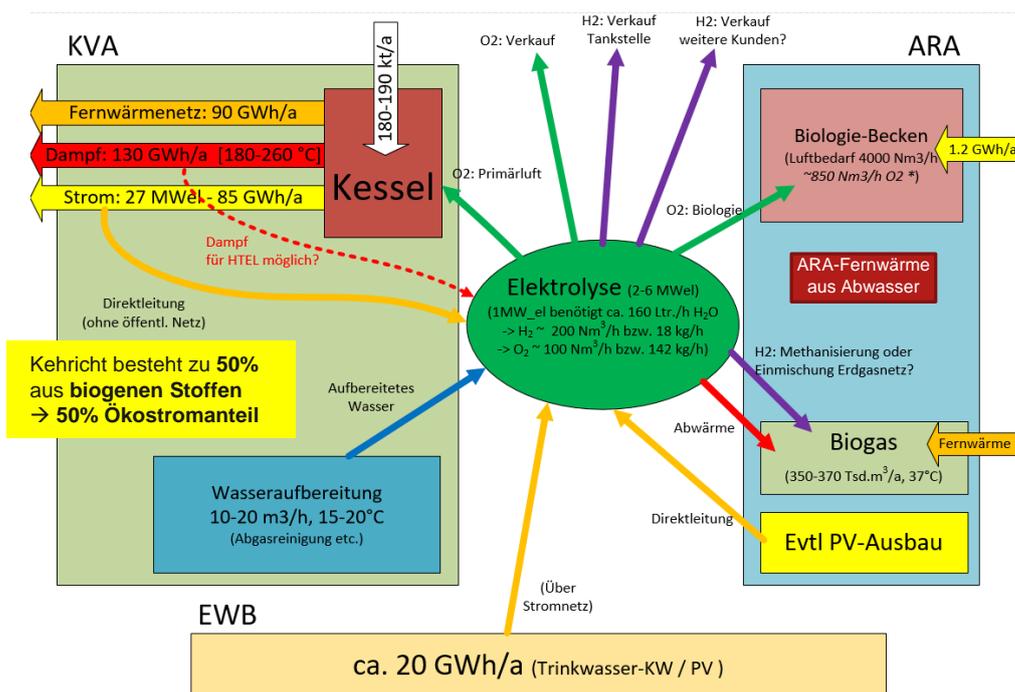


Wasserstoff & Sektorkopplung beim Verein für Abfallentsorgung Buchs (SG)

ExpertInnengespräche Power-to-X, am 24. März 2022
OST – IET, Rapperswil

Matthias Berthold
Matthias.Berthold@ost.ch
Telefon Nr.: +41 58 257 31 51
Technik Buchs / Institut für Energiesysteme (IES)
Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES

Sektoren & Mengenbilanz KVA Buchs (SG)



Sektor Kopplung im KVA

Optionen Kehricht in

- ✓ Wärme
- ✓ Strom
- Gas - Wasserstoff (?)
 - Mobilität
 - Industrie

Grundsätzliches zu Wasserstoff

Wasserstoff

- ist das häufigste Element auf der Erde -> keine «Knappheit»
- kann nachhaltig gewonnen werden («Grüner Wasserstoff»)
- saubere Verbrennung, da ausschliesslich Wasser entsteht
- hat die höchste gravimetrische Energiedichte [kWh/kg]
(aber nur sehr geringe volumetrische Energiedichte [kWh/Nm³])
- ist das Element mit der geringsten Dichte (14,4-mal weniger dicht als Luft)



Eigenschaft	Wasserstoff	Vergleich
Dichte (gasförmig)	0.089 kg/m ³ (0°C, 1 bar)	1/10 von Erdgas, 1/14 von Luft
Dichte (flüssig)	70.79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	1/6 von Erdgas
Siedepunkt	-252.76°C (1 bar)	90°C unterhalb von Flüssigerdgas
Gravimetrische Energiedichte (Heizw.)	33.3 kWh/kg	ca. 3-mal so hoch wie Benzin / Diesel
Volumetrische Energiedichte (Heizw.)	3 kWh/Nm ³	1/3'000 von Benzin / Diesel (p=1 bar)
Selbstzündtemperatur	585°C	220°C bei Benzin

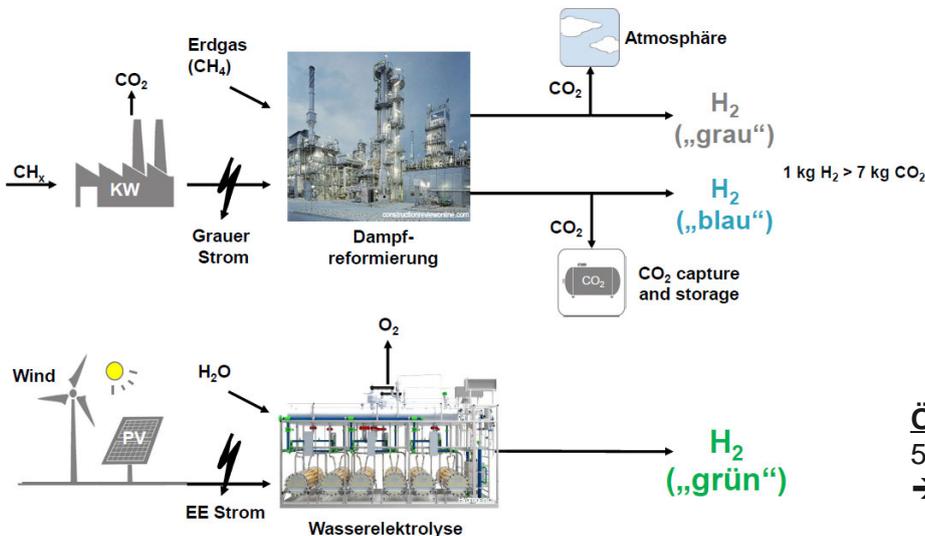
Quelle: Sterner, Energiespeicher, 2017, Seite 353 u.ff.



Wasserstoff-Gewinnung: Grau, Blau und Grün

Grauer - Blauer - Grüner Wasserstoff

Dampfreformierung - Wasserelektrolyse



Ökostrom beim KVA?
50% biogener Anteil bei Kehricht
→ 50% Ökostromanteil



© SIZ-EGS . www.siz-egs.de . 8. PL Treffen Energiewende Bauen . 14.5.2020

Quelle: \04_Recherche_Datenblätter\2020_05_Esslingen_West_P2G2P_1MW_AEL.pdf



Vergleich der unterschiedlichen Technologien:

	AEL (Alkalische El.)	PEM (Proton Exchange M.)	HTES (Hochtemp. El.)
Betriebstemperatur [°C]	40-90	20-100	700-1000
Druck [bar]	1-30	(1)-30-50	ca. 30
Eta-Elektrolyse [%] (Sternera):	62-82 %	67-82 %	65-82 %
Eta-Elektrolyse [%] (IEAb):	63-80 %	56-74 %	74-90 %
	61 % (Gesamt)	57% (Gesamt)	
Lastwechsel [%/s]a)	< 1 %/s	ca. 10 %/s	ca. 0.05 %/s
Lastbereich / Nennlast [%]b):	10-110 %	0-160 %	
Stack-Lebensdauer b)	60-90 Tsd. h	30-90 Tsd. h	
Kraftanlagen (2020):	80 Tsd. h	80 Tsd. h	
2014 Investitionskosten a) [€/kW]	800-1'500 EUR/kW	2'000-6'000 EUR/kW	
2019 Investitionskosten b) [\$/kW]	500-1'400 USD/kW	1'100-1'800 USD/kW	
Vorteile (AEL & PEM):	+ geringere Investkosten + etwas höhere Effizienz	+ hohe Leistungsgradienten + weniger Platzbedarf (ca. 1/2)	

Quellen:

a) Sterner, «Energiespeicher», 2017

b) [iea, „The future of hydrogen - Seizing today's opportunities,“ International Energy Agency, June 2019](#)

Systemgrenzen Elektrolyse bei KVA (für Gestehungskosten)

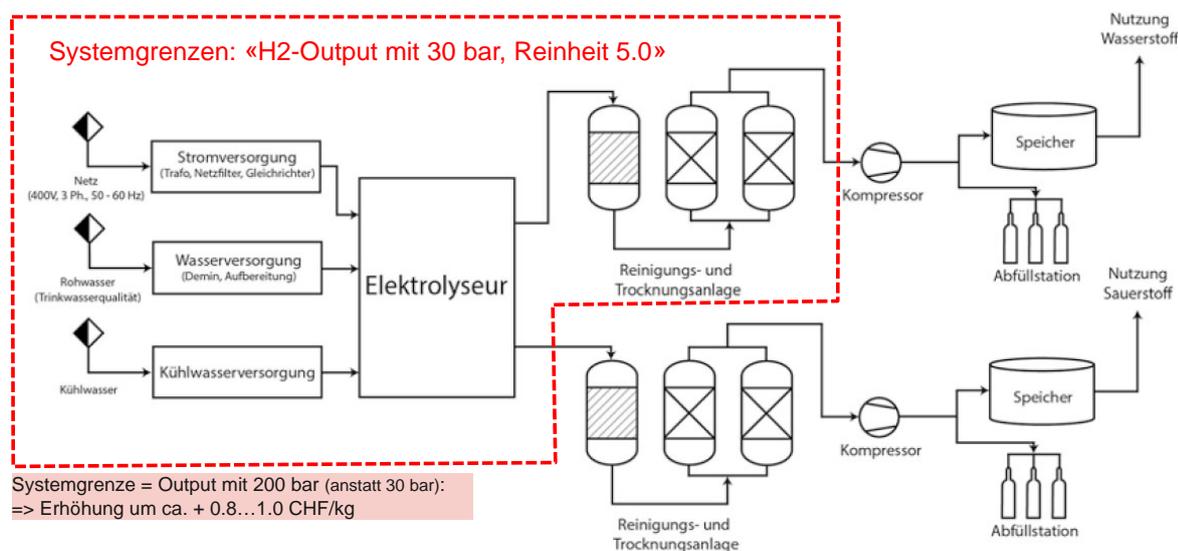
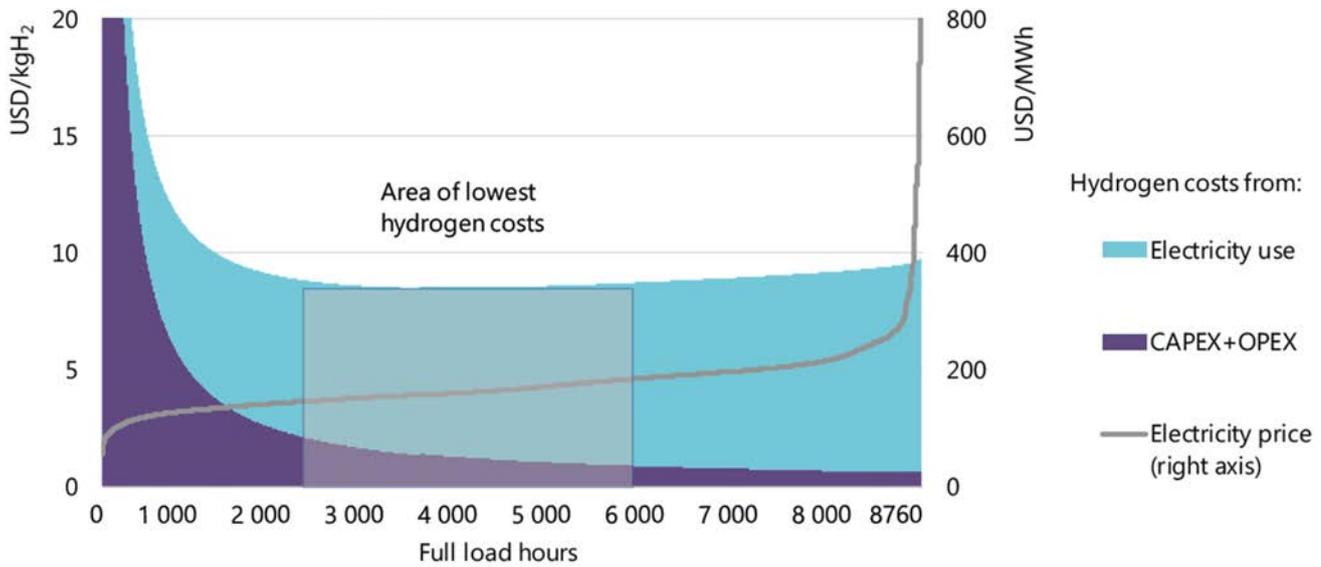


Abb. 8.17 Anlagenschema der Druckelektrolyse, nach [127]

Bildquelle: Sterner, Energiespeicher, 2017, Seite 356, Systemgrenzen eigene Adaption

Gestehungskosten-Abhängigkeit von Volllaststunden & Strompreis



Quelle: [iea, „The future of hydrogen - Seizing today's opprotunities.“ International Energy Agency, June 2019](#)

7 | Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES

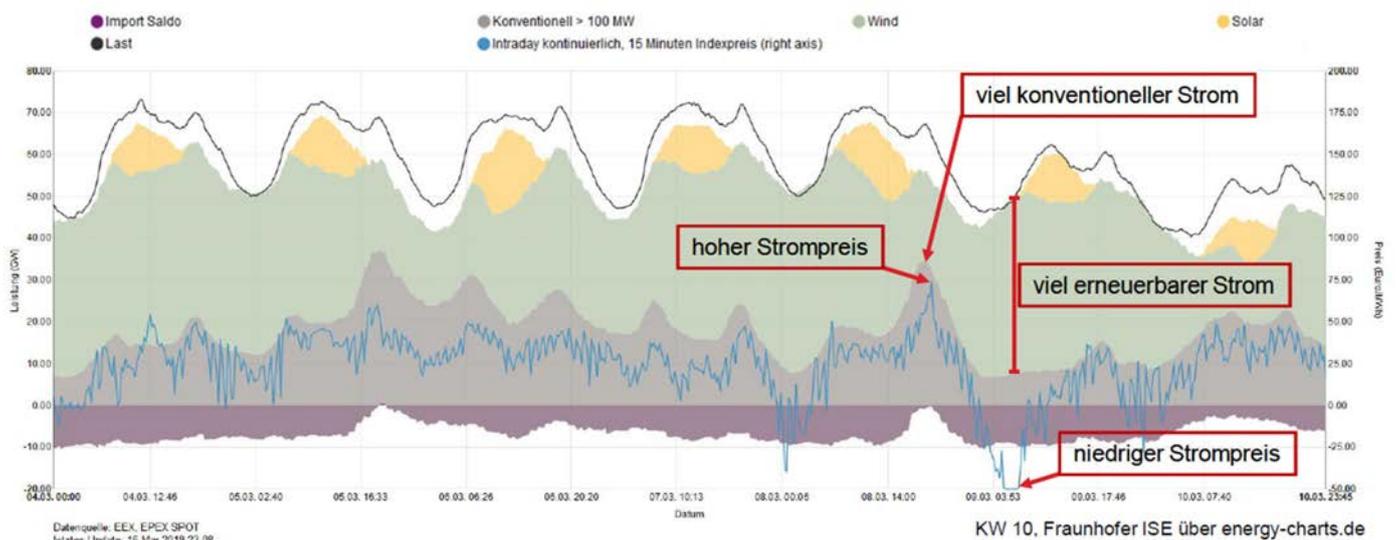
PtX-Expertinnengespr. (24.3.2022, Rapperswil)



Generelle Elektrolyse Betriebsweise «Energiewendeditlich» → Speichermöglichkeit für nEE-Einspeisung !!!

Günstiger Strom korreliert mit nEE-Einspeisung

→ Energie-Wende-Dienlicher Einsatz der Elektrolysen aus „Kostengründen“ (3'000...6'000 Volllaststunden angestrebt)!



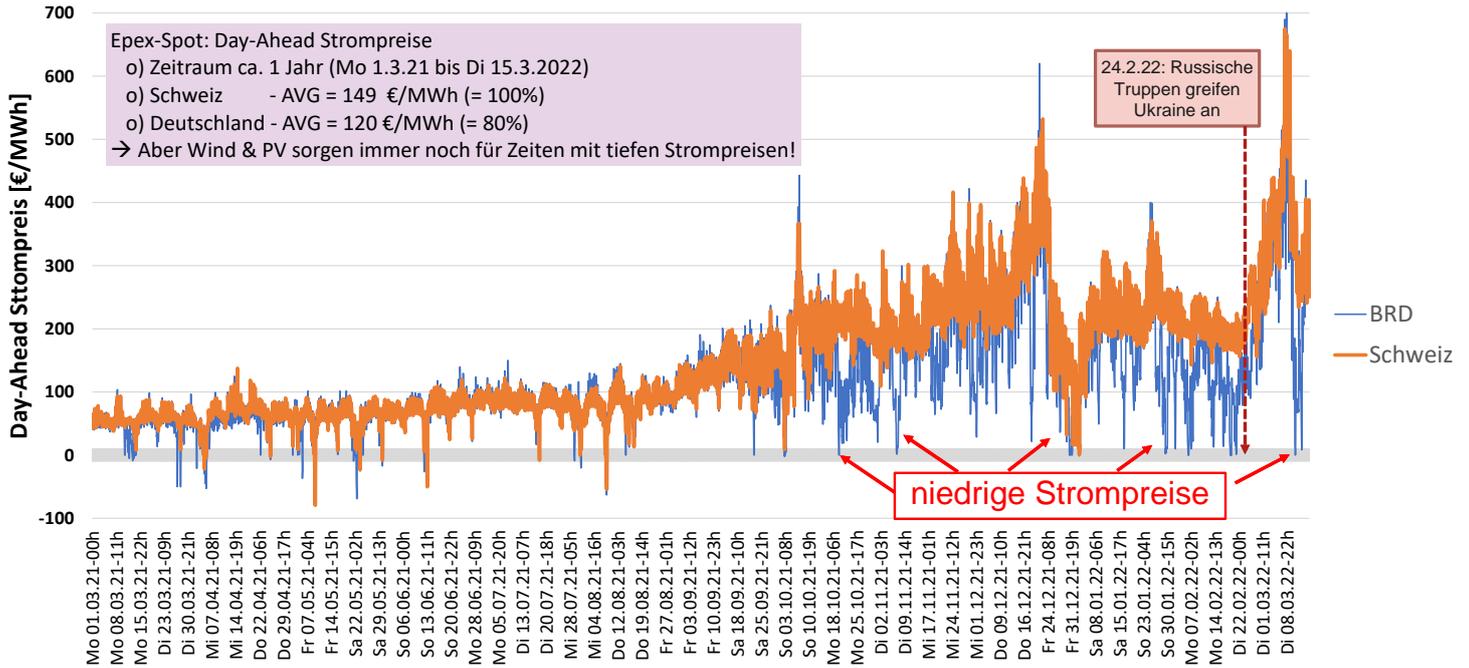
Quellen: [\04_Recherche_Datenblätter\2020_05_Esslingen_West_P2G2P_1MW_AEL.pdf](#)

8 | Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES

PtX-Expertinnengespr. (24.3.2022, Rapperswil)



Aktuelle Herausforderung: „Hohe Strompreise“



Datenquelle: <https://www.smard.de/home/downloadcenter>, Epex-Spot, abgerufen am Di 15.3.2022

9 | PtX-Expertinnenngespr. (24.3.2022, Rapperswil)

Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES



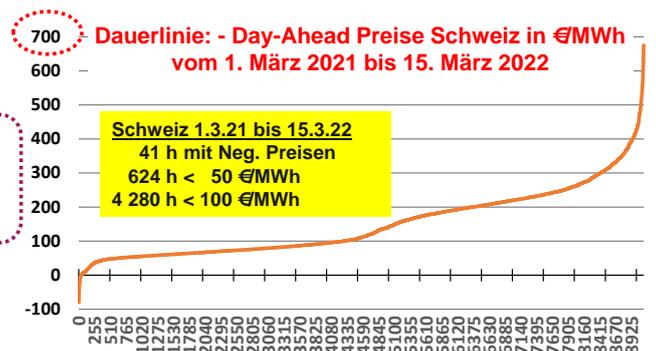
Gestehungskosten-Vergleich: 2.5 MW PEM & 5 MW AEL

		2.5 MW PEM	5 MW AEL
Stromversorgung	Mio. CHF	1	1
Lebensdauer Stromvers.	a	50	50
Leistung Elektrolyser	MW	xxx	xxx
Gesamtkosten für Anlage	Mio. €	xxx	xxx
Gesamtkosten für Anlage	Mio. CHF	xxx	xxx
spez. Betriebskosten	OPEX % CAPEX	xxx	xxx
Anlagen-Kosten pro W	CHF/W	1.xx	1.xx
	€/W	1.xx	1.xx
Effizienz Elektrolyseur (* / Heizwert)	kWh/Nm ³	5.3	4.9
Energiebedarf - Peripherie	% des Elekt	xxx	xxx
Volllaststunden	h/a	xxx	xxx
Energiepreis	Rp/kWh	xxx	xxx
Kapitalzins	%	xxx	xxx
Lebensdauer Betriebsstd.	a	80'000	80'000
Lebensdauer Anlage	a	20	20
		Gesamt-Anlage	Gesamt-Anlage
spez. Investitionskosten	CAPEX CHF/a	xxx	xxx
spez. Betriebskosten	OPEX CHF/a	xxx	xxx
Energiekosten:	CHF/a	xxx	xxx
20 kV Anschlusskosten	CHF/a	xxx	xxx
Gesamtkosten:	CHF/a	xxx	xxx
Gestehungskosten H2	CHF/Nm ³	xxx	xxx
bezogen auf Heizwert	CHF/kg	xxx	xxx
	Rp./kWh	xxx	xxx
	Rel. Preis	xxx	xxx
Gestehungskosten in €/kg	€/kg	xxx	xxx

Aufteilung der Gestehungskosten:

- **Energiekosten-Anteil:** 50%...56%
- **CAPEX:** 32%...35%
- **spez. Betriebskosten:** 10%
- **elektr. Anschlusskosten:** 3%...5%

=> Herausforderung: steigende Strompreise!



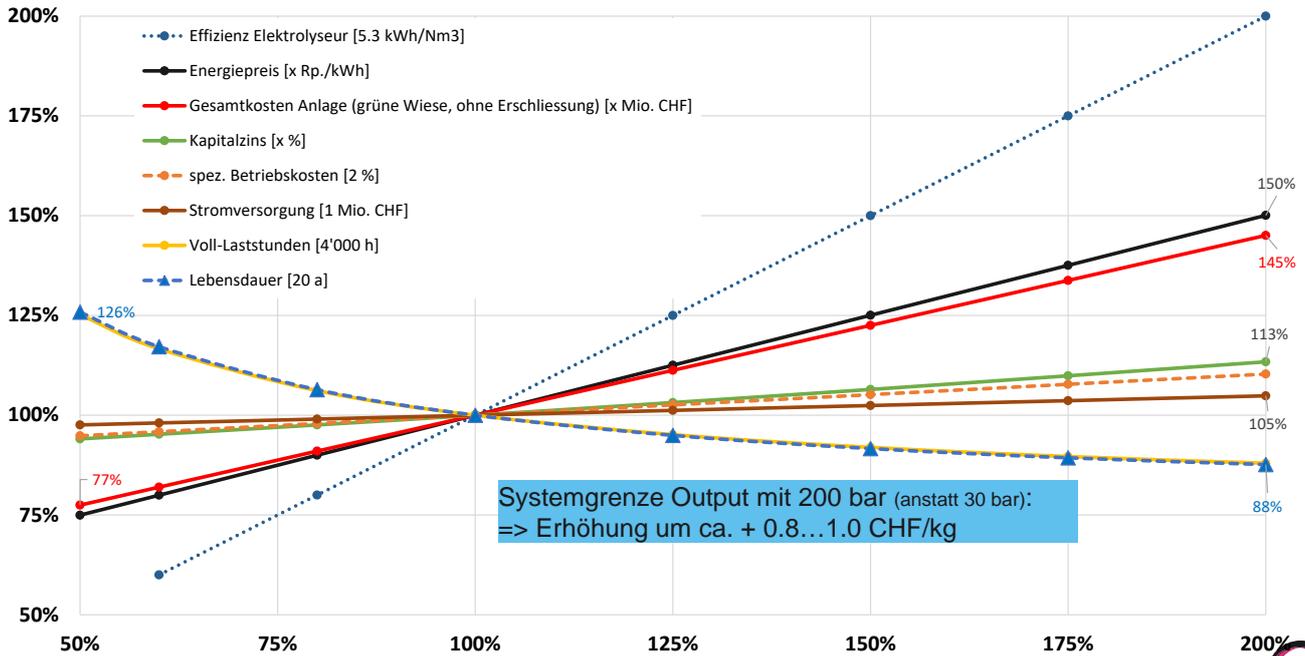
10 | Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES

PtX-Expertinnenngespr. (24.3.2022, Rapperswil)



Sensitivitätsanalyse 80 Tsd. Betriebsstunden (20 Jahre)

Sensitivitätsanalyse - Gestehungskosten H2 (100% = x CHF/kg = xx Rp/kWh)



Einordnung typischer Preise & Kosten (bisherige Anlagen & Angaben)

H₂-Verwertung

Bewertung der Wirtschaftlichkeit



H2 Gestehungskosten:

- WK-Aarau¹: 9.1 €/kg
- Esslingen: 5 – 7 €/kg

H2 Verkaufspreise:

- Mobilität: 4 – 10 €/kg
- Industrie: 2 – 8 €/kg
- Gasnetzeinspeisung: 1 – 2 €/kg
- Rückverstromung: 1 – 2 €/kg

H₂-Menge: 170 to /a (2.5 MW, 4'000h)
367 to /a (5.0 MW, 4'000h)

Datenquelle H₂-Erlöse: i.a. Potenzialstudie P2G, dena, 2016



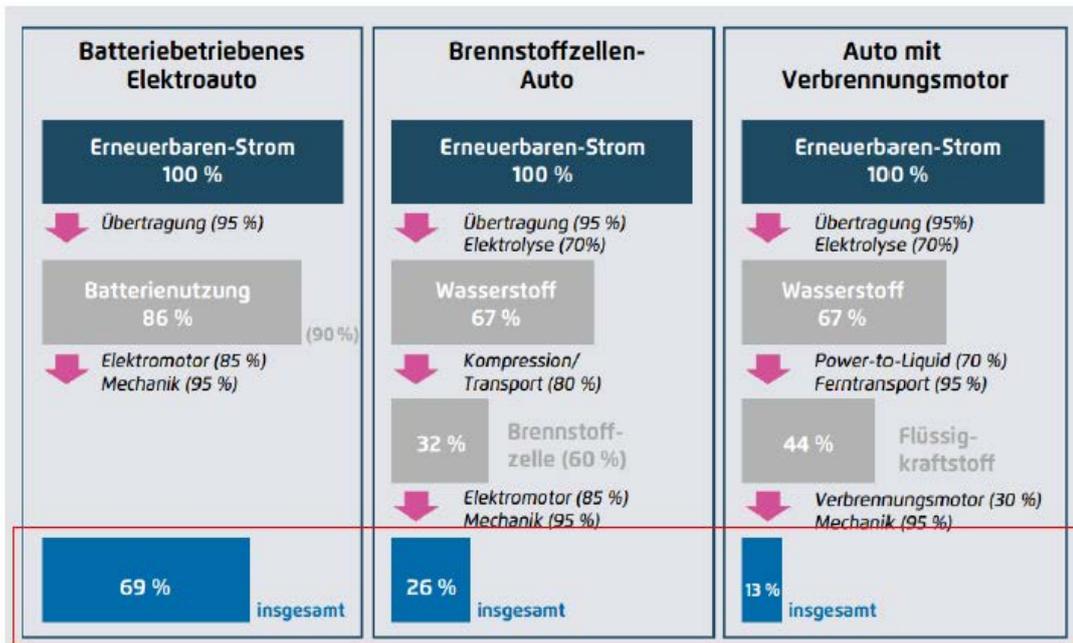
© SIZ-EGS . www.siz-egs.de . 8. PL Treffen Energiewende Bauen . 14.5.2020

37

Quellen: \04 Recherche Datenblätter2020_05 Esslingen West P2G2P 1MW AEL.pdf
1) WK-Aarau, 174kW PEM (2016): ,\04 Recherche Datenblätter\BFE_H2_WK_Aarau_Projektbericht.pdf



Effizienz geringer → ABER Reichweite & Ladezeiten (!)



Wichtig: Wasserstoff & synthetische Kraftstoffe sind „besser“ **speicherbar** als elektr. Energie!

→ Für Wind- & PV-Einspeisung sehr wichtig!

Quelle: \201805_ZukunftStrombasierterBrennstoffe_Agora.pdf

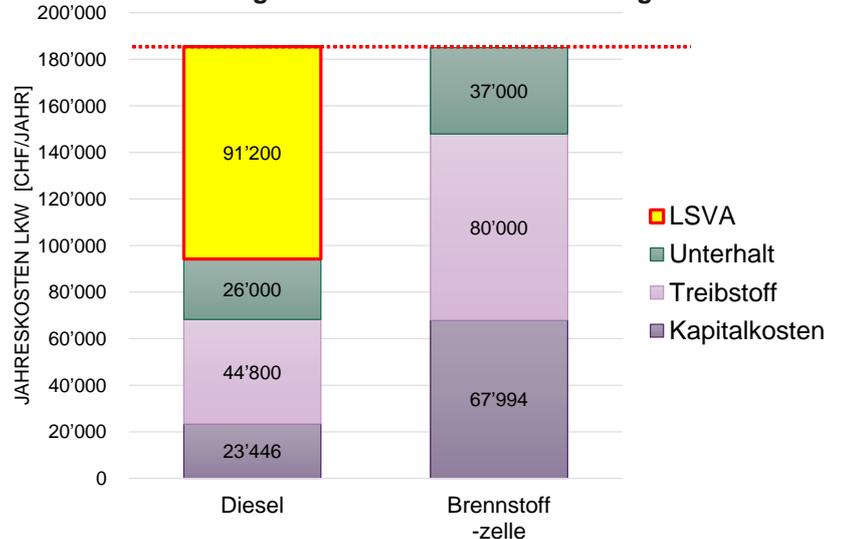


Güterverkehr: FC-Variante Konkurrenzfähig

Grund: LSVA → sonst sind alle Kostenteile bei FC aktuell noch höher!

	Diesel-Verbrennungsmotor Angaben gemäss (38)	Elektrischer Antrieb BZ-H ₂ Angaben gemäss (38)
Durchschnittlicher Verbrauch pro 100 km	32 Liter Diesel	8 kg H ₂
Wirkungsgrad	0.45	0.58
Fahrstrecke pro Jahr	100'000 km	
Preis Energieträger	0.135 CHF pro kWh Diesel	0.33 CHF pro kWh Wasserstoff
Wartungskosten	0.26 CHF pro km gem. (34)	0.37 CHF pro km gem. (34)
Strassensteuern (LSVA)	0.0228 CHF pro tkm gemäss (15)	Befreit gemäss (35)
OPEX	162'000.00 CHF pro Jahr	117'000.00 CHF pro Jahr
CAPEX	200'000.00 CHF (eigene Schätzung)	580'000.00 CHF (eigene Schätzung)
Kapitalzins	3 %	

Jahreskostenvergleich von LKW mit 40 Tonnen Gesamtgewicht nach Antriebstechnologie



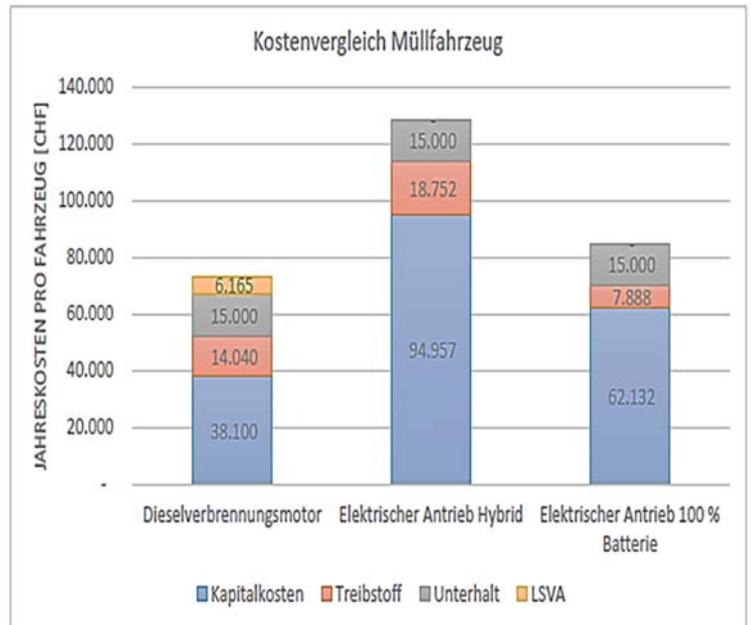
Quelle: Analyse genereller Wasserstoff-Anwendungen sowie Potentialabschätzung für den Grossraum Buchs SG, 2020



Müllfahrzeuge: FC-Variante fast doppelt so teuer

(auch Energiekosten sind höher!)

Wirkungsgrad	Diesel-Verbrenner = 0.45	Batterie. = 0.89 Brennstoffzelle = 0.58	Batterie. = 0.89
Preis Energieträger	0.135 CHF pro kWh Diesel	0.15 CHF pro kWh el. Netzstrom 0.33 CHF pro kWh Wasserstoff	0.15 CHF pro kWh el. Netzstrom
Batteriekapazität	n.a.	85 kWh	255 kWh
Arbeitstage pro Jahr	260		
LSVA	2'377.00 CHF pro Jahr	befreit	befreit
OPEX	35'205.00 CHF pro Jahr	33'752.00 CHF pro Jahr	22'888.00 CHF pro Jahr
CAPEX	325'000.00 CHF	810'000.00 CHF	530'000.00 CHF
Kapitalzins	3 %		
Annuität	11.7 %		
Betrachtungszeitraum	10 Jahre		



Quelle: [Analyse genereller Wasserstoff-Anwendungen sowie Potentialabschätzung für den Grossraum Buchs SG, 2020](#)

15 | Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES | PtX-Expertinnengespr. (24.3.2022, Rapperswil)



Benötigen wir Elektrolyse? (Bedarf im GW-Bereich!)

Wie viel Flexibilitäten* werden für eine erfolgreiche Energiewende benötigt?



* Am Beispiel von Batterieausbau und Elektrolyse in Deutschland. Weitere Flexibilitäten existieren.

Aktuelle Studien zeigen ein sehr diffuses Bild benötigter Flexibilitäten.

Quelle: [BEE, Vortrag Dr. Stark, EnInnov Symposium 2022, TU Graz](#)

16 | PtX-Expertinnengespr. (24.3.2022, Rapperswil)

Matthias.Berthold@ost.ch, OST-IES



Standort Buchs (SG) für H₂-Elektrolyse sehr gut geeignet



Vorteile:

- ✓ Versorgung mit grüner Energie relativ kostengünstig möglich
- ✓ Netzanbindung ohne öffentl. Netz sehr gut möglich (daher keine Netzgebühren für Endverbraucher)
- ✓ Gute Autobahn-Anbindung (wegen Mobilität)
- ✓ Bestehende Industriezone → mögl. Abnehmer?
- ✓ Evtl. Synergie bei Speisewasseraufbereitung mit KVA
- ✓ Evtl. Sauerstoff-Abnahme ohne aufwändige Reinigung möglich (ARA und/oder KVA)

