

# Wie reagiert ein Stadtwerk auf die Herausforderungen der Energiewende

Wasserstoff im Überblick und  
Power to Gas Anwendungen im ÖPNV

Bernhard Hupfaut, Roland Tiwald  
Oktober 2018

## Inhalt:

1. Zur IKB
2. Warum beschäftigt sich IKB mit Wasserstoff
3. Pilotanwendungen zur Sektorenkopplung
4. Grundsätzliches zum Element Wasserstoff
5. Power to Gas
6. Wasserstoffherstellung
7. Wasserstoffspeicherung
8. Wasserstofftransport
9. Wasserstoffnutzung im ÖPNV

# 1. Das Unternehmen

Die IKB liefert intelligente Energie- und Infrastrukturlösungen und treibt damit die positive Entwicklung des Lebens- und Wirtschaftsraums von Innsbruck und Tirol an.

**Mitarbeiter:** 672 (Konzern: 1.632)

**Eigentümer:** 50 % + 1 Aktie = Stadt Innsbruck  
50 % -- 1 Aktie = TIWAG

**Investitionen:** EUR 45,5 Mio./anno





## Strom-Erzeugung

- 12 Kraftwerke mit Stromerzeugung zu 100 % aus erneuerbarer Energie
- Versorgungsgrad: ca. 50 % des Jahresbedarfes von 625 Mio. kWh erzeugt die IKB in ihren eigenen Kraftwerken
- Steigerung der Stromeigenerzeugung auch durch Energieeffizienzprojekte wie neue Druckrohrleitung beim Kraftwerk Obere Sill und Photovoltaik-Anlagen.

## Strom-Vertrieb

- ca. 80.000 Kunden mit 625 Mio. kWh Stromverbrauch pro Jahr

## Strom-Netz

- Verteilung über 8 Umspannwerke
- Die Stromleitungen verlaufen fast ausschließlich unterirdisch, deshalb zählt das IKB-Stromnetz zu den ausfallsichersten Leitungsnetzen Österreichs.
- Projekte: Umstellung der öffentlichen Beleuchtung in Innsbruck auf LED und Ausbau der Ladestationen für e-Mobilität in Innsbruck.



## Energieservices

für Gewerbekunden, Wohnbauträger,  
Hoteliere und Gemeinden:

- über 600 Anlagen tirolweit und überregional
- professionelle Planung, Beratung, Finanzierung und Umsetzung inkl. Vollgarantie und 24-h-Service
- Wärme-/Kälte-/Luft-Anlagen
- Technisches Anlagen-Management
- LED-Indoor- und -Outdoor-Beleuchtung
- Schwimmbadtechnik
- Schachtentlüftungssysteme
- 360°-Energie-Check



## Internet und IT

- 100 % echtes Glasfasernetz und Breitbandinternet
- Telefonie
- HD-TV
- Serverhousing
- Cloud-Computing
- Security





## Abwasser

### Kanalnetz:

- 250 Kilometer Sammelkanäle; innovative Sanierungsverfahren mittels Schlauchlining (ohne Aufgraben der Straßen)

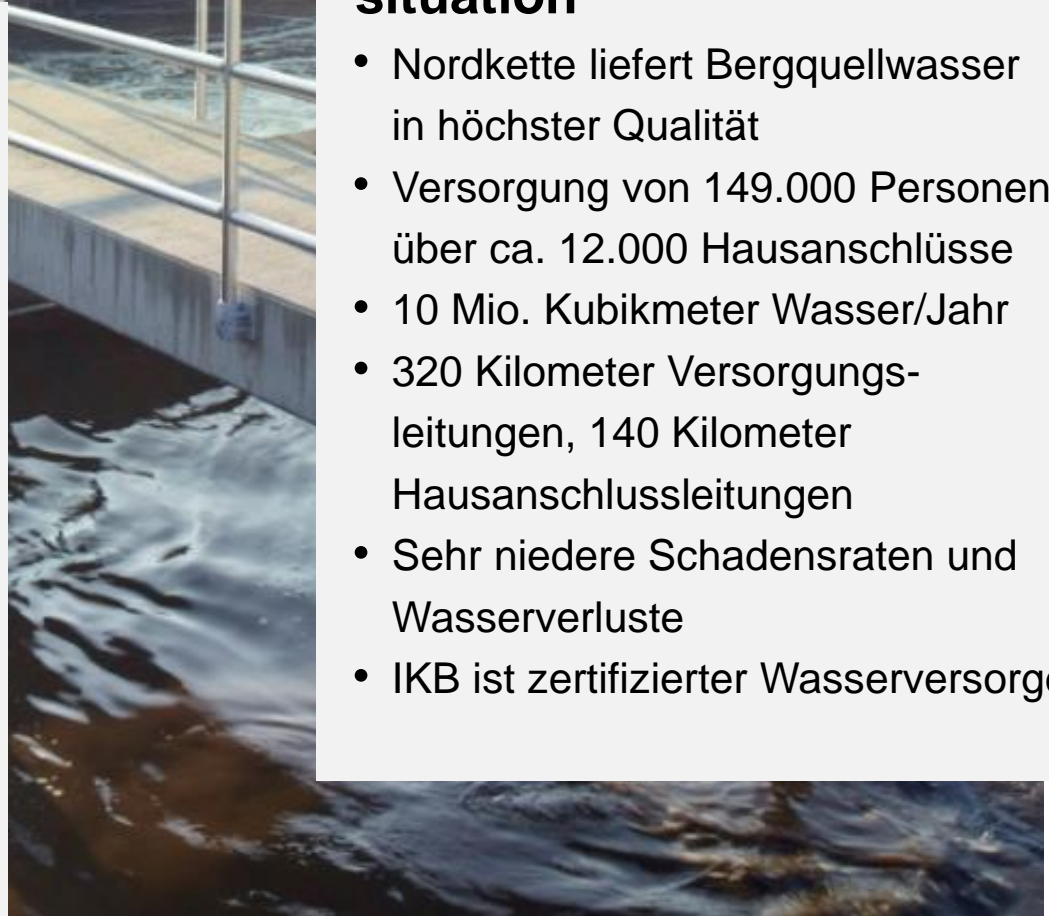
### Kläranlage:

- Abwasserreinigung für Innsbruck und 14 weitere Gemeinden seit 1996; Errichtung 1991 bis 96 mit Kostenaufwand von rund 70 Mio. EUR
- Reinigungsleistung: rund 99 % der im Abwasser enthaltenen organischen Verschmutzungen; über 90 % des Phosphors und über 80 % des Stickstoffs werden bei der Reinigung im Klärwerk entfernt.

## Wasser-Versorgung

### Einmalige Trinkwasser-situation

- Nordkette liefert Bergquellwasser in höchster Qualität
- Versorgung von 149.000 Personen über ca. 12.000 Hausanschlüsse
- 10 Mio. Kubikmeter Wasser/Jahr
- 320 Kilometer Versorgungsleitungen, 140 Kilometer Hausanschlussleitungen
- Sehr niedere Schadensraten und Wasserverluste
- IKB ist zertifizierter Wasserversorger







## **Abfallsammlung**

- jede Woche rund 21.000 Innsbrucker Abholungen
- tägl. Entsorgung von ca. 40 t Biomüll, 88 t Restmüll und 35 t Altpapier

## **Recyclinghof Roßau**

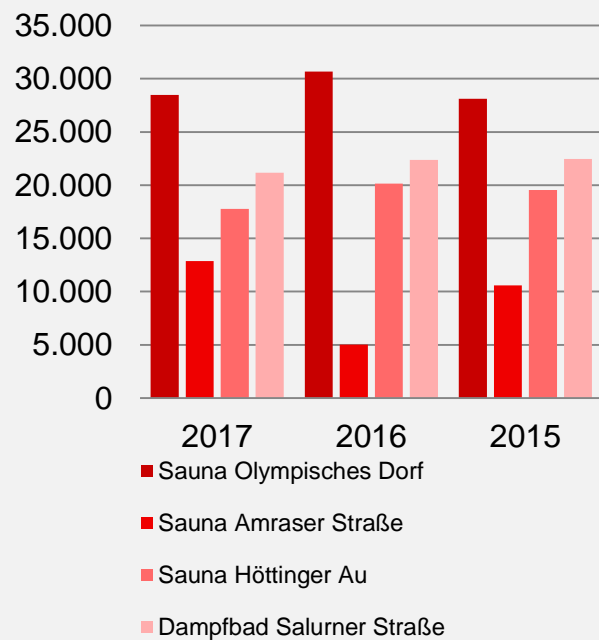
- Sammelstelle für Wert- und Problemstoffe
- über 200.000 Einfahrten p.a.

## **Betreuung von circa 130 Wertstoffinseln**

- im Stadtgebiet Innsbruck

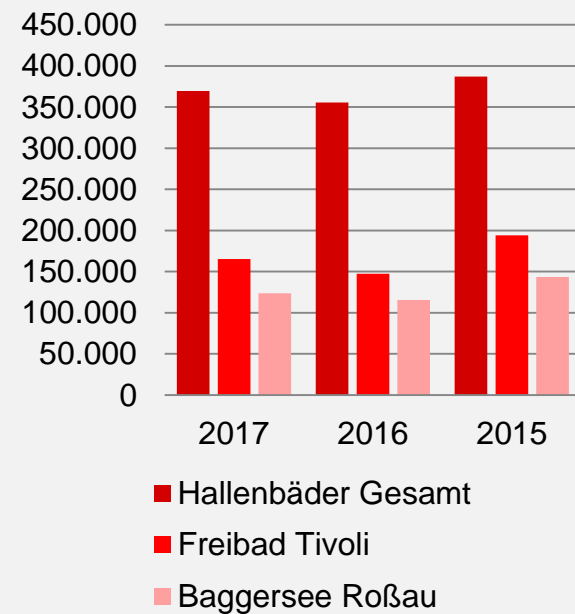
## Saunen

Frequenzentwicklung Sauna  
(Besucher in Tausend)



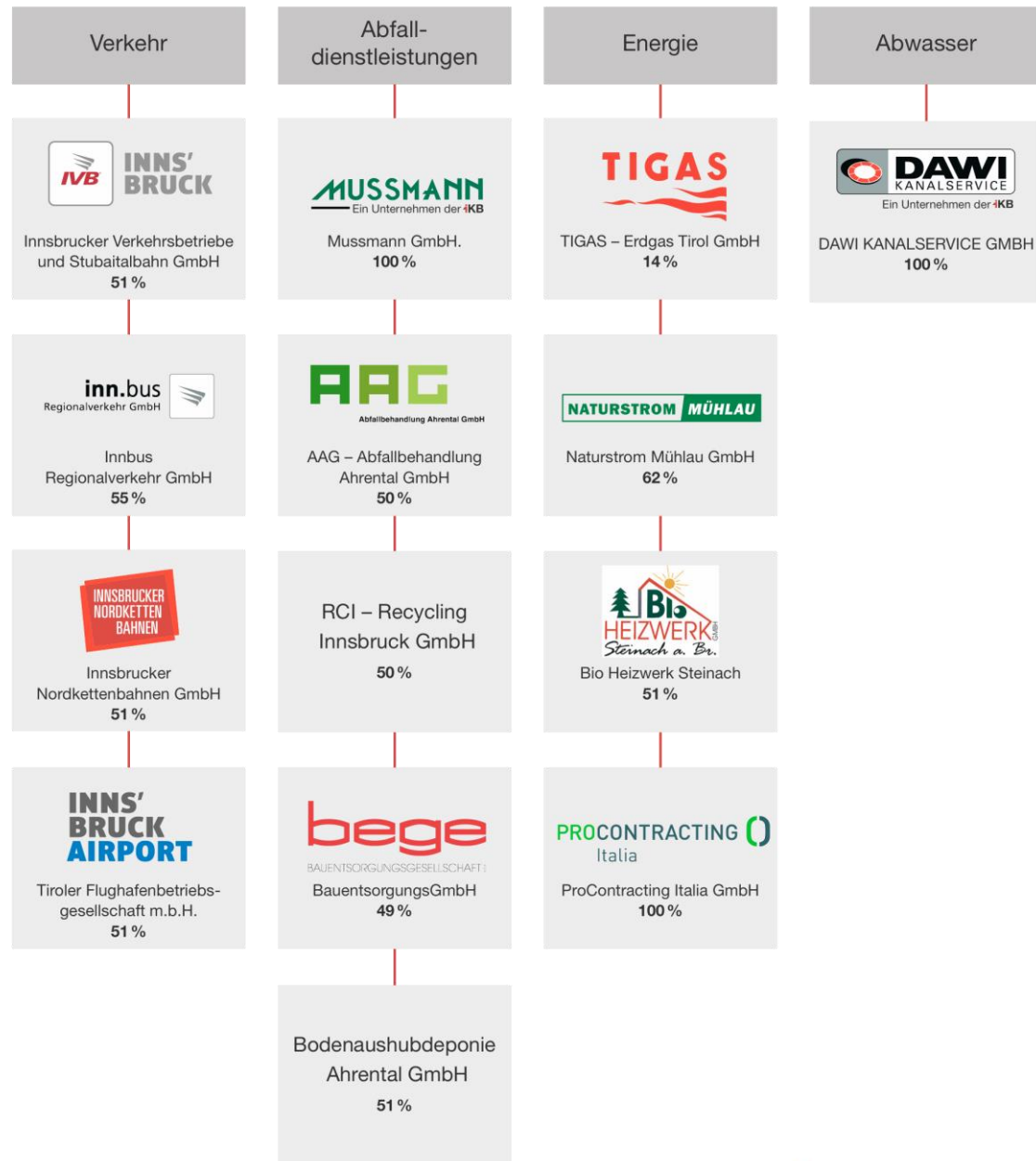
## Bäder

Frequenzentwicklung Schwimmen  
(Besucher in Tausend)





# Beteiligungen



## 2. Warum befasst sich ein Stadtwerk mit Wasserstoff?



# Österreichisches Regierungsprogramm 2017

---



Die türkis-blaue Koalition präsentierte am 16.12.2017 ihr Regierungsprogramm:

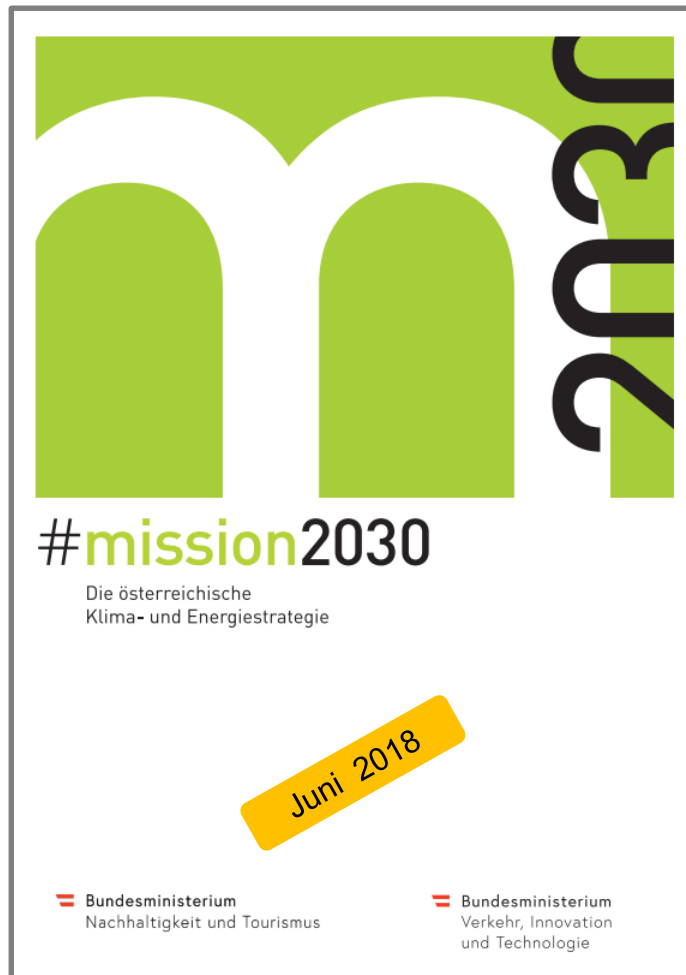
Maßnahme im Kapitel „Energie“:

- Erarbeitung und Verabschiedung einer integrierten Klima- und Energiestrategie
- Gesamtbetrachtung der Systeme für Strom, Wärme und Verkehr (Sektorenkopplung)
- Wasserstofftechnologie speziell für den Wirtschafts- und Verkehrsbereich



# Die Österreichische Klima- und Energiestrategie

---



## WAS UNS WICHTIG IST

### Energie als Gesamtsystem (Sektorenkopplung)

Die **Sektorenkopplung** wird als **Schlüsselkonzept** der Energiewende und dem Aufbau von dekarbonisierten Energiesystemen betrachtet.

Die Sektorenkopplung ermöglicht Synergieeffekte bei der Integration erneuerbarer Energien.

Power-to-Gas unter Einsatz von Wasserstoff wird als ein mögliches Kopplungselement angeführt.

### 3. Pilotanwendungen zur Sektorenkopplung Bsp. Energienutzung Kläranlage Innsbruck

1

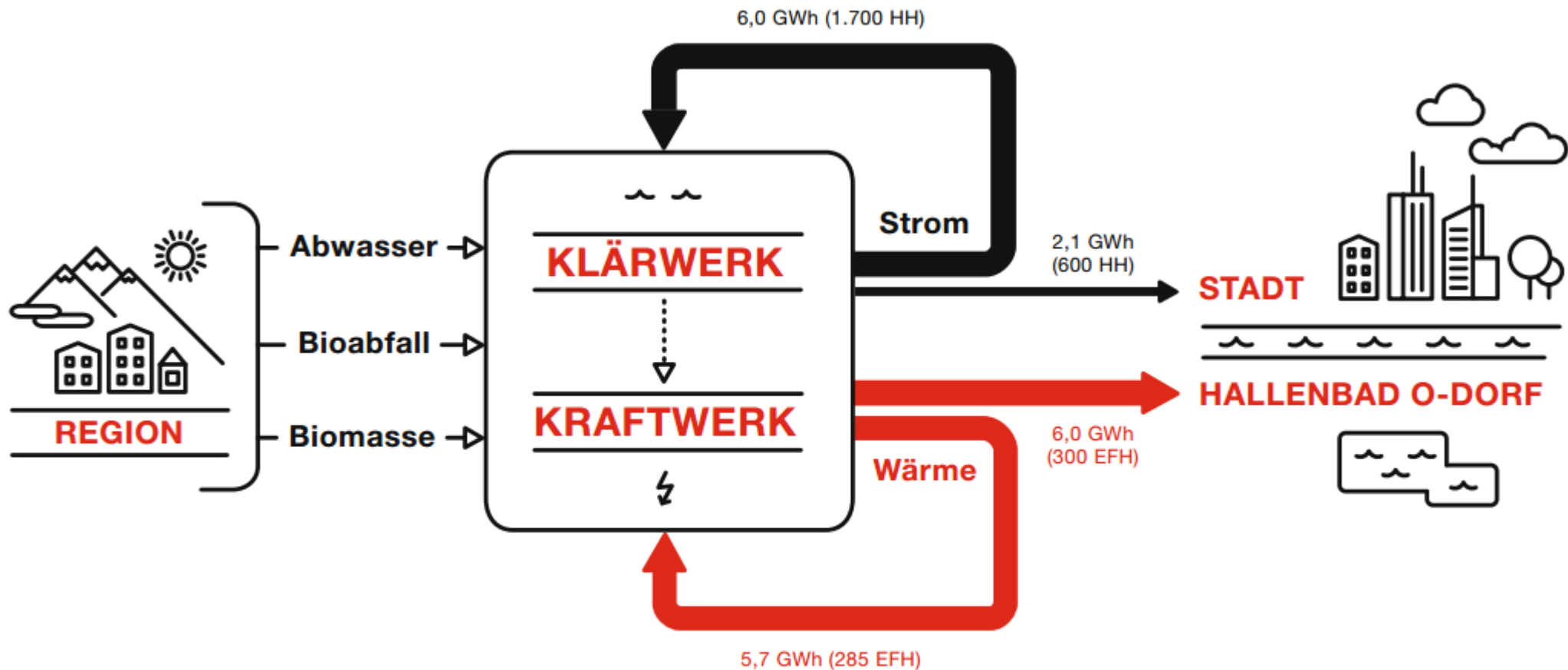


**SINFONIA Bausteine  
der ENK:**

Faulgas BHKW (2015)  
Biomassekraftwerk mit Photovoltaik (2016)  
Wärmeleitungen zu HBO und Deck 47 (2015/16)  
Klärschlamm-trocknung (2016/17)

# Energienutzung Kläranlage Innsbruck

## Vom Klärwerk zum Kraftwerk



Smart City  
**Lebensqualität  
für alle.**

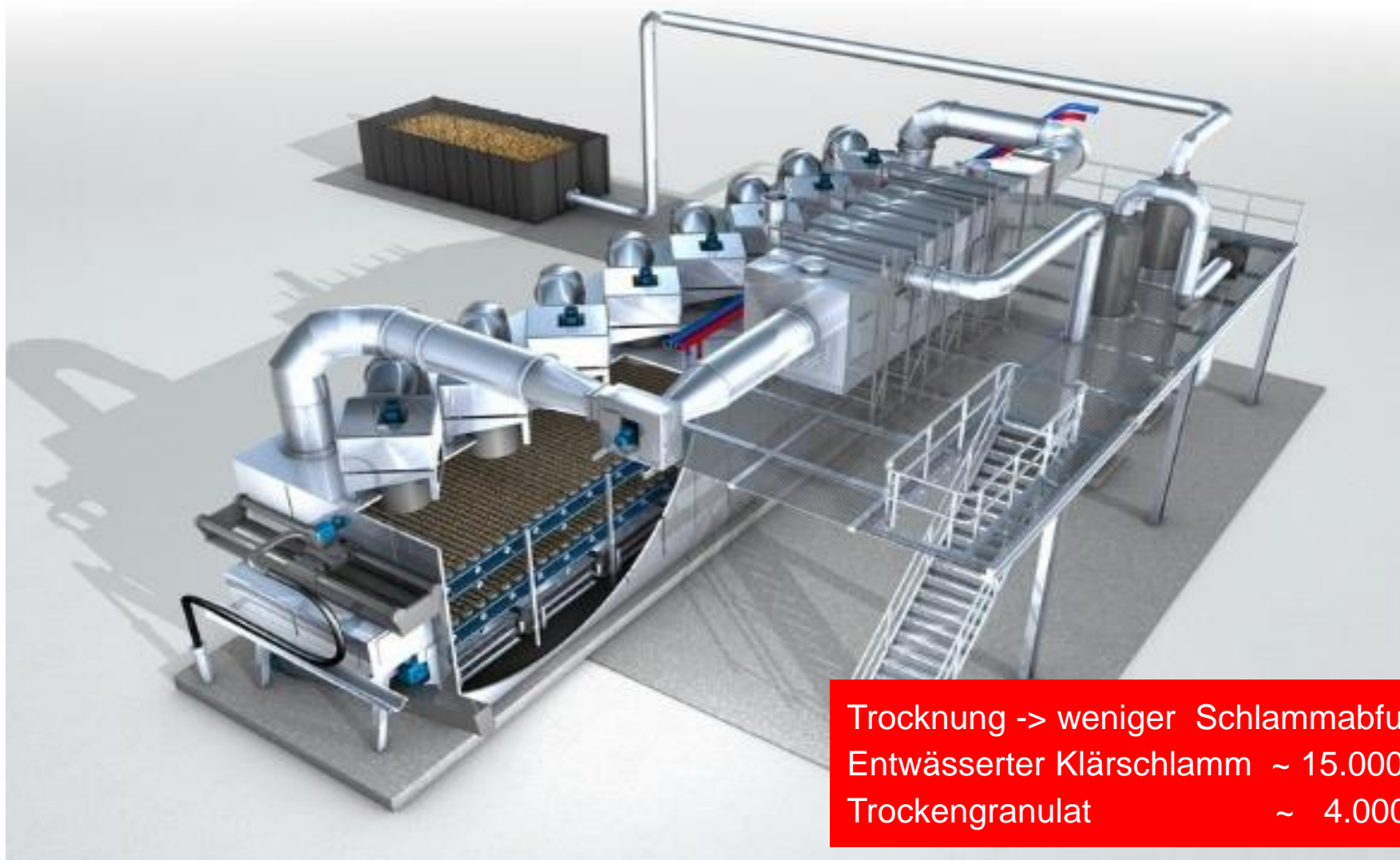
Durchschnittlicher Stromverbrauch pro Haushalt 3.500 kWh  
Durchschnittlicher Wärmeverbrauch pro Einfamilienhaus 2.000 L Öl = 20.000 kWh  
HH = Haushalt, EFH = Einfamilienhaus





# Energienutzung Kläranlage Innsbruck

## *Klärschlamm-trocknung*



Trocknung -> weniger Schlammabfuhr:  
Entwässerter Klärschlamm ~ 15.000 t/a  
Trockengranulat ~ 4.000 t/a

# Energienutzung Kläranlage

## *Biogas BHKW*





# Energienutzung Kläranlage

## *Biomassekraftwerk & Wärmeleitung*



**Input:**  
**Hackgut** 225kg/h (W 10%)

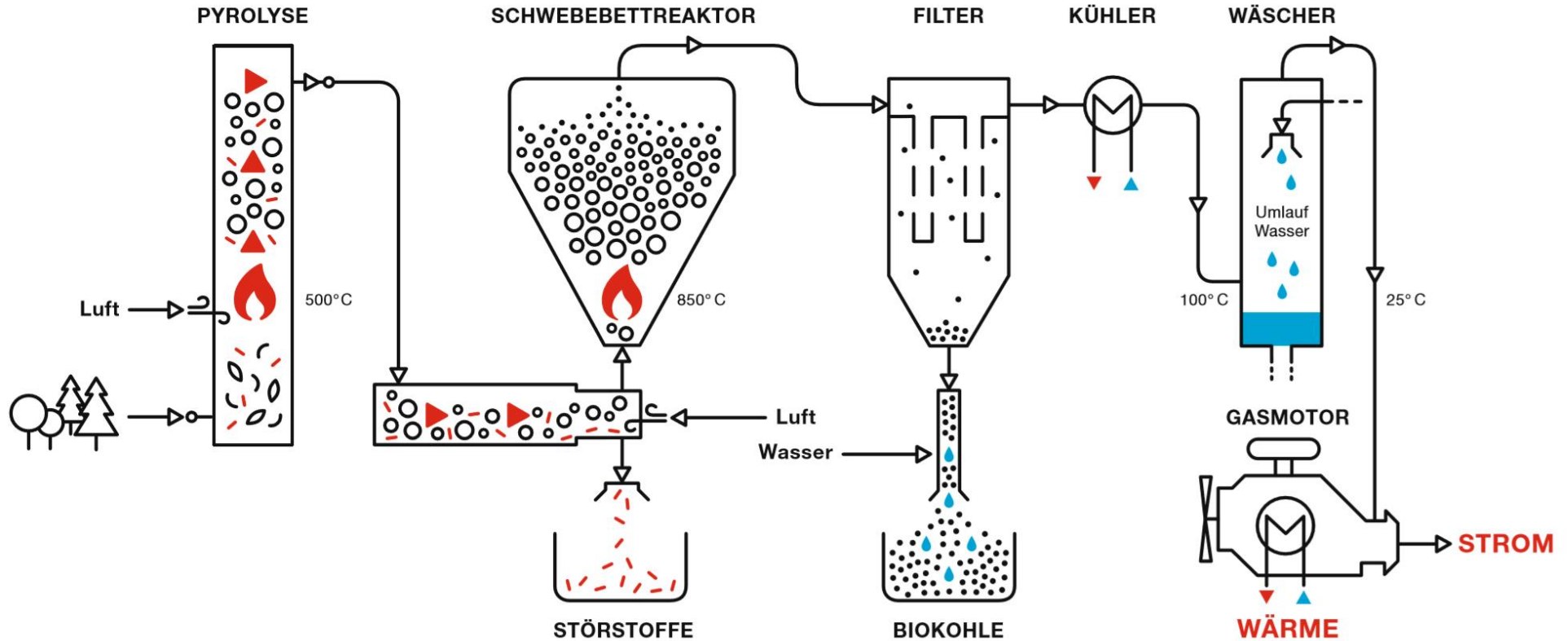
**Output:**  
**Leistung**<sub>elektrisch</sub> 260kW  
**Leistung**<sub>thermisch</sub> 400kW  
**Biokohle** 0,1 m<sup>3</sup>/h

Gesamtkosten ca. 5 mio€

7.000 h/a geplante Volllaststunden



# Die Technologie



Smart City  
**Lebensqualität  
für alle.**



# Sinfonia



## IKB-Smart-City-Lab

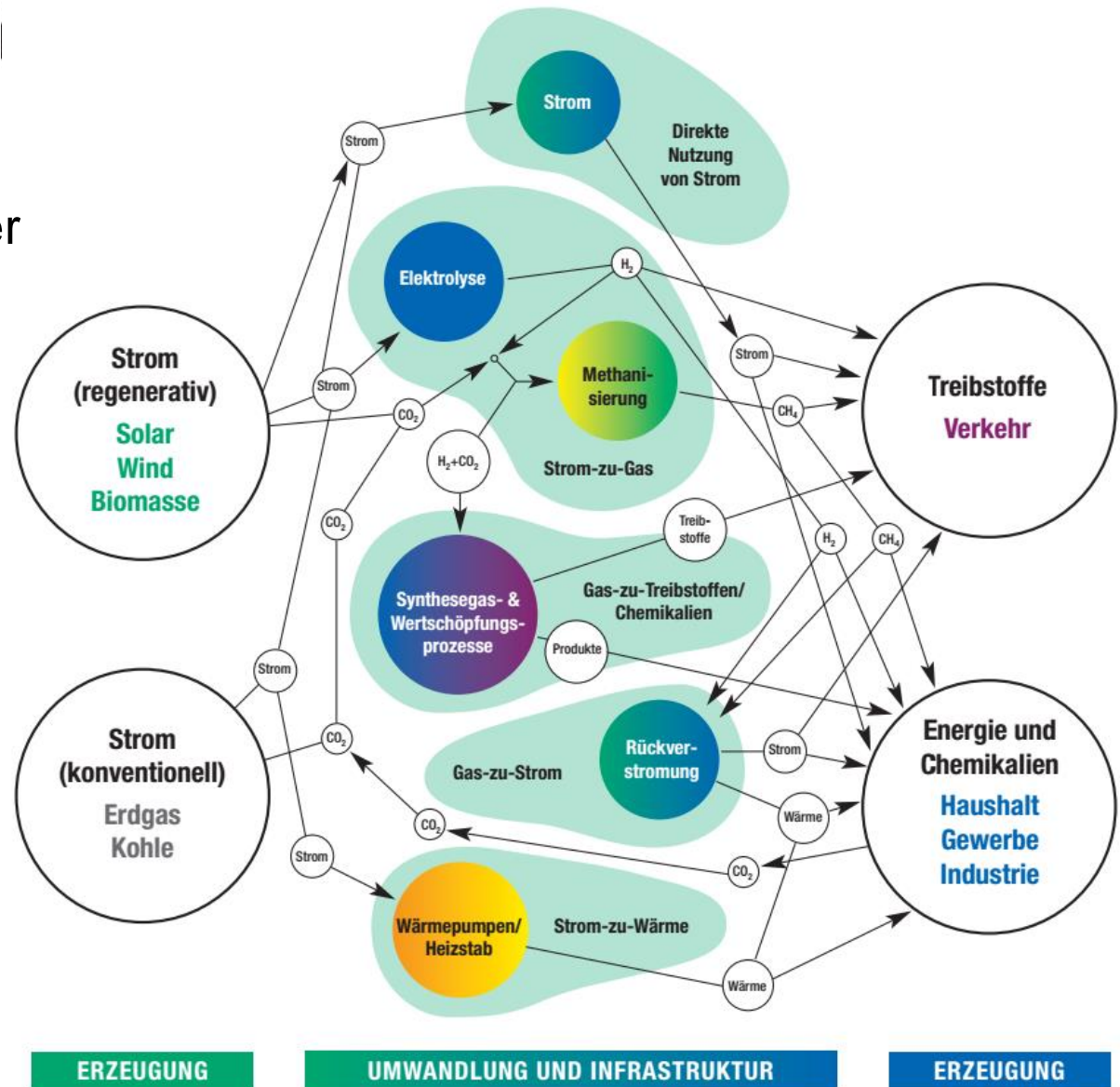
Intelligente thermische und elektrische Vernetzung  
und Speicherung

Reinhard Fohringer

# Sektorenkopplung als gesamtheitliche Betrachtung des Energiesystems

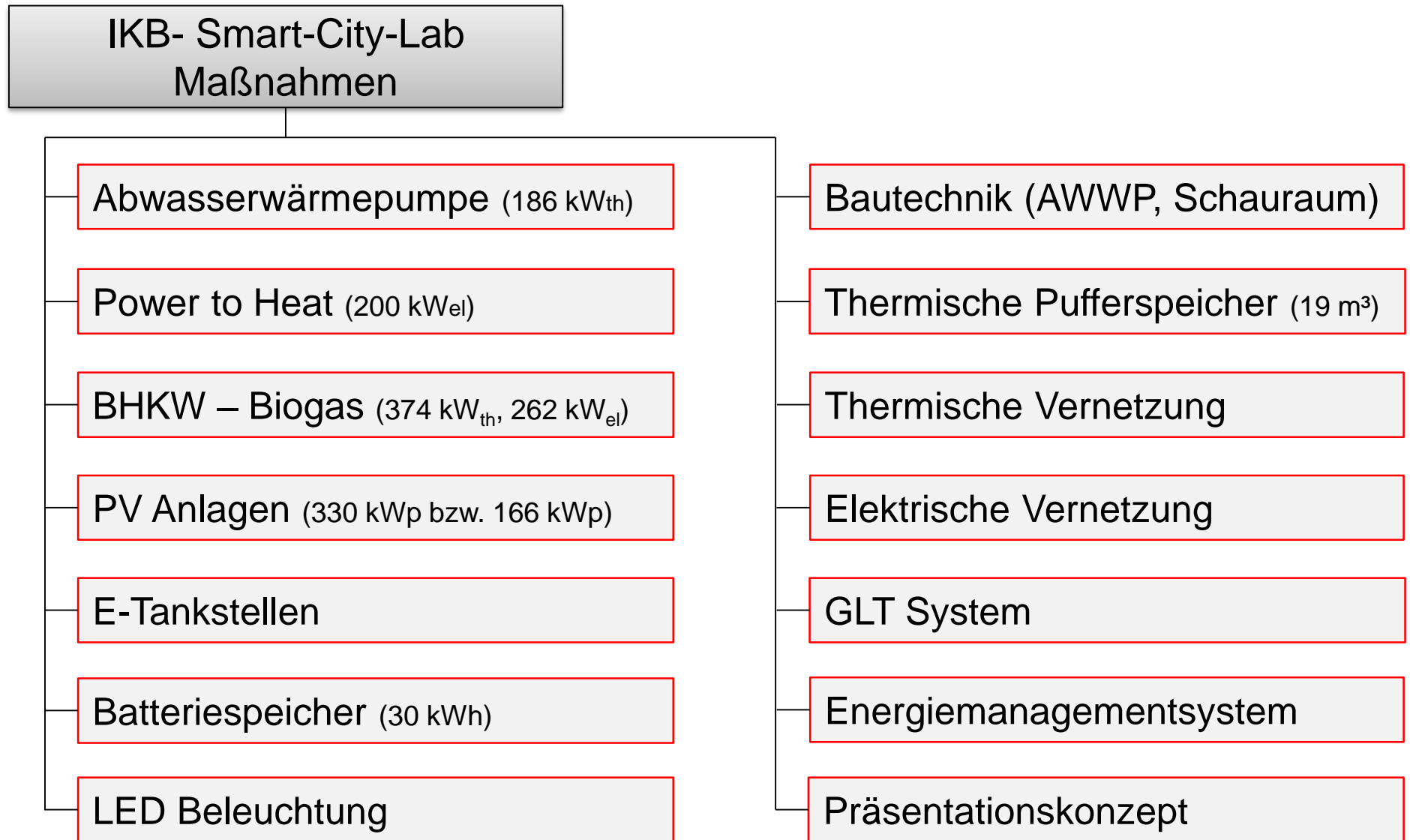
Strom = flexibler Energieträger  
(leichte Umwandelbarkeit)

Nutzung von erneuerbar  
produziertem Strom in den  
Sektoren Wärme, Verkehr  
und Industrie  
→ Ersetzt dort fossile  
Energieträger





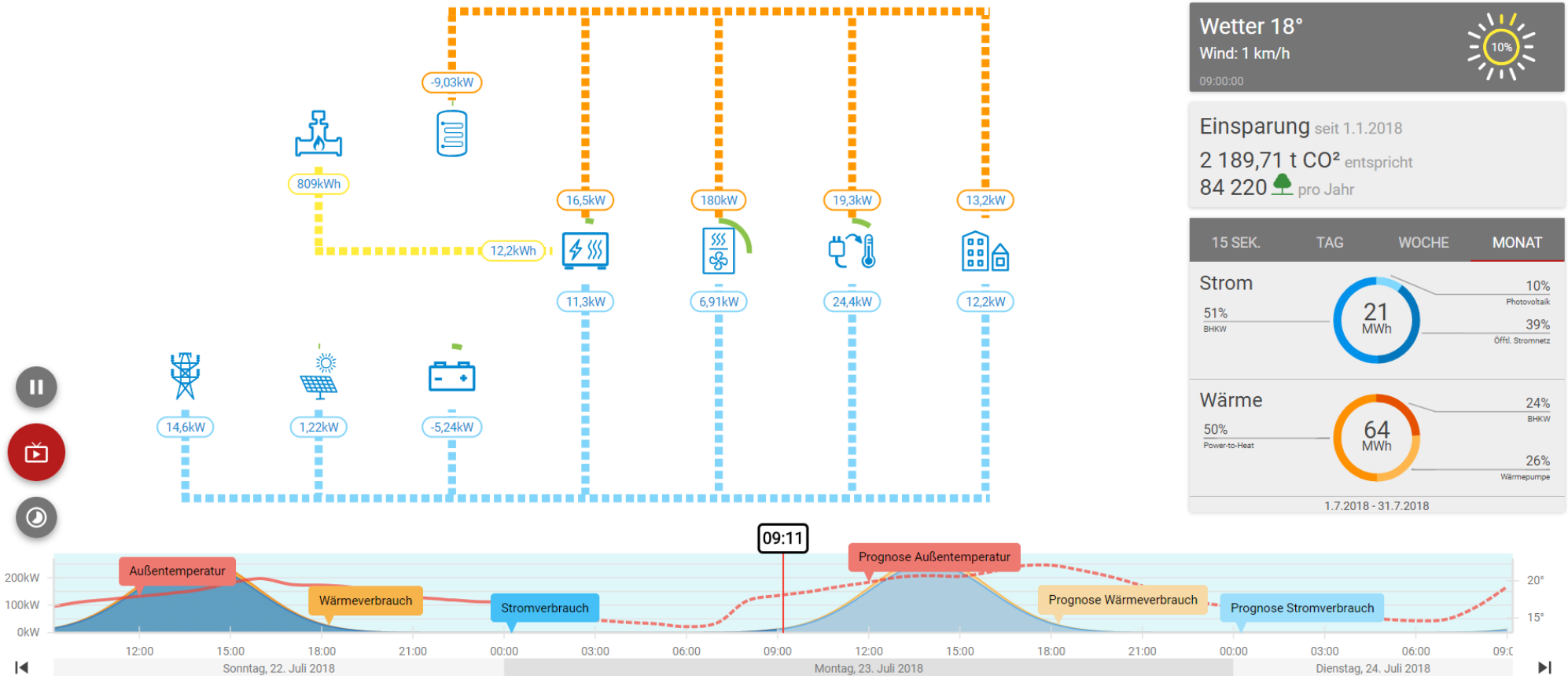
# Maßnahmen im Überblick



# Energiemanagementsystem

EMS

Deutsch



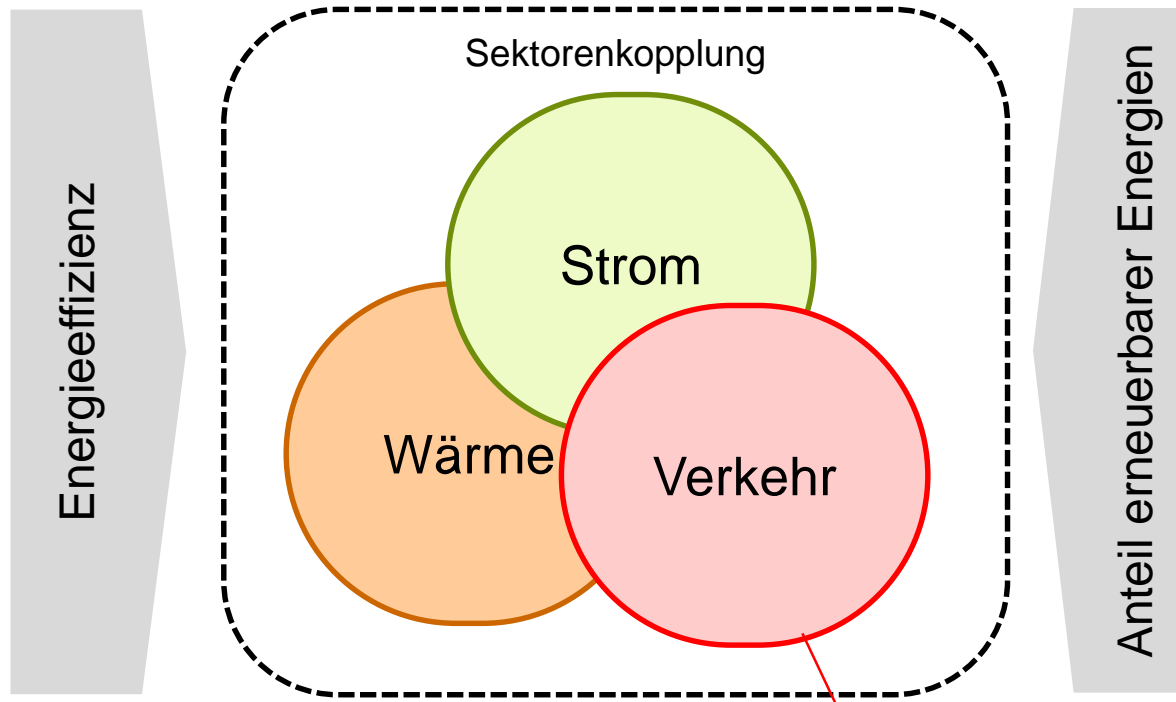
# Wasserstoff im Überblick

## und

# Power to Gas Anwendungen für den öffentlichen Busverkehr

# Klimaziele 2030: Strategischer Ansatz Sektorenkopplung

---



## **Klimaziele 2030:** Reduzierung CO<sub>2</sub>-Ausstoß

- Ausgangssituation: 2/3 fossil, 1/3 erneuerbar
- Größtes Potential im Verkehrssektor (>90% fossil, schlechte Effizienz d. V-Motors)
- Ohne Einbeziehung des Verkehrssektor sind Klimaziele nicht zu erreichen
- Ziel: Forcierung der **Elektromobilität + Wasserstoffmobilität**



# Beitrag der IKB zur Erreichung der Klimaziele

---

Sparten **Strom** und **Wärme**: -> ist IKB-Kerngeschäft

- IKB-Strom = 100% erneuerbar
- Energieeffizienz, Ausbau der EE (PV, Wasserkraft, Biogas-BHKW..)
- Produkte Wärme und Kälte (Energieeffizienz + Erneuerbare Wärme / Kälte)
- EU-Projekt Sinfonia, Sektorenkopplung
- Fernwärme...

Sparte **Verkehr**:

**IKB engagiert sich im Bereich der Elektromobilität**

- Ausbau der Ladestationen
- Smart Grid - Lademanagement
- E-Fahrzeuge als Dienstfahrzeuge (PKW)
- Car Sharing Modell...

**IKB hat noch keine Erfahrung im Bereich der Wasserstoffmobilität**

- Ziel: Überblick schaffen, Basis-Know-How aufbauen
- Thema: Erzeugung von Wasserstoff?
- Thema: Nutzung von H<sub>2</sub> in IKB-Flotte? ÖPNV? Flughafen?



## 4. Das Element Wasserstoff (H<sub>2</sub>)

---

- geruchloses, farbloses Gas, nicht toxisch, nicht krebserregend, umweltneutral, nicht explosiv
- hat hohen Energiegehalt, Energiedichte
- ist „unbegrenzt“ verfügbar
- ist gebunden in Wasser (H<sub>2</sub>O), Erdgas (CH<sub>4</sub>), Kohle, Öl, organischer Materie, Luft (rF)  
*-> H<sub>2</sub> ist KEIN Primärenergieträger, aus fossilen / erneuerbaren Energieträgern hergestellt*
- erstes Element im Periodensystem -> geringste Atommasse / Molekülmasse  
*geringster Dichte*, leichtestes Gas, 14x leichter als Luft... *H<sub>2</sub> ist sehr flüchtig*  
H<sub>2</sub>-Moleküle sind sehr klein und können sogar durch feste Stoffe hindurch diffundieren  
*-> Konsequenz für Speicher: Diffusionsfeste Stähle, Diffusionssperren, Versprödung...*
- Dichte H<sub>2</sub>-Gas: 0,089 g/l      Normalbedingungen 0°C u. 1,013 bar    (Luft 1,29 g/l)  
*-> Relevant für Speicherung / Transport (Druckspeicher)*
- Dichte H<sub>2</sub>-flüssig: 70,79 g/l      am Siedepunkt -252,76 °C / 20,3 K und Normaldruck  
*-> Durch Verflüssigung nimmt die Dichte des H<sub>2</sub> um den Faktor 800 zu und der Speicherbedarf entsprechend ab*



- >  $H_2$  bei Normaldruck auf unter  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  abkühlen oder
- >  $H_2$  unter die kritische Temperatur von  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$  abkühlen und durch Druckerhöhung verflüssigen

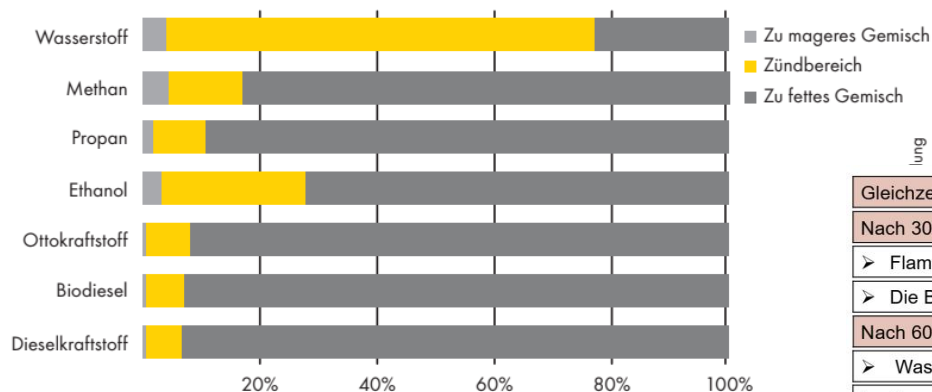


# Das Element Wasserstoff (H<sub>2</sub>)

- Brennbarkeit und Zündbereich

H<sub>2</sub> ist in sehr breitem Konzentrationsspektrum brennbar (**Zündbereich 4-77 Vol.%** extrem groß)  
**Selbstentzündungstemperatur bei 585 °C** (höher als bei konventionellen Kraftstoffen)  
geringe Zündenergie notwendig (geringer als bei konventionellen Kraftstoffen)

**Daher: Große Sorgfalt im Umgang + Einhaltung der Sicherheitsvorschriften!**



**Zündbereiche von Kraftstoffen**

## Versuch Fahrzeugbrand

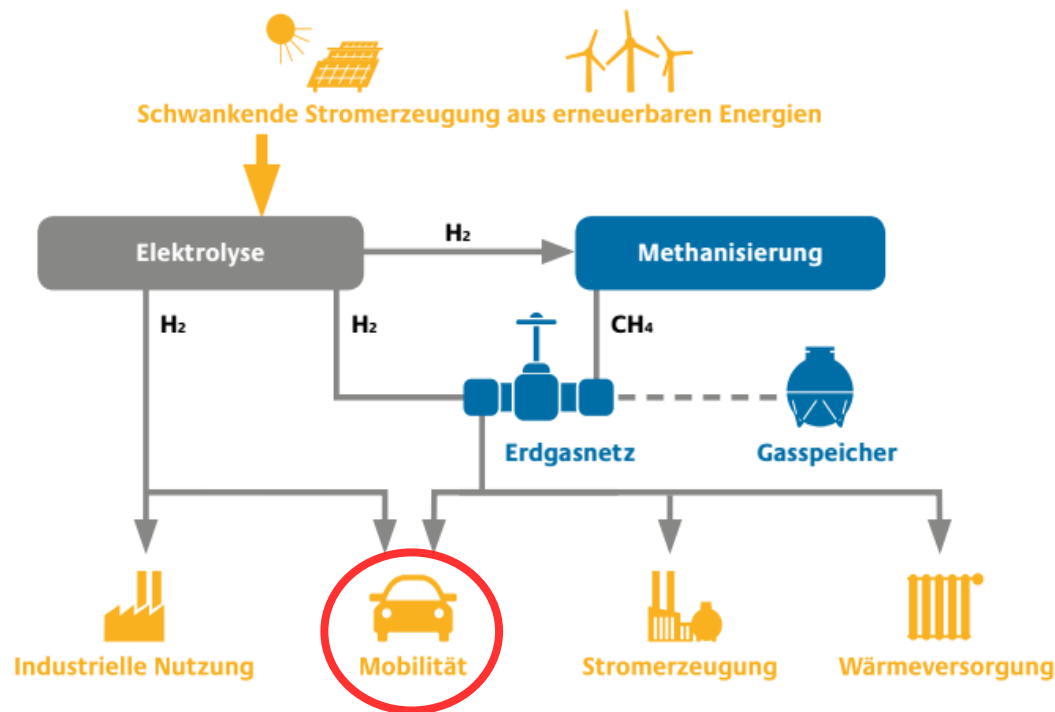
lung
Gleichzeitige Zündung beider Autos
Nach 30 Sekunden
➤ Flamme des Wasserstoffs schießt nach oben
➤ Die Benzindämpfe sinken unter das Auto
Nach 60 Sekunden
➤ Wasserstoffflamme wird kleiner
➤ Benzinfeuer breitet sich aus und ergreift den Innenraum
Nach 90 Sekunden
➤ Wasserstoff ist fast vollständig verbrannt, keine Schäden am Auto erkennbar
➤ Benzinfeuer hat das gesamte Auto erfasst, auch Innenraum in Flammen



Vergl. H<sub>2</sub> ist extrem flüchtig:  
Katastrophe Hindenburg, 1937  
Vollbrand 200.000 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>; 32 Tote

## 5. Power to Gas: Idee

Mit Power to Gas wird **Strom** aus erneuerbaren Quellen in **Wasserstoff** bzw. Methan umgewandelt



Quelle:  
Deutsche Energieagentur

**dena**  
Deutsche Energie-Agentur



Die **Sektorenkopplung** wird als **Schlüsselkonzept** der Energiewende und für den Aufbau Co<sub>2</sub>-freier Energiesysteme angesehen

- Power-to-Gas unter Einsatz von Wasserstoff ist ein mögliches Kopplungselement
- Wasserstofftechnologie speziell für den Wirtschafts- und Verkehrsbereich

# 5. Power to Gas: Einsatzgebiete

## Stromsektor

- Beitrag zur Netzstabilität
- Flexibilisierung des Stromsystems (Bereitstellung von Regelenergie)
- Stromerzeugung und Leistungsdeckung in Gaskraftwerken (Gas-turbinen bzw. KWK)...**SNG** bzw. mit Brennstoffzellen...**H<sub>2</sub>**

## Wärmesektor

- Gebäudewärme, Gasheizungen...**SNG**
- Brennstoffzellenheizungen... **H<sub>2</sub>**
- Wärme für Gewerbeanwendungen

*Pilot: Bäckerei M-Preis*

## Verkehrssektor

- Kraftstoff für den Individual- u. Lastverkehr, **H<sub>2</sub>-Tankstellen** (Ergänzung zur E-Mobilität für große Reichweiten und Transportlasten,) ...**H<sub>2</sub>**
- Erdgasfahrzeuge...**SNG**
- Fernverkehr, Schiffs-, Flug- und Bahnverkehr.... **H<sub>2</sub>** bzw. **PtL**

*Piloten: Bozen, Hamburg, Köln...*

*Pilot: Zillertalbahn*

## Energiespeicher

- Saisonale Energiespeicher... **SNG, H<sub>2</sub>**
- .....

## Industrie

- Hochtemperaturwärme, Prozesswärme...**SNG**
- Raffinerie, Herstellung von konventionellen Kraftstoff...**H<sub>2</sub>**
- Grundstoffindustrie und chemische Industrie... **H<sub>2</sub>**

*Pilot: Stahlerzeugung Voest*

*SNG... Synthetic Natural Gas  
PtL... Power to Liquid  
LNG... Liquefied Natural Gas*

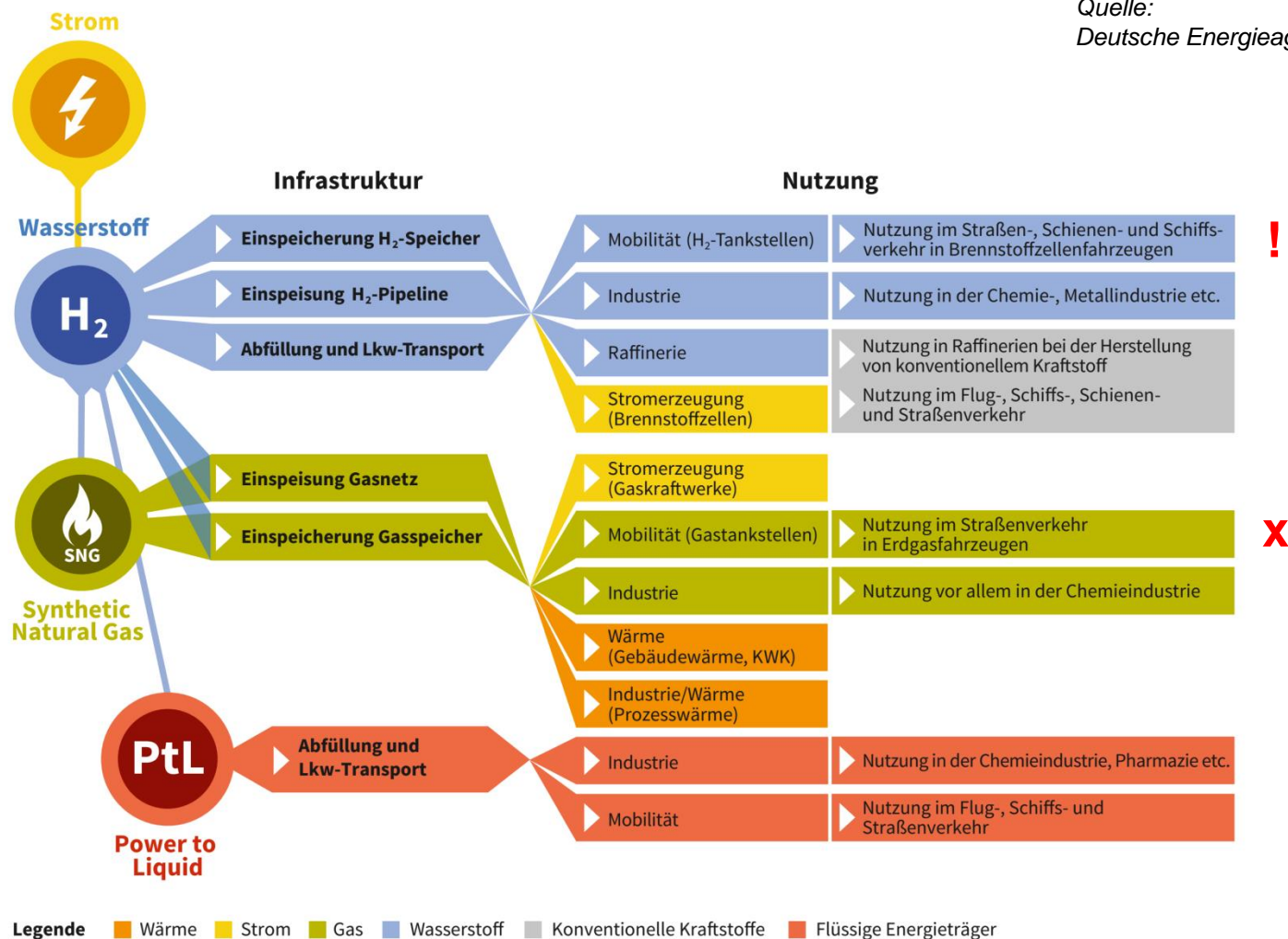
*Quelle:  
Deutsche Energieagentur*





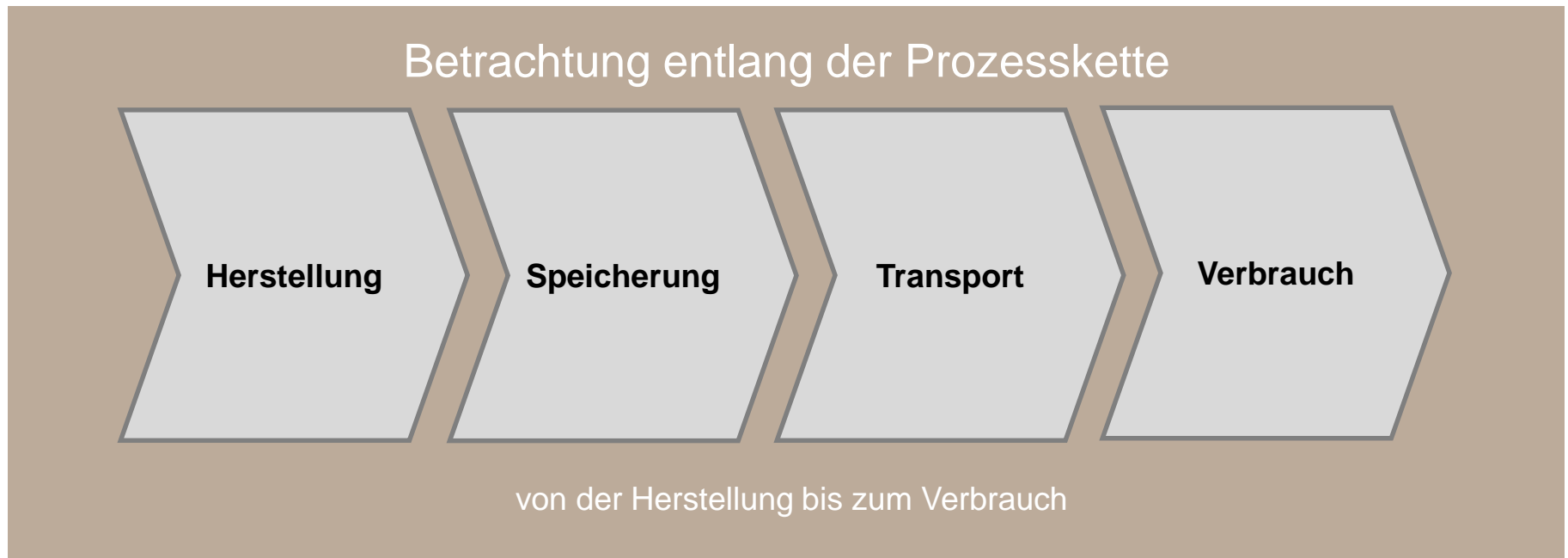
# 5. Power to Gas: Nutzungspfade

Quelle:  
Deutsche Energieagentur



## 5. Wasserstoff im öffentlichen Verkehr

---



	Herstellung	Speicherung	Transport	Verbrauch
Systeme, Technik				
Energieeffizienz				
Ökologie				
Kosten				

# 6. Wasserstoffherstellung: Überblick

## Herstellung aus fossilen Energieträgern

- **Dampfreformation** von leichten Kohlenwasserstoffen (**Erdgas**)
- Partielle Oxidation schwerer Kohlenwasserstoffe (Rückstandsöle aus der Erdölindustrie, **schweres Heizöl**)
- Partielle Oxidation von **Kohle**



Anteil:	> 90% weltweit
Kosten:	günstig
Klima:	schädlich

CO<sub>2</sub>-Emission, Ressourcenverbrauch

## Herstellung aus Biomasse ... im Forschungsstadium, vielversprechend

- Aus fester Biomasse (z.B. Holz, Pellets aus Abfall..)
- durch Vergärung von Biomasse
- Biologische Wasserstofferzeugung mittels Bakterien (Grünalgen)

Anteil:	??
Kosten:	??
Klima:	günstig?

## Herstellung mittels Elektrolyse

- Zerlegung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff. Mit Elektrolyse lässt sich hochreiner H<sub>2</sub> herstellen. Problematisch sind dzt. der **hohe Energieaufwand** und **die Kosten**. Die Umweltverträglichkeit hängt von der Art der Stromerzeugung ab.

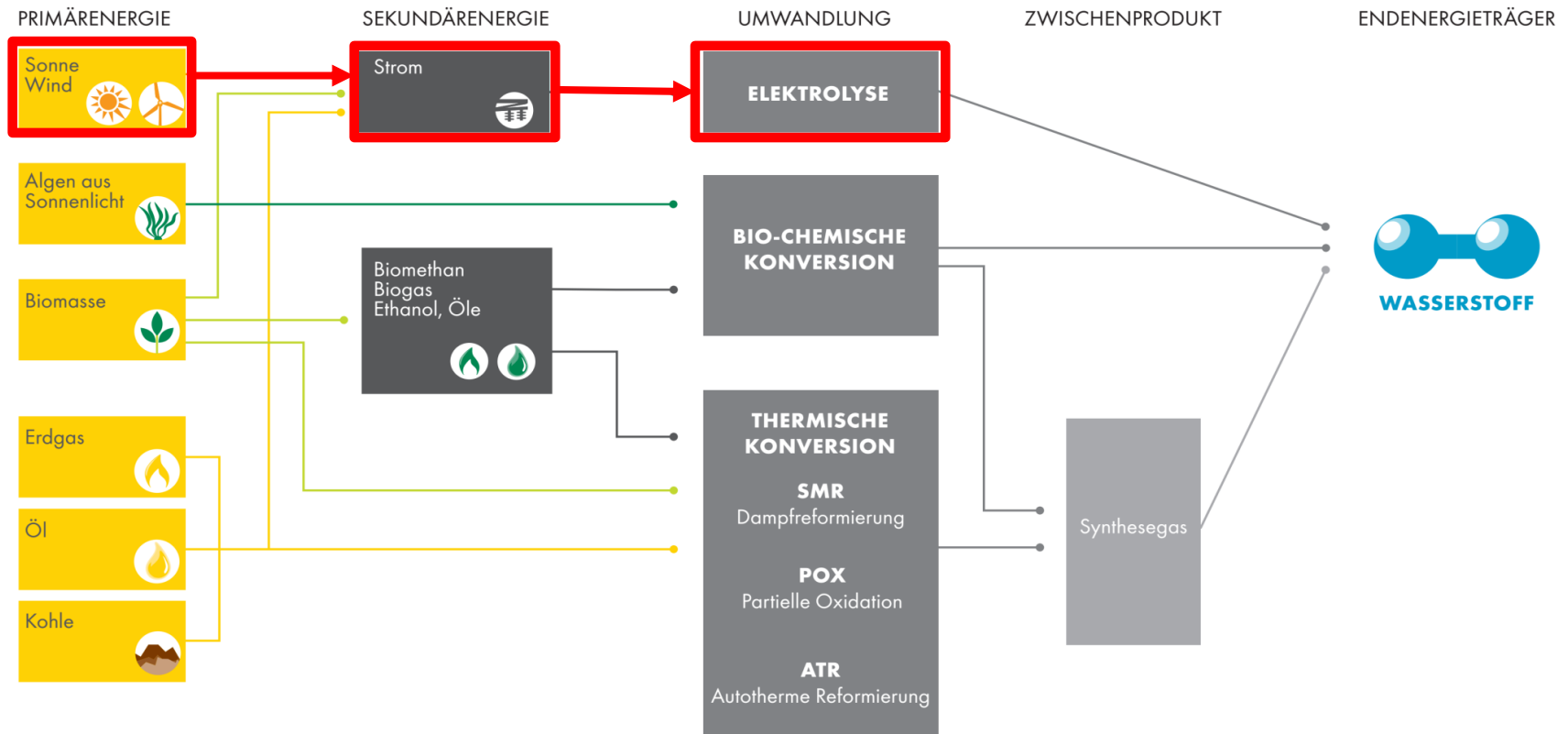
Anteil:	rd.5% weltweit
Kosten:	teuer
Klima:	günstig

Bei Verwendung von EE-Strom

**Die Hoffnung des PtG-Konzepts ruht auf der Elektrolyse**



# 6. Wasserstoffherstellung: Verfahren



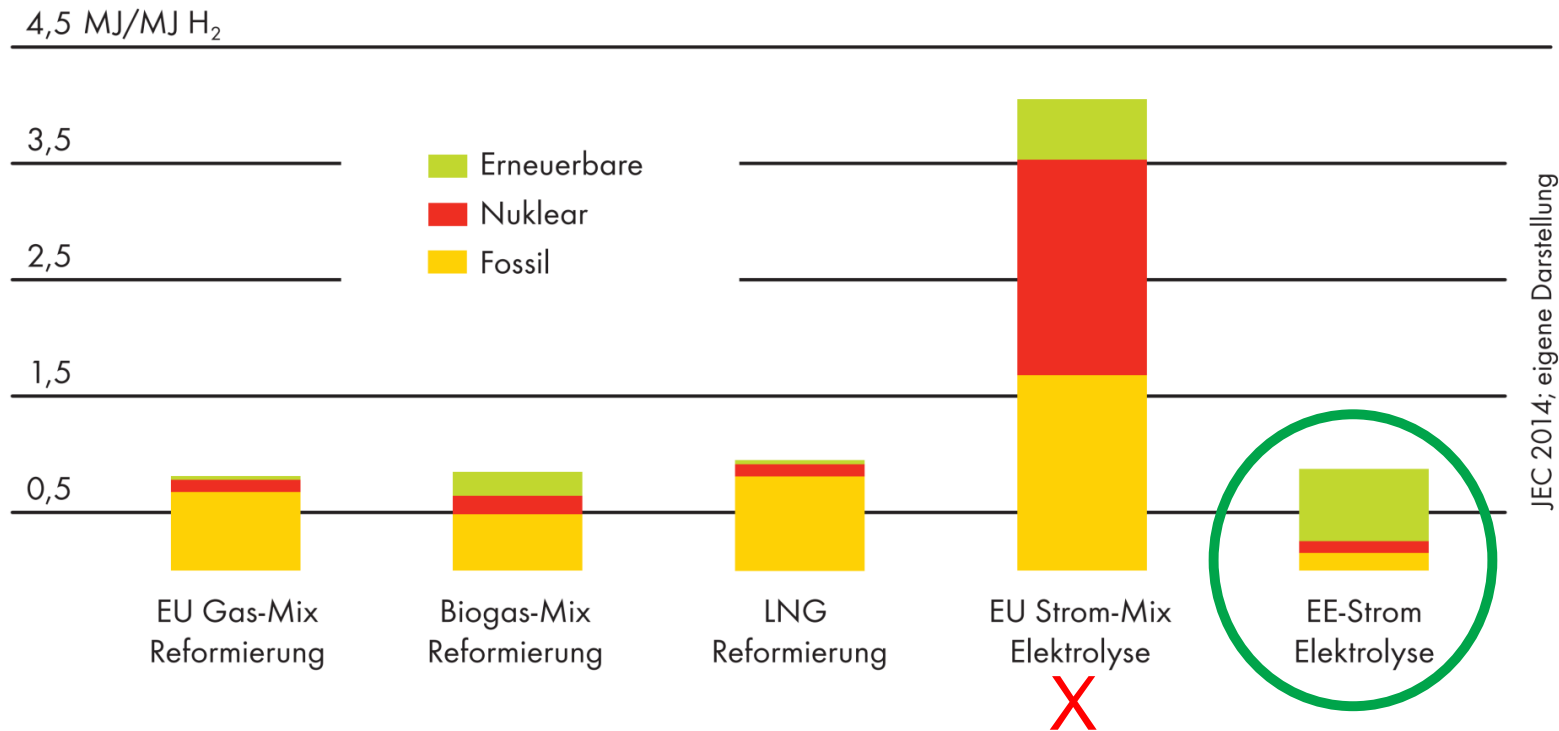
Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



Der „Marktanteil“ der Elektrolyse an der Wasserstoffproduktion ist mit rd. 5% dzt. noch sehr gering!

## 6. Wasserstoffherstellung: Energieeffizienz

### Energieeffizienz der Bereitstellungspfade: Primärenergie -> H<sub>2</sub>



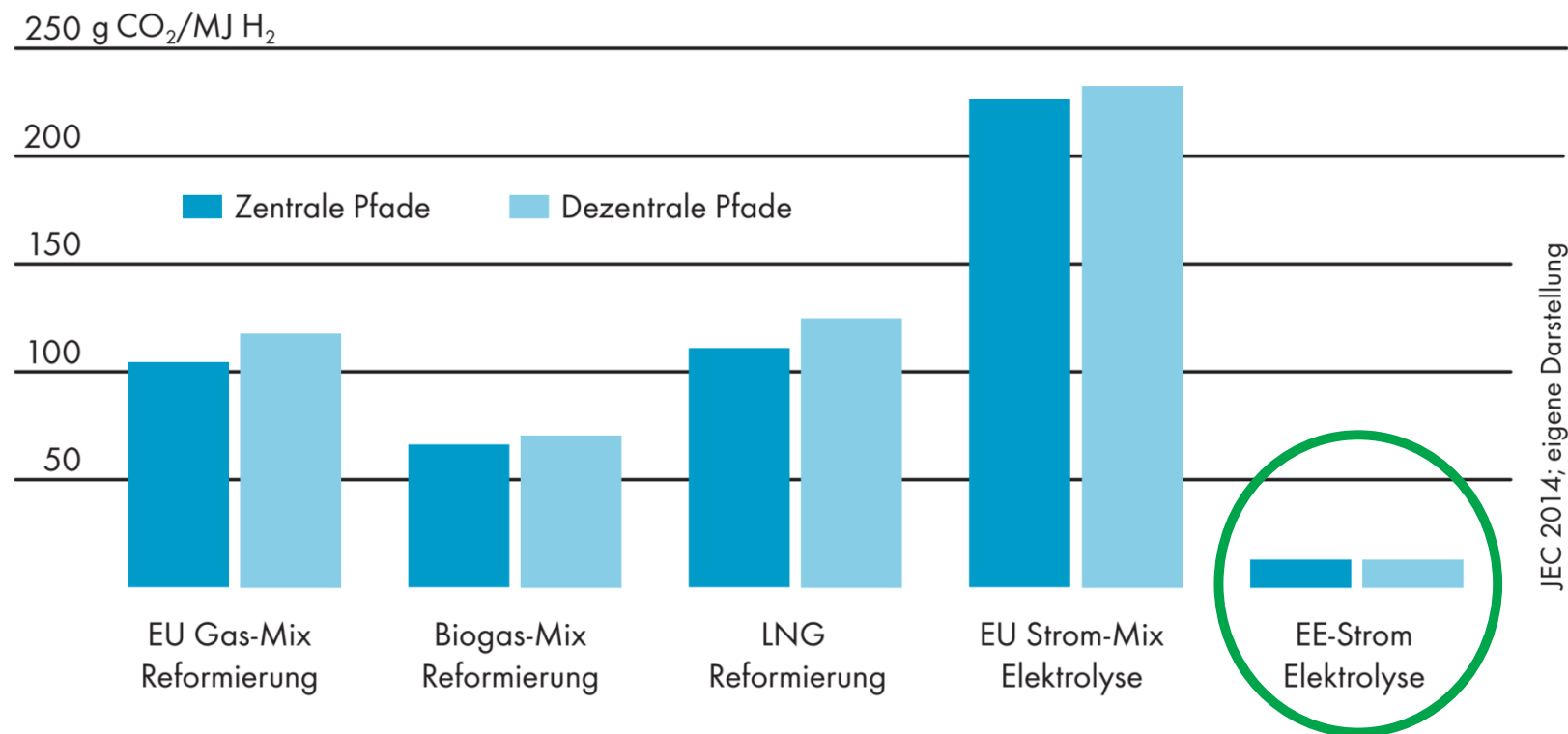
Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



Aus Sicht des Klimaschutzes ist die Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse nur dann sinnvoll wenn der Strom aus erneuerbaren Quellen stammt! (Wind, Sonne, Wasserkraft)

Elektrolyse mit Verwendung von „fossilem Strom“ ist Unsinn!

## 6. Wasserstoffherstellung: Treibhausgasemission



Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017

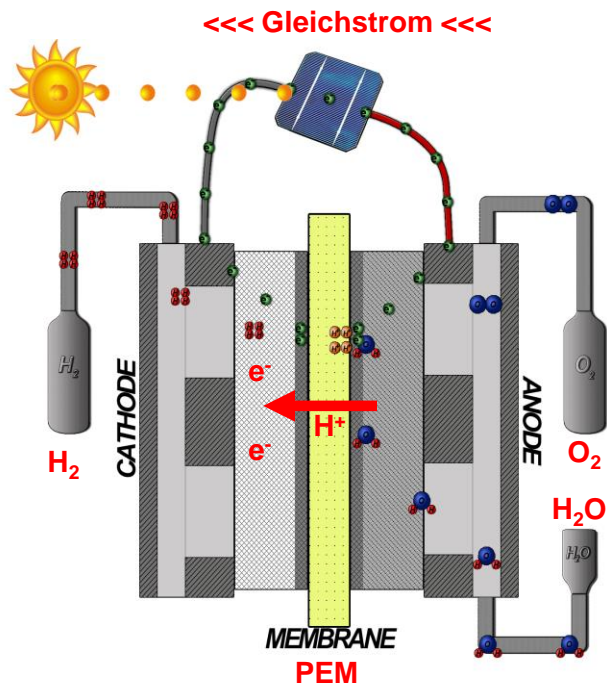


## 6. Wasserstoffherstellung: Elektrolyse

Die **Elektrolyse** zur Wasserstofferzeugung ist der **Kernprozess** des PtG-Konzeptes

Es gibt 3 relevante Verfahren der Elektrolyse:

- Die **alkalische** Wasserelektrolyse mit einem flüssigen basischen Elektrolyt (KOH)  
Verfahren schon lange im Einsatz, (PAE: Pressurized Alkaline Electrolyser) *z.B. M-Preis*
- **PEM-Elektrolyse**: Die saure bzw. Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse ionenselektive Membran, die  $H^+$  Ionen nicht aber  $H_2O$  durchlässt; *z.B. Zillertalbahn, Voest*
- die Hochtemperatur-Wasserdampfelektrolyse mit einem Festoxid als Elektrolyt, dzt. Labormaßstab



### PEM

**PEM-Elektrolyse hat Vorteile für PtG-Anwendungen:**

- Flexibel bei Lastwechsel, im Teilastbereich
- Keine Gefahrenstoffe (KOH), Elektrolyt ist Feststoffmembran
- Weitgehend wartungsfrei
- Erzeugt hochreinen  $H_2$  (keine Nachreinigung erf.)

Rasante Entwicklung, insbesondere hinsichtlich geeigneter Werkstoffe und verfahrenstechnischer Prozesse.

**Ziel ist es, die Investitionskosten der PEM-Elektrolyse bis 2022 von dzt. 1.000-2.000 €/kW auf 500 €/kW zu reduzieren.**



# 6. Wasserstoffherstellung: Elektrolyse

## Power to Gas: Stand der Technik und Perspektiven

ELEKTROLYSE			METHANISIERUNG			
IST-SITUATION	Alkalische Elektrolyse	PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC)	Katalytische Methanisierung	Biologische Methanisierung	
	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div>9</div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div>8</div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div>6</div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div>8</div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div>7</div></div>	
	Technology Readiness Level					
	Vorteile	kostengünstig (große Anlagen), langjährige Erfahrung	kompakte Bauweise, bessere Dynamik, gute Skalierbarkeit, keine Korrosion	bei Nutzung der Abwärme effizienter und kostengünstiger	gute Skalierbarkeit, hochwertige Abwärme	robust, flexibel, schnelle Reaktionszeit
	Herausforderungen	Laugen, Kaltstart- und Teillastverhalten	teure Werkstoffe, Materialanforderungen	Prozess bei hoher Temperatur	teure Werkstoffe, geringe Flexibilität, Reinheit der Eingangsgase	biologisches System, bisher noch keine Multi-MW-Anlage realisiert
	Wirkungsgrad	62 – 82 %	65 – 82 %	65 – 85 %	77 – 83 %	77 – 80 %
	Investitionen	800 – 1.500 €/kW	900 – 1.850 €/kW	2.200 – 6.500 €/kW	400 – 1.230 €/kW	400 – 1.980 €/kW
PERSPEKTIVE	↓	↓	↓	↓	↓	
	Wirkungsgrad	78 – 84 %	75 – 84 %	87 – 95 %	77 – 90 %	79 – 90 %
	Investitionen	250 – 400 €/kW	300 – 700 €/kW	270 – 800 €/kW	130 – 400 €/kW	200 – 400 €/kW

Wirkungsgrad bezogen auf unteren Heizwert; Investitionen bezogen auf Nennleistung der Anlage

## 6. Wasserstoffherstellung: Elektrolyse

	Temperatur °C	Elektrolyt	Anlagengröße		Wirkungs- grad	Reinheit H <sub>2</sub>	Systemkosten	Lebens- erwartung	Reifegrad
Alkaline Elektrolyse (AE)	60 – 80	Kalium- hydroxid	0,25 – 760 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	1,8 – 5.300 kW	65 – 82 %	99,5% - 99,9998%	1000 – 1200 €/kW	60.000 – 90.000 h	Kommerziell seit 100 Jahren in Industrie genutzt
Proton Exchange Membran Elektrolyse (PEM)	60 – 80	Feststoff- membran	0,01 – 240 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	0,2 – 1.150 kW *)	65 – 78 % ⚡	99,9% - 99,9999% ⚡	1900 – 2300 €/kW	20.000 – 60.000 h	Kommerziell in mittleren und kleinen Anwendun- gen (<300 kW)
Anion Exchange Membran Elektrolyse (AEM)	60 – 80	Polymer- Membran	0,1 – 1 Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub> /h	0,7 – 4,5 kW	k.A.	99,4%	k.A.	k.A.	Kommerziell verfügbar in limitierten Anwendungen
Solid Oxide Elektrolyse (SOE)	700 – 900	Oxidkeramik	Bisher nur Labormaßstab		85% (Labor)	k.A.	k.A.	ca 1.000 h	FuE

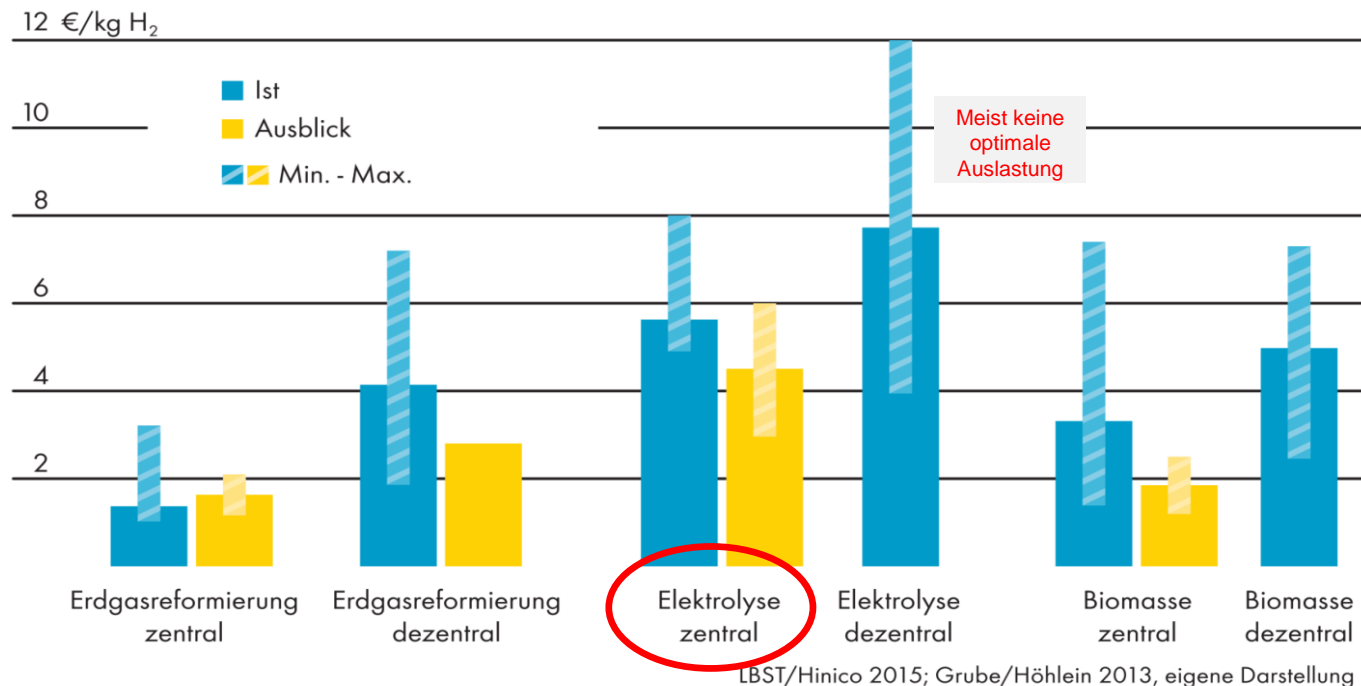
\*) Voest: 6 MW in Bau

Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



# 6. Wasserstoffherstellung: Kosten

## 12 ERZEUGUNGSKOSTEN VON WASSERSTOFF



Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



**Erzeugungskosten:**  
6-8 €/kg H<sub>2</sub> (zentral)  
8-12 €/kg H<sub>2</sub> (dezentral)

**Preise / Kosten für H<sub>2</sub>:**

6-8	€/ kg H <sub>2</sub>
9,0	€/ kg H <sub>2</sub>
9,5	€/ kg H <sub>2</sub>
8,0	€/ kg H <sub>2</sub>
11,3	€/ kg H <sub>2</sub>

**Zielwert:** 4-6 €/ kg H<sub>2</sub>

Kosten Deutschland: verfahrensabhängig  
Innsbruck: OMV-Tankstelle (Preis an Zapfsäule)  
Shell Homepage (Preis entsprechend konventionellen Kraftstoff eingestellt)  
Hincio, Ludwig Bölkow (Preis an Zapfsäule: 300 bar)  
IIT Bozen, Protokoll IVB .. Kosten  
bei H<sub>2</sub>-Kosten von 4,8 €/kg wären Kraftstoffkosten von Diesel und H<sub>2</sub> gleich

## 6. Wasserstoffherstellung: Strombezugskosten

---

Die Strombezugskosten beeinflussen die H<sub>2</sub>-Herstellungskosten wesentlich (Kostenanteil bis zu ¼)

Kosten für Strombezug (C/kWh)	2	4	6
Kostenanteil an Produktionskosten H <sub>2</sub> (C/kWh)	1,0	2,0	3,0

### §111 ELWOG:

Nach heutiger Rechtslage fallen auf Grund einer befristeten Ausnahmeregelung im ELWOG für Anlagen zur Umwandlung von Strom zu Wasserstoff **keine laufenden Systemnutzungsentgelte** (Netznutzung, Netzverlust) an !

### Möglichkeiten für Strombezug:

- Direktanschluss an Kraftwerk
- Bezug aus dem Stromnetz
- Überschussstrom aus Regelenergiemarkt ... *Diskontinuierlicher Betrieb Elektrolyseur?*
- Beschaffung Bandstrom ... *Kontinuierlicher Betrieb Elektrolyseur*



## 6. Wasserstoffherstellung: Fazit

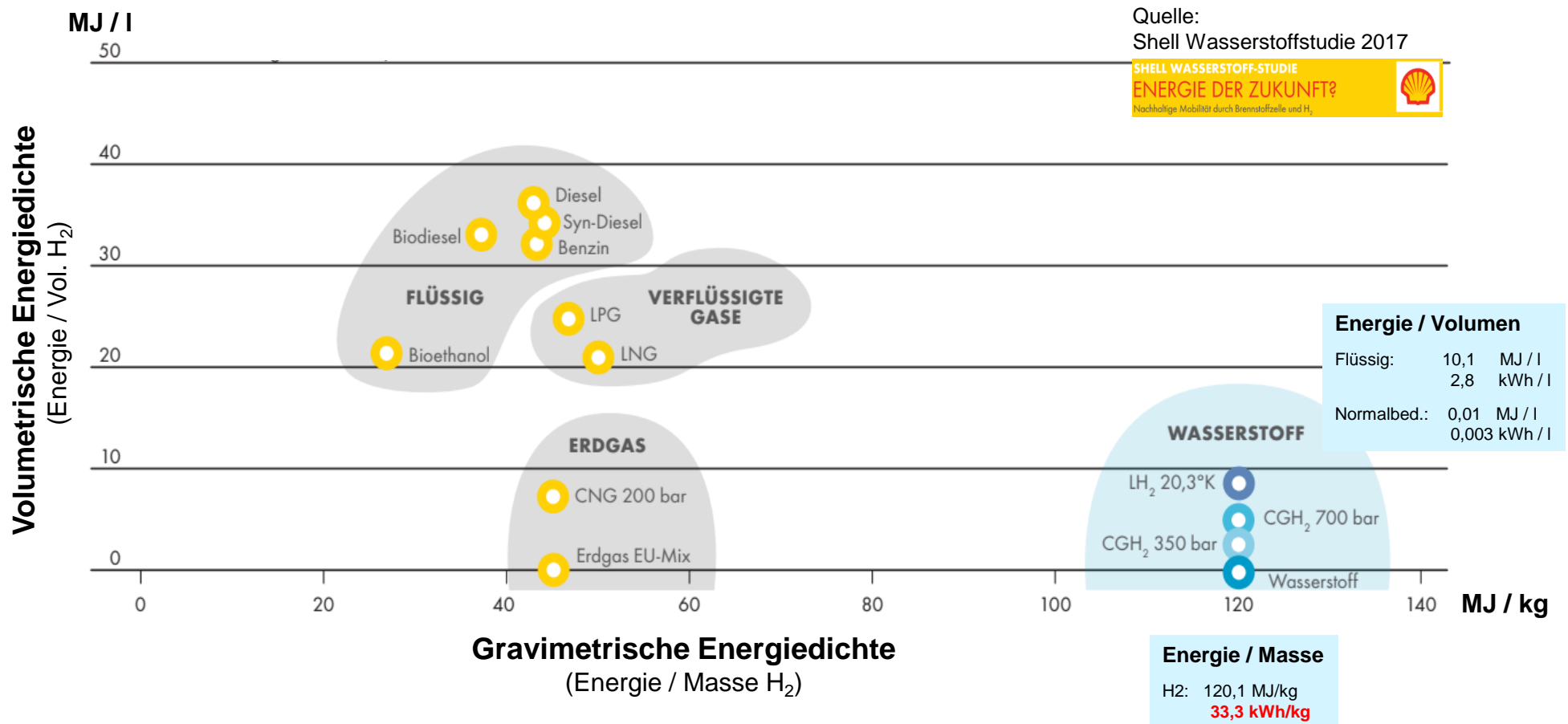
---

- Für PtG-Anwendungen steht die Herstellung von „grünem Wasserstoff“ mittels **Elektrolyse** im Mittelpunkt (i.G.z. fossilem Wasserstoff).
- Die H<sub>2</sub>-Produktion mittels Elektrolyse ist aus Klimaschutzgründen nur dann sinnvoll wenn der **Strom aus erneuerbaren Quellen** stammt.
- Elektrolyse hat gegenüber der Herstellung aus fossilen Energieträgern noch erhebliche Nachteile: hoher Energieaufwand, hohe Kosten, geringer Marktanteil
- Es kommen im wesentlichen 2 Verfahren zum Einsatz:  
die **alkalische** Wasserelektrolyse...      altes Verfahren  
Die **saure** bzw. PEM-Elektrolyse...      neues Verfahren
- Rasante Entwicklungsfortschritte bei der **PEM-Elektrolyse** -> **Zukunftsweg?**

# 7. Wasserstoffspeicherung

Die Speicherung eines Energieträgers wird maßgebend durch seine **Energiedichte** bestimmt.

H<sub>2</sub> hat von allen Brennstoffen bezogen auf die **Masse die höchste Energiedichte** (33,3 kWh/kg), jedoch in Bezug auf das **Volumen eine der geringsten Energiedichten** (0,003 kWh/l).



# 7. Wasserstoffspeicherung

## Ein Versuch der Visualisierung

Speicher mit 1 kWh Energieinhalt

**Diesel**

**Batterie**

**Wasserstoff**

700 bar, 15°C

**Wasserstoff**

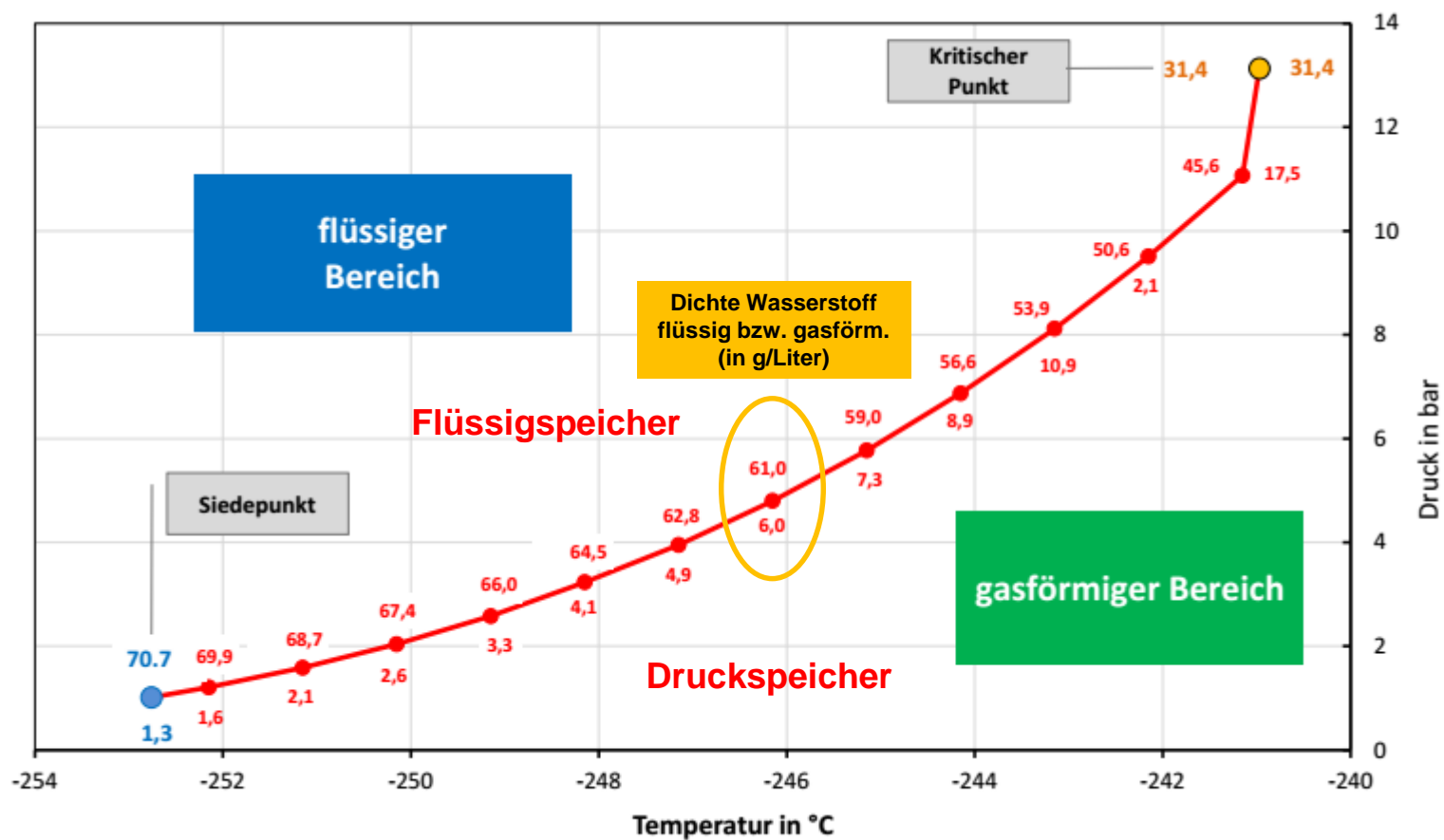
350 bar, 15°C



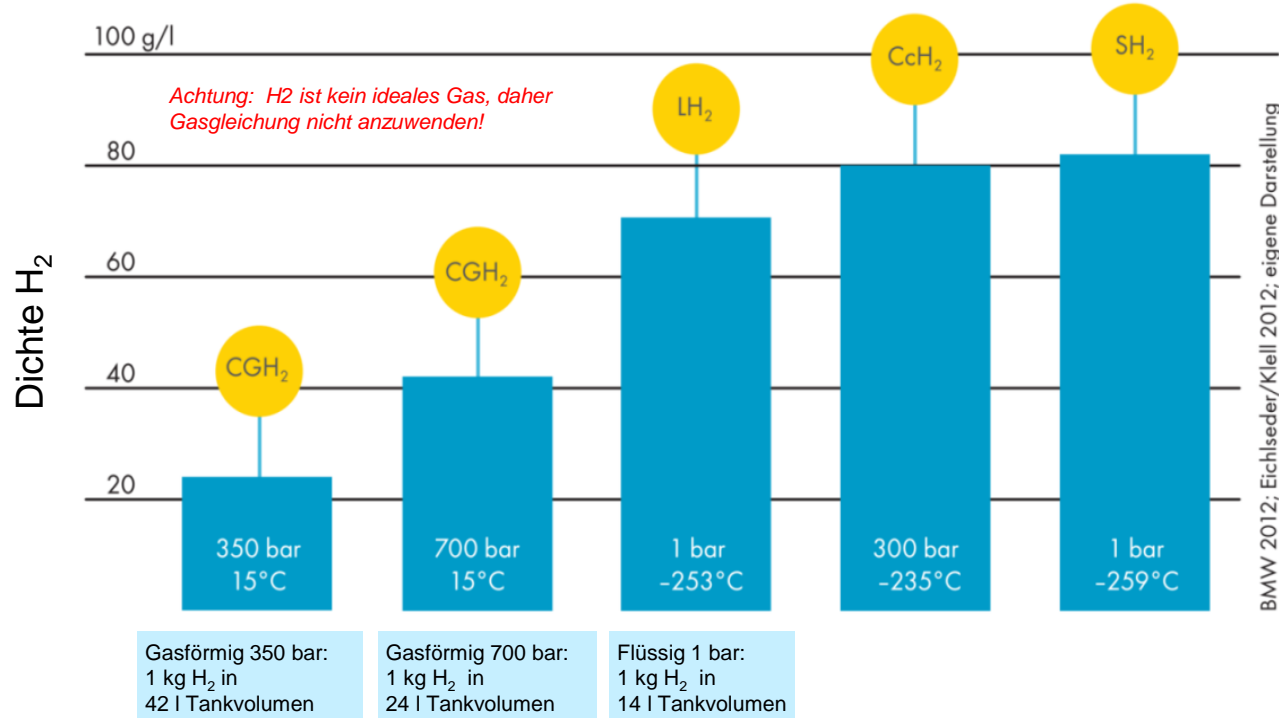
Volumen	1	35	7	13
Masse	1	59	0,35	0,35

# 7. Wasserstoffspeicherung

## Dichte von H<sub>2</sub> entlang der Dampfdruckkurve Druckspeicher - Flüssigspeicher



# 7. Wasserstoffspeicherung



Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



## Stoffspeicher

noch in Entwicklung

- In Festkörper
- In Flüssigkeiten
- An Oberflächen

## Physikalische Speicherverfahren

Am häufigsten, am weitesten entwickelt

- Druckspeicher  $CGH_2$  (Compressed Gaseous Hydrogen) ... Mobilität: i.d.R. 350 bar LKW, 700 bar PKW
- Flüssigspeicher  $LH_2$  (Liquid Hydrogen) .... Insbesondere Raumfahrt, hoher Aufwand für Verflüssigung auf -235 °C
- Kombination  $CcH_2$
- Gelspeicher  $SH_2$  (Slush Hydrogen) .... Insbesondere Raumfahrt, Abkühlung bis Schmelzpunkt -259 °C

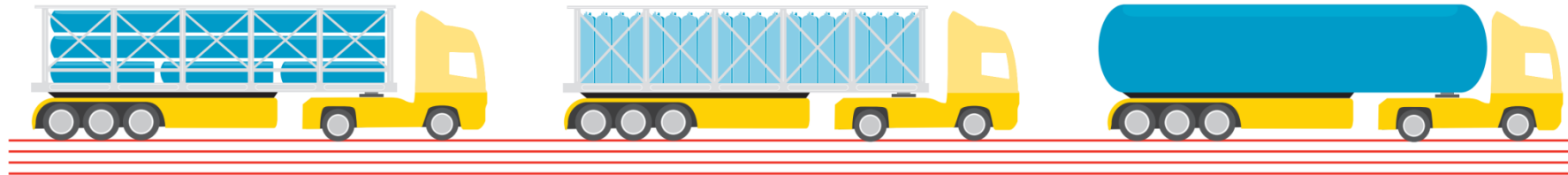


# 8. Transport von Wasserstoff

## Straßentransport

kurze Entfernungen: gasförmig, komprimiert

große Entfernungen: flüssig



TUBE TRAILER

200 – 250 bar, ≈ 500 kg, Umgebungstemperatur

CONTAINER TRAILER

500 bar, ≈ 1.000 kg, Umgebungstemperatur

LIQUID TRAILER

1 – 4 bar, ≈ 4.000 kg, tiefkalt

Energieinhalt: 1 : 2 : 8

### Energieeffizienz:

Verluste durch Verflüssigung:

20-30%

Verluste durch Komprimierung:

<10%



### Daher:

- Möglichst kurze Transportwege (Druckspeicher)
- Keine Transportwege: H<sub>2</sub>-Herstellung beim Verbraucher

## Pipeline

- Systeme erst in Aufbau
- weltweit gibt es dzt. über 4.500 km Wasserstoff-Pipelines, meist als Mikronetze
- Alternativ: Einspeisung in vorhandene Erdgasnetze (USA: Beimischung 5-15%, D: bis 10%)

# 9. Wasserstoffnutzung: Übersicht

## Stationäre Anwendungen

- **Stromerzeugung**

Dezentrale Stromversorgung in netzfernen Gebieten,  
Notstromversorgung, Back-up-Systeme...  
Wirkungsgrad: bis zu 60%

- **Hausenergie**

Strom und Wärmenutzung in KWK (strom-oder  
wärmegeführt)  
Systemwirkungsgrad: bis zu 95%

- **Industrie**

Grundstoffindustrie und chemische Industrie

Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



## Mobile Anwendungen

- **Raumfahrt**

Seit 1950/60er Jahren als Raketentreibstoff etabliert

- **Luftfahrt**

Zur Notversorgung oder als Hilfsaggregate für die  
Bordversorgung; für Antriebssysteme noch im  
Forschungsstadium, Demo-Projekte für unbemannte  
Systeme (Drohnen, Motorsegler..)

- **Nautische Anwendungen**

Hpts. für Bordversorgung bei Großschiffen; als  
Antriebssysteme für U-Boote bereits gängig (mit  
Elektrolyse zugleich Atemlufterzeugung  $O_2$ )

- **Schiene / Hydrail**

Bislang Demo-Projekte; Durchbruch mit Zillertalbahn?

- **Gabelstapler / Schlepper**

Hpts. Indoor; mehr als 11.000 Anwendungen in USA

- **Busse**

Erprobte Technologie; vor kommerziellen Einsatz

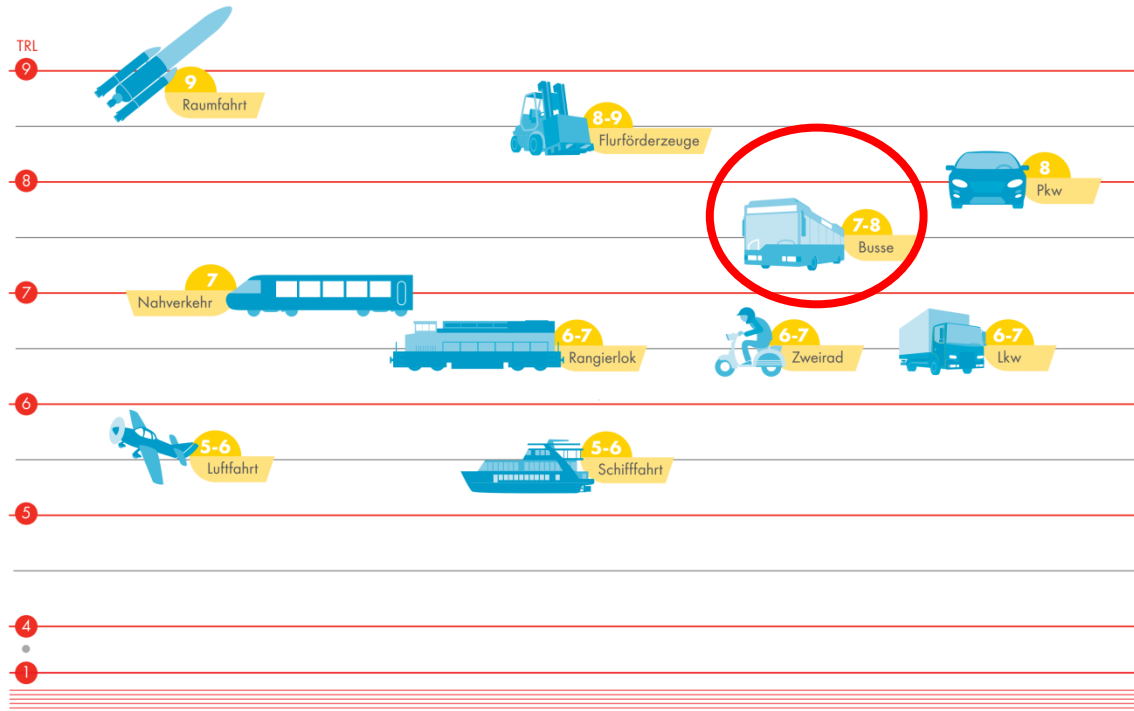
- **LKW und leichte Nutzfahrzeuge** Prototypen

- **Motorräder** nur Prototypen

- **Personenwagen** erste Serien, moderate Stückzahlen

# 9. Wasserstoffnutzung: Technologiereife

## Die technologische Reife für Busse liegt bei 7-8



Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017



## Technologiereife

Technology Readiness Level (TRL) der NASA:

1. Funktionsprinzip
2. ...
3. Proof of Concept
4. ...
5. Versuchsaufbau in Einsatzumgebung, wesentliche Technikelemente erprobt
6. Prototyp in Einsatzumgebung, technische Machbarkeit in Anwendung nachgewiesen
7. Prototyp im Einsatz, Demonstration maßstabsgetreu im betrieblichen Umfeld
8. Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionsfähigkeit
9. Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes - **Produkt**

## 9. Wasserstoffnutzung: Verkehrssektor ÖPNV

---

Wasserstoff wird in Fahrzeugen des ÖPNV auf zwei Arten eingesetzt:

### Verbrennungsmotor (Ottomotor, Wankelmotor)

- Geringer Wirkungsgrad, z.B. 25-35%
- wegen der hohen Temperaturen entstehen geringe Mengen  $\text{NO}_x$
- wegen der hohen Zündtemperatur von Wasserstoff (560 °C, Diesel 250 °C) ist der Einsatz für Dieselmotoren nicht geeignet

Technologie  
ab 1990

### Brennstoffzelle (kalte Verbrennung)

- Antrieb des Fahrzeuges mit E-Motor, BZ versorgt E-Motor
- Systemwirkungsgrad BSZ + E-Motor ca. 45-50%
- Batterie als Zwischenspeicher / Puffer
- Bremsenergierückgewinnung

Technologie  
heute

# 9. Wasserstoffnutzung: Verkehrssektor ÖPNV

Quelle:  
Shell Wasserstoffstudie 2017

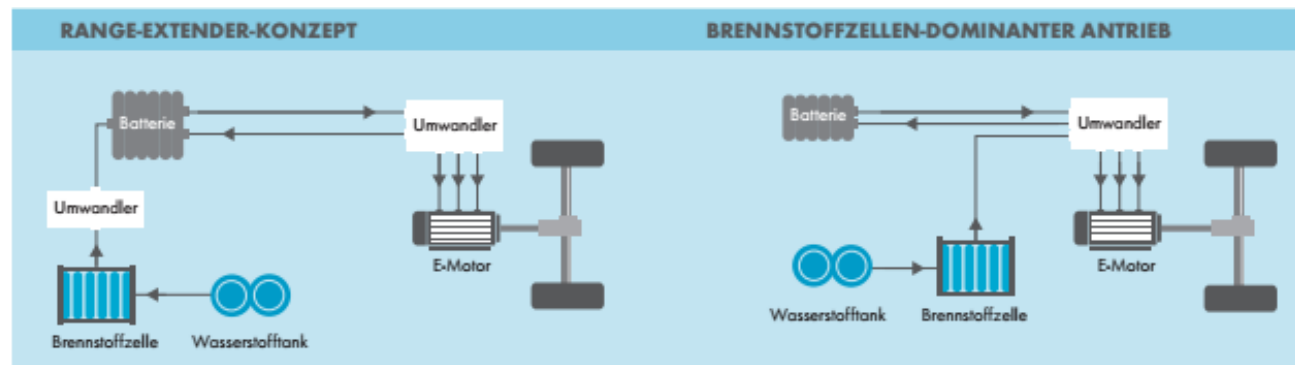
SHELL WASSERSTOFF-STUDIE  
ENERGIE DER ZUKUNFT?  
Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>



Heute immer **Hybridsysteme** mit aus **Brennstoffzelle** und **Batterie** (FCEB)

2 unterschiedliche Konzepte:

- Brennstoffzelle als **Range-Extender** für E-Bus
- Brennstoffzellen-**dominanter Antrieb** mit Batterie als Anfahrhilfe und zur Rekuperation



## FCEB: Fuel Cell Electric Buses

Heute meist 2 BZ-Stacks mit je 100-150 kW Leistung  
Drucktanks meist 350 bar, Inhalt rd. 1.200-1.600 l  
Wasserstoffmenge: 30-40 l  
Verbrauch: 8-9 kg H<sub>2</sub>/100 km (40 l Diesel / 100 km)  
Reichweite: 350-450 km



# 9. Wasserstoffnutzung: Pilot- u. Förderungsprojekte ÖPNV

## Köln



- Brennstoffzellen-Hybridbusse
- Nebenprodukt-H<sub>2</sub> aus Industrie \*)

## Hamburg



- 4 Brennstoffzellenbusse
- Batteriebusse mit Range Extender

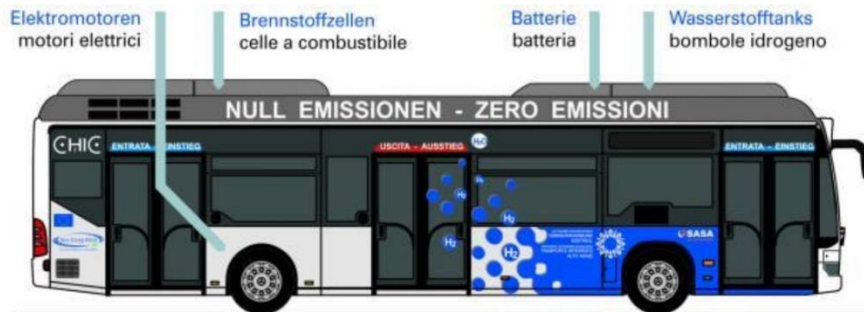
## Bozen



- Batteriebusse wo möglich – Brennstoffzellenbusse wo nötig

\*) Nebenprodukt- oder Reststoff-Wasserstoff aus der Industrie (z.B. Chlor-Alkali-Elektrolyse) wird immer mehr in internen Prozessen gezielt genutzt und steht daher immer weniger als kostengünstiger „Verlustwasserstoff“ als Kraftstoff für den Verkehrssektor zur Verfügung!

## Bozen



Technische Daten:

- 12 m Länge
- Wasserstoff
- Reichweite
- max. 100 km/h
- max. 100 km/h

Besondere

- Wasserstoff
- reiner Wasserstoff
- eine Brennstoffzelle
- geräuscharme Elektromotoren
- hoher Fahrkomfort



## 9. Wasserstoffnutzung im ÖPNV

---

Wie gehts weiter im Duell der Elektromobilität?

### Wasserstoff oder Batterie 2.0



Quelle: InnoZ (© Vector Market/ © Freepik)

# Unterlagen, Kontakte

---



Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)  
Energiesysteme und  
Energiedienstleistungen  
Chausseestraße 128 a  
10115 Berlin

Tel.: +49 (0)30 72 61 65-600  
Fax: +49 (0)30 72 61 65-699  
E-Mail: [info@dena.de](mailto:info@dena.de)  
Internet: [www.dena.de](http://www.dena.de)

## SHELL WASSERSTOFF-STUDIE ENERGIE DER ZUKUNFT?

Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>



Shell Deutschland Oil GmbH  
22284 Hamburg  
[www.shell.de/wasserstoffstudie](http://www.shell.de/wasserstoffstudie)  
Hamburg 2017



<http://www.powertogas.info/power-to-gas/power-to-gas-produkt-wasserstoff>

Weitere Informationen zu Power to Gas finden Sie auf der Internetseite  
der Strategieplattform: [www.powertogas.info](http://www.powertogas.info)



**Austrian Energy Agency - Österreichische Energieagentur**



Seit 1999 hat das Umweltbundesamt die Rechtsform einer GmbH. Rund 500 Expertinnen entwickeln Strategien und Lösungen für EntscheidungsträgerInnen aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft - auf nationaler und internationaler Ebene.

**IIT** Institut für Innovative Technologien Bozen

H2 Südtirol: Wasserstoffzentrum Bozen Süd  
[www.h2-suedtirol.com](http://www.h2-suedtirol.com)



# Danke

für die Aufmerksamkeit

# Fragen

Bernhard Hupfauf  
[bernhard.hupfauf@ikb.at](mailto:bernhard.hupfauf@ikb.at)

Roland Tiwald  
[Roland.tiwald@ikb.at](mailto:Roland.tiwald@ikb.at)



Eins für alle  
mit Ideen.

0 800 500 502 / [www.ikb.at](http://www.ikb.at)

# Innovation

