



OST

Ostschweizer
Fachhochschule

Al-to-Energy

Wärme und Wasserstoff aus Aluminium

Dr. Michel Haller

10. September 2020



INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK

Inhalt

- **Motivation**
 - Warum Aluminium?
- **Aluminium-Speicherzyklus**
 - Power-to-Al (Beladung)
 - Al-to-Energy (Entladung)
- **Labor Prototyp für Al-to-Energy**
- **Simulation eines Gebäude-Energiesystems**
 - CO₂-Bilanz (GWP)
 - Wie viel Aluminium braucht das?
 - Was kostet die kWh Endenergie (Capex + Opex)?
- **Fazit und Danksagung**

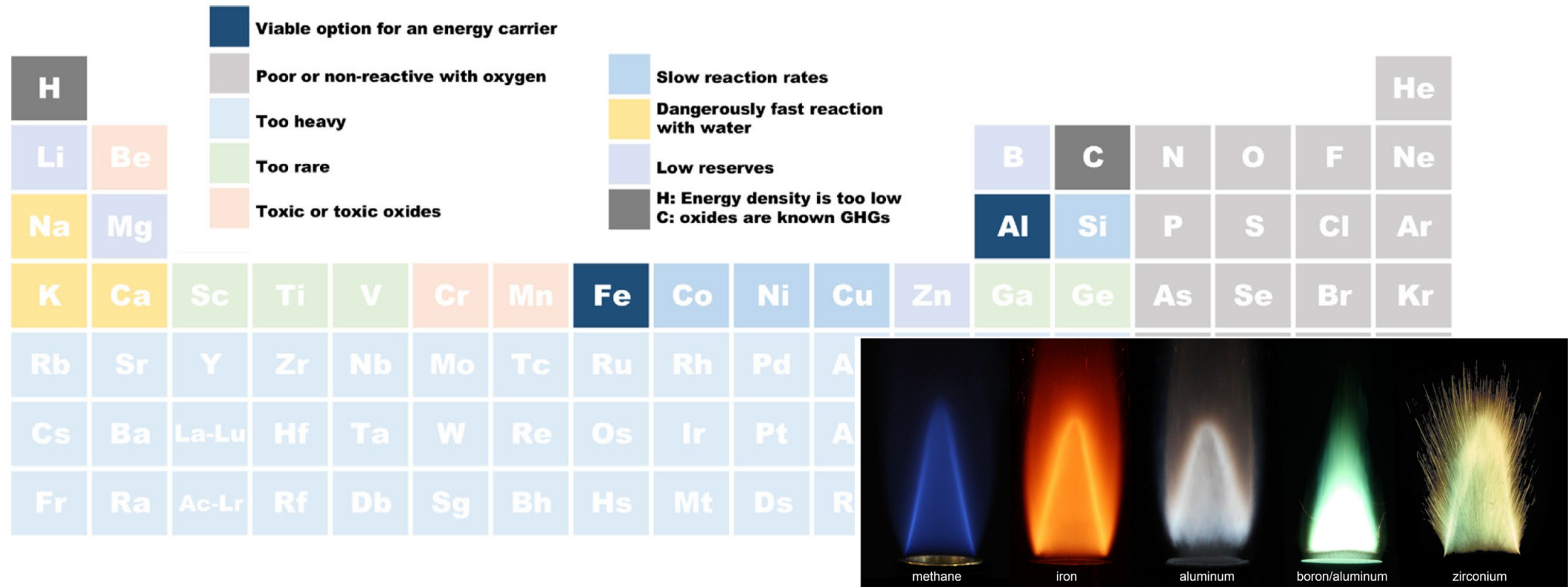
Motivation

Power-to-X

- **Für eine saisonale Speicherung von Energie sollte X auch in grossen Mengen**
 - einfach
 - verlustfrei
 - und sicher lagerbar sein
- **H₂ erscheint unter diesem Gesichtspunkt nicht ideal...**
 - -> **Umwandlung von H₂ zu Methan, Methanol etc. ...**
 - ... bringt weitere Verluste und Kosten, braucht Kohlenstoffquelle
 - ... X ist immer noch leicht entzündbar (Sicherheit)
- **Power-to-Al**
 - **Wir produzieren mit erneuerbarem Strom Aluminium (Power-to-Al)**
 - **Al kann einfach und sicher auf unbeschränkte Zeit verlustfrei gelagert werden**
 - Al stinkt nicht, reagiert nicht, brennt nicht
 - Aus Aluminium können wir mit Al-to-Energy Wärme und Strom produzieren

Motivation

Renewable Metal Fuels: Al + Fe sind "viable options"

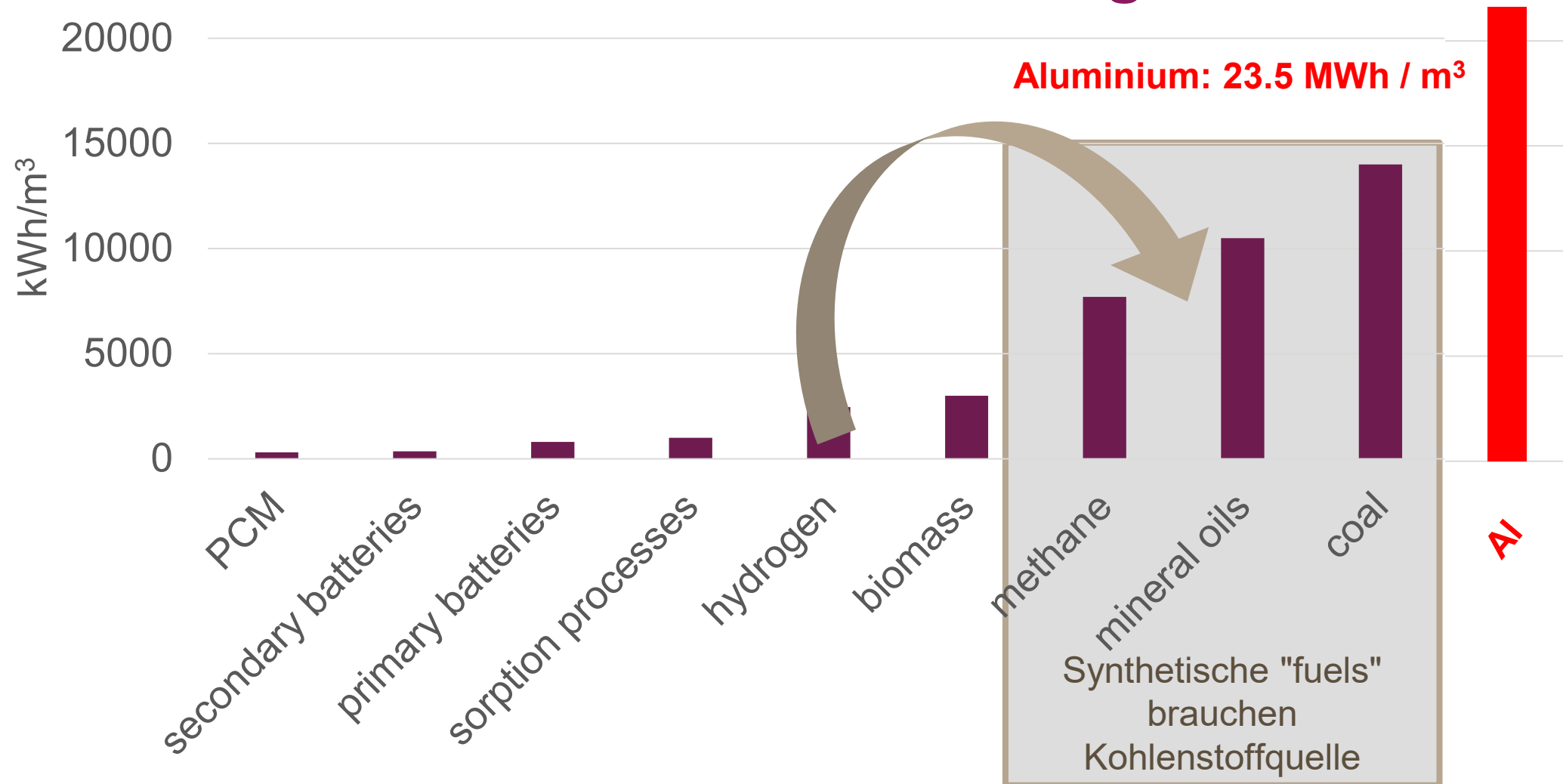


Quellen:

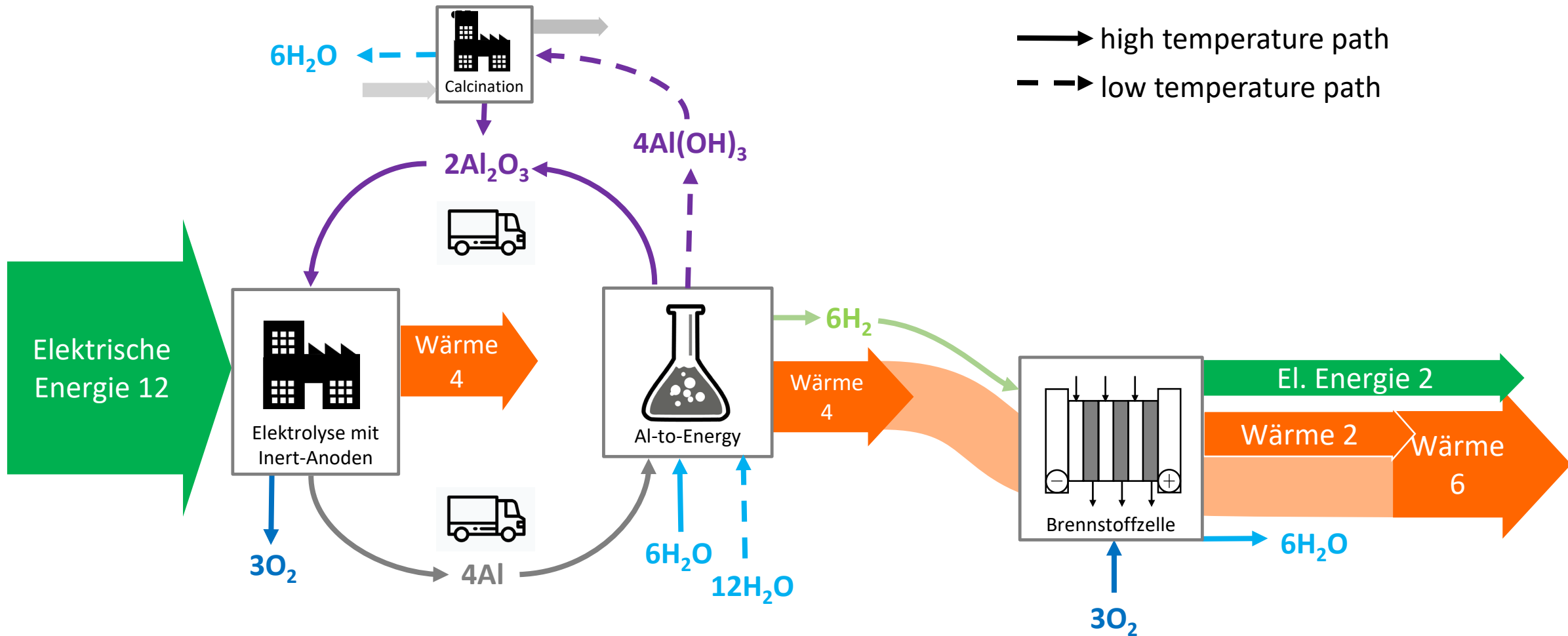
- Trowell KA, Goroshin S, Frost DL, Bergthorson JM. Aluminum and its role as a recyclable, sustainable carrier of renewable energy. *Applied Energy* 2020;275:115112. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115112>.
- Bergthorson JM, Goroshin S, Soo MJ, Julien P, Palecka J, Frost DL, et al. Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power. *Applied Energy* 2015;160:368–82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.037>.

Motivation

Aluminium hat eine extrem hohe Energiedichte



Der Aluminium-Energiespeicherzyklus



Aluminium-Speicherzyklus

Power-to-Al

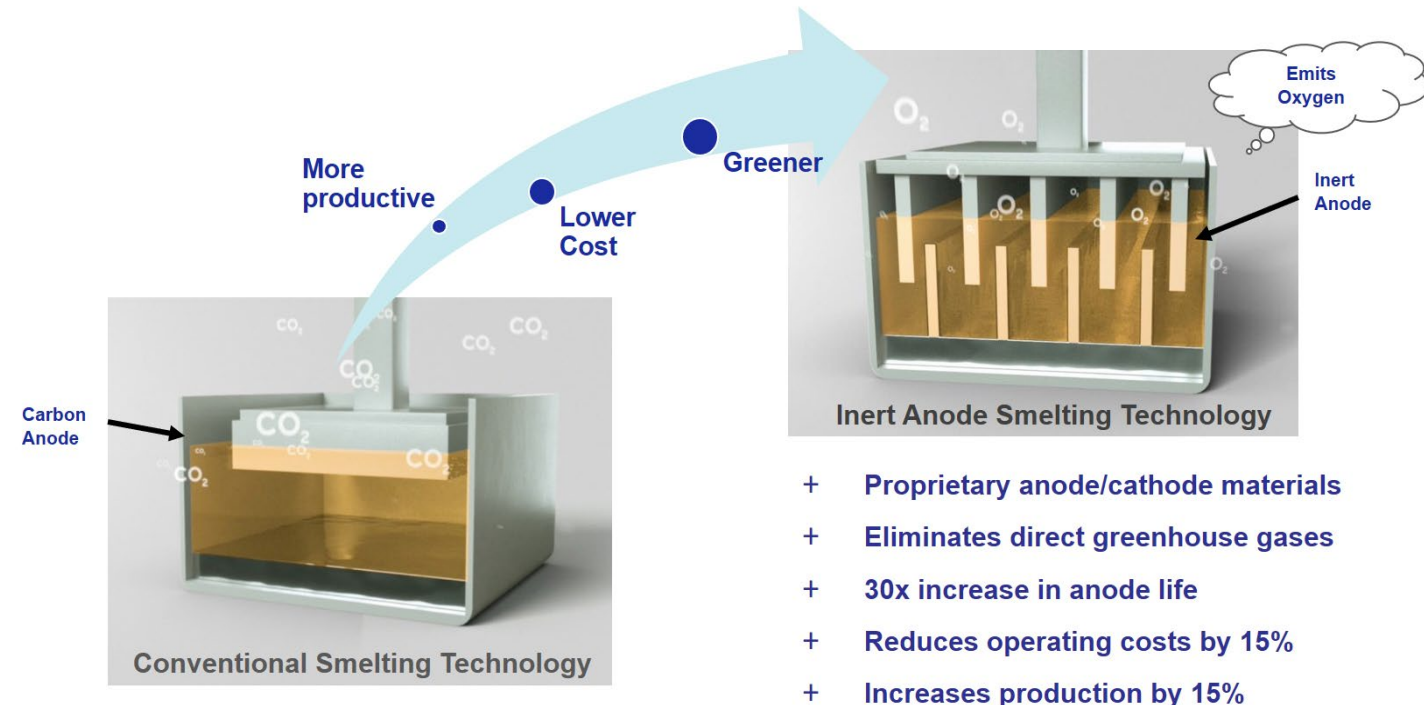
• Heute / Konventionell

- Hall-Héroult Prozess (>100 Jahre alt)
- Total Energieeffizienz $\approx 50\%$
- Kohleanoden \rightarrow CO_2 und CF_x Emissionen

• Zukunft

- Inert-Elektroden – keine Kohleelektroden
- produziert O_2 anstatt CO_2
- keine CF_x Emissionen
- potenzielle Energieeffizienz 65%
- Elysis kündigte Markteinführung für 2024 an

A breakthrough aluminum smelting technology

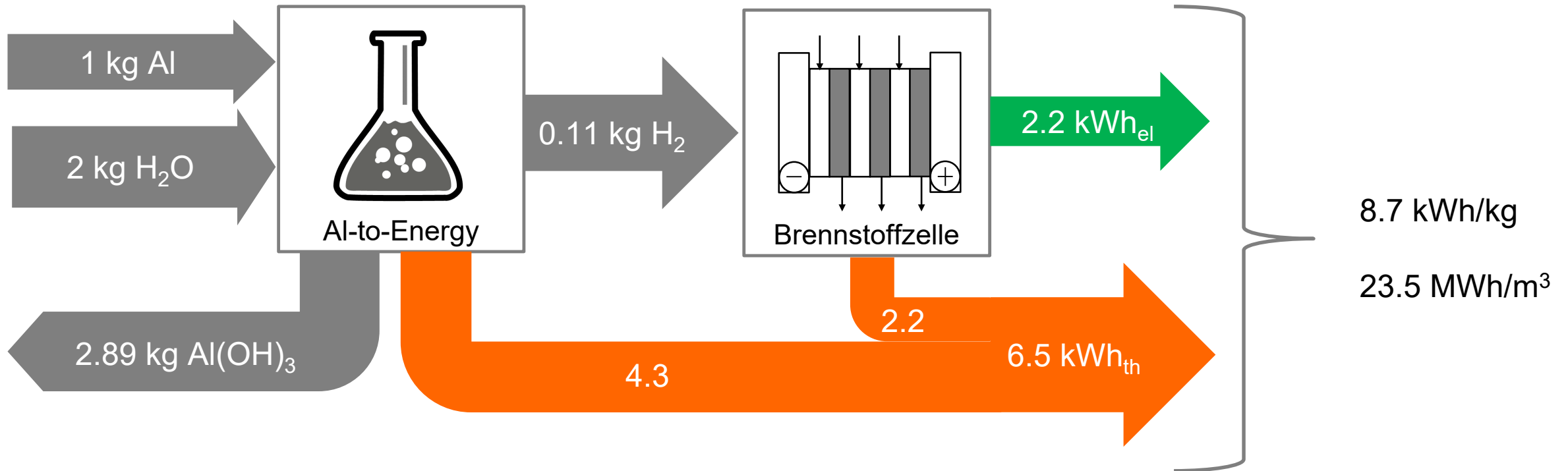
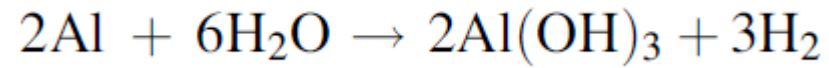


- + Proprietary anode/cathode materials
- + Eliminates direct greenhouse gases
- + 30x increase in anode life
- + Reduces operating costs by 15%
- + Increases production by 15%

Source: Elysis (joint venture of RioTinto and Alcoa)

Aluminium-Speicherzyklus

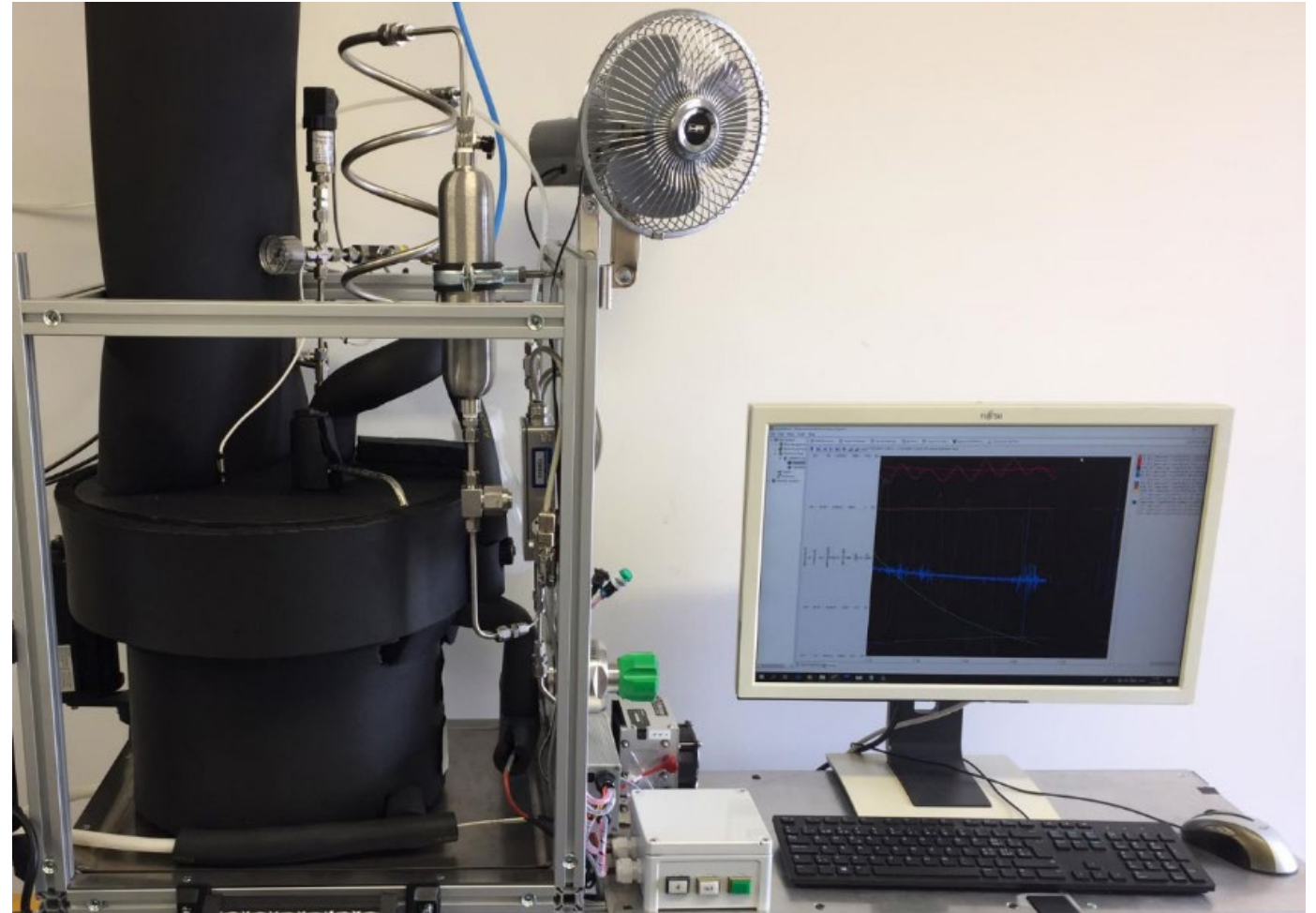
Al-to-Energy



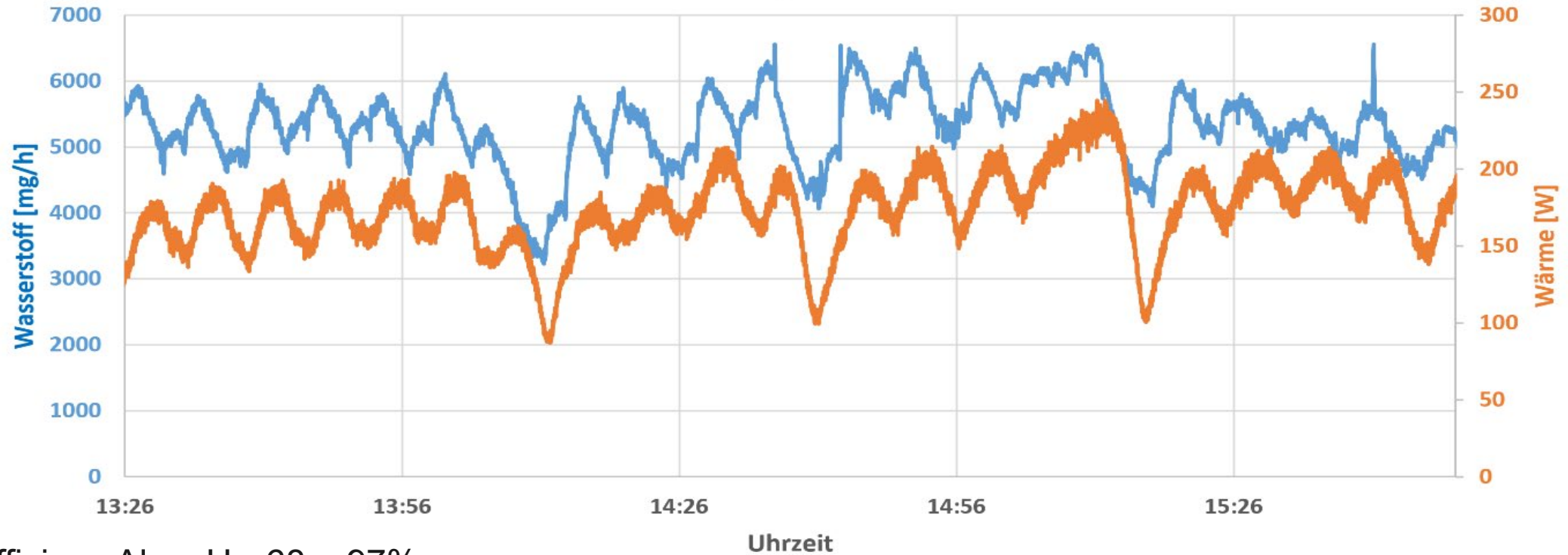
Al-to-Energy: Labor-Prototyp am SPF

- **Auslegung**

- 50 g Al pro Stunde
- 5.5 g H₂ pro Stunde
- 400 Watt total (Wärme und H₂)

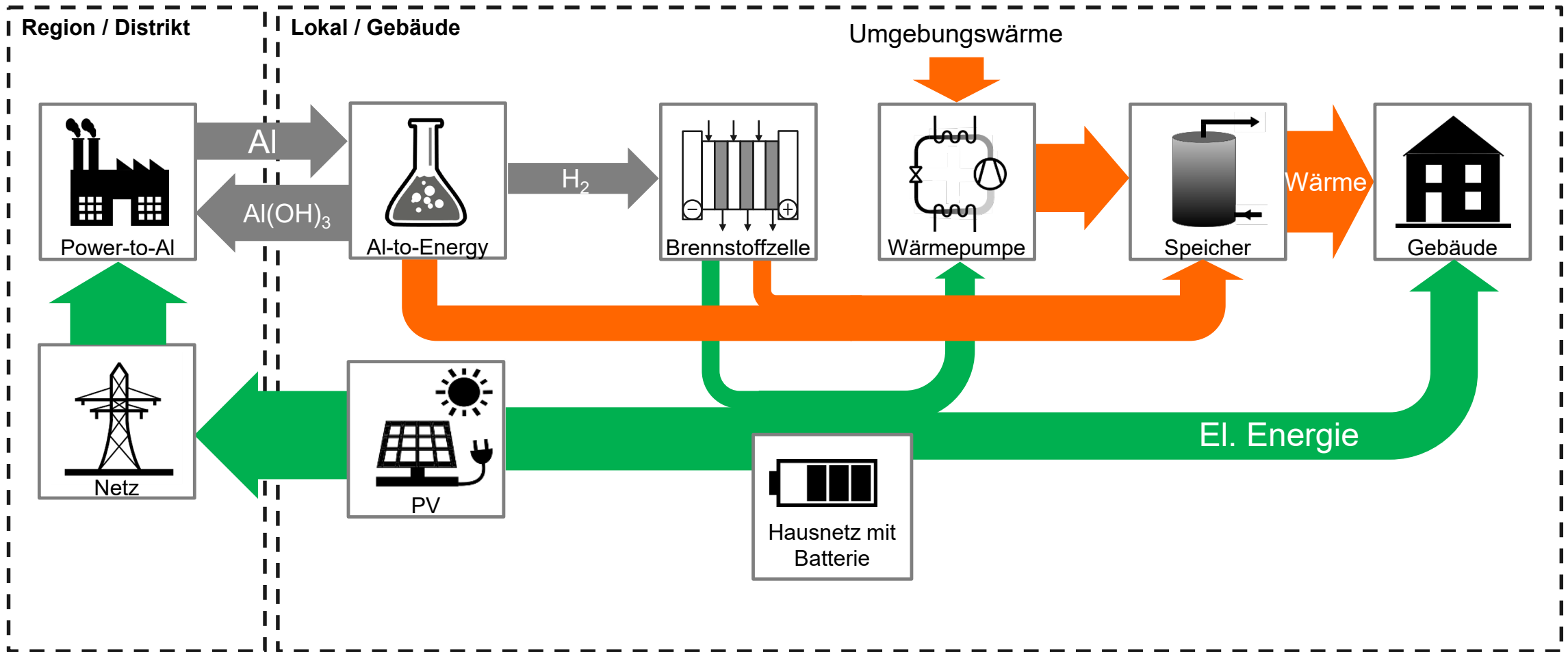


Al-to-Energy: Messungen



- Effizienz Al zu H₂: 68 – 97%
- Effizienz Al zu Wärme: 68 – 99%
- Energiegewinnung aus Al: 8.69 kWh/kg

Integration ins Gebäude-Energiesystem

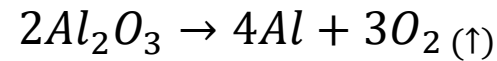
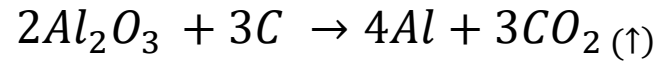


Simulation Gebäude-System

CO₂-Bilanz / GWP

- Prozess für Power-to-Al
- konventionell Hall-Héroult (HH):
- Inert-Elektroden (Inert El.):

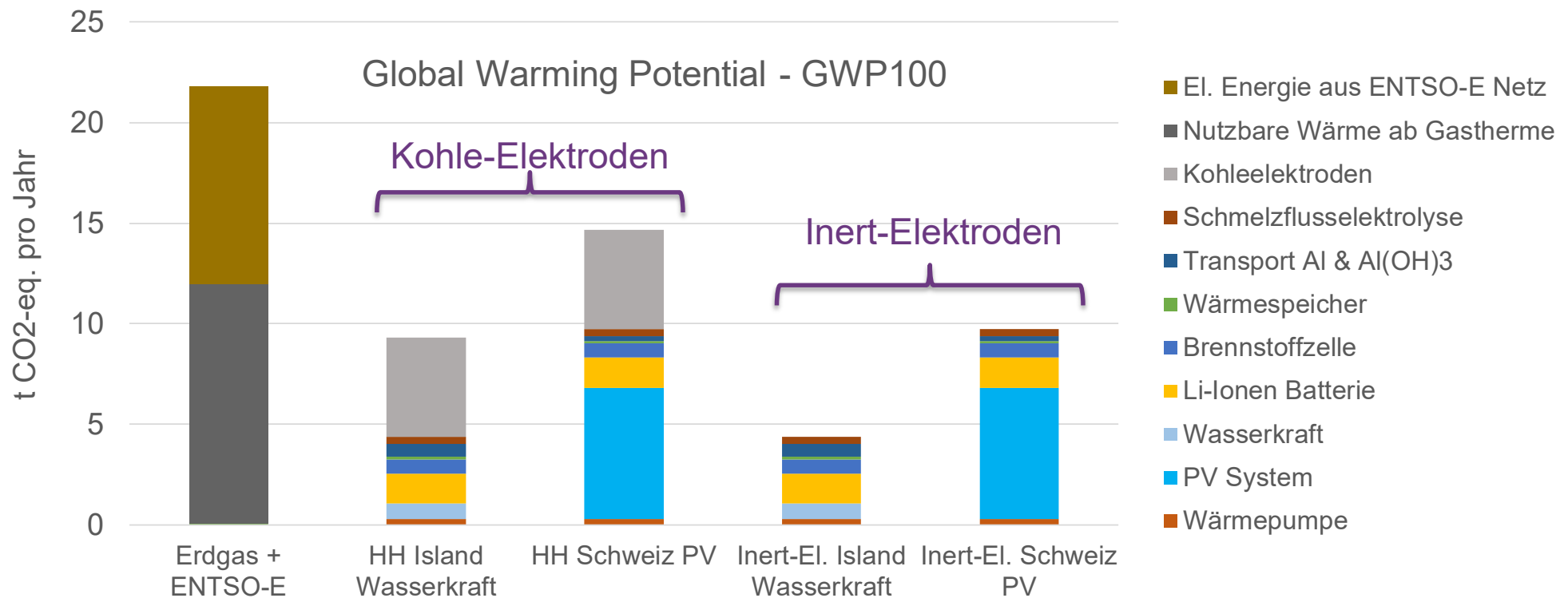
Redox-Reaktion



Energiebedarf pro kg Al

11.5 kWh el. + 3.8 kWh "carbon"

≈ 12 - 15 kWh el.



Fazit

- **Aluminium eignet sich sehr gut als Energiespeicher**
 - Die Speicherdichte ist extrem hoch mit 8.7 kWh/kg (im Labor bestätigt) und max. 23.6 MWh/m³
- **Al-to-Energy**
 - Labor-Prototyp für 200 Watt Wärme und 200 Watt in Form von Wasserstoff (H₂) erfolgreich
 - pro Wohneinheit braucht es ca. 300 – 500 kg Aluminium als Speichermedium (< 0.5 m³) um über den Winter zu kommen (Neubau, kein Passivhaus)
- **Power-to-Al**
 - Voraussetzung: Einsatz von ausschliesslich erneuerbarem Strom (PV, Wind, Wasser)
 - ideal über Inertelektrodenprozess (in Entwicklung)
 - Verdoppelung des Zyklus-GWP bei traditionellem Hall-Héroult Prozess in Kombination mit PV-Strom
 - in jedem Fall deutlich weniger Emissionen als Wärme aus Gasbrenner und Strom ab ENTSO-E Netz
- **Wirtschaftlichkeit**
 - Energiekosten (CAPEX + OPEX) von < 0.2 €/kWh für Endkonsumenten 2030 realistisch

Fazit und Danksagung

Fragen?



michel.haller@spf.ch

www.spf.ch/hepostal, www.spf.ch/hybridstock

Journal Article: Haller et al. 2020. Energy Conversion and Management: X 2020;5:100017. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100017>

FUTUR

Gewinner des
Innovationspreises
der Stiftung FUTUR



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Wir danken dem Bundesamt für Energie
(BFE) für die finanzielle Unterstützung

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

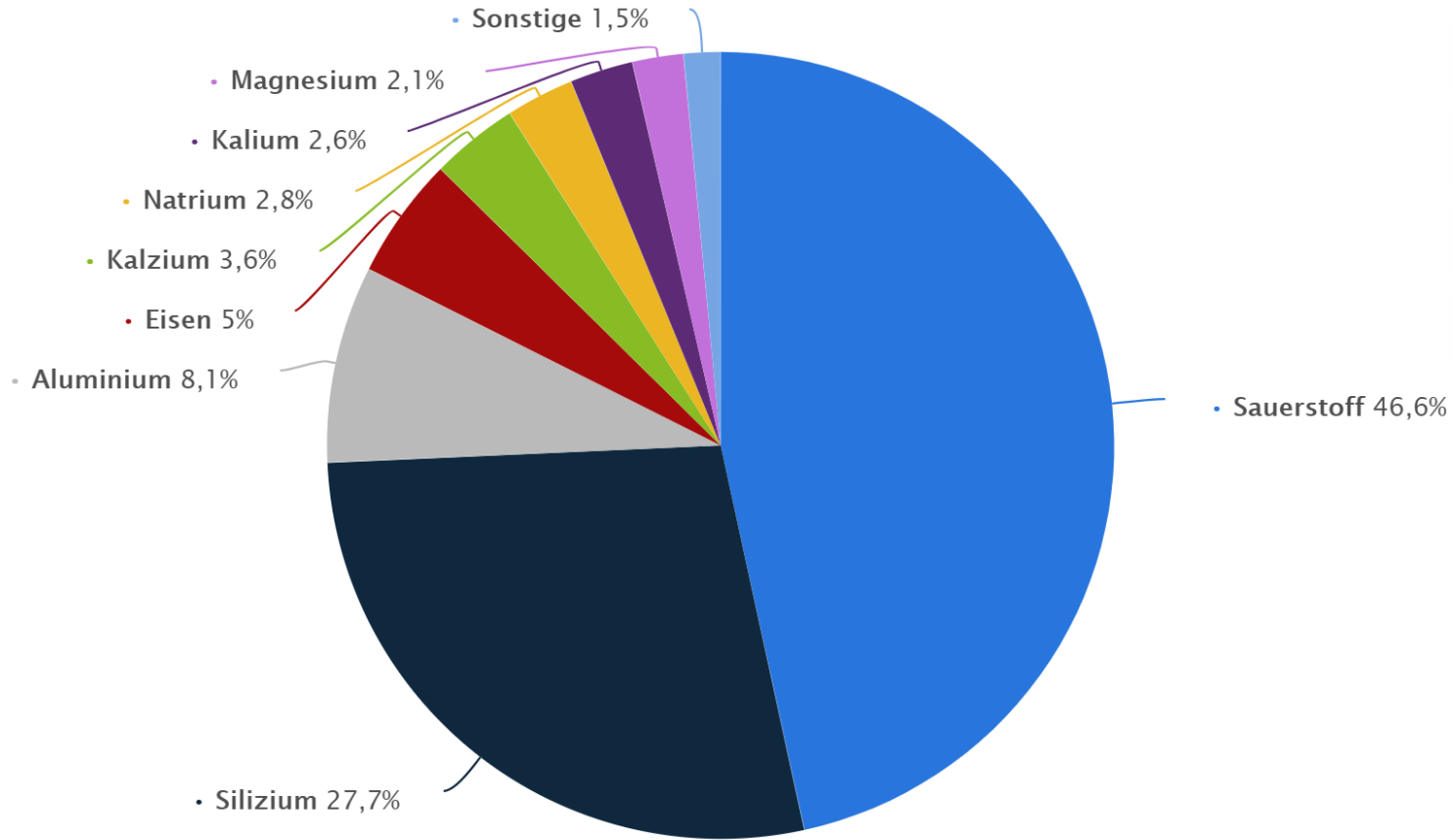
Wirtschaftlichkeit – Ausblick für 2030

Investitionskosten und Energieerzeugungskosten für ein Mehrfamilienhaus mit 6 Wohneinheiten in Zürich						
Komponente	Kosten [€]	Grösse	Lebensdauer [Jahre]	Total Kosten [€]		
PV	1000+700/kWp	60 kWp	25	43'350	41%	
Batterie	450+230/kWh	100 kWh	15	23'450	22%	
Wärmespeicher	700+700/m ³	3.5 m ³	40	3'150	3%	
Wärmepumpe	6'000+450/kW	26 kW	25	17'700	17%	
Brennstoffzelle	1'000+1'000/kW _{el}	10 kW _{el}	20	11'000	10%	
AI-to-Energy	1'500+1'300/(kg/h)	5 kg/h	25	8'000	8%	
	Total Investitionskosten (CAPEX)			106'650	100%	
Annuität	Kapitalkosten (Annuität) (3% Zins)			6'805/a	52%	
	AI "solar fuel" (1.2 €/kg)			2'662 kg	3'195/a	24%
	Unterhalt (1% der Investitionskosten)			1'066/a	8%	
	Netzentgelte (0.05 €/kWh)			39'934 kWh	1'997/a	15%
	Strom vom Netz (0.3 €/kWh)			289 kWh	87/a	1%
	Gesamte Jahreskosten			13'131/a	100%	
Gemischte Wärme- und Stromgestehungskosten (CAPEX + OPEX)			0.20	€/kWh		

source: Haller et al. 2020. Energy Conversion and Management: X 2020;5:100017. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100017>.

Verfügbarkeit

Aluminium: Nr. 3 in der Erdkruste!



Details: Weltweit

© Statista 2020