

Verflüssigtes Biogas als Treibstoff im Schweizer Schwerlastverkehr

Fabian Ruoss, Zoe Stadler, Prof. Dr. Elimar Frank - OST Ostschweizer Fachhochschule

Tags: LBG (Liquefied Biogas) aus biogenen Abfallstoffen / noch keine Produktion in der Schweiz / Well-to-Wheel-Analyse (Produktion, Transport, Lagerung, Verwendung) / direkte Methan-Emissionen, Venting / Erneuerbarkeit des Stroms für Produktion entscheidend / klimarelevante Emissionen deutlich reduziert, bis zu 70 Prozent gegenüber Diesel

Die Logistikbranche hat zunehmend den Anspruch, den Transport von Gütern und Waren fossilfrei zu gestalten. Ein Team der OST Ostschweizer Fachhochschule hat zusammen mit dem Transportunternehmen Krummen Kerzers AG und mit Lidl Schweiz AG untersucht, ob und in welchem Ausmass die Substitution von konventionellem Dieselmotortreibstoff durch biologisch hergestelltes und verflüssigtes Methan (LBG) für schwere Nutzfahrzeuge in der Schweiz ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist.

Europaweit wird zunehmend verflüssigtes Methan „LNG“ (Liquefied Natural Gas) als Treibstoff für den Schwerlastverkehr eingesetzt. Der Umstieg von Diesel auf LNG bietet bereits eine CO₂-Minderung von bis zu 20 Prozent. Die weitere Transformation auf das erneuerbare verflüssigte Biomethan LBG (Liquefied Biogas) ist danach nutzerseitig ohne zusätzliche technische Anpassungen möglich.

LBG ist tiefkaltes, verflüssigtes Methan (ca. -162 °C bei 1 bar Absolutdruck), das im Gegensatz zu LNG aus biologischen Rohstoffen hergestellt wird. Zur Herstellung von LBG werden nachwachsende Rohstoffe oder biologische Abfälle verwendet. In der Schweiz existiert aktuell keine LBG-Produktion. Beim Import muss darauf geachtet werden, dass das LBG aus biogenen Abfällen produziert wird, da beispielsweise nachwachsende Rohstoffe als Substrat für eine Biogas-Anerkennung in der Schweiz nicht zugelassen sind. Durch die Verwendung von biologischen Rohstoffen ist der Kohlenstoffkreislauf bei der Verbrennung von LBG geschlossen und es wird kein zusätzliches CO₂ in die Atmosphäre abgegeben. Flüssiges Methan hat eine ca. 600-Mal höhere Dichte als Methan bei Standardbedingungen und ist deshalb für den Einsatz im Schwerlastverkehr sehr gut geeignet. Zur Verflüssigung werden Kühlkreisläufe eingesetzt. Die eingesetzte Technologie ist abhängig von der Anlagengrösse. Für kleine Anlagen, wie sie oft bei LBG-Produktionen mit einer Jahresproduktion zwischen 1'000 bis mehreren 10'000 Tonnen vorkommen, wird oft die Mixed Refrigerant Technology verwendet, welche auf mehreren verschiedenen Kältemitteln basiert [1]. Der Energiebedarf für kleine Verflüssigungsanlagen liegt im Bereich von 0.7 bis 1.8 kWh pro kg LNG.

Aktuell ist der Markt für verflüssigtes Biogas noch klein. In der Schweiz gibt es noch keine Produktion, in Europa sind einige Anlagen seit mehreren Jahren in Betrieb (insbesondere in Skandinavien) und eine steigende Anzahl in Planung, davon manche kurz vor einem Produktionsstart. Wichtig dabei für die Anerkennung des LBG in der Schweiz ist, dass die Substrate für die Produktion aus biogenen Abfallstoffen stammen, ansonsten kann keine (ökonomisch relevante) Befreiung von der Mineralölsteuer und perspektivisch auch keine Reduktion der LSVA-Abgabe erreicht werden.

Das Ziel des Projekts ist zu untersuchen, ob und wie LBG ökologisch und ökonomisch sinnvoll in der Schweiz im Schwerlastverkehr eingesetzt werden kann. Hierzu analysiert das Projektteam den Energiebedarf und die Emissionen während der ganzen Wertschöpfungskette von der Produktion des LBG über den Transport und die Lagerung bis hin zur Verwendung im Fahrzeug und führt damit eine sogenannte Well-to-Wheel-Analyse

durch. Dabei werden nicht nur die direkten CO₂-Emissionen bestimmt, sondern es werden auch andere relevante Treibhausgase als CO₂-Äquivalente sowie sonstige Schadstoffe ermittelt.

Für das Projekt wurden LNG-Lkw mit verschiedenen Motorentechnologien (HPDI und Otto) und eine LNG Tankstelle angeschafft.

Die Untersuchungen werden finanziell vom Bundesamt für Energie, dem Forschungsfonds Gas (FOGA) der schweizerischen Gasindustrie und der Lidl Schweiz AG unterstützt. Umsetzungspartner sind die Kruppen Kerzers AG und Lidl Schweiz AG.

Methodik

Da während des Projektes pandemiebedingt nur limitiert LBG zur Verfügung stand, wurden die meisten Messungen mit LNG durchgeführt. Die beiden Kraftstoffe sind chemisch annähernd identisch. Der Einfluss auf die Messergebnisse ist deshalb marginal; er liegt hauptsächlich bei der Betrachtung der Ökobilanz der gesamten Herstellungskette inklusive Produktion des Biogases. Chemisch bleiben die Emissionen eines Lkw die gleichen, wenn dieser mit LNG oder mit LBG betrieben wird. Die CO₂-Emissionen bei der Verwendung von LBG sind aber nicht klimawirksam, da zuvor dieselbe Menge CO₂ durch das verwendete Substrat aufgenommen wurde.

Ein wichtiger Punkt, welcher bei der ökologischen Beurteilung von LBG und LNG zu beachten ist, sind direkte Methanemissionen in allen Prozessschritten. Methan ist ein 28 mal stärkeres Treibhausgas als CO₂ [2]. Dadurch fallen direkte Methan-Emissionen 28-mal stärker ins Gewicht als bei der Verbrennung von Methan, bei der CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Dies muss bei allen Herstell- und Verwendungsschritten von LBG und LNG berücksichtigt werden (Produktion, Aufbereitung, Transport, Lagerung, Betrieb). Das bedeutet, dass Leckagen und sonstige Methanemissionen sowohl in der Produktion des Biogases sowie auch im Transport und Einsatz des LBG zu prüfen und zu vermeiden sind. Daneben sind das Substrat, der Energiebedarf der Biogas- und LBG-Produktion, der Transport des LBG an den Verwendungsort inklusive Tankstellenbetrieb, sowie der Kraftstoffverbrauch der Lkw entscheidende Faktoren bei der ökologischen Beurteilung.

Um die Emissionen von Methan und CO₂ über die Wertschöpfungskette hinweg bestimmen zu können, wurden im Projekt einerseits Messungen an Tankstelle und Fahrzeugen durchgeführt und andererseits Mess- oder Dimensionierungswerte von bestehenden LBG-Produktionsanlagen verwendet.

Das flüssige Methan wird sowohl im Lkw wie auch in der Tankstelle in vakuumisolierten Tanks gelagert, ohne aktive Kühlung. Trotz Vakuumisolation erwärmt sich das flüssige Methan von anfänglich -162 °C (1 bar), wobei ein Teil des Methans gasförmig wird und der Absolutdruck im Tank steigt. Würde dieser 16 bar überschreiten, müsste aus Sicherheitsgründen Gas aus den Tanks abgeführt werden. Ist kein geeignetes System zur Speicherung dieser Methanemissionen vorhanden (z.B.: Rückverflüssigung, Einspeisung in das Erdgasnetz, CNG-Tankstelle), wird das Methan an die Umgebung abgegeben. Das kann beispielsweise vorkommen, wenn ein Lkw zu lange (d.h. > 5 Tage) nicht bewegt wird oder an einer Tankstelle zu wenig getankt wird. Durch die Entnahme von Gas aus den Tanks sinken Druck und Temperatur wieder. Zur Quantifizierung solcher Emissionen wurde ein Messsystem entwickelt. Zusätzlich wurden Fahrzeuge und Tankstelle mittels einer Gascam auf Leckage geprüft. Die Emissionen der Lkw (LNG HPDI, LNG Otto, Diesel) wurden über die Flottenmanagementsysteme der Hersteller über den Zeitraum von einem Jahr untersucht und verglichen. Zusätzlich wurden Referenzmessungen für alle drei Motorentechnologien mittels PEMS (Portable Emission Measurement System) gemacht. Dabei durchliefen die Lkw mehrfach mit derselben Beladung ein RDE-Prüfverfahren (Real Driving Emissions).

Um Lessons Learnt aus dem Betrieb einer LNG-Tankstelle und LNG-Lkw-Flotte zu formulieren, wurden die Erfahrungen an den eigenen beiden Tankstellen sowie bei der eigenen Lkw-Flotte durch die Partner der Projektgruppe protokolliert.

Alle detaillierten Ergebnisse werden bis Ende 2021 in einem Projektabschlussbericht publiziert. Ausgewählte Zwischenergebnisse sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

Ergebnisse

LBG Produktion

Im Rahmen dieses Projektes fand ein Austausch mit drei LBG-Produktionsanlagen statt, die sich hinsichtlich Grösse, verwendeter Technologien und Energiezufuhr sowie der Verwendung von Substraten unterscheiden. Die verfügbaren Informationen reichen nicht aus, um detailliertere Aussagen zum Vergleich einzelner Aspekte zu treffen. Allgemein konnte aber festgestellt werden, dass es (a) ökonomisch valable Optionen für Verflüssigungsanlagen bereits ab Produktionsmengen von etwa 5 Tonnen pro Tag gibt, (b) die Erneuerbarkeit der Strom- und ggf. Wärmezufuhr bei der Produktion entscheidend ist, und (c) die transportbedingten Emissionen dann eine untergeordnete Rolle für die Well-to-Wheel Bilanz spielen. Die bisherigen Berechnungen für eine Anlage in Skandinavien (Produktionskapazität etwa 20 Tonnen pro Tag) zeigen, dass Emissionsminderungen von bis zu 82 Prozent gegenüber fossilem Diesel (95.1 g CO₂, eq/MJ, das entspricht den durchschnittlichen Emissionen von in Europa verwendetem Diesel bezogen auf die benötigte Energie [3]) erreicht werden können, sofern erneuerbare Energie für die Produktion eingesetzt wird. Ansonsten reduziert sich die Emissionsminderung auf 46 Prozent. Die LBG Produktion einschliesslich Verflüssigung wurde mit 8 g CO₂, eq/MJ berechnet, die verbleibenden Emissionen von nochmals etwa 9 g CO₂, eq/MJ können durch die Verringerung der Transportdistanz (bei gleicher Anlagengrösse) und das konsequente Vermeiden von Ventings beim Tankstellen- und LKW-Betrieb (siehe nächster Abschnitt) nochmals erheblich reduziert werden.

Tankstelle

Der Transport des LBG von Skandinavien in die Schweiz mit einem Diesel-Lkw sowie die Lagerung des LBG in der Tankstelle haben etwa den selben Einfluss wie die LBG Produktion (8.8 g CO₂, eq/MJ). Diese Emissionen lassen sich durch den Transport des LBG mit LBG betriebenen Lkw deutlich reduzieren. 4.2 g CO₂, eq/MJ sind auf Methanemissionen der Tankstelle zurückzuführen. Diese entstehen durch sogenanntes Venting. Bei einem Venting wird Methan aus einem Lkw-Tank an die Tankstelle zurückgeführt. Liegt der Druck in der Tankstelle über 9.5 bar, geht das Methan nicht in die Tankstelle, sondern wird an die Umgebung abgegeben, um einem zu schnellen Erwärmen des Methans in der Tankstelle entgegen zu wirken. Diese Ventings können durch einen höheren Methanverbrauch (ca. 2000 kg pro Tag) an der Tankstelle auf nahezu Null reduziert werden. Der elektrische Energiebedarf der Tankstelle liegt bei knapp 0.07 Prozent der betankten Energiemenge und hat damit kaum Einfluss auf die Emissionen.

Lkw

Bei zwei LNG-Lkw sowie einem Diesel-Lkw wurden Abgasmessungen durchgeführt, um die effektiven Emissionen feststellen zu können (inklusive Methanschlupf). Es sind Unterschiede zwischen den verschiedenen Technologien von LNG-Lkw bemerkbar (Abbildung 1). So weist ein Fahrzeug mit Ottomotor (Lambda = 1) höhere CO₂-Emissionen auf als ein Fahrzeug mit HPDI-Motor (high pressure direct injection), welches für die Zündung jedoch zusätzlich noch Diesel einsetzt. Der höhere Verbrauch des Lkw mit Otto-Motor ist auf die geringere Effizienz dieser Technologie gegenüber dem Dieselprinzip zurückzuführen. HPDI-Motoren können nicht vollständig auf LBG umgestellt werden, da immer ein Rest von ca. 10 Prozent (Masse) an Diesel benötigt wird.

Durch den Ersatz von fossilem Diesel durch LBG aus Norwegen können die Emissionen von 1044 g CO₂, eq/km auf bis zu 270 CO₂, eq/km gesenkt werden (Abbildung 2). Dies noch ohne Optimierung des Transportes oder der Tankstelle. Der Einsatz von fossilem LNG lohnt sich aus ökologischer Sicht bezogen auf die CO₂, eq Emissionen nur für Lkw mit HPDI Motoren. Als Basis für die LNG-Emissionen dient der Referenzwert von 74.5 g CO₂, eq/MJ [3] (durchschnittliche Emissionen von in Europa verwendetem LNG bezogen auf die benötigte

Energie) plus die Emissionen von 4.2 g CO₂, eq/MJ für die Emissionen bei der Lagerung in der Tankstelle. Lkw mit Otto-Motoren zeigen mit LNG höhere CO₂, eq-Emissionen als das Diesel-Referenzfahrzeug. Für die Emissionen pro km (g CO₂, eq/km) werden die energiebezogenen Emissionen (g CO₂, eq/MJ) mit der von den Lastwagen benötigten Energie pro km (MJ/km) multipliziert.

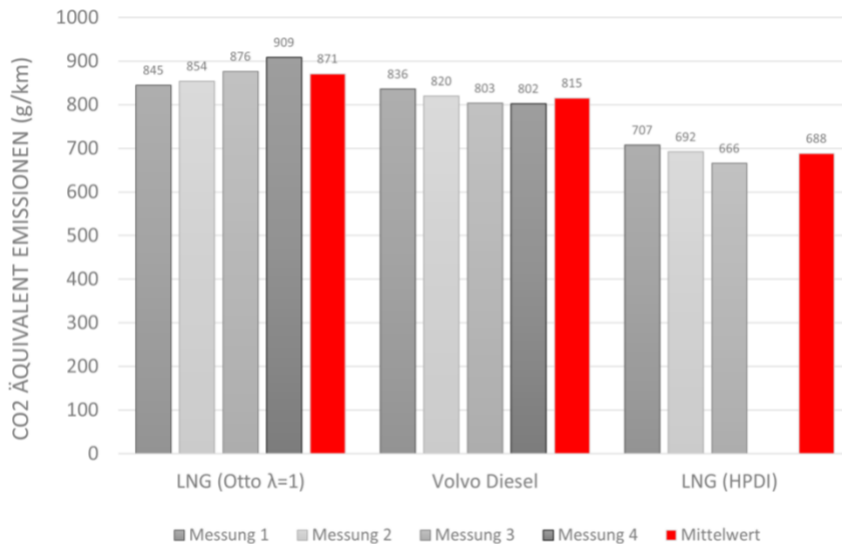


Abbildung 1: Direkte CO₂, eq-Emissionen (CO₂ und CH₄) im Abgas für die Lkw aus den PEMS Messungen. Im Projekt wurden zwei LNG-Lkw mit unterschiedlichen Motoren, d.h. einer mit Otto-Motor und einer mit HPDI-Motor (high pressure direct injection) und ein Diesel Lkw untersucht.

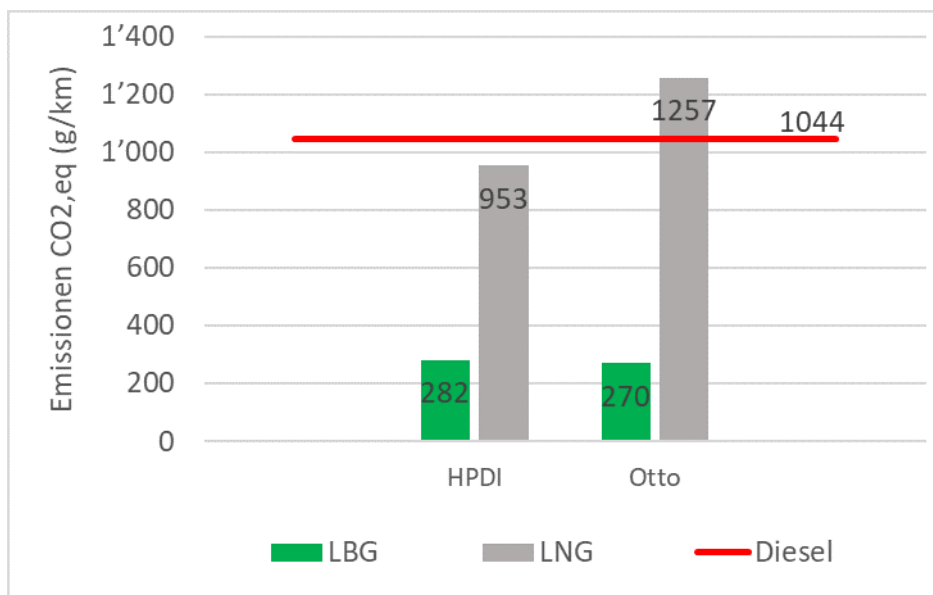


Abbildung 2: Provisorische Ergebnisse der Well-to-Wheel-Analyse für LBG aus Norwegen (grün). In den Angaben sind alle Emissionen (CO₂, eq) enthalten welche während der Herstellung, der Lagerung sowie der Verwendung entstehen. Als Vergleich sind die Emissionen von LNG (grau) sowie die Emissionen eines Diesel-Lkw ebenfalls dargestellt. Die Well-to-Wheel-Analyse zeigt eine klare Emissionsminderung bei der Verwendung von LBG aus Norwegen gegenüber LNG oder Diesel.

Bei der Planung einer LNG-Tankstelle ist zu beachten, dass nicht alle LNG-Tankstellen und LNG-Fahrzeuge in Bezug auf ihre Anschlüsse kompatibel sind. Für den Bau sollten Anlagenplaner herbeigezogen werden, welche neben den technischen Aspekten auch

logistische und regulatorische Kenntnisse einbringen können. In Bezug auf die Schweiz ist zu beachten, dass es kantonale Unterschiede bei baulichen Vorgaben, Auslegung der Störfallverordnung und Klassifizierung gemäss Brandschutznormen gibt.

Im Betrieb der Tankstellen wurden zwei hauptsächliche Schwierigkeiten identifiziert. Einerseits betrifft es die Anlieferung von LNG, welche abhängig vom Transportunternehmen nicht jederzeit möglich ist. Es braucht deshalb eine genaue Abstimmung der Bestellmenge und Liefer-termine. Abhängigkeiten und Einschränkungen im Betrieb können durch ein dichteres Tankstellennetz vermindert und damit mehr Flexibilität erreicht werden. Andererseits sind die Füllstandsanzeigen der Tankstelle zum Teil ungenau. Dies erschwert die Planung von Lieferungen sowie den Befüllvorgang.

Fazit und Ausblick

Durch den Ersatz von LNG durch verflüssigtes Biomethan (LBG) können die klimarelevanten Emissionen deutlich reduziert werden. Während im Fahrzeugeinsatz aufgrund der weitgehend identischen chemischen Zusammensetzung von LNG und LBG zunächst ähnliche Emissionen auftreten, zeigt eine ganzheitliche Well-to-Wheel-Betrachtung ein anderes Bild: Hier werden für biogene Treibstoffe die CO₂-Emissionen bei der Verbrennung im Motor durch den pflanzlichen Zyklus egalisiert. Doch bleiben auch beim LBG die produktions- und transportbedingten Emissionen bestehen sowie auch diejenigen Gase, welche beim Einsatz im Lkw neben dem CO₂ gebildet werden.

Im Projekt konnten erste Ergebnisse zu der Well-to-Wheel-Analyse von flüssigem Biogas verschiedener Anbieter bestimmt werden. Am Beispiel von LBG aus einer Verflüssigungsanlage in Norwegen wurde ermittelt, dass bei fossilfreier Produktion des Biogases gesamthaft eine Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber Diesel von über 70 Prozent erreicht wird. Dabei entfällt etwa die Hälfte der Emissionen auf den Transport des LBG aus Norwegen. Mit dem Import von LBG von naheliegenden Produktionsstandorten oder sogar einer LBG-Produktion in der Schweiz sowie der Verhinderung von Ventings an der Tankstelle sollte die Well-to-Wheel-Bilanz nochmals besser ausfallen.

Literaturverzeichnis

- [1] DVGW, DENA, DR. DIETRICH GERSTEIN, FREDERIK BRANDES: LNG kann Grün! Erneuerbares LNG – LRG (Liquefied Renewable Gas) (2019)
- [2] PIERS FORSTER (UK), VENKATACHALAM RAMASWAMY: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing : IPCC (2007)
- [3] GIORGOS MELLIOS (EMISIA S.A.), EVI GOULIAROU: Greenhouse gas intensities of road transport fuels in the EU in 2018 : Monitoring under the Fuel Quality Directive (2018) – Überprüfungsdatum 2021-08-02