

## Analyse eines Pilotprojekts von Power-to-Mobility (Bachelorarbeit)

Autor: Daan Haegel  
Erstprüfer: Professor als Juniorprofessor Dr.-Ing. Aaron Praktiknjo  
Betreuung: Stefan Scharl, M. Sc.

### Kurzfassung

Vor dem Hintergrund der Erderwärmung und der lokalen Emissionsproblematik in Innenstädten werden im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs Alternativen zum heute vorherrschenden Dieselantrieb gesucht (Pütz, 2014: 4). Parallel dazu wandelt sich im Zuge der Energiewende die Stromversorgung von auf fossilen Brennstoffen basierenden, gut regelbaren Energiequellen zu stark fluktuierenden Erneuerbaren Energien wie Windkraft und Photovoltaik (BMW, 13.04.2018). Die stark schwankenden Netzlasten aus erneuerbaren Energien stellen neue Herausforderungen an die Flexibilität und Speicherkapazität der Energieversorgung. In einem Wuppertaler Pilotprojekt von Power-to-Mobility wird ein Lösungsansatz verfolgt, der die beiden meist getrennten Sektoren Stromerzeugung und Mobilität koppelt. Das System nutzt Strom aus dem MHKW Wuppertal um mittels Wasserelektrolyse  $H_2$  zu erzeugen, den Busse an einer Tankstelle auf dem Betriebsgelände des MHKW tanken. Dies ermöglicht zum einen die Flexibilisierung der Stromauspeisung und zum anderen durch die Substitution von Diesel die Dekarbonisierung und Minderung innerstädtischer  $NO_x$ -Emissionen des öffentlichen Personennahverkehrs.

Ein Konzept, in dem günstiger Strom genutzt wurde um  $H_2$  zu erzeugen wurde bereits 1929 umgesetzt, als die Firma Norsk Hydro im norwegischen Ort Rjukan eine Wasserkraftanlage mit einem Elektrolyseur koppelte. In späteren Projekten wie seit 1990 in Saudi-Arabien oder seit 1998 am Forschungszentrum Jülich wurden vor allem Photovoltaik-Anlagen mit Elektrolyseuren gekoppelt, wobei der  $H_2$  in Saudi-Arabien für chemische Anwendungen verkauft und in Jülich mittels Brennstoffzelle rückverstromt wird. (Robinius, 2015: 43) Das Gesamtsystem mit Stromerzeugung im MHKW und integrierter Nutzung des  $H_2$  im Nahverkehr ist in dieser Form einzigartig, sodass es hier einer umfangreichen technischen und ökonomischen Evaluierung bedarf. In dieser Arbeit werden für das Pilotprojekt die technischen und ökonomischen Nachhaltigkeitsaspekte untersucht. Vor allem soll geklärt werden, ob durch das System die Emissionen des Nahverkehrs tatsächlich erheblich reduziert werden und wie hoch die Produktionskosten des erzeugten  $H_2$  sind.

Als übergeordnete Forschungsfrage wird untersucht, ob Power-to-Mobility in Form des Wuppertaler Pilotprojekts technisch, ökologisch und ökonomisch nachhaltig ist. Inwieweit ermöglicht hier die Sektorenkopplung eine Reduktion von Treibhausgasemissionen und wie energieeffizient ist der Systempfad? Wie ist die Relation zwischen  $CO_2$ -Reduktion und Mehrkosten des Power-to-Mobility Pfades im Vergleich zu konventionellen Dieselnbussen?

Generell ist das Ziel der Arbeit eine umfassende Darstellung des Power-to-Mobility-Systems im Wuppertaler Pilotprojekt sowie v.a. dessen technische und ökonomische Bewertung. Dazu wird zunächst der Technologiepfad dargestellt, um alle Komponenten des Pilotprojekts auszuwählen. Das Ziel der technischen Bewertung ist die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades

sowie der spezifischen Treibhausgasemissionen, um diese der Referenztechnologie Dieselsebus gegenüberstellen zu können. Das primäre Ziel der ökonomischen Bewertung ist die Ermittlung der H<sub>2</sub>-Gestehungskosten für das angenommene Power-to-Mobility-System.

Um bei erforderlicher Detailliertheit die Übersichtlichkeit der Arbeit zu gewährleisten wird ein klar abgegrenzter Technologiepfad betrachtet. Dieser umfasst den Weg von der Müllverbrennung bis zur Ausspeisung des erzeugten H<sub>2</sub>. Komponenten innerhalb der Systemgrenzen sind somit die Müllverbrennungsanlage mit zugehörigem Müllbunker, der Elektrolyseur, der H<sub>2</sub>-Speicher und die Tankstelle. Zur Dimensionierung werden auch In- und Outputströme des Systems analysiert, also der angelieferte Abfall sowie die energetischen Ausgangsströme H<sub>2</sub>, Strom und Wärme. Vor- und nachgeschaltete Systeme wie die Sammlung und Anlieferung des Abfalls oder die Nutzung des Wasserstoffs in den Bussen werden nicht oder bei Bedarf nur sehr knapp betrachtet. Bei der Evaluierung der Nachhaltigkeit von Power-to-Mobility liegt der Fokus auf technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Die sozialen Auswirkungen der Technologie werden in dieser Arbeit untergeordnet behandelt.

## Abstract

Due to global warming and local emissions problems in inner cities, alternatives to today's predominant diesel drive are being sought in the area of local public transport (Pütz, 2014: 4). Parallel to this, in the course of the energy transition, the power supply is changing from well-controllable energy sources based on fossil fuels to highly fluctuating renewable energies such as wind power and photovoltaics (BMW, 13.04.2018). The highly fluctuating grid loads from renewables pose new challenges to the flexibility and storage capacity of the energy supply system. In a Wuppertal pilot project of power-to-mobility, a solution approach is being pursued that couples the two usually separate sectors of power generation and mobility. The system uses electricity from the Wuppertal waste-to-energy plant to generate H<sub>2</sub> by means of water electrolysis, which buses refuel at a filling station on the grounds of the waste-to-energy plant. On the one hand, this makes it possible to make the power supply more flexible and, on the other hand, to decarbonize and reduce inner-city NO<sub>x</sub> emissions from local public transport by substituting diesel.

A concept in which cheap electricity was used to generate H<sub>2</sub> was implemented as early as 1929, when the company Norsk Hydro in the Norwegian town of Rjukan coupled a hydropower plant with an electrolyzer. In later projects, such as in Saudi Arabia since 1990 or at the Jülich Research Center since 1998, mainly photovoltaic plants were coupled with electrolyzers, with the H<sub>2</sub> being sold for chemical applications in Saudi Arabia and reconverted to electricity by means of fuel cells in Jülich. (Robinius, 2015: 43) The overall system with electricity generation in the MHKW and integrated use of the H<sub>2</sub> in local transport is unique in this form, so that an extensive technical and economic evaluation is required here. In this work, the technical and economic sustainability aspects are investigated for the pilot project. Above all, it is to be clarified whether the emissions of the local traffic are actually considerably reduced by the system and how high the production costs of the generated H<sub>2</sub> are.

The overarching research question is whether power-to-mobility in the form of the Wuppertal pilot project is technically, ecologically and economically sustainable. To what extent does sector coupling enable a reduction of greenhouse gas emissions and how energy efficient is the system path? What is the relationship between CO<sub>2</sub> reduction and additional costs of the power-to-mobility path compared to conventional diesel buses?

In general, the aim of the paper is a comprehensive presentation of the power-to-mobility system in the Wuppertal pilot project and, above all, its technical and economic evaluation. For this purpose, the technology path is first presented in order to select all components of the pilot project. The goal of the technical evaluation is to calculate the overall efficiency as well as the specific greenhouse gas emissions in order to compare them with the reference technology diesel bus. The primary goal of the economic evaluation is to determine the H<sub>2</sub> production costs for the assumed power-to-mobility system.

In order to ensure the required level of detail and clarity of the work, a clearly defined technology path is considered. This includes the path from waste incineration to the exit of the generated H<sub>2</sub>. Components within the system boundaries are thus the waste incineration plant with associated waste bunker, the electrolyser, the H<sub>2</sub> storage and the filling station. For dimensioning, input and output flows of the system are also analyzed, i.e., the delivered waste as well as the energetic output flows H<sub>2</sub>, electricity and heat. Upstream and downstream systems such as the collection and delivery of the waste or the use of the hydrogen in the buses are not considered or, if necessary, only very briefly. In evaluating the sustainability of power-to-mobility, the focus is on technical and economic aspects. The social impacts of the technology are treated as subordinate in this work.