

NEUE STUDIE

Flüssigwasserstoff entpuppt sich als Gamechanger für nicht-elektrifizierte Bahnstrecken

Gastbeitrag von Peter Loidolt

Aktuelle Klimaziele – etwa von der Deutschen Bahn AG (klimaneutral bis 2040) oder auf EU-Ebene (Netto-Null bis 2050) – fordern im Bahnbereich eine sukzessive Umstellung auf emissionsfreie Antriebe. Die Elektrifizierung von Bahnstrecken ist oftmals unwirtschaftlich, Diesel nicht umweltfreundlich. Somit müssen Alternativen gefunden werden. Wasserstoff und Batteriespeichersysteme stellen attraktive Alternativen dar. Vor allem flüssiger Wasserstoff kann speziell bei längeren Fahrtstrecken punkten.

Die Elektrifizierung von Eisenbahnstrecken mittels Oberleitungen ist aus Sicht des Antriebssystems eine sehr effiziente Lösung und ist bisher speziell in Europa das Mittel der

Wahl, um die Hauptverkehrsrouten ohne Dieseltreibstoff betreiben zu können. So sind in Deutschland rund 62 Prozent des Schienennetzes mittels Oberleitungen elektrifiziert (Stand 2023), mit der Absicht, das Oberleitungsnetz weiter auszubauen. Nach Angaben des deutschen Bundesministeriums für Digitales und Verkehr liegen die Kosten für den Ausbau im Bereich von 1,4 bis 3,6 Millionen Euro pro Kilometer. Eine Größenordnung, die für wenig genutzte Schienenwege wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen ist. Speziell in flächenmäßig großen Ländern mit kaum vorhandenen Oberleitungen ist eine komplette Elektrifizierung aufgrund der exorbitanten Kosten und der aufzuwendenden Zeit für die notwendigen baulichen Maßnahmen unrealistisch. Die USA, die über ein Schienennetz von ca. 225.000 Kilometer verfügen, von denen nur rund 1 Prozent elektrifiziert sind, sind diesbezüglich ein Paradebeispiel.

Alternative Lösungen sind also wirtschaftlich und klimatechnisch erforderlich, um für schwach befahrene Strecken,

aber auch für weitläufige Netze, eine gangbare Lösung zu finden, bei der auf fossile Kraftstoffe verzichtet werden kann. In den Fokus rücken dabei mobile Speicherlösungen wie Batterie- und Wasserstoffsysteme, insbesondere für Nebenstrecken.

Studie zeigt Potenzial alternativer Antriebe

Beim 46. Internationalen Wiener Motorensymposium im Mai 2025 präsentierten Experten der SAG Group erstmals eine Studie zum Thema „Flüssiger Wasserstoff als attraktive Energiespeicherlösung für Bahnanwendungen“. Der Schwerpunkt der Studie liegt auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-basierten Systemen und batteriebasierten Systemen, die mit Oberleitungssystemen verglichen werden. Bei auf Wasserstoff basierenden Brennstoffzellen-Systeme werden gasförmige Hochdruckspeicher (cGH₂) und Flüssigwasserstoffspeicher (LH₂) unterschieden.

Hochdruckspeicher sind das bisher am weitesten verbreitete Speichersystem für Wasserstoff in Bahnanwendungen. Flüssigwasserstoff-Speichersysteme haben sich jedoch zum Beispiel für Schwerlast-Lkw-Anwendungen bewährt und scheinen auch für Zuganwendungen eine geeignete Lösung zu sein.

Auf den Anwendungsfall kommt es an

Batterieelektrische Triebwagen eignen sich besonders für kurze und mittlere Strecken – beispielsweise im Regionalverkehr mit regelmäßigen Ladepunkten. Bei längeren Distanzen oder Strecken ohne Ladeinfrastruktur stoßen Batterien jedoch an ihre Grenzen. Hier spielen wasserstoffbasierte Antriebe ihre Stärken aus. Besonders flüssiger Wasserstoff (LH₂) überzeugt durch seine hohe Energiedichte. Während gasförmiger Wasserstoff (cGH₂) trotz des hohen Drucks voluminös ist und schwere Hochdrucktanks benötigt werden, lässt sich LH₂ platzsparend und in leichteren Tanks speichern – ein Vorteil, gerade bei begrenztem Bauraum.

- Gasförmiger Wasserstoff: Schwer und voluminös, mit geringer volumetrischer Energiedichte, weniger effizient für Anwendungen mit begrenztem Platzangebot. Verwendung von teuren, nicht recyclingfähigen Kohlefaserverbundwerkstoffen.
- Flüssiger Wasserstoff: Leichter und volumeneffizienter, mit höherer volumetrischer Energiedichte, besser geeignet für Bahnsysteme, deren Bauraum begrenzt ist, welche jedoch lange Fahrtstrecken ohne Nachbetankung zurücklegen müssen. Verwendung von recyclebaren Materialien wie Stahl und Aluminium.

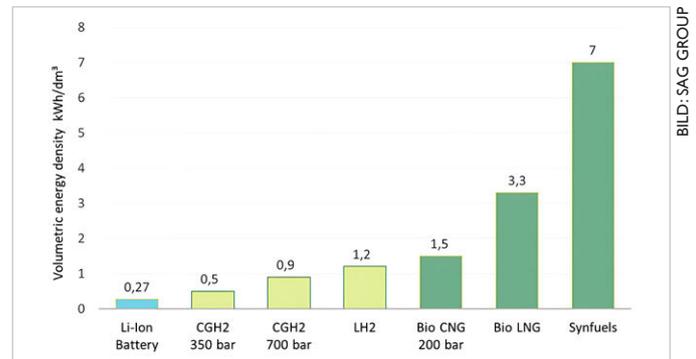


BILD: SAG GROUP

Flüssigwasserstoff bietet im Vergleich zu Batterien und gasförmigem Wasserstoff die höchste Energiedichte je Liter.

- Batteriesysteme: Schwer und voluminös, mit geringerer Energiedichte im Vergleich zu Wasserstoff, aber geeignet zur Überbrückung kurzer Netzabschnitte ohne Oberleitungen.
- Dieseltanks: Leicht und sehr volumeneffizient, mit hoher Energiedichte, aber keine saubere Energiequelle.

Jedes System hat seine Vor- und Nachteile, und die Wahl hängt von den spezifischen Anforderungen und Einschränkungen des Eisenbahnsystems ab. So bietet beispielsweise die Wasserstoffspeicherung (sowohl gasförmig als auch flüssig) eine sauberere Alternative zu Diesel, bringt aber Herausforderungen in Bezug auf Gewicht und Volumen mit sich. Batteriesysteme eignen sich für elektrische Züge, haben aber im Vergleich zu Wasserstoff eine viel geringere Energiedichte. Sie haben einen geringeren gravimetrischen und volumetrischen Speicherwirkungsgrad, können aber eine praktikable Lösung sein, wenn Platz- und Reichweitenanforderungen diese Einschränkungen zulassen. Dies gilt insbesondere dann, wenn nur Teile des Schienennetzes nicht elektrifiziert und mit Batterien überbrückt werden – in diesem Fall können die vorhandenen Stromleitungen in elektrifizierten Abschnitten zum Laden der Batterien genutzt werden.

In Anwendungsfällen, die vergleichsweise hohe Reichweiten erfordern, kann die volumetrische Energiedichte eine wichtige Spezifikation sein, insbesondere wenn der



BILD: DAIMLER TRUCK

Flüssigwasserstofftank der SAG Group für mobile Anwendungen – auch im Schienenverkehr.

Platzbedarf kritisch ist – zum Beispiel in Triebzügen (Züge ohne eigene Lokomotiven), in denen der von Energiespeichern belegte Platz zu einer Verringerung des Platzes für die Fahrgäste führt. Speichersysteme für flüssigen Wasserstoff sind aufgrund ihrer hohen volumetrischen Energiedichte die beste umweltfreundliche Lösung für diese Spezifikationen.

LH₂ punktet bei Platzbedarf und Reichweite ...

Flüssigwasserstoff wird bei rund -250 Grad Celsius gespeichert und bietet eine hohe volumetrische Energiedichte. Im Vergleich zu Batterien und cGH₂ sind LH₂-Speicher leichter, benötigt weniger Platz und können höhere Reichweiten ermöglichen. Das macht sie ideal für Mehrsystem-Triebzüge, bei denen jeder Kubikzentimeter zählt. SAG demonstriert dies anhand von Tanksystemen, die bereits für den Einsatz im Schwerlastverkehr konzipiert wurden. Die Lebensdauer kann bei geeigneter Materialwahl und Wartung bis zu 25 Jahre betragen – vergleichbar mit klassischen Dieseltanks.

... und überzeugt durch langfristige Ersparnis

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt: Während Batterien pro Kilowattstunde Speicherenergie teuer bleiben, bieten LH₂-Systeme bei entsprechender Skalierung der Produktion Kostenvorteile aufgrund der einfachen eingesetzten Materialien. Produktionskosten für LH₂-Speicher

könnten bei etwa 6,5 bis 7,2 USD/kWh liegen (bei Großserienproduktion), während die für Dauereinsatz bei Schienenfahrzeugen konzipierten Batteriespeicher bis zu 570 USD/kWh kosten können. Diesel bleibt zwar unschlagbar günstig, ist aber ökologisch nicht zukunftsfähig. Wichtig ist: Der TCO (Total Cost of Ownership) entscheidet, nicht der reine Anschaffungspreis. Und hier hat LH₂ bei langen Einsatzzyklen die Nase vorn.

Die Rahmenbedingungen müssen stimmen

Bei nicht vorhandenen Pipelines ist der Transport von Flüssigwasserstoff mittels Trailer die optimale Lösung, um den Wasserstoff zu den Tankstellen zu bringen. Studien zeigen: Die Betankung mit LH₂ ist nicht nur schneller, sondern auch kostengünstiger als gasförmige Alternativen – sofern eine zentrale Produktion gewährleistet ist. Bei entsprechender Auslastung sind LH₂-Tankstellen bis zu drei Mal günstiger als ihre gasförmigen Pendanten. Zudem lassen sich bestehende Lkw-Infrastrukturen mitnutzen – ein Pluspunkt bei der Netzintegration.

Die Zukunftsfähigkeit von Schienenfahrzeugen mit Flüssigwasserstoffspeicherung hängt stark von der Verfügbarkeit von flüssigem Wasserstoff in der zukünftigen Energieinfrastruktur ab. Wird flüssiger Wasserstoff für die Verteilung von Wasserstoff über Schiffe, Züge und Lkw verwendet, sind die Gesamtbetriebskosten von Flüssigwasserstoffspeichern im Vergleich zu gasförmigen Speichern niedriger. Im Falle der Verteilung von gasförmigem Wasserstoff über Pipelines kann der zusätzlich notwendige Schritt der Verflüssigung jedoch zu einer erheblichen Erhöhung der TCO im Falle von Betankung mit flüssigem Wasserstoff führen. Für die Verteilung von Wasserstoff über Pipelines sind jedoch – wie bei der Elektrifizierung mittels Oberleitungen – große Investitionen notwendig, wodurch dies (global betrachtet) nicht für jede Region umsetzbar ist. Folglich wird der flüssige Wasserstoff in diesen Regionen die bevorzugte Wahl sein.

Zusammenfassend lässt sich jedenfalls sagen, dass die Nutzung von flüssigem Wasserstoff als Energieträger für Schienenfahrzeuge eine technisch machbare und wirtschaftlich tragfähige Lösung zur Dekarbonisierung nicht-elektrifizierter Abschnitte des globalen Schienennetzes darstellt. Voraussetzung ist allerdings, dass die Politik die Weichen in Richtung Ausbau der Infrastruktur für die Produktion und die Distribution des flüssigen Wasserstoffs stellt. ==

DI Dr. Peter Loidolt ist als Leiter der Forschung und Entwicklung bei der SAG Group in Lend (Salzburg), Österreich, tätig.