

# Wasserstoffherzeugung: Erfahrungen aus dem CUTE-Projekt

Kernaufgabe des CUTE-Projekts (Clean Urban Transport for Europe) war es, die Zuverlässigkeit von Brennstoffzellenbussen und ihren Versorgungs-Infrastrukturen im Alltag (Linienbetrieb) zu demonstrieren. Zwei Jahre lang waren 27 Busse in neun Großstädten zwischen Stockholm und Porto im Einsatz. Dies bot ein weites Spektrum an Betriebsbedingungen.

Jeder Standort besaß eine Wasserstoff-Tankstelle (350 bar Nenndruck), die meisten zusätzlich eine Anlage zur Produktion von Wasserstoff mittels Erdgasreformierung bzw. Elektrolyse. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Infrastruktur-Systemen waren erheblich. Es gab keine identischen Anlagen.

Während der jeweils zwei Betriebsjahren haben die Busse über 4 Millionen Passagiere befördert

und rund 840.000 Kilometer zurückgelegt, mehr als einmal zum Mond und zurück. Über 192 Tonnen Wasserstoff wurden an die Fahrzeuge abgegeben in mehr als 8.900 Betankungsvorgängen. Rund 121 Tonnen wurden vor Ort erzeugt, davon etwa zwei Drittel mittels Elektrolyse.

Die Europäische Union hat CUTE aus ihrem Fünften Rahmenprogramm für Forschung und technologische Entwicklung unterstützt.

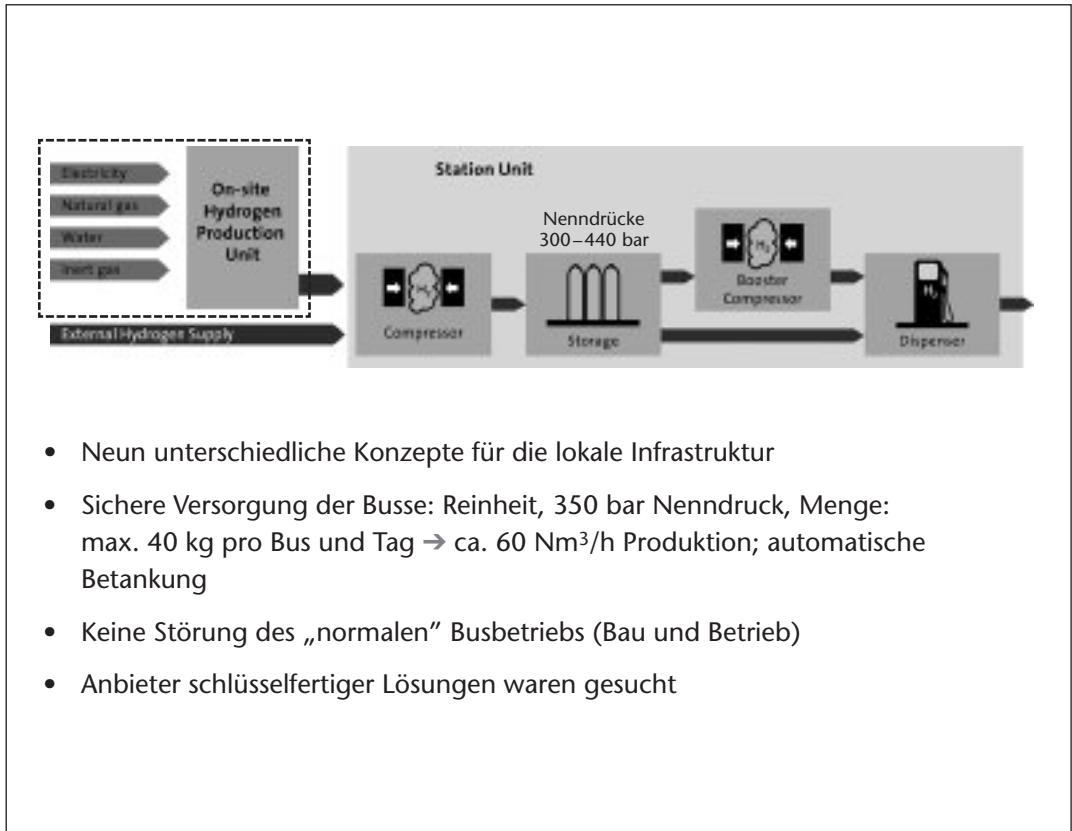
Der Vortrag bietet zunächst einen Überblick über die Infrastrukturen und die an sie gestellten Anforderungen und geht dann auf die Erfahrungen mit den Elektrolyseuren, Reformern und Tankstellen ein. Die Anlagen werden beispielhaft anhand der Indikatoren Verfügbarkeit, Ursachen für Ausfallzeiten, Energiebedarf und Wasserstoff-Verluste bewertet.

K. Stolzenburg  
PLANET GbR  
k.stolzenburg@  
planet-energie.de

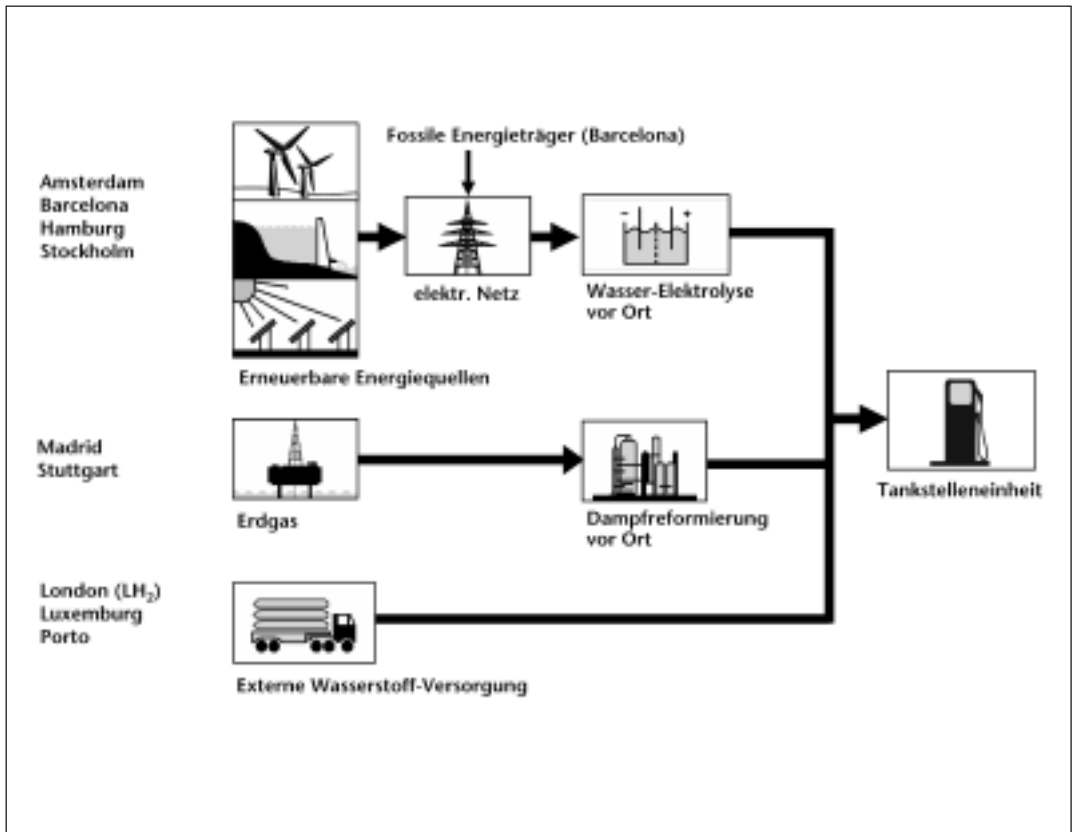
*CUTE – Clean Urban  
Transport for Europe*

- Zuverlässigkeit der Brennstoffzellen-Busse und ihrer Versorgungs-Infrastrukturen im Alltag zeigen (Linienbetrieb)
- Neun Standorte zwischen Stockholm und Porto → breites Spektrum von Betriebsbedingungen
- Planungs- und Bauphase: November 2001 bis Mai/Dezember 2003  
Betriebsphase: 2 Jahre pro Stadt
- Umfassender Projektansatz: Aktivitäten auch in der Bereichen Bildung und Ausbildung, Umweltbilanzierung, Kostenmodelle für die Zukunft, ...

Infrastrukturen:  
Systeme und  
Anforderungen



Pfade der Wasserstoff-  
Bereitstellung



Insgesamt haben die Wasserstoff-Infrastrukturen zufrieden stellende bis gute Leistungen gezeigt. Die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse erfolgte im Allgemeinen zuverlässig. Die Erdgas-Reformer konnten die an sie gestellten Erwartungen nicht bzw. nur eingeschränkt erfüllen. Bei den Tankstellen zeigten sich die Kompressoren als kritischster Baustein im Blick auf Ausfallzeiten und deren Ursache. Auch die Komponenten, mit denen die Nutzer in Berührung kommen, müssen in Zukunft verbessert werden, vor allem Füllkupplungen und Schläuche. Der Energiebedarf zur Bereitstellung des Kraftstoffs und die Verluste von Wasserstoff waren teilweise überraschend hoch.

Die Leitfragen und Indikatoren des „CUTE Assessment Framework“ haben sich als tragfähig zum Vergleich der sehr unterschiedlichen Anlagen erwiesen.

Insgesamt bestehen große Potenziale zur Optimierung der Versorgungssysteme, sei es durch Standardisierung von Anforderungen und Schnittstellen, verbesserte Systemintegration entlang der Kette zur Kraftstoffbereitstellung oder Anpassung von Komponenten an häufige Start-Stopp-Zyklen.

Für die Zukunft sind „Flottentests“ mit Wasserstoff-Tankstellen wünschenswert, d. h. der Einsatz identischer oder zumindest sehr ähnlicher Anlagen unter verschiedenen Betriebsbedingungen, wie es in CUTE für die Busse realisiert wurde.

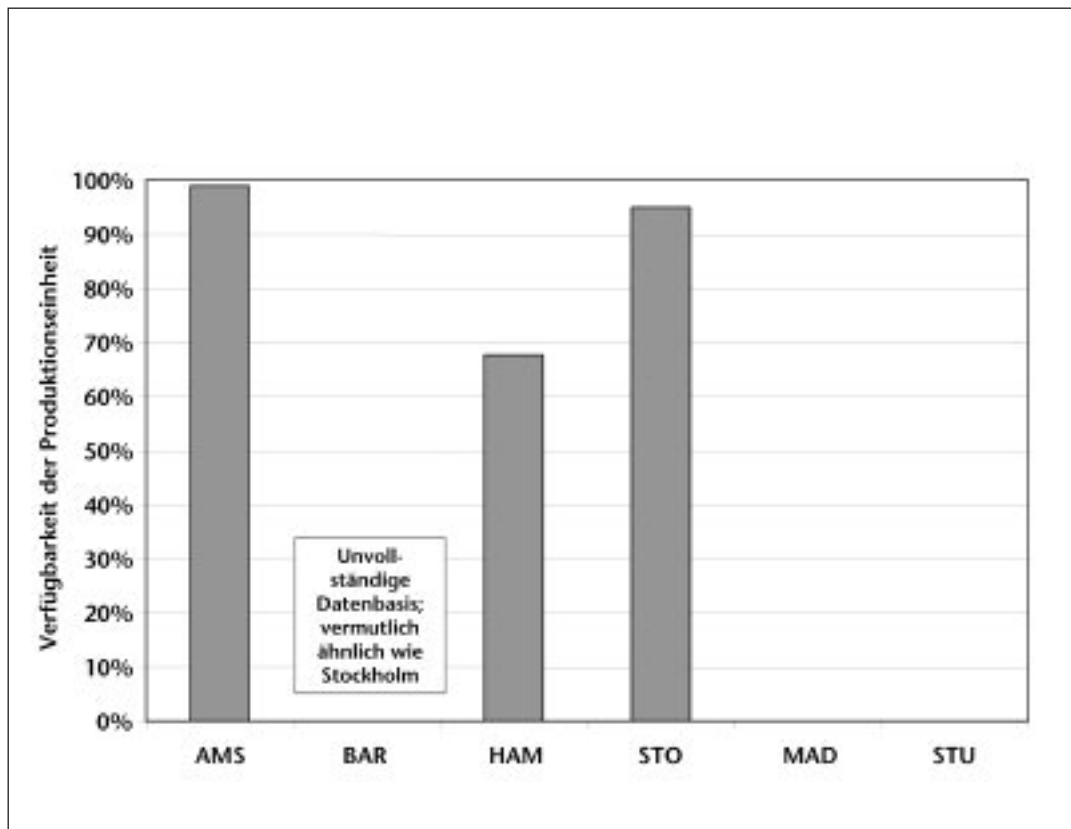
- Leitfragen, zum Beispiel:
  - Was waren die wesentlichen Probleme und Erfahrungen während der Planung, der Realisierung und des **Betriebs** der Wasserstoff-Infrastrukturen?
  
- Indikatoren unter anderem:
  - Verfügbarkeit der **Produktionseinheit** und der Tankstelleneinheit (bestimmt über die Zeiträume, in denen das System nicht in Betrieb bzw. nicht betriebsbereit war)
  - Ursachen für Ausfallzeiten
  - Energiebedarf, z. B. für die Wasserstoff-Erzeugung vor Ort
  - Wasserstoff-Verluste

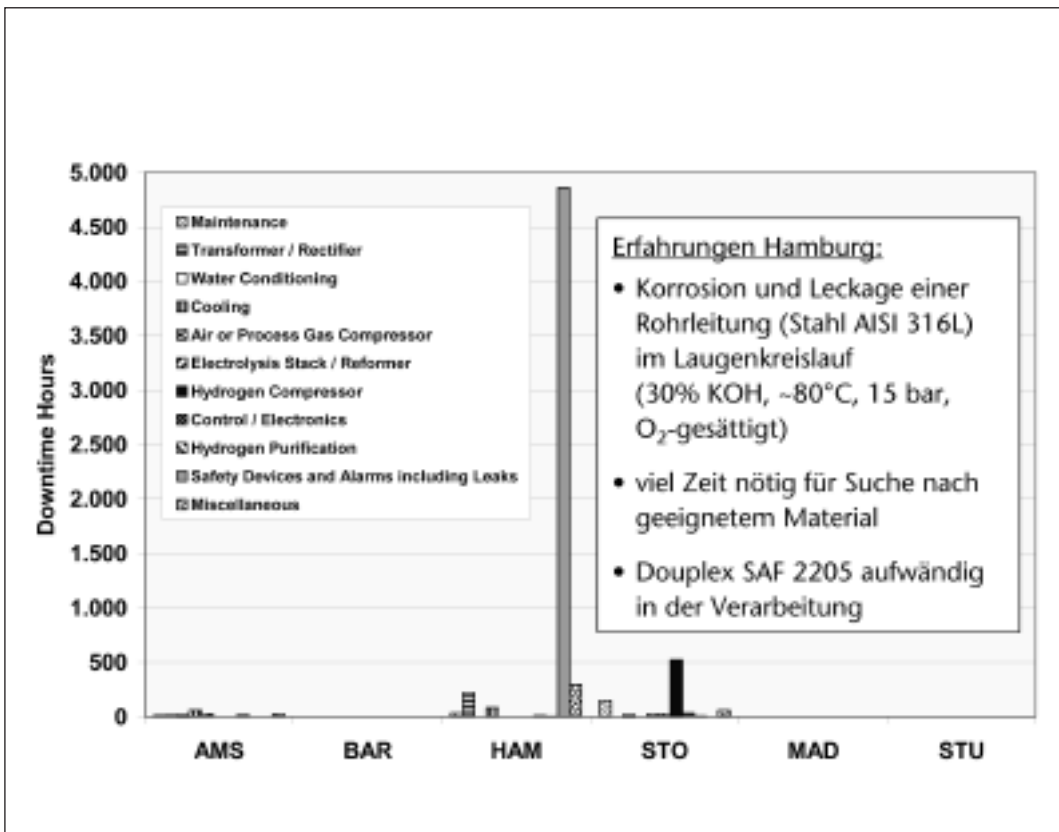
*Bewertung:  
CUTE Assessment  
Framework*

Eckdaten  
Elektrolyse-Einheiten

	Amsterdam	Barcelona	Hamburg	Stockholm
Production range [Nm <sup>3</sup> /h]	15 – 60	15 - 60	30 – 60	15 - 60
Installed power [kW]	400	400	390	400
Power source	green	grid mix (+ PV on site)	green	green
Rated energy demand (stack+pumps) [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	4,8 +/- 0,1			
Resulting efficiency <sup>4</sup>	63%			
Additional external hydrogen supply	no	backup	backup	no

Indikator:  
Verfügbarkeiten  
Elektrolyse-Einheiten



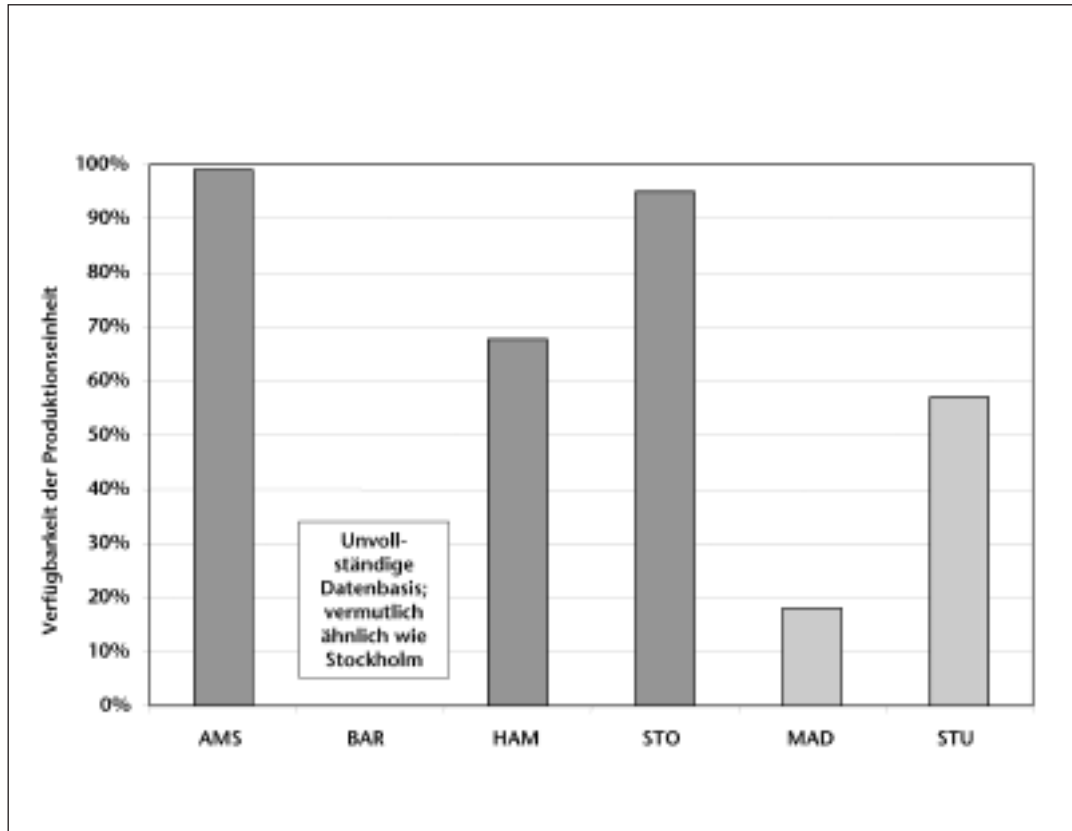


Indikator:  
Ursachen für  
Ausfallzeiten  
Elektrolyse

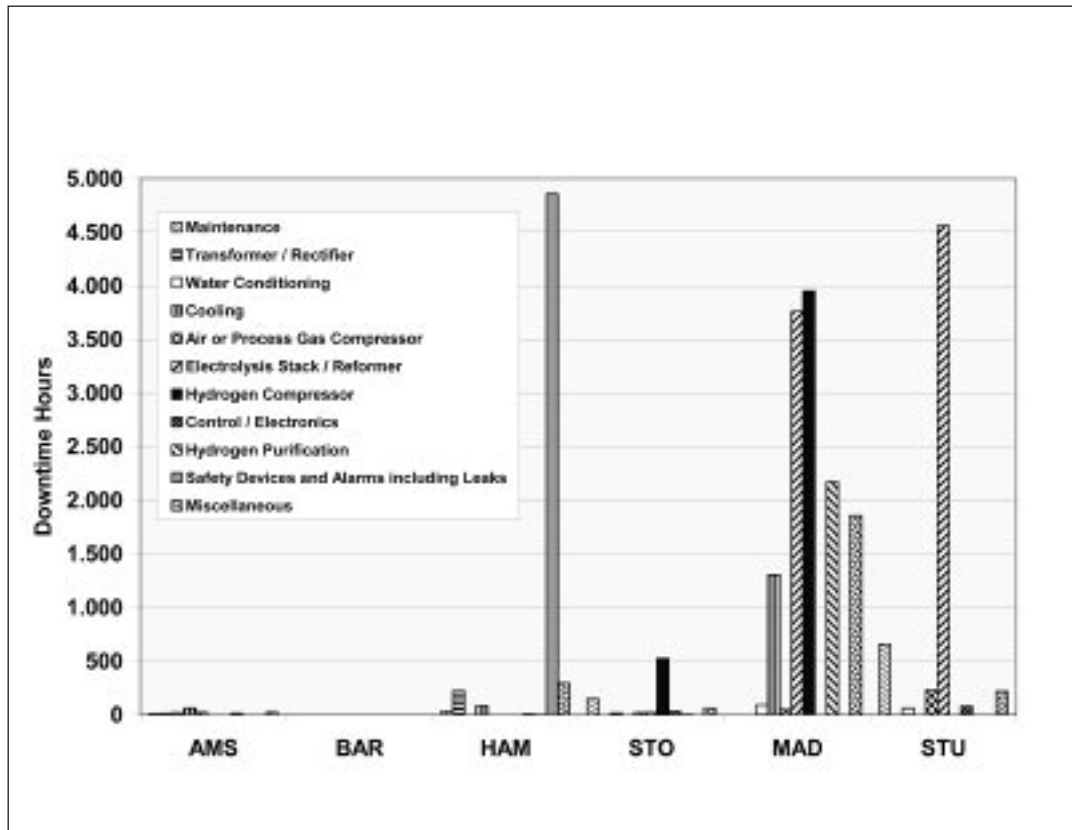
	Madrid	Stuttgart
Production range [Nm <sup>3</sup> /h]	30 – 50	50 – 100
Installed thermal power (natural gas) [kW]	ca. 280 kW	ca. 500 kW
Gas source	grid mix	grid mix
Rated thermal energy demand <sup>†</sup> [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	4,86	4,65
Resulting thermal efficiency <sup>†</sup>	62%	65%
Installed auxiliary electrical power [kW]	45	89
Power source	grid mix	grid mix
Additional external hydrogen supply	regular	backup

Eckdaten  
Reformer-Einheiten

Indikator:  
Verfügbarkeit  
Reformer-Einheiten



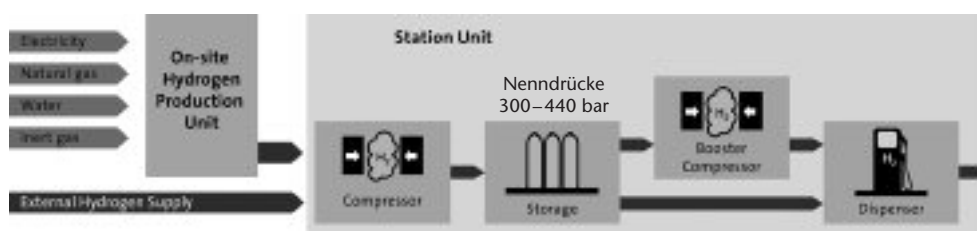
Indikator: Ursachen  
für Ausfallzeiten  
Reformer



*Erfahrungen  
Reformer-Einheiten*

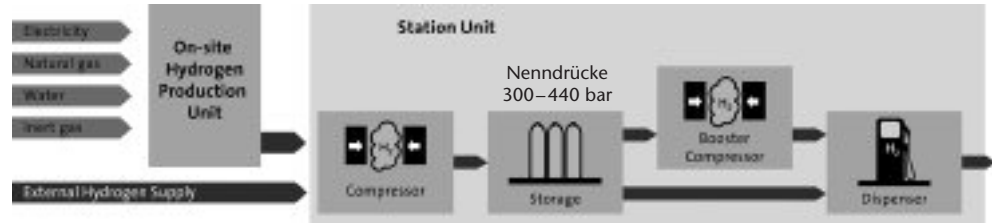
- Stuttgart: Temperaturen im Reformer höher als berechnet  
→ Materialproblem (Risse, Konstruktion beschädigt)
- Madrid: Serie von Problemen (Reformer, Kompressor, ...)
- Start-Stop-Zyklen schwieriger als erwartet  
→ Dauerbetrieb (Teillast), auch wenn Speicher voll  
→ Wasserstoff-Verlust
- Thermischer Wirkungsgrad im Teillastbetrieb:  
Madrid: Nennwert 62% → 39% Teillast  
Stuttgart: Nennwert 65% → 42% Teillast

*Tankstelleneinheiten:  
Erfahrungen 1*



- knapp 50 % der Stillstandszeiten verursacht durch die Wasserstoff-Kompressoren
  - Ausfall
  - Verunreinigung des Wasserstoffs

Tankstelleneinheiten:  
Erfahrungen 2



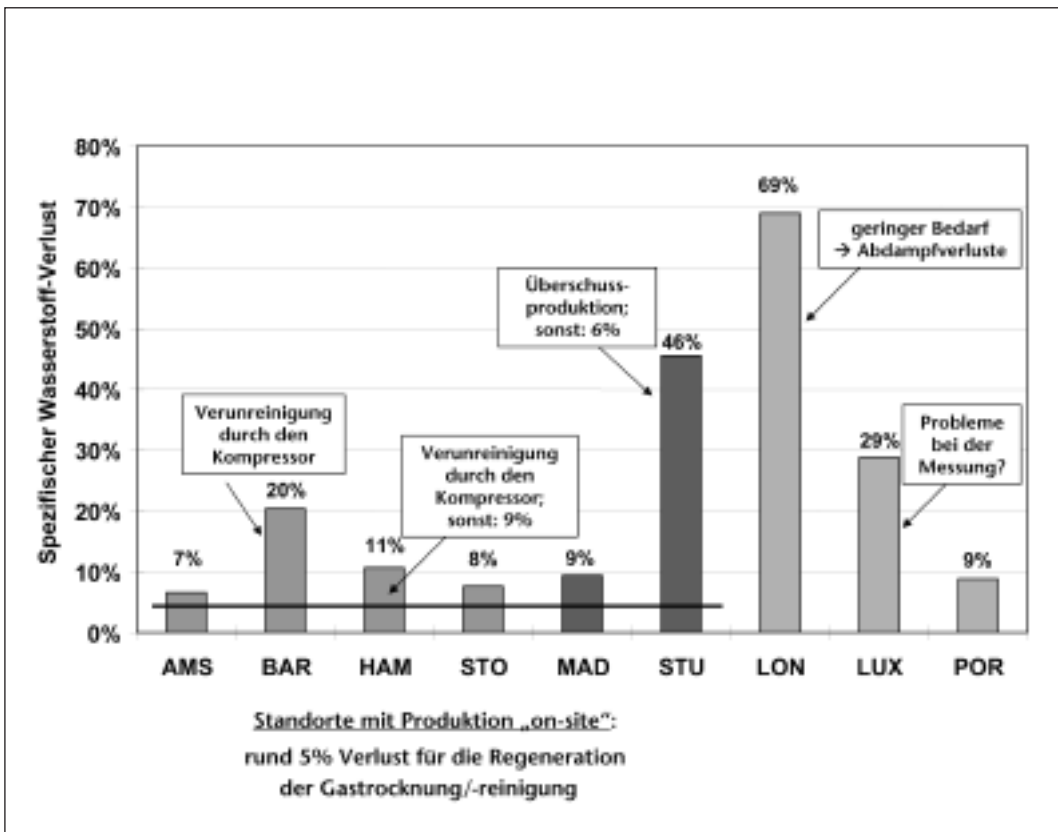
- rund 20 % der Stillstandszeit verursacht durch die Zapfsäulen („user interface“ = Füllkupplung, Schläuche, Abreißkupplung)
  - technische Probleme
  - Sicherheitsbedenken
- Lösungen durch die Arbeit einer „Task Force for Safety and Security“ (insbesondere durch intensive Kommunikation)

Betriebsergebnisse

- 841.123 km zurückgelegt, mehr als 4 Millionen Passagiere
- Tankvorgänge mit 350 bar Nenndruck sind Alltag geworden:
  - mehr als 8.900 Betankungen
  - mit mehr als 192 t Wasserstoff
- 121 t Wasserstoff vor Ort erzeugt
  - 78,5 t aus Elektrolyse
  - 42,5 t aus Reformierung
  - davon als 56 % auf der Basis erneuerbarer Energiequellen
- 153,5 t Wasserstoff per LkW angeliefert



Wasserstoff-Verluste



Zusammenfassung

- Leistungen der Wasserstoff-Infrastrukturen insgesamt zufriedenstellend bis gut
  - Elektrolyseure: zuverlässig
  - Reformier: Erwartungen nicht erfüllt
  - Tankstellen: Kompressoren kritischste Komponenten
  - Verbesserung der Füllkupplung etc. (user interface) nötig
- Wasserstoff-Verluste und Energiebedarf zum Teil sehr hoch
- Indikatoren tragfähig für Leistungsvergleiche zwischen unterschiedlichen Versorgungssystemen
- Dokumentation zu CUTE: [www.fuel-cell-bus-club.com](http://www.fuel-cell-bus-club.com)

*Ausblick*

- Drittes Betriebsjahr der meisten Standorte in HyFLEET:CUTE
  - [www.global-hydrogen-bus-platform.com](http://www.global-hydrogen-bus-platform.com)
- „Flottentests“ von Tankstellen wünschenswert
- Potentiale zur Optimierung:
  - Standardisierung von Anforderungen und Schnittstellen
  - Verbesserte Systemintegration entlang der Kette Erzeugung – Verdichtung – Speicherung – Betankung
  - Anpassung an häufige Start-Stop-Zyklen
  - ...