

Speicheroptionen für Wasserstoff

Klaus Stolzenburg



**Ingenieurbüro für Energie- und Versorgungstechnik
Donnerschweer Straße 89/91, 26123 Oldenburg
k.stolzenburg@planet-energie.de**



Ingenieurbüro für Energie- und Versorgungstechnik

Projekte zu Wasserstoff als Energieträger seit 1997

- **techno-ökonomische Analysen und Hardware-Projekte zur Versorgung mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien**
- **Demonstration von Brennstoffzellen-Fahrzeugen und Wasserstoff-Tankstellen**
 - **Auswertung von Betriebsdaten → Technologiewalidierung**
 - **Sammlung und Dokumentation von Erfahrungen, Problemen und Lösungen**
- **effiziente Verflüssigung von Wasserstoff**
- **Betriebshöfe für Brennstoffzellenbusse**
- ...



Foto: PLANET

Wasserstoff

- ... besitzt eine hohe gravimetrische Energiedichte: 1 kg H₂ so viel wie ca. 3 kg Diesel
[bezogen auf den Heizwert = in mechanische Energie wandelbarer Anteil]
 - ... bildet als H₂ das leichteste aller Moleküle: bei atmosphärischen Druck wiegt 1 m³ ca. 90 g
 - ... besitzt daher eine geringe volumetrische Energiedichte:
bei atmosphärischen Druck: **ca. 0,003 kWh/Liter, Diesel: ca. 10 kWh/Liter** (Faktor > 3.000)
[Temperaturabhängigkeit unberücksichtigt]
 - Kompression erhöht die volumetrische Energiedichte
 - jedoch: Druckbehälter sind schwer → Verlust des gravimetrischen Vorteils
- Gibt es Alternativen?

Ziel des Vortrags: Überblick geben, keine umfassende Behandlung der Thematik

Speicheroptionen zur stationären Lagerung und zum Transport

- „Druckwasserstoff“
gasförmig (GH_2) unter Druck (auch CGH_2 abgekürzt)
- „Flüssigwasserstoff“
verflüssigt (LH_2), tiefkalt (-253°C), knapp über absolutem Nullpunkt
- LOHC / Liquid Organic Hydrogen Carrier
temporäre chemische Bindung an eine organische Flüssigkeit
- [Metallhydridspeicher / temporäre Einlagerung in ein Metallgitter
hohes Gewicht → Einsatz in U-Booten, eventuell für stationäre Speicherung]

Anwendungsbeispiel: Portalhubwagen

- **Annahme:**
10 bis 15 Einheiten mit PEM-Brennstoffzelle mit Kraftstoff zu versorgen
- **grobe Abschätzung:**
1.300 kg H₂ Verbrauch pro Tag
- **350 bar im Fahrzeugtank**
(für die Brennstoffzelle: H₂ drucklos, rein)
- **Elektrolyse zur Erzeugung dieser H₂-Menge:**
ca. 3 MW bei kontinuierlichem Betrieb

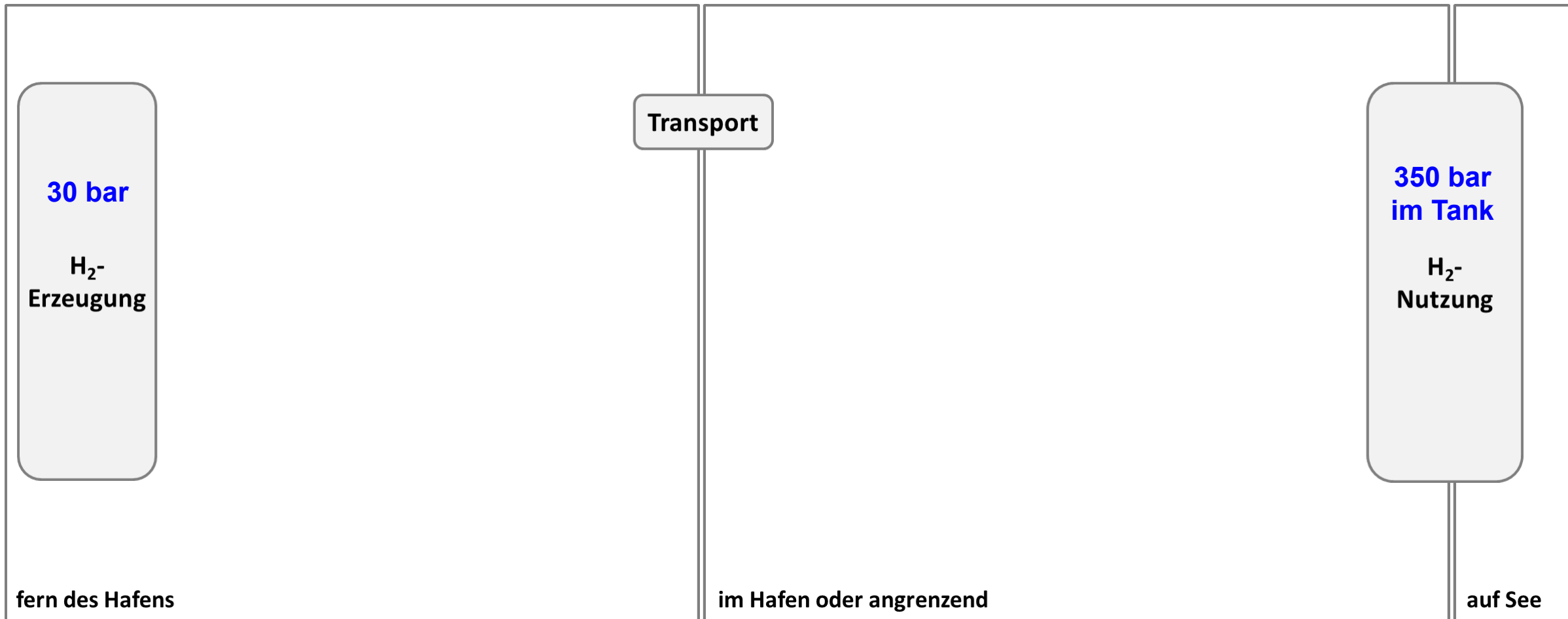
Anwendungsbeispiel: Anlieferung des Wasserstoffs per Lkw-Trailer

überschlägige Mengen pro Transport zur Versorgung der Portalhubwagen (1.300 kg/Tag)

- Druckwasserstoff 200 bar: $\leq 400 \text{ kg H}_2$
ca. 4 Fahrten täglich
- Druckwasserstoff 500 bar: $\leq 1.000 \text{ kg H}_2$
1 bis 2 Fahrten täglich
- Flüssigwasserstoff: $\leq 4.000 \text{ kg H}_2$
1 Fahrt alle 3 Tage
- Liquid Organic Hydrogen Carrier: $\leq 2.000 \text{ kg H}_2$
1 Fahrt alle 1 bis 2 Tage

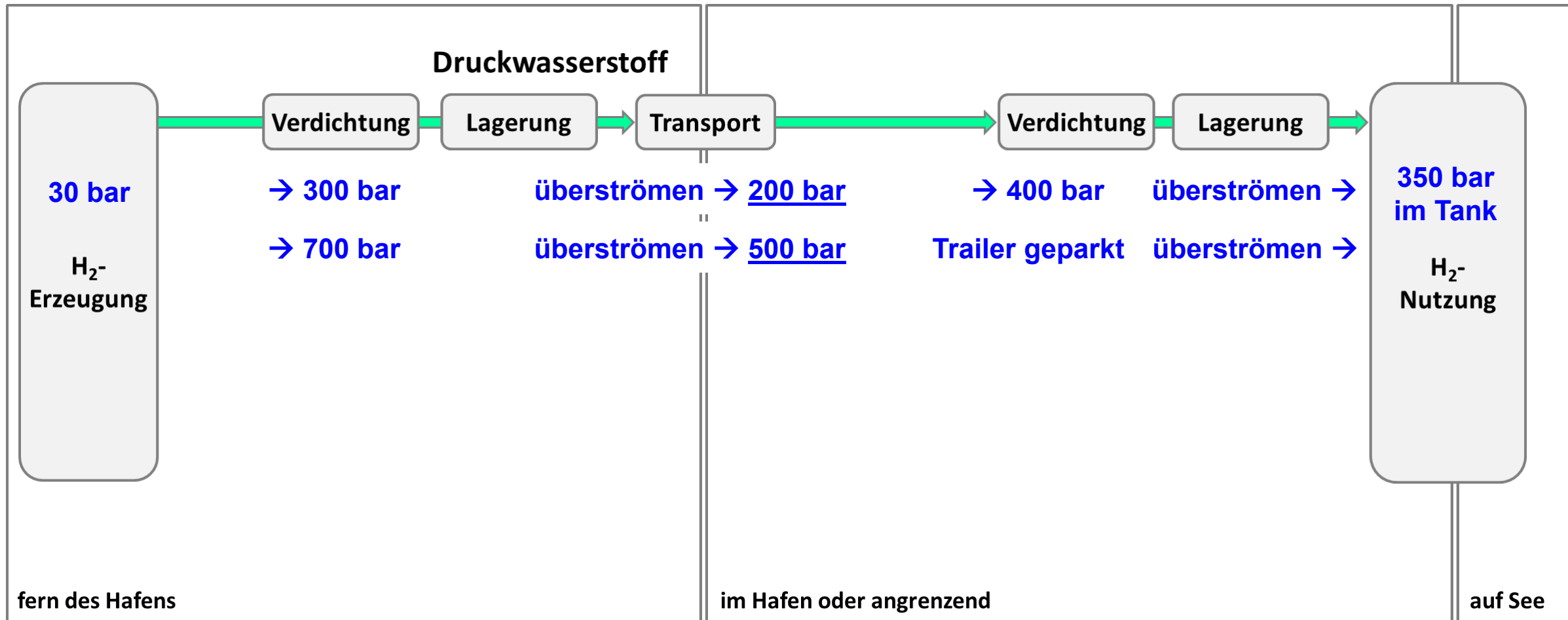
limitierende Faktoren: Platzbedarf und Maximalgewicht 40 Tonnen, Sicherheitsaufschläge

Speicheroptionen – schematische Betrachtung



beispielhafte Darstellung

Druckwasserstoff-Pfad



beispielhafte Darstellung

Druckwasserstoff

- **Behälter:**
 - **Stahl (Typ 1) – „der Klassiker“**
z.B. 45, 200 oder 300 bar
 - **Metall oder Kunststoff ummantelt mit Faserverbundstoffen (Typ 2 bis 4),**
leichter und teurer als Typ 1, u.a. für Fahrzeugtanks
z.B. 350, 500 oder 700 bar; 500 bar: Energiedichte ca. 1,1 kWh/l (Diesel ca. 10 kWh/l)
- **Energieaufwand für Verdichtung:**
abhängig vom Verdichtungsverhältnis, hoher Anfangsdruck vorteilhaft
z.B. 10 bar → 500 bar: < 4 kWh/kg (< 12% des H₂-Energieinhaltes)
- **potenzielles zukünftiges Versorgungssystem, analog zu Erdgas heute:**
Kaverne (180 – 200 bar) und Pipeline (< 100 bar im Transportnetz)
langfristiger Aufbau bzw. Umnutzung der Erdgasinfrastruktur,
kostengünstig, jedoch sehr hohe Anfangsinvestition

Druckwasserstoff – Beispiel: Tank Typ 1, 45 bar Nenndruck

Hersteller: Vako, Kreuztal
Betriebsdruck: max. 45 bar
Höhe: 9 m
Kapazität je Tank: ca. 50 m³ / 225 kg
Dicke des Stahls: 2-3 cm

Manufacturer: Vako, Kreuztal
Operating pressure: max. 4.5 MPa
Height: 9 m
Capacity per tank: approx. 50 m³ / 225 kg
Steel thickness: 2-3 cm



Die 450 kg Wasserstoff in diesen Tanks reichen für eine Autofahrt von Hamburg bis nach Athen plus einmal um die Erde (43.000 km).

The 450 kg of hydrogen in these tanks are sufficient for a car ride from Hamburg to Athens plus a trip right round the earth (43,000 km).

Druckwasserstoff – Beispiel: Flaschenbündel Typ 2, 350 bar Nenndruck



Foto: PLANET

Druckwasserstoff – Beispiel: Fahrzeugtank, Typ 4, 700 bar Nenndruck

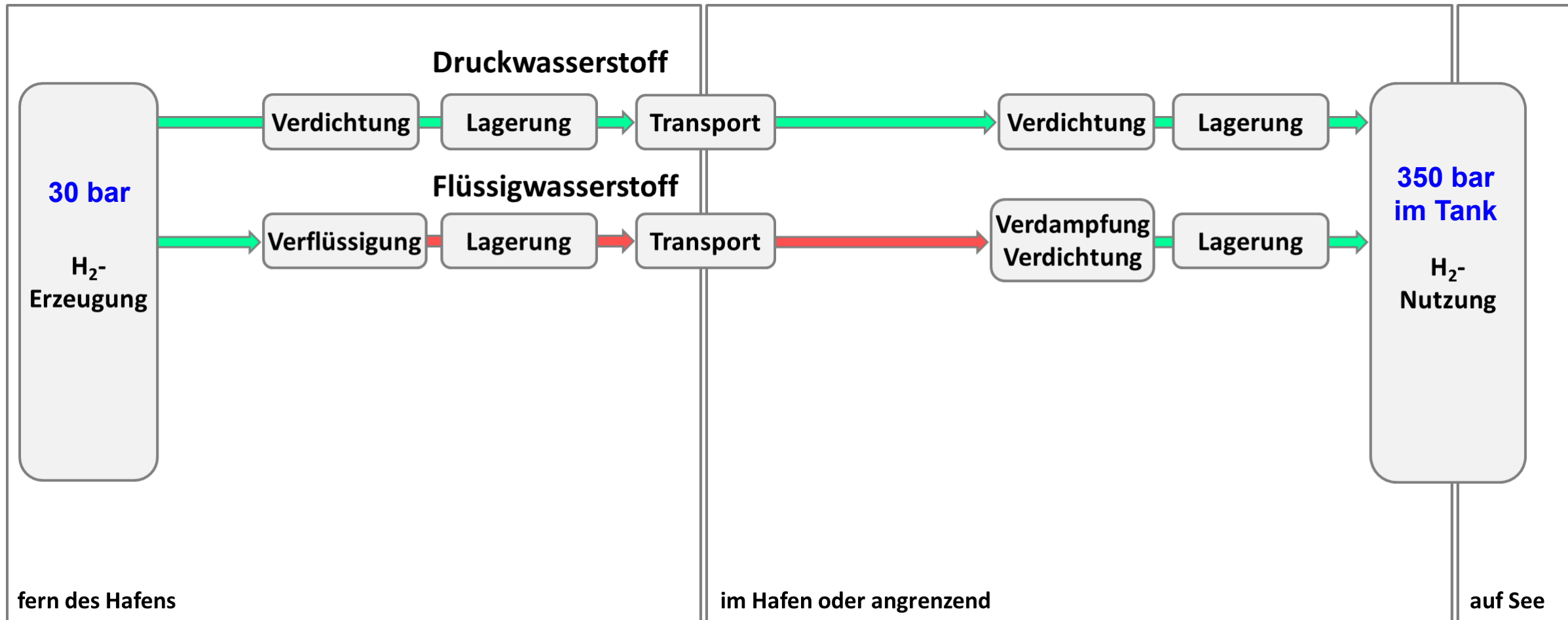


Foto: PLANET

Flüssigwasserstoff

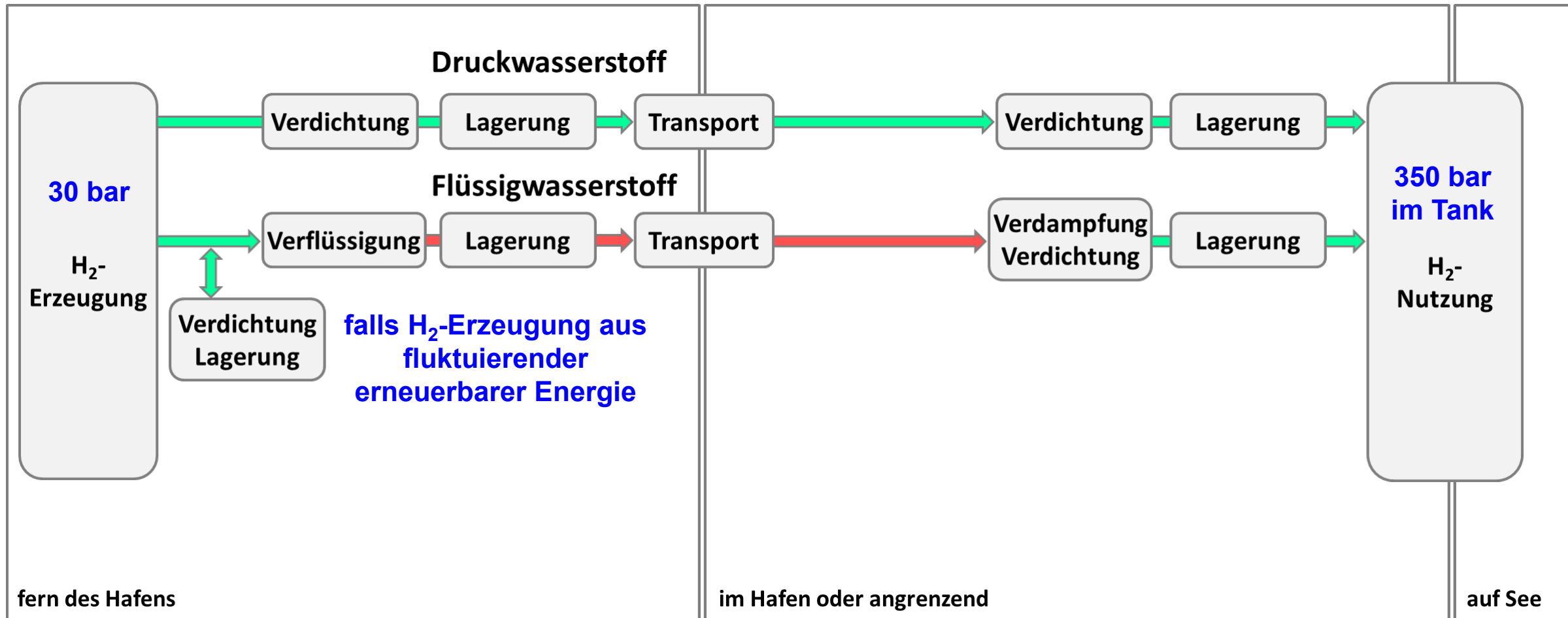
- **LH₂, tiefkalt (-253°C), knapp über absolutem Nullpunkt**
 - **Energiedichte ca. 2,35 kWh/l (plus Platzbedarf für die Isolierung des Tanks)**
 - **hoher Aufwand für Verflüssigung, vor allem elektrische Energie
heute ca. 12 kWh/kg (ca. 36% des H₂-Energieinhaltes) [plus nachfolgende Verdichtung]**
 - **gleichmäßige Auslastung nötig, hohe Investition
(zukünftig größere, effizientere Anlagen mit < 7 kWh/kg möglich)**
 - **3 Verflüssiger in Europa heute, davon 1 in Leuna**
 - **keine perfekte Isolierung der Tanks → Wasserstoff beginnt zu verdampfen („boil-off“)
→ Druck steigt → Sicherheitsventil öffnet → Wasserstoffverlust**

Flüssigwasserstoff-Pfad



beispielhafte Darstellung

Flüssigwasserstoff-Pfad



beispielhafte Darstellung

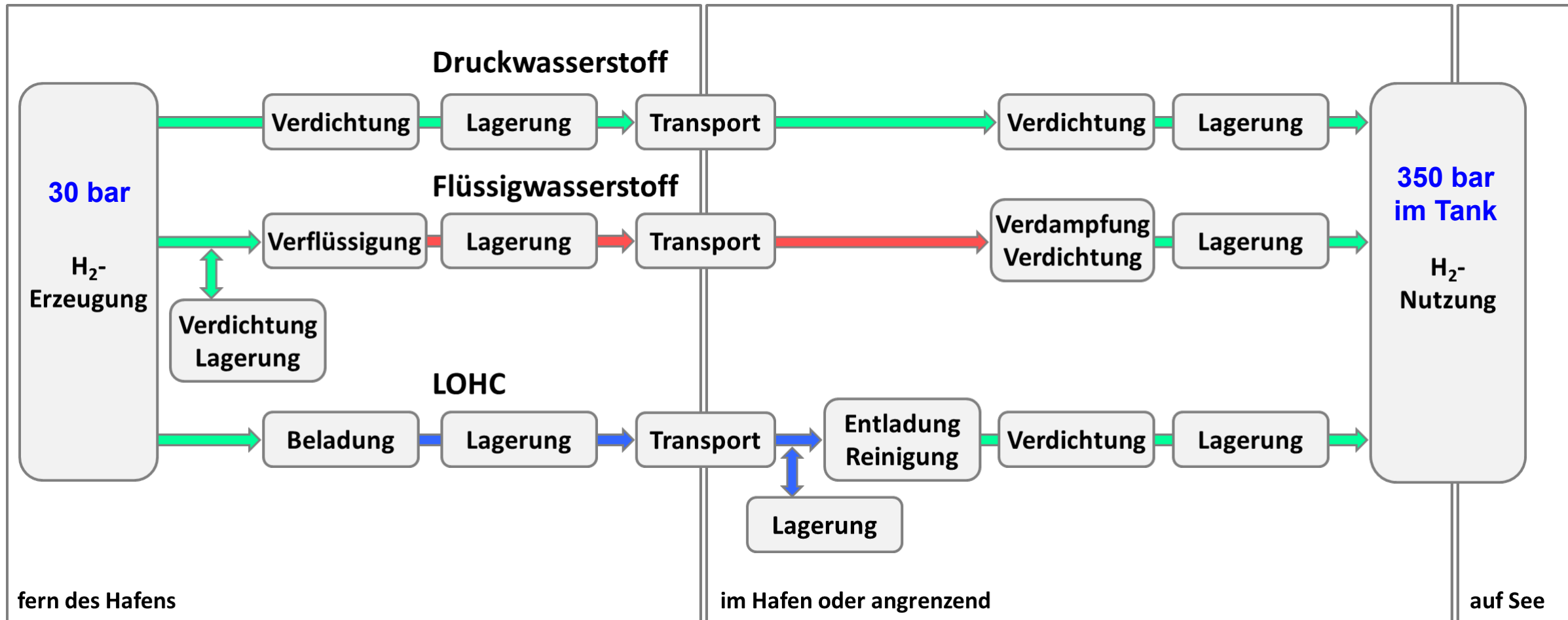
Flüssigwasserstoff – Beispiel



LOHC: aktuelles Beispiel Dibenzyltoluol ($C_{21}H_{20}$)

- industrielles Wärmeträgeröl → relativ kostengünstig und gut verfügbar
 - Beladung bei 20 - 100 bar und mittels Katalysator
→ Hydrierung zu $C_{21}H_{38}$, Freisetzung von Wärme ($\leq 170^\circ\text{C}$), **max. Energiedichte 1,9 kWh/l**
 - Entladung mittels Katalysator und Zufuhr von Wärme ($300 - 330^\circ\text{C}$) bei geringem Druck
- Vorteile u.a.:
 - drucklose Speicherung und durch chemische Bindung kann kein H_2 austreten
 - kein Gefahrguteinstufung beim Straßentransport, anders als CGH_2/LH_2
 - bei Genehmigungsverfahren (z.B. Mengenschwellen bei der Lagerung)
- Nachteile u.a.:
 - **Energieaufwand ca. 12 kWh/kg, wie LH_2 , jedoch thermisch [plus nachfolgende Verdichtung]**
 - für Nutzung in PEM-Brennstoffzellen H_2 -Reinigung nötig nach Entladung
 - Dibenzyltoluol wasser- und gesundheitsgefährdend, Zersetzung

LOHC-Pfad



beispielhafte Darstellung

Fazit

Druck- und Flüssigwasserstoff bewährt zur Lagerung und zum Transport von H₂

- CGH₂:

- **technisch einfachste Option, geringer energetischer Aufwand**
- **geringe Energiedichte → geringe Menge pro Transport (Innovation „500 bar“)**
- **langfristige Perspektive: Versorgungsnetz wie für Erdgas**

- LH₂:

- **hohe Energiedichte → große Mengen/weite Wege: günstiger für den Straßentransport**
- **hoher energetischer Aufwand, Innovationen möglich**

LOHC (Dibenzyltoluol) als weitere Option

- **Sicherheitsvorteile (Wasserstoff gebunden, drucklos), hohe Energiedichte**
- **hoher energetischer Aufwand, andere Risiken**
- **im Entwicklungsstadium, wesentliche Herausforderungen**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Klaus Stolzenburg



**Ingenieurbüro für Energie- und Versorgungstechnik
Donnerschweer Straße 89/91, 26123 Oldenburg
k.stolzenburg@planet-energie.de**

