

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 113 (2022)

Heft: 3

Artikel: De l'hydrogène à la place du diesel = Wasserstoff statt Diesel im ÖV

Autor: Hutter, Andreas / Koch, Nelson / Söderström, Thomas

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1037073>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



De l'hydrogène à la place du diesel

Utilisation de l'hydrogène pour les transports publics en Suisse | Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, le Conseil fédéral ambitionne de remplacer les bus diesel par des technologies de propulsion alternatives neutres en CO₂. Une étude a été réalisée afin d'analyser l'utilisation des technologies reposant sur l'hydrogène vert pour les transports publics suisses.

ANDREAS HUTTER, NELSON KOCH, THOMAS SÖDERSTRÖM

Ces dernières années, un intérêt croissant est porté à l'hydrogène en tant que vecteur énergétique. En Europe, le partenariat public-privé Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), établi en 2008, s'est fixé pour objectif de soutenir l'introduction des technologies de l'hydrogène sur le marché européen.[1] Entre 2014 et 2020, un budget total de 1,33 milliard d'euros a été investi dans un programme de recherche et d'innovation (R&I) afin de développer un porte-

feuille de solutions propres et efficaces. Et en juillet 2020, la Commission européenne a inscrit dans la durée sa volonté de développer la filière «hydrogène vert» pour atteindre ses objectifs climatiques en créant l'«European Clean Hydrogen Alliance».[2]

Cette alliance vise un déploiement ambitieux des technologies de l'hydrogène d'ici 2030. Elle a notamment pour objectif de coordonner la production d'hydrogène renouvelable et à faible émission de carbone, la demande dans le

domaine de la mobilité et dans d'autres secteurs, ainsi que le transport et la distribution d'hydrogène. Grâce à elle, l'UE prévoit des investissements cumulés dans l'hydrogène propre de 180 à 470 milliards d'euros d'ici 2050 afin de soutenir l'engagement de l'UE à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

En Suisse, le Conseil fédéral a chargé l'Office fédéral des transports (OFT) de mettre en œuvre la Stratégie énergétique pour les transports publics (TP). Actuellement, environ 6000 bus des TP

roulent au diesel à l'échelle nationale et les besoins en énergie primaire qui y sont liés sont estimés à environ 3 TWh/an.[3] Dans le cadre du programme «Stratégie énergétique 2050 pour les transports publics», l'OFT a démarré une étude afin d'examiner le potentiel de l'hydrogène dans les transports publics.[4] Un extrait des résultats concernant l'adéquation des bus à hydrogène au contexte suisse est présenté ci-après. L'étude complète sera, quant à elle, publiée début 2022 et pourra être téléchargée sur le site indiqué dans la référence [4].

L'un des avantages des bus à hydrogène réside dans leur autonomie, qui est comparable à celle des véhicules thermiques conventionnels. La principale alternative, également zéro émission, est le bus électrique à batterie. Grâce au développement de la technologie des batteries pour les voitures de tourisme, celui-ci est aujourd'hui nettement moins cher que les bus à hydrogène. Dans cet article, la consommation de carburant et les performances générales de ces deux technologies sont comparées à celles des bus diesel, en utilisant pour l'analyse les données provenant des lignes de référence pour le trafic régional et urbain considérées dans le cadre du projet Navig [5].

Les différents types de bus

Dans les bus à hydrogène, l'hydrogène peut être soit transformé directement en énergie cinétique par un moteur à combustion (bus de type HICEB, pour «hydrogen internal combustion engine bus»), soit transformé d'abord en énergie électrique via une pile à combustible qui entraîne ensuite un moteur électrique (bus de type FCEB, pour «fuel cell electric bus»). Le rendement «tank-to-wheel», c'est-à-dire la part d'énergie qui est effectivement transférée à la roue, est supérieur à 40% à pleine charge autant pour le HICEB que pour le FCEB, et ce, en tenant compte de toutes les pertes liées à la transmission. Tandis qu'un FCEB peut exploiter ce rendement sur quasiment toute la plage de régime du moteur, celui d'un HICEB diminue presque linéairement à bas régime, raison pour laquelle ce dernier affiche un rendement moyen moins élevé. En revanche, un bus entièrement électrique (BEB, pour «battery electric bus») atteint un rendement de plus de 70%.

Il existe aussi d'autres différences au niveau du poids à vide: les FCEB sont aujourd'hui généralement plus lourds que les bus diesel (DB pour «diesel bus») et les BEB un peu plus lourds encore en raison des batteries. Au niveau de la puissance nécessaire pour alimenter les auxiliaires, elle est généralement plus élevée pour les FCEB et les BEB, qui sont en principe équipés d'une pompe à chaleur pour le chauffage de l'habitacle, la chaleur dégagée par le moteur n'étant pas aussi importante que pour les DB. En outre, une capacité de réserve est également prise en compte pour les BEB afin de compenser le vieillissement de la batterie. Les paramètres utilisés dans l'étude sont résumés dans le **tableau 1**.

Définitions des modèles de consommation

Pour faire avancer le bus, le moteur doit fournir une force permettant de compenser (ou de surpasser en cas d'accélération du bus) les différentes forces représentées dans la **figure 1**, notamment la composante parallèle à la route de la force de gravitation ainsi que les forces dues à la résistance de l'air et à la résistance au roulement. Le moteur doit également fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement des auxiliaires (compresseurs pour l'ouverture des portes, assistance au freinage, etc.).

En plus de ces éléments, le modèle utilisé dans l'étude tient compte, pour les entraînements avec batteries (BEB et FCEB), de la possibilité de récupération d'énergie lors du freinage ou en descente, mais se limite en général à des hypothèses simplifiées. Par exemple, le comportement dynamique du moteur – c'est-à-dire la consommation d'énergie du moteur en fonction de son régime – n'est pas directement pris en compte, mais est intégré via le choix du rendement constant dépendant du type de parcours.

Le modèle montre que la résistance au roulement, la force d'accélération ainsi que la force nécessaire pour compenser la force de gravitation en montée ou en descente dépendent principalement du poids du bus. La résistance de l'air et la force d'accélération sont déterminées par le profil d'accélération, qui dépend lui-même fortement du profil d'altitude, de la répartition des arrêts sur la ligne de bus, mais aussi du volume de trafic et du style de conduite. Le projet Navig a effectivement montré que ce dernier influençait la consommation, et ce, jusqu'à 10%.

Pour tenir compte de ces dépendances, quatre lignes de référence des transports publics fribourgeois TPF ont été utilisées. Celles-ci comprennent deux lignes de transport régional typiques, caractérisées par une vitesse moyenne d'environ 40 km/h, un arrêt par kilomètre et un kilométrage journalier de 400 km,

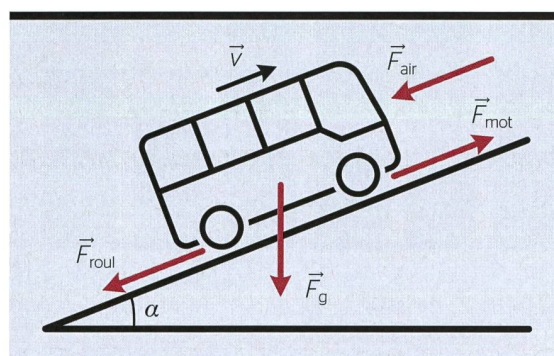


Figure 1 Forces prises en compte par le modèle.

	DB	HICEB	FCEB	BEB
Rendement	33% / 40% ¹⁾	36% / 43% ¹⁾	44%	73%
Masse à vide	12,6 t	12,6 t	14,4 t	14,6 t
Puissance des auxiliaires	2 kW	3 kW	4 kW	5 kW
Réserve de capacité	-	-	-	20%

Tableau 1 Paramètres des systèmes utilisés dans l'étude [4].¹⁾ La première valeur est utilisée pour les trajets locaux, au cours desquels le moteur tourne principalement à bas régime, et la deuxième pour les trajets régionaux, où le moteur fonctionne plutôt à pleine charge.

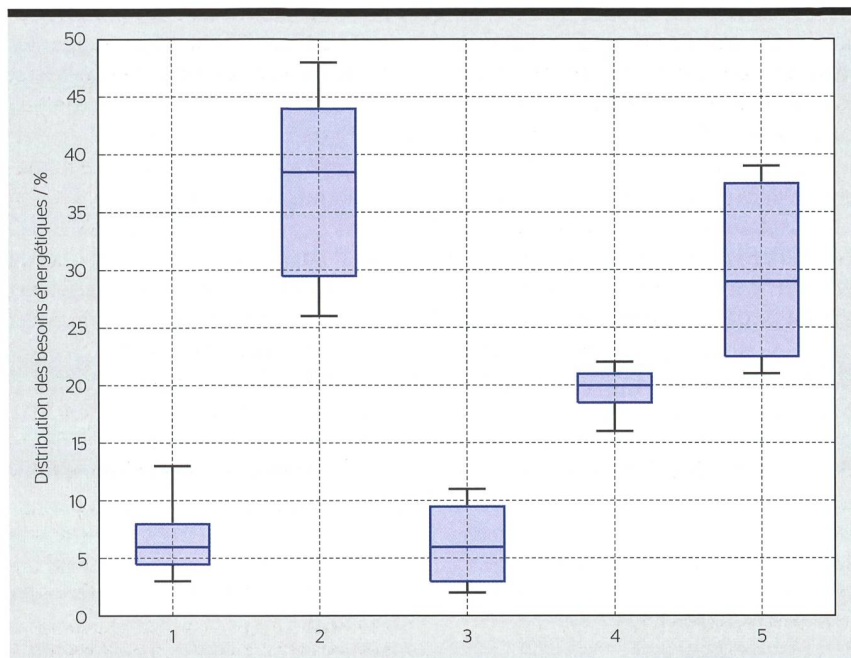


Figure 2 Distribution des besoins énergétiques liés à la consommation des auxiliaires (1), à l'accélération positive (2), au frottement de l'air (3), à la compensation des forces de résistance au roulement (4) et à l'élévation positive du véhicule (5).

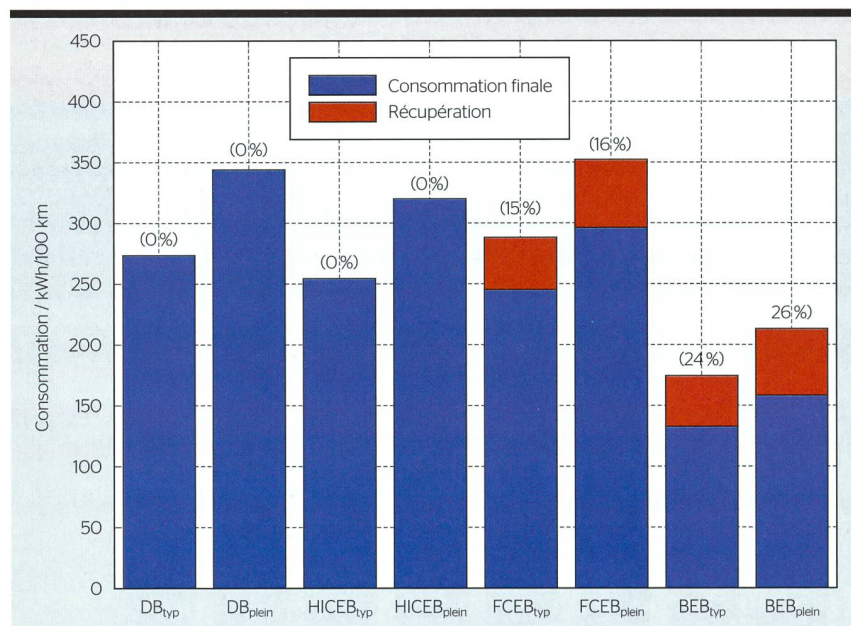


Figure 3 Consommations des différents types de bus en charge typique et en pleine charge (la part d'énergie récupérée est indiquée entre parenthèses) sur la ligne TPF 260.

ainsi que deux lignes de transport urbain avec une vitesse moyenne de 20 km/h, trois arrêts par kilomètre et un kilométrage journalier de 250 km. Il convient de noter que la pente moyenne, qui varie entre 1 et 2 % sur les lignes de référence, ne peut pas être utilisée comme critère de différenciation entre les lignes régionales et urbaines.

Analyse et comparaison de la consommation

L'analyse de la consommation pour les trajets de référence montre que la distribution des différents composants du modèle est similaire pour tous les types de bus étudiés. La consommation d'énergie pour les auxiliaires ainsi que la résistance de l'air ne jouent qu'un rôle secondaire dans la consommation totale d'énergie, qui est surtout déterminée par l'accélération et l'élévation du bus (figure 2). Sur les tronçons de référence évalués, ces deux composants représentent ensemble entre 64 % et 72 % de la consommation totale d'énergie. Ceci est intéressant, car ces composants déterminent l'énergie potentiellement récupérable au freinage, notamment lors de la descente.

L'influence du poids et de l'efficacité des différents types de bus est représentée à titre d'exemple dans la figure 3 pour l'une des lignes régionales, où l'on compare les bus remplis de passagers à une charge typique de 20 % de la pleine capacité. De manière générale, le HICEB présente une consommation inférieure d'environ 8 % à celle du bus diesel, ce qui s'explique par son rendement plus élevé. En raison de sa masse plus importante, le FCEB a besoin de plus d'énergie, ce qui est toutefois compensé par un taux de récupération d'énergie d'environ 18 % en moyenne. Les besoins en énergie du FCEB sont inférieurs d'environ 15 % (trajets régionaux) à 25 % (trajets urbains) à ceux d'un bus diesel, ces valeurs étant encore

Numéro de la ligne	DB / l		HICEB / kgH ₂		FCEB / kgH ₂		BEB / kWh	
	Typique	Plein	Typique	Plein	Typique	Plein	Typique	Plein
5	102,6	130,5	27,4	34,9	22,2	26,9	498,9	592,6
201	97,0	123,6	25,9	33,0	20,8	25,3	462,4	553,8
234	116,4	146,5	31,5	39,7	28,2	34,0	596,1	703,6
260	112,8	141,8	30,6	38,4	29,5	35,6	663,4	790,9

Tableau 2 Besoins quotidiens en énergie pour les lignes locales (5 et 201) de 250 km et les lignes régionales (234 et 260) de 400 km par jour ; les chiffres en gras excèdent la capacité de stockage typique de la technologie en question et les chiffres en rouge dépassent les capacités disponibles aujourd'hui sur le marché.

augmentées de quelques points de pourcentage à pleine charge. Le FCEB est donc toujours un peu plus efficace que le HICEB. Le BEB, qui permet de récupérer en moyenne environ 28 % de l'énergie totale, nécessite environ 60 %, soit 2,5 fois, moins d'énergie, ce qui fait de la propulsion électrique la technologie de loin la plus efficace.

L'autonomie constitue également un paramètre important, surtout pour les bus électriques – l'étude ayant analysé les bus qui sont rechargés au dépôt, généralement pendant plusieurs heures pendant la nuit. Il s'avère que les bus électriques doivent disposer de batteries de très grande capacité pour les trajets étudiés et que les capacités maximales actuellement disponibles sur le marché (environ 600 kWh) sont encore insuffisantes pour les trajets régionaux (tableau 2). Les bus à hydrogène ne présentent pas cette limitation et peuvent donc remplacer directement les bus diesel sur ces lignes.

Quel bus pour quel trajet?

Les bus à hydrogène peuvent remplacer directement les bus diesel et permettent une réduction de l'énergie de l'ordre de 10 à 30 %. Aujourd'hui, les bus disponibles sur le marché sont principalement des bus équipés de piles à combustible et de petites batteries d'une capacité maximale de 50 kWh permettant l'équilibrage des pics de charge et la récupération d'énergie. Actuellement, environ 200 de ces bus circulent dans différentes villes européennes. En termes de coûts d'investissement, ceux-ci sont aujourd'hui encore environ trois fois plus chers que les bus diesel. Outre une baisse de prix, qui viendra avec le volume, il existe encore un potentiel d'amélioration technique au niveau des

piles à combustible. En effet, leur durée de vie est actuellement de 20 000 à 30 000 h de fonctionnement: elles doivent donc être remplacées plusieurs fois pendant la durée de vie d'un bus.

Les bus électriques à batterie présentent quant à eux une réduction nettement plus importante des besoins en énergie. Ils ne seront toutefois pas utilisés pour toutes les lignes régionales suisses en raison de leur autonomie encore trop limitée pour un bon nombre de trajets. Même s'il est permis de supposer que la recherche dans le domaine des batteries continuera à progresser, il est plus judicieux de partir du principe que les bus à hydrogène représenteront, au moins à court terme, la seule alternative au remplacement des bus diesel pour une grande partie des quelque 3000 bus utilisés dans le transport régional de personnes.

Deux centrales de 225 MW

La Stratégie énergétique vise à éliminer totalement les émissions de CO₂. Pour atteindre cet objectif dans les transports publics avec des bus à hydrogène, le carburant doit être produit exclusivement à partir d'énergie renouvelable. Aujourd'hui, avec un besoin annuel mondial de 70 Mt pour l'industrie, l'hydrogène est presque exclusivement produit à partir de combustibles fossiles. La technologie la plus mûre et commercialement disponible pour produire de l'hydrogène vert est actuellement l'électrolyse de l'eau. L'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM), qui est aujourd'hui utilisée à grande échelle, présente un rendement de plus de 60 %. Les besoins annuels en énergie nécessaires à l'alimentation de 3000 bus à hydrogène pour les trajets régionaux peuvent être estimés à envi-

ron 2,03 TWh/an avec les paramètres cités ci-dessus. Si l'on suppose que les 3000 véhicules restants, destinés aux lignes locales, seront convertis en bus électriques à batterie, 0,66 TWh seront nécessaires. Pour fournir cette énergie, une centrale électrique d'une puissance d'environ 225 MW est requise pour chaque type de bus. La centrale qui servira à la production d'hydrogène vert devrait tourner en continu, tandis que la centrale destinée à la recharge des batteries des bus électriques ne sera exploitée que pendant la nuit. Ces chiffres reflètent les défis à relever pour mettre en œuvre la Stratégie énergétique.

Références

- [1] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, « Mission and objectives ». fch.europa.eu/page/mission-objectives
- [2] European Clean Hydrogen Alliance. ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance_en
- [3] OFEN, « Abschätzung des Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten – Grundlagestudie zum Postulatsbericht 19.3000 », rapport du 12 octobre 2020. pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10413
- [4] A. Hutter, « Etude du potentiel de l'hydrogène dans les TP », projet du programme « Stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050) » de l'Office fédéral des transports (OFT). bav.admin.ch/bav/fr/home/themes-generaux/recherche-et-innovation/programmes-de-recherche-et-innovation/setp2050/resultats-de-projets.html
- [5] V. Robatel, F. Vannel, « Développement d'un système embarqué dans les bus pour favoriser une conduite écologique », projet SETP 2050 P-084 Navig, 12 janvier 2021. bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/schlussbericht-p084.pdf

Auteurs

D^r **Andreas Hutter** est Group Leader Energy Systems au Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM).
→ CSEM, 2000 Neuchâtel
→ andreas.hutter@csem.ch

Nelson Koch est R&D Engineer au CSEM.
→ nelson.koch@csem.ch

D^r **Thomas Söderström** est Deputy Business Units Leader Photovoltaics au CSEM.
→ thomas.soederstroem@csem.ch

EMOTIONALE GESCHICHTEN
PACKEND IN SZENE SETZEN.

somedia
PRODUCTION

PRINT VIDEO WEB

www.somedia-production.ch

**Batterie mit oder
ohne Räder?**



Unsere bidirektionale
Ladestation macht
Ihr Fahrzeug zum
Stromspeicher!



Erfahren Sie mehr im Video.
Jetzt QR-Code scannen!
Mehr Informationen auf
sun2wheel.ch

*kompatible Fahrzeuge:
Nissan, Mitsubishi, Honda.



Wasserstoff statt Diesel im ÖV

Wasserstofftechnologien für den öffentlichen Verkehr in der Schweiz | Im Rahmen der Energiestrategie 2050 strebt der Bundesrat unter anderem an, Dieselsebusse durch alternative, CO₂-neutrale Antriebstechnologien zu ersetzen. Eine Studie wurde durchgeführt, um die Nutzung von Technologien, die auf grünem Wasserstoff basieren, für den öffentlichen Verkehr in der Schweiz zu analysieren.

ANDREAS HUTTER, NELSON KOCH, THOMAS SÖDERSTRÖM

In den letzten Jahren ist das Interesse an Wasserstoff als Energieträger gewachsen. In Europa hat sich die 2008 gegründete öffentlich-private Partnerschaft Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) zum Ziel gesetzt, die Einführung von Wasserstofftechnologien auf dem europäischen Markt zu unterstützen [1]. Zwischen 2014 und 2020 wurde ein Gesamtbudget von 1,33 Mia. Euro in ein Forschungs- und Innovationsprogramm investiert, um ein Portfolio an

sauberen und effizienten Lösungen zu entwickeln. Im Juli 2020 hat die Europäische Kommission mit der Gründung der European Clean Hydrogen Alliance ihren Willen, die grüne Wasserstoffbranche zur Erreichung ihrer Klimaziele zu entwickeln, dauerhaft festgeschrieben.[2]

Diese Allianz zielt auf einen ehrgeizigen Einsatz von Wasserstofftechnologien bis 2030 ab, indem sie die Produktion von möglichst erneuerbarem Wasserstoff, die Nachfrage in der

Mobilität und anderen Sektoren sowie den Transport und die Verteilung von Wasserstoff zusammenbringt. Mit dieser Allianz erwartet die EU bis 2050 kumulative Investitionen in sauberen Wasserstoff in Höhe von 180 bis 470 Mia. Euro, um die Verpflichtung der EU zur Erreichung der Kohlenstoffneutralität bis 2050 zu unterstützen.

In der Schweiz hat der Bundesrat das Bundesamt für Verkehr (BAV) beauftragt, die Energiestrategie für den öffentlichen Verkehr (ÖV) umzusetzen.

Aktuell werden in der Schweiz rund 6000 Busse im ÖV mit Dieselmotoren betrieben, und der damit verbundene Primärenergiebedarf wird auf rund 3 TWh pro Jahr geschätzt.[3] Im Rahmen des Programms «Energiestrategie 2050 für den öffentlichen Verkehr» hat das BAV eine Studie zur Untersuchung des Potenzials von Wasserstoff im ÖV in Auftrag gegeben.[4] Ein Auszug der Resultate bezüglich der Eignung von Wasserstoffbussen für das Schweizer Umfeld wird in diesem Beitrag präsentiert. Die vollständige Studie wird ihrerseits Anfang 2022 veröffentlicht und kann auf der in der Referenz [4] angegebenen Website heruntergeladen werden.

Einer der Vorteile von wasserstoffbetriebenen Bussen ist ihre Reichweite, die mit der herkömmlicher Verbrennungsfahrzeuge vergleichbar ist. Die wichtigste, ebenfalls emissionsfreie Alternative ist der batteriebetriebene Elektrobuss. Dank der Entwicklung der Batterietechnologie für Pkw ist dieser heute deutlich günstiger als Wasserstoffbusse. In diesem Beitrag werden der Kraftstoffverbrauch sowie die generelle Eignung dieser beiden Technologien mit Dieselmotoren verglichen, wobei Daten von Referenzstrecken für Regional- sowie auch Ortsverkehr aus dem Navig-Projekt [5] für die Analyse herangezogen werden.

Unterschiedliche Bustypen

In wasserstoffbetriebenen Bussen kann Wasserstoff entweder direkt von einem Verbrennungsmotor in Bewegungsenergie umgewandelt werden (Bustyp HICEB -hydrogen internal combustion engine bus) oder zunächst über eine Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt werden, die dann einen Elektromotor antreibt (Bustyp FCEB -fuel cell electric bus). Der sogenannte tank-to-wheel-Wirkungsgrad, also der Anteil der Energie, der schliesslich auf die Strasse gebracht wird, liegt bei Vollast für HICEB und FCEB bei über 40%, wobei hier auch alle Umwandlungsverluste (Getriebe, bei FCEB auch Batterie etc.) berücksichtigt sind. Während ein FCEB diesen Wirkungsgrad fast über den gesamten Drehzahlbereich des Motors ausnutzen kann, hat ein HICEB einen geringeren durchschnittlichen Wert, da der Wirkungsgrad bei niedrigen Drehzahlen fast linear abfällt. Ein batteriebetriebener,

rein elektrischer Bus (battery electric bus - BEB) hat dagegen einen Wirkungsgrad von über 70%.

Weitere Unterschiede findet man beim Leergewicht, wo FCEB heute noch allgemein und BEB aufgrund der Batterien etwas schwerer als Dieselmotorenbusse sind, sowie auch bei der benötigten Leistung für Hilfsantriebe, da FCEB und BEB zusätzlich mit einer Wärmepumpe ausgestattet sind, weil die Abwärme des Motors nicht zum Heizen ausreicht. Zudem wird für den BEB wegen der Batteriealterung eine Reservekapazität mitberücksichtigt. Die in der Studie verwendeten Parameter sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Definition von Verbrauchsmodellen

Um den Bus vorwärts zu bewegen, muss der Motor eine Kraft aufbringen, die die verschiedenen in **Bild 1** dargestellten Kräfte ausgleicht (oder bei einer Beschleunigung des Busses überwindet), insbesondere die fahrbahnparallele Komponente der Gravitationskraft sowie die Kräfte aufgrund des Luft- und Rollwiderstands. Der Motor muss auch die Energie liefern, die für den Betrieb der Hilfseinrichtungen (Kompressoren zum Öffnen der Türen, Bremsassistent usw.) erforderlich ist.

Zusätzlich zu diesen Elementen berücksichtigt das in der Studie verwendete Modell bei Batterieantrieben

(BEB und FCEB) auch die Möglichkeit der Energierückgewinnung beim Bremsen oder Bergabfahren, beschränkt sich aber im Allgemeinen auf vereinfachte Annahmen. Beispielsweise wird das dynamische Verhalten des Motors - d. h. der Energieverbrauch des Motors in Abhängigkeit von seiner Drehzahl - nicht direkt berücksichtigt, sondern über die Wahl eines konstanten, von der Art der Fahrt abhängigen Wirkungsgrads einbezogen.

Das Modell zeigt, dass der Rollwiderstand, die Beschleunigungskraft sowie die Kraft, die benötigt wird, um die Gravitationskraft beim Auf- und Absteigen zu kompensieren, hauptsächlich vom Gewicht des Busses abhängt. Der Luftwiderstand und die Beschleunigungskraft werden durch das Beschleunigungsprofil bestimmt, das wiederum stark vom Höhenprofil, der Verteilung der Haltestellen auf der Buslinie, aber auch vom Verkehrsaufkommen und dem Fahrstil abhängt. Das Navig-Projekt hat gezeigt, dass Letzterer den Verbrauch beeinflusst, und zwar um bis zu 10%.

Um diese Abhängigkeiten adäquat zu berücksichtigen, wurden vier Referenzstrecken der Verkehrsbetriebe Freiburg TPF herangezogen. Diese Strecken beinhalten zwei typische Regionalverkehrslinien, die mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 40 km/h, einem Halt pro Kilometer

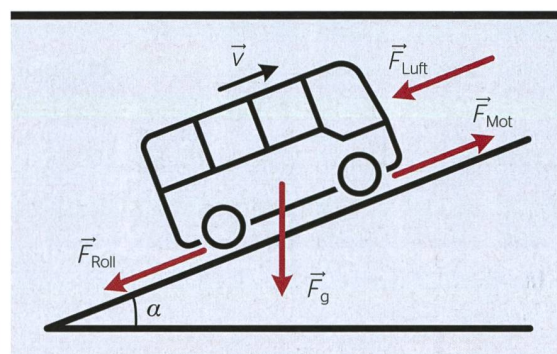


Bild 1 Im Modell verwendete Systemparameter. [4]

	DB	HICEB	FCEB	BEB
Wirkungsgrad	33% / 40% ¹⁾	36% / 43% ¹⁾	44%	73%
Leergewicht	12,6 t	12,6 t	14,4 t	14,6 t
Leistung für Hilfsantriebe	2 kW	3 kW	4 kW	5 kW
Reservekapazität	-	-	-	20%

Tabelle 1 Verwendete Systemparameter [4]. ¹⁾ Der erste Wert wird für lokale Fahrten verwendet, bei denen der Motor hauptsächlich mit niedriger Drehzahl läuft, und der zweite Wert für regionale Fahrten, bei denen der Motor eher unter Vollast läuft.

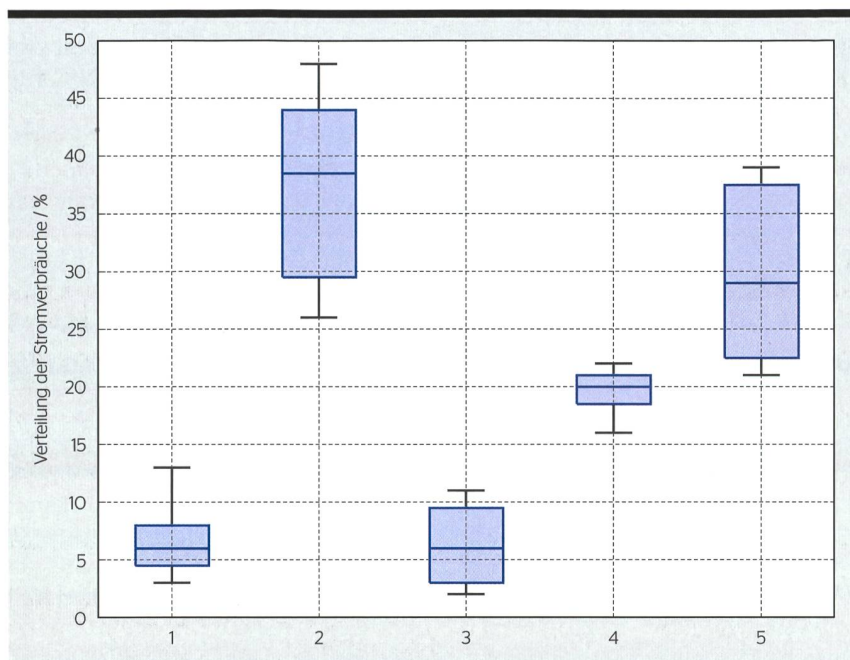


Bild 2 Energiebedarf aller Bustypen und Referenzstrecken als Funktion des Verbrauchs der Hilfsantriebe (1), der Beschleunigung (2), des Luftwiderstands (3), des Rollwiderstands (4) und des Anteils der Gravitation zur Überwindung der Höhendifferenz (5).

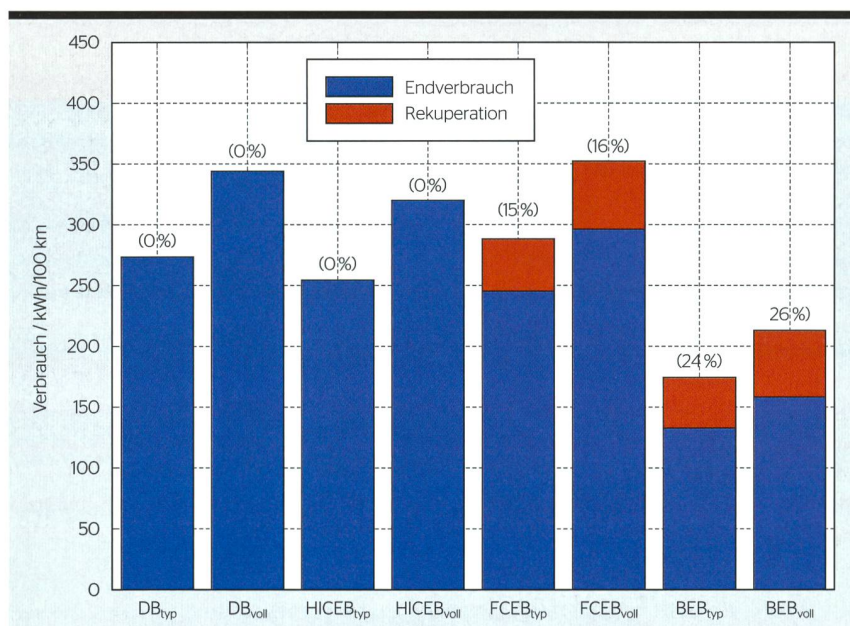


Bild 3 Verbrauch verschiedener Bustypen mit typischer und voller Beladung (Anteil der regenerierten Energie in Klammern) auf der TPF Linie 260.

und einer Tageskilometerleistung von 400 km charakterisiert sind, sowie zwei Ortsverkehrslinien mit 20 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit, drei Haltestellen pro Kilometer und einer Tageskilometerleistung von 250 km. Es sei angemerkt, dass die durchschnittliche Steigung, die auf den Referenzstrecken zwischen 1% und 2% variiert, nicht als Unterscheidungsmerkmal zwischen Regional- und Ortsverkehrslinien herangezogen werden kann.

Verbrauchsanalyse und Vergleich

Die Analyse des Verbrauchs für die Referenzfahrten zeigt, dass die Verteilung der verschiedenen Komponenten des Modells bei allen untersuchten Bustypen ähnlich ist. Der Energieverbrauch für Hilfseinrichtungen sowie der Luftwiderstand spielen nur eine untergeordnete Rolle im Gesamtenergieverbrauch, der vor allem durch die Beschleunigung und das Anheben des Busses bestimmt wird (**Bild 2**). Auf den ausgewerteten Referenzstrecken machen diese beiden Komponenten zusammen zwischen 64% und 72% des Gesamtenergieverbrauchs aus. Dies ist interessant, da diese Komponenten die potenziell rückgewinnbare Energie beim Bremsen, insbesondere bei der Talfahrt, bestimmen.

Der Einfluss des Gewichts und des Wirkungsgrads der unterschiedlichen Bustypen ist in **Bild 3** exemplarisch für eine der Regionalstrecken dargestellt, wobei für die typische Beladung mit ca. 20% der vollen Kapazität gerechnet wird. Generell weist der HICEB wegen seines höheren Wirkungsgrads einen um ca. 8% geringeren Verbrauch als der Dieselbus auf. Der Brennstoffzellenbus benötigt durch die grössere Masse mehr Energie, was aber durch eine Regenerierungsrate von im Durchschnitt ca. 18% kompensiert wird. Der Energiebedarf ist beim FCEB ca. 15%

Nummer der Linie	DB / l		HICEB / kgHz		FCEB / kgHz		BEB / kWh	
	Typisch	Voll	Typisch	Voll	Typisch	Voll	Typisch	Voll
-								
5	102,6	130,5	27,4	34,9	22,2	26,9	498,9	592,6
201	97,0	123,6	25,9	33,0	20,8	25,3	462,4	553,8
234	116,4	146,5	31,5	39,7	28,2	34,0	596,1	703,6
260	112,8	141,8	30,6	38,4	29,5	35,6	663,4	790,9

Tabelle 2 Täglicher Energiebedarf für Ortsstrecken (5 und 201) mit 250 km und Regionalstrecken (234 und 260) mit 400 km pro Tag; die Zahlen in fett übersteigen die typische Speicherkapazität der jeweiligen Technologie. Rot dargestellte Zahlen übersteigen heute kommerziell erhältliche Kapazitäten.

(Regionalstrecken) bis 25% (Ortsstrecken) geringer als für einen Dieselsbus, wobei diese Werte bei Volllast noch um einige Prozentpunkte höher liegen. Der FCEB ist damit immer etwas effizienter als der HICEB. Der BEB, bei dem im Schnitt ca. 28% der Gesamtenergie regeneriert werden können, benötigt rund 60% und somit 2,5-mal weniger Energie, was den Elektroantrieb zur weitaus effizientesten Technologie macht.

Die Reichweite ist auch ein wichtiger Parameter, besonders für Elektrobusse – in der Studie wurden Busse analysiert, die im Depot aufgeladen werden, in der Regel über Nacht für mehrere Stunden. Es hat sich gezeigt, dass Elektrobusse für die untersuchten Fahrten über Batterien mit sehr hoher Kapazität verfügen müssen und dass die derzeit erhältlichen maximalen Kapazitäten (etwa 600 kWh) für regionale Fahrten noch nicht ausreichen (Tabelle 2). Wasserstoffbusse weisen diese Einschränkung nicht auf und können daher Dieselsbusse auf diesen Strecken direkt ersetzen.

Welcher Bus für welche Strecke?

Wasserstoffbusse können Dieselsbusse direkt ersetzen und ermöglichen eine Reduktion des Energiebedarfs um 10% bis 30%. Kommerziell stehen heute meist Busse zur Verfügung, die mit Brennstoffzellen und kleinen Batterien im Bereich von bis zu 50 kWh zum Abgleich der Lastspitzen arbeiten. Aktuell sind in Europa rund 200 Busse in mehreren europäischen Städten unterwegs. Bezüglich Investitionskosten sind diese Busse heute noch dreimal so teuer wie Dieselsbusse. Neben einer Preissenkung, die mit steigendem Volumen eintreten wird, gibt es

bei den Brennstoffzellen noch Potenzial für technische Verbesserungen. Denn ihre Lebensdauer liegt derzeit bei 20 000 bis 30 000 Betriebsstunden: Sie müssen also während der Lebensdauer eines Busses mehrmals ausgetauscht werden.

Batteriebetriebene Elektrobusse verbrauchen deutlich weniger Primärenergie, werden aber aufgrund der heutigen Reichweitenlimitierungen bei vielen Schweizer Regionallinien nicht zum Einsatz kommen. Auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass die rasch voranschreitende Batterieforschung weitere Fortschritte machen wird, werden Wasserstoffbusse für viele der rund 3000 Busse, die nur im regionalen Personenverkehr eingesetzt werden, zumindest kurzfristig die einzige Alternative zu Dieselsbussen darstellen.

Zwei Kraftwerke mit 225 MW

Die Energiestrategie will die CO₂-Emission komplett eliminieren. Um dieses Ziel im öffentlichen Verkehr mit Wasserstoffbussen umzusetzen, muss der Treibstoff aber ausschliesslich mit erneuerbarer Energie hergestellt werden. Wasserstoff, mit einem globalen Jahresbedarf von 70 Mio. t für die Industrie, wird heute fast nur aus fossilen Brennstoffen erzeugt. Die zurzeit technisch ausgereifteste kommerziell verfügbare Technologie, um sogenannten grünen Wasserstoff herzustellen, ist die Wasserelektrolyse. Die Proton-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyse, die heute im grossindustriellen Ausmass betrieben wird, hat einen Wirkungsgrad von über 60%. Der für die Versorgung von 3000 regionalen Bussen nötige Energiebedarf kann mit den oben angeführten Parametern auf ca. 2,03 TWh pro Jahr abgeschätzt wer-

den. Wenn man davon ausgeht, dass die restlichen 3000 Fahrzeuge als batteriebetriebene Elektrobusse für lokale Linien umgerüstet werden, werden dafür 0,66 TWh benötigt. Um diese Energie zu liefern, wird für jeden Busstyp ein Kraftwerk mit einer Leistung von etwa 225 MW benötigt. Ein Kraftwerk, das zur Herstellung von grünem Wasserstoff dient, muss dabei kontinuierlich laufen, während das Kraftwerk zum Aufladen der Batterien der Elektrobusse nur nachts laufen muss. Diese Zahlen spiegeln die Herausforderungen wider, welche für die Umsetzung der Energiestrategie gemeistert werden müssen.

Referenzen

- [1] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, «Mission and objectives». fch.europa.eu/page/mission-objectives
- [2] European Clean Hydrogen Alliance. ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-clean-hydrogen-alliance_en
- [3] BFE, «Abschätzung des Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten – Grundlagenstudie zum Postulatsbericht 19.3000». Bericht vom 12. Oktober 2020. pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10413
- [4] A. Hutter, «Étude du potentiel de l'hydrogène dans les TP», projet du programme «Stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050)» de l'Office fédéral des transports (OFT). www.bav.admin.ch/bav/de/home/allgemeine-themen/forschung-innovation/forschungs-innovationsprogramme/ES-oeV2050/laufende-abgeschlossene-projekte.html
- [5] V. Robatel, F. Vannel, «Développement d'un système embarqué dans les bus pour favoriser une conduite écologique», projet SETP 2050 P-084 Navig, 12 janvier 2021. bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/schlussbericht-p084.pdf

Autoren

Dr. **Andreas Hutter** ist Group Leader Energy Systems beim Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM).
→ [CSEM, 2000 Neuenburg](mailto:andreas.hutter@csem.ch)
→ andreas.hutter@csem.ch

Nelson Koch ist R&D-Ingenieur beim CSEM.
→ nelson.koch@csem.ch

Dr. **Thomas Söderström** ist Deputy Business Units Leader Photovoltaics beim CSEM.
→ thomas.soederstroem@csem.ch