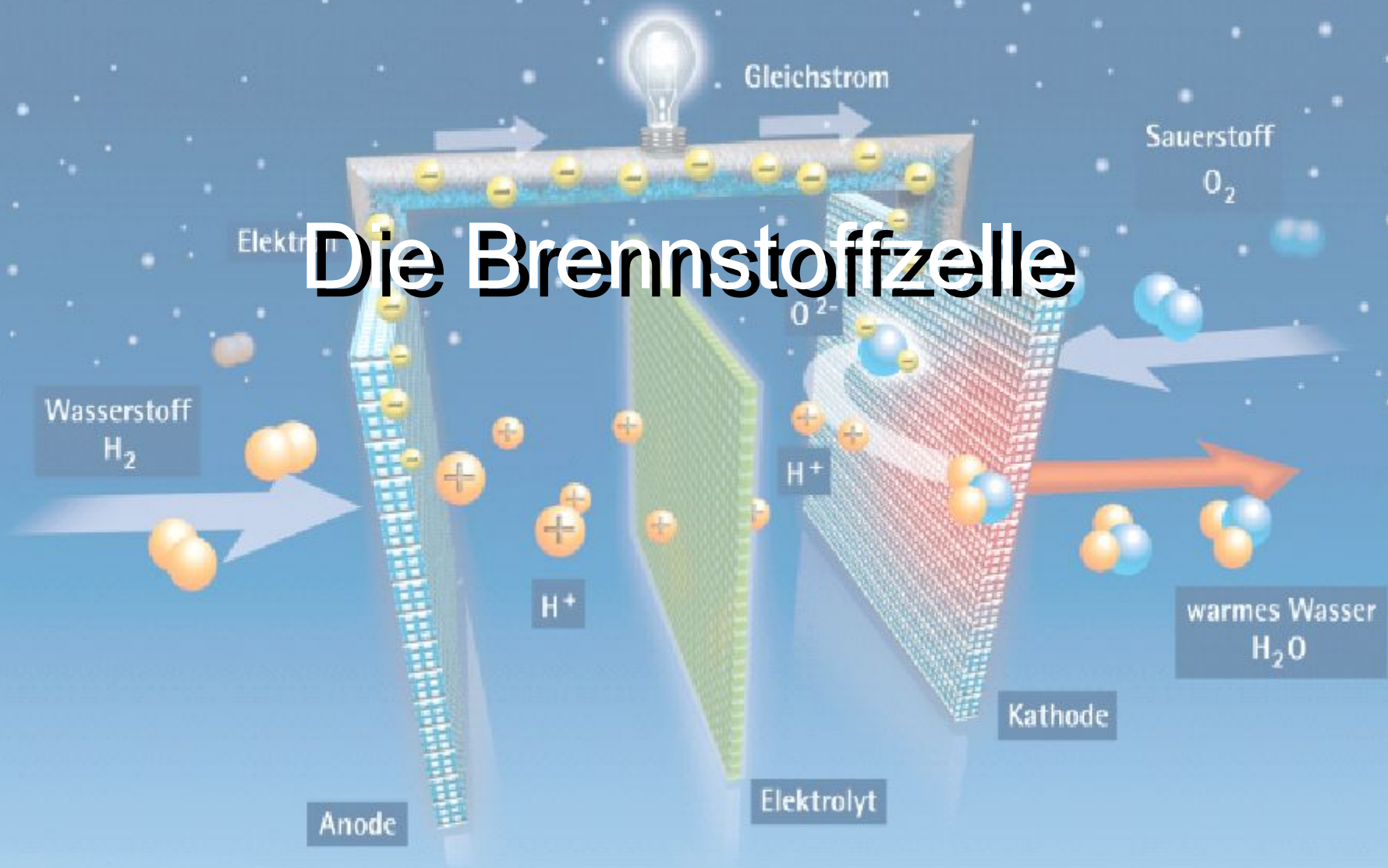


# Die Brennstoffzelle



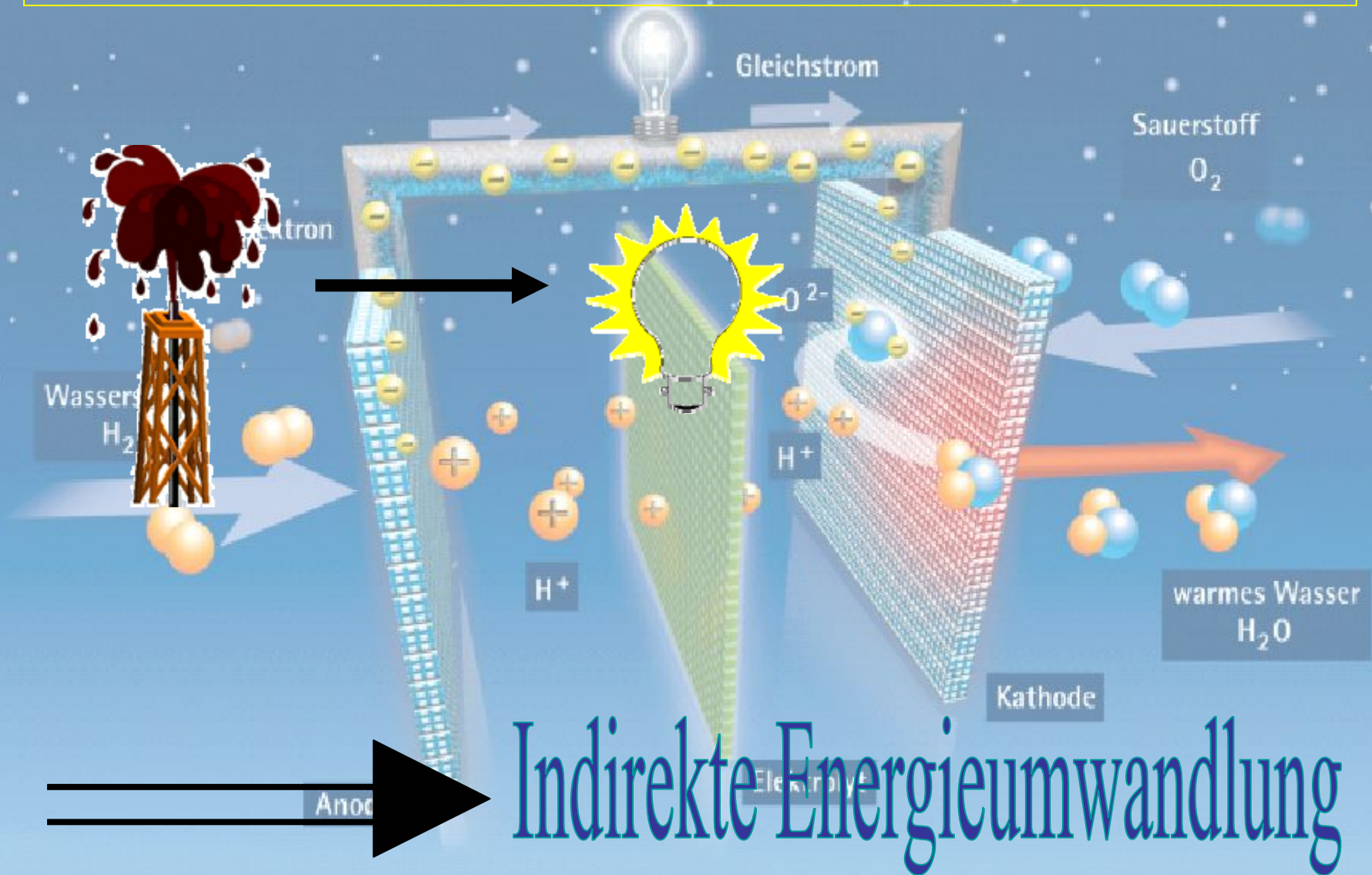
# Gliederung

- Was ist eine Brennstoffzelle?
- Geschichte der Brennstoffzelle
- Aufbau und Funktionsweise der Brennstoffzelle
- Unterschiedliche Arten
- Gesamtwirkungsgrad
- Kosten

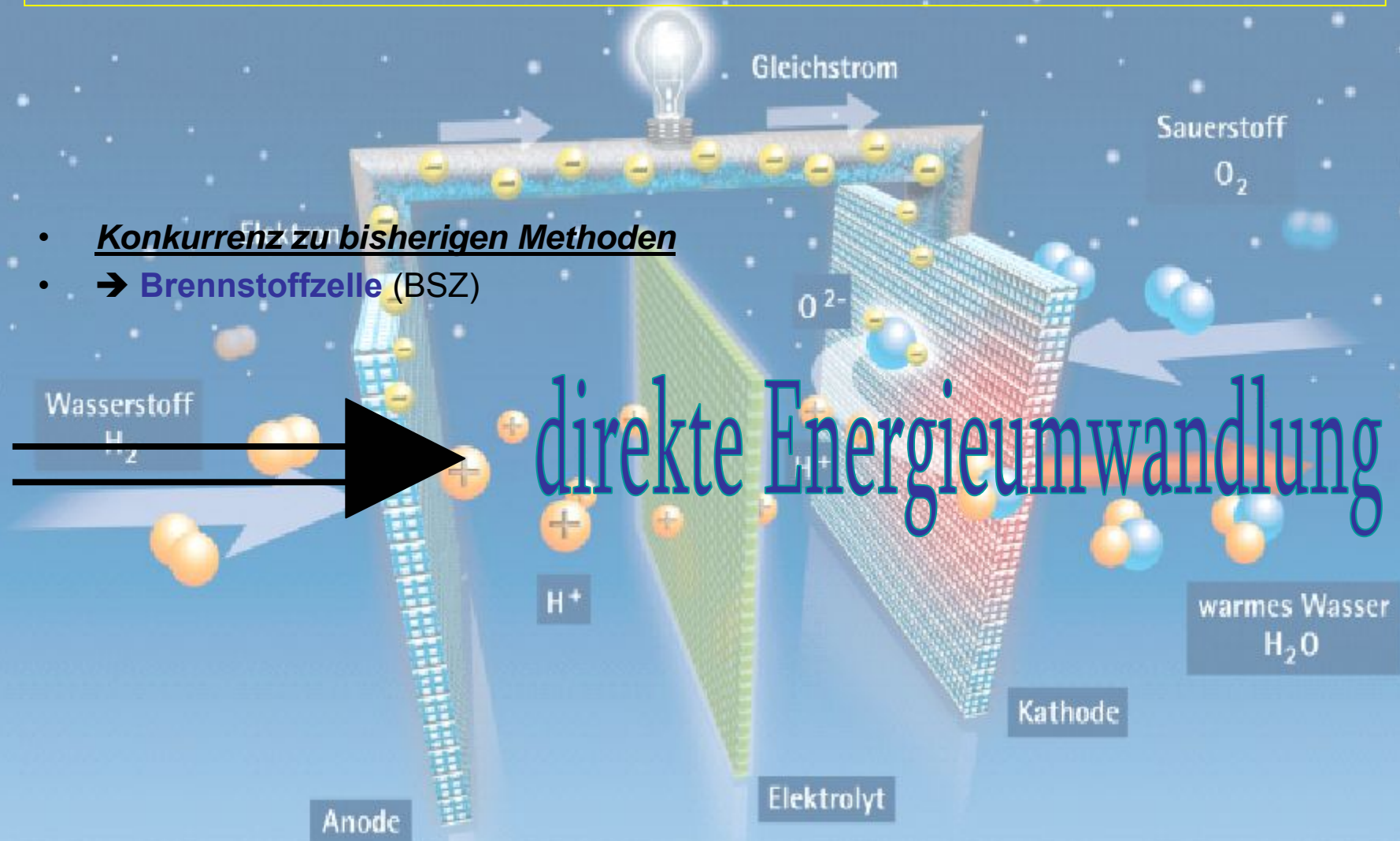


Was ist eine Brennstoffzelle?

1



- Konkurrenz zu bisherigen Methoden
- → Brennstoffzelle (BSZ)

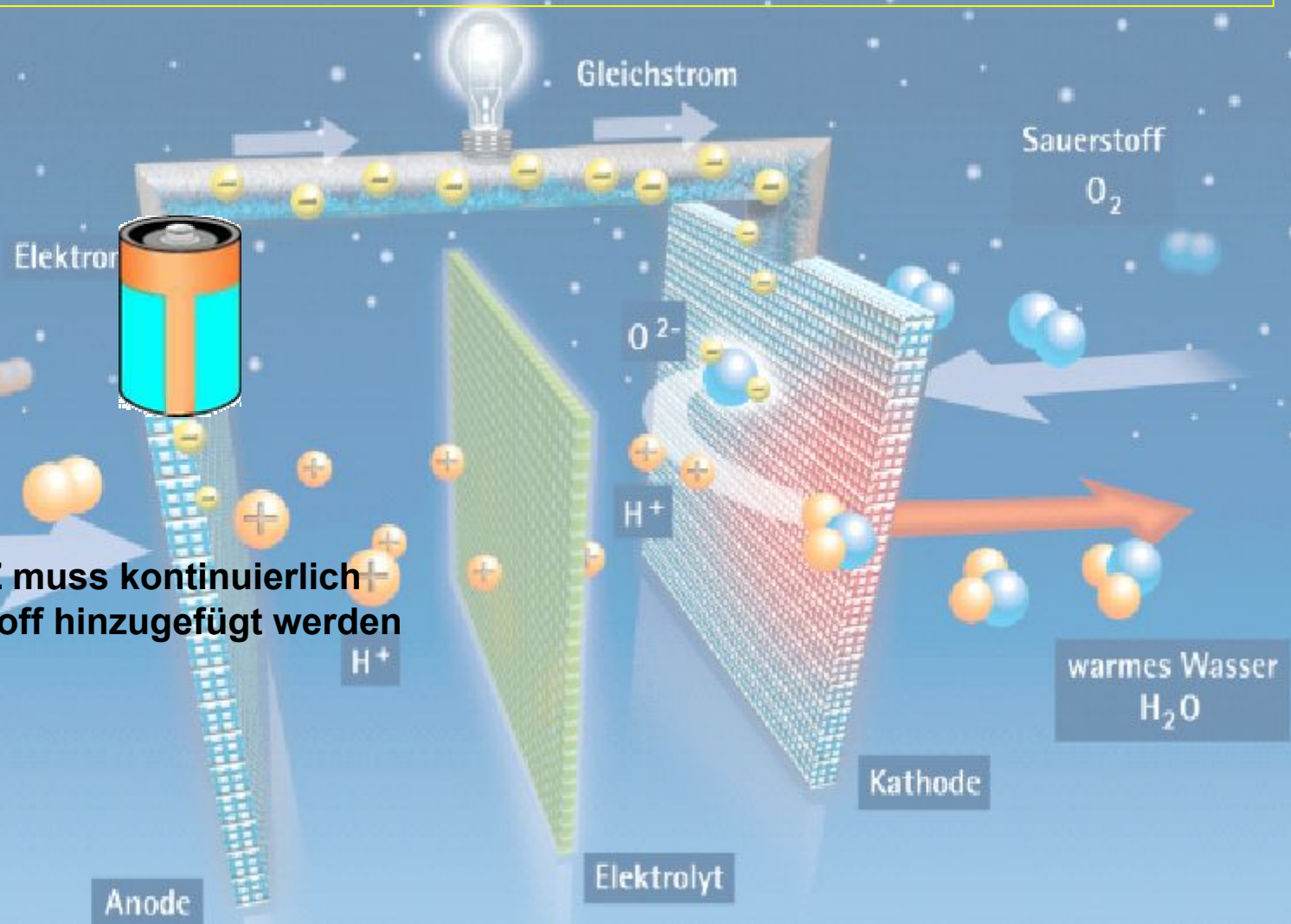


- **ähnlich**

Wasserstoff  
 $H_2$

- **Aber:**

- **Der BSZ muss kontinuierlich Brennstoff hinzugefügt werden**



- 1800 → Johann wilhelm Ritter entdeckt die Elektrolyse
- 1839 → Sir William Grove kehrt den Ritterschen Versuch um



- **Geburtsstunde der BSZ**

Aber:

**Brennstoffzelle war technologisch seiner Zeit weit voraus**

- Elektrochemie = komplex
- Platin sehr teuer

→ **Werner von Siemens**

Wasserstoff  
 $H_2$



zur gleichen Zeit erfand er  
das **Dynamo**

- unkompliziert
- preisgünstig

Anode

Elektrolyt

Kathode

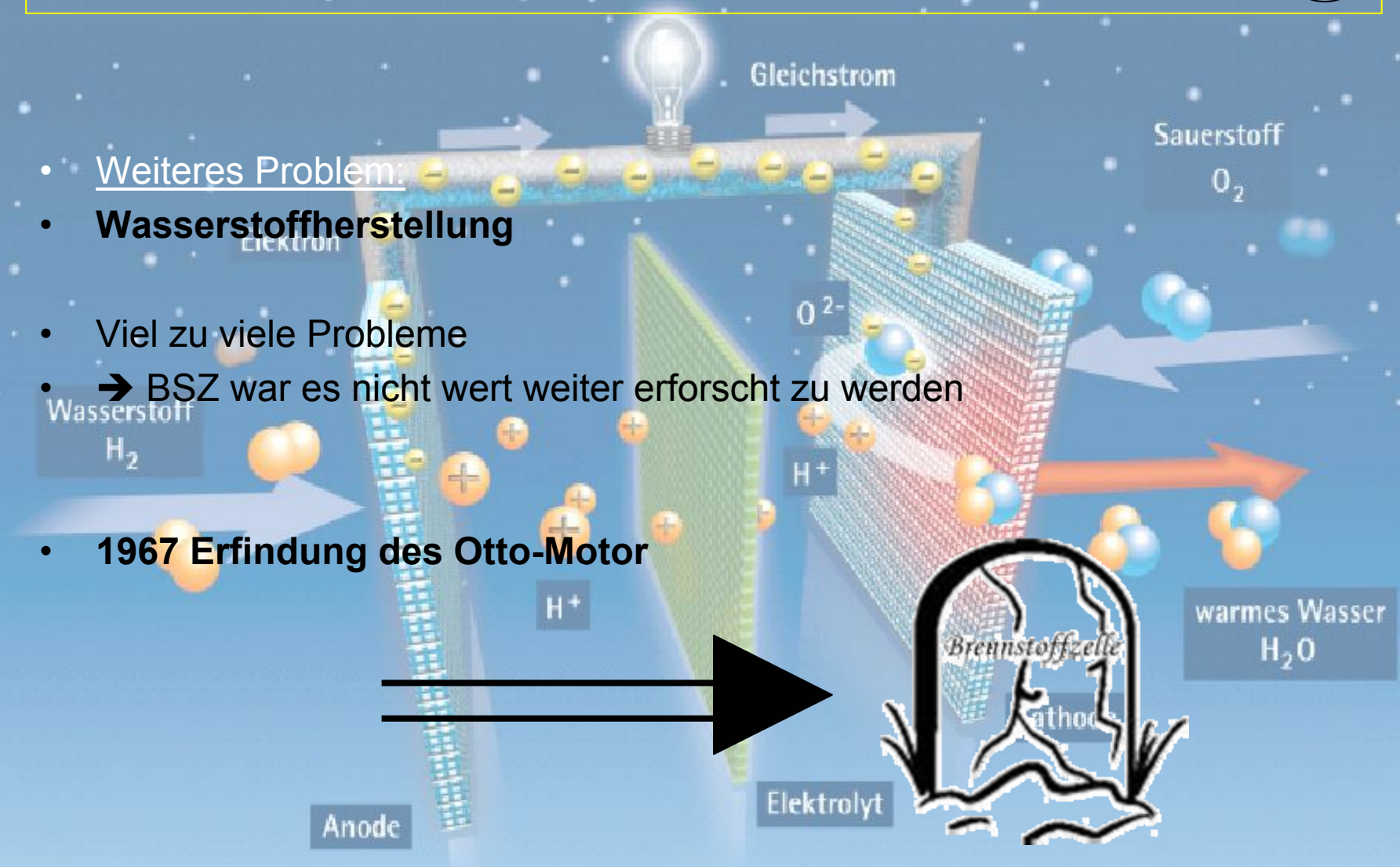
warmes Wasser  
 $H_2O$

Sauerstoff  
 $O_2$

Gleichstrom



- Weiteres Problem:
- **Wasserstoffherstellung**
- Viel zu viele Probleme
- → BSZ war es nicht wert weiter erforscht zu werden
- **1967 Erfindung des Otto-Motor**





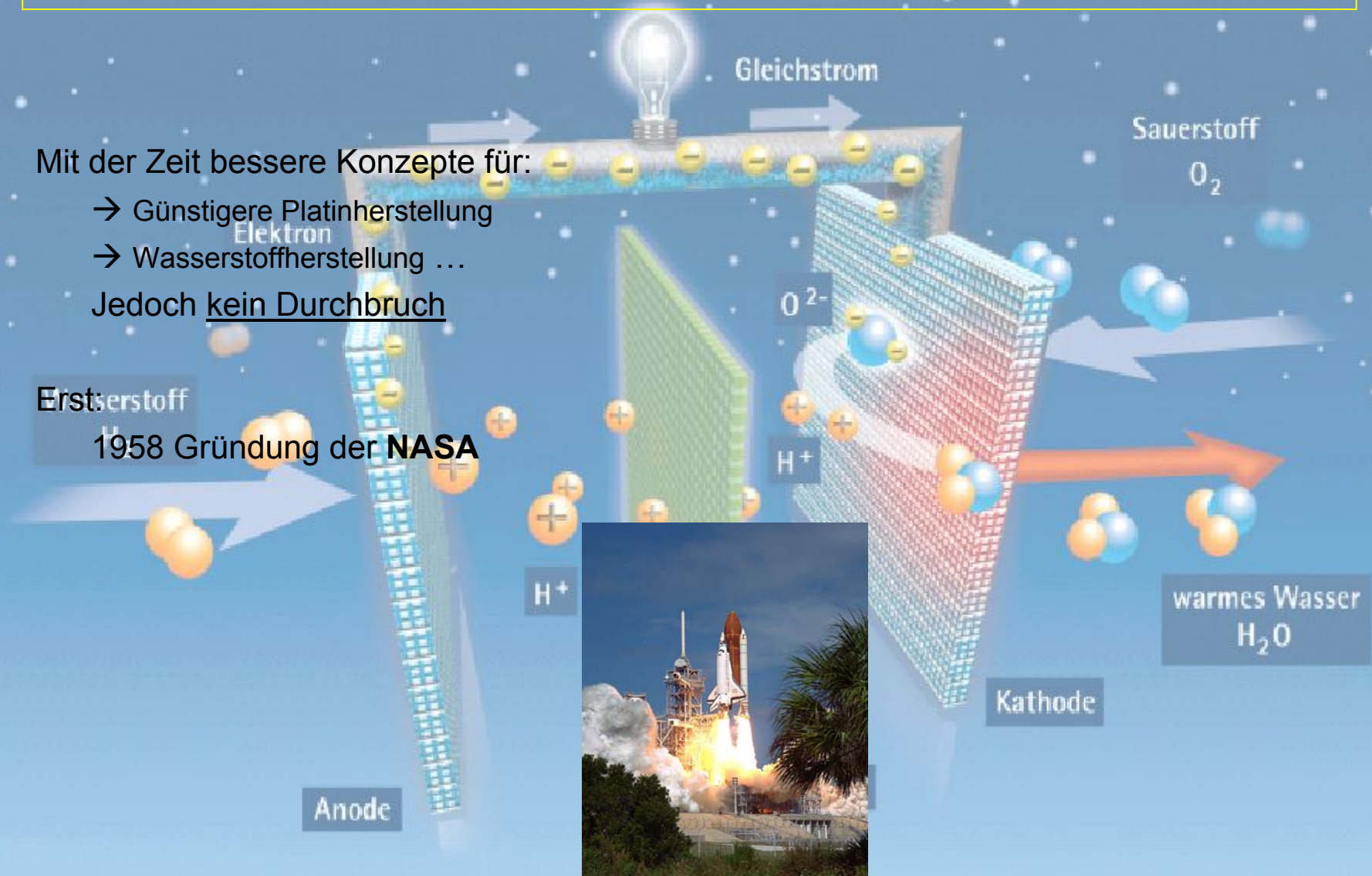
Mit der Zeit bessere Konzepte für:

- Günstigere Platinherstellung
- Wasserstoffherstellung ...

Jedoch kein Durchbruch

Erst:

1958 Gründung der **NASA**



## Raumkapsel sollte mit Strom versorgt werden

- Atomreaktoren → zu risikoreich
- Solarenergie → zu leistungsarm
- Batterie → groß, schwer und kurze Lebensdauer

Wasserstoff  
 $H_2$

Lösung = BSZ

*Jedoch für Erde unpraktikabel*

Anode

Elektrolyt

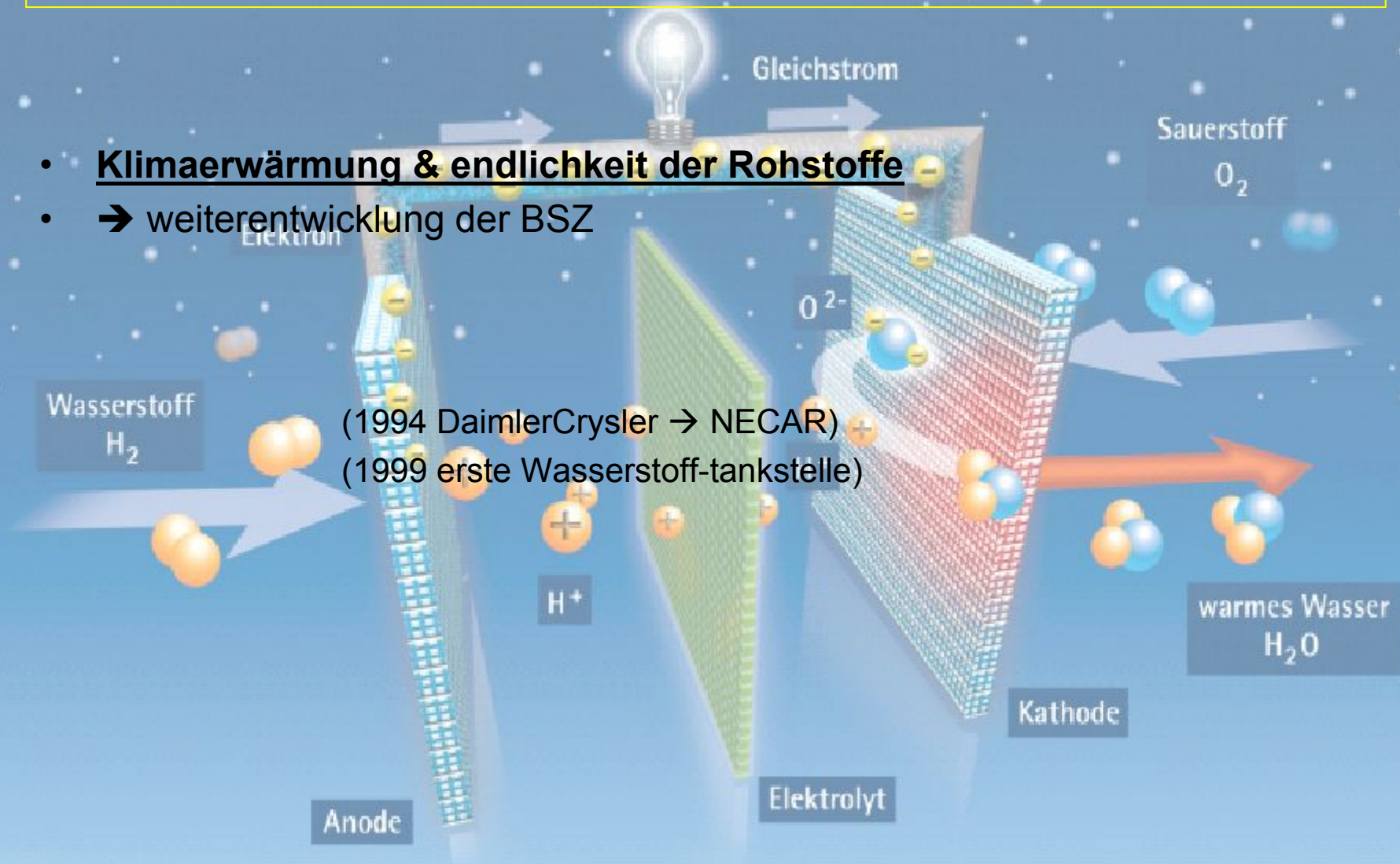
Kathode

Gleichstrom

Sauerstoff  
 $O_2$

warmes Wasser  
 $H_2O$

- **Klimaerwärmung & endlichkeit der Rohstoffe**
- → weiterentwicklung der BSZ



(1994 DaimlerCrysler → NECAR)  
(1999 erste Wasserstoff-tankstelle)

Aufbau der BSZ

→ **Sehr einfacher Aufbau**

aufgebaut wie ein Sandwich (3 Lagen)

Äußere Schicht = Elektroden (Anode & Kathode)

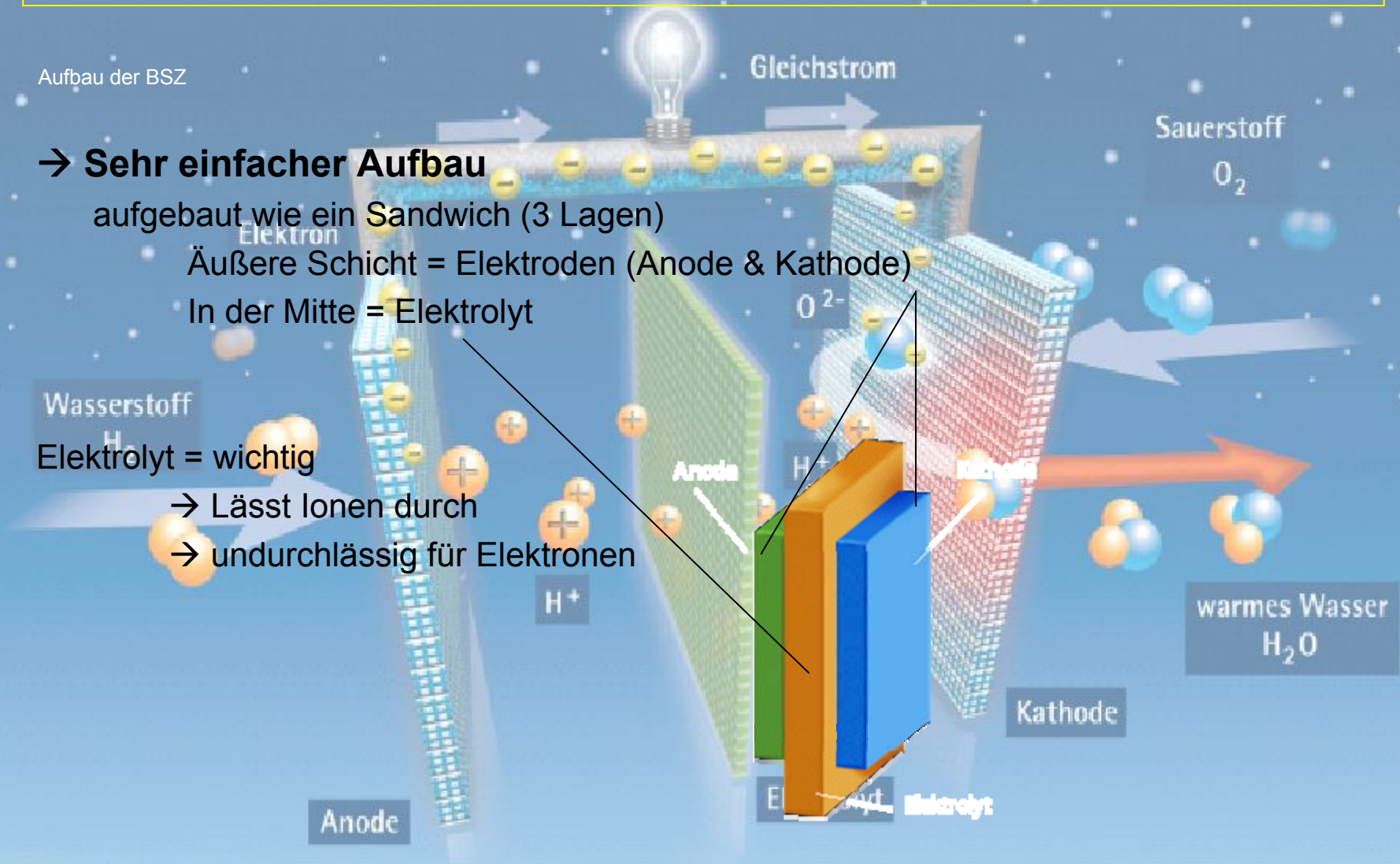
In der Mitte = Elektrolyt

Wasserstoff  
 $H_2$

Elektrolyt = wichtig

→ Lässt Ionen durch

→ undurchlässig für Elektronen



Funktionsweise

- Anode & Kathode → Katalysator-schicht (Platin)

Elektrolyt = durchlässig für bestimmte Ionen  
(abhängig vom Elektrolyt)

(Heute) 6 verschiedenen Arten von BSZ

→ Fast gleiche Funktionsweise:

Anode → Brennstoff (Wasserstoff)

Kathode → Sauerstoff (Luft)

Kat (Anode) → spaltet  $H_2$

Elektronen +  $H^+$  Ion

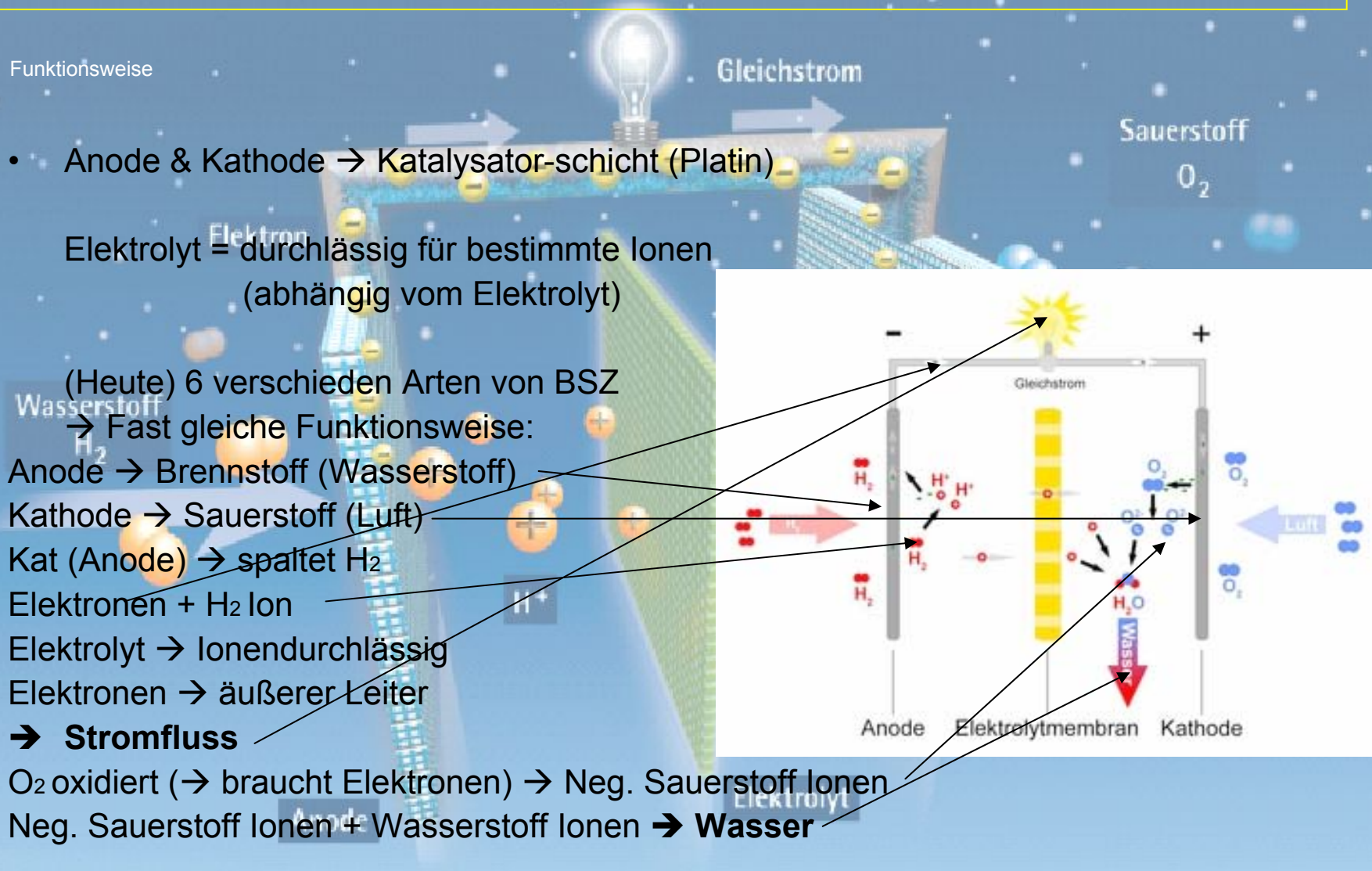
Elektrolyt → Ionendurchlässig

Elektronen → äußerer Leiter

→ **Stromfluss**

$O_2$  oxidiert (→ braucht Elektronen) → Neg. Sauerstoff Ionen

Neg. Sauerstoff Ionen + Wasserstoff Ionen → **Wasser**



Haben gesehen:

BSZ

→ direkte Umwandlung von Chem. in El. Energie

→ 2.Hauptsatz der Thermodynamik gilt hier nicht

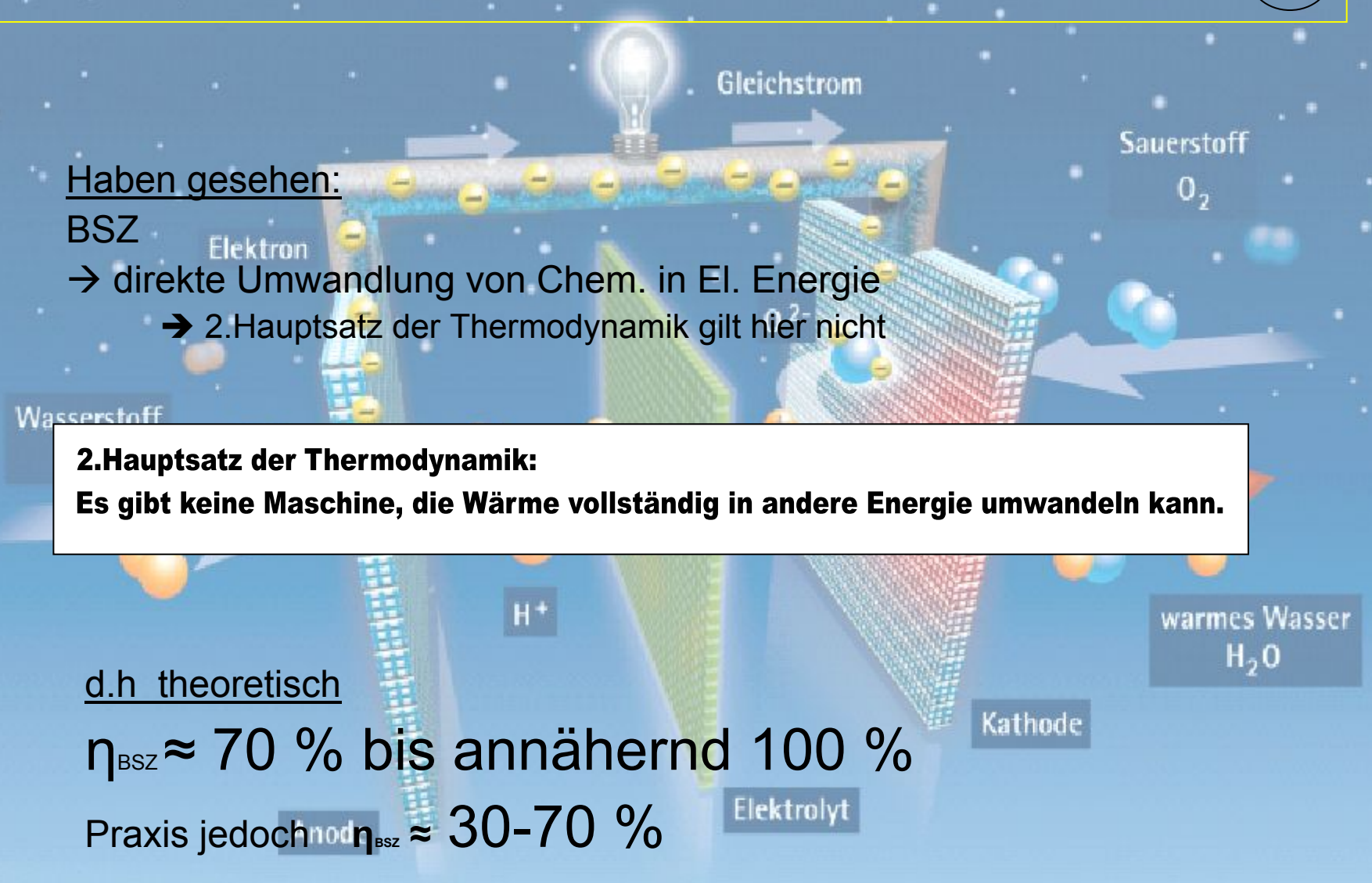
**2.Hauptsatz der Thermodynamik:**

**Es gibt keine Maschine, die Wärme vollständig in andere Energie umwandeln kann.**

d.h. theoretisch

$\eta_{\text{BSZ}} \approx 70 \% \text{ bis annähernd } 100 \%$

Praxis jedoch  $\eta_{\text{BSZ}} \approx 30-70 \%$



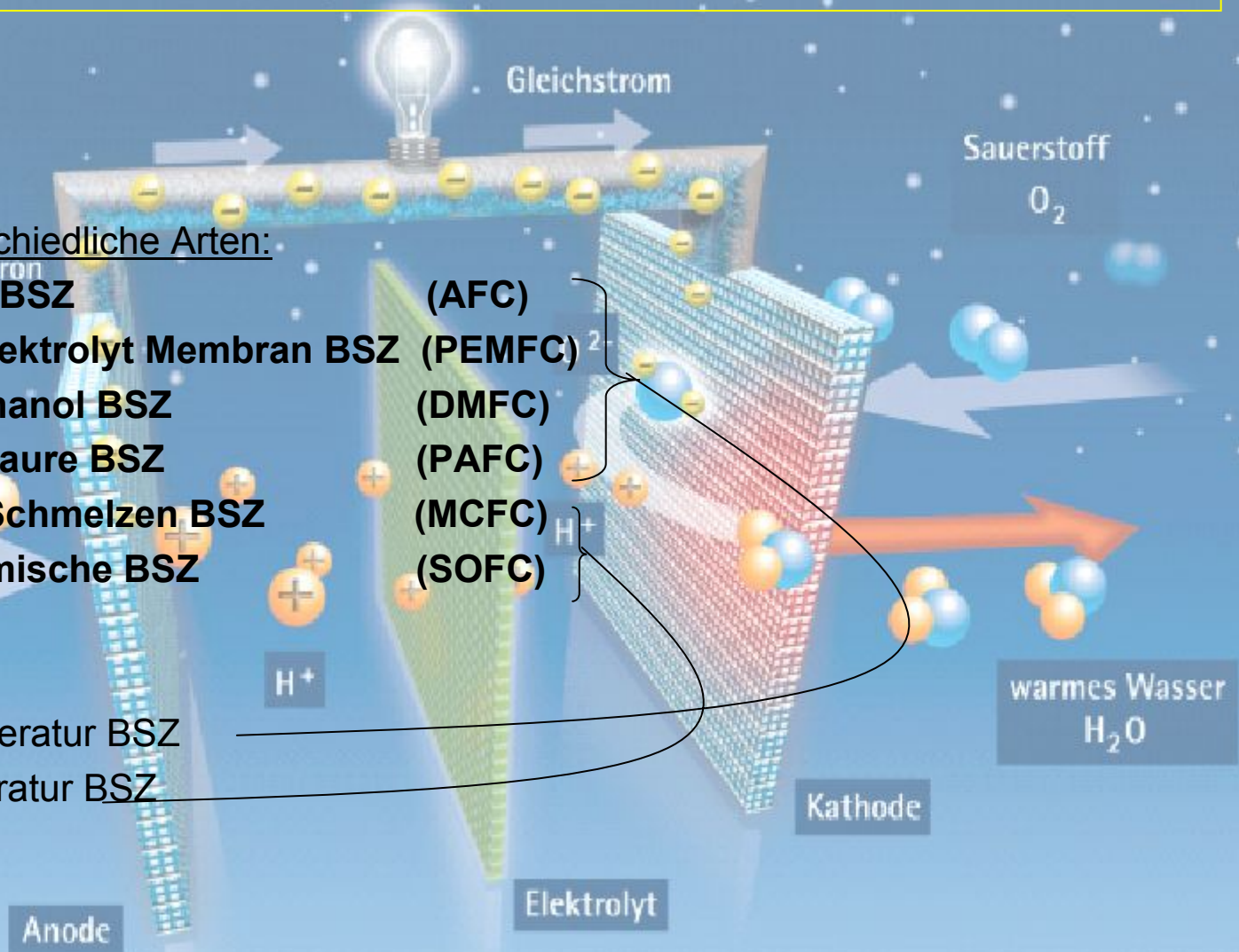
Zur Zeit:

→ 6 Unterschiedliche Arten:

- 1) **Alkalische BSZ (AFC)**
- 2) **Polymer Elektrolyt Membran BSZ (PEMFC)**
- 3) **Direkt Methanol BSZ (DMFC)**
- 4) **Phosphorsaure BSZ (PAFC)**
- 5) **Karbonat-Schmelzen BSZ (MCFC)**
- 6) **Oxid-Keramische BSZ (SOFC)**

Unterteilung:

- Niedertemperatur BSZ
- Hochtemperatur BSZ



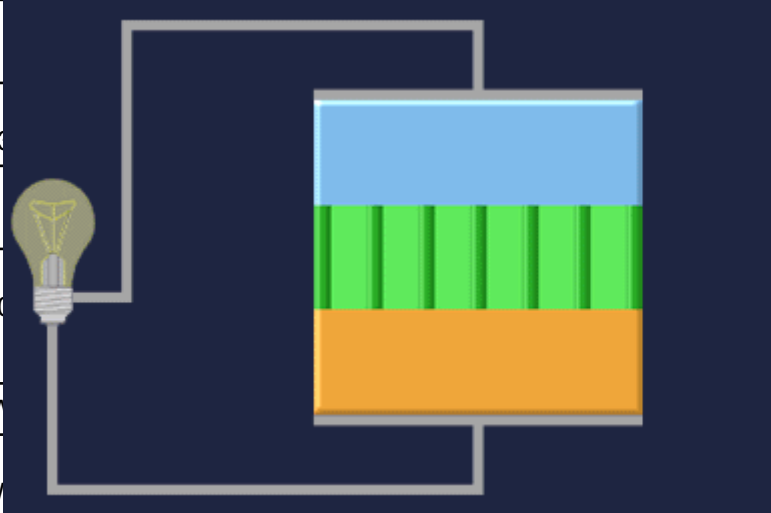
	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas
<b>Transportierte Ionen</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	O <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
<b>Betriebs temperatur</b>	60-90 °C	bis 80 °C	60-130 °C	130-220 °C	bis 650°C	750-1000 °C
<b>Zellen wirkungsgrad</b>	60%	58%	40%	50%	60%	65%
<b>System wirkungsgrad</b>	60%	32-40%	20-30%	40%	52-54% 80% <sup>2</sup>	35-55% 70% <sup>3</sup>
<b>Leistung</b>	10 - 100 kW	0,03 - 250 kW	1 mW - 100 kW	50 kW - 11MW	250 kW - 2 MW	1-100 kW
<b>Anwendung</b>	Raumfahrt, U-Boot Nischenfahrzeuge	Stromversorgung Fahrzeugantriebe Hausversorgung Blockheizkraftwerke portable Geräte	PKW portable Geräte	Blockheizkraftwerke Kleinkraftwerke	Blockheizkraftwerke Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Hausversorgung Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich		schwach CO empfindlich	CO <sub>2</sub> muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich

14

<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformier erzeugt

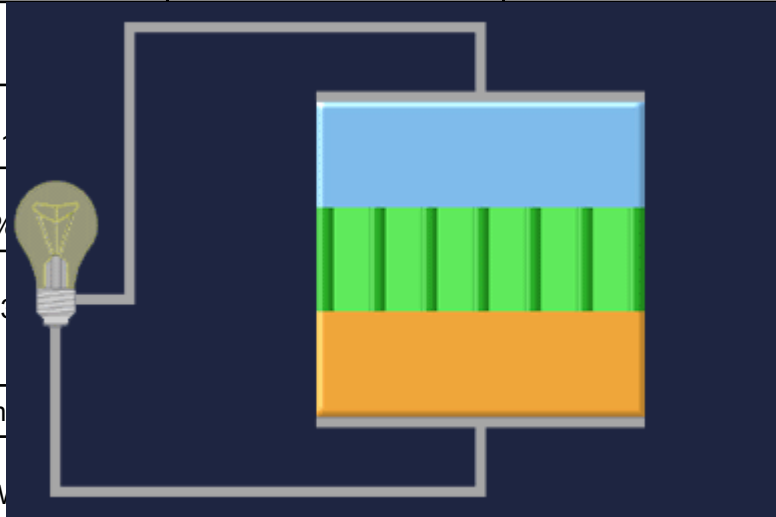
<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)



	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC		
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid		
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest		
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas		
<b>Transportierte Ionen</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>			O <sup>2-</sup>		
<b>Betriebs temperatur</b>	60-90 °C	bis 80 °C	60-130 °C			750-1000 °C		
<b>Zellen wirkungsgrad</b>	60%	58%	40%			65%		
<b>System wirkungsgrad</b>	60%	32-40%	20-30%			35-55% 70% <sup>3</sup>		
<b>Leistung</b>	10 - 100 kW	0,03 - 250 kW	1 mW			1-100 kW		
<b>Anwendung</b>	Raumfahrt, U-Boot Nischenfahrzeuge	Stromversorgung Fahrzeugantriebe Hausversorgung Blockheizkraftwerke portable Geräte	PKW portable Geräte			Kleinkraftwerke	Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Hausversorgung Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich				schwach CO empfindlich	CO <sub>2</sub> muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich

<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformer erzeugt

<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)

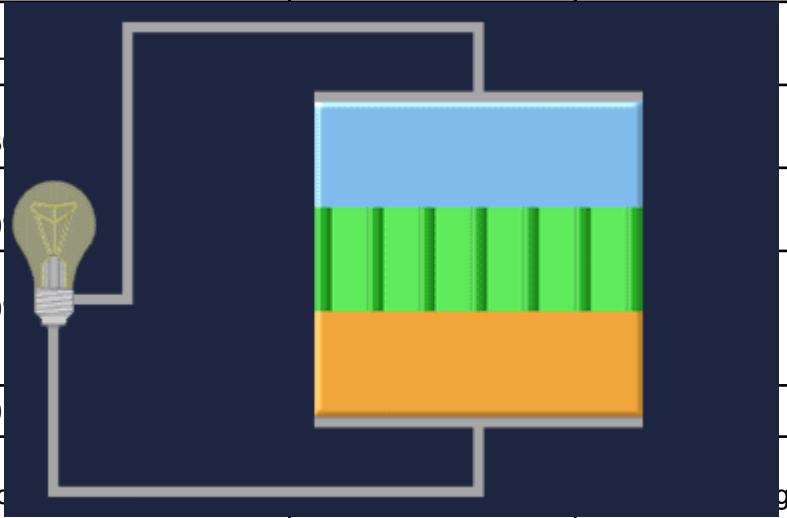
	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas
<b>Transportierte Ionen</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>			O <sup>2-</sup>
<b>Betriebs temperatur</b>	60-90 °C	bis 80 °C	60-100 °C			750-1000 °C
<b>Zellen wirkungsgrad</b>	60%	58%	40%			65%
<b>System wirkungsgrad</b>	60%	32-40%	20-30%			35-55% 70% <sup>3</sup>
<b>Leistung</b>	10 - 100 kW	0,03 - 250 kW	1 mW	100 W	1-100 kW	1-100 kW
<b>Anwendung</b>	Raumfahrt, U-Boot Nischen fahrzeuge	Stromversorgun g Fahrzeugantrieb e Hausversorgung Blockheizkraftwe rke portable Geräte	PKW portable Geräte	Kleinkraftwerke	Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Hausversorgung Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich		schwach CO empfindlich	CO <sub>2</sub> muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich

<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformer erzeugt

<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)

	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas
<b>Transportierte Ionen</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>		
<b>Betriebs temperatur</b>	60-90 °C	bis 80 °C	60-130 °C	130-200 °C		
<b>Zellen wirkungsgrad</b>	60%	58%	40%	50%		
<b>System wirkungsgrad</b>	60%	32-40%	20-30%	40%		
<b>Leistung</b>	10 - 100 kW	0,03 - 250 kW	1 mW - 100 kW	50 - 100 kW		
<b>Anwendung</b>	Raumfahrt, U-Boot Nischenfahrzeuge	Stromversorgung Fahrzeugantriebe Hausversorgung Blockheizkraftwerke portable Geräte	PKW portable Geräte	Blockheizkraftwerke Kleinkraftwerke	Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich		schwach CO empfindlich	CO <sub>2</sub> muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich

17



<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformer erzeugt

<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)

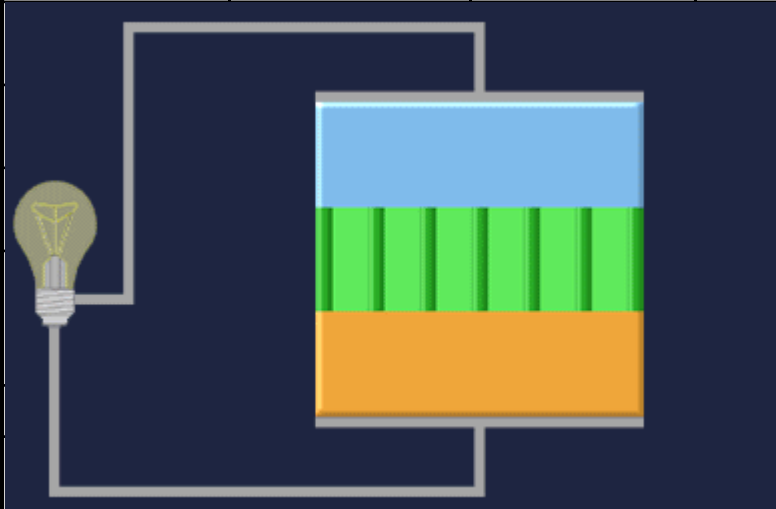
	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas
<b>Transportierte Ionen</b>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> oder OH <sup>-</sup>	O <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
<b>Betriebs temperatur</b>	60-90 °C	bis 80 °C	90-120 °C	180-260 °C	bis 500 °C	750-1000 °C
<b>Zellen wirkungsgrad</b>	60%	58%	40%	50%	60%	65%
<b>System wirkungsgrad</b>	60%	32-40%	20-30%	40%	52-54% 80% <sup>2</sup>	35-55% 70% <sup>3</sup>
<b>Leistung</b>	10 - 100 kW	0,03 - 250 kW	1 mW - 100 kW	50 kW - 11MW	250 kW - 2 MW	1-100 kW
<b>Anwendung</b>	Raumfahrt, U-Boot Nischen fahrzeuge	Stromversorgun g Fahrzeugantrieb e Hausversorgung Blockheizkraftwe rke portable Geräte	PKW portable Geräte	Blockheiz kraftwerke Kleinkraftwerke	Blockheiz kraftwerke Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Hausversorgung Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich		schwach CO emfindlich	CO2 muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich

18

**Bis auf Elektrolyt Funktionsweise = PEMFC**

<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformer erzeugt

<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)

	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC	
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid	
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest	
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas	
<b>Transportierte Ionen</b>					O <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	
<b>Betriebs temperatur</b>					20 °C	bis 650 °C	750-1000 °C
<b>Zellen wirkungsgrad</b>						60%	65%
<b>System wirkungsgrad</b>						52-54% 80% <sup>2</sup>	35-55% 70% <sup>3</sup>
<b>Leistung</b>						250 kW - 2 MW	1-100 kW
<b>Anwendung</b>	Nischen fahrzeuge	Fahrzeugantriebe Hausversorgung Blockheizkraftwerke portable Geräte	portable Geräte	Kleinkraftwerke Blockheiz kraftwerke	Blockheiz kraftwerke Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Hausversorgung Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie	
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich		schwach CO empfindlich	CO <sub>2</sub> muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich	

<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformer erzeugt

<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)

	AFC	PEFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC	
<b>Elektrolyt</b>	Alkalilauge	Polymer membran	Polymer membran	Konzentrierte Phosphorsäure	Alkalikarbonat schmelze	Yttriumdotiertes Zirkondioxid	
<b>Aggregat zustand</b>	flüssig	fest	fest	flüssig	flüssig	fest <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">20</span>	
<b>Anodengas</b>	reinsten Wasserstoff	Wasserstoff Methanol <sup>1</sup> Methan <sup>1</sup>	Methanol	Wasserstoff Methan <sup>1</sup>	Wasserstoff Methan Kohlegas	Wasserstoff Methan Kohlegas	
<b>Transportierte Ionen</b>					O <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>	
<b>Betriebs temperatur</b>					20 °C	bis 650 °C	750-1000 °C
<b>Zellen wirkungsgrad</b>						60%	65%
<b>System wirkungsgrad</b>						52-54% 80% <sup>2</sup>	35-55% 70% <sup>3</sup>
<b>Leistung</b>						250 kW - 2 MW	1-100 kW
<b>Anwendung</b>	Nischen fahrzeuge	Fahrzeugantriebe Hausversorgung Blockheizkraftwerke portable Geräte	portable Geräte	Kleinkraftwerke	Blockheiz kraftwerke Kleinkraftwerke Schiffsantriebe	Hausversorgung Kleinkraftwerke Fahrzeugbatterie	
<b>Zusatz</b>	CO <sub>2</sub> empfindlich	CO empfindlich		schwach CO empfindlich	CO <sub>2</sub> muss im Kreislauf der Zelle geführt werden	keine Reformierung von Brenngasen erforderlich	

<sup>1</sup> Wasserstoff wird über Reformier erzeugt

<sup>2/3</sup> mit nachgeschalteter Dampfturbine (und zusätzlicher Wärmeauskupplung)

**ABER:**

BSZ benötigt **Wasserstoff**

Wasserstoff

→ Wasserstoff immer in Verbindung mit anderen Elementen  
d.h.: Wasserstoff muss hergestellt werden

z.B.: Elektrolyse

→ man braucht Elektrische Energie

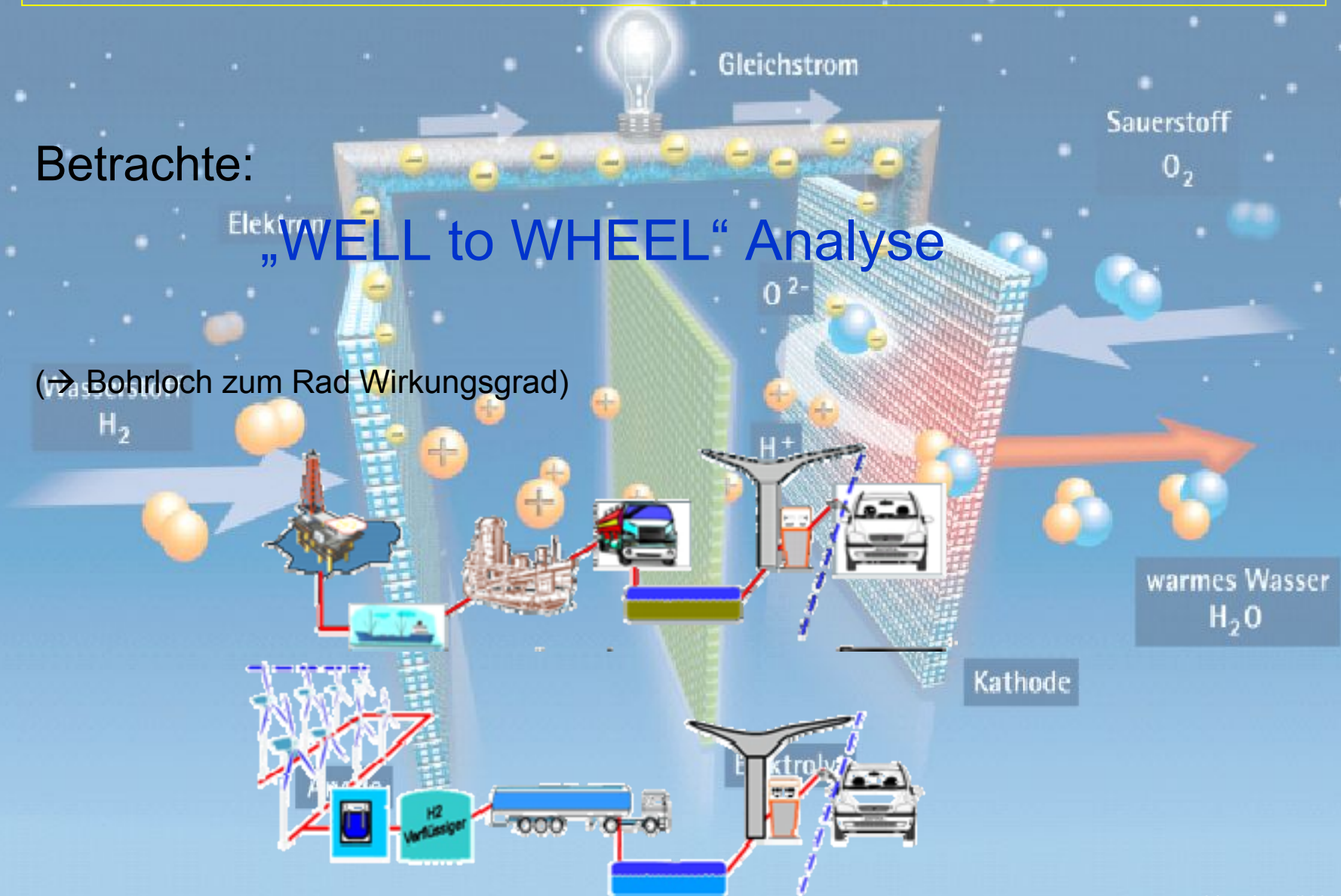
→ Gesamtwirkungsgrad muss betrachtet werden



Betrachte:

# „WELL to WHEEL“ Analyse

(→ Bohrloch zum Rad Wirkungsgrad)

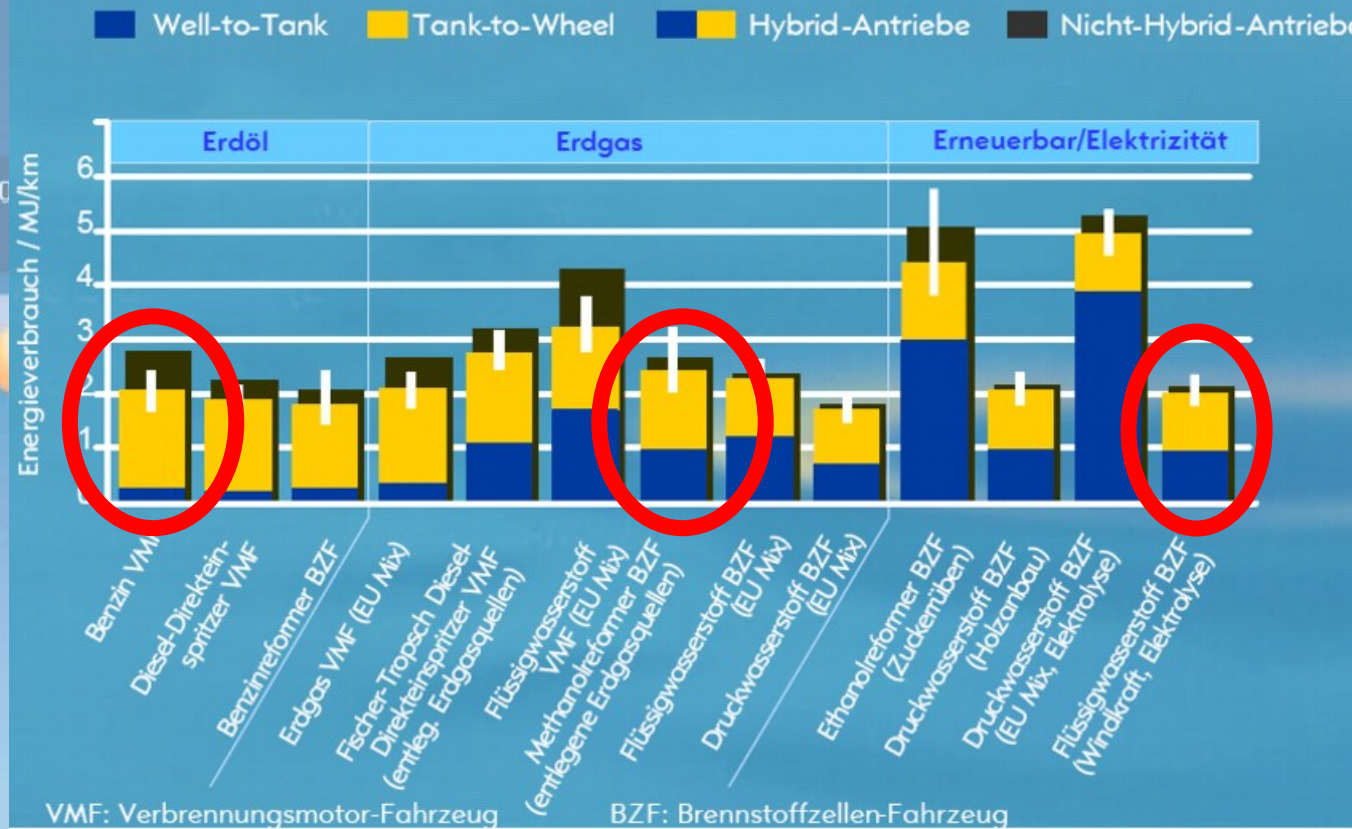






Sauerstoff

## Well-to-Wheel Energieverbrauch



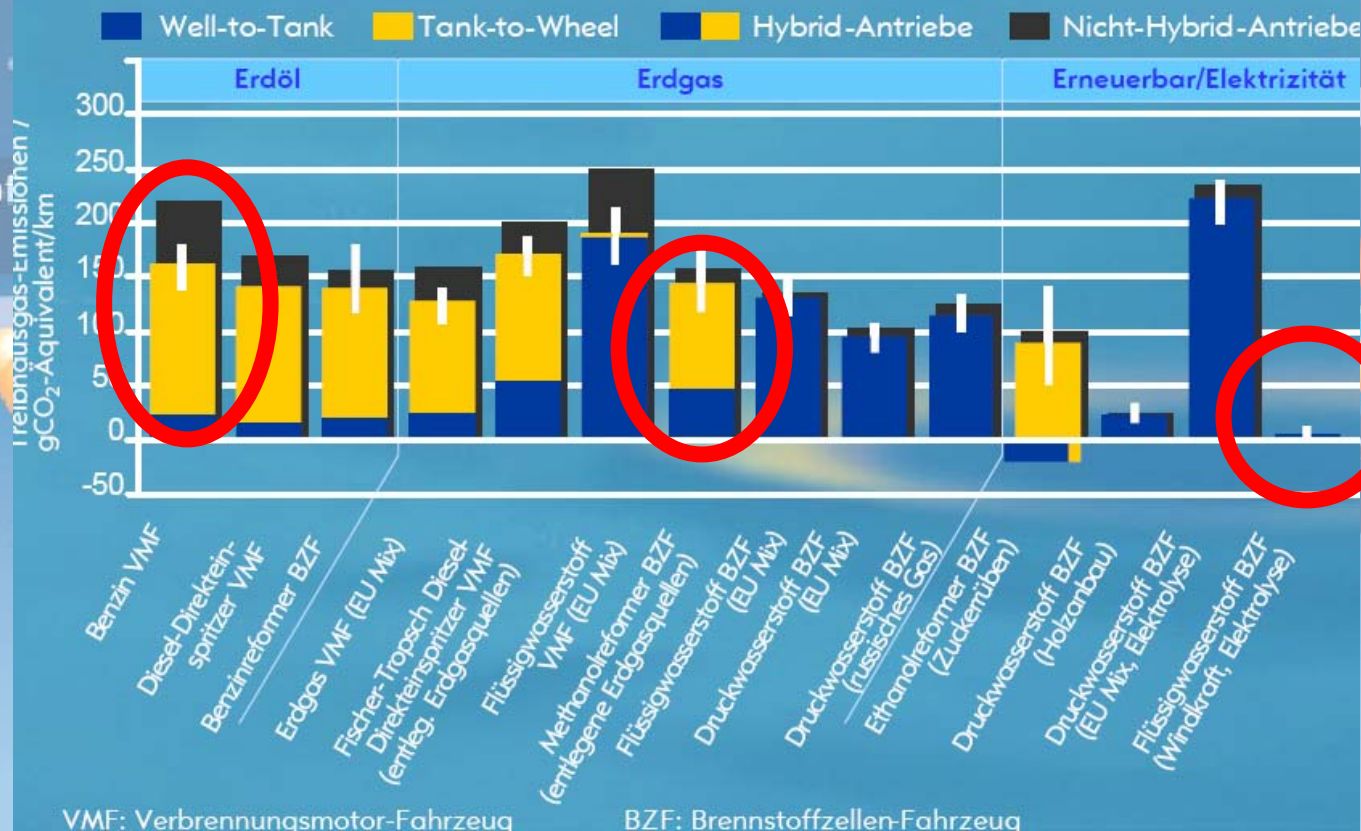
Wasserstoff  
H<sub>2</sub>

Warmes Wasser  
H<sub>2</sub>O



# Well-to-Wheel Treibhausgas-Emissionen

Wasserstoff  
H<sub>2</sub>



Reines Wasser  
H<sub>2</sub>O

VMF: Verbrennungsmotor-Fahrzeug

BZF: Brennstoffzellen-Fahrzeug

# Greenpeace

→ gegen BSZ!

Wasserstoff  $H_2$   
Angeblich **zwei Mal** so hoher Energieverbrauch durch Elektrolyse  
→ Sogar mit erneuerbarer Energie wie Solar, Wind..



## Zusammenfassung:

- Kraftstoffverbrauch durch Hybridmotoren verringert (bei allen Systemen)
- Reduzierte Treibhausgase bei BZF mit reformiertem Erdgas
- BZF haben Potenzial Treibhausgase nahezu vollständig zu reduzieren (von art der Wasserstoffherstellung abhängig)
- BZF mit Methanol → keine Vorteile gegenüber Benzinfahrzeuge

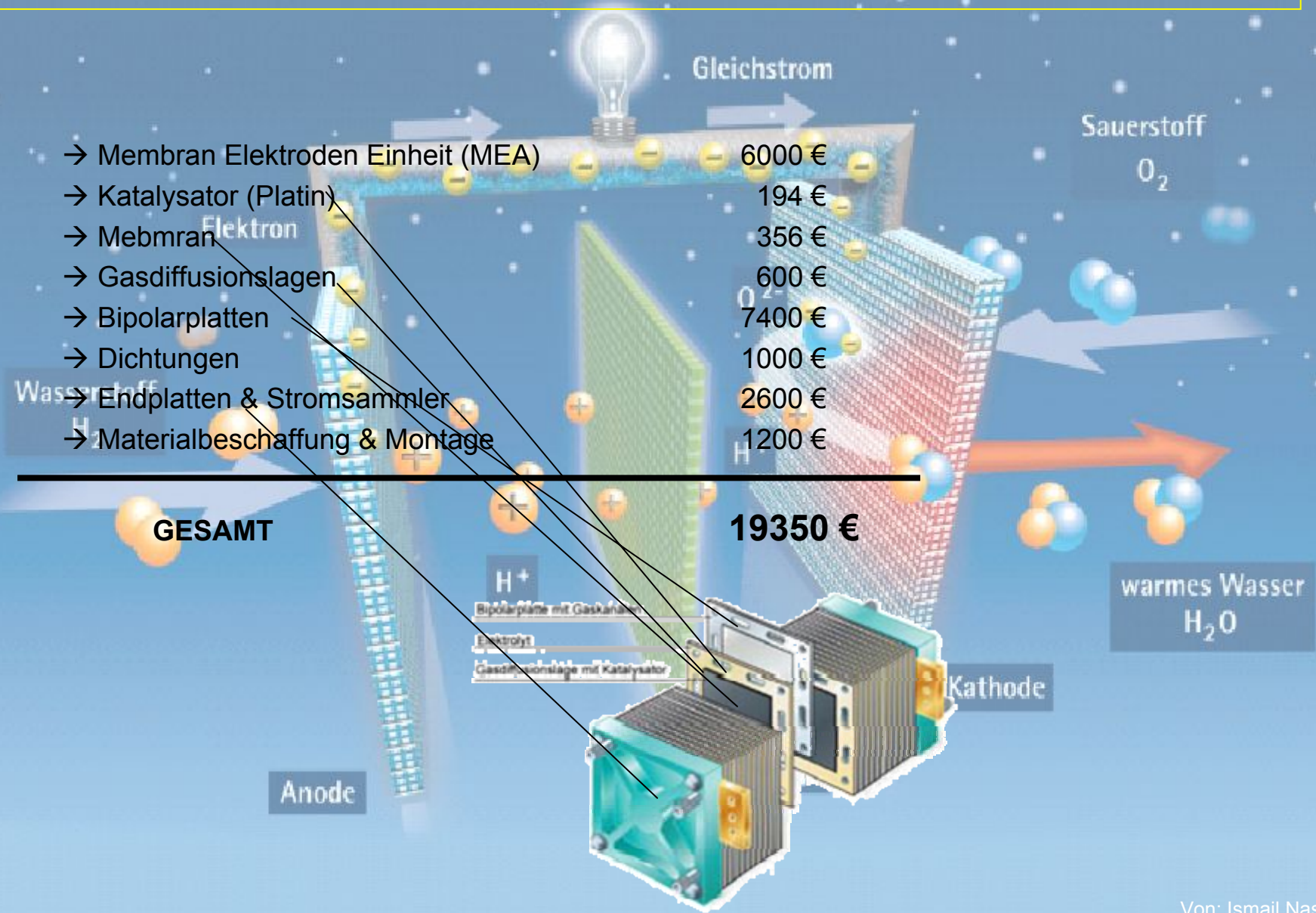


# Was kostet eine BSZ?

Elektron  
Stack  $\approx$  50 Einzelzellen



Jeder Stack besteht aus mehreren Bauteilen:



# Quellen

[www.innovation-Brennstoffzelle.de](http://www.innovation-Brennstoffzelle.de)

[www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)

[www.initiative-brennstoffzelle.de/de/ibz/live/nachrichten/detail/109.html](http://www.initiative-brennstoffzelle.de/de/ibz/live/nachrichten/detail/109.html)

[www.initiative-brennstoffzelle.de](http://www.initiative-brennstoffzelle.de)

[http://www.lbst.de/gm-wtw/Wel2WheelStudie\\_d.pdf](http://www.lbst.de/gm-wtw/Wel2WheelStudie_d.pdf)

<http://www.fz-juelich.de/portal/forschung/energie/brennstoffzellen>

[www.google.de](http://www.google.de) ☺

