

METHANOL ALS REVOLUTION IN DER AUTOBRANCHE

Ein zukunftsorientierter Blick auf ein alternatives Energiespeichersystem



Abbildung 1: Titelbild

Maturitätsarbeit von:

Simon Dekker
Im Hofacher 24
8185 Winkel
Erstellt 2024/25

Betreuungsperson:

Roger Brüderlin
KZU Lehrperson der
Fachschaft Physik

Experte:

Carmelo Marchica
KZU Lehrperson der
Fachschaft Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	4
1.1 Lösungsversuch	5
1.2 Fragestellung	5
1.3 Methode	5
1.4 Hypothese	6
2. Konstruktion.....	7
2.1 Fahrtüchtigkeit.....	7
2.2 Bau der Batterie.....	8
2.3 Einbau der Methanol-Brennstoffzelle	9
2.4 Letzte Schritte.....	9
3. Funktion der Brennstoffzelle.....	10
3.1 Was ist Methanol?	10
3.2 Warum Methanol?	11
3.3 Chemischer Vorgang	11
3.3.1 Übersicht.....	11
3.3.2 Prinzip einer Direktmethanol-Brennstoffzelle.....	12
3.3.3 Reaktionen einer Direktmethanol-Brennstoffzelle	13
3.3.4 Prinzip einer indirekten Methanol-Brennstoffzelle	14
3.4 Vergleich der Methoden	15
4. Resultate	17
4.1 Messungen	17
4.2 Berechnung der Verlängerung der Fahrdauer	18
4.2.1 Verlängerung durch die Brennstoffzelle.....	18

4.2.2 Verlängerung durch die Solarzellen.....	20
4.2.3 Verlängerung durch die Kombination von Brennstoff- und Solarzellen.....	21
4.3 Verhältnis der Kosten.....	22
4.3.1 Nachladen mit gekauftem Strom.....	22
4.3.2 Nachladen mit Solarstrom.....	22
4.3.3 Nachladen mit der Methanol-Brennstoffzelle.....	23
4.3.4 Nachladen mit der Methanol-Brennstoffzelle und Solarzellen.....	23
4.4 Übersicht der Ergebnisse.....	23
5. Methodenkritik.....	24
5.1 Zu tiefe Leistung der Brennstoffzelle.....	24
5.2 Zu tiefe Leistung der Solarzellen.....	24
5.3 Inkompatibilität der Brennstoffzelle.....	25
6. Diskussion.....	26
6.1 Diskussion der Resultate.....	26
6.1.1 Kritik der Resultate.....	26
6.1.2 Starker Anstieg der Reichweite bei der Solar-Methanol Kombination.....	26
6.1.3 Analyse der Kosten.....	27
6.2 Beantwortung der Fragestellung und Prüfung der Hypothese.....	27
6.2.1 Beantwortung der Fragestellung.....	27
6.2.2 Hypothese.....	28
6.3 Andere Szenarien.....	28
6.4 Ausblick.....	28
7. Fazit.....	29
8. Danksagung.....	29

Literaturverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Eigenständigkeitserklärung.....	IV

1. Einleitung

In der heutigen Zeit steht der Klimawandel als eine der grössten globalen Herausforderungen im Mittelpunkt. Ein zentraler Faktor dafür ist der stetig steigende CO₂-Ausstoss, wobei der Verkehr, insbesondere der Automobilsektor, einen erheblichen Anteil daran hat. In der EU stammen rund 25% der CO₂-Emissionen aus dem Strassenverkehr. [1] Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, neue Ansätze für eine nachhaltige Mobilität zu entwickeln.

Immer wieder werden jedoch Stimmen laut, dass die Anschaffungskosten von Elektroautos im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennern viel zu hoch seien. (Abb. 2) Dies liegt vor allem an den hohen Kosten des grossen Akkus. Dazu kommt, dass die Furcht vor Stromknappheit bei der Bevölkerung in den letzten Jahren enorm gestiegen ist. [2] Dies spiegelt sich in den Neuzulassungszahlen der Elektroautos wider, welche in Deutschland im November 2024 gegenüber des Vorjahrmonats um 22% gesunken sind. [3]



Abbildung 2: Sinnbild Ladevorgang Elektroauto

Aufgrund dieser Fakten und Ereignisse stellt sich die Frage, wie man diesen Herausforderungen begegnen könnte. Eine mögliche Lösung könnte in der Integration von Solarzellen liegen, wie sie bereits von renommierten Automobilherstellern umgesetzt wird



Abbildung 3: Hyundai Ioniq 5 mit Solardach

– etwa beim Hyundai Ioniq 5 (Abb. 3). [4] Diese Technologie birgt das Potenzial, die Abhängigkeit von externen Energiequellen zu reduzieren und somit die Elektroautos attraktiver zu machen. Doch wie lässt sich dieses Konzept weiterdenken, etwa wenn gerade nicht genügend Sonnenenergie vorhanden ist und dennoch eine stetige Energieversorgung gewährleistet werden muss?

1.1 Lösungsversuch

Eine bekannte Methode zur Lösung dieses Problems sind Brennstoffzellen, die Strom aus Wasserstoff erzeugen können. Da Wasserstoff jedoch ein Gas ist, das nur in komprimierter Form ausreichend Energie liefert, wäre eine flüssige und einfacher zu lagernde Alternative ideal. Methanol (CH_3OH) stellt eine vielversprechende Lösung dar, da es in Wasserstoff (H_2) und Kohlendioxid (CO_2) aufgespalten werden kann. Der dabei entstandene Wasserstoff kann nun in einer Brennstoffzelle zur Stromproduktion benutzt werden. Alternativ lässt sich Methanol auch direkt durch die Elektrolyse zur Gewinnung elektrischer Energie verwenden, wobei das dabei entstehende CO_2 in die Umwelt gelangt. Das Entscheidende dabei stellt die Umkehrbarkeit der Prozesse dar: Das dabei freigesetzte CO_2 kann mit Hilfe spezieller Anlagen wieder in Methanol umgewandelt werden. Dadurch entsteht ein geschlossener Kreislauf, welcher einen geringeren Nettoausstoß an Treibhausgasen ermöglicht. [5] [6]

1.2 Fragestellung

In dieser Maturarbeit wird dieses Energiespeichersystem untersucht. Dabei stellen sich folgende Fragen:

Wie verhalten sich die Betriebskosten eines kombinierten Solar-Methanol-Brennstoffzellensystems im Vergleich zu rein akkubetriebenen Systemen?

Inwiefern verändert sich die Reichweite eines akkubetriebenen Fahrzeugs durch den Einbau einer Methanol-Brennstoffzelle und Solarzellen?

1.3 Methode

Um die oben genannten Fragestellungen zu beantworten, wird ein von einem Elektromotor angetriebener Go-Kart gebaut. Die notwendige Antriebsenergie stammt aus einer Batterie. Diese wird zum einen von auf dem Fahrzeug installierten Solarzellen stetig nachgeladen. Zum anderen wird eine Methanol-Brennstoffzelle eingebaut, die ebenfalls permanent Energie für die Batterie liefern soll. Als Brennstoffquelle für die Brennstoffzelle dient dabei ein auf dem Fahrzeug angebrachter Methanol-Kanister.

Nachdem der Go-Kart fertiggestellt ist, werden damit Tests durchgeführt, um verschiedene Daten zu erheben. Diese Ergebnisse sowie persönliche Erfahrungen beim Bau und der Nutzung des Fahrzeugs werden die Grundlage darstellen, um die Fragestellungen dieser Arbeit zu beantworten.

1.4 Hypothese

Die Kombination von Solarenergie und Methanol-Brennstoffzellen stellt eine vielversprechende Lösung für die zukünftige Energieversorgung von Fahrzeugen dar. Sie bietet das Potenzial, fossile Brennstoffe zu ersetzen und gleichzeitig die Umweltbelastung zu reduzieren. Dennoch ist es denkbar, dass technologische Fortschritte in anderen Bereichen, wie zum Beispiel der Batterietechnologie oder der Wasserstoffnutzung, diese Kombination langfristig überholen könnten, da die Alternativen potenziell effizienter und umweltfreundlicher sind.

2. Konstruktion

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Go-Kart zu bauen, welcher autark von einem Akku betrieben wird, der jedoch kontinuierlich durch Solarpaneele und eine Methanol-Brennstoffzelle nachgeladen wird. Anfangs war der Plan, den ganzen Go-Kart inklusiv Chassis selbst zu entwerfen, aus Zeitgründen wurde von Experten davon abgeraten. Aus diesem Grund wurden ein gebrauchtes Go-Kart Chassis sowie eine gebrauchte Methanol-Brennstoffzelle gekauft, da neue Teile das Budget dieser Arbeit überschritten hätten.

2.1 Fahrtüchtigkeit

In der ersten Phase meines Projektes geht es darum, den Go-Kart zum Fahren zu bringen. Da der ebenfalls neu gekaufte Elektromotor über eine Leistung von einem Kilowatt verfügt, wird vorerst überprüft, ob dieser genug stark ist, um den Go-Kart anzutreiben. Dazu wird der Elektromotor, wo zuvor der Benzinmotor befestigt war, mit einem Holzbrett am Chassis befestigt, was sich jedoch nicht als genug stabil erweist. Mithilfe von Rohrschellen kann das Holzbrett schliesslich sicher ans Chassis angebracht werden. (Abb. 4)



Abbildung 4: Provisorischer Erstaufbau



Abbildung 5: Schweissvorgang

Nach der Verbindung des Motors mit dem Motorcontroller und einem provisorischen 36V-Akku kann der Antrieb erstmals unter realen Bedingungen getestet werden. Dabei funktioniert das System grundsätzlich einwandfrei. Ein unerwartetes Problem stellt das Ritzel (Zahnrad) am Elektromotor dar, das nicht zur Kette und dem Achsenritzel des ursprünglichen Benzinmotorantriebs passt.

Da keine passenden Ritzel für die Elektromotorwelle verfügbar sind, wird das Problem dadurch gelöst, indem auf dem nicht passenden Ritzel des Elektromotors ein entsprechendes Benzinmotorritzel aufgeschweisst wird. (Abb. 5) Dabei entsteht allerdings eine für die Testzwecke nicht relevante Unwucht (Abb. 6)



Abbildung 6: Antrieb mit verschweisstem Ritzel

2.2 Bau der Batterie

Im nächsten Schritt wird der Akku gebaut. Für den Betrieb des 1-kW-Motors bei 36V wird ein leichter Lithium-Ionen-Akku gewählt, der aus einzelnen Lithium-Zellen zusammengestellt wird, da dies kostengünstiger ist als der Erwerb eines fertigen Akkus. Der ursprüngliche Plan, drei 12V-Akkus in Serie zu schalten, muss verworfen werden, da diese nur eine Nominalspannung von jeweils 11,1V und somit eine Gesamtnominalspannung von

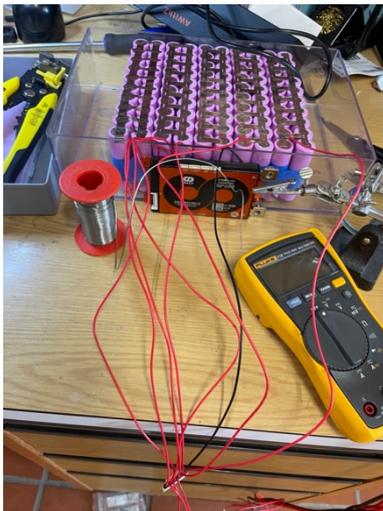


Abbildung 7: Bau des Akkus

33,3V ergeben hätten. Stattdessen wird ein neuer Aufbau in Form eines 10S-10P-Akkus (zehn Zellen in Serie und zehn parallel) gebaut, welcher über eine Nominalspannung von 36.5V und eine Kapazität von 26 Ampèrestunden verfügt. (Abb. 7) Zur Sicherstellung der gleichmässigen Entladung der Zellen und zur Überwachung von Ladestand und Batterieparametern wird ein Battery Management System (BMS) integriert, welches eine Kontrolle der entsprechenden Werte über die App namens «SMART BMS» ermöglicht.

2.3 Einbau der Methanol-Brennstoffzelle

Anschliessend wird die Methanol-Brennstoffzelle in das System integriert. Da die Brennstoffzelle für 12V-Akkus ausgelegt ist, das Gesamtsystem jedoch auf 36.5V basiert, wird zunächst ein Spannungswandler eingesetzt, um die von der Brennstoffzelle gelieferte Spannung von 12V auf die Ladespannung von 42V, zu erhöhen. Die Ladespannung ist dabei höher als die Nominalspannung, damit eine Ladung des Akkus stattfinden kann. Dieser Ansatz funktioniert jedoch nicht, da der Spannungswandler den Stromfluss nur in eine Richtung zulässt und die Brennstoffzelle selbst Energie benötigt, um Strom zu erzeugen. Zur Lösung dieses Problems wird ein 12V-Akku zwischen der Brennstoffzelle und dem Spannungswandler integriert, um als Puffer zu agieren und der Brennstoffzelle die nötige Energie zu liefern. Um ein kontinuierliches Entladen des 12V-Akkus zu verhindern, wird zusätzlich ein Ladebrückenschalter zwischen dem 12V-Akku und dem 36V-System eingebaut, um den Stromfluss bei Bedarf zu unterbrechen. (Abb. 8)



Abbildung 8: Tests Brennstoffzelle

2.4 Letzte Schritte

Anschliessend wird die Brennstoffzelle und der Methanol-Kanister am Go-Kart montiert. Zuerst werden Pläne zur Befestigung und Platzierung dieser Komponenten erstellt, um eine möglichst gute Gewichtsverteilung zu erreichen. (Abb. 9) Dazu muss auch die Platzierung des Akkus mitbedacht werden. Da Methanol hochentzündbar ist, wird entschieden, die selbstgebauten Akkus nicht neben dem Methanol-Kanister anzubringen.

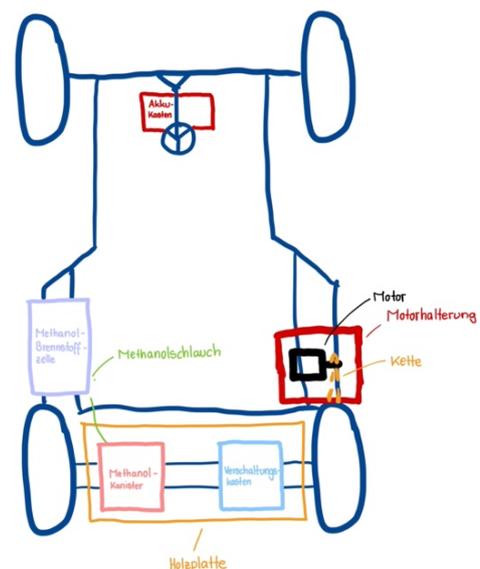


Abbildung 9: Skizze Aufbau ohne Solarzellen

Die Brennstoffzelle wird an der linken Seite des Gokarts befestigt, da dort optimal Platz vorhanden ist. Ebenso wird der Methanol-Kanister hinten links am Go-Kart angebracht, da die Schlauchlänge zwischen Brennstoffzelle und Kanister ansonsten zu kurz wäre.

Die Akkus werden an der Vorderseite des Fahrzeugs unter dem Lenkrad platziert, wo zuvor der Benzinkanister befestigt war. Schlussendlich wurden die Solarzellen parallel miteinander verbunden und ebenfalls am Go-Kart angebracht. (Abb. 10)



Abbildung 10: Fertiggestellter Go-Kart

3. Funktion der Brennstoffzelle

3.1 Was ist Methanol?

Methanol ist ein einwertiger Alkohol. Er entsteht in der Natur hauptsächlich in Gärungsvorgängen, wie zum Beispiel von Zuckerrohrsaft. [8] Grundsätzlich kommt Methanol in der Natur jedoch nur in kleinen Mengen vor. In der Industrie wird Methanol meistens aus Erdgas gewonnen. Umweltfreundlicher ist jedoch die Herstellung mithilfe von aus grünem Strom gewonnenem Wasserstoff. Bei diesem Vorgang wird CO₂ aus der Luft extrahiert und mit Wasserstoff zu Methanol synthetisiert. Beim Verbrauch findet die Rückreaktion statt, die Elektrolyse. Somit wird schlussendlich bei der Elektrolyse von Methanol so viel CO₂ frei, wie bei dessen Herstellung aus der Luft extrahiert wurde. Wird diese Art von Methanol verwendet, wird von grünem Methanol gesprochen. [5] [8]

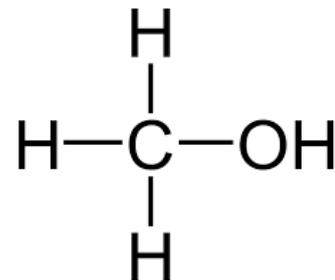


Abbildung 11: Formel Methanol

3.2 Warum Methanol?

Der bekannteste Speicher in Form von chemischer Energie ist Wasserstoff, mit dem durch Elektrolyse Strom erzeugt werden kann. Da Wasserstoff jedoch ein Gas ist, muss dieses unter hohem Druck in einer Gaskartusche gespeichert oder bei tiefen Temperaturen verflüssigt werden.

Dies erfordert entweder viel Platz oder viel zusätzliche Energie. [10] Eine flüssige Alternative hierzu stellt Methanol dar. Methanol ist demnach wesentlich einfacher zu handhaben und kann mit Hilfe einer Direktmethanol-Brennstoffzelle durch Aufspaltung von Methanol in CO_2 und Wasser elektrische Energie generieren. Aus diesem Grund wird diese Methode in dieser Arbeit verwendet. [5]

3.3 Chemischer Vorgang

3.3.1 Übersicht

Bei der Gewinnung von elektrischer Energie durch eine chemische Reaktion mit Methanol durch Brennstoffzellen gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits gibt es die direkte Methode, bei der Methanol durch eine Redoxreaktion (genauer unter 3.3.3) direkt elektrische Energie freisetzt. Andererseits wird bei der indirekten Methode das Methanol zuerst in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid aufgespalten, woraufhin der Wasserstoff bei seiner Oxidation zu Wasser elektrische Energie freisetzt. Der indirekte Prozess ist in der Realität jedoch sehr komplex und wird selten angewendet, weshalb auch in dieser Arbeit auf die direkte Methode gesetzt wird. [9]

3.3.2 Prinzip einer Direktmethanol-Brennstoffzelle

Eine Direktmethanol-Brennstoffzelle besteht aus zwei Kammern, die durch eine H⁺-durchlässige Elektrolytmembran (in Abb. 12 gestrichelt), welche aus einem speziellen Polymer besteht, getrennt sind. Die Anode und die Kathode bestehen aus mit Platin beschichteten Kohlepartikeln, welche als Katalysatoren dienen.

In der linken Kammer befindet sich ein Methanol-Wasser-Gemisch als Brennstoff. Die rechte Kammer ist mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft gefüllt. Zur besseren Übersicht sind in Abb. 12 die Anode, die Kathode und die Elektrolytmembran in einem deutlich größeren Abstand dargestellt, als dies in der Realität der Fall ist. Zwischen Anode und Kathode befindet sich der Elektrolyt. Dieser ist eine spezielle Substanz und fungiert als Protonenleiter. An der Anode findet der eine Teil der Redoxreaktion, die Oxidation des Methanols statt: Das Methanol-Wasser-Gemisch wird an der Dreiphasengrenze, also dem Berührungspunkt von Brennstoff, Katalysator und Membran, in diesem Fall an der Anode, in Protonen (H⁺-Ionen), Elektronen und Kohlendioxid aufgespalten. Die freigesetzten Protonen wandern durch die Elektrolytmembran zur Kathode, während die Elektronen durch einen äusseren Stromkreis zur Kathode fließen, wodurch ein elektrischer Strom entsteht. An der Kathode verbinden sich die ankommenden Protonen mit den Elektronen und dem Sauerstoff aus der zweiten Kammer. Dadurch entsteht Wasser. Ein Platin-Katalysator an der Kathode beschleunigt wiederum diese Reaktion. [10] [11]

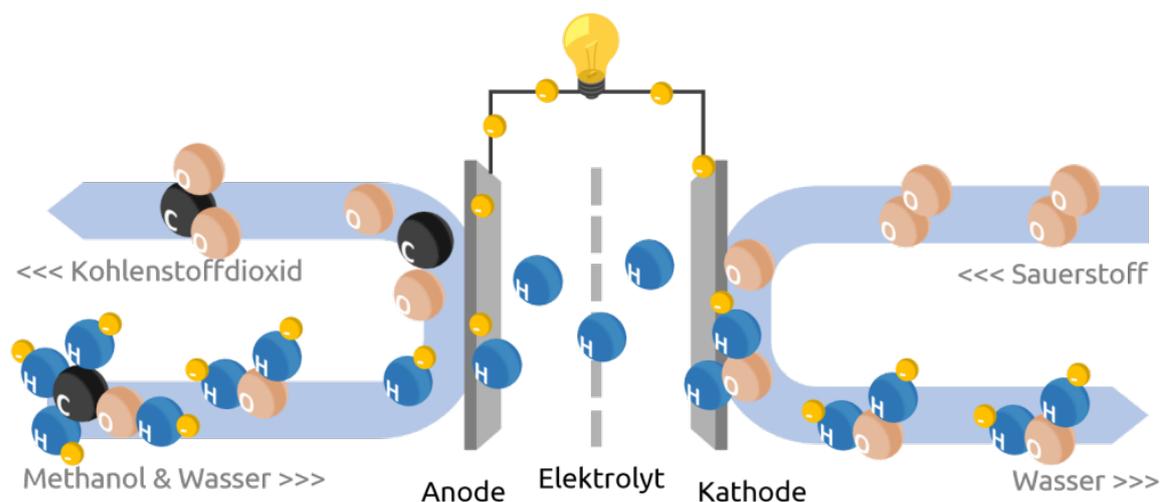


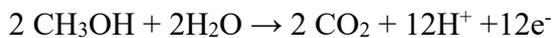
Abbildung 12: Funktion einer Direktmethanol-Brennstoffzelle

3.3.3 Reaktionen einer Direktmethanol-Brennstoffzelle

In der Direktmethanol-Brennstoffzelle laufen an der Anode und der Kathode Reaktionen ab, welche zusammen die Freisetzung von elektrischer Energie ermöglichen. In diesem Teilkapitel wird genauer auf die chemischen Reaktionen in der DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) eingegangen.

Anodenreaktion (Oxidation von Methanol):

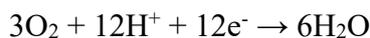
An der Anode wird Methanol zusammen mit Wasser in Kohlendioxid und Wasserstoff-Ionen sowie Elektronen aufgespalten. Die chemische Reaktionsgleichung lautet:



Es sind nun Elektronen frei geworden, die durch den äusseren Leiter fließen (In Gleichung als e^- und in Abb. 11 als gelbe Elektronen zu erkennen). Damit ein Ungleichgewicht entsteht und die Elektronen durch den Leiter fließen, müssen an der Kathode die Elektronen und die Wasserstoff-Ionen wiederum für eine Reaktion gebraucht werden.

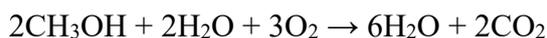
Kathodenreaktion (Reduktion von Methanol):

An der Kathode verbindet sich der Sauerstoff aus der rechten Kammer mit den Wasserstoff-Ionen und den Elektronen, wodurch Wasser entsteht:

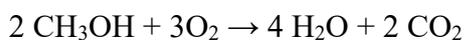


Gesamtreaktion (Redoxreaktion):

Durch die Summe der Anoden- und Kathodenreaktion ergibt sich nun die Gesamtreaktion:



Oder gekürzt:



Diese Gleichung stellt die vollständige Umwandlung von Methanol und Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser dar. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass das eigentlich Spannende, die Entstehung von Strom, in den Teilreaktionen zu finden ist. Ebenfalls zeigt die ungekürzte Gesamtreaktion an, dass als Brennstoff ein Methanol-Wasser-Gemisch benötigt wird. [10] [11]

3.3.4 Prinzip einer indirekten Methanol-Brennstoffzelle

Im Gegensatz zur Direktmethanol-Brennstoffzelle ist bei der indirekten Methanol-Brennstoffzelle nicht das Methanol, sondern Wasserstoff der Brennstoff. Ansonsten bleibt der Aufbau der Brennstoffzelle identisch.

Um Wasserstoff aus Methanol gewinnen zu können, wird zuerst Methanol in einem Reformier (Eine Art Dampfkochtopf bei hohem Druck) in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid aufgespalten.

Das Kohlendioxid gelangt aus dem System in die Atmosphäre, wobei der Wasserstoff weiterverwendet wird. Je nach Art der Brennstoffzelle muss im Nachhinein der Wasserstoff noch aufbereitet werden.

An der Anodenseite der Brennstoffzelle wird Wasserstoffgas zugeführt. Bei der Dreiphasengrenze, welche sich wiederum an der Anode befindet, gibt der Wasserstoff seine Elektronen ab. Dabei wird das Wasserstoffmolekül in zwei Protonen (H^+ -Ionen) und zwei Elektronen aufgespalten. Die Protonen diffundieren durch die Elektrolytmembran zur Kathodenseite der Brennstoffzelle, während die freigesetzten Elektronen über einen externen Stromkreis fließen, wobei sie einen angeschlossenen Verbraucher mit elektrischer Energie versorgen.

An der Kathodenseite reagieren die angekommenen Elektronen mit Sauerstoffmolekülen aus der Umgebungsluft. Der Sauerstoff wird durch die Aufnahme von Elektronen zu Oxidionen (O^{2-}) reduziert. Diese Oxidionen verbinden sich mit den Protonen, die aus der Anodenseite durch die Membran diffundiert sind. Dadurch entsteht Wasser (H_2O) als Endprodukt. Somit wurde durch diese chemische Reaktion Strom erzeugt. [11]

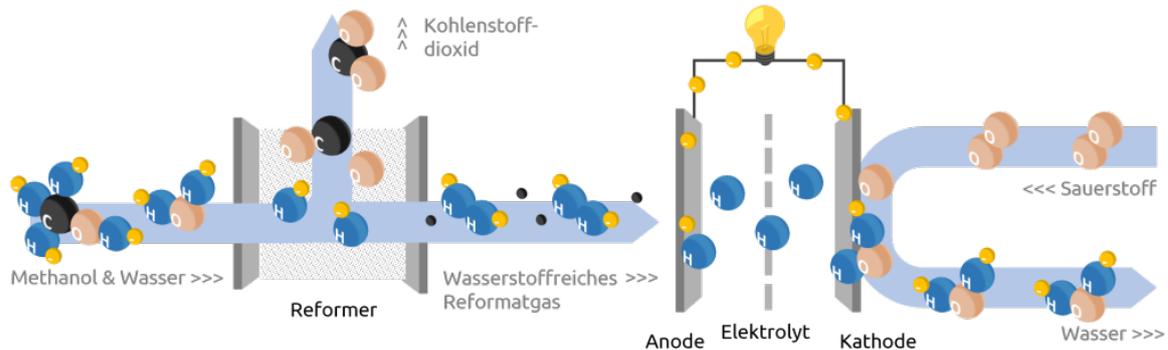


Abbildung 13: Funktion einer indirekten Methanol-Brennstoffzelle

3.4 Vergleich der Methoden

Die Direktmethanol-Brennstoffzelle zeichnet sich durch verschiedene Vorteile gegenüber der indirekten Methanol-Brennstoffzelle aus. Einer davon liegt in der verhältnismässig schnellen Startzeit, da sie ohne einen vorgeschalteten Reformer auskommt, welcher Wasserstoff aus Methanol erzeugt. Durch diesen einfacheren Aufbau ist sie auch viel kompakter, was insbesondere für Anwendungen von Vorteil ist, bei denen Platz und Gewicht eine Rolle spielen.

Die direkte Methode weist jedoch auch einige Nachteile auf. Während die indirekte Methanol-Brennstoffzelle unreines Methanol nutzen kann, ist die Direktmethanol-Brennstoffzelle auf hochreines Methanol angewiesen, das in der Regel mit Wasser gemischt wird. Diese Mischung ist erforderlich, um der Korrosivität des Methanols gegenüber der Elektrolytmembran entgegenzuwirken. Unter Korrosivität werden chemische Reaktionen verstanden, welche an der Membran stattfinden. Dadurch wird deren Struktur geschwächt und die Leitfähigkeit beeinträchtigt.

Aufgrund dieser Korrosivität stellt sich ein weiteres spezifisches Problem der Direktmethanol-Brennstoffzelle heraus: Das sogenannte Methanol-Crossover. Die Elektrolytmembran ist nun durch die Korrosion durchlässiger, wodurch nicht nur Protonen (H^+ -Ionen), sondern auch Elektronen unkontrolliert hindurchgelangen. Dies führt zu einem Spannungsverlust, da weniger Elektronen über den externen Leiter fließen können. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wird das Methanol mit Wasser noch weiter verdünnt. Dadurch ist die Energiedichte geringer und die Lebensdauer der Brennstoffzelle wird verlängert.

Ein weiterer Nachteil zur direkten Methode ist der Wirkungsgrad. Eine Direktmethanol-Brennstoffzelle erreicht einen Wirkungsgrad von 20–30 %, vergleichsweise ist die indirekte Methode, mit 35-50% Wirkungsgrad deutlich effizienter.

Dazu kommt die geringe Toleranz der Direktmethanol-Brennstoffzelle gegenüber tiefen Temperaturen. Da die Brennstoffzelle Methanol mit Wasser kombiniert, besteht bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt die Gefahr der Bildung von Eiskristallen an der Membran. Diese Eiskristalle können die empfindliche Membran schädigen und die Funktion der Zelle beeinträchtigen.

Die Direktmethanol-Brennstoffzelle überzeugt somit durch ihre einfache Handhabung, schnelle Betriebsbereitschaft und kompakte Bauweise. Ihr Einsatz ist jedoch durch den niedrigeren Wirkungsgrad und die höhere Empfindlichkeit gegenüber niedrigen Temperaturen begrenzt. Im Vergleich dazu stellt sich die indirekte Methanol-Brennstoffzelle als effizienter und robuster dar, ist jedoch deutlich komplexer aufgebaut, weshalb die Direktmethanol-Brennstoffzelle in der Realität deutlich öfter Verwendung findet. [10] [11]

4. Resultate

Der Go-Kart darf aufgrund der geltenden Gesetzeslage nicht auf öffentlichen Strassen betrieben werden. Da jedoch keine abgesperrte Strecke verfügbar ist, wird er vorsichtig innerhalb der eigenen Wohnsiedlung getestet. Dabei wird stets auf eine angepasste Geschwindigkeit geachtet.

Die Strasse in der Wohnsiedlung verläuft kreisförmig und bietet eine abwechslungsreiche Strecke mit steilen Abhängen, geraden Abschnitten und mittleren Steigungen. Diese Strecke bietet ideale Bedingungen, um die Fahreigenschaften des Go-Karts in unterschiedlichen Situationen zu testen.

4.1 Messungen

Folgende Daten wurden während den Tests ermittelt.

Länge einer Fahrtrunde (Laut Google Maps)	330m
Spannungsdifferenz nach einer Runde (ohne Solar)	0.3V
Spannungsdifferenz nach einer Runde (mit Solar)	0.3V
Energieverbrauch einer Runde	25.26Wh
Zeit für eine Runde	1min 22s = 0.023h
Leistung der Solarzellen	40W

Tabelle 1: Messungen

4.2 Berechnung der Verlängerung der Fahrdauer

4.2.1 Verlängerung durch die Brennstoffzelle

Der Akku kann aufgrund der Inkompatibilität der Wohnwagenbrennstoffzelle zum Antriebssystem des Go-Karts nicht während des Fahrens aufgeladen werden. Demzufolge kann der Akku nur im Stillstehen durch die Brennstoffzelle nachgeladen werden, wodurch es keine direkte Verlängerung der Fahrdauer durch die Brennstoffzelle gibt.

Jedoch kann, wenn der Go-Kart über keine weitere Energie verfügt, der Akku durch die Brennstoffzelle aufgeladen werden.

Der Akku hat eine Bruttokapazität von 26 Ampèrestunden und eine Nominalspannung von 36,5V. Die Nominalspannung eines Akkus repräsentiert die mittlere Spannung, die die Zellen bei der Entladung liefern und dient dadurch als Referenzwert. [13] Die Bruttokapazität beschreibt die gesamte Energiemenge, die entnommen werden kann, wenn der Akku über seinen vollen Spannungsbereich (30V bis 42V) genutzt wird.

Da die Angabe der Kapazität in Wattstunden (Wh) für weitere Berechnungen praktischer ist, werden diese Werte miteinander multipliziert, was eine Bruttokapazität von 936Wh ergibt:

$$26Ah \times 36.5V \approx 936Wh$$

Da die volle Spannungsnutzung die Lebensdauer der Akkuzellen belastet, wurde die Arbeitsspannung für dieses Projekt auf 31V bis 41V begrenzt. Diese Einschränkung verlängert die Lebensdauer der Akkus erheblich. Zudem wird sie in jedem Elektroauto ebenfalls begrenzt, was ein realitätsnahes Bild zeigt. [14] Der Kompromiss ist ein Kapazitätsverlust von je ca. 5% an den Spannungsgrenzen, also insgesamt 10% der Bruttokapazität. Die Nettokapazität ergibt sich aus der Energiemenge, die im definierten Spannungsbereich genutzt werden kann. [14]

Die Nettokapazität des Akkus beträgt also 842Wh:

$$936Wh \times 0.9 \approx 842Wh$$

Bei den Messungen kann entnommen werden, dass eine abwechslungsreiche Strecke von 330m einen Verbrauch von 25.26Wh hat. Dadurch kann nun die Reichweite bestimmt werden:

$$\frac{0.330km}{25.26Wh} \times 842Wh = 11km$$

Der Wirkungsgrad des Spannungswandlers, welcher zwischen dem 12-Volt-Akku und dem Hauptakku verbaut ist, konnte nicht genau herausgefunden werden. Deswegen wurde ein plausibler Wert eines Spannungswandlers mit einem Wirkungsgrad von 90% gewählt. [15] Um den Akku wieder auf 100% aufzuladen, muss bei einer Kapazität von 842Wh die Brennstoffzelle dementsprechend 8.9 Stunden laufen:

$$\frac{842Wh}{105W \times 0.9} \approx 8.9h$$

Dabei gibt der Hersteller an, dass die Brennstoffzelle 0.9 Liter Methanol pro produzierte Kilowattstunde verbraucht. [16] Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Step-Up Wandlers bedeutet das, dass mit einem 10 Liter Methanol-Kanister der Akku 11.9-mal auf 100% aufgeladen werden kann:

$$\frac{10l}{0.9l} \approx 11.1kWh \quad \frac{11.1kWh \times 0.9}{0.842kWh} \approx 11.9$$

Bei einer Reichweite von 11km kann ein 10 Liter Methanolkanister die Reichweite um 131 Kilometer verlängern:

$$11.9 \times 11km \approx 131km$$

4.2.2 Verlängerung durch die Solarzellen

Im Gegensatz zur Brennstoffzelle können die Solarzellen den Hauptakku kontinuierlich aufladen. Unter gleichbleibenden Bedingungen lässt sich berechnen, wie viel zusätzliche Reichweite durch die Solarzellen in etwa erzielt werden kann.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Solarzellen unter einer dauerhaften und maximalen Sonneneinstrahlung arbeiten. Diese Annahme ist notwendig, da die Leistung der Solarzellen bei moderater oder schwacher Sonneneinstrahlung deutlich abnimmt und demnach abrupt unter einen bestimmten Schwellenwert fällt, unter welchem die Solarzellen keine nutzbare Energie mehr liefern können.

Die errechneten Werte stellen somit eine theoretische Obergrenze dar, die unter realen Bedingungen durch Faktoren wie schwankende Sonneneinstrahlung oder Schatten meist nicht vollständig erreicht wird.

Unter idealen Bedingungen liefern die Solarzellen bei maximaler Sonneneinstrahlung eine Leistung von 40 W. Der eingesetzte MPPT-Controller (Maximum Power Point Tracking) weist einen Wirkungsgrad von 97 % auf, wodurch sich eine nutzbare Leistung von 38,8 W ergibt:

$$40W \times 0.97 = 38.8W$$

Um den Einfluss der Solarzellen einsehen zu können, muss der Durchschnittsverbrauch errechnet werden. Dafür wird der Verbrauch durch die Zeit geteilt:

$$\frac{25.26Wh}{0.023h} \approx 1100W$$

Somit kann nun die Nettoausgangsleistung bestimmt werden:

$$1100W - 38.8W = 1061.2W$$

Durch die Nettoausgangsleistung lässt sich nun wiederum der Nettoverbrauch in Wattstunden berechnen:

$$1061.2W \times 0.023h = 24.2Wh$$

Mit Hilfe des Nettoverbrauches kann nun die neue Reichweite berechnet werden:

$$\frac{0.330km}{24.2Wh} \times 842Wh = 11.5km$$

Es ergibt sich dadurch eine neue Reichweite von 11.5km. Dadurch lässt sich die zusätzliche Reichweite bestimmen:

$$11.5km - 11km = 0.5km$$

Durch die Solarzellen ergibt sich pro Akkuladung eine zusätzliche Reichweite von 500m.

4.2.3 Verlängerung durch die Kombination von Brennstoff- und Solarzellen

Da der Go-Kart für den Ladevorgang durch die Brennstoffzelle stillstehen muss, wird für diese Berechnung angenommen, dass der Go-Kart zunächst mit der durch die Solarzellen ermöglichten Reichweite und einem vollen Akku fährt, bis der Akku vollständig entladen ist. Anschliessend wird der Akku im Stillstand durch die Methanol-Brennstoffzelle vollständig aufgeladen. Während dieser Ladezeit befindet sich der Go-Kart an der Sonne, wodurch die Solarzellen weiterhin Energie liefern und die Gesamtreichweite zusätzlich erhöhen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis der Methanol-Kanister leer ist.

Die Ladeleistung der Brennstoffzelle und der Solarzelle kann wie folgt summiert werden:

$$94.5W + 38.8W = 133.3W$$

Die Ladezeit des Akkus bis zur vollständigen Aufladung beträgt also 6.3h:

$$\frac{842Wh}{133.3W} \approx 6.3h$$

Durch die Unterstützung der Solarzellen muss die Brennstoffzelle während des Ladevorgangs nur 6,3 Stunden laufen und erzeugt dabei 662Wh an Energie:

$$6.3h \times 105W \approx 662Wh$$

Bei einem 10-Liter-Methanolkanister und einem Wirkungsgrad von 90%, der die Produktion von 10 kWh Strom ermöglicht, kann der Akku somit 15-mal vollständig aufgeladen werden:

$$\frac{10kW}{0.663kW} \approx 15$$

Mit einer Reichweite bei einer Ladung mit Unterstützung der Solarzellen von 11.5km entspricht dies einer zusätzlichen Reichweite von 172.5km:

$$15 \times 11.5km = 172.5km$$

Die zusätzliche Reichweite der Kombination von Methanol-Brennstoffzelle und Solarzellen beträgt somit 41.5km:

$$171.5km - 131km = 41.5km$$

4.3 Verhältnis der Kosten

4.3.1 Nachladen mit gekauftem Strom

Wenn nur mit dem Strom aus der Steckdose gefahren wird, so sind die Kosten im Hochtarif in Zürich laut EKZ 32.8Rp/kWh. [17] Eine volle Ladung des Akkus kostet somit ca. 27.6Rp

$$32.8Rp. \times 0.842kWh \approx 27.6Rp$$

Somit lassen sich nun die Kosten pro 100 Kilometer berechnen:

$$\frac{27.6Rp}{11km} \times 100 \approx 2.50Fr/100km$$

4.3.2 Nachladen mit Solarstrom

Wenn der Akku initial vollgeladen ist, ergeben sich Kosten von 2.40Fr/100km:

$$\frac{27.6Rp}{11.5km} \times 100 \approx 2.40Fr/100km$$

4.3.3 Nachladen mit der Methanol-Brennstoffzelle

Bei einem Preis für einen 10 Liter Methanol-Kanister von aktuell ca. 65 Franken, ergibt sich ohne Solarunterstützung ein Methanolpreis von ca. 49.60Fr pro hundert Kilometer:

$$\frac{65Fr}{131km} \times 100 \approx 49.60Fr/100km$$

4.3.4 Nachladen mit der Methanol-Brennstoffzelle und Solarzellen

Bei der Unterstützung der Solarzellen sinkt der Preis pro Kilometer auf ca. 37.90Fr pro hundert Kilometer:

$$\frac{65Fr}{171.5km} \times 100 \approx 37.90Fr/km$$

4.4 Übersicht der Ergebnisse

Um die berechneten Ergebnisse zu veranschaulichen, werden diese in einer Tabelle dargestellt:

	Nur Akku	Solarstrom	Methanolstrom	Solar + Methanolstrom
Zusätzliche Reichweite	0km	0.5km	131km	171.5km
Gesamte Reichweite*	11km	11.5km	142km	183km
Kosten	2.50Fr/100km	2.40Fr/100km	49.60Fr/100km	37.90Fr/100km

Tabelle 2: Übersicht

*Mit initial vollgeladenem Akku

5. Methodenkritik

Grundsätzlich zeigt das Projekt, dass Methanol das Potenzial hat, die Reichweite eines Fahrzeugs im Vergleich zu einem rein akkubetriebenen Antrieb zu verlängern. Dennoch wird deutlich, dass der entwickelte Prototyp einige Schwachstellen aufweist, die in einem professionell gebauten Fahrzeug nicht auftreten würden.

5.1 Zu tiefe Leistung der Brennstoffzelle

Da es auf dem handelsüblichen Markt nur eine Marke gibt, welche Methanol-Brennstoffzellen für den Eigengebrauch herstellt, musste für diese Arbeit zwangsweise auf diese Marke zurückgegriffen werden. Diese Brennstoffzellen haben jedoch nur eine maximale Ausgangsleistung von 105W, was bei einem maximalen Verbrauch von 1.2kW und einem berechneten Durchschnittsverbrauch von 1.1kW nicht weit reicht. Wäre hier eine deutlich leistungseffizientere Brennstoffzelle verbaut worden, so wäre das Resultat sicherlich deutlich besser und eine Reichweitenverlängerung ohne Zwischenhalt zum Laden wäre durchaus möglich gewesen.

5.2 Zu tiefe Leistung der Solarzellen

Aus budgettechnischen Gründen wird bei diesem Projekt bei den Solarzellen gespart und auf einer chinesischen Webseite vier Solarzellen à 50 Watt bestellt. Wenn diese parallel geschaltet werden, ergibt sich jedoch nicht wie zu erwarten eine Leistung von 200 Watt, sondern eine wesentlich tiefere von maximal 40 Watt. In der finalen Bauphase werden die Solarzellen möglichst schnell auf den Go-Kart montiert, um den Bau rechtzeitig abschliessen zu können. (Abb. 14) Deshalb kann die optimale Ausrichtung der Solarzellen zur Sonne nicht berücksichtigt werden, wodurch die Solarzellen ihr volles Potenzial nicht ausschöpfen und den Go-Kart nur sehr langsam aufladen können, weshalb bei alleiniger Nutzung der Solarzellen eine geringe zusätzliche Reichweite resultiert.



Abbildung 14: Suboptimale Ausrichtung der Solarzellen

5.3 Inkompatibilität der Brennstoffzelle

Da die Brennstoffzelle für Campingfahrzeuge ausgelegt ist, arbeitet diese mit einer Spannung von 12V. Da jedoch das Fahrzeug mit einer höheren Spannung von 36V aufgrund der hohen Leistung arbeitet, wurde, wie schon im Abschnitt 3.3.3 erwähnt, ein 12V-Akku als Zwischenspeicher eingebaut. Damit dieser nicht stetig entladen wird, wurde ein Ladebrückenschalter eingebaut, welcher die Verbindung der beiden Akkus bei Bedarf unterbrechen kann. (Abb. 16)



Abbildung 15: Verschaltung Brennstoffzelle mit Hauptakku

Beim Schliessen des Ladebrückenschalters entnimmt der Motor direkt Strom aus der kleinen Batterie. Die Ausgangsspannung nach dem Spannungswandler beträgt konstant 42V, was einer höheren Spannung als derjenigen des Hauptakkus entspricht. Da die Stromquellen parallel verbunden sind (Abb. 15) fließt dabei aufgrund der höheren Spannung nach dem Spannungswandler sogar mehr Strom aus dem kleinen Akku als aus dem Hauptakku.



Abbildung 16: Parallelschaltung mit Spannungswandler

Dieses Verhalten stellt ein Problem dar. Die geringe Spannung des 12V-Akkus (Blauer Akku in Abb. 15) zwingt diesen dazu, einen hohen Strom zu liefern, was einer Entladung von über zwei C (C für Kapazität) entspricht, also zweimal deren Kapazität pro Stunde. Das schadet nicht nur den Akkuzellen, sondern überlastet auch die dafür vorgesehenen Kabel.

Um dies zu verhindern, muss der Ladeschalter während der Beschleunigung und bei längeren Fahrten geöffnet sein, damit der 12V-Akku vollständig vom System getrennt ist.

Folglich sind die berechneten Ergebnisse nicht mit denjenigen eines kontinuierlichen Ladevorgangs vergleichbar. Um diesem Problem entgegenzuwirken, müsste eine spezielle Schaltung eingebaut werden, welche bei zu hoher Last den 12V-Akku automatisch vom System trennt.

6. Diskussion

6.1 Diskussion der Resultate

6.1.1 Kritik der Resultate

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von Solarzellen und einer Methanol-Brennstoffzelle die Reichweite eines Fahrzeugs deutlich erhöhen kann. Dennoch müssen die Resultate kritisch betrachtet werden, da sie trotz eigener Daten unter idealisierten Bedingungen berechnet wurden. Beispielsweise berücksichtigt die Berechnung der Solarzelleneffizienz weder wechselnde Wetterbedingungen noch die aktuelle Tageszeit, was die reale Leistungsfähigkeit stark beeinflusst. Auch die angenommene konstante Leistung der Brennstoffzelle ist in der Praxis aufgrund chemischer Effekte unrealistisch, da diese eine gewisse Zeit braucht, bis sie die volle Leistung erbringen kann. Weiterhin kann der Akku aufgrund der bereits beschriebenen Inkompatibilitäten während der Fahrt nicht gleichzeitig aus der Brennstoffzelle geladen werden. Dies erschwert die Interpretation der Ergebnisse.

6.1.2 Starker Anstieg der Reichweite bei der Solar-Methanol Kombination

Die Ergebnisse zeigen, dass Solarzellen allein die Reichweite des Go-Karts nur wenig steigern. Wenn sie jedoch mit der Methanol-Brennstoffzelle kombiniert werden, erhöht sich die Reichweite deutlich im Vergleich zur alleinigen Nutzung der Brennstoffzelle. Das liegt daran, dass der Go-Kart bei leerem Akku und Sonnenlicht zusätzlich Energie von den Solarzellen bekommt, während die Brennstoffzelle lädt. Diese Unterstützung ermöglicht es, den Akku bis zu 15-mal aufzuladen, was die Reichweite deutlich steigert. Obwohl die Solarzellen nicht viel Leistung zur Verfügung stellen, trägt ihr Beitrag über viele Ladezyklen hinweg deutlich zur Reichweitenverlängerung bei.

6.1.3 Analyse der Kosten

Die Kosten pro Kilometer hängen vom Verbrauch an Energie und dessen Preis ab. Bei den Berechnungen ist eindeutig zu sehen, dass es am günstigsten ist, den Go-Kart direkt an der Steckdose zu laden. Sobald jedoch Methanol ins Spiel kommt, steigen gemäss den Berechnungen die Kosten exorbitant. Besonders auffallend ist, dass die Solarenergie allein kaum einen Einfluss auf die Kosten hat. Kombiniert mit der Brennstoffzelle können die Kosten pro 100km im Gegensatz zur alleinigen Nutzung der Solarzellen jedoch um fast zwölf Franken gesenkt werden.

6.2 Beantwortung der Fragestellung und Prüfung der Hypothese

6.2.1 Beantwortung der Fragestellung

Wie verhalten sich die Betriebskosten eines kombinierten Solar-Methanol-Brennstoffzellensystems im Vergleich zu rein akkubetriebenen Systemen?

Die Betriebskosten eines kombinierten Solar-Methanol-Brennstoffzellensystems sind deutlich höher als bei rein batteriebetriebenen Systemen. Dies liegt vor allem an den hohen Kosten des Methanols und den begrenzten Wirkungsgraden der eingesetzten Technologien. Dabei ist die Kombination zwischen Brennstoff- und Solarzellen merkbar günstiger als der reine Gebrauch von Methanol.

Inwiefern verändert sich die Reichweite eines akkubetriebenen Fahrzeugs durch den Einbau einer Methanol-Brennstoffzelle und Solarzellen?

Der Einbau einer Methanol-Brennstoffzelle und Solarzellen verlängert die Reichweite eines batteriebetriebenen Fahrzeugs erheblich. Die Reichweite kann theoretisch um mehrere hundert Kilometer erweitert werden, wobei die Kombination aus beiden Systemen die effektivste Lösung darstellt. Dies macht das System insbesondere für Anwendungen interessant, bei denen eine grössere Autarkie erforderlich ist.

6.2.2 Hypothese

Die Hypothese, dass die Kombination von Solarenergie und Methanol-Brennstoffzellen fossile Brennstoffe ersetzen und die Umweltbelastung reduzieren kann, wird nur teilweise bestätigt. Während das Potenzial zur Reichweitenverlängerung gegeben ist, bleiben die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit der Technologie problematisch, weshalb sich andere Technologien durchaus besser durchsetzen könnten. Zudem wird Methanol derzeit meistens aus Erdgas gewonnen, was Methanol im Grundsatz wieder zu einem fossilen Brennstoff macht.

6.3 Andere Szenarien

Ein alternatives Szenario würde so aussehen: Die Brennstoffzelle arbeitet mit der gleichen Spannung wie der Rest der Schaltung, wodurch sie den Akku während der Fahrt laden kann. In diesem Fall verlängert sich die Fahrdauer pro Akkuladung, allerdings ohne die Gesamtreichweite zu erhöhen. Der Grund dafür liegt in der begrenzten Leistung der Brennstoffzelle und der Solarzellen, die den Energiebedarf des Motors weiterhin nicht vollständig decken könnten. Eine deutliche Verbesserung liesse sich nur durch den Einsatz leistungsstärkerer Brennstoffzellen oder hochwertigerer Solarzellen erzielen, was sogar eine kontinuierliche Nutzung des Fahrzeugs ermöglichen würde.

6.4 Ausblick

Für die Zukunft wäre es interessant, die Technologie mit effizienteren Solarzellen und Brennstoffzellen weiterzuentwickeln. Auch die Verwendung von grünem Methanol könnte die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit verbessern. Zudem könnten Untersuchungen unter realistischeren Bedingungen, etwa auf Teststrecken oder bei längeren Fahrten, wertvolle Einblicke in die Praxistauglichkeit liefern.

Unternehmen wie Synhelion, die sich darauf spezialisiert haben, aus Sonnenlicht Methanol herzustellen und dieses in nachhaltige Flugkraftstoffe (Jet Fuels) umzuwandeln, könnten eine entscheidende Rolle in der Zukunft spielen. Ihre bahnbrechenden Technologien könnten die Frage, ob Methanol als Energiequelle für Elektrofahrzeuge sinnvoll ist, in Zukunft durchaus positiv beantworten. [18]

7. Fazit

In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Methanol und Solarenergie die Reichweite eines Fahrzeugs durchaus beeinflusst. Es stellte sich heraus, dass grünes Methanol, welches in diesem Projekt verwendet wurde, aktuell zu teuer ist. Da Methanol meistens aus Erdgas gewonnen wird, ist es aktuell nicht sinnvoll, Elektroautos mit Hilfe von Methanol anzutreiben, da andere fossile Energiequellen (z.B. Dieselgeneratoren), im Vergleich mehr Strom für einen deutlich geringeren Preis liefern. Die Voraussetzung wäre eine Herstellung von Methanol, wie etwa durch Elektrolyse, welche umweltschonend und möglichst klimaneutral wäre.

8. Danksagung

Ich danke für die wertvolle Unterstützung und die hilfreichen Inputs meines Betreuers Roger Brüderlin, Physiklehrer der Kantonsschule Zürcher Unterland. Ein grosser Dank geht ebenfalls an meine Eltern für die grosszügige finanzielle Unterstützung dieses Projektes und insbesondere an meinen Vater für die technische Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] europarl.europa.eu [Online] Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20190313STO31218/co2-emissionen-von-pkw-zahlen-und-fakten-infografik> [Zugriff am 08. 11. 2024]
- [2] Anspannung des Strommarktes [Online] Available: <https://www.nzz.ch/wirtschaft/wie-angespannt-ist-die-lage-am-strommarkt-ld.1697374> [Zugriff am 12. 11. 2024]
- [3] adac.de [Online] Available: <https://www.adac.de/news/neuzulassungen-kba/> [Zugriff am 08. 11. 2024]
- [4] Hyundai mit Solardach [Online] Available: <https://laxmihyundai.com/electric/ioniq-5-electric/convenience> [Zugriff am 12. 11. 2024]
- [5] sfc.com [Online] Available: <https://www.sfc.com/de/glossar/methanol-verwendung/#:~:text=So%20bietet%20Methanol%20Automobilherstellern%20die,für%20eine%20bessere%20Kraftstoffverdampfung%20mitbringt.> [Zugriff am 08. 11. 2024]
- [6] Rückgewinnung von Methanol durch CO₂ [Online] Available: <https://www.rifs-potsdam.de/de/forschung/rueckgewinnung-von-co2-zur-methanolproduktion-0> [Zugriff am 12. 11. 2024]
- [7] chemie.de [Online] Available: https://www.chemie.de/lexikon/Methanol.html#google_vignette [Zugriff am 12. 11. 2024]
- [8] Herstellung von Methanol [Online] Available: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/290678/> [Zugriff am 21. 12. 2024]
- [9] PEM gegenüber DMFC [Online] Available: <https://www.aip.uni-halle.de/bimap/forschung/396> [Zugriff am 08. 11. 2024]
-

- [10] Funktionsweise einer Methanolbrennstoffzelle [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=FaGzN3tZB2k> [Zugriff am 12. 11. 2024]
- [11] Aufbau einer Methanolbrennstoffzelle [Online] Available: <https://sigens.de/methanol-brennstoffzelle/#Design-and-principle-of-a-methanol-fuel-cell> [Zugriff am 12. 11. 2024]
- [12] Chemische Reaktion Brennstoffzelle [Online] Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Brennstoffzelle.html> [Zugriff am 20. 12. 2024]
- [13] Unterschied Ladeschlussspannung, Nennspannung und Leerlaufspannung [Online] Available: https://www.akkushop.de/de/news/unterschied-zwischen-ladeschlussspannung-nennspannung-und-leerlaufspannung-hier-kommt-die-loesung/?utm_source=chatgpt.com [Zugriff am 20. 12. 2024]
- [14] Das Netto vom Brutto [Online] Available: <https://generationstrom.com/2019/07/01/das-netto-vom-brutto-so-definiert-sich-die-nutzbare-energie-eines-akkus/> [Zugriff am 21. 12. 2024]
- [15] Wirkungsgrad Step-Up Wandler [Online] Available: https://www.kentfaith.de/blog/article_welchen-wirkungsgrad-haben-dc-dc-wandler_352#:~:text=In%20der%20Regel%20haben%20sie,der%20Effizienz%20des%20Wandlers%20selbst. [Zugriff am 23. 12. 2024]
- [16] Verbrauch Brennstoffzelle Efoy [Online] Available: <https://www.my-efoy.com/service/faq/> [Zugriff am 23. 11. 2024]
- [17] Stromtarife EKZ [Online] Available: <https://www.ekz.ch/de/privatkunden/strom/tarife/stromtarife.html> [Zugriff am 23. 12. 2024]
- [18] Synhelion.com [Online] Available: <https://synhelion.com/news> [Zugriff am 02.01. 2025]
-

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Titelbild.....	0
Abbildung 2: Sinnbild Ladevorgang Elektroauto	4
Abbildung 3: Hyundai Ioniq 5 mit Solardach	4
Abbildung 4: Provisorischer Erstaufbau	7
Abbildung 5: Schweissvorgang.....	7
Abbildung 6: Antrieb mit verschweisstem Ritzel	8
Abbildung 7: Bau des Akkus	8
Abbildung 8: Tests Brennstoffzelle	9
Abbildung 9: Skizze Aufbau ohne Solarzellen	9
Abbildung 10: Fertiggestellter Go-Kart.....	10
Abbildung 11: Formel Methanol.....	10
Abbildung 12: Funktion einer Direktmethanol-Brennstoffzelle	12
Abbildung 13: Funktion einer indirekten Methanol-Brennstoffzelle.....	15
Abbildung 14: Suboptimale Ausrichtung der Solarzellen.....	24
Abbildung 15: Verschaltung Brennstoffzelle mit Hauptakku.....	25
Abbildung 16: Parallelschaltung mit Spannungswandler	25

Quellen: Internet, Eigene Aufnahmen

Diese Maturitätsarbeit wurde mit Hilfe von künstlicher Intelligenz auf ihre sprachliche Korrektheit überprüft.

Eigenständigkeitserklärung

Ich, Simon Dekker, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Maturitätsarbeit eigenständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe erstellt habe und dass alle Quellen, Hilfsmittel und Internetseiten wahrheitsgetreu verwendet wurden und belegt sind. Zudem habe ich für die Erstellung der Maturitätsarbeit die KI nicht in unerlaubter Weise verwendet.

Ort, Datum

Unterschrift