

# Brennstoffzellenpostauto. Ein emissionsfreier Antrieb für unsere Umwelt

VöV-Kommission Technik und Betrieb Bus KTBB,  
Winterthur 21.11.2017

21.11.2017 / René Krieger



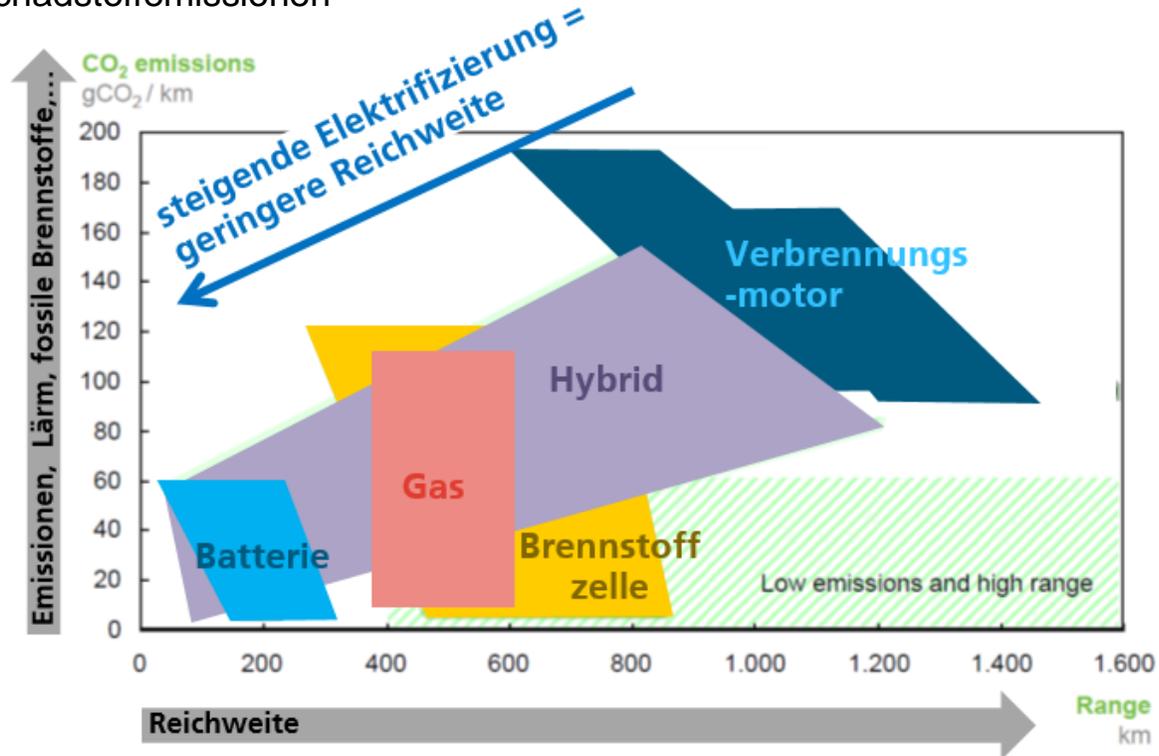
**PostAuto**   
Die gelbe Klasse.

# Inhaltsverzeichnis

- Antriebsvarianten
- Europäische Union
- Wasserstoffmobilität im ÖV
- Projekt CHIC
- Brennstoffzellenpostauto - Technik
- Brennstoffzellenpostauto - 5 Jahre unterwegs mit Wasserstoff
- Wasserstofftankstelle
- Fazit
- Impressionen Rückbau

# Antriebsvarianten

Vergleich verschiedener Antriebsarten bezüglich Reichweite (pro Tankfüllung resp. Batterieladung) bezogen auf Lärm – und Schadstoffemissionen



Der Brennstoffzellenantrieb kommt dem Zielfeld von PostAuto -> **grosse Reichweite und wenig schädliche Umwelteinflüsse** gemäss heutigem Stand der Technik am Nächsten

PostAuto – Flotte per Oktober 2017

Total 2242 Fahrzeuge

...davon 45 Hybrid Busse:

- 2 Seriell Hybrid Busse (Verbrennungsmotor wandelt Diesel in Strom um und fährt elektrisch)
- 43 Parallel Hybrid Busse (Verbrennungsmotor wird vom Elektromotor unterstützt)

1 Elektrobus in Interlaken und 2 Elektrobusse für den Winterbetrieb in Saas Fee

In Planung für 2018

Jeweils 1 Elektrobus für Sarnen und Poschiavo

# Europäische Union

## Projekt CHIC -> (Clean Hydrogen in European Cities)



Die EU hat schon seit langer Zeit erkannt, dass die Mobilität und die fossilen Brennstoffe im Konflikt zu einander stehen und sich entschlossen eine neue Infrastruktur, ohne die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, aufzubauen.

Dazu werden verschiedene Projekte gefördert. PostAuto nimmt an einem dieser international beachteten Projekte teil. In diesem Rahmen testete PostAuto seit Ende 2011 bis Ende 2016 in Brugg (AG) fünf Brennstoffzellenbusse im Linienbetrieb.



# Wasserstoffmobilität im ÖV

## Auswahl verschiedener Brennstoffzellenbus – Projekte in Europa

### Ongoing EU-funded fuel cell bus projects

- CHIC** ●
- ✓ Bolzano, IT – 5 FC buses (2013)
  - ✓ Aargau, CH – 5 FC buses (2011)
  - ✓ London, UK – 8 FC buses (2011)
  - ✓ Milan, IT – 3 FC buses (2013)
  - ✓ Oslo, NO – 5 FC buses (2013)

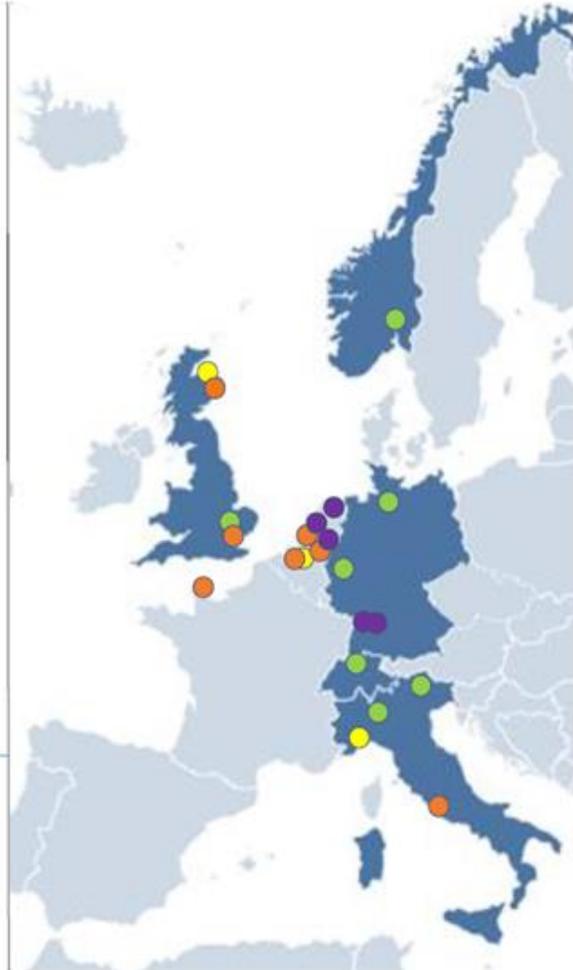
- ✓ Cologne, DE\* – 4 FC buses (2011/14)
- ✓ Hamburg, DE\* – 6 FC buses (2011/2015)

- High V.LO-City** ●
- ✓ Liguria, IT – 5 FC buses (2015)
  - ✓ Antwerp, BE – 5 FC buses (2015)
  - ✓ Aberdeen, UK – 4 FC buses (2015)

- HyTransit** ●
- ✓ Aberdeen, UK – 6 FC buses (2015)

### Legend

- CHIC countries
  - ✓ In operation
  - ✓ Planned operation
- (2015) Operation start/planned start  
\* Co-financed by regional/national funding sources



### Ongoing EU-funded fuel cell bus project

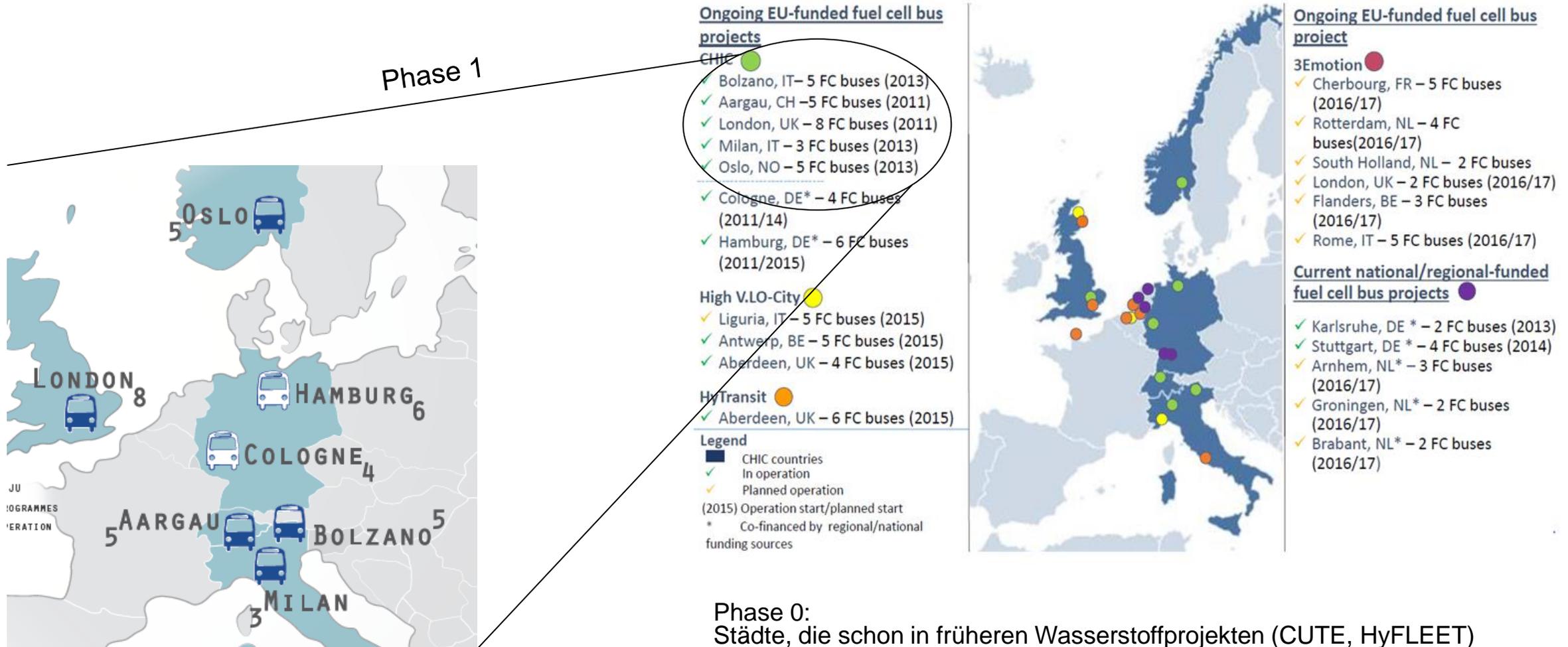
- 3Emotion** ●
- ✓ Cherbourg, FR – 5 FC buses (2016/17)
  - ✓ Rotterdam, NL – 4 FC buses (2016/17)
  - ✓ South Holland, NL – 2 FC buses (2016/17)
  - ✓ London, UK – 2 FC buses (2016/17)
  - ✓ Flanders, BE – 3 FC buses (2016/17)
  - ✓ Rome, IT – 5 FC buses (2016/17)

### Current national/regional-funded fuel cell bus projects

- ✓ Karlsruhe, DE\* – 2 FC buses (2013)
- ✓ Stuttgart, DE\* – 4 FC buses (2014)
- ✓ Arnhem, NL\* – 3 FC buses (2016/17)
- ✓ Groningen, NL\* – 2 FC buses (2016/17)
- ✓ Brabant, NL\* – 2 FC buses (2016/17)

# Projekt CHIC (Clean hydrogen in European Cities)

Im Rahmen des Projekts CHIC waren insgesamt 24 Brennstoffzellenbusse in Oslo, London, Bozen, Mailand und Brugg unterwegs.



**Phase 0:**  
Städte, die schon in früheren Wasserstoffprojekten (CUTE, HyFLEET) mitgemacht hatten (sogenannte Altmeister) wie Hamburg, Köln, Berlin, Whistler.

# Projekt CHIC

## Brennstoffzellenbusse der verschiedenen Teilnehmern (Phase 1 Städte)

### Brugg (Aarau)



5 Evo Busse  
(seit Dezember 2011)

1,3 Mio. Km

### Bolzano



5 Evo Busse  
(seit November 2013)

481'454 Km

### London



8 Wright Busse  
(seit Januar 2011)

1,3 Mio. Km

### Milano



3 Evo Busse  
(seit Oktober 2013)

178'396 Km

### Oslo



3 van Hool Busse  
(seit April 2013)

546'223 Km

# Brennstoffzellenpostauto

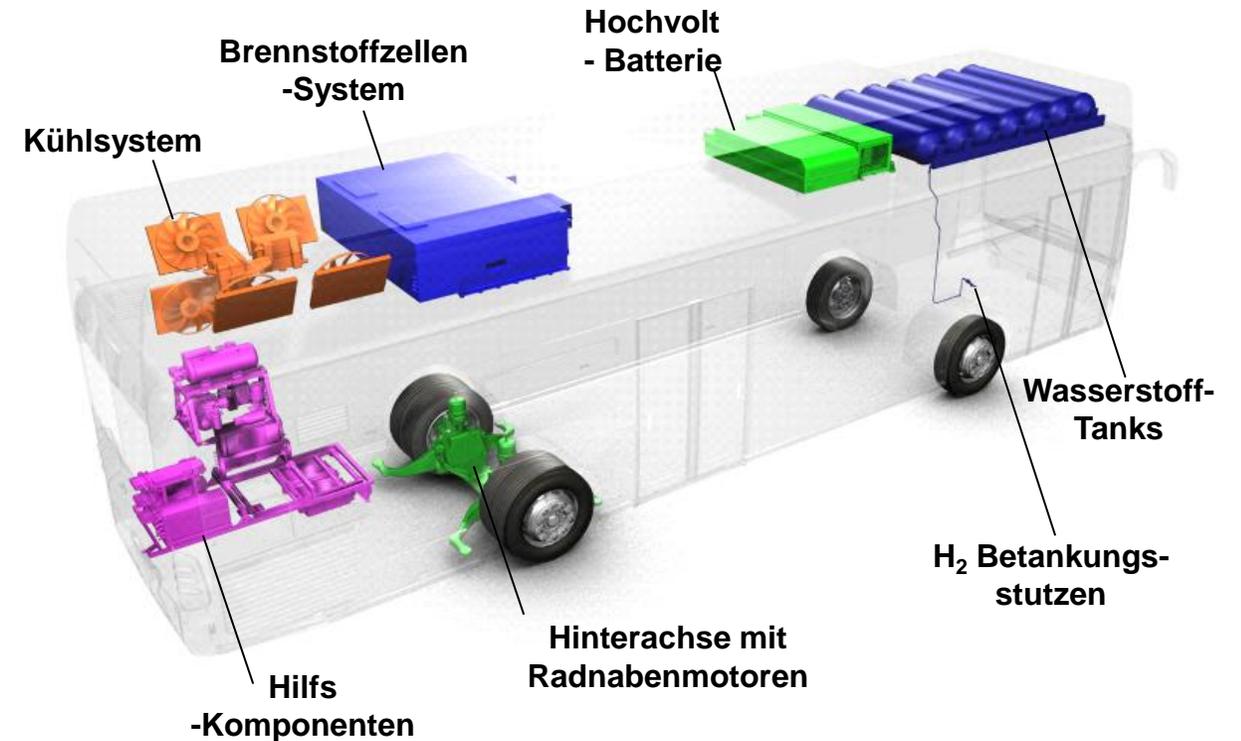
Technik



# Brennstoffzellen-Hybrid Mercedes Benz Citaro O 530

## Technische Informationen / Komponenten

Länge	11'950 mm
Breite	2'550 mm
Höhe inkl. Dachaufbauten	3'419 mm
Sitzplätze	27
Stehplätze	40
Zulässiges Gesamtgewicht	18'000 kg
Leergewicht	ca. 13'400 kg
Antriebsart	Serieller Hybrid mit Brennstoffzellentechnik
Radnabenmotoren	2 elektrische Asynchronmotoren, integriert in der Antriebsachse, 2 x 125kW entspricht 340 PS / 2 x 11'000 Nm Drehmoment
Hochvolt-Batterie	Lithium-Ionen, 700 Volt (180 kW bei 26.9 kWh)
Brennstoffzellensystem	2 identische Brennstoffzellen mit PEM (Proton Exchange Membrane)
Gesamtleistung	120 kW (Dauerbetrieb) / 140 kW (Spitze)



Technik Brennstoffzellenpostauto

Brennstoffzellenpostauto

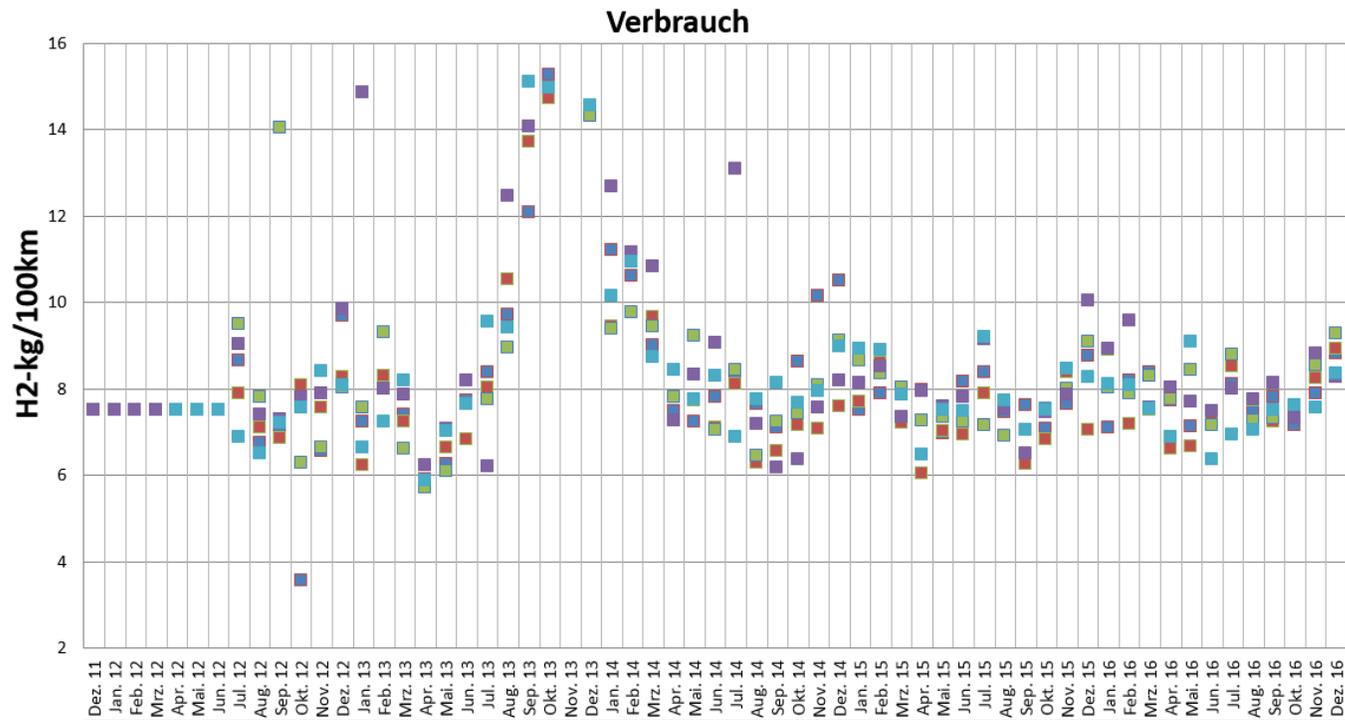
# Brennstoffzellenpostauto

5 Jahre unterwegs mit Wasserstoff



# Brennstoffzellenpostauto

## Verbrauch



## Vergleich zwischen den verschiedenen Antriebsarten

Erfahrungen bei PostAuto	Brennstoffzellen-Hybrid	Diesel-Hybrid		Diesel
	Seriell-Hybrid	Paralell-Hybrid	Seriell-Hybrid	
Wasserstoff (kg pro 100 km)	8	-	-	-
Entspricht kWh pro 100 km	312	299	359	399
Diesel (Liter pro 100 km)	30	28.5 ca. -25%	34.2 ca. -10%	38 Basis: 100%

Mit der Berücksichtigung des oberen Heizwertes (ca. 39 kWh/kg Wasserstoff) sowie dem eigentlichen Brennwert von 10.5 kWh/Liter Diesel kann der Verbrauch der Brennstoffzellenbusse in kWh und anschliessend in Liter Diesel umgerechnet werden.

Bei einer gefahrenen Gesamtkilometerleistung von 1'370'136 km haben alle 5 Brennstoffzellenfahrzeuge zusammen etwa **468'000** Liter Diesel eingespart. (Vgl. mit Seriell Hybrid)

# Brennstoffzellenpostauto

## Vermeidung CO<sub>2</sub>-Ausstoss (Berechnungen in Zusammenarbeit Paul-Scherrer Institut)

### CO<sub>2</sub> – Emissionen Dieselpostauto

	km Total	Verbrauch Diesel [l]	Diesel Emissionsfaktor [kg CO <sub>2</sub> /l Diesel]	Emission CO <sub>2</sub> [t]
Tank to Wheel	1'370'136	520'652	2.67	1'390
Well to Tank	1'370'136	520'652	0.51	266
Total				1'656

#### Tank to Wheel:

(z.B. entstehende lokale Emissionen / Wirkungsgrad)

#### Well to Tank:

(z.B. gesamte Kette der «Kraftstoffgewinnung» resp. Wasserstoffgewinnung bis zur Tankstation)

### CO<sub>2</sub> – Emissionen Brennstoffzellenpostauto

	km Total	CO <sub>2</sub> -Emission durch Elektrolyse sowie Stromverbrauch für Einstellhalle [t]	CO <sub>2</sub> -Ausstoss durch Anlieferung des Wasserstoffs auf Trailer [t]	Emission CO <sub>2</sub> [t]
Tank to Wheel	1'370'136	0	0	0
Well to Tank	1'370'136	42.9	73	116
Total				116

CO<sub>2</sub> – Emissionen des bei der Fa. Cabb

hergestellten Wasserstoffes = 68 t

(Bezogene Menge Wasserstoff 12.8 t und CO<sub>2</sub> Gehalt Wasserstoff = 5.3 kgCO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>)

Grundlage 10% Stromanteil aus D-Strom Herstellmix von 530 gCO<sub>2</sub>/kWh)

CO<sub>2</sub> – Emissionen des angelieferten Wasserstoffes mittels Trailer = 5 t

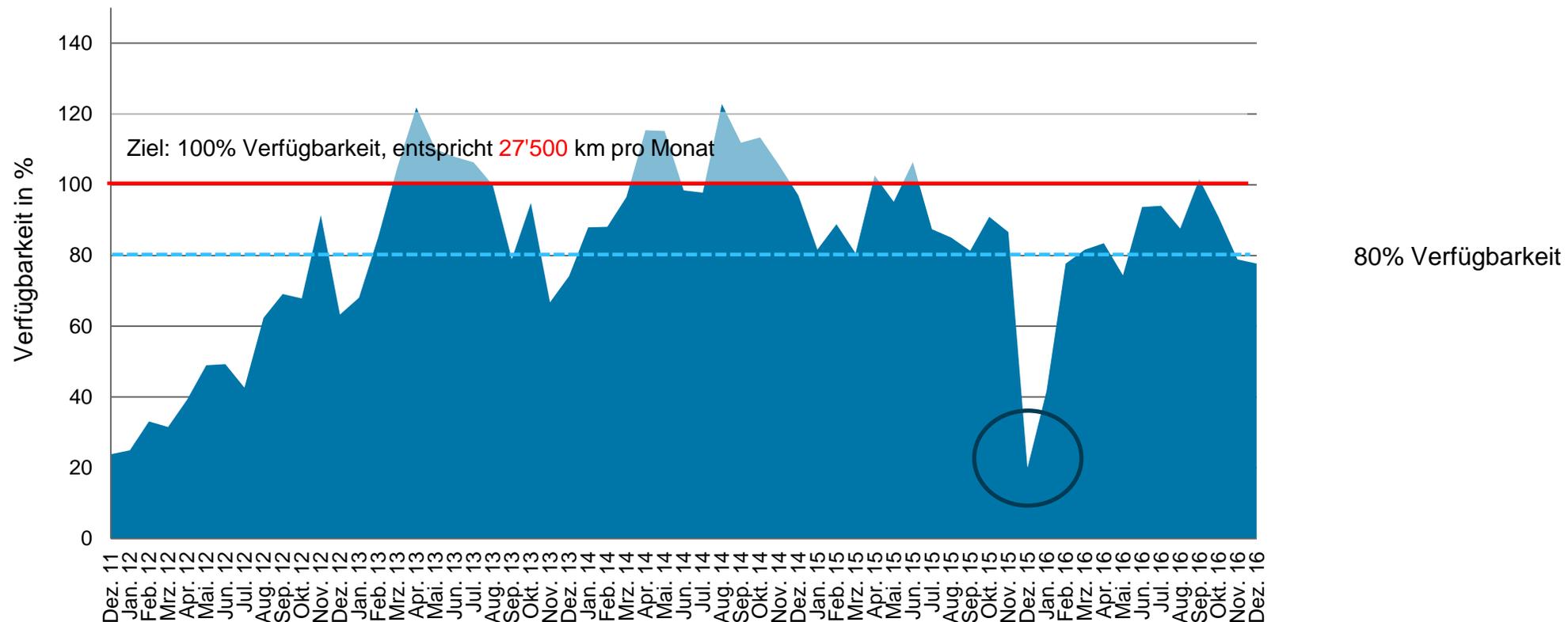
(Gefahrene Strecke 4888 km zu 47 Fahrten mit 32l/100 km Verbrauch inkl. Umrechnungsfaktor TtW und WtT 3.18 kgCO<sub>2</sub>/Liter Diesel)

CO<sub>2</sub> – Gehalt des verwendeten Stroms zur Herstellung Wasserstoff mittels Elektrolyse vor Ort in Brugg und Stromverbrauch Einstellhalle = 42.9 t

(Stromverbrauch Elektrolyse 6.53 GWh, Anteil 5.1 gCO<sub>2</sub>/kWh mittels Ökostrom und Stromverbrauch für die Einstellhalle 0.103 GWh gem. CH-Strom Verbrauchsmix von 93gCO<sub>2</sub>/kWh)

# Brennstoffzellenpostauto

## Verfügbarkeit



**Kompressor 1** – Totalausfall April 2015

**Kompressor 2** – Riss im Zylinderkopf Nov./Dez. 2015, anschliessend konstanter Betrieb mit gleichbleibendem hohen Wartungsaufwand

93% Verfügbarkeit

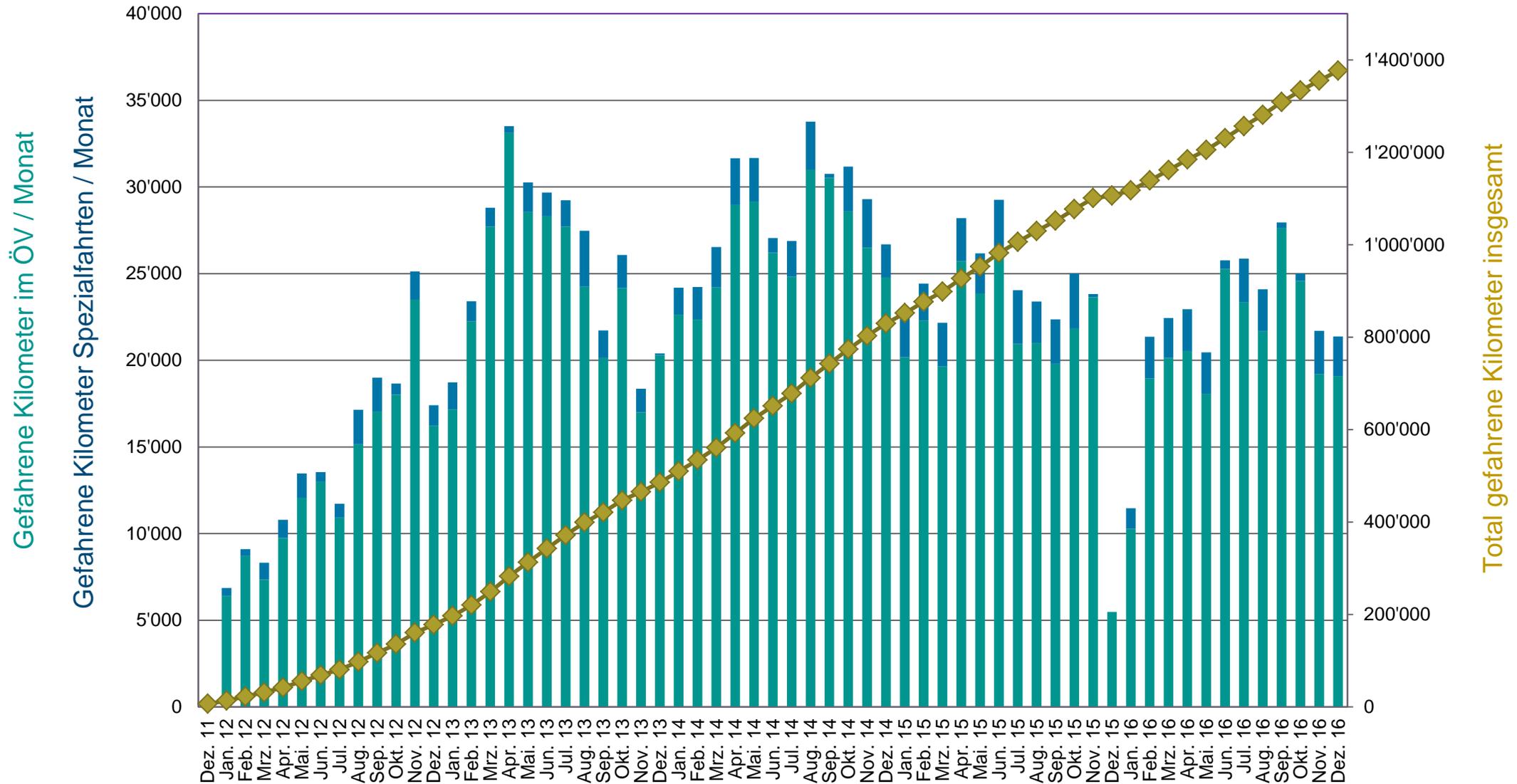
# Brennstoffzellenpostauto

## Internationaler Vergleich

Project Goals concerning FC buses (as per DOW)		Overall Project status (Phase 0 & Phase 1)	Phase 0 Cities					Phase 1 Cities					
			Berlin	Cologne	Cologne	Hamburg	Whistler	Overall Phase 1	Aargau	Bolzano	London	Milan	Oslo
			12m	18m	13m	12m	12,5m		12m	12m	12m	12m	13,2m
			ICE-Bus	FC-Bus	FC-Bus	FC-Bus	FC-Bus		FC-Bus	FC-Bus	FC-Bus	FC-Bus	FC-Bus
FC lifetime per bus [h]	> 6.000	6,820		2,052	5,331	4,759	9,178	6,690	5,063	6,186	12,214	4,721	4,180
No of Stacks beyond Goal		56		-	-	5	22	29	9	9	9	2	-
Availability [%]	> 85	69%	92%	39%	83%	59%	67%	70%	81%	89%	67%	66%	47%
Fuel consumption [kg/100 km]	< 13	12.1	22.8	16.5	13.7	8.7	14.9	9.9	7.9	8.7	9.8	10.4	13.2
Project total running distance [Mio. km]	> 2.75	9.6	0.9	0.1	0.1	0.5	4.0	4.0	1.3	0.6	1.4	0.2	0.6
Project total hours of operation [thousands h]	> 160	519		6.1	10.1	32.0	201.9	269.4	60.2	33.5	133.6	17.4	24.7

# Brennstoffzellenpostauto

Insgesamt gefahrene Kilometer (Dezember 2011 bis Dezember 2016)



# Brennstoffzellenpostauto

Einige Kennzahlen Dezember 2011 - Dezember 2016

Mehr als 60'000  
Betriebsstunden  
(pro Fzg über 12'000  
Std / Ziel 6'000 Std)

Mehr als 7'700  
Betankungen

Mehr als 1'370'000  
gefahrne Kilometer  
(pro Fzg über 270'00km)



110'000 kg getankter  
Wasserstoff in Brugg

Durchschnittliche  
Reichweite / Fzg mehr  
als 600 km



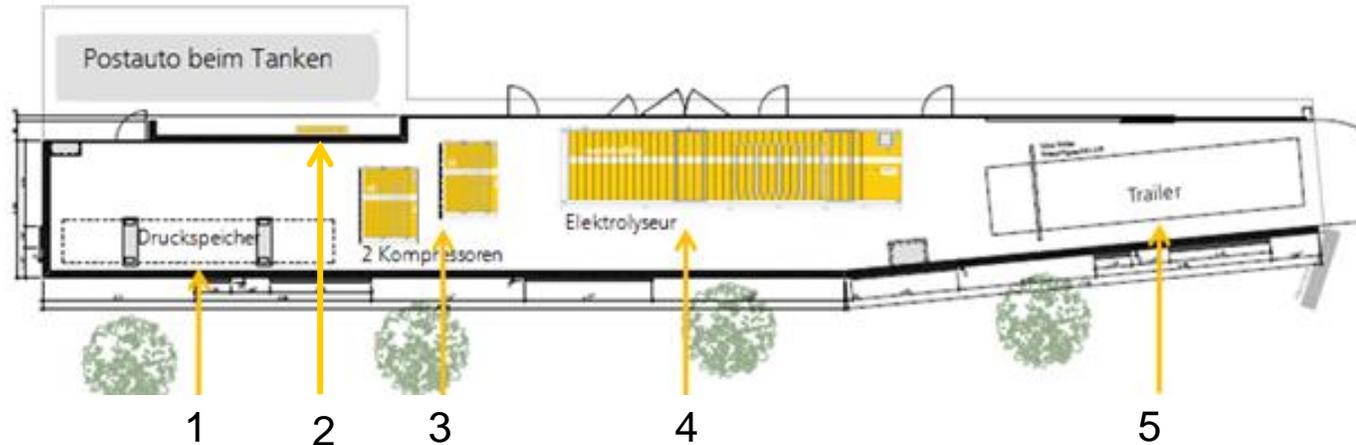
# Wasserstofftankstelle

4 Jahre eigene Wasserstoffproduktion



# Wasserstofftankstelle

## Skizze Wasserstofftankstelle / Komponenten



Pos	Komponente	Techn. Daten
1	1 Hochdruckspeicher	Pufferinhalt ca. 12'360 Liter Druck nach Füllung 410 bar Gasinhalt gefüllt 5000Nm <sup>3</sup>
2	1 Zapfsäule	Betankung mit 350bar (Betankungszeit ca. 10 min)
3	2 Kompressoren	Membran – Kompressoren 60Nm <sup>3</sup> /h bei 10 bar
4	1 Elektrolyseur	60Nm <sup>3</sup> /h -> aus Wasser und Strom wird Wasserstoff produziert
5	1 Trailer	Fassungsvermögen ca. 3600Nm <sup>3</sup> Fülldruck 200 bar

# Wasserstofftankstelle

## Produktion vor Ort mittels Elektrolyse



Betriebsdauer Elektrolyse 01.05.2012 bis 31.12.2016

-> Produzierte Menge Wasserstoff ca. 96'000kg

Der Elektrolyseur spaltet Leitungswasser mittels Strom in Wasserstoff und Sauerstoff



# Wasserstofftankstelle

## Anlieferung von Wasserstoff per Trailer

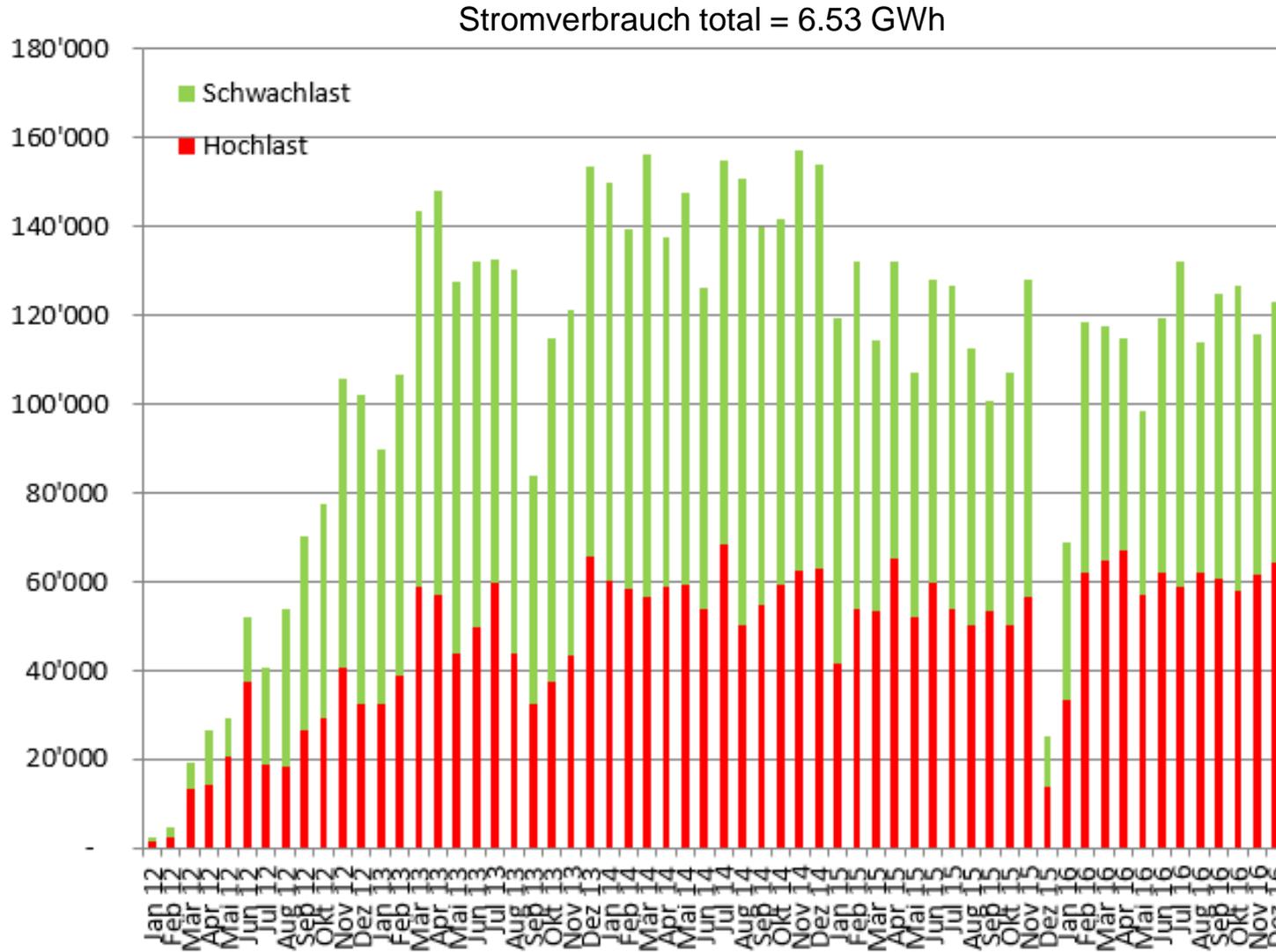
Zur Sicherstellung einer uneingeschränkten H<sub>2</sub>-Versorgung der Busse auch bei Betriebsstillstand der Elektrolyse sowie für die sekundäre Versorgung der H<sub>2</sub>-Tankstelle (d.h. für die Differenzmenge zwischen On-Site-Produktionskapazität und tatsächlichem Bedarf) erfolgte die Zuführung von H<sub>2</sub> aus einer externen Quelle mittels eines H<sub>2</sub>-Trailers

Angelieferte Menge Wasserstoff ca. 14'000 kg



# Wasserstofftankstelle

## Stromverbrauch Wasserstofftankstelle



Bsp:  
 Stromverbrauch EFH mit 3 oder mehr  
 Personen in der Schweiz ca. 7550  
 kWh

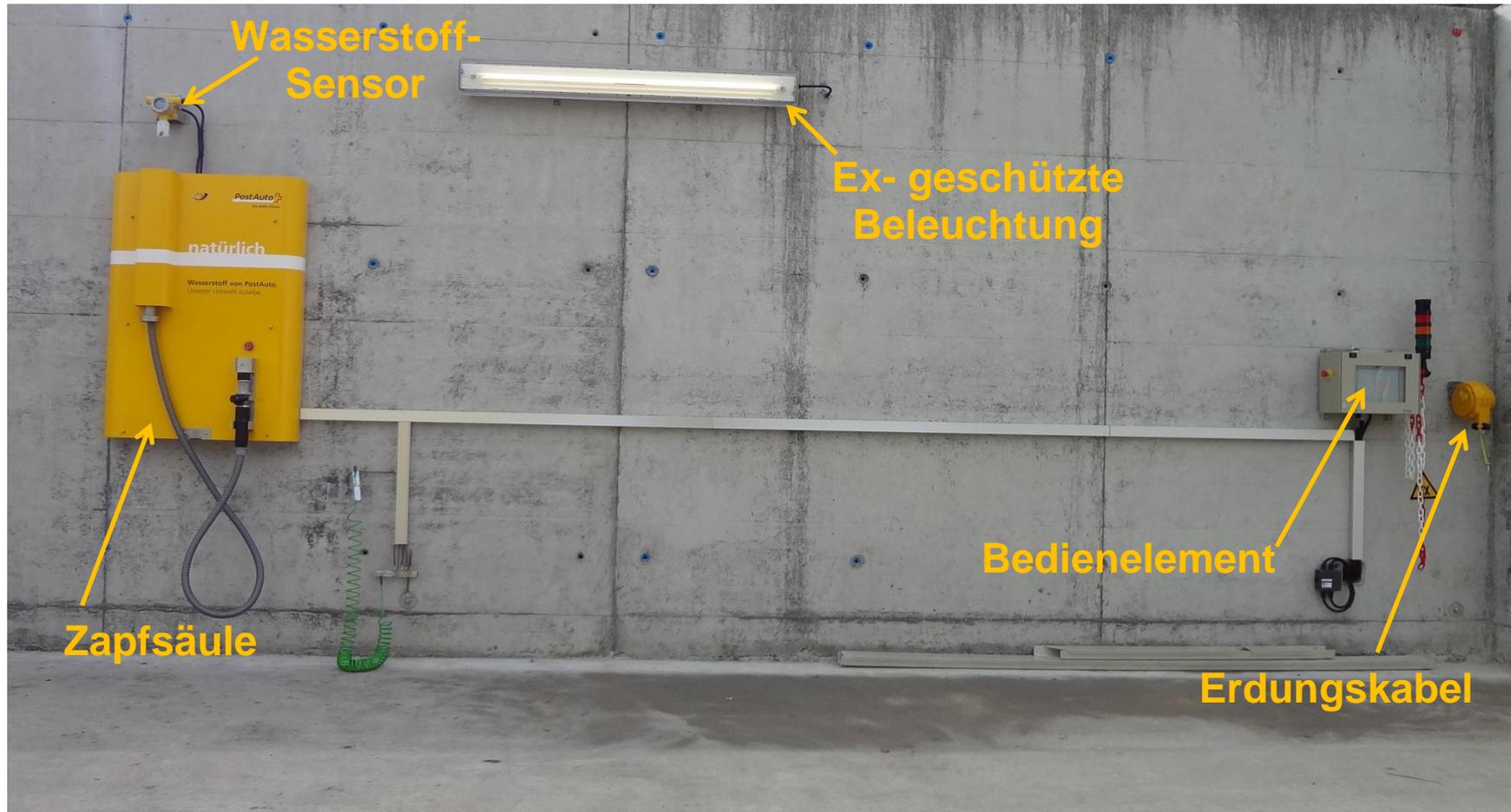
$6.53 \text{ GWh} / 7550 \text{ kWh} = 864 \text{ EFH}$   
 -> bei 5000 kWh = 1305 EFH



Wasser 95%  
 Photovoltaik 2 %  
 Biomasse 2%  
 Windkraft 1%

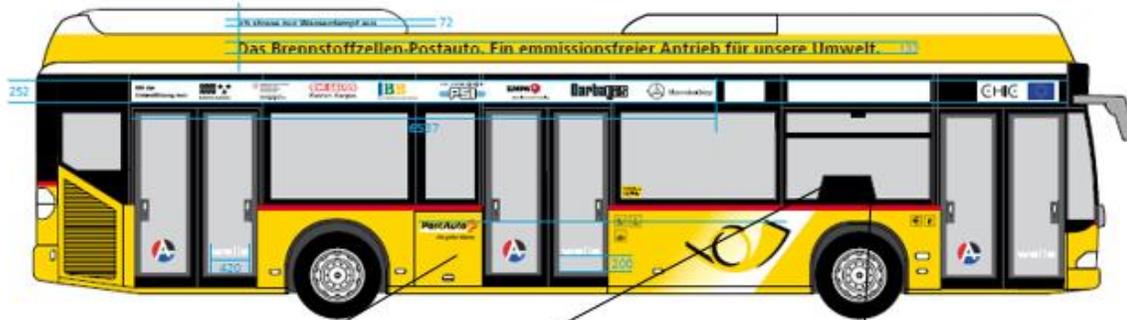
# Wasserstofftankstelle

## Tankstation



# Wasserstofftankstelle

## Betankung Brennstoffzellenpostauto



### Betankungsreihenfolge



# Wasserstofftankstelle

## Zusammenfassung

### Produktion vor Ort

PostAuto hat etwa 88% des Wasserstoffs mittels Elektrolyse vor Ort produziert, das entspricht etwa 96 Tonnen H<sub>2</sub>.

### Betankung

Die Betankung eines Fahrzeugs funktionierte durch Überströmen dank unterschiedlichen Druckverhältnissen. Das lässt sich mit der Betankung eines Gasfahrzeuges vergleichen und dauerte etwa 10 Minuten pro Fahrzeug.

### Herausforderungen

Die Tankstelle erwies sich als wartungsintensiv. Das betraf insbesondere die Kompressoren der Anlage.

### Erfahrung

Aufgrund der gemachten Erfahrungen empfiehlt PostAuto, den Wasserstoff als Massenware einzukaufen und nicht vor Ort zu produzieren.



# Projekt Wasserstoffmobilität

## Fazit



# Projekt Wasserstoffmobilität

## Fazit

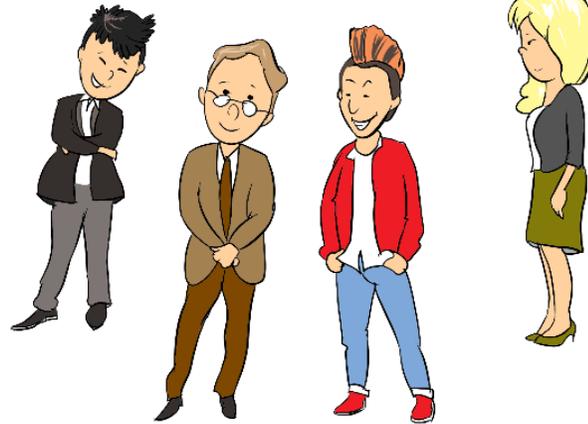


Interesse an der Technologie

Gut temperierter Innenraum

Ruhige und ruckfreie Fahrt

Umweltfreundlichkeit



# Projekt Wasserstoffmobilität

## Fazit

Das Fazit fällt positiv aus, PostAuto konnte seine Ziele erreichen:

- ✓ Bau und Betrieb der ersten grösseren Wasserstofftankstelle in der Schweiz
- ✓ Betrieb der ersten Brennstoffzellenbusse in der Schweiz
- ✓ Erhalt von wissenschaftlichen Messreihen in Bezug auf die Effizienz und Effektivität der Brennstoffzellen und des Wasserstoffeinsatzes

PostAuto würde mit einer Verlängerung des Projekts aber keine neuen Erkenntnisse gewinnen.

### Fahrzeuge

- Hohe Verfügbarkeit, im Betrieb bewährt
- Wartungskosten sind hoch
- Ersatzteilbeschaffung längerfristig nicht gewährleistet, weil Fahrzeuge Prototypen sind.
- Serienmodell in 2-3 Jahren verfügbar

### Tankstelle

- Betankung der Fahrzeuge war problemlos (ca. 10 Min.)
- Kompressoren als wartungsintensive Elemente der Anlage
- Platzbedarf der Tankstelle (wegen Produktionsanteil) ist hoch



# Projekt Wasserstoffmobilität

## Fazit

### Wirtschaftlichkeit

Kosten (Beschaffung und Betrieb) sind deutlich höher als bei konventionellen Dieselfahrzeugen. Es besteht die Hoffnung, dass Bewegung in den Markt kommt, die sich positiv auf die Preise auswirkt.

Gesamtprojektkosten : 18 Millionen Franken

Fahrzeuge : 1,8 Mio. Euro / Fahrzeug  
(inkl. 600'000 Euro für 5 jährigen Wartungsvertrag)

Betriebskosten : Mit bestehenden H2-Postautos etwa  
dreimal so hoch wie bei neuem Dieselfahrzeug



Am Projekt beteiligte Partner  
mit finanzieller Unterstützung.



# Projekt Wasserstoffmobilität

Impressionen Rückbau Areal



# Projekt Wasserstoffmobilität

## Impressionen Rückbau Tankstelle



# Projekt Wasserstoffmobilität

## Impressionen Rückbau Tankstelle

Stand Oktober 2017

