

Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Wasserstoffbereitstellung

MATHIAK, JENS; HEINZEL, ANGELIKA; SPITTA, CHRISTIAN

ZENTRUM FÜR BRENNSTOFFZELLENTÉCHNIK GMBH, CARL-BENZ-STR. 201, D-47058 DUISBURG, DEUTSCHLAND

SCHLÜSSELWÖRTER: WIRTSCHAFTLICHKEIT, WASSERSTOFF, REFORMIERUNG

Zusammenfassung

Eine notwendige Voraussetzung für stationäre Wasserstoffanwendungen und deren Entwicklungen ist eine entsprechende Wasserstoffbereitstellung. Vielfach erfolgt die Wasserstoffversorgung derzeit dezentral über Druckgasflaschen oder Elektrolyseure. In der jüngsten Vergangenheit hat jedoch die Reformertechnologie getrieben durch Markterwartungen in mobilen und stationären Brennstoffzellenanwendungen große Fortschritte erzielt. Dadurch kann Wasserstoff mitunter ökonomischer durch einen Kleinreformer gekoppelt mit einer angepassten Druckwechseladsorption (PSA) bereitgestellt werden kann.

1 Einleitung

Für die Versorgung von Wasserstoffverbrauchern werden in Abhängigkeit der Leistungsklasse unterschiedliche Techniken verwendet. Kleinstsysteme verwenden in der Regel Hydridspeicher, in einer mittleren Leistungsklasse wird Wasserstoff aus Druckgasflaschen oder Elektrolyseuren eingesetzt und im industriellen Maßstab werden üblicherweise Anlagen zur Wasserstoffproduktion aus Erdgas aufgebaut. Diese traditionelle Klassifizierung muss aufgrund der technischen Weiterentwicklung kleinerer Reformieranlagen vor einem ökonomischen Hintergrund neu hinterfragt werden. In dieser Untersuchung steht die Frage im Vordergrund, ab welcher Leistungsklasse eine wirtschaftliche Versorgung mittels Reformern realisierbar ist. Das analysierte Marktsegment bezieht sich auf stationäre Anwendungen, wobei von einer Erdgas-, Strom- und Kühlmedium-Infrastruktur ausgegangen wird.

2 Modellbeschreibung

Zunächst werden die verschiedenen Wasserstoffversorgungswege charakterisiert und in einem Kostenmodell zusammengefasst. Anschließend erfolgt ein Vergleich, der als Grundlage einer Entscheidung für den Einsatz von Wasserstoffdruckgasflaschen, eines Elektrolyseurs oder eines Reformersystems verwendet werden kann. Bei Einsatzorten mit erhöhtem Wasserstoffbedarf bieten die Gaslieferanten oftmals auch größere Gastanks als kostengünstigere Variante zur Druckgasflaschenversorgung an. Zu dieser Alternative waren jedoch keine veröffentlichten Daten in Bezug auf das Kostenmodell zu erhalten, so dass diese Möglichkeit nicht erfasst wird.

2.1 Druckgasflaschen

Es gibt zahlreiche Anbieter für eine Versorgung mit Druckgasflaschen, wie z.B. die Firmen Messer oder Linde. Diese bieten den Energieträger in verschiedenen Qualitäten, Flaschengrößen und Druckniveaus an. Die Kosten werden im Wesentlichen durch diese Spezifikationen bestimmt. Darüber hinaus gibt es noch weitere Parameter die den Preis beeinflussen können. Dazu zählen die jährliche Abnahmemenge (Großabnehmererrabatt), Flaschenmiete und Transportkosten. Bei dem Verbraucher entstehen zudem noch Anschaffungsnebenkosten in Form der Lagerung, den Aufwendungen für Flaschenwechsel und dgl. Dieser Aspekt wird zunächst nicht in das Kostenmodell integriert, welches nur die externen Ausgaben beschreiben soll, sondern am Ende der Untersuchung separat betrachtet.

Aus diesen Spezifikationen können zusammen mit dem Wasserstoffverbrauch die jährlichen Kosten ermittelt werden. Im Einzelfall lässt sich der Bedarf teilweise nur komplex bestimmen oder gar vorhersagen. In der Regel kann aber auf historische Daten wie beispielsweise den letztjährigen Wasserstoffverbrauch zurückgegriffen werden. Die jährlichen Kosten K können demnach durch folgenden Ansatz beschrieben werden:

$$K_{\text{Druckgasflaschen}} = \dot{V} \cdot k_{\text{Wasserstoff}}$$

Darin bezeichnet \dot{V} den jährlichen Wasserstoffverbrauch (gemessen in kg/Jahr) und k die spezifischen Kosten (gemessen in €/kg). Zur quantitativen Evaluierung des Kostenmodells wird beispielhaft bei einer 200 bar 50 Liter Wasserstoffflasche von 100 € ausgegangen. Aus den Dichten unter Anlieferungsbedingungen von 16,54 kg/m³ und bei einem Flaschenrestdruck von 5 bar von 0,41 kg/m³ lässt sich der nutzbare Flascheninhalt mit 0,807 kg pro Flasche berechnen. Es ergeben sich spezifische Kosten in Höhe von $k = 124 \text{ €/kg}_{\text{H}_2}$.

2.2 Elektrolyseur

Anstelle einer Druckgasflaschenversorgung kann der Energieträger durch einen Elektrolyseur aus Wasser produziert werden. Für dieses Verfahren ergibt sich ein anderer Ansatz für die Bestimmung der jährlichen Kosten zur Wasserstoffversorgung. Es wird vorausgesetzt, dass der Verbraucher gleichzeitig Eigentümer und Betreiber des Elektrolyseurs ist und keine Contracting- oder Leasing-Modelle existieren. Dadurch ergeben sich Betriebskosten und Anschaffungskosten ($K_{\text{Investition}}$) der Anlage, die durch Abschreibung und einen kalkulatorischen Zins zur Berücksichtigung des Finanzierungsaufwandes auf jährliche Kosten zur Erzeugung des Wasserstoffs überführt werden können.

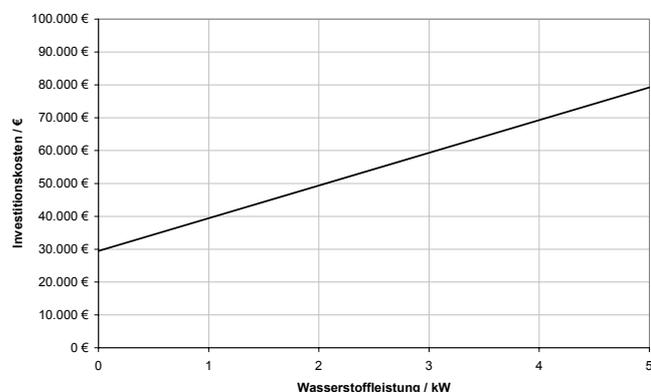


Abb. 1: Näherungsgerade zur Abbildung der Investitionskosten von Elektrolyseuren

$$K_{\text{Elektrolyseur}} = K_{\text{Elektrolyseur, Betrieb}} + K_{\text{Elektrolyseur, Investition}} \cdot \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}}$$

In der Gleichung bezeichnet $K_{\text{Elektrolyseur, Betrieb}}$ die jährlichen Betriebskosten des Wasserstofferzeugers, r den kalkulatorischen Zinssatz (Annahme 6%) und n die Laufzeit in Jahren (Annahme 8 Jahre). Bei dieser Rechnung muss eine Betriebsstrategie hinterlegt werden, um aus der nominellen Wasserstoffleistung des Elektrolyseurs (siehe Abb. 1) eine Jahresproduktionsmenge zu berechnen. Dazu wird angenommen, dass die Anlage durchschnittlich bei halber Last betrieben wird. Die Betriebskosten wiederum setzen sich hauptsächlich aus den Betriebsmittelkosten für Wasser und Strom zusammen, die nachfolgend einzeln berechnet werden.

$$K_{\text{Elektrolyseur, Betrieb}} = K_{\text{Wasser}} + K_{\text{Strom}}$$

Für die Elektrolyse werden etwa 12 kg_{Wasser}/kg_{Wasserstoff} benötigt [1]. Wird eine Wasseraufbereitung durch Deionisationsfilter berücksichtigt, ergibt sich durch Investitions- und Betriebskosten ein Betrag von $k_{\text{Wasser}} = 1,9 \text{ €/kg}_{\text{H}_2}$. Die jährlichen Kosten können analog berechnet werden.

$$K_{\text{Wasser}} = \dot{V} \cdot k_{\text{Wasser}}$$

Die Stromkosten zum Betrieb des Elektrolyseurs können mit 59 kWh/kg_{H₂} angesetzt werden [1]. Für die Stromkosten wird von einem Bezugspreis von 10 €-Cent/kWh und somit $k_{\text{Strom}} = 5,9 \text{ €/kg}_{\text{H}_2}$ ausgegangen.

$$K_{Strom} = \dot{V} \cdot k_{Strom}$$

Anhand dieses Modells und den getroffenen Annahmen ergeben sich die in Abb. 2 dargestellten jährlichen Bereitstellungskosten für einen vorgegebenen Wasserstoffverbrauch. Daraus ist erkennbar, dass bei einem Jahresbedarf von bis zu 91 kg die Versorgung mit Druckgasflaschen wirtschaftlich ist, bei einem höheren Bedarf jedoch die Bereitstellung durch einen Elektrolyseur günstiger ist. Gegen diese Konkurrenzsituation muss nun die Wasserstofferzeugung durch Reformierung antreten.

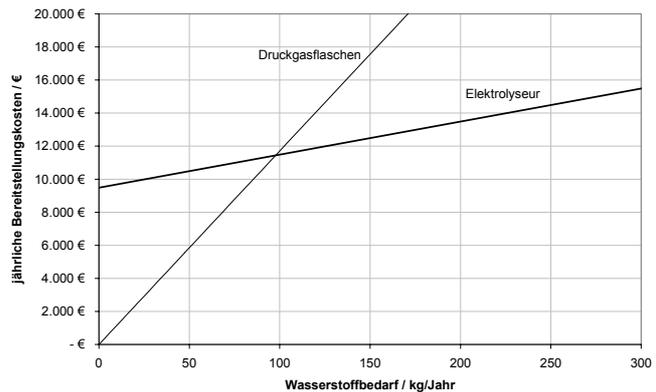


Abb. 2: Jährliche Bereitstellungskosten durch Druckgasflaschen bzw. Elektrolyseur

2.3 Reformierung

Alternativ kann auch eine Produktion des Energieträgers aus Erdgas erfolgen. Dazu ist ein unter Druck betriebener Dampf reformer mit Shift-Stufen und einer Druckwechseladsorptionsanlage (Pressure Swing Adsorption, PSA) erforderlich (siehe Abb. 3).

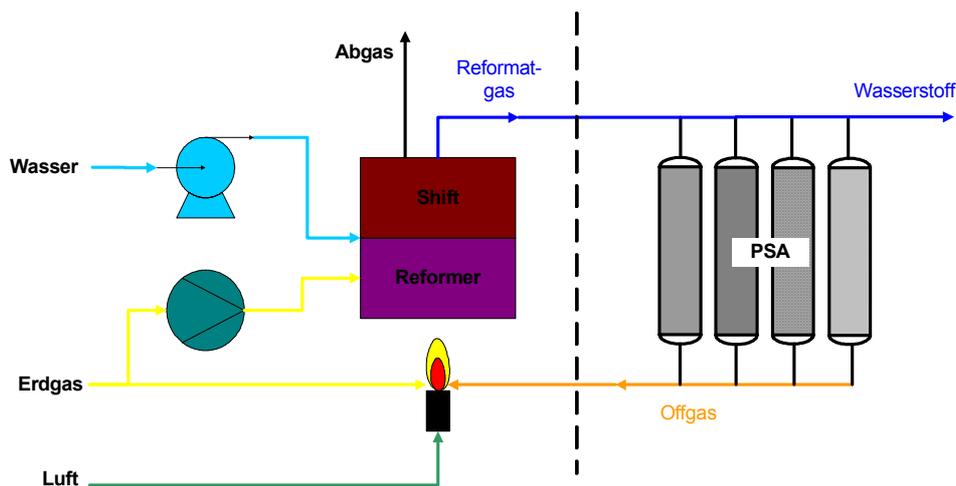


Abb. 3: Verfahrensschema eines Reformersystems

An dieser Stelle wird nicht auf die Verfahrenstechnik eingegangen sondern auf weiterführende Literatur verwiesen [2, 3]. Neben den Hauptkomponenten ist die weitere Anlagenperipherie (Balance of Plant, BOP) sowie gegebenenfalls ein Wasserstoffspeicher zur zeitlichen Entkopplung von Produktion und Verbrauch und damit gleichsam zur Deckung von Spitzenlasten erforderlich.

Für die Reformierung resultiert der gleiche Ansatz für die Bestimmung der jährlichen Kosten zur Wasserstoffversorgung wie beim Elektrolyseur. In dieser Analyse soll jedoch nicht von bekannten Anschaffungskosten eines Reformersystems ausgegangen werden, sondern auf Basis der jährlichen Kosten der Alternativlösung (Druckwasserstoff oder Elektrolyseur) $K_{Alternativ}$ die tolerierbare Kostengrenze des Reformersystems ermittelt werden (Rentenbarwertkalkulation).

$$K_{Reformer,Investition} = (K_{Alternativ} - K_{Reformer,Betrieb}) \cdot \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r}$$

In der Gleichung bezeichnet $K_{Reformer,Betrieb}$ die jährlichen Betriebskosten des Wasserstoffherstellers. Die Betriebskosten wiederum setzen sich hauptsächlich aus den Betriebsmittelkosten für Erdgas, Wasser und Strom zusammen, die nachfolgend einzeln berechnet werden. Die Kosten für Erdgas können über den Heizwert des produzierten Wasserstoffes Δh_v und den Wirkungsgrad der Anlage ermittelt werden.

$$K_{Erdgas} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta h_v \cdot k_{Erdgas}}{\eta_{Reformer}}$$

In der Gleichung wird aus dem oben bereits eingeführten Wasserstoffverbrauch mit Hilfe des Heizwertes (33,3 kWh/kg) zunächst der thermische Wasserstoffverbrauch berechnet. Wird dieser noch durch den Wirkungsgrad des Reformers dividiert erhält man den thermischen Erdgasverbrauch der Anlage und schließlich durch Multiplikation mit dem spezifischen Erdgaspreis die jährlichen Erdgaskosten. Für eine numerische Auswertung wird mit einem Wirkungsgrad von 75% und 3,45 €/Cent/kWh_{Erdgas} gerechnet.

Für die Dampfreformierung werden überschlägig 8 kg_{Wasser}/kg_{Wasserstoff} bzw. 1,25 €/kg_{H₂} (s.o.) benötigt. Die Stromkosten zum Betrieb des Reformersystems lassen sich korrekt nur an einer konkreten Anlage ermitteln. Aus der Literatur lassen sich diesbezüglich keine belastbaren Daten entnehmen. Somit muss hier eine Annahme getroffen werden, dass etwa 20% der thermischen Wasserstoffleistung auch in Form von Strom benötigt wird.

$$K_{Strom} = \dot{V} \cdot \Delta h_v \cdot k_{Strom} \cdot 20\%$$

Bei der Kostenanalyse wurde von einer existierenden Infrastruktur ausgegangen. D.h. es wurden keine Installationskosten für die Versorgung mit Erdgas oder Strom berücksichtigt.

3 Auswertung

Mit dem oben beschriebenen Modell kann nun eine Auswertung erfolgen, wie hoch die Investitionskostengrenze für ein Reformersystem zur Bereitstellung von Wasserstoff anstelle von Druckgasflaschen bzw. Elektrolyseur ist (siehe Abb. 4). Für die technischen Spezifikationen wurden bereits Annahmen getroffen. Die kalkulatorische Laufzeit des Reformersystems wird ebenfalls wie die der Elektrolyseure auf 8 Jahre bezogen. Wenn nun die Kosten einer Wasserstoffherstellung bekannt sind (ähnlich zu der Recherche bei Elektrolyseuren aus Abb. 1), kann eine Wirtschaftlichkeit beurteilt werden. Ein Ansatz zur näherungsweisen Beschreibung besteht somit in einer Gleichung aus einer Konstanten und einem leistungsproportionalen Term.

$$K_{Investition} = K_1 + k_2 \cdot P$$

Werden diese Parameter nun an bekannte Kosten von Wasserstoffherstellung angepasst, ergeben sich Werte von 150.000 € für K_1 bzw. 1300 €/kW für k_2 . In der leistungsabhängigen grafische Darstellung ergibt sich ein Diagramm gemäß Abb. 4. Darin ist erkennbar, dass bestehende Reformersysteme erwartungsgemäß nicht gegen Druckgasflaschen sondern gegen Elektrolyseure konkurrieren. Ab einem Bedarf von 1000 kg_{H₂}/Jahr (Rentabilitätsgrenze) ist gemäß dieser Auswertung eine Bereitstellung des Wasserstoffes durch einen Reformer anstelle eines Elektrolyseurs ökonomisch. Bei der Rentabilitätsgrenze wäre ein 7,4 kW Reformer erforderlich, wenn dieser im Jahr durchschnittlich bei halber Last betrieben würde.

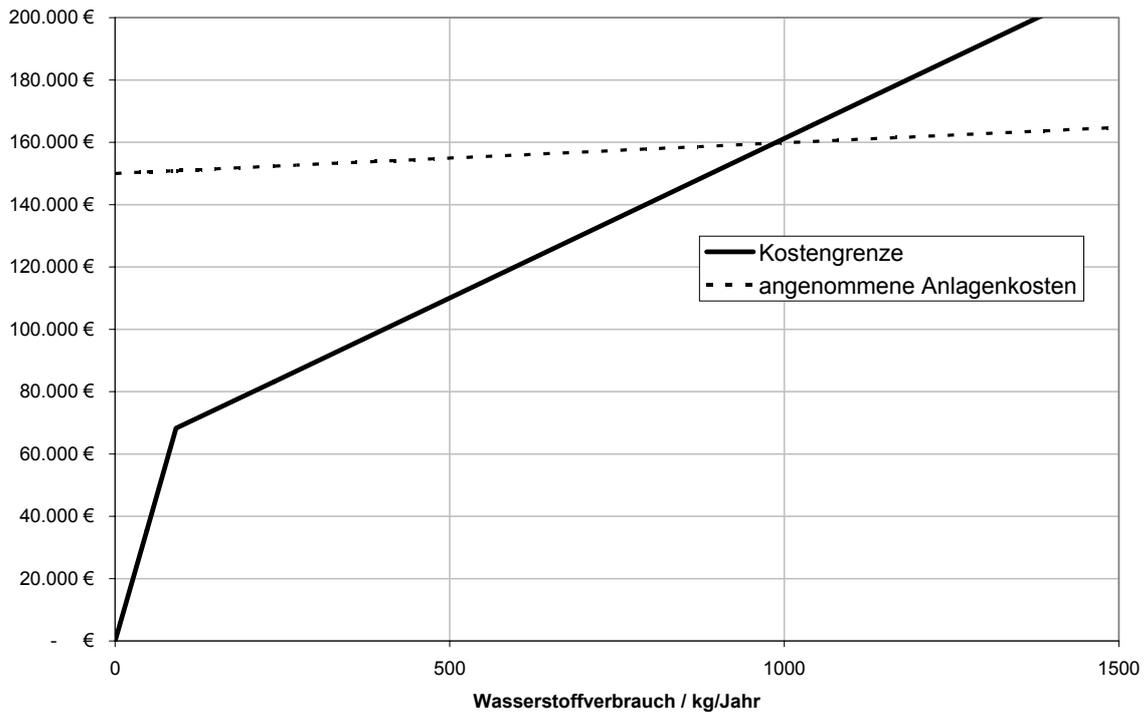


Abb. 4: Investitionskostengrenze und angenommene Anlagenkosten eines Reformersystems

Neben den erwähnten Einflüssen muss im Einzelfall eine Bewertung weiterer Randbedingungen erfolgen. Sowohl bei der Wasserstoffversorgung mit Druckgasflaschen als auch mit einem Elektrolyseur oder einem Reformersystem ist mit Ausfallzeiten und Arbeitsaufwand (Wechsel der Flaschen bzw. Anfahren der Anlagen) zu rechnen. Ein Vorteil bei Druckgasflaschen ist, dass bei der Bestellung auf den Bedarf unterschiedlicher Gasqualitäten und damit Kosten eingegangen werden kann. Diese Variabilität ist bei einem installierten Wasserstoffherzeuger in der Regel nicht mehr möglich, so dass dieser für die höchste geforderte Qualität ausgelegt werden muss. Ein wesentlicher Einfluss der Wirtschaftlichkeit liegt in den Kosten eines Wasserstoffspeichers (z.B. Tank), dessen Dimensionierung von der Kontinuität des Wasserstoffbedarfs geprägt ist. Bei einem Einsatzort mit stetigem Bedarf empfiehlt sich daher die Verwendung eines Wasserstoffherzeugers, bei starken Schwankungen wiederum ist eine Druckflaschenversorgung besser geeignet.

4 Bewertung

Für die Ausgleichsgrade zur Abbildung von Investitionskosten eines Reformersystems waren ausschließlich Daten von Anlagen hoher Leistung verfügbar. Deren Gültigkeit bei geringerer Kapazität und somit Extrapolierbarkeit ist fragwürdig. Sollte die Miniaturisierung der Systeme einen geänderten Kostenansatz für Kleinsysteme erlauben, könnte sich ein Marktpotenzial für dezentrale Wasserstoffherzeuger als Ersatz für existierende Versorgungsstrukturen ergeben.

Wichtig zu erwähnen bleibt jedoch, dass sich die gewählten Parameterwerte bei der Versorgung mit Druckgasflaschen im Einzelfall stark unterscheiden können. Daher kann auch die numerische Auswertung bei einzelnen Verbrauchern fundamental verschieden sein. Das wesentliche Ergebnis dieser Untersuchung ist also das Modell und nicht dessen Evaluierung.

5 Literaturverzeichnis

[1] Machens, Christian: *Regenerativer Wasserstoff aus Elektrolyse*, in Tagungsband zum 10. OTTI Profiforum Brennstoffzelle, Berlin, 2003

[2] Ledjeff-Hey, Konstantin; Mahlendorf, Falko; Roes, Jürgen: *Brennstoffzelle - Entwicklung, Technologie, Anwendung*, 2. Auflage, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 2001

[3] Mathiak, Jens: *Verfahrensanalyse zur dezentralen Hausenergieversorgung auf Basis von PEM-Brennstoffzellen*, Logos Verlag Berlin, 2003

Autoren Biografie



Dr.-Ing. Dip.Wirt.-Ing. Jens Mathiak, Jahrgang 1972, Studium des Maschinenbaus mit der Vertiefungsrichtung Verfahrenstechnik an der Ruhr-Universität Bochum/RWTH Aachen und anschließend wirtschaftswissenschaftliches Zusatzstudium an der FU Hagen. 1999-2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Energietechnik der Universität Duisburg-Essen. 2003 Promotion im Bereich Maschinenbau zur Wasserstoffherzeugung. Seit 2002 Leiter der Gasprozesstechnik am Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH in Duisburg.



Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinzel, Jahrgang 1955, Studium der Chemie in Münster, Kiel und Oldenburg, Abteilungsleiterin Energietechnik am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. 2001 Ruf an den Lehrstuhl Energietechnik der Universität Duisburg-Essen. Seither Geschäftsführerin am Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH in Duisburg.



Dipl.-Ing. Christian Spitta, Jahrgang 1972, Studium des Maschinenbaus mit der Vertiefungsrichtung Energietechnik an der Universität Duisburg-Essen bzw. beim DLR in Köln & Almería (Spanien). 2000-2001 Teamleiter und verantwortlich für den Aufbau eines Internetgestützten Datenbanksystems bei der valudo ag. Von 2001-2003 Abwicklung von nat. & internat. Projekten im Bereich des Energiemanagements bei der STEAG Ketek IT GmbH. Seit 2003 Projektingenieur und Entwicklung neuer Reformerkonzepte am Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH in Duisburg.