

# Wasserstoffsysteme - Wertanalyse

- Verfügbarkeit
- Kostentreiber
- Skaleneffekte



# Wertanalyse

## Agenda

---

MARKT

VERFÜGBARKEIT

KOSTEN

SKALENEFFEKTE



# Wasserstoffsystem

## Herausforderungen



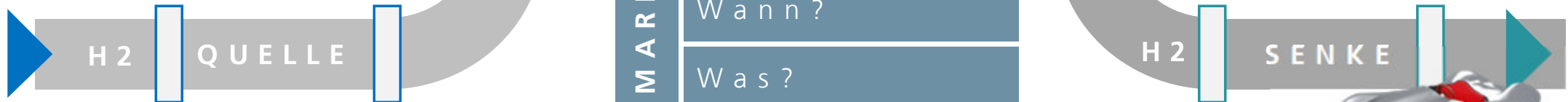
TECHNOLOGIE	Verfügbarkeit ↑
	Industrialisierung ↑
	Kosten ↓
	Effizienz ↑
	Lebensdauer ↑



ELEKTROLYSEUR



BRENNSTOFFZELLE



# Wasserstoff

## Angebotslücke

### Kalkulation:

Produktion Kapazität:: 2 GW  
 Jährliches Wachstum: 21%  
 Kummuliert bis 2030: **68 GW**  
**Δ Europa** **52 GW**  
 Δ Global 847 GW

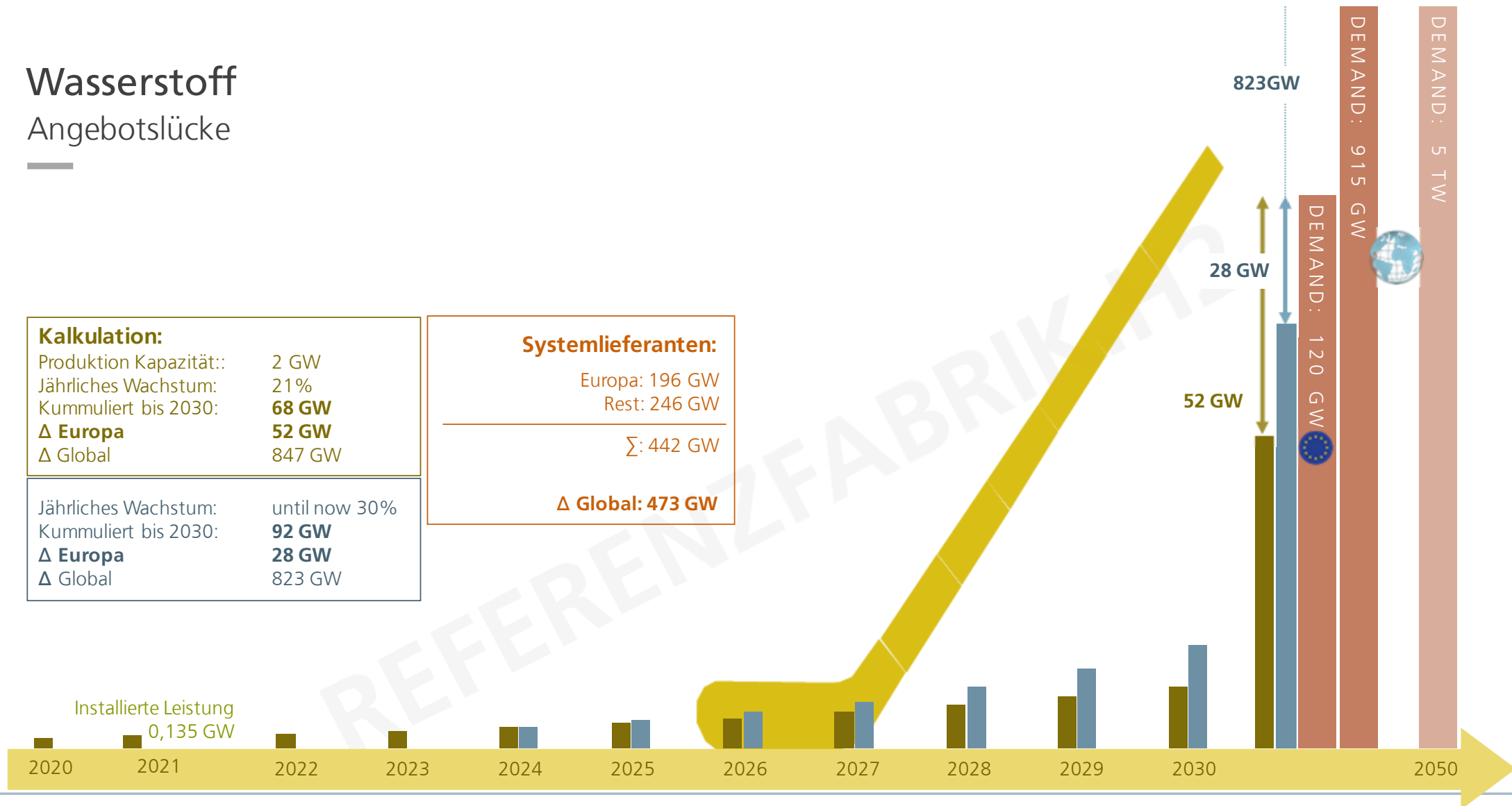
Jährliches Wachstum: until now 30%  
 Kummuliert bis 2030: **92 GW**  
**Δ Europa** **28 GW**  
 Δ Global 823 GW

### Systemlieferanten:

Europa: 196 GW  
 Rest: 246 GW

Σ: 442 GW

**Δ Global: 473 GW**



# Elektrolyseure

## Bedarf vs. Angebot

Rahmenbedingungen (global bis 2030):

### Produktion:

Kapazitäten aktuell: 2 GW/ a

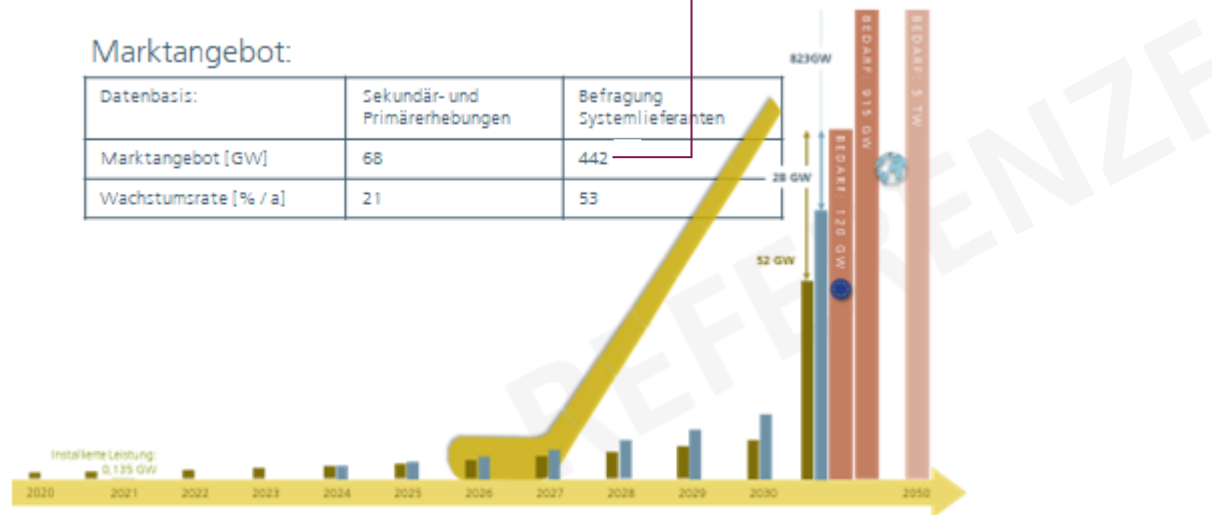
### Wasserstoff-Bedarf:

915 GW  
zur Erreichung Dekarbonisierungsziele

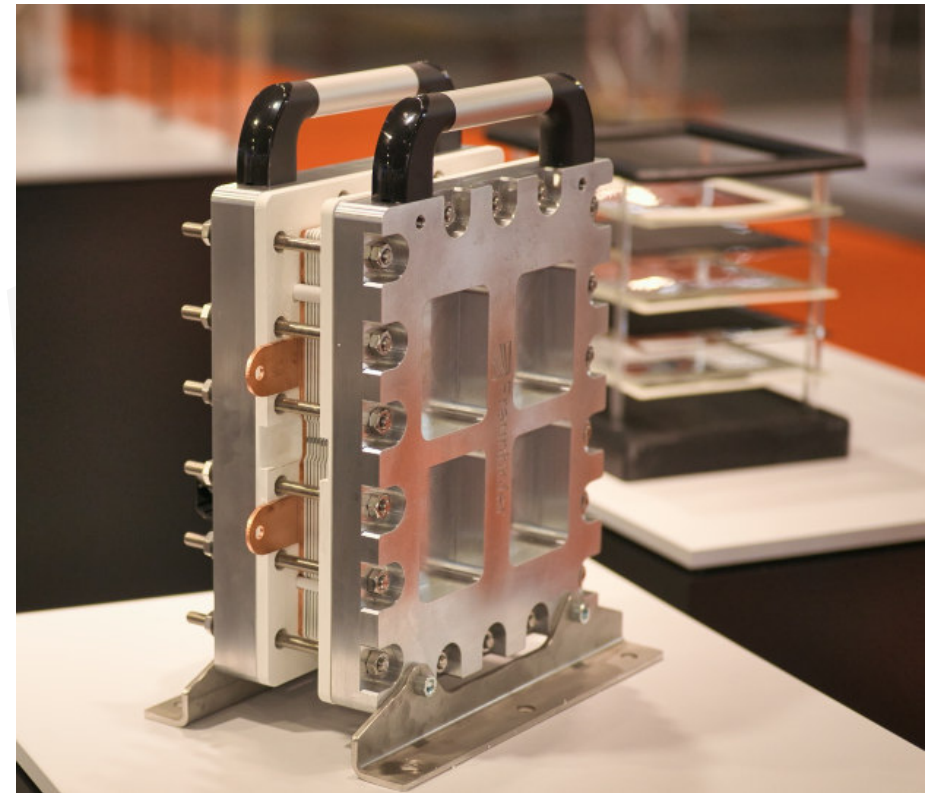
Bedarf 915 GW in 2030  
Angebot (best case): 442 GW  
 $\Delta 473 \text{ GW} = \text{ca. } 74 \text{ Mio. t H}_2$

### Marktangebot:

Datenbasis:	Sekundär- und Primärerhebungen	Befragung Systemlieferanten
Marktangebot [GW]	68	442
Wachstumsrate [% / a]	21	53



Neuer **ELEKTROLYSEUR**  
entwickelt für die industrielle  
Massen-Produktion und -Anwendung



# Elektrolyseure

## Bedarf vs. Angebot

Rahmenbedingungen (global bis 2030):

### Produktion:

Kapazitäten aktuell: 2 GW/ a

### Wasserstoff-Bedarf:

915 GW  
zur Erreichung Dekarbonisierungsziele

### Marktangebot:

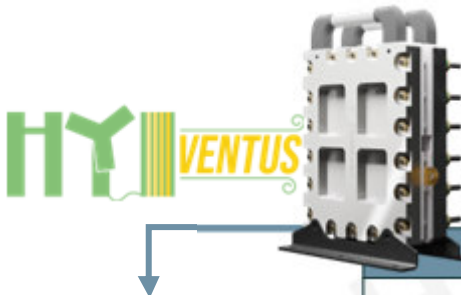
Datenbasis:	Sekundär- und Primärerhebungen	Befragung Systemlieferanten
Marktangebot [GW]	68	442
Wachstumsrate [% / a]	21	53

Bedarf 915 GW in 2030  
Angebot (best case): 442 GW  
 $\Delta 473 \text{ GW} = \text{ca. } 74 \text{ Mio. t H}_2$

200 Mio. Stück

Komponente:	Bedarf
BPP:	2.000 Mio. Stück
Benötigter Stahl:	
mit 300 cm <sup>2</sup> / HP	120 Mio. m <sup>2</sup>
	= 18.000 Fußballfelder
	= 35 Central Parks NY
mit 8g/ cm <sup>2</sup>	4,80 Mio.t
mit 35,7 Mio. t	= 13% Stahlproduktion D 2020
Schweißnähte	
mit 1 m pro BPP	2 Mio. km
	= 5 bis zum Mond
Heftnähte	
Mit 0,5 m pro BPP	1 Mio. km
	= 25 Äquatorlänge

Bezeichnung:	HyVentus
Entwicklung:	Referenzfabrik.H2
Wasserstoff-System:	Elektrolyseur
Komponente:	Stack
Aufbau:	04
Zellen- - Design:	Metall
- Aktive Fläche:	300 cm <sup>2</sup>
- Anzahl:	10
Spannung:	20 V
Strom:	Max. 600 A
Leistung:	12 kW
Wasserverbrauch:	1,1 l/h
Wasserstoffherzeugung:	2,5 Nm <sup>3</sup> /h
Wirkungsgrad:	ca. 74%



# Elektrolyseur-Kosten

Reduktion erforderlich!

U.S.-Hydrogen Strategie:



1 Dollar

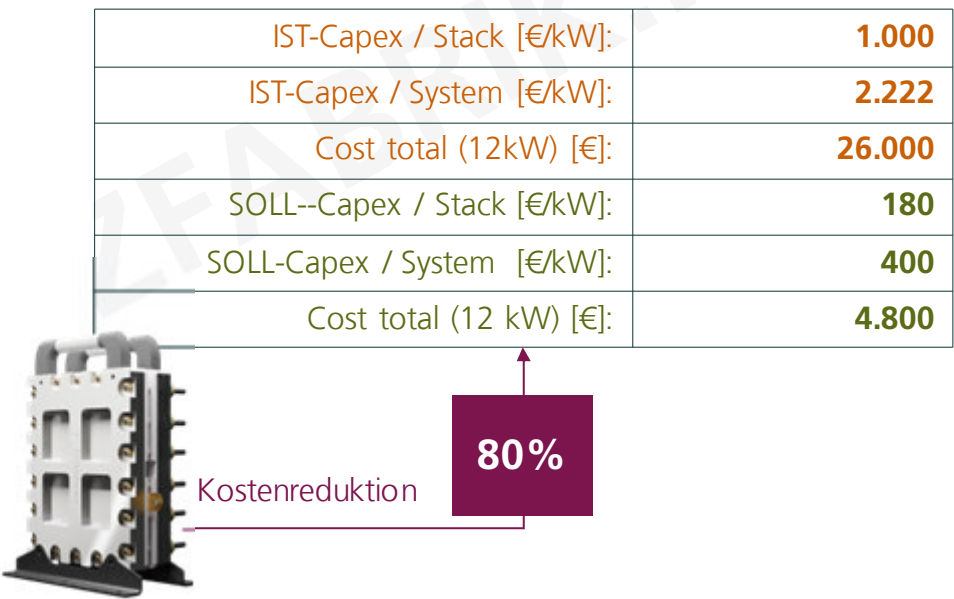


1 Kilogram



1 Decade

Identification:	HyVentus	
Tension:	20 V	
Electricity:	Max. 600 A	
Power:	12 kW	
Water-demand:	1,1 l/h	
Hydrogen-production:	2,5 Nm³/h	
Efficiency:	ca. 74%	
LCOH Levelised Cost of H2 [€/kgH2]	3,41 --> 3,70 \$	1,72 --> ca. 2 \$
LHV Lower Heating Value [kWh/kgH2]	50	50
i Discount Rate [%]	10	10
n Lifetime [a]	10	10
E Electricity cost [€/kWh]	0,35	0,35
n SystemEfficiency / LHV	75	75
T Full Load Hours [h]	7884	7884
OPEX	10	10
Capex total [€/kW]	2222	1000
	IST	INTERIM

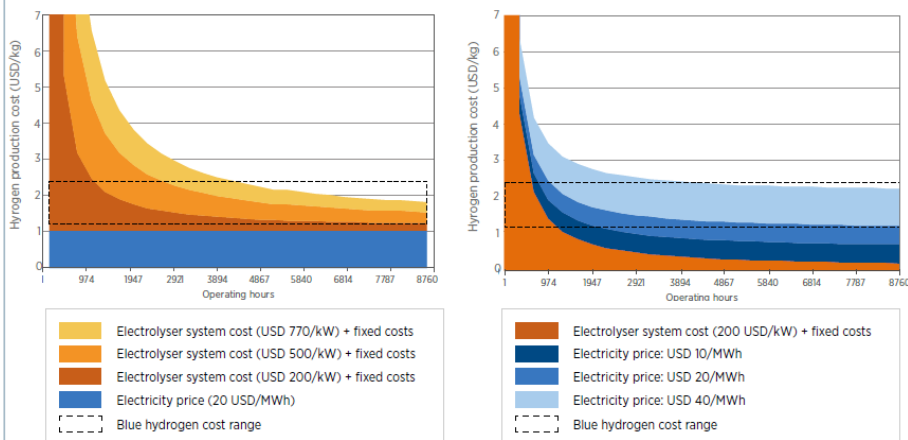




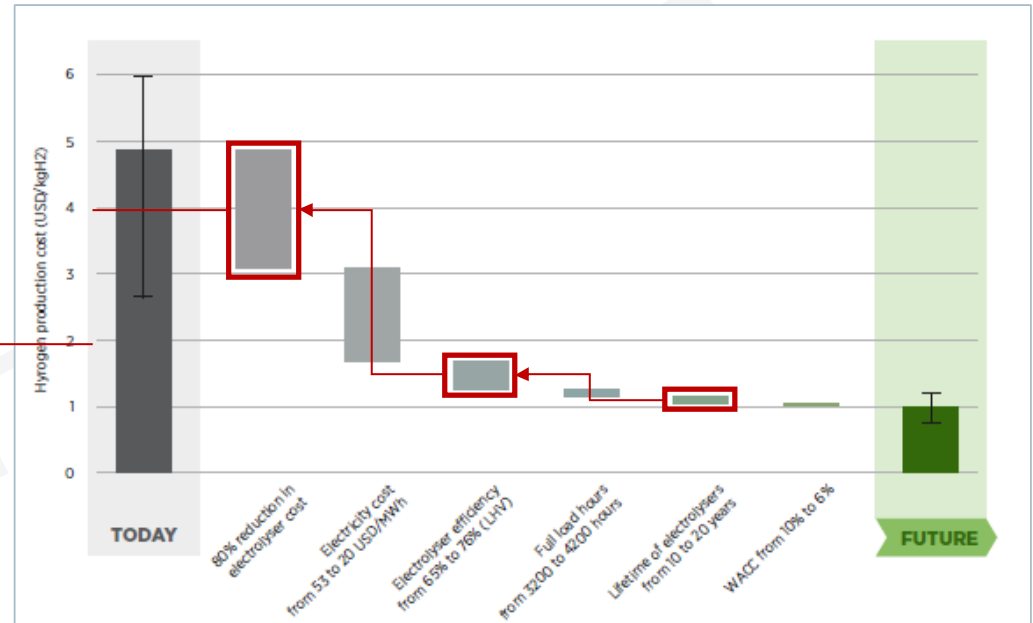
# Elektrolyseur-Kosten

## Bewertung

**Figure 1.** Hydrogen production cost as a function of investment, electricity price and operating hours.



Note: Efficiency at nominal capacity is 65% (with an LHV of 51.2 kWh/kg H<sub>2</sub>), the discount rate 8% and the stack lifetime 80 000 hours.



Cost reduction between 2020 and 2050 best-case scenario, green hydrogen can already be produced at costs competitive with blue hydrogen today



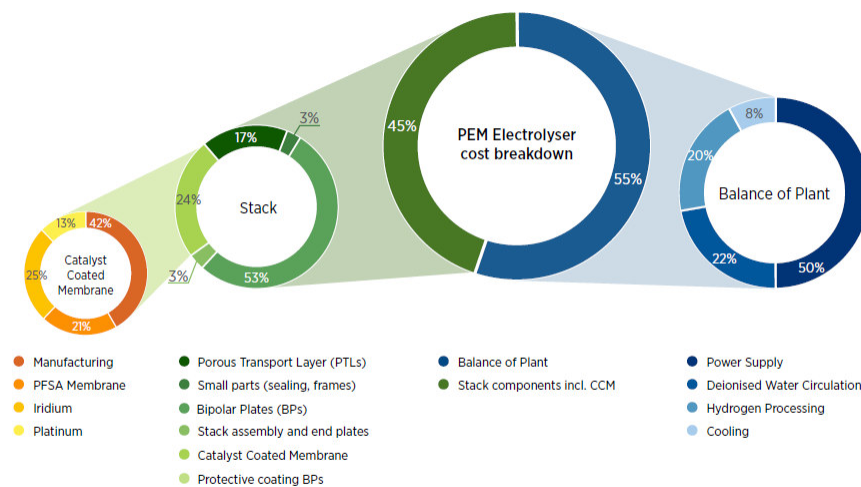
# Elektrolyseur-Kosten

## Bewertung

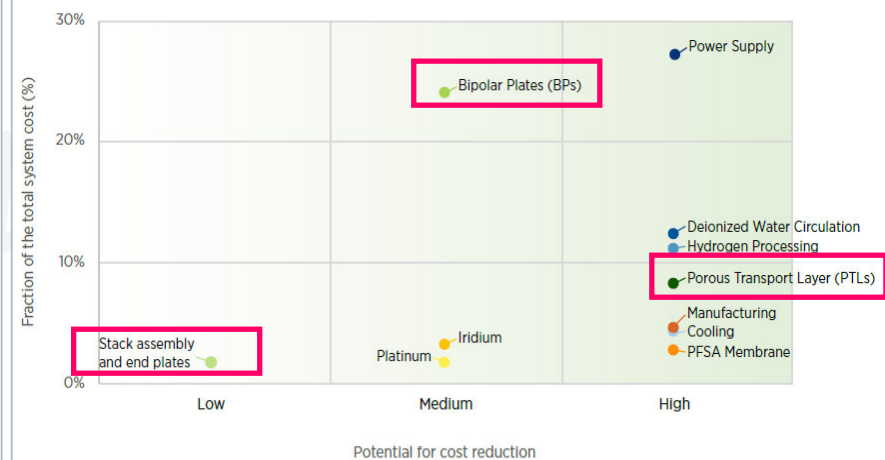
- ↓ Wasserstoffkosten auf 1 USD/kg H<sub>2</sub>
- ↓ Elektrolyseur-Capex auf 200 USD/kW

- ↑ Elektrolyseur-Effizienz um 15%
- ↑ Elektrolyseur-Lebensdauer um 100%

**Figure 18.** Cost breakdown for a 1 MW PEM electrolyser, moving from full system, to stack, to CCM.



**Figure 19.** System components for a 1 MW PEM electrolyser classified based on contribution to total system cost and potential for cost reduction.



# Elektrolyseure

## Chancen

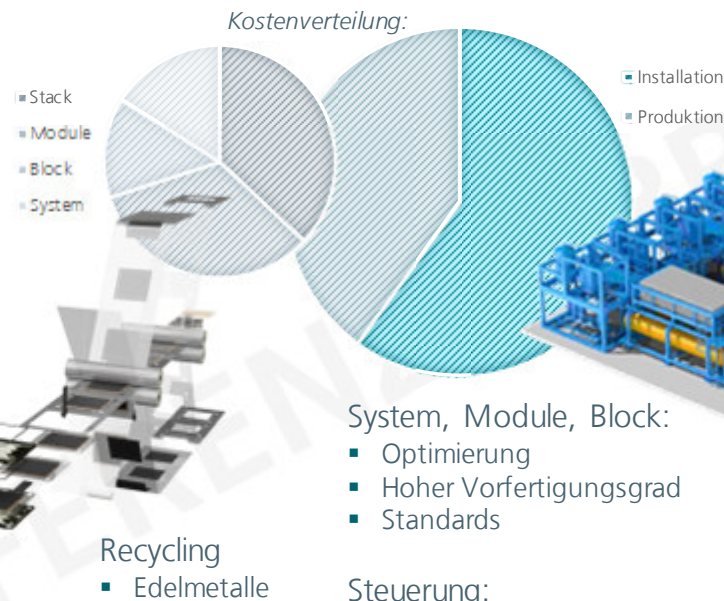
Schaffung neuer Lösungen!

Integration mehr Kompetenzen & Infrastrukturen!

Aufbau regionaler Lieferketten!

### PRODUKTION

- Material:
- Vermeidung von:
- PFAS
  - Iridium, Platin
- Stack:
- DFMA
  - Wirkungsgrad
  - Standards
  - Use-Daten
- Test:
- in-situ
  - EoL-Methoden
- Qualifizierung
- Unternehmen
  - Facharbeiter
  - Engineering
- Fertigung
- R2R
  - Stückzahlskalierbar
  - Standards
  - Automatisierung

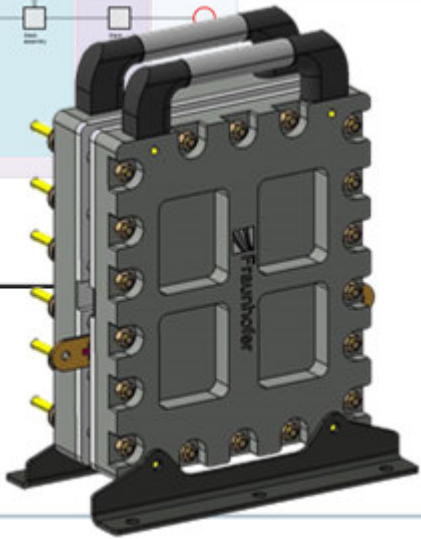
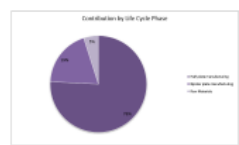
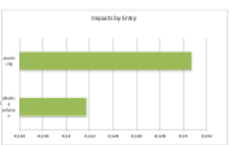
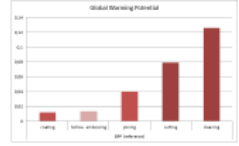
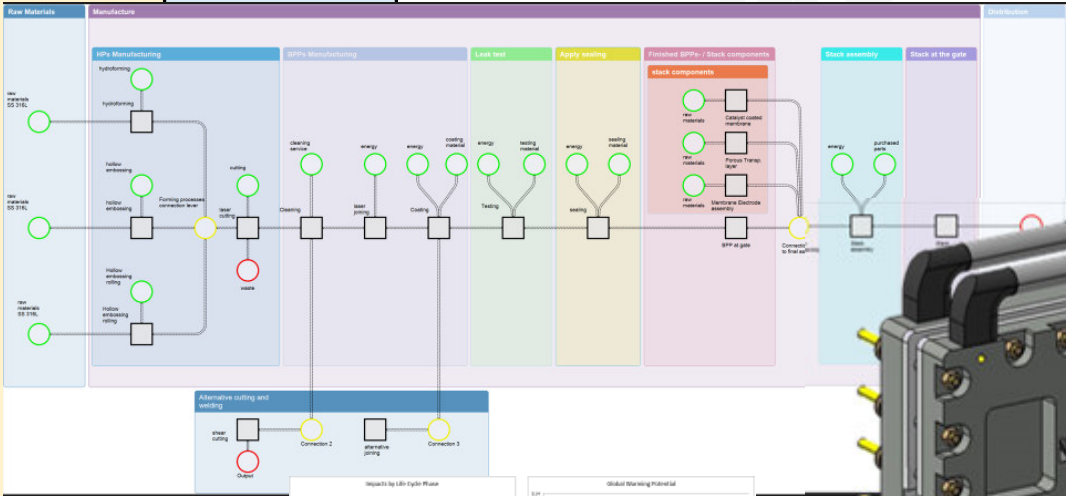


### INSTALLATION

- Montage
- Vereinfachung
  - Mechanische Verbindungen
  - Ohne spezielle Fachskills
  - Standards
- Qualifizierung:
- Zulieferer
  - Fertigungspartner
  - Installation
  - Wartung
- System, Module, Block:
- Optimierung
  - Hoher Vorfertigungsgrad
  - Standards
- Steuerung:
- Unikat der Projekte --> Standardisierung
  - Logik entwerfen, dass alle Sicherheitsrichtlinien beachtet werden
  - Digitale Sicherheit
- Test
- Methoden

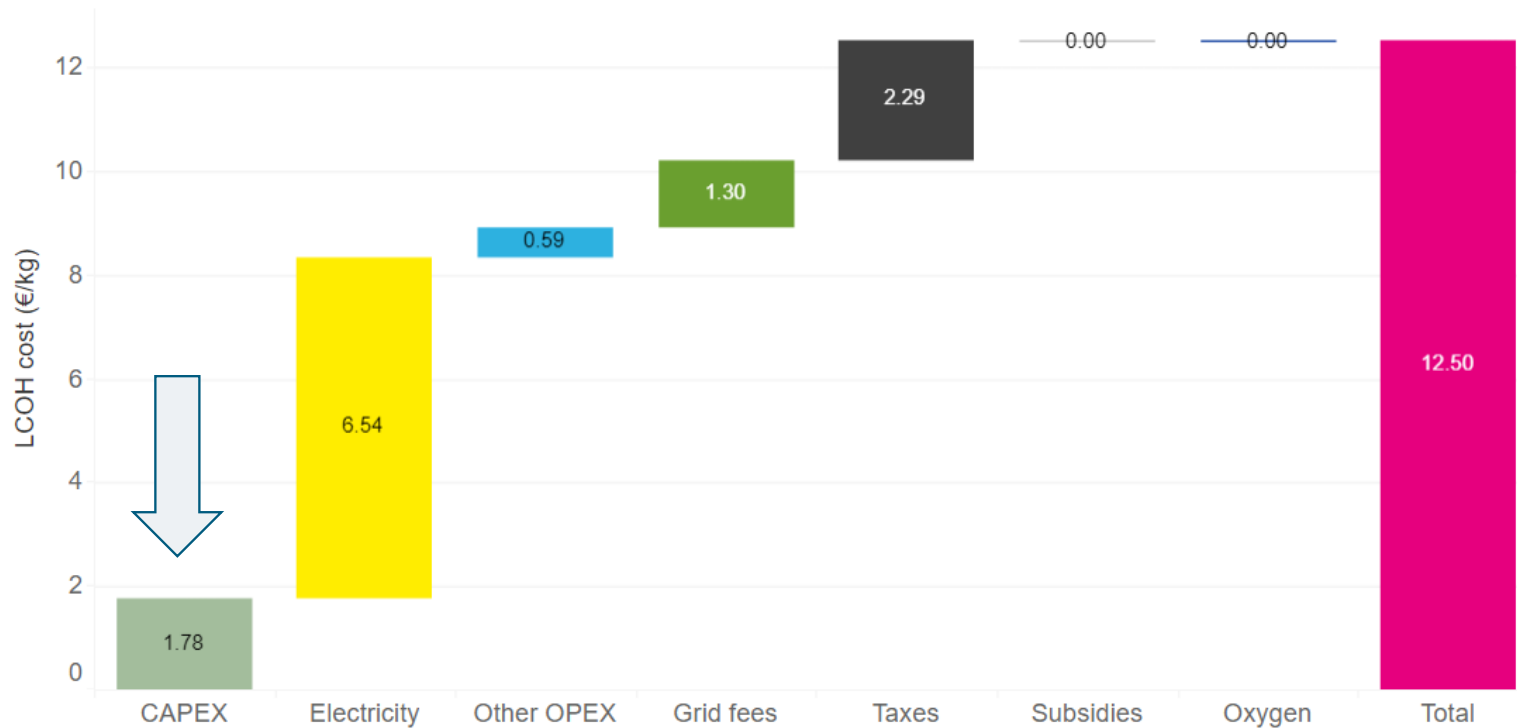
# Elektrolyseur-Kosten Analyse

Komponenten				Prototyp		Manufaktur		Serie	
Pos.	Anzahl	Benennung	Material	Hersteller	Kosten	Hersteller	Kosten	Hersteller	Kosten
03.001	11	Bipolar Plate	V2A + Ti	ProfiRoll	1.276,00 €				
03.004	10	Porous Transport Layer	V2A + Ti	Haver&Boecker	1.000,00 €				
03.005	10	Gas Diffusion Layer	V2A	Haver&Boecker	1.000,00 €				
03.006	10	Catalyst Coated Membrane	Nafion	Fumatec	4.000,00 €				
03.007	10	Subgasket	PEN	Müller-Alhorn	700,00 €				
03.009	11	Gasket Anode	EPDM	RCT	275,00 €				
03.010	11	Gasket Cathode	EPDM	RCT	275,00 €				
03.011	1	Current Distributor Anode	Copper+Gold	IWU	220,00 €				
03.012	1	Current Distributor Cathode	Copper+Gold	IWU	220,00 €				
01.014	1	Compression End Plate Anode	1.4404	WZB Ullmann	955,00 €				
01.015	1	Compression End Plate Cathode	1.4404	WZB Ullmann	955,00 €				
01.016	1	Insulation Plate Anode	PTFE	KTW Gornau	320,00 €				
01.017	1	Insulation Plate Cathode	PTFE	KTW Gornau	230,00 €				
01.018	4	Gasket Insulation	EPDM	RCT	60,00 €				
01.019	2	Stand	1.4404	IWU	100,00 €				
01.020	18	Screw Spindle	1.4404	Betec	19,80 €				
01.021	18	Insulation Sleeve	PTFE	KTW Gornau	360,00 €				
01.022	2	Alignment Pin D12	PTFE	KTW Gornau	62,00 €				
01.023	2	Alignment Pin D8	PTFE	KTW Gornau	60,00 €				
01.024	2	Handle	-	Ganter	60,00 €				
01.025	2	Port Cover H2	1.4404	IWU	30,00 €				
01.026	2	Port Cover H2O	1.4404	IWU	30,00 €				
01.027	18	Spring Assembly	-	Betec	10,48 €				
03.000	1	Assembly		IWU	500,00 €				
				Gesamt:	12.718,28 €	Gesamt:	- €	Gesamt:	

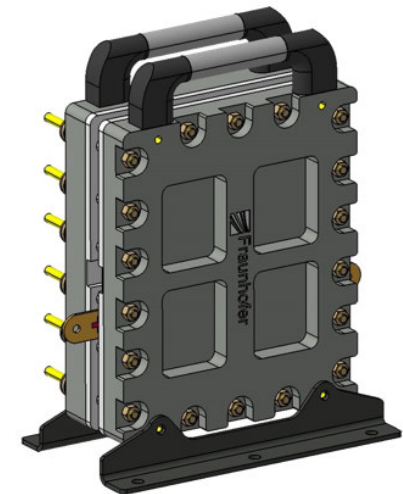


## L.C.O.H – DEUTSCHLAND 2024 (12kW Elektrolyseur ähnlich HyVentus)

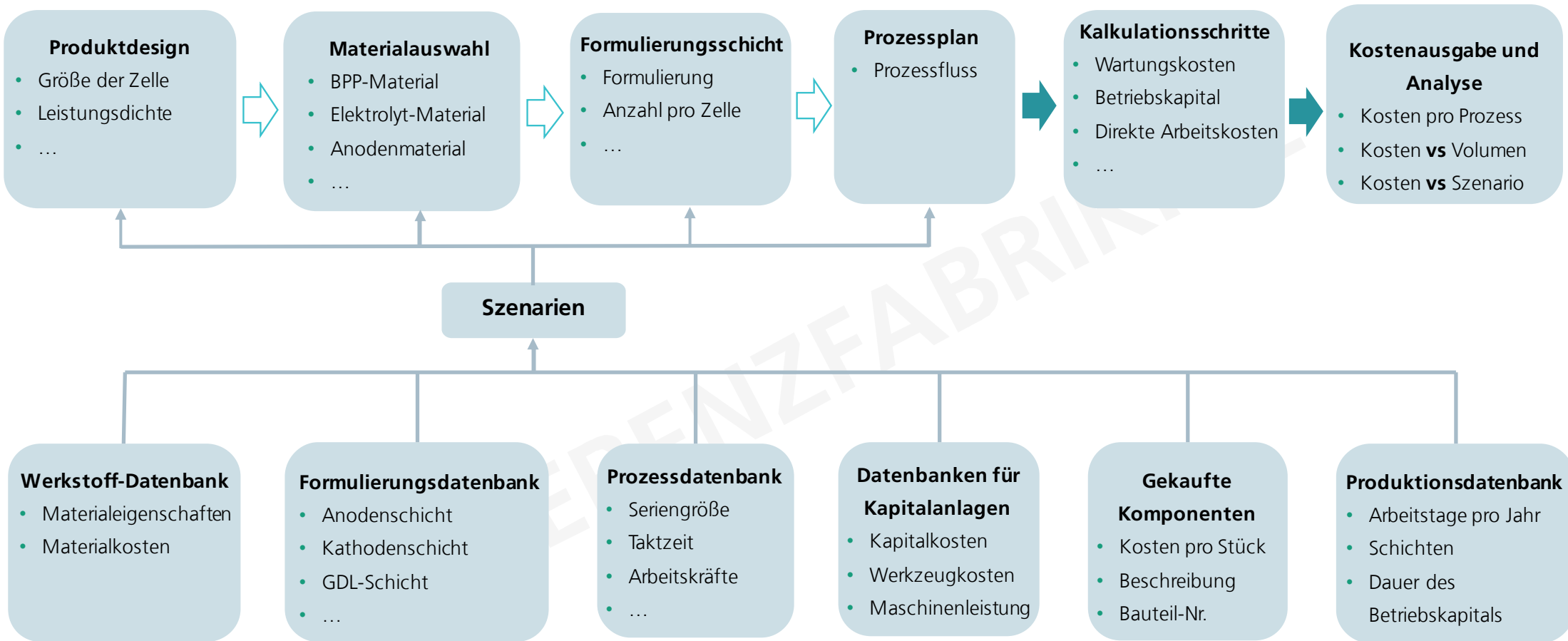
Wie werden diese Kosten bewertet und reduziert, um H2 rentabel zu machen?



Ziel: 0,9€/kg

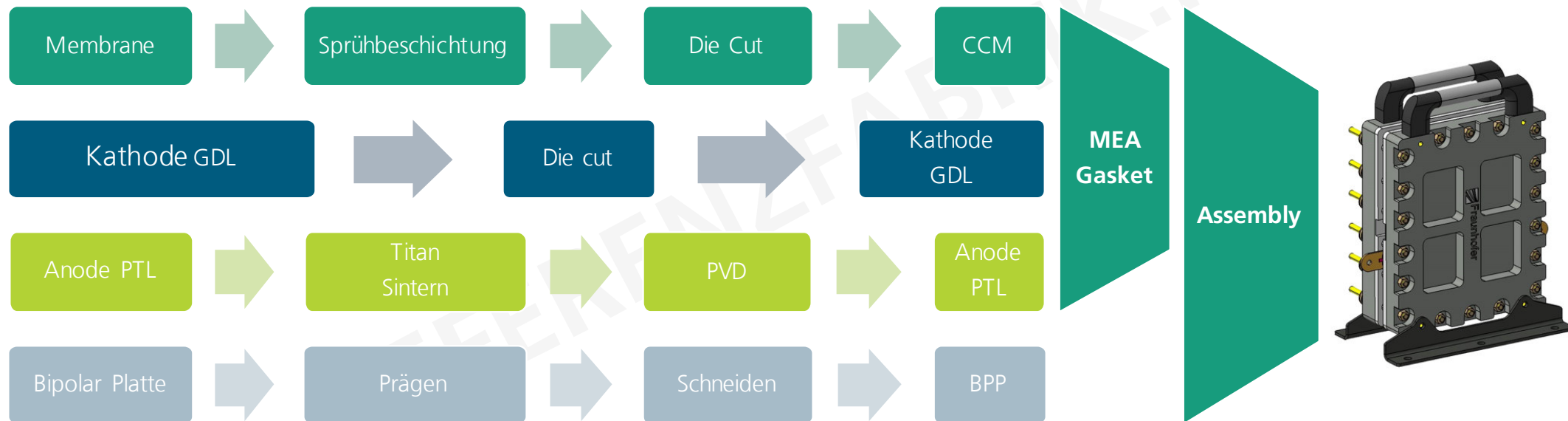


# PEM-Stack - Kostenmodell



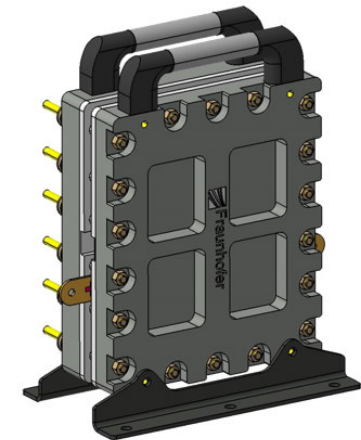
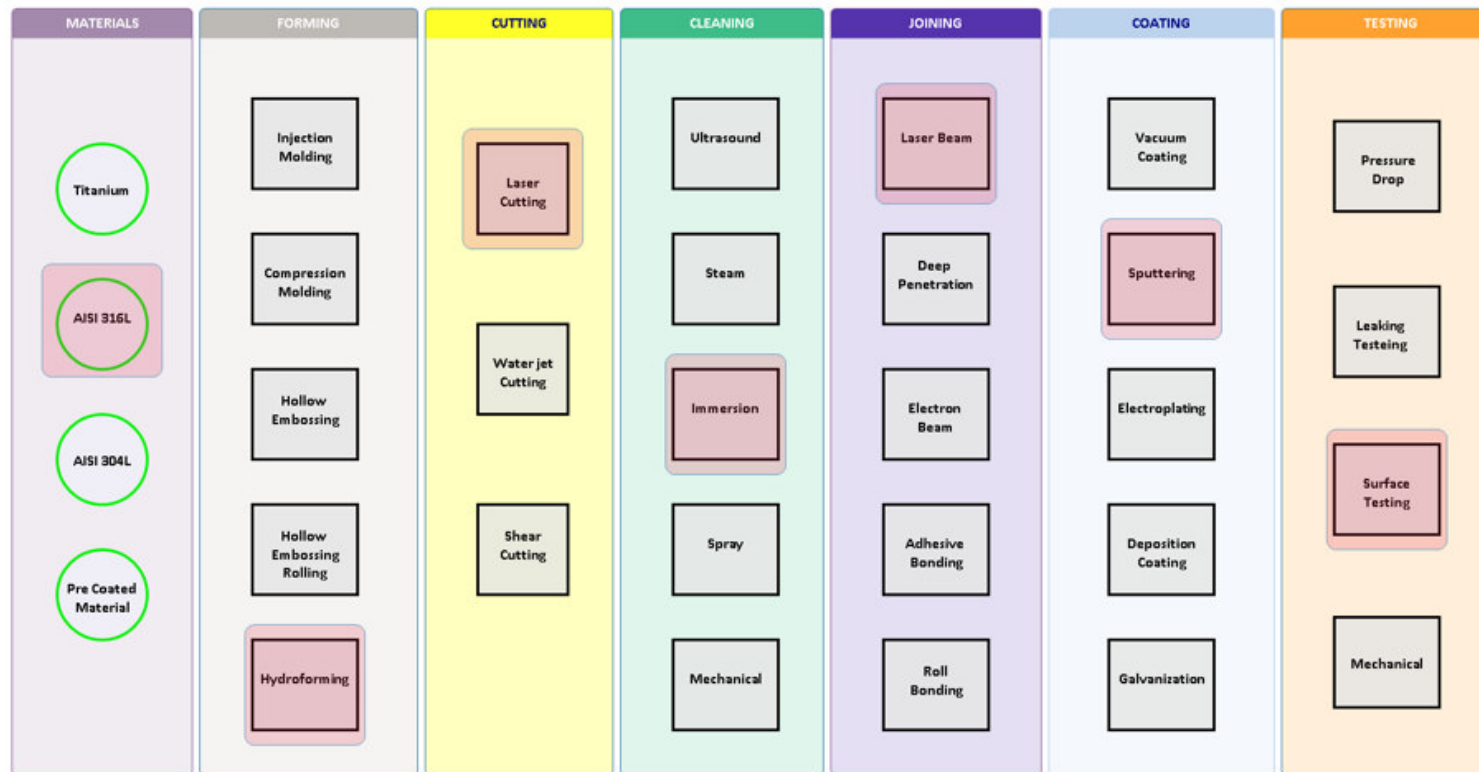
# HyVentus: Bottom-up Analyse

Zuordnung von Produktionsverfahren zu jeder Komponente des Stacks



# HyVentus: Bottom-up Analyse:

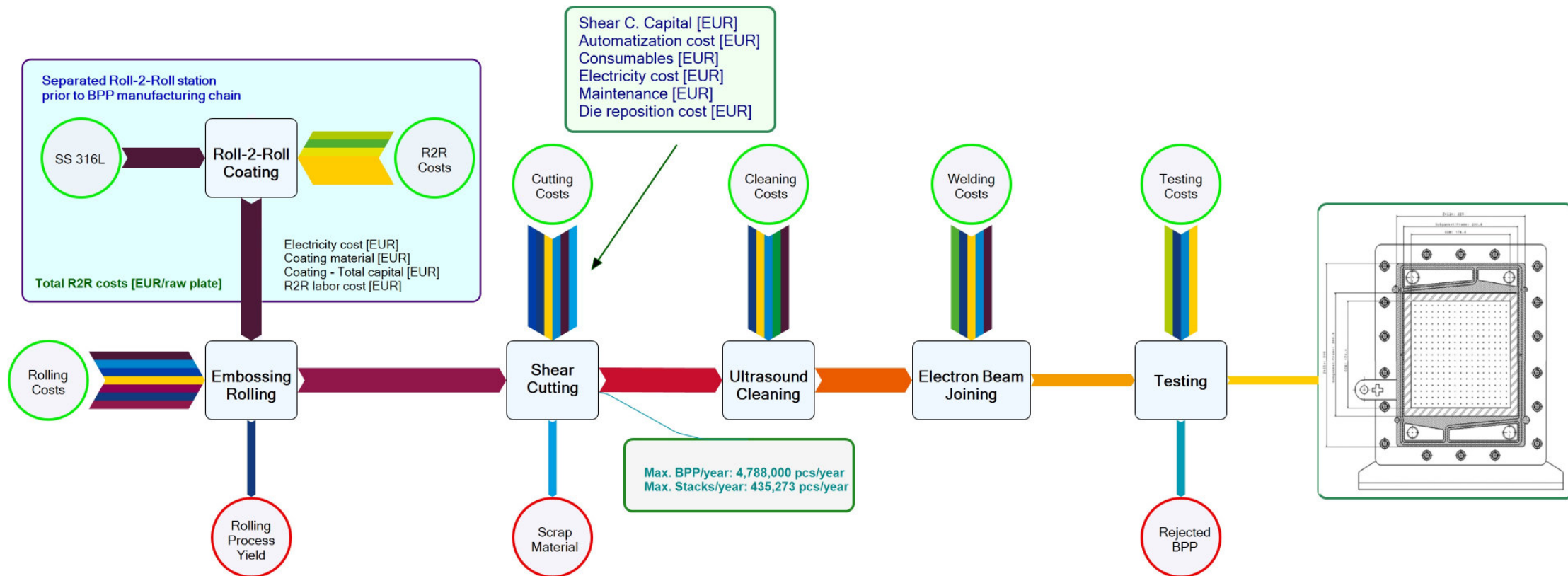
## Simulationsbeispiel auf Basis des Baukastensystems





# HyVentus

## Erwartete Kostenreduzierung - Lösungsansätze



- **Bottom-up-Kostenanalyse:**

Kalkuliert die Kosten für die Produktion von Elektrolyseur-Stacks, indem jeder Komponente des Elektrolyseur-Stacks ein spezifischer Herstellungsprozess zugeordnet wird.

- **Techno-ökonomische Analyse:**

Ein Prozess, um zu analysieren und zu verstehen, wie profitabel ein Produkt oder ein Prozess sein könnte und wie die Rentabilität gesteigert werden kann. T.O.A. basiert auf Informationen darüber, wie Produkte konstruiert und produziert werden.

Der technoökonomische Aspekt von TEA bezieht sich auf ein umfassendes Verständnis des Energie- und Materialverbrauchs für ein bestimmtes Verfahren sowie auf die Typen der für das Verfahren verwendeten Maschinen.

- **Design For Manufacturing and Assembly (DFMA):**



Systematischer Ansatz für die Produktentwicklung, der sich auf die Optimierung des Herstellungs- und Montageprozesses konzentriert, um die Kosten zu senken und die Fertigungseffizienz zu verbessern.

# HyVentus

## Wertanalyse- Kostenbewertung - Kalkulationen

- **Techno-ökonomische Kalkulationen (jährliche Betriebskosten mit Kapitalkosten und Betriebskosten)**

- **Produktionssysteme benötigt ( $S_{req}$ ):**

$$S_{req} = \frac{A_{area}}{L_{cap}}$$

$A_{area}$  = Jährlich produzierte aktive Fläche

$L_{cap}$  = Kapazität einer einzelnen Fertigungslinie

- **Kapitalkosten für Ausrüstung ( $C_{eq}$ ):**

$$C_{eq} = S_{req} * (C_{line}) * (1 + R_{install})$$

$C_{line}$  = Kosten der Ausrüstung für eine Fertigungslinie

$R_{install}$  = Installationsfaktor (normalerweise zwischen 5 % und 10 %)

- **Kapitalkosten des Gebäudes oder der Nutzfläche ( $C_{floor}$ ):**

$$C_{floor} = S_{req} * (R_{floor}) * (M_{footprint})$$

$R_{floor}$  = Gebäudekosten pro Flächenbasis

$M_{footprint}$  = Grundfläche einer Fertigungslinie

# HyVentus

## Wertanalyse- Kostenbewertung - Kalkulationen

- **Techno-ökonomische Kalkulationen (jährliche Betriebskosten mit Kapitalkosten und Betriebskosten)**

- **Jährliche Kosten für Energie ( $C_{energy}$ ):**

$$C_{energy} = S_{req} * (R_{power}) * (M_{use}) * 8760$$

$R_{power}$  = Stromverbrauch für eine einzelne Fertigungslinie

$M_{use}$  = prozentuale Auslastung der Produktionslinien auf Jahresbasis

- **Jährliche Arbeitskosten ( $C_{labor}$ ):**

$$C_{work} = S_{req} * (R_{worker}) * (M_{use}) * R_{labor} * 8760$$

$R_{labor}$  = Arbeitskosten

$R_{workers}$  = Mitarbeiter, die für eine einzige Fertigungslinie benötigt werden

- **Jährliche Gesamtkosten ( $C_{annual}$ ):**

$$C_{annual} = C_{work} + C_{energy} + C_{floor} + C_{eq} + C_{mat}$$

$C_{mat}$  = Kosten für das notwendige Rohmaterial

# HyVentus

## Wertanalyse- Kostenbewertung - Methoden

### DFMA Ziel



- Die Komplexität der Fertigung zu reduzieren
- Abfall zu minimieren
- Den Materialverbrauch und die Prozesse zu optimieren

### Wie?

**Materialauswahl**

**Prozessvereinfachung**

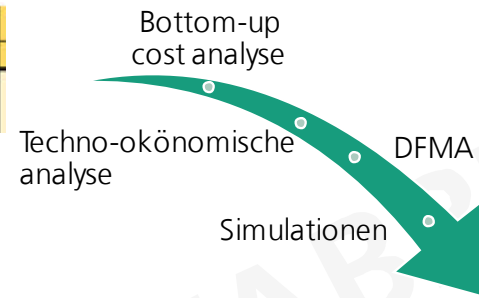
**Standardisierung**

**Toleranz-Optimierung**

# HyVentus

## Erwartete Kostenreduzierung – Bipolarplatten

Komponenten				Prototyp	
Pos.	Anzahl	Benennung	Material	Hersteller	Kosten
03.001	11	Bipolar Plate	V2A + Ti	ProfiRoll	1.276,00 €



### Kostenreduzierung

	Stacks/year			
	10,000	50,000	100,000	200,000
	EUR	EUR	EUR	EUR
Price per stack (BPP only):	522.36	308.62	242.51	202.99



# HyVentus

## Erwartete Kostenreduzierung – Bipolarplatten

MANUFACTURING COST ALLOCATION

Unit  
Manufacturing  
Cost  
(\$/unit)

**\$907**

■ 10,000 stack units



● Titanium ● Cleaning ● Labor  
● Stamping ● Cutting ● Welding  
● Robot ● Electricity ● Natural Gas  
● Fuel Oil

● Titanium ● Cleaning ● Electricity  
● Natural Gas ● Fuel Oil

● Titanium ● Cleaning ● Electricity  
● Natural Gas ● Fuel Oil



# HyVentus

## Wertanalysen und Simulationsergebnisse

### Simulationen Ergebnisse:

- Spezifische Datenbank für die Wasserstoffproduktion auf der Referenzfabrik Baukasten System aufgebaut.
- Simulation und Analyse der einzelnen Elektrolyseur-Komponenten für verschiedene Produktionstechnologien.
- Neukonzeption und Design-Anpassungen.
- Abstimmung der am besten passenden Produktionskette für jedes gewünschte Ergebnis.
- Skaleneffekte + Nutzung der Maschinenrate + Optimales Design:

**Bipolarplatten bis zu 70% günstiger**  
**Elektroliseur bis zu 80% günstiger**



# HyVentus

## Wertanalysen und Simulationsergebnisse

---

REFERENZFABRIK.H2

# Wasserstoffsystem

## Herausforderungen



TECHNOLOGIE	Verfügbarkeit ↑
	Industrialisierung ↑
	Kosten ↓
	Effizienz ↑
	Lebensdauer ↑

ELEKTROLYSEUR

BRENNSTOFFZELLE

H<sub>2</sub> QUELLE

H<sub>2</sub> SENKE

MARKT

Wieviel?

Wann?

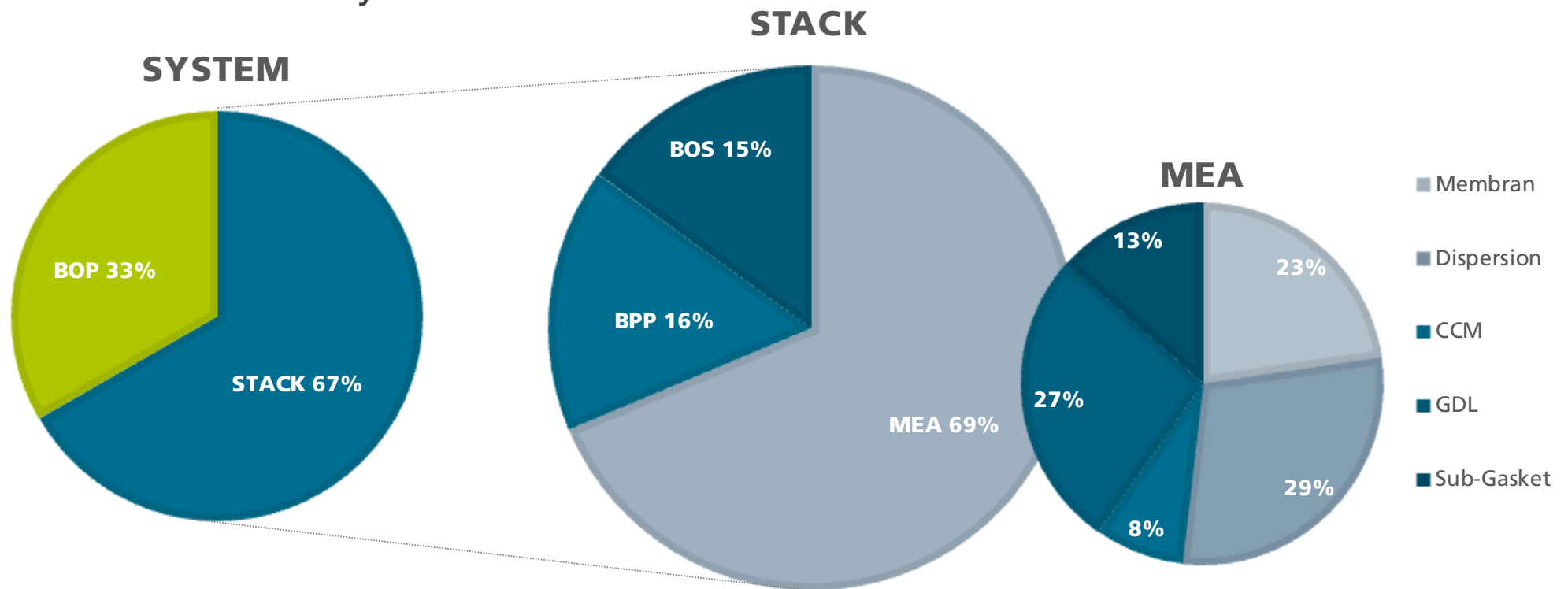
Was?

# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Kostentreiber

Elektrische Leistung: 80 kW<sub>net</sub>

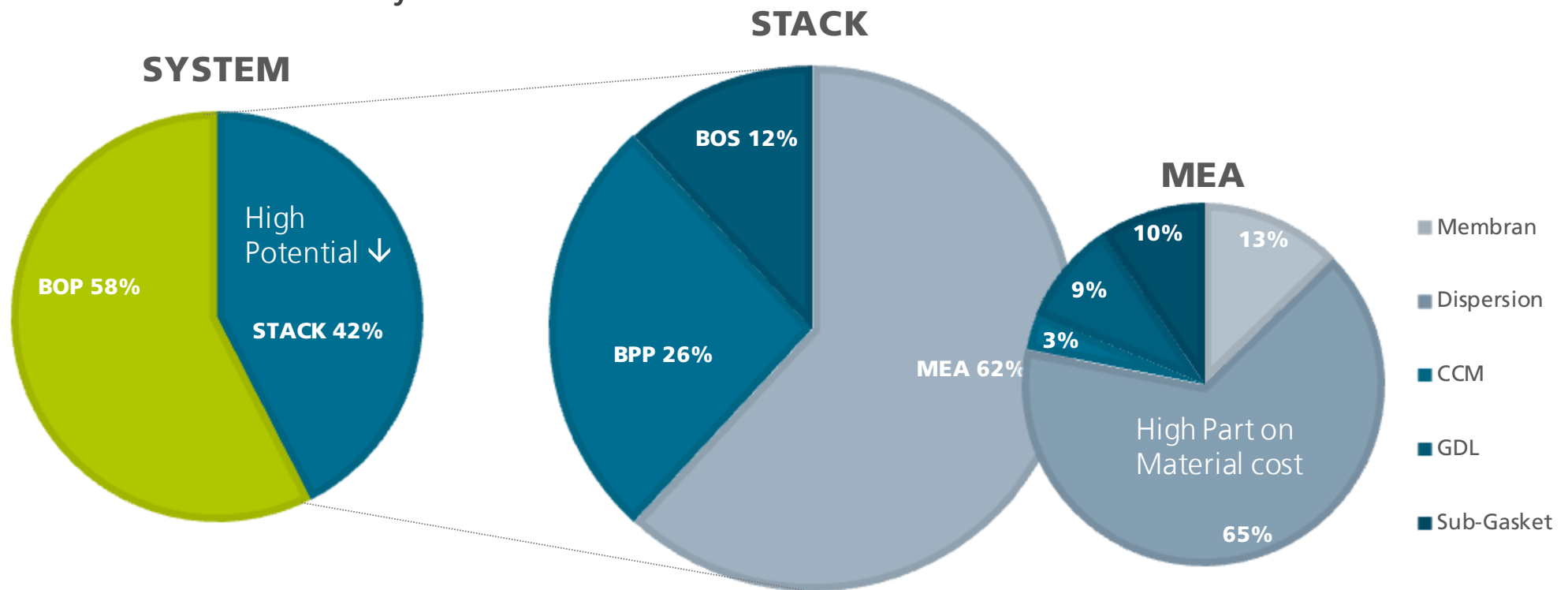
Produktionsvolumen: **1.000 Systeme**



# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Skaleneffekte

Elektrische Leistung: 80 kW<sub>net</sub>  
Produktionsvolumen: **500.000 Systeme**

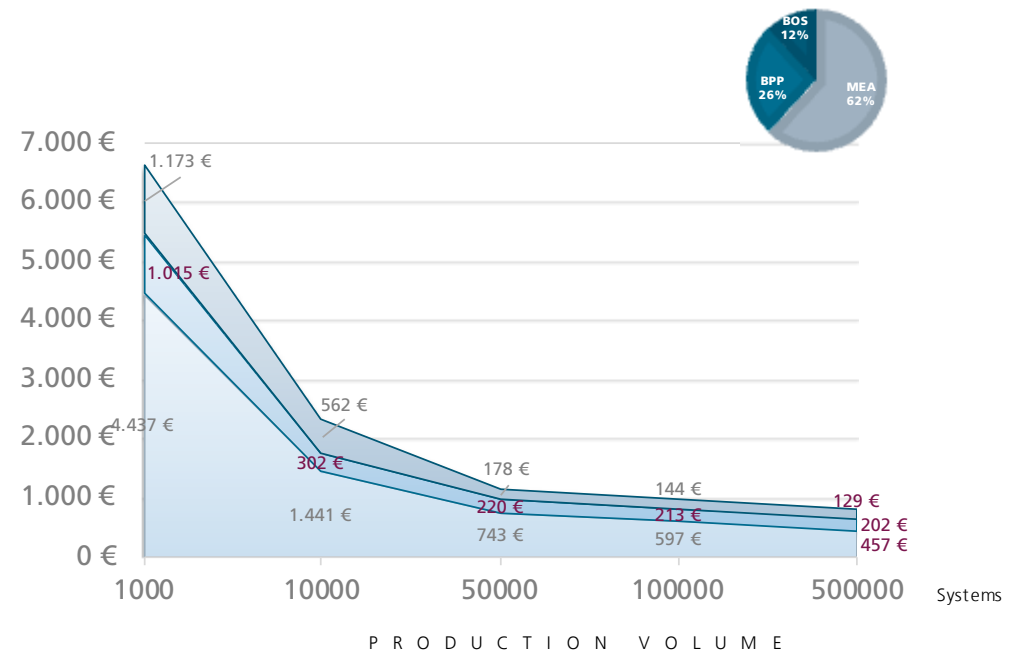
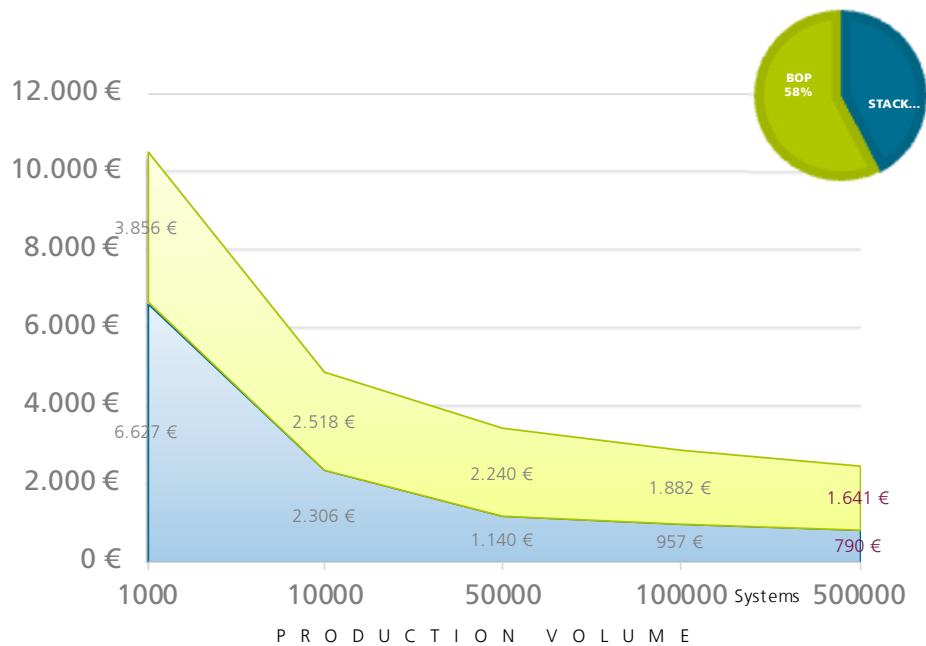


# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Skaleneffekte

Elektrische Leistung: 80 kW<sub>net</sub>

Produktionsvolumen: **1.000 - 500.000 Systeme**



# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Zielkosten

Elektrische Leistung: 80 kWnet

Aktive Zellen: 380

Systeme: 500.000

Bipolar Platte → 380 Mio. HP/a

Kosten pro Stack	<b>202 €</b>
------------------	--------------

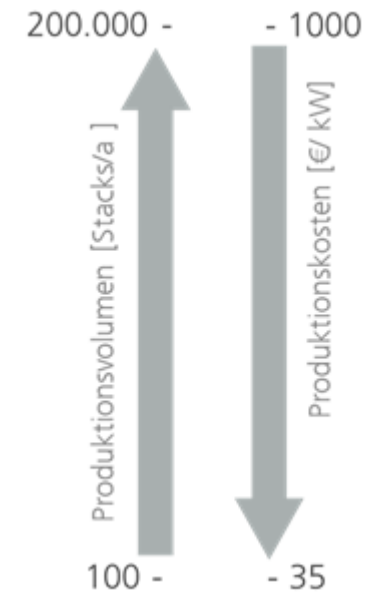
Einzelkosten	<b>0,64 €</b>
--------------	---------------

Material	0,33 €
----------	--------

Fertigung	0,10 €
-----------	--------

Werkzeug	0,10 €
----------	--------

Beschichtung	0,11 €
--------------	--------





# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Zielkosten

Elektrische Leistung: 80 kW<sub>net</sub>

Aktive Zellen: 380

Systeme: 500.000

Membran-Elektroden-Assembly 190 Mio./a

Gesamtkosten pro Stack	<b>457 €</b>
------------------------	--------------

Einzelkosten	<b>1,20 €</b>
--------------	---------------

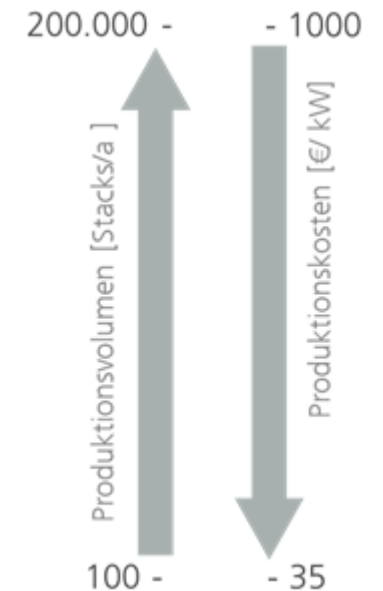
Membran	0,10 €
---------	--------

Tinte & Catalyst (CCM)	0,77 €
------------------------	--------

GDL	0,19 €
-----	--------

Pressing and Cutting	0,01 €
----------------------	--------

Sub-Gasket	0,13 €
------------	--------



# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Zielkosten

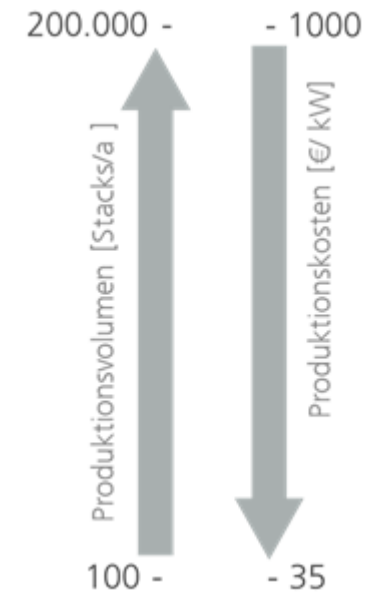
Elektrische Leistung: 80 kWnet

Aktive Zellen: 380

Systeme: 500.000

## Balance of Stack

Gesamtkosten per Stack	129 €
(Einzelkosten per Zelle total)	(0,34 €)
Laser Welding	0,16 €
Stack Assembly	0,08 €
Gasget	0,00 €
Endplate	22,00 €
Collector	3,40 €
Stack (Bands, Housing, Conditioning)	13,44 €



# PEM-BRENNSTOFFZELLE

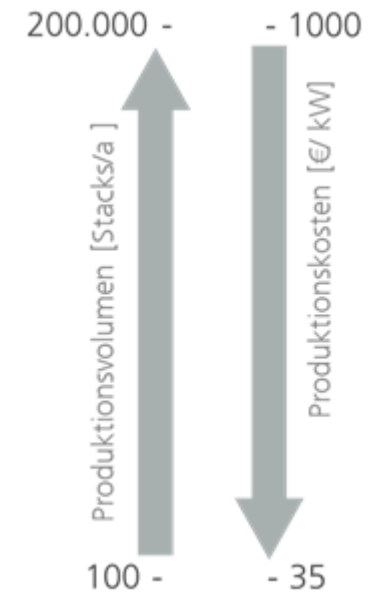
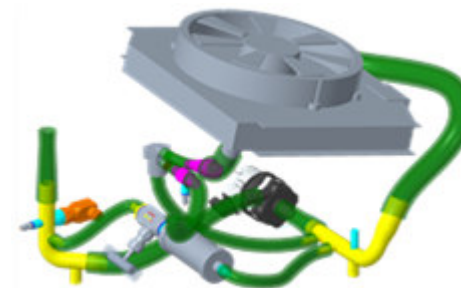
## Zielkosten

Elektrische Leistung: 80 kW<sub>net</sub>

Systeme: 500.000

### Balance of Plant

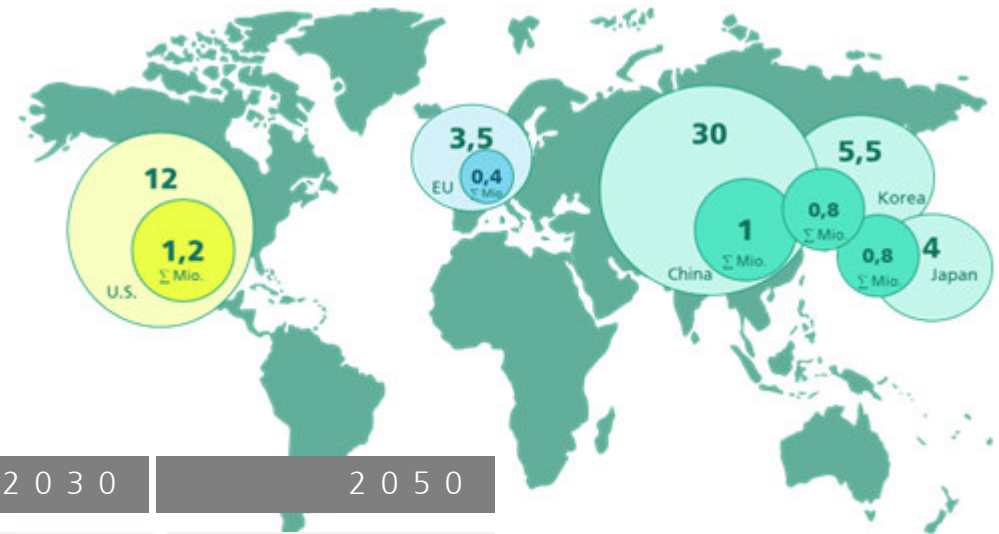
Gesamtkosten per System	<b>1.641 €</b>
Air circuit	825 €
Water recovery circuit	91 €
Cooling	312 €
Hydrogen circuit	174 €
System control	65 €
Sensor	78 €
others	96 €



# PEM-BRENNSTOFFZELLE

## Wertanalyse

Elektrische Leistung: 80 kWnet



2030: 04,2 Mio.  
2050: 55,0 Mio.

500.000 SYSTEME		2030	2050
= 380 Half plates	202 €	ca. 848 Mio.€	ca. 11 Mrd. €
= 190 MEA	457 €	ca. 1.462 Mio.€	ca. 25 Mrd.€
= 1 BOS → Endplates	22 €	ca. 70 Mio.€	ca. 1,2 Mrd.€
= 1 BOP → Air circuit	825 €	ca. 2.640 Mio.€	ca. 45 Mrd.€
= 1 BOP → Cooling	312 €	ca. 998 Mio.€	ca. 17 Mrd.€
		Σ 5.816 Mio. €	Σ ca. 100 Mrd. €



# Kontakt

---

**Dr.-Ing. Ulrike Beyer**  
**Leiterin Referenzfabrik.H2**  
**Tel. +49 371 5397-1066**  
**[ulrike.beyer@iwu.fraunhofer.de](mailto:ulrike.beyer@iwu.fraunhofer.de)**

[info@referenzfabrik.de](mailto:info@referenzfabrik.de)  
[www.referenzfabrik.de](http://www.referenzfabrik.de)

Fraunhofer IWU  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz  
[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)



Fraunhofer-Institut für Werkzeug-  
maschinen und Umformtechnik IWU

