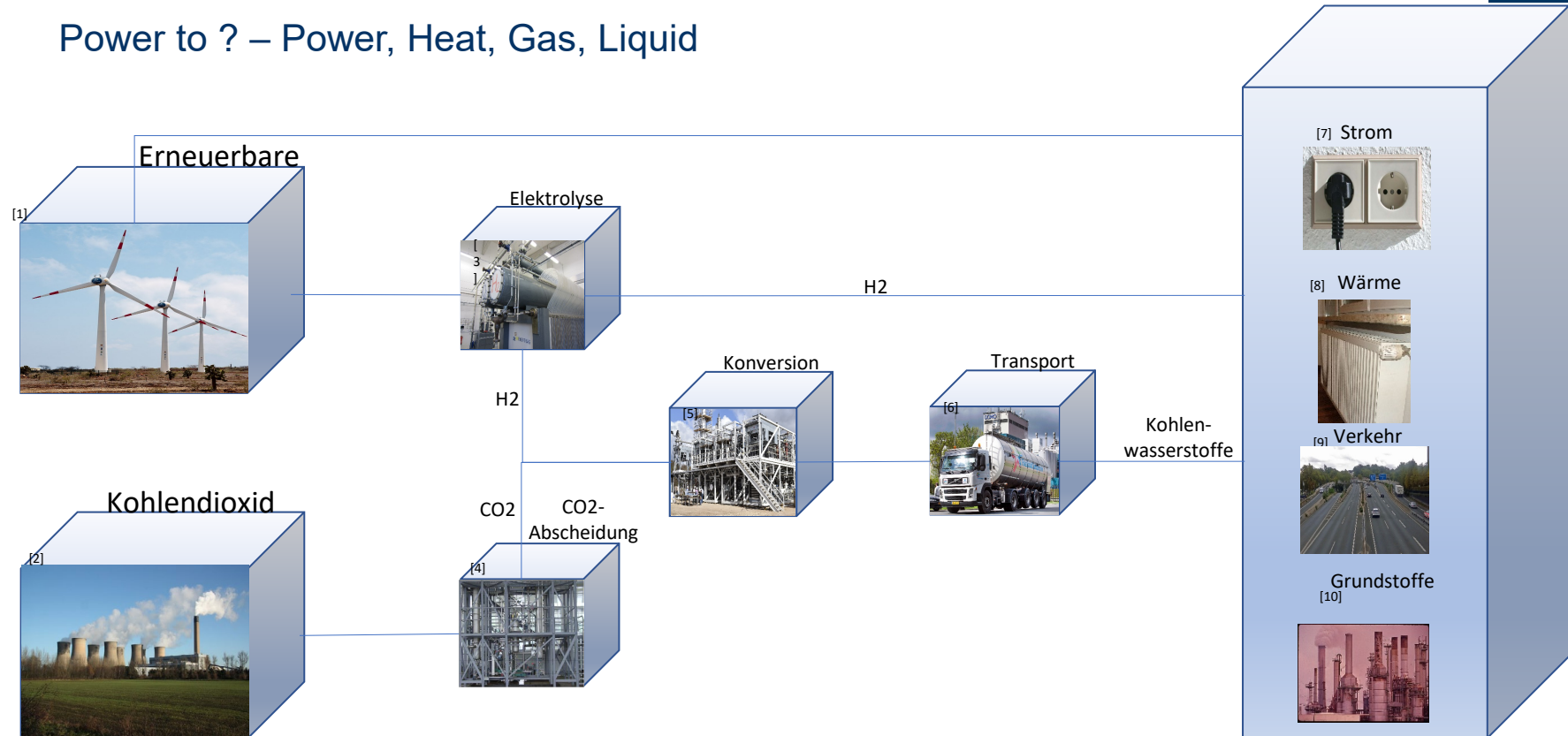
	AEL	PEMEL	SOEL
Operating Parameters			
Temperature (°C)	70-90	50-80	700-1 000
Pressure (bar)	1-60	20-50	1-15
Current density (A/cm ²)	0.25-0.45	1.0-2.0	0.3-1.0
Flexibility			
Cold start time	1-2 h	5-10 min	several hours
Time for warm start	1-5 min	< 10 s	15 min
Efficiency			
Electrical energy consumption (kWh/Nm ³)	4.4-5.0 ~4.4 (2050)	4.7-5.0 ~4.4 (2050)	3.7-3.9 ~3.6 (2050)
Nominal system efficiency (LHV)	60-68 %	64-68 %	76-81 %
Capacity			
Max. nominal stack power (MW)	6	2	< 0.15
H ₂ Production per Stack (Nm ³ /h)	1 400	400	40
service life (kh)	55-120	60-100	8-20 (forecast)
Efficiency degradation (%/a)	0.25-1.5	0.5-2.5	3-50
Economic Parameters			
CAPEX (€/kW)	800-1 500 ~500 (forecast 2050)	1 400-2 100 ~500 (forecast 2050)	> 2 000 ~250 (forecast 2050)
Operating costs (% von CAPEX)	2-3	3-5	no information
Maturity level	mature	commercialization	first systems on the market

Quellen: Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasser Elektrolyse in Deutschland. NOW (2018)
Buttler et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018. 2440-2454

3. Chemical Energy Storage Technologies
3.7 Chemical storage - Systemic view

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
3.7 Chemische Speicher – Systemische Sicht

Power to ? – Power, Heat, Gas, Liquid



[1] Wind turbines at the Seymour Airport, Victor Gleim, CC-BY-Sa 4.0 †
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baltra_Island_-_Wind_Turbines.jpg

[2] Eggborough Power Station Large coal-fired power station on the River Aire, Richard Croft, CC-BY-SA 2.0 †
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Eggborough_Power_Station_-_geograph.org.uk_-_1612489.jpg

[3] Elektrolyseanlage im Kombikraftwerk Prenzlau., Hanno Böck, CC0 †
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Ene-trag-Elektrolyse.jpg>

[4] CO2-Wäscher (IUTA), IUTA e.V., CC-BY-SA 3.0 †
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CO2-W%C3%A4scher.jpg>

[5] Modular transportable gas-to-liquids unit based on the direct conversion of natural gas into synthetic oil., Sergezolotukhin, CC-BY-SA 4.0 †
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/INFRAM100_GTL_Plant.jpg

[6] DOMO Bedum met tankauto FrieslandCampina, Jos, CC-BY-SA 2.0 †
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/25/2012-05-12_DOMO_Bedum_met_tankauto_FrieslandCampina.jpg

[7] Schuko-Steckdose, Bran, Public Domain †
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d0/Steckdose.jpg>

[8] Plattenheizkörper, Ala z, CC-BY-SA 3.0 †
https://de.wikipedia.org/wiki/Heizk%C3%B6rper#/media/Datei:POL_kalorifer_0001.JPG

[9] Essen-Südviertel, Helbingbrücke, Bundesautobahn 40, Wiki05, CC-BY-SA 3.0 †
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Essen,_Autobahn_40,_Helbingbr%C3%BCcke.jpg

[10] Smokestacks of Chemical Plant, The U.S. National Archive, Public Domain †
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smokestacks_of_Chemical_Plant_11-1972_\(3703566787\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smokestacks_of_Chemical_Plant_11-1972_(3703566787).jpg)

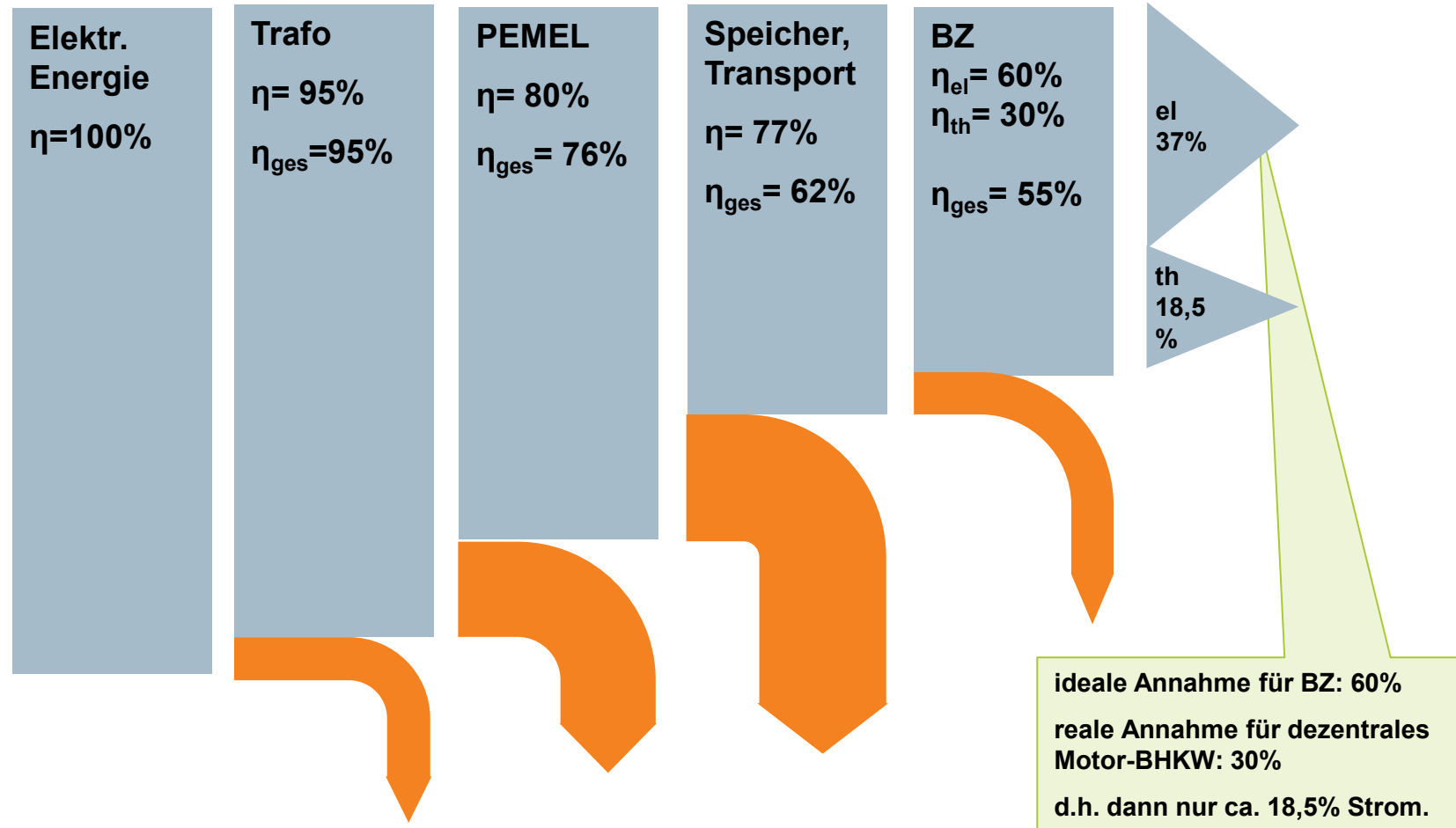
Energy Storage | #8 Chemical Energy Storage

3. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage
 3.7 Chemical storage - Systemic view

Efficiency chain from power-to-hydrogen-to-power by fuel cell
 Efficiency chain for the conversion of electricity from renewable energy to methane and its use. The losses in storage and transport are essentially due to the compression and re-compression of the gas.

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
 3.7 Chemische Speicher – Systemische Sicht

Wirkungsgradkette von Power-to-Hydrogen-to-Power mittels Brennstoffzelle



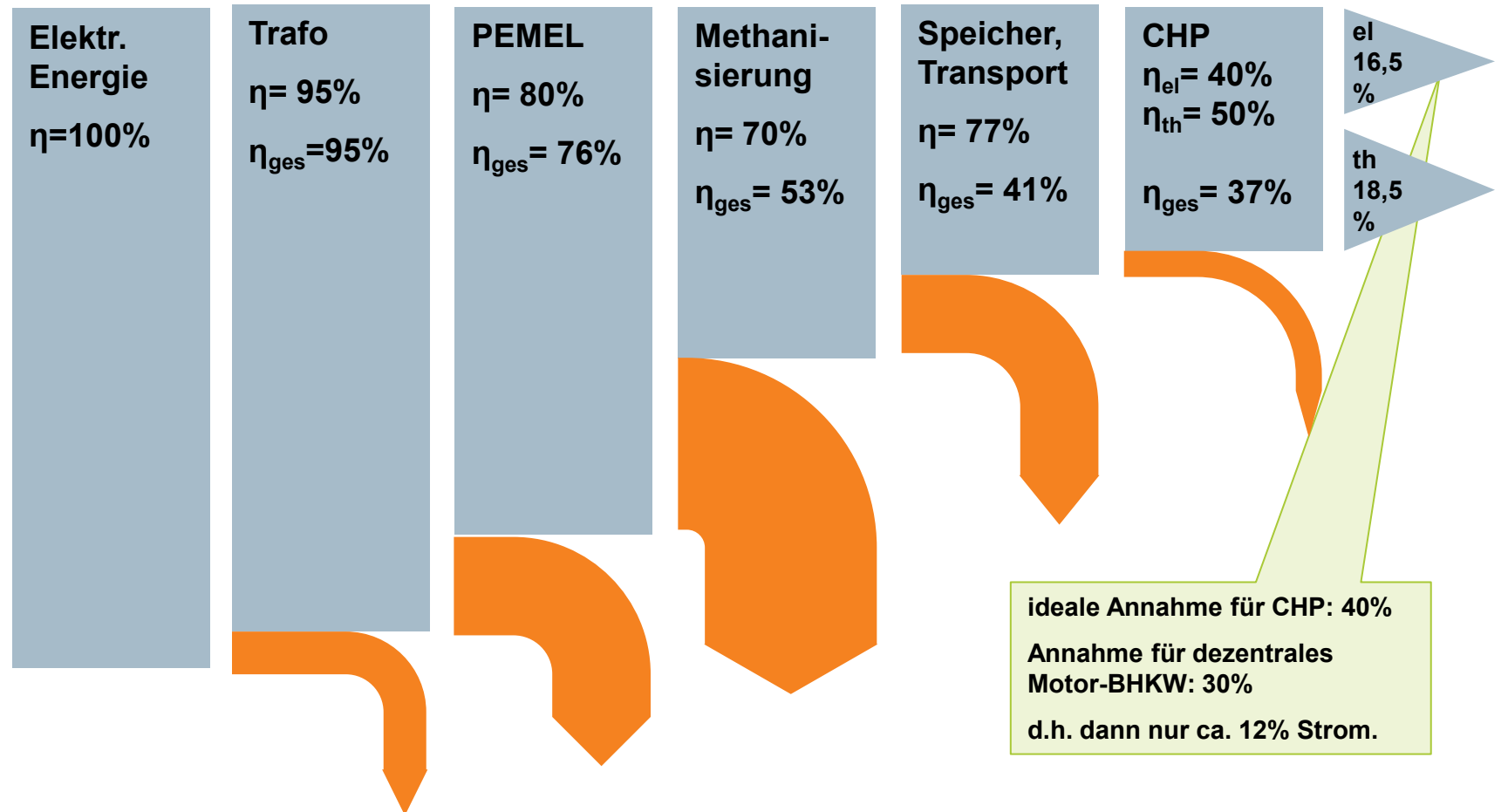
Daten aus: Ausfelder et. Al. „Energiespeicherung als Element einer sicheren Versorgung“, CIT 2015, No 1-2, 17-89

3. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage
3.7 Chemical storage - Systemic view

Efficiency chain from power-to-methane-to-power by huge CHP
Efficiency chain for the conversion of electricity from renewable energy to methane and its use. The losses in storage and transport are essentially due to the compression and re-compression of the gas.

3. Chemische Energiespeicher – Technologien
3.7 Chemische Speicher – Systemische Sicht

Wirkungsgradkette von Power-to-Methan-to-Power mit großem BHKW



Daten aus: Ausfelder et. Al. „Energiespeicherung als Element einer sicheren Versorgung“, CIT 2015, No 1-2, 17-89

3. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

3.x Comparison heat pump vs. hydrogen boiler

Heat supply efficiency

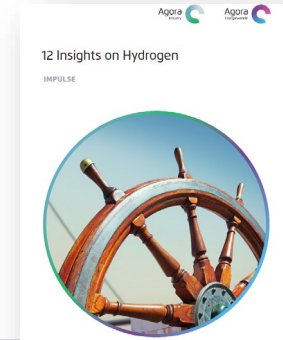
- Direct use of RE in heat pumps is by far the most efficient method, in summer and in winter
- If (longer-term) intermediate storage via hydrogen is necessary (time shift by weeks/months), then use in a gas and steam combined cycle power plant with heat pump use of the electricity makes the most sense.
- The direct combustion of hydrogen for (low-temperature) heating purposes has by far the worst efficiency

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.7 Chemische Speicher – Systemische Sicht

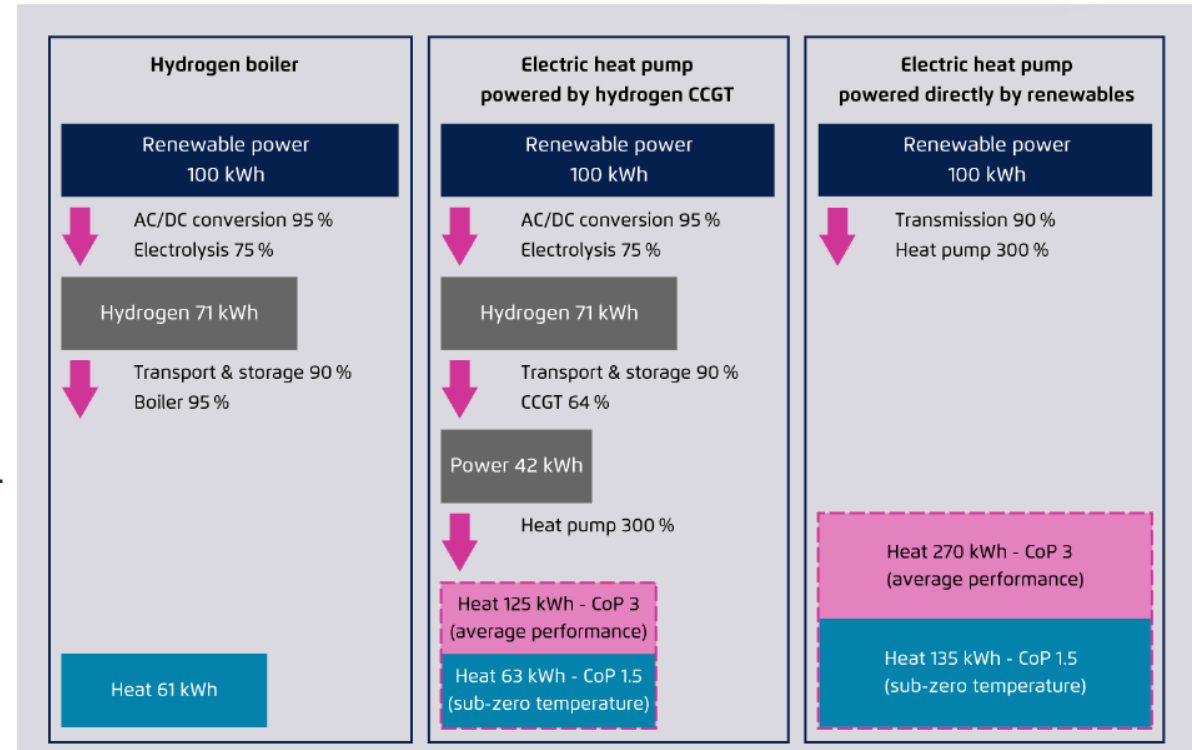
Vergleich Wärmepumpe vs. Wasserstoff-Gaskessel

- Direkte Nutzung von EE in Wärmepumpen ist die mit Abstand effizienteste Methode, Sommer wie Winter
- Sofern eine (längerfristige) Zwischenspeicherung via Wasserstoff notwendig ist (zeitl. Verschiebung um Wochen/Monate), dann ist die Nutzung in einem Gas- und Dampfkombikraftwerk mit Wärmepumpennutzung des Stroms am sinnvollsten.
- Die direkte Verbrennung des Wasserstoffs für (Niedertemperatur) Heizzwecke hat die mit Abstand schlechteste Effizienz



Efficiency comparison of different heating systems starting from renewable electricity

Figure 16



https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_11_H2_Insights/A-EW_245_H2_Insights_WEB.pdf

3. Water electrolysis fuel cell system as electrical energy storage

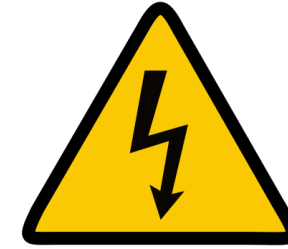
3.7 Chemical storage - Systemic view – resources

- **Energy demand:**
The electricity demand for the production of hydrogen in the electrolysis process is currently approx. 55 kWh/kg H₂ with an assumed efficiency of >60%.
- **Energy costs:**
At 5 ct/kWh the energy costs are 2.75 €/kg H₂ (without investment costs!)
- **Water requirement:**
For the production of 1 kg hydrogen, 9 times the amount of water is necessary, i.e. 9 liters.
- **Other:**
Catalysts, membranes etc.

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.7 Chemische Speicher – Systemische Sicht: Ressourcenbedarf

- **Energiebedarf:**
Der Strombedarf für die Herstellung von Wasserstoff im Elektrolyseverfahren liegt derzeit bei ca. 55 kWh/kg H₂ bei einem angenommenem Wirkungsgrad von >60%.
- **Energiekosten:**
Bei 5 ct/kWh ergeben sich Energie-Kosten für den Wasserstoff von 2,75 €/kg H₂ (ohne Investitionskosten!)
- **Wasserbedarf:**
Für die Erstellung von 1 kg Wasserstoff ist die neunfache Menge Wasser notwendig, also 9 Liter.
- **Sonstiges:**
Katalysatoren, Membranen etc.



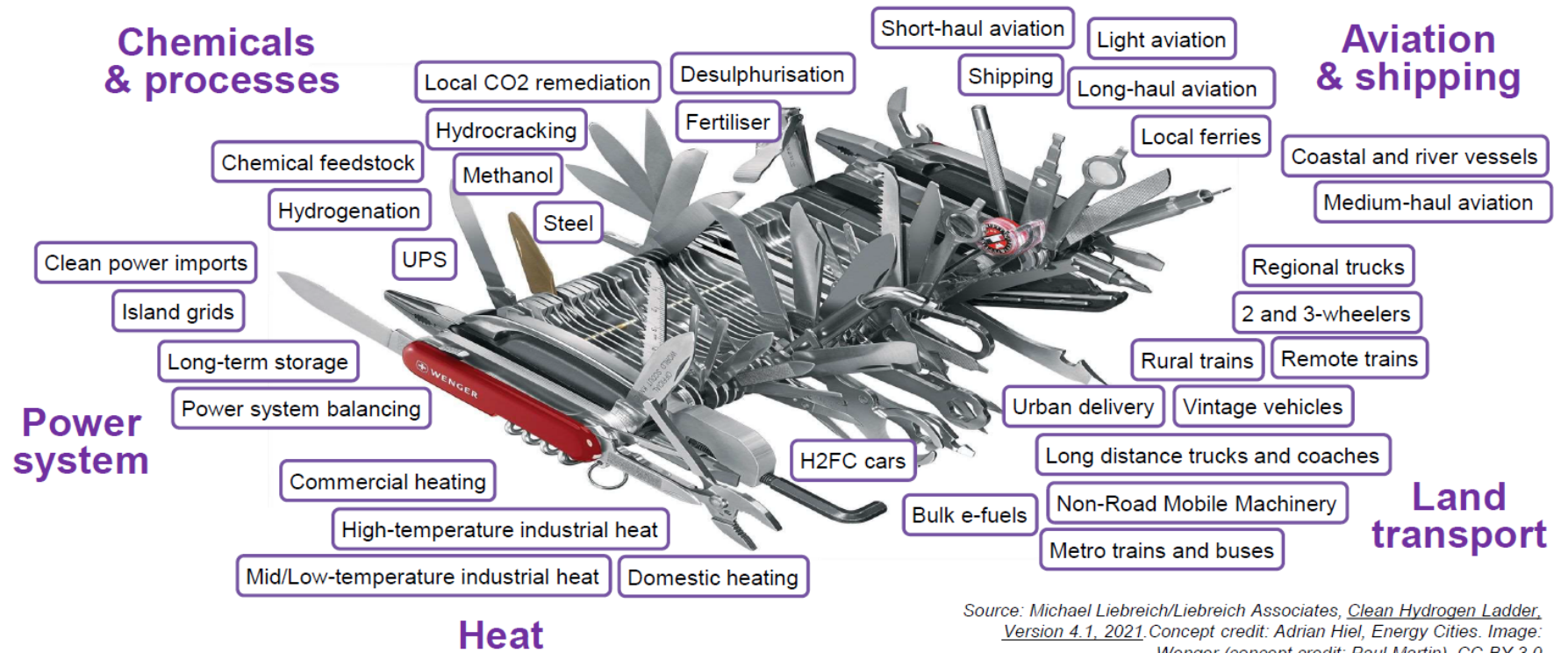
ElectricDanger, Fatalflex, CC-BY-SA 3.0 †
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ElectricDanger.svg>

A picture of some Euro banknotes and various Euro coins.. Avij, Public Domain
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Euro_coins_and_banknotes.jpg

A globule of liquid water, and the concave depression and rebound in water caused by something dropping through the water surface. José Manuel Suárez, CC-BY-SA 2.0 †
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6e/Water_drop_001.jpg

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.8 Wasserstoff – vielseitige Einsatzmöglichkeiten von H₂



Source: Michael Liebreich/Liebreich Associates, *Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021*. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities. Image: Wenger (concept credit: Paul Martin). [CC-BY 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)

Source: <https://www.liebreich.com/>

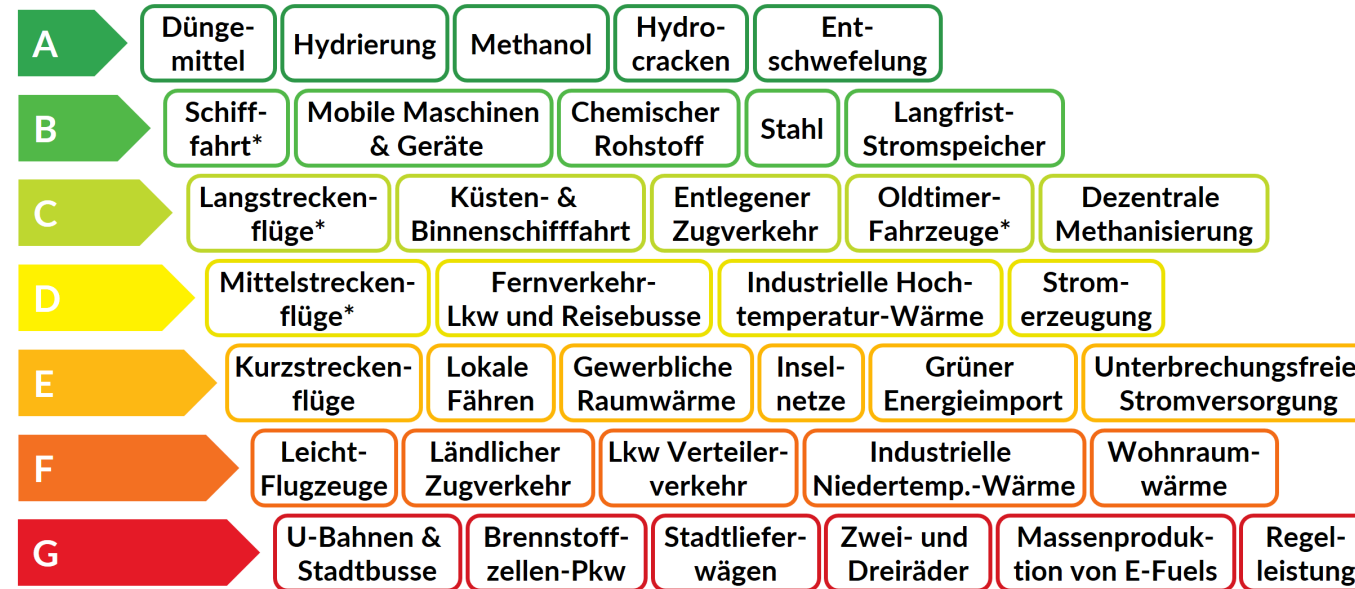
3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.8 Wasserstoff – vielseitige Einsatzmöglichkeiten von H₂

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Nach M. Liebreich, 2021)

Alternativlos



Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

© Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill & Martin Kittel, based on Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities, „A chart that ranks the different uses of clean hydrogen according to their cost-effectiveness“, CC-BY-SA 4.0†, <https://mobile.twitter.com/wozukunft/status/1436681783920242696>

Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill & Martin Kittel, based on Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities, „A chart that ranks the different uses of clean hydrogen according to their cost-effectiveness“, CC-BY-SA 4.0†, <https://mobile.twitter.com/wozukunft/status/1436681783920242696>

Source: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Einsatzbereiche_sauberen_Wasserstoff.png

Englischsprachige Original-Quelle: <https://www.liebreich.com/>

3. Chemical Energy Storage Technologies

3.7 Summary

1. Up to now, hydrogen has mainly been produced conventionally (fossil). In addition to green hydrogen, there are also other "colors" that enable reduced CO₂ emissions.
2. Green hydrogen is currently not yet economically competitive with the 1-1.5 €/kg H₂ of conventional hydrogen.
3. There are three basic electrolysis processes today: AEL, PEM and HT-SOEL electrolysis
4. Alkaline electrolysis (AEL) is cost effective and long proven, but less compact and flexible
5. PEM electrolysis is more powerful and flexible than AEM, but not yet as proven and not as cost-effective due to catalyst costs
6. High-temperature electrolysis is still in the development stage, but promises the highest (electrical) efficiency, provided free/low-cost waste heat is available.
7. Hydrogen can be used in the energy system in ALL Sectors, as a fuel, as a platform chemical for chemistry or also for decentralized energy supply (combined heat and power).
8. Methanation allows existing natural gas infrastructure to be used, but further reduces the already low overall efficiency.

3. Chemische Energiespeicher – Technologien

3.7 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Wasserstoff wird bisher vor allem konventionell (fossil) gewonnen. Neben grünem Wasserstoff gibt es auch andere „Farben“, die verminderte CO₂-Emissionen ermöglichen.
2. Grüner Wasserstoff ist zur Zeit noch nicht wirtschaftlich konkurrenzfähig mit den 1-1,5 €/kg H₂ von konventionellem Wasserstoff.
3. Es gibt drei grundsätzliche Elektrolyseverfahren heutzutage: Die AEL, PEM und HT-SOEL Elektrolyse
4. Die Alkalische Elektrolyse (AEL) ist kostengünstig und langjährig erprobt, aber weniger kompakt und flexibel
5. Die PEM Elektrolyse ist leistungsfähiger und flexibler als die AEM, aber noch nicht so erprobt und durch Katalysatorkosten auch nicht so kostengünstig
6. Die Hochtemperaturelektrolyse ist noch im Entwicklungsstadium, verspricht aber den höchsten (elektrischen) Wirkungsgrad, sofern kostenlose/-günstige Abwärme zur Verfügung steht.
7. Wasserstoff kann im Energiesystem in ALLEN Sektoren genutzt werden, als Treibstoff, als Plattformchemikalie für die Chemie oder auch zur dezentralen Energieversorgung (Kraft-Wärme-Kopplung)
8. Die Methanisierung ermöglicht bisherige Erdgasinfrastruktur zu nutzen, vermindert aber den an sich schon geringen Gesamtwirkungsgrad noch weiter.

#8. Chemische Energiespeicher

#8. Chemical Energy Storage

$$W_{el} = \Delta G = U \cdot Q = U \cdot n \cdot z \cdot F$$

$$U_{rev,l} = \frac{\Delta G}{z \cdot F} \quad U_{th} = \frac{\Delta H}{z \cdot F}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{mit } R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

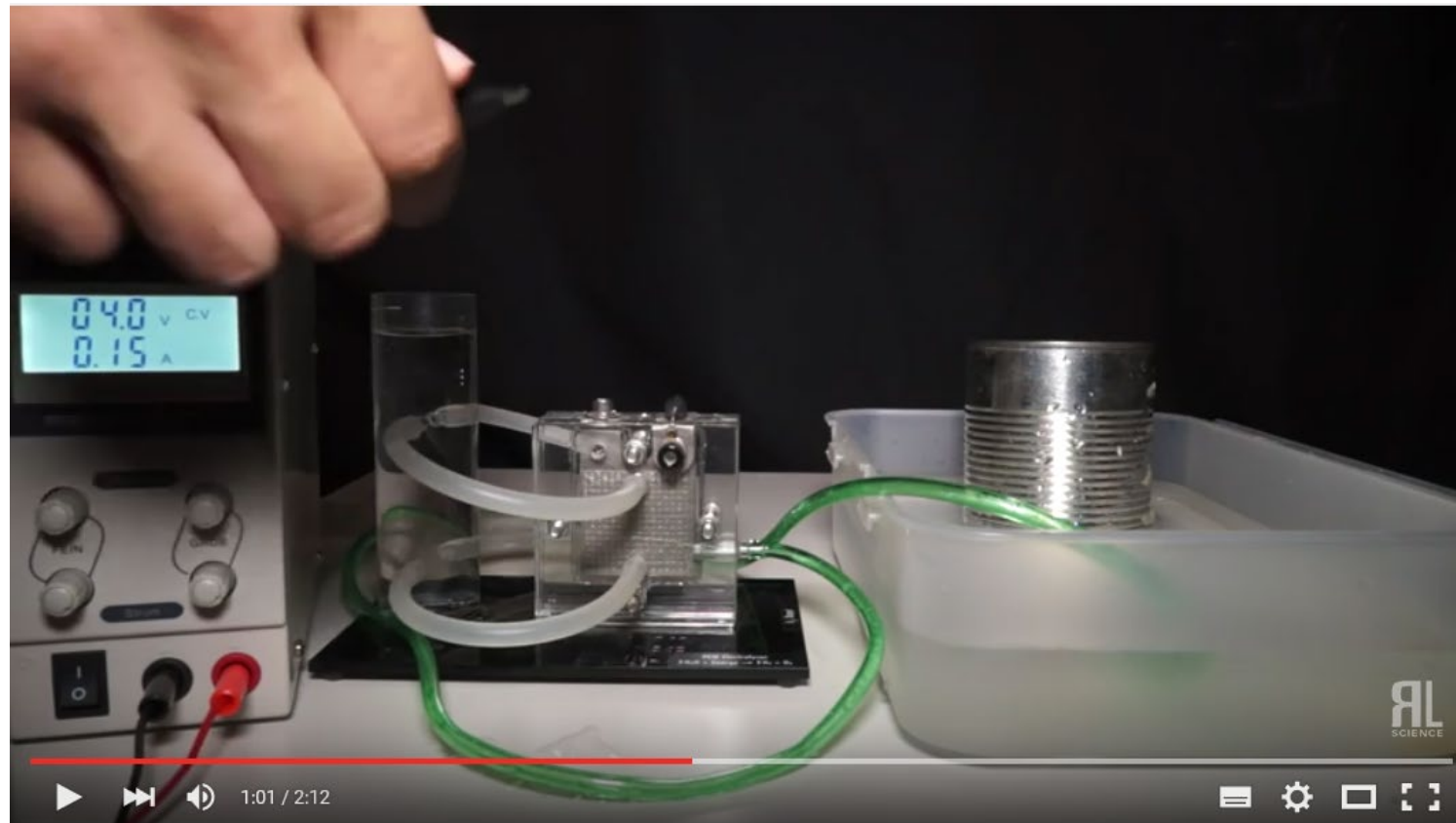
$$\eta_{energetisch} = \frac{\Delta H_{\text{Nutzen}}}{\Delta H_{\text{Aufwand}}} = \frac{\Delta H_{100^\circ\text{C}}}{\Delta H_{\text{Aufwand}}}$$

$$W_n = n \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot \alpha^{(n-1)}$$

Weiterführende Videos

Further videos

VIDEO: „Knallgas-Dose“ [0:00 – 2:12]



<https://youtu.be/Fmos57Vuu34>

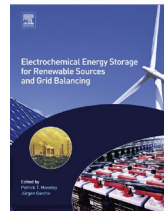
Weiterführende Literatur

Further Reading



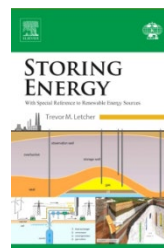
Michael Sterner, Ingo Stadler (Hrsg.); „Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration“

- Kapitel 8 „Chemische Energiespeicher“



Moseley, P.T.; Garch J. [Hrsg./Ed.]: „Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing“

- Chapter 8 “Hydrogen Production from Renewable Energies - Electrolyzer Technologies”
- Chapter 9 “Large-Scale Hydrogen Energy Storage”
- Chapter 10 “Hydrogen Conversion into Electricity and Thermal Energy by Fuel Cells”
- Chapter 11 “PEM Electrolyzers and PEM Regenerative Fuel Cells Industrial View”
- Chapter 12 “Energy Carriers Made from Hydrogen”



Trevor M. Letcher (ed.); „STORING ENERGY: with Special Reference to Renewable Energy Sources“

- Chapter 16 „Hydrogen From Water Electrolysis“
- Chapter 18 „Power-to-Gas“

Weiterführende Literatur

Further Reading



Eisner, Sauer et al.; „Energiespeicher“, Schriftenreihe Energiesystem der Zukunft

- Kapitel 3 „Chemische Energiespeicher“

Siehe auch Moodle



Karim Ghaib; „Das Power-to-Methane-Konzept: Von den Grundlagen zum gesamten System“

- Kapitel 2 „Wasserelektrolyse“



Ausfelder et al. „Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung“

- Kapitel 4.2.1-4.2.10

Siehe auch Moodle

Weiterführende Literatur

Further Reading

Eigenschaften von Wasserstoff in transportabler Form

		CGH ₂ 57-59	CGH ₂ 58-60	LH ₂ 6, 57, 58, 61-64	NH ₃ 65-71	MeOH 61, 72-74	LOHC 61, 65, 66, 75-77	LNG 78, 79
Carrier Properties	<i>p</i> /MPa	35	70	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	<i>T</i> /K	298	298	20.3	240.1	298	240.1	111.5
Volumetric density ^b	[kg/m ³]	23.3	39.2	70.9	682	786	769	423
Gravimetric hydrogen content	[wt. %]	100	100	100	17.8	12.5	6.16	-
Volumetric H ₂ density	[kgH ₂ /m ³]	23.2	39.2	70.9	121	99	47.3	-
Specific energy [mass] ^c	[kWh/kg _{carrier}]	33.3	33.3	33.3	5.93	4.20	2.05	15.3
Specific energy [volume] ^c	[kWh/L _{carrier}]	0.78	1.31	2.36	4.04	3.30	1.58	6.67
Energy to produce carrier	[kWh/kg _{carrier}]	1.67-4.4	6.7	6-15 ^d	2-4 ^e	2.06-2.83 ^f	0.04-0.07 ^g	0.33-0.7 ^h
Energy to produce carrier	[kWh/kg _{H₂}]	1.67-4.4	6.7	6-15 ^d	11.2-22.5	10.9-15 ^f	0.967	-
Energy for dehydrogenation	[kWh/kg _{H₂}]	-	-	-	7.94	6.7-15.4 ⁱ	9.7-11.2 ^j	-
End product consumed ^k	[%]	5-13.2	20	18.2-45.5	57.4-90.4	52.8-91.2	32-36.5	2.2-4.6
LCOP ^l	[US\$/kg]	0.22-0.28 ^m	2.83 ⁿ	1.1-2.8 ^o	1-2.17 ^p	2-4.17 ^q	0.58-1.56 ^r	0.03-0.21 ^s

^aCGH₂ – compressed hydrogen gas, LH₂ – liquid hydrogen, NH₃ – ammonia, MeOH – methanol, LOHC – methylcyclohexane. ^bVolumetric density is obtained using reference thermodynamic models implemented in REFPROP 10. ^cExcluding LNG, specific energy refers to amount of hydrogen available, in kWh equivalent terms, within one unit of carrier. LHV of hydrogen used: 120 MJ/kg and LHV of LNG [methane] used: 50 MJ/kg to calculate values. Molecular mass taken from the National Centre for Biotechnology Information. ^dIncludes current industrial hydrogen liquefaction plant technology and conceptual studies for a range of plant capacities, from 5 TPD to >50 TPD. 6 kWh/kg has been demonstrated in conceptual studies for plant capacities > 50 TPD. The specific energy consumption of liquefiers operated in the USA is stated to range between 12.5 and 15 kWh/kg_{H₂} for capacities between 5.4 and 32 TPD. ^eValue calculated from the energy requirements for ammonia synthesis [10-12 kWh/kg_{ammonia}]. ^fElectricity consumption to synthesise methanol from CO₂. This value includes energy requirement for water electrolysis to produce hydrogen. The study evaluates 2 different scenarios, transporting CO₂ and placing the CO₂ recovery facility nearby to the electrolyser. ^gRequired energy to hydrogenate toluene. ^hBased on the energy efficiencies on various natural gas liquefaction cycles. ⁱIncludes catalytic steam reforming of methanol: 6.7 kWh/kg_{H₂} and methanol electrolysis: 15.4 – 32.4 kWh/kg_{H₂}. The methanol electrolysis study referenced contains experimental data. Energy consumption is expected to decrease as the technology develops, hence the best case is stated. ^jRange varies due to the difference in enthalpies of dehydrogenation listed in the studies. ^kPercentage of end product consumed, either hydrogen or LNG. Calculated by total required energy to produce carrier [kWh/kg_{H₂}] over the specific energy of the end product. Hydrogen specific energy: 33.3 kWh/kg, LNG specific energy: 15.3 kWh/kg. ^lLCOP – Levelized cost of end product. Does not include hydrogen feed costs or transportation. ^mIncludes Capex, Opex for compression and storage. Modelling assumes storage capacity is charged and discharged on a daily basis from tanks of 100 m³ capacity. Stated cost is base case for the levelized cost of hydrogen. With key actions and improvements in technology, best case range is 0.17 – 0.21 US\$/kg. ⁿCost to compress and refuel 750 bar storage tank. ^oIncludes a range of values taken from conceptual studies. Base-case and best-case cost scenarios are included. ^pIncludes the cost associated with hydrogenation and dehydrogenation. ^qPrice range includes small- and large-scale methanol plants. Small scale – 350 TPD [MeOH], large scale > 1,000 TPD [MeOH]. ^rIncludes LOHC production, hydrogenation and dehydrogenation costs. ^sStudy quantitatively assessed various natural gas liquefaction processes. Costs include production, maintenance and amortized capital costs, excludes feed natural gas costs. The data was converted from \$/GJ to \$/kg using the LHV of LNG [methane, 50 MJ/kg].

Quelle: Al Ghafri et al., Hydrogen Liquefaction: A review of the Fundamental Physics, Engineering Practice and Future Opportunities, *Energy & Environmental Science*, 2021

Weiterführende Literatur

Further Reading

Eigenschaften von Wasserstoff in transportabler Form

Wasserstoff-Daten

unterer Heizwert	3,00 kWh/Nm ³	10,8 MJ/Nm ³
	2,359 kWh/l LH ₂	8,495 MJ/l LH ₂
	33,33 kWh/kg	120,0 MJ/kg
oberer Heizwert	3,54 kWh/Nm ³	12,75 MJ/Nm ³
	2,790 kWh/l LH ₂	10,04 MJ/l LH ₂
	39,41 kWh/kg	141,86 MJ/kg
Dichte	0,0899 kg/Nm ³	70,79 kg/m ³ LH ₂
Siedepunkt	20,390 K	
	(0,1013 MPa)	
unterer Wobbe-Index	11,361 kWh/Nm ³	40,898 MJ/Nm ³
oberer Wobbe-Index	13,428 kWh/Nm ³	48,340 MJ/Nm ³
spezifische Wärmekapazität	c _p = 14,199 J/kg/K	c _v = 10,074 J/kg/K
Explosionsgrenze in Luft		4,0 – 75,0 Vol.-%
Detonationsgrenze in Luft		18,3 – 59,0 Vol.-%
Diffusionskoeffizient	0,61 cm ² /s	

Der Energiegehalt von 1 Nm³ Wasserstoff entspricht 0,34 l Benzin, 1 l flüssiger Wasserstoff entspricht 0,27 l Benzin, 1 kg Wasserstoff entspricht 2,75 kg Benzin.

Gas-Umrechnungstabelle (m³ bei 15° C und 1 bar)

Gas*	m ³		kg	
	15° C	1 bar	flüssig	
H ₂	1	1,188	0,0841	
	454,3	0,842	1	0,0708
	-252,8	11,891	14,126	1

Kompressionsfaktor (273,15 K)

Druck (MPa)	0,1013	5	10	15	20
Kompressionsfaktor	1	1,032	1,065	1,098	1,132
Druck (MPa)	25	30	35	40	50
Kompressionsfaktor	1,166	1,201	1,236	1,272	1,344
Druck (MPa)	60	70	80	90	100
Kompressionsfaktor	1,416	1,489	1,560	1,632	1,702

Daten zu Energieträgern

Wasserstoff	3,00 kWh/Nm ³	33,33 kWh/kg
Rohöl	≈ 1 toe/t	≈ 11,6 kWh/kg
Diesel	≈ 10 kWh/l	≈ 11,9 kWh/kg
Benzin	≈ 8,8 kWh/l	≈ 12,0 kWh/kg
Methanol	4,44 kWh/l	5,47 kWh/kg
Methan	9,97 kWh/Nm ³	13,9 kWh/kg
Erdgas	8,8 – 10,4 kWh/Nm ³	10,6 – 3,1 kWh/kg
(82 – 93 % CH ₄)		
Propan	25,89 kWh/Nm ³	12,88 kWh/kg
Buthan	34,39 kWh/Nm ³	12,7 kWh/kg
Stadtgas**	4,54 kWh/Nm ³	7,57 kWh/kg








LH₂: 100 % para-Wasserstoff
Normbedingungen: 273,15 K; 0,1013 MPa

* Verdampfungswärme und Siedetemperatur bei 1,013 bar.
** (51 %_{vol} H₂; 18 %_{vol} CO; 19 %_{vol} CH₄; 2 %_{vol} C₂H₆; 4 %_{vol} CO₂; 6 %_{vol} N₂)
Alle Angaben ohne Gewähr.

Umrechnungsfaktoren

Energie		
von	in	multiplizieren mit
MJ	kWh	0,2778
toe	kWh	11.630
BTU	kWh	0,2931 x 10 ⁻³
kWh	MJ	3,6
toe	MJ	41.868
BTU	MJ	0,001055
kWh	BTU	3.412
MJ	BTU	947,9
toe	BTU	39,7 x 10 ⁶
kWh	toe	86,0 x 10 ⁻⁶
MJ	toe	23,88 x 10 ⁻⁶
BTU	toe	25,19 x 10 ⁻⁹
Druck		
bar	MPa	0,1
psi	MPa	0,006895
MPa	psi	145
bar	psi	14,5
MPa	bar	10
psi	bar	0,06895
Volumen		
scf	Nm ³	(Normbedingungen) 0,0283
Nm ³	scf	35,31

Quelle: https://www.linde-gas.at/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110_tcm550-169419.pdf

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution Share Alike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution No Derivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution Non Commercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution Non Commercial Share Alike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution Non Commercial No Derivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA
Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0