



Die Elektrolyse von Wasser im Wandel der Zeit

aktuelle Herausforderungen und die Bedeutung des Strukturmodells von Wasser

Franca Drexler

Professor Dr. Bernhard Neumann (Hochschule Merseburg)

Dr. Jürgen Koppe (Geschäftsführer MOL Katalysatortechnik GmbH)

Die Elektrolyse von Wasser im Wandel der Zeit

aktuelle Herausforderungen und die Bedeutung des Strukturmodells von Wasser

1. Die Bedeutung und Verwendung von Wasserstoff früher und heute
2. Die Entwicklung der Wasserelektrolyse
3. PEM-Elektrolyse
 - a) Aufbau und Funktionsweise
 - b) Beispiel-Anlage
 - c) Anforderungen an moderne Anlagen
 - d) *Neue Ansätze zur Leistungssteigerung*
4. Die Bedeutung des Strukturmodells von Wasser bei der Elektrolyse
 - a) Wasser als Elektrolyt
 - b) Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit
5. Beobachtungen bei Laborexperimenten
6. Zusammenfassung

1. Die Bedeutung und Verwendung von Wasserstoff

- **Kohlehydrierung** (seit 1913)
- Reduktionsmittel bei **Verhüttung von metallischen Erzen**
- **Ammoniak** – für Düngemittel und Sprengstoffe (seit 1913)
- **Fetthärtung**
- **Kühlmittel** / Kryogen
- **Traggas** in Ballons und Luftschiffen (bis Anfang 20. Jhd.)
- **Energieträger** (Schweißen, Raketentreibstoff, Kraftstoff für Strahltriebwerke)



Abbildung 1: Ammoniakreaktor (Chemiemuseum Merseburg) [1]

1. Die Bedeutung und Verwendung von Wasserstoff

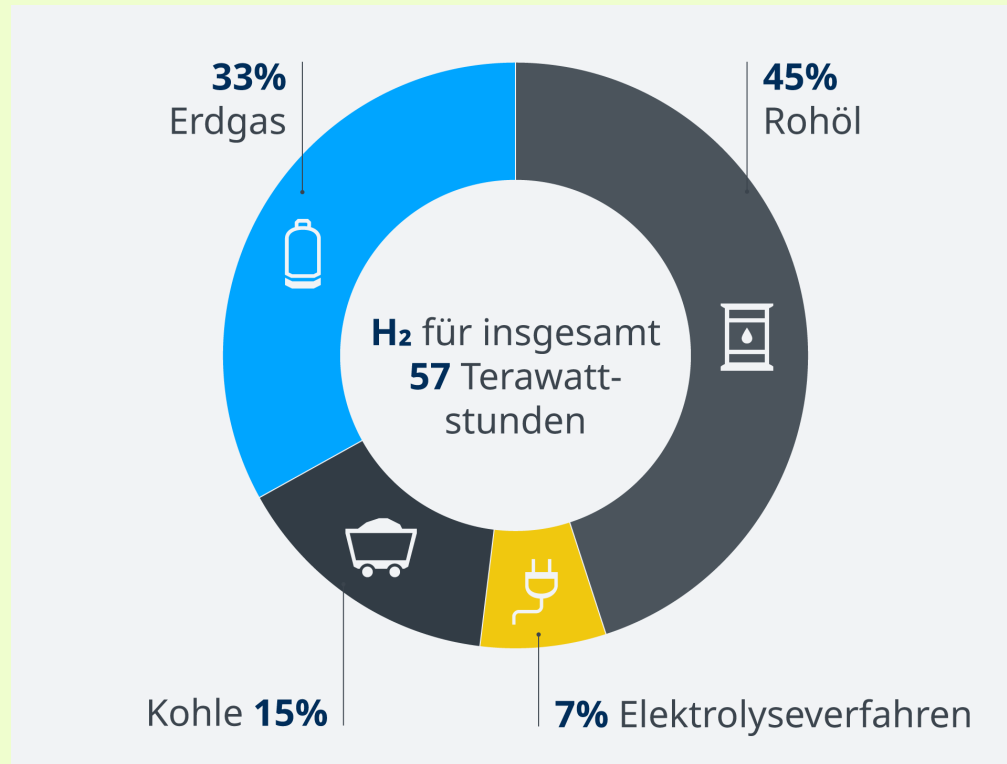


Abbildung 2: Wasserstoffherstellung in Deutschland (2015) [2]



Abbildung 3: Prognostizierter Wasserstoffbedarf in Deutschland [TWh/Jahr] [3]

2. Die Entwicklung der Wasserelektrolyse

- 1800: Durchführung erster Elektrolysen von JOHANN WILHELM RITTER
- 1834: MICHAEL FARADAY: Beschreibung der Begriffe Elektrolyse, Elektrolyt, Anode, Kathode; Formulierung der Faraday'schen Gesetze
- 1890: Chloralkali-Elektrolyse zur Gewinnung von Natronlauge (1. Anlage in Griesheim)
- 1970er: Polymer-Elektrolyt-Membran-(PEM-) Elektrolyse bei *General Electric* nach der Entwicklung des Nafion[®] von WALTER GROT

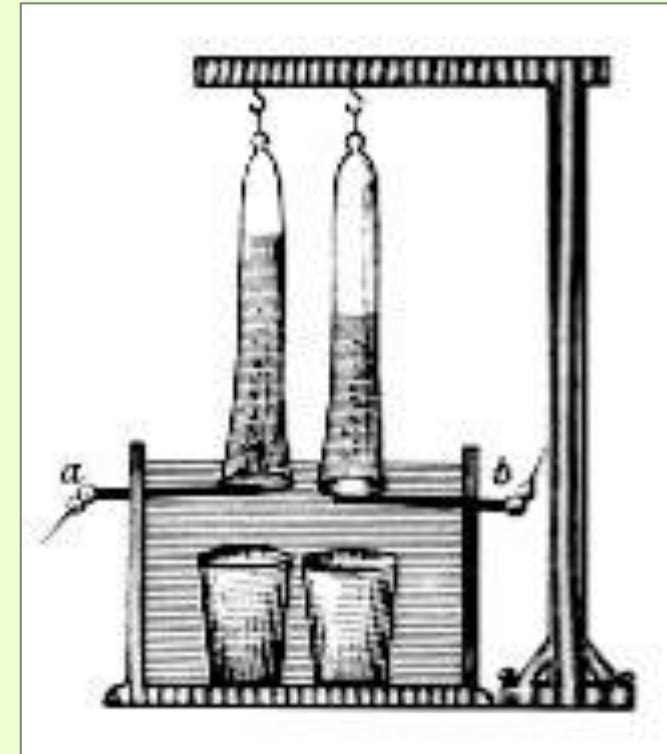


Abbildung 4: Wasserelektrolyse durch Johann Wilhelm Ritter [4]

3. PEM-Elektrolyse: a) Aufbau und Funktionsweise

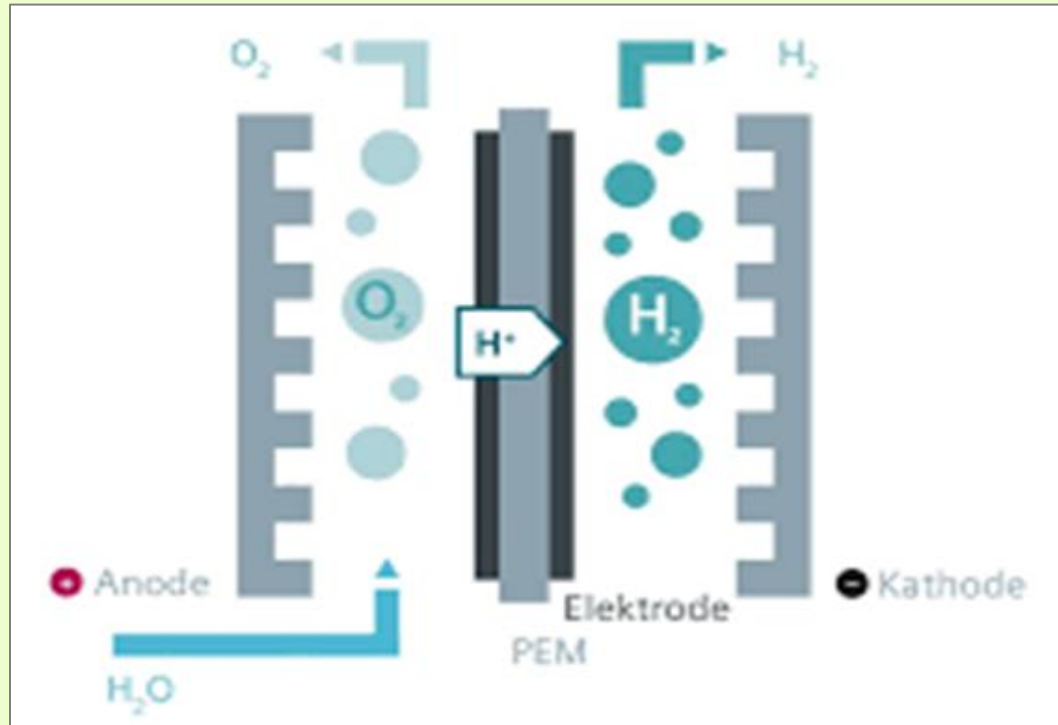
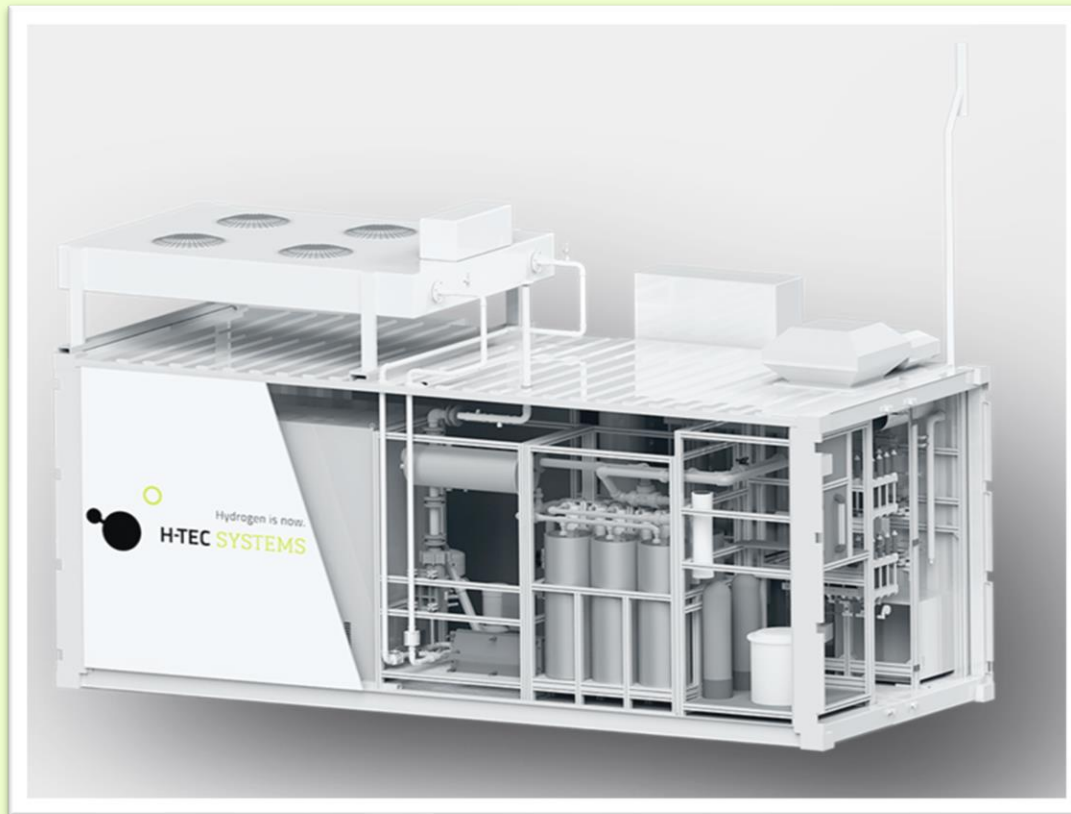


Abbildung 5: Schema einer PEM-Elektrolysezelle

- Elektroden aus Platin (Kathode) und Iridiumoxid (Anode)
- Elektrolyt aus festem Polymermaterial (Nafion®; gute Leitfähigkeit für Protonen; hydrophil; Anlagerung von molekularem Wasser)
- Einsatzstoff: Wasser
- anodische Teilreaktion: $2 H_2O \rightarrow O_2 + 4 H^+ + 4 e^-$
- kathodische Teilreaktion: $4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2$
- Gesamtreaktion: $2 H_2O \rightarrow O_2 + 2 H_2$
- $E_{Z,ideal} = 1,23 V$

3. PEM-Elektrolyse: b) Beispiel-Anlage



PEM-Elektrolyseur von H-TEC-Systems

- Wasserstoffproduktion: 13-66 m³/h
- Energieverbrauch: 4,9 kWh/m³
- Systemwirkungsgrad: 74%
- Betriebsdruck H_2 : 1-30 bar
- Container 6 m x 3 m x 3,5 m

Abbildung 6: Elektrolyseur „ME 100/350“ [6]

[6] https://www.h-tec-systems.com/fileadmin/Content/PDFs/19022019/H-TEC_SYSTEMS_Datenblatt_Elektrolyseur_ME100_350_DE.pdf

3. PEM-Elektrolyse:

c) Anforderungen an moderne Anlagen

→ Wasserstoff aus erneuerbaren Energie-Quellen



→ Einsatz als Energieträger im Verkehrssektor, in der Industrie und für Haushalte

→ dezentrale, leistungsstarke Elektrolyseanlagen

- Zielstellung: Senken des Energieverbrauches, Erhöhung der Stromdichte, Verlängerung der Lebensdauer, Senken der Betriebs- und Instandhaltungskosten

3. PEM-Elektrolyse:

d) neue Ansätze zur Leistungssteigerung

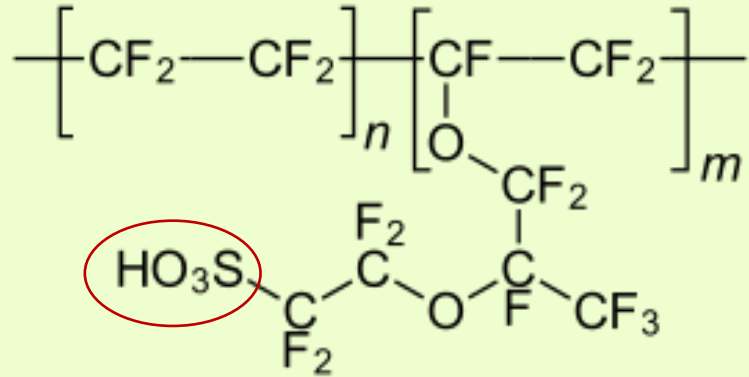


Abbildung 7: Strukturformel von Nafion® [7]

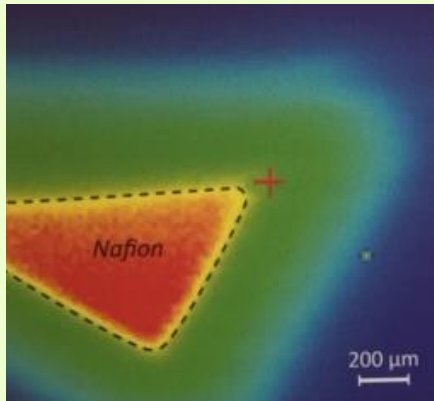


Abbildung 8: Nafion in Wasser, untersucht mit Infrarotabsorption [8]

- **Ansatz für Verbesserung: MOL®LIK sowohl als katalytisch aktive Komponente als auch für die Bereitstellung von molekularem Wasser**

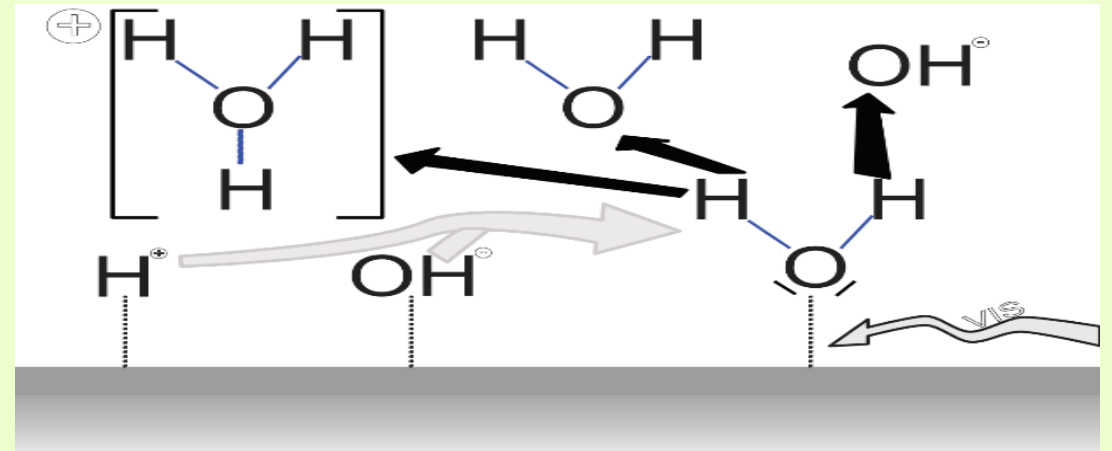


Abbildung 9: Schema der Wirkungsweise von MOL®LIK [9]

4. Die Bedeutung des Strukturmodells von Wasser bei der Elektrolyse

a) Wasser als Elektrolyt

- In Wasser gibt es leitende und nichtleitende Bereiche
- -> starre Cluster und bewegliche Moleküle
- -> Erhöhung der Leitfähigkeit durch Erhöhung der Anzahl beweglicher Moleküle

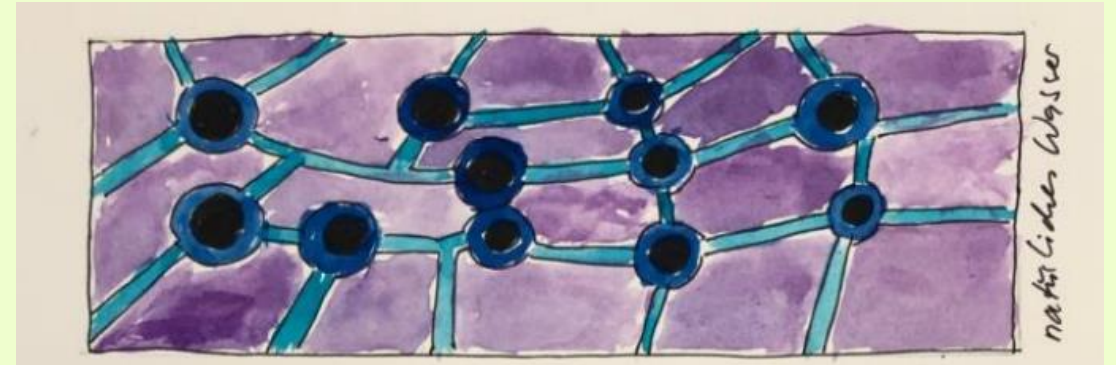
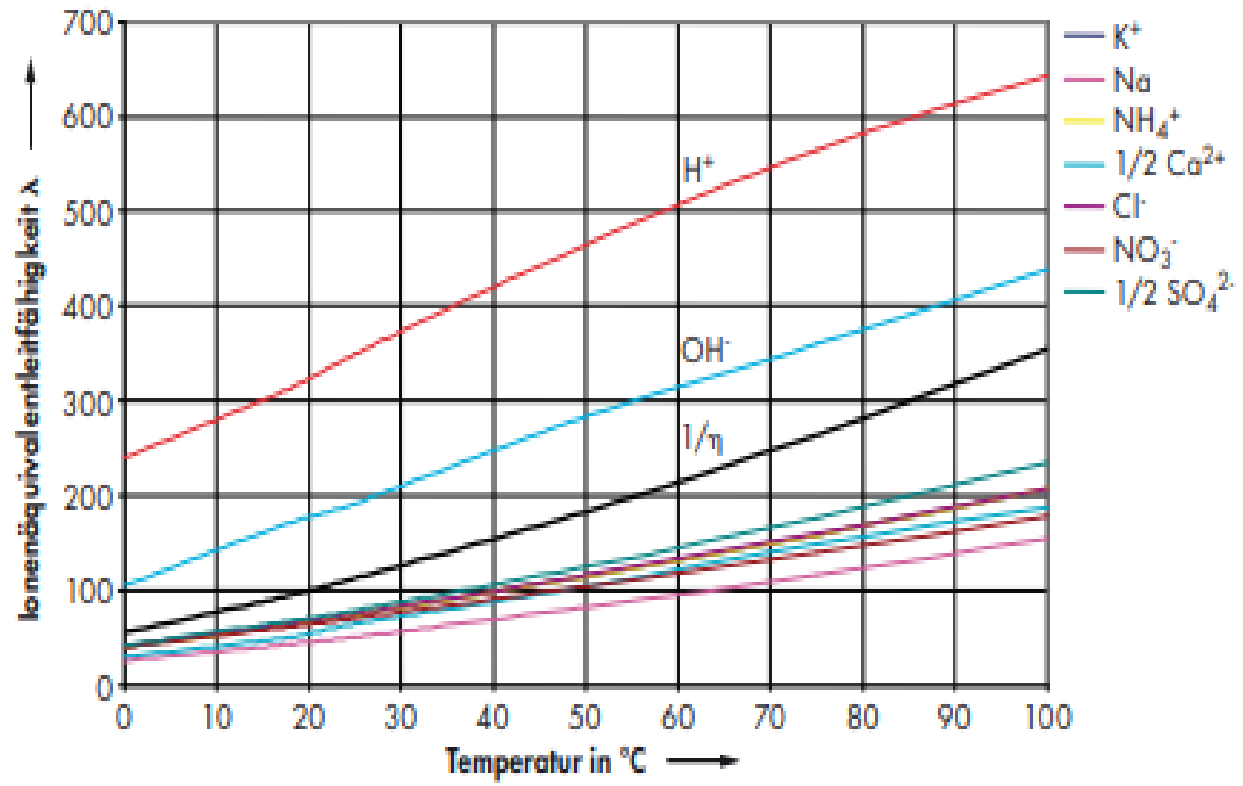


Abbildung 10: Zeichnung der Strukturen im Wasser: violett = Cluster; dunkelblau = molekulares Wasser [10]

4. b) Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit

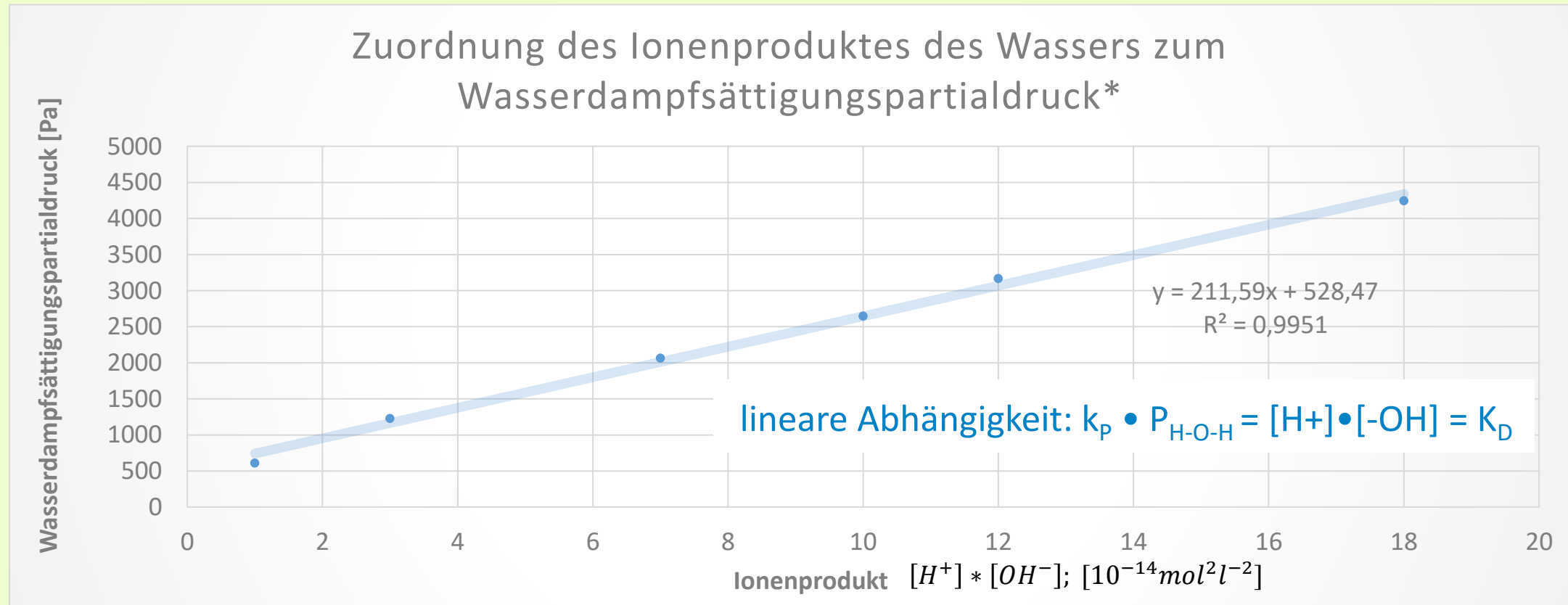


- Je höher die Temperatur des Elektrolyten, desto höher seine Leitfähigkeit.
- Wasserstoffionen und Hydroxydionen sind sehr leitfähig, jedoch ist der Anteil von dissoziierten Ionen in Wasser so gering, dass es in reiner Form kaum leitend ist.

Abbildung 11: Temperaturabhängigkeit der Ionenäquivalentleitfähigkeit [S*cm²/mol] und der reziproken Viskosität von Wasser

[11] Heinz Wagner: Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit verdünnter, wässriger Lösungen; 2012

4. b) Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit



Höhere Temperatur → höherer Wasserdampfpartialdruck
→ größerer Anteil an molekularem Wasser
→ mehr Dissoziation zu Ionen → Leitfähigkeit steigt

5. Beobachtungen bei Laborexperimenten

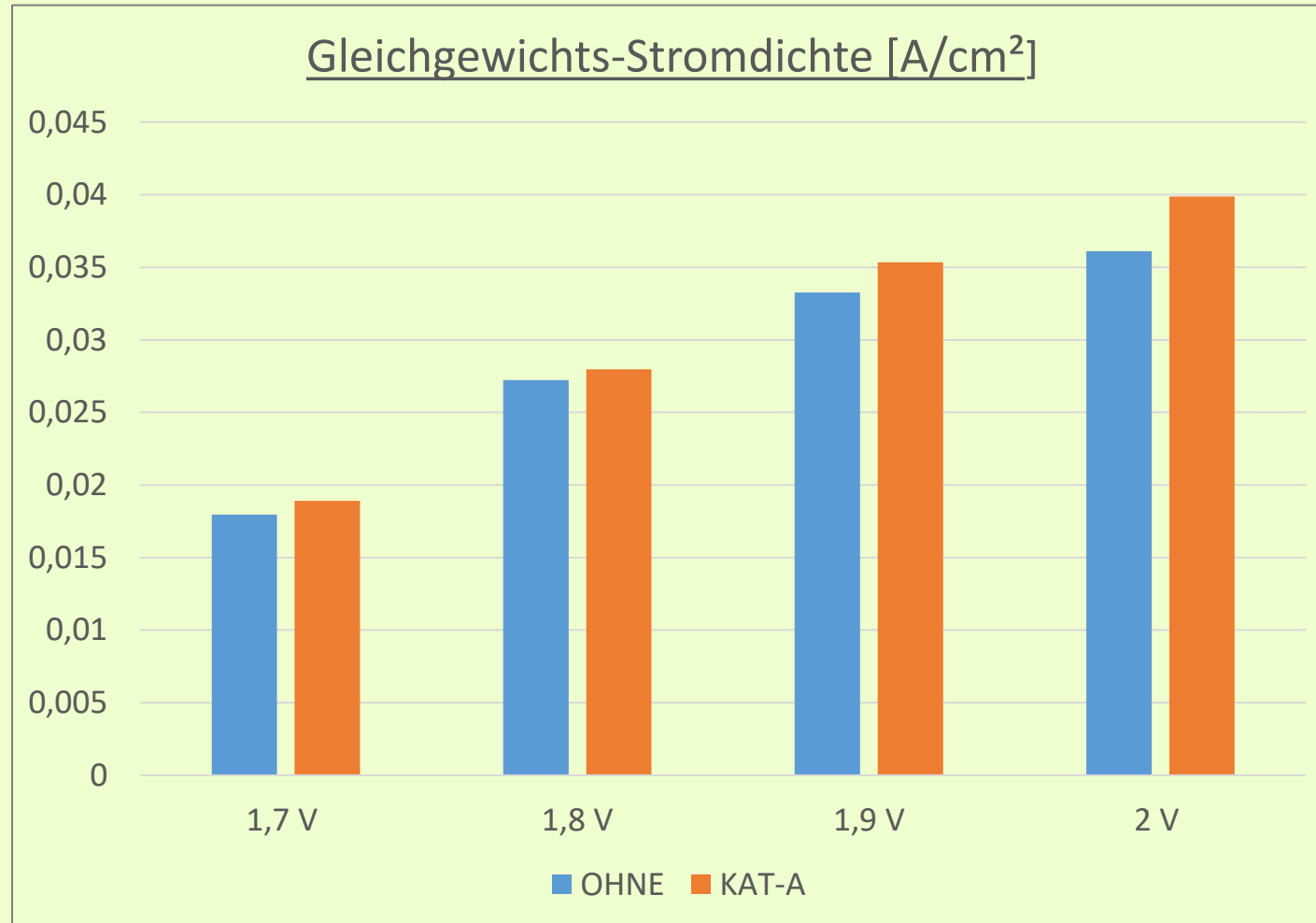
Folgende Werte wurden bei unterschiedlichen Klemmspannungen ohne Kat/ mit MOL[®]LIK-Kat gemessen bzw. berechnet:

- Stromdichte
- Wirkungsgrad
- Zeitlicher Verlauf der Stromstärke



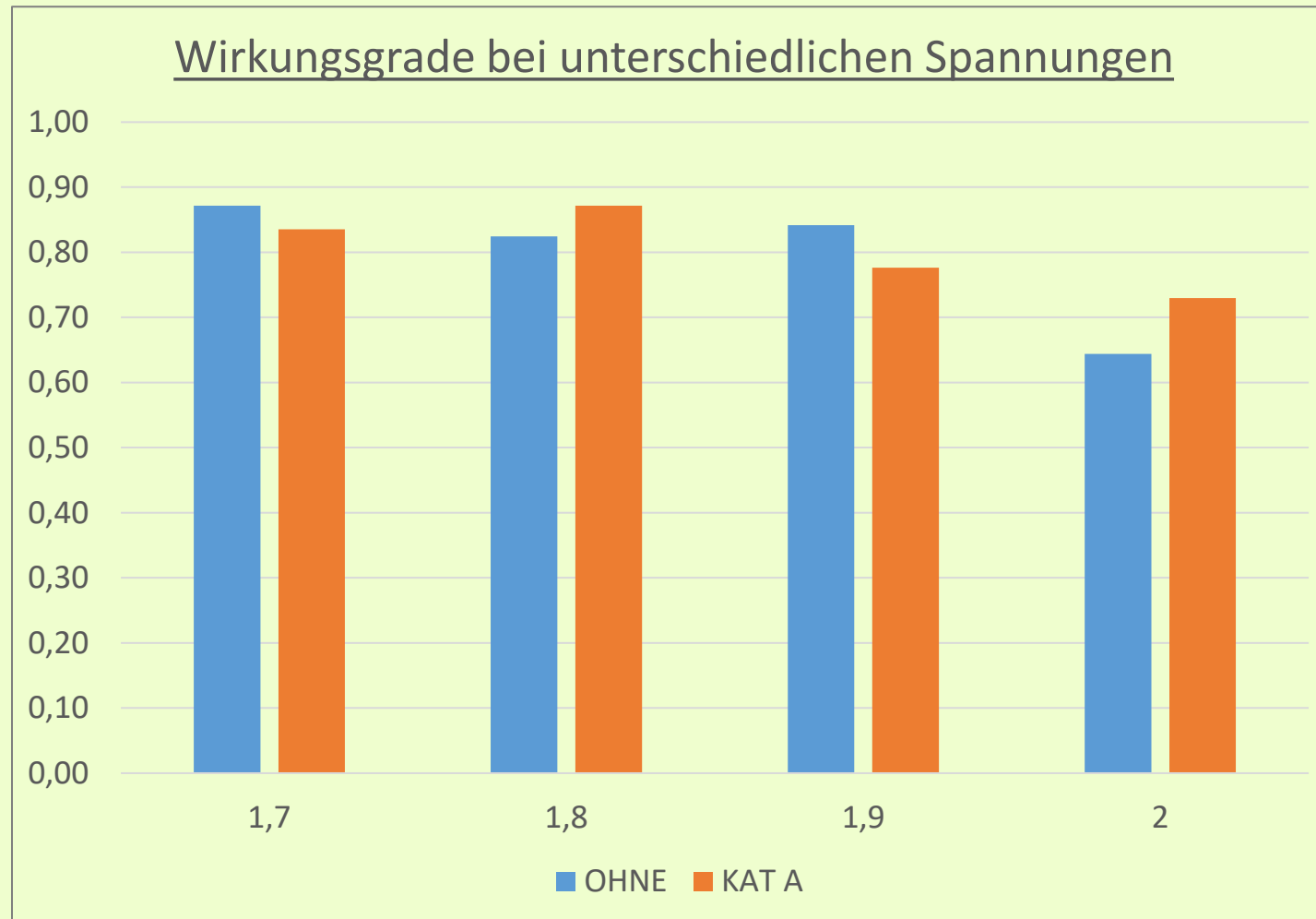
Abbildung 12: Versuchsaufbau – Computer für Datenverarbeitung, Stromversorgungsgerät, Messgeräte zum Aufnehmen der Spannung/ Stromstärke, reversible PEM-Brennstoffzelle mit Vorratsbehältern für Produktgase

5. Beobachtungen bei Laborexperimenten



- Stromdichte umso größer, je höher die angelegte Klemmspannung
- Bei Verwendung des MOL[®]LIK Katalysators leichte Erhöhung der Stromdichte

5. Beobachtungen bei Laborexperimenten



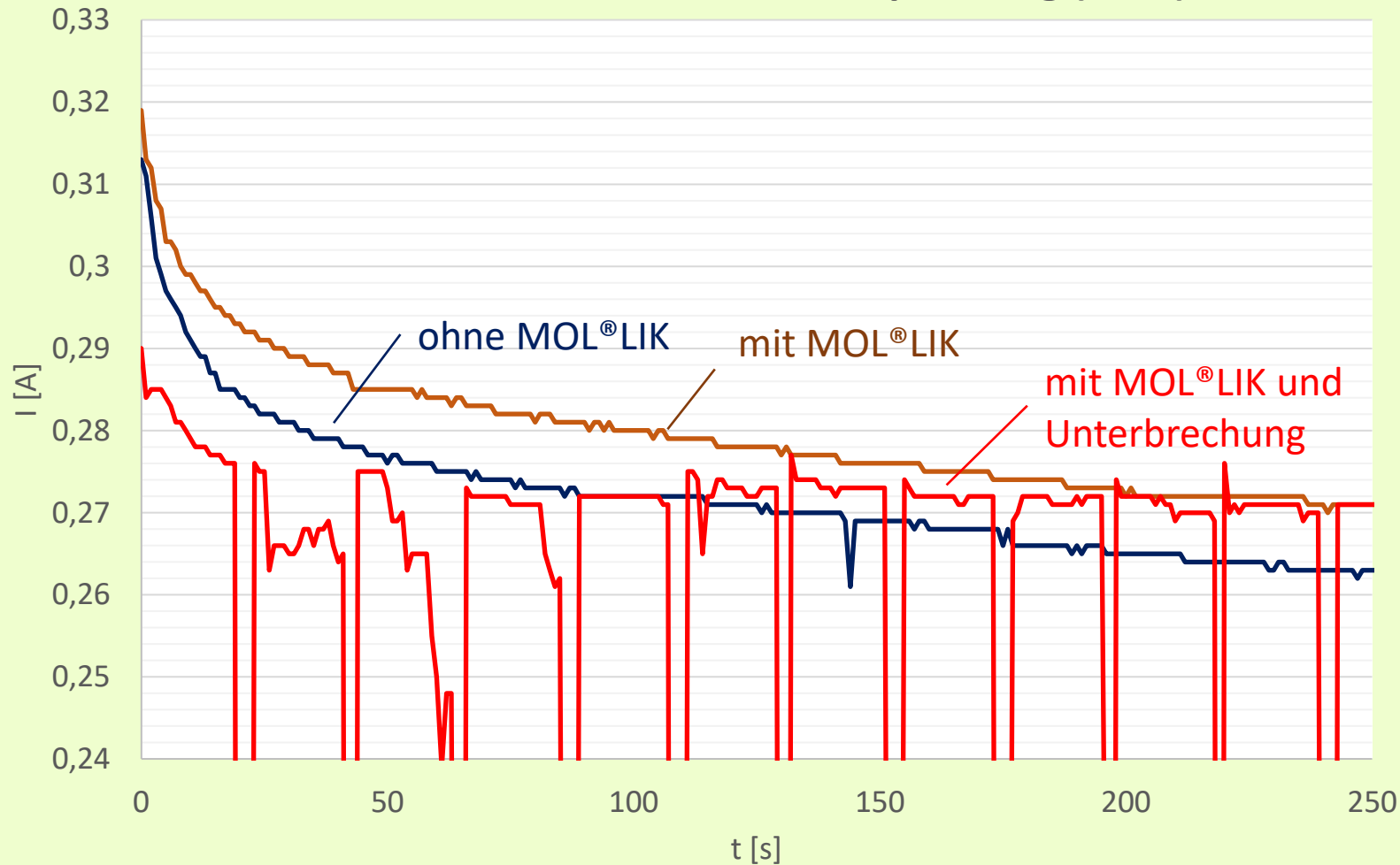
- Berechnung der energetischen Wirkungsgrade mit:

$$\varepsilon(DC) = \frac{V(H_2) * H_o}{W_{el}}$$

- Wirkungsgrad bei 1,7 V/ 1,8 V am größten

5. Beobachtungen bei Laborexperimenten

Vergleich der Wasserelektrolyse mit und ohne Katalysator bei konstanter und alternierender Spannung (1,9V)



- Wenn die Spannung alle 20 s für 2 s unterbrochen wird, kann die Stromstärke über lange Zeit auf einem hohen Level gehalten werden
- Erklärungsansatz: unter Spannung stehende Cluster-Strukturen werden entspannt und die Beweglichkeit von Wassermolekülen wird erleichtert

6. Zusammenfassung

- Die PEM-Elektrolyse erfüllt die Anforderungen an die Wasserstoffherstellung aus erneuerbaren Energien.
- Um den Einsatz der PEM-EL auch in dezentralen Kleinanlagen möglichst effizient zu gestalten und damit Kosten zu sparen, können alternative Materialien eingesetzt sowie die Betriebsweise angepasst werden.
- Der MOL[®]LIK Katalysator zeigt in Laborversuchen positive Effekte bei der PEM-EL. Durch die Bereitstellung von ausreichend molekularem Wasser bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck können Kosten eingespart und Materialbeanspruchung reduziert werden.
- Eine alternierende Stromzufuhr hat sich bei Laborversuchen als gute Methode gezeigt, über einen längeren Zeitraum die Stromdichte bei der Elektrolyse konstant zu halten.