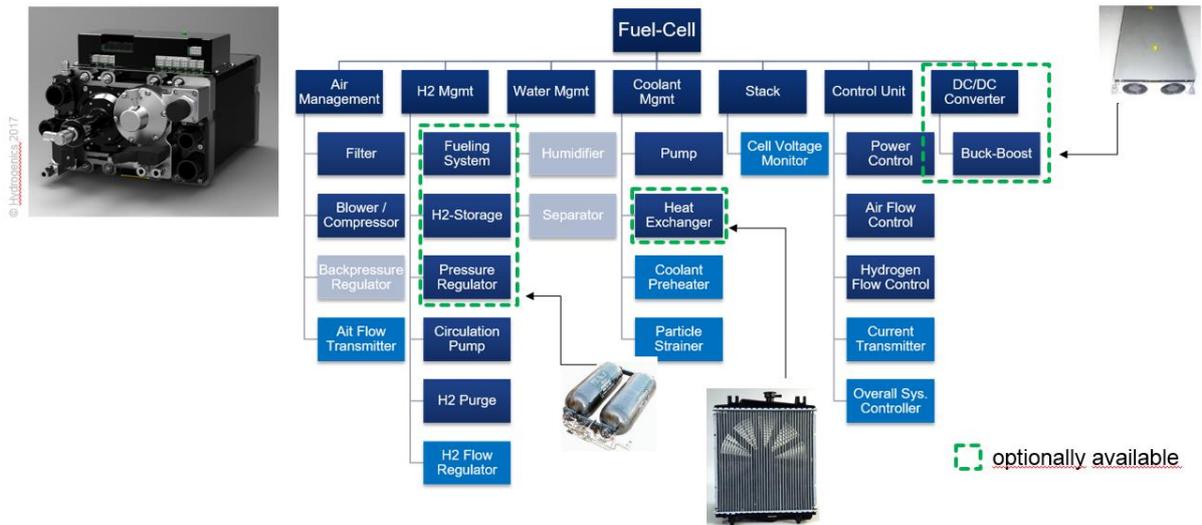


Endbericht

Neue Fahrzeugkonzepte für urbane Mobilität in Smart Cities

Intelligent Transport Cubes als neues Fahrzeugkonzept für urbane Mobilität in Smart Cities
SATW Projekt M-2018-012



Auftragnehmer:

Institut für Virtuelle Produktion

Tannenstrasse 3

8092 Zürich

Prof. Dr. Pavel Hora, pavel.hora@ivp.mavt.ethz.ch, 044 632 26 10

Auftraggeber:

SATW

St. Annagasse 18

8001 Zürich

044 226 50 11

Vertreten durch: Dr. Rolf Hügli, rolf.huegli@satw.ch, 044 226 50 12

Neues Fahrzeugkonzept für urbane Mobilität in Smart Cities

Projekt-Kurzfassung und Konzept

Im Auftrag der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften SATW hat das Institut für Virtuelle Produktion zusammen mit der ZHDKⁱ ein Brennstoffzellen-angetriebenes Fahrzeugkonzept „Intelligent Transport Cubes – iTC“ für Schweizer Städte entwickelt.

Die individuelle Mobilität wird heute zum grössten Teil durch Autos abgedeckt. Die Folge davon ist eine städtische Verkehrsdichte, welche zum Kollaps führt, eine unzulässige Luftverschmutzung verursacht sowie in mit Autos zugeparkte Strassen resultiert. In Anbetracht einer steigenden Mobilitätsnachfrage auf der einen Seite, aber beschränkten Ressourcen (Platz, Luft, Energie) auf der anderen sind zukünftig grundsätzlich andere Verkehrskonzepte erforderlich. Diese gehen weit über die heute propagierte Elektromobilität resp. Fahrzeuge mit hybriden Antrieben hinaus.

Im Rahmen des durchgeführten Projektes „Neue Fahrzeugkonzepte für urbane Mobilität in Smart Cities“ wird deshalb die erste Phase eines neuen urbanen „Zero Emission“ Gesamtkonzeptes entwickelt, welches trotzdem individuelle Bedürfnisse abdeckt. Dieses unterscheidet sich in folgenden Hauptpunkten von den heutigen Mobilitätskonzepten:

- Die privaten Fahrzeuge werden mehrheitlich durch «public shared»-organisierte Fahrzeuge („Transport Cubes“) ersetzt, welche primär nach „Transportkriterien“ (Platz, Geschwindigkeit, optimale Nutzung als shared Fahrzeuge, minimale Umweltbelastung) konzipiert sind. Autos als „Statussymbole“, welche obere Kriterien nur sehr schlecht erfüllen, sind zu vermeiden
- Eine wichtige Anforderung an diese *intelligent Transport Cubes iTC* ist die Fähigkeit, autonom fahren zu können (Level 6). Dies ist bei Umgestaltung der Fahrbahnen (eigene Fahrspuren, eigene Leitsysteme) bereits heute denkbar. Die heute angestrebte Integration von „driverless Fahrzeugen“ in bestehende Verkehrssysteme ist nicht effektiv und nicht sinnvoll.
- Da ca. 35% des CO₂-Ausstosses durch den Verkehr verursacht wird, ist ein Wechsel zu Zero-Emission Fahrzeugen zwingend. Die Brennstoffzellen-Systeme (PEMFC) bieten hierzu einen bereits heute realisierbaren Ansatz.
- Einen weiteren kritischen Aspekt stellt die Energieversorgung dar. Beim Ersatz der Verbrennungsmotoren durch Elektromotoren müssen andere Energieträger bereitgestellt werden. Die heutige Problematik liegt vor allem in der Tatsache, dass die mit Wind und Sonne erzeugte elektrische Energie nicht gespeichert werden kann. Die Speicherung in Form von „synthetisch“ hergestellten Gasen, z.B. als H₂, stellt wiederum einen sinnvollen und auch bereits heute realisierbaren Ansatz dar.
- Da die CO₂ Ziele in sehr kurzer Zeit (bis 2030 Reduktion um 50%) realisiert werden müssen, kommen nur weitgehend entwickelte Technologien in Frage.
- Bei den heute von der Automobilindustrie präferierten Batteriebasierten Lösungen spricht – zumindest bei den heute jährlich produzierten Mengen von ca. 100 Mio Fahrzeugen – der nicht verfügbare Bedarf an Metallen wie Co, Ni und anderen seltene Erden gegen die „Batterie-Lösung“. Dies abgesehen von der oben erwähnten

Problematik der Energiespeicherung, der nicht vorhandenen Infrastruktur zum schnellen Laden, den langen Aufladezeiten, der geringen Reichweite und diversen anderen negativen Aspekten bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der Umweltbelastung (Ein TESLA ist nicht umweltverträglicher als ein Dieselfahrzeug, wenn der Strom in einem 50:50 Kohle-Wind-Mix erzeugt wird).

Obere Ausführungen weisen auf die Komplexität und die Vielschichtigkeit der erforderlichen Gesamtlösung hin. Das von der SATW unterstützte Projekt beschränkt sich deshalb auf das Modul 1 eines Gesamtprojektes, bestehend aus vier Modulen, dar: (1) iTC Transport Unit, (2) iTC Driverless - autonomes Fahren, (3) iTC - Mobile App und (4) iTC Infrastruktur Smart City.

Technisches Grundkonzept eines iTC-Moduls

Modul 1 fokussiert auf die Ausarbeitung eines technischen H2E-Antriebskonzeptes, welches auf realistischen städtischen Nutzungsszenarien basiert und folgendes beinhaltet:

- **Festlegung der Betriebsanforderungen:** eine Beurteilung verschiedener **iTC-Szenarien** für Nutzung, mögliche Fahrzeugstrecken und beförderten Personen am Beispiel des Grossraums der Stadt Zürich.
- **Entwurf eines heute realisierbaren technischen Fahrzeugkonzeptes:** das technische Konzept für das **iTC-Fahrzeug**. Mit kommerziell erhältlichen Modulen wird ein Aufbau eines hybriden Brennstoffzellen/Batterieangetriebenen elektrischen **Fahrzeugantriebes** entwickelt.
- **Ausarbeitung eines Designkonzeptes:** ein mögliches Designkonzept für die Gestaltung der **Fahrzeugkarosserie** wird vorgestellt.

Das Fahrzeug muss in Bezug auf die Umweltverträglichkeit dem CO₂-Zero Anspruch genügen. Als Option kommen deshalb nur Elektroantriebe infrage. Der hohe Bedarf an elektrischer Energie zu den Hauptladezeiten am Abend führt zu einer nächtlichen, ungleichmässigen Überbelastung der Elektrizitätsnetzwerke. Durch die Bereitstellung von Wasserstoff aus überschüssiger Energie, können Fahrzeuge H₂ tanken. Sie bieten somit eine Möglichkeit der Leistungshomogenisierung in nationalen und internationalen Elektrizitätsnetzwerken.

Bei hybriden Antrieben kann die Energieversorgung entweder direkt über Batterien oder für längere Distanzen mit Hilfe einer zusätzlichen Energiespeicherung in Form von Wasserstoff erfolgen. In diesem Fall wird die elektrische Energie mit Hilfe einer PEMFC wieder zurückgewonnen. Die Batterie dient dann nur als Energiepuffer und kann somit viel kleiner und dadurch auch leichter ausgelegt sein. Das entwickelte Antriebskonzept basiert auf kommerziell erhältlichen Modulen, so dass bereits heute eine praktische Umsetzung möglich wäre. Der hierzu erforderliche Aufbau von H₂-Tankstellen stellt in der Tat lediglich ein kommerziell infrastruktur-spezifisches, nicht aber ein technisches (!) Problem dar.

I Festlegung der Betriebsanforderungen

Der Aufbau ist so ausgelegt, dass ein in Leichtbauweise angefertigte 4-plätziges iTC mit einer Maximalgeschwindigkeit von 60 km/h in der Stadt Zürich bewegt werden kann.

Der vorgegebene Fahrzyklus in der Stadt Zürich definiert ein Geschwindigkeitsprofil gekoppelt mit einem Höhenprofil. Die ausgewählte Strecke geht vom Zürich HB via Zoo, Örlikon und Flughafen Kloten zurück zum Hauptbahnhof.

Basierend auf der Europäischen Gesetzgebung und auf existierenden Fahrzeugen sowie mithilfe einer Fahrzyklusanalyse wurden folgende Anforderungen formuliert.

Tabelle 1: Anforderungsübersicht

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| Kontinuierliche Leistung | 40 kW |
| Spitzenleistung | 60 kW |
| Kontinuierlicher Drehmoment | 700 Nm |
| Kapazität | 4 Personen+ Gepäck |
| Maximalgeschwindigkeit | 60 km/h |
| Reichweite | 150 km |
| Fahrzeuglänge | 3400 mm |
| Fahrzeughöhe | 2200 mm |
| Fahrzeugbreite | 1700 mm |
| Bodenfreiheit | 140 mm |
| Radstand | 2200 mm |
| Spurbreite | 1495 mm |
| Kurvenradius | 9 m |
| Lenkwinkel | 30 ° |
| Gewicht | 1450 kg |

II Entwurf eines heute realisierbaren technischen Fahrzeugkonzepts:

Eine der wichtigsten Anforderungen an die Fahrzeuge ist ihr Nutzung resp. ihr Einsatz als „shared transport cubes“. Mit der Bezeichnung als „transport Cubes“ wird dem wichtigsten Auslegungskriterium - dem Personen und Waren-Transport vor anderen heute noch die Fahrzeuge stark beeinflussenden Kriterien wie Ästhetik, Statussymbol usw. Rechnung getragen.



Für den geplanten autonomen Betrieb werden keine Pedale und kein Steuerrad benötigt. Das bedeutet eine grösstmögliche Gestaltungsfreiheit des Innenraumes. Die Motoren können in den Rädern untergebracht werden, was zusätzliche Möglichkeiten der Fahrzeuggestaltung ermöglicht. Im Passagierraum soll die Möglichkeit bestehen, Passagiere in Rollstühlen zu befördern. Alternativ soll die Möglichkeit des Warentransports ausgelegt werden. Die Gewichtsschätzung basiert auf dem Leergewicht bestehender Elektroautos (Leergewicht 800kg) mit vier Passagieren (410kg), einer Batterie (140kg), einer Brennstoffzelle (30kg) und der Wasserstoffperipherie (70kg).

Zero Emission Konzept

Eine weitere Grundanforderung an die „Transport Cubes“ ist ihre absolute CO₂-Neutralität. Aus diesem Grund ist es klar, dass nur Elektroantriebe in Frage kommen. Die Differenzierung gegenüber der heute meist realisierten „Batterielösungen“ ist jedoch das hier verfolgte PEMFC-Konzept. Somit ein Konzept, wo die benötigte Energie primär in Form von H₂ mitgeführt wird. Dieses Konzept wird nicht auf Grund eines besseren Wirkungsgrades, sondern alleine aus Gründen der absoluten Umweltverträglichkeit von H₂, seiner unbeschränkten „Rezyklierbarkeit“ sowie der Option der möglichen Energiespeicherung bevorzugt.

Simulation des Energiemanagements

Im Sinne wiederum einer möglichst optimalen Schonung der Ressourcen einerseits, der Kosten aber andererseits, muss die Auslegung des Antriebseinheit nach den real gegebenen Anforderungen erfolgen.

Die untere Abbildung 1 zeigt die Komplexität beim Aufbau und Kontrolle der Brennstoffzelle. Die wichtigsten Funktionsgruppen sind die Luftzufuhr, die Wasserstoffzufuhr, der Wasserhaushalt, die Kühlung, die Spannungskontrollen sowie der Spannungswandler.

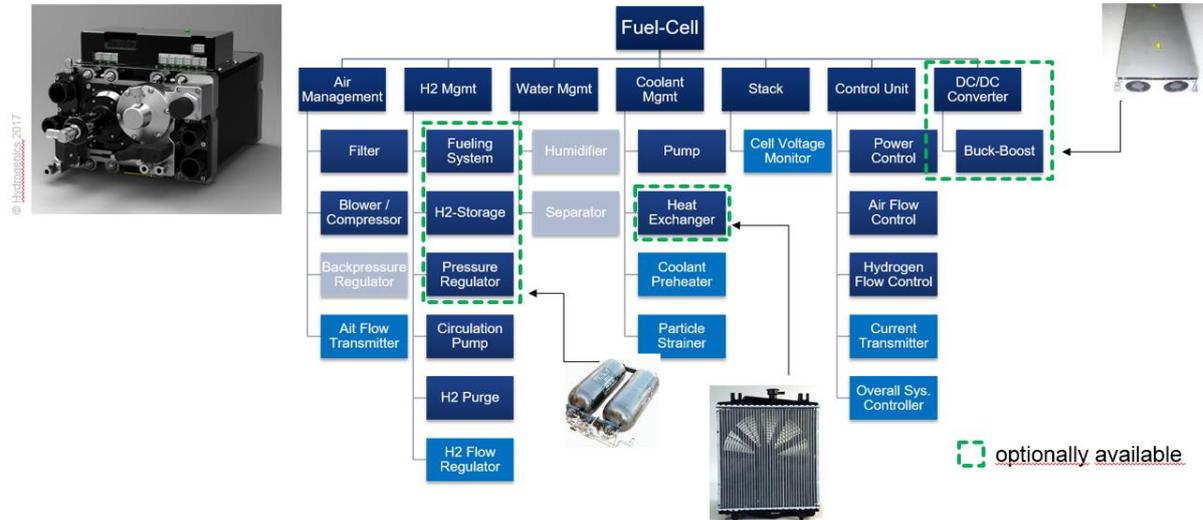


Abbildung 1: Übersicht der Komponenten einer Brennstoffzelle

Eine der Aufgaben bestand darin, die Brennstoffzelle für den ausgewählten Fahrzyklus in der Stadt Zürich möglichst optimal ausulegen. Die Fahrzyklen und Streckenspezifische Höhenprofile ermöglichen eine Analyse der Betriebsbedingungen und Verifizierung von potentiellen Komponenten. Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird in einer Rückkopplungsschleife vorgegeben und steuert das Leistungs- und Energieverhalten aller Komponenten. Die Protokolle des Verhaltens zeigen die Leistungs- und Drehmomentgrenzen. Eine konstante Brennstoffzellenleistung wird verwendet, um den Anfangsladungszustand (SOC) in Phasen geringer Auslastung wiederherzustellen. Der Leistungsverbrauch der Motoren und die Schwankungen der Ladezustände können durch eine Simulation in Simulink eruiert werden.

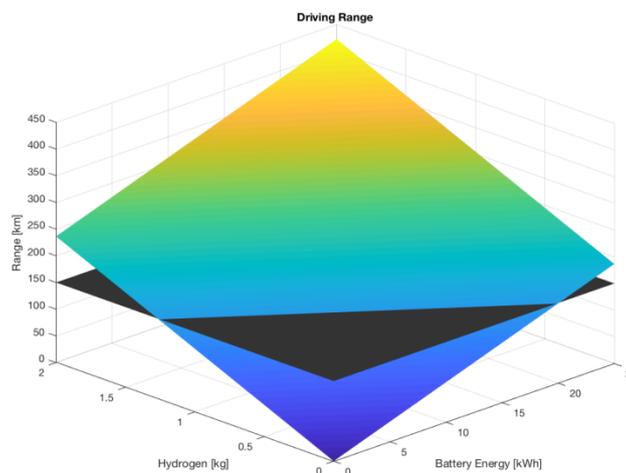


Abbildung 2: Theoretische Fahrzeugreichweite ohne Rekuperationsdynamik und Streckenprofile

Die theoretische Reichweite eines Fahrzeugs ist definiert durch eine Kombination aus Batteriegrösse und gespeicherter Wasserstoffmasse wie in Abbildung 2 dargestellt. Es sind mehrere Lösungen möglich, um die verlangten 150km Reichweite zu erreichen. In Abbildung

3 werden die möglichen Lösungen aufgezeigt, die sich durch den Schnitt der Anforderungen mit den berechneten Reichweiten ergeben. Es sind reine Elektroantriebe sowie reine Brennstoffzellenantriebe möglich. Mit der Annahme eines tieferen Durchschnittsenergieverbrauchs durch Gewichtsverminderung wird eine Reduktion der Batteriegrösse angestrebt. Die Batterie erfüllt die Anforderungen an die Leistungsspitzen und speichert die regenerierte Energie. Eine vollkommene Entladung auf 0% sollte verhindert werden um die Lebensdauer nicht einzuschränken. Ladezustände zwischen 10% und 80% sind darum optimal.

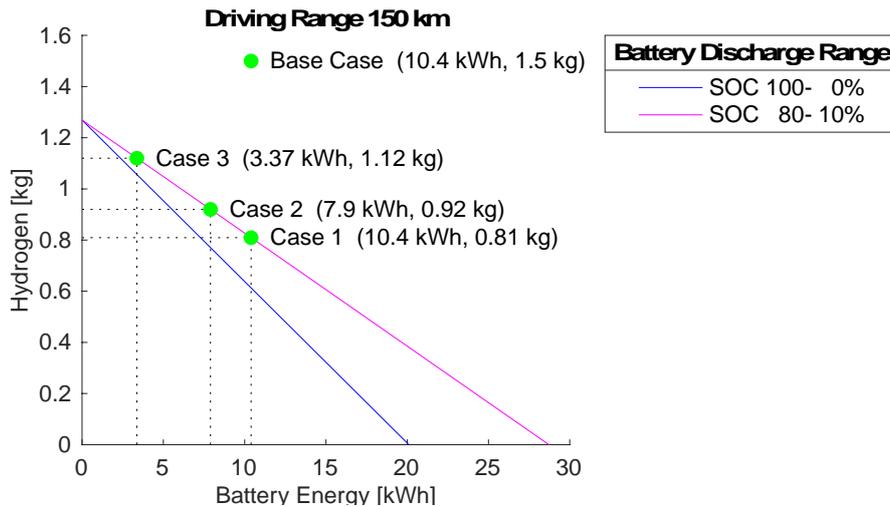


Abbildung 3: Schnittmenge zwischen Anforderungen und berechneter Reichweite

Es wurden drei Kombinationsmöglichkeiten in die Simulation der Fahrzyklen miteinbezogen. Bei Case 3 kann die Batteriekapazität nicht die Leistungsspitzen bei der Rekuperation verwerten und der Ladezustand kann nicht konstant gehalten werden. Die Batterie leert sich bevor der gesamte Wasserstoffvorrat aufgebraucht ist. Die Kombinationen 1 und 2 erreichen die erforderlichen 150km mit dem tiefsten Ladezustand von 10%, siehe Abbildung 4.

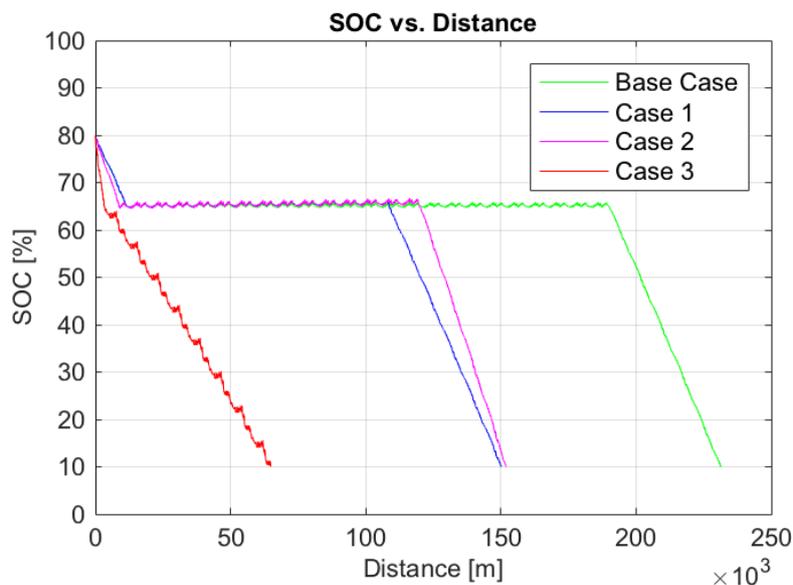


Abbildung 4: Ladezustand der Batterie als Funktion der Strecke im Fahrzyklus

Anforderung eines durchgängigen Betriebs.

Das iTC sollte in den urbanen Gebieten einen autonomen Betrieb 24h/7 Tage pro Woche bereitstellen können. Eine grössere betankte Wasserstoffmasse erlaubt eine Erweiterung der Reichweite, ohne dass der Ladezustand unterhalb des kritischen Zustandes fällt. Die optimale Kombination aus Brennstoffzelle und Batterie für die verlangten Fahrzyklen besteht somit aus einer 10.4kWh Batterie zusammen mit einer 7.8kW Brennstoffzelle und mindestens 1.3kg Wasserstoff. Der Base Case in Abbildung 4 widerspiegelt diesen mit 15% mehr Wasserstoff als Sicherheitsreserve.

Aufbau des Antriebskonzeptes

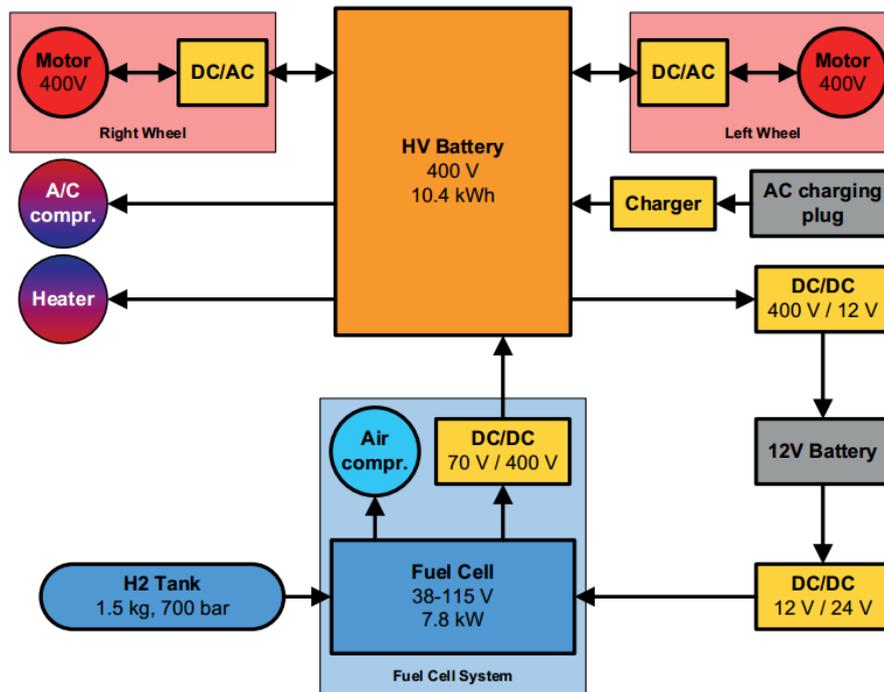


Abbildung 5: Antriebskonzept mit hybrider Energieversorgung

Das gewählte Antriebskonzept garantiert die gewählte Reichweite und das gewünschte Fahrverhalten durch eine hybride Energieversorgung dargestellt in Abbildung 5. Eine Hochspannungsbatterie wird verwendet um Leistungsspitzen abzudecken. Die Brennstoffzelle hat die Eigenschaft einer langsamen Dynamik bei Leistungsschwankungen und muss für einen effizienten Betrieb an einem konstanten Betriebspunkt gehalten werden. Dadurch ist sie mit einem konstanten und niedrigen Strom- und Spannungsniveau als Range-Extender geeignet. Ein Gleichspannungswandler zwischen der Brennstoffzelle und der Batterie ist notwendig und minimiert Umwandlungsverluste zwischen der Hochvoltbatterie und dem Motor. Die Motoren sind mit der gesamten Elektronik im Rad eingebaut. Als Hybridfahrzeug bietet sich auch die Möglichkeit die Hochvoltbatterie über einen externen Anschluss ans Stromnetz anzuschliessen.

Zustandsmaschine als Zwischenschritt zum Prototyp

Die Zustandsmaschine modelliert einen vorläufigen Ansatz für eine Fahrzeugsteuereinheit (Vehicle Control Unit). Änderungen zwischen verschiedenen Fahrzuständen sowie Anlauf und Sicherheitsabschaltung können dadurch simuliert werden.

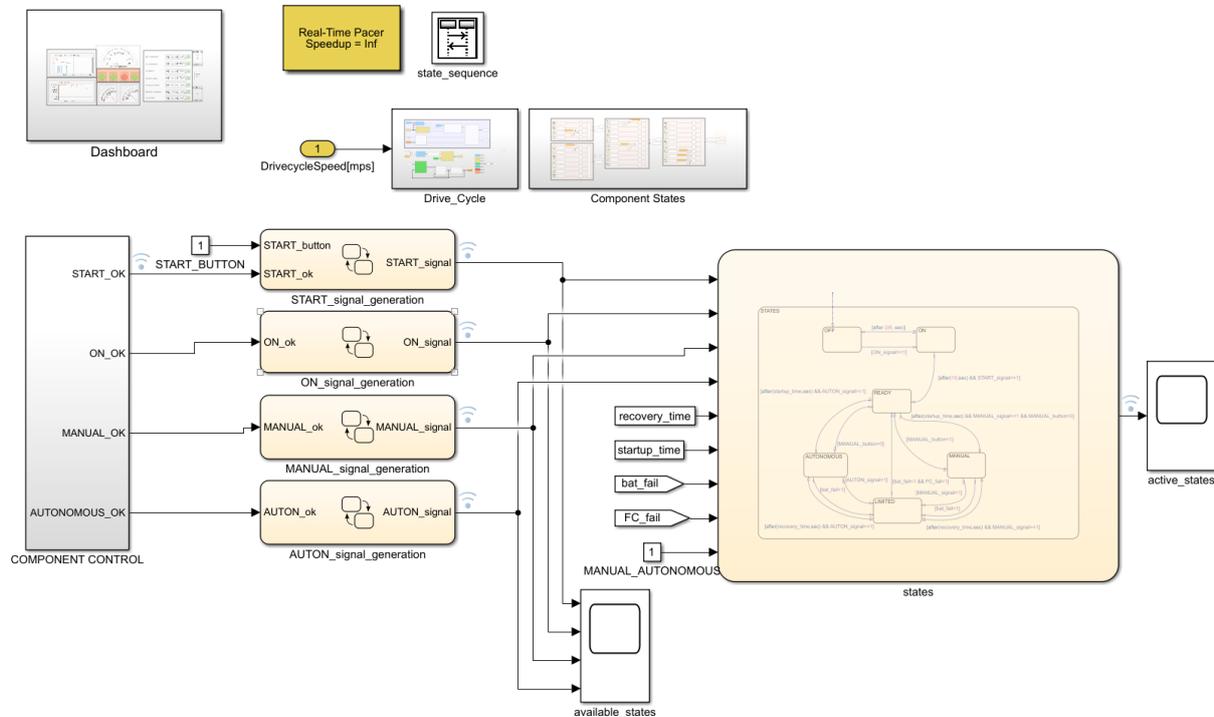


Abbildung 6: Zustandsmaschine Simulink structure

Die Elemente der Zustandsmaschine sind in zwei Ebenen geordnet. Die höchste Ebene in Abbildung 6 zeigt die Hauptblöcke. Die wichtigsten sind die Komponentensteuerung und die Zustandsänderungen von Maschine starten, Motoren an, manuelle Steuerung und automatischer Betrieb. Hinzu kommen die Fahrzyklen und das Armaturenbrett.

Die Simulation zeigt die Dynamik im Übergang der Betriebszustände. Informationen aus dem Energiemanagement und vordefinierten Komponentenparameter sowie provozierte Fehler können über das Armaturenbrett in Abbildung 7 angezeigt werden. Untersysteme können durch Schnittstellen gesteuert und überwacht werden. Der Benutzer hat die Möglichkeit, die Komponenten durch Implementierte Schieberegler und Kippschalter zu steuern. Während des VCU-Entwicklungsprozesses konnte somit theoretisches Wissen durch die verschiedenen Funktionen der Zustandsmaschine gewonnen werden. Für eine optimale VCU können jetzt Versionsiterationen durchgeführt werden, speziell beim hinzufügen neuer Funktionen und Komponenten.

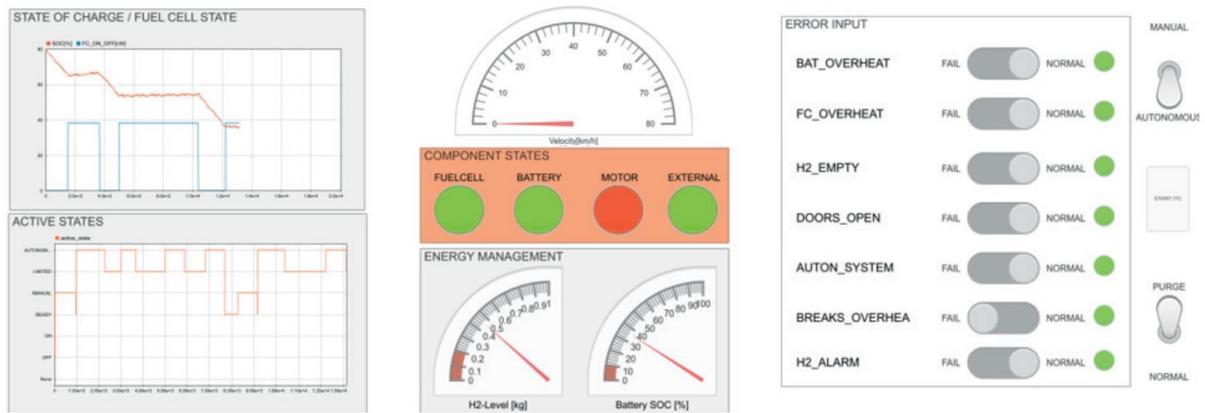


Abbildung 7: Armaturren Brett mit Steuerungsübersicht

Komponentenübersicht und Kostenvorschlag

Das Antriebsmodul besteht grundsätzlich aus zwei Radnabenmotoren, einer Motorsteuerung, einem Gleichspannungsumwandler, einer Traktionsbatterie, zwei Wasserstofftanks und einem Kühler. Die Anordnung der Komponenten ist in Abbildung 8 sichtbar.

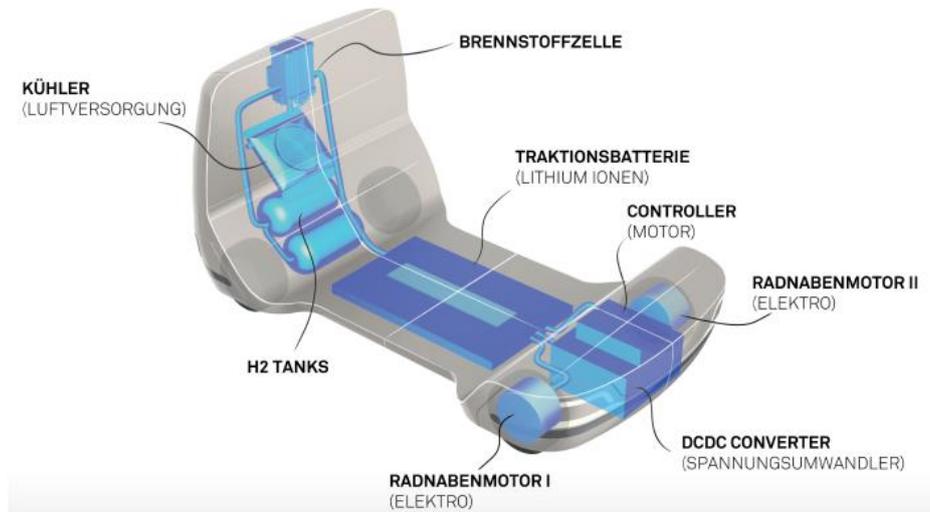


Abbildung 8: Anordnung der Komponenten des Antriebs

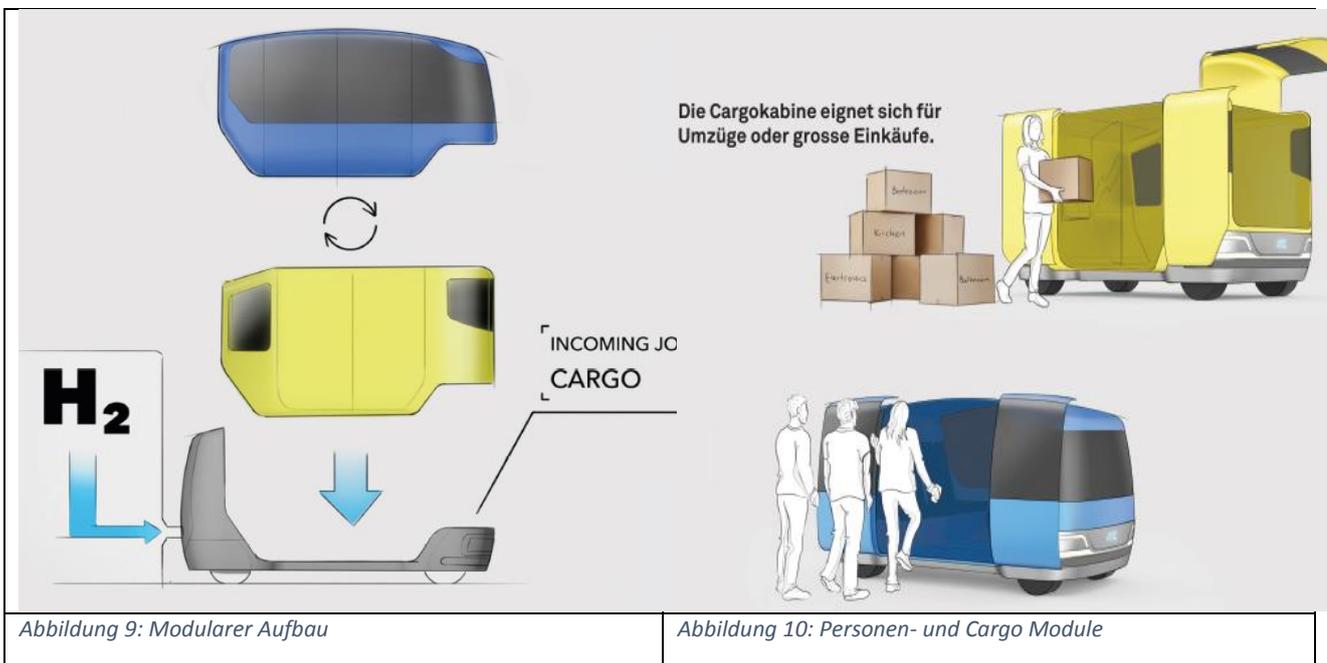
Tabelle 2: Kostenübersicht für die Antriebstechnik

| | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Brennstoffzelle | 42 000 CHF | Proton Motors S8 Power Modul |
| Brennstoffzelle Peripheriegeräte | 5 000 CHF | Schätzung |
| Wasserstoff Peripherie | 2 000 CHF | Schätzung |
| DC/DC Gleichspannungswandler | 8 000 CHF | Tame Power Comet |
| Hochspannungsbatterie | 8 000 CHF | Lithium Storage |
| Total | 65 000 CHF | |

III Ausarbeitung eines Design- und Nutzungskonzeptes

Fahrzeugkarosserie und Nutzerszenarien

Der Aufbau des Fahrzeugs in Abbildung 9 weist eine technische Trennung zwischen dem Antriebsmodul und der Kabine. Der Wasserstofftank, die Brennstoffzelle und die Kühlung befinden sich im Heck, die Batterie in der Mitte und die Radnabenmotoren sowie die Gleichspannungswandler vorne. Die Fahrkabine wird modular auf dem fahrbaren Untersatz aufgesetzt und kann durch eine Cargo Variante ersetzt werden (Abbildung 10). Die Wasserstofftechnik ist für die Wartung einfach zugänglich von aussen und aus Sicherheitsgründen abgesondert von der Fahrkabine.



Die Bestellung eines iTCs wird mithilfe einer App erledigt. Der reine Personen- oder Warentransport sowie eine gemischte Nutzung sind denkbar. Personen können ein Taxi bestellen, geleitete Sightseeing Touren buchen, ihren Umzug begleiten, einen zweiten iTC zur Kapazitätserweiterung buchen oder Waren autonom zu einem bestimmten Abgabeort senden. Es eröffnet sich ein grosses Anwendungsfeld. Die Berücksichtigung der Wasserstofftechnik im Designprozess ist ein Alleinstellungsmerkmal im Vergleich zu anderen aktuellen Mobilitätskonzepten.

Die hier oben gezeigten Designstudien wurden im Rahmen der Bachelorarbeit durch C. Poli an der ZHdK entwickelt.

Zusammenfassung / Fazit

- Ein Fahrzeugkonzept für die zukünftige urbane Mobilität wird vorgeschlagen. Basierend auf Gewicht und Beschleunigungsdaten wurden die benötigten Leistungsanforderungen ermittelt. Das Antriebskonzept mit einem Radnabenmotor wurde aus Effizienzgründen ausgewählt sowie um eine möglichst grosse Designfreiheit zu ermöglichen.
- Die langsame Dynamik der Brennstoffzellen erfordert eine Hybride Energieversorgung. Die geeigneten Komponenten werden vorgestellt und eine Kostenanalyse durchgeführt. Die Batterie liefert die nötige Leistung für alle Leistungsszenarien und die Brennstoffzelle lädt die Batterie konstant wieder auf. Sie sorgt somit für eine grössere Reichweite.
- Mittels eines Fahrzeugmodells wurde das Energiemanagement simuliert und die Leistungsanforderungen an die Komponenten bestätigt. Die Batteriegrösse wurde ebenfalls bestätigt. Ein kleinerer Batteriespeicher zeigt keine relevante Verbesserung aufgrund der Gewichtsreduktion, sondern eine Limitierung des Potentials der Energierückgewinnung.
- Die Entwickelte Zustandsmaschine erlaubt es, die Zusammenwirkung aller Antriebskomponenten besser zu verstehen. Dadurch sind die Voraussetzungen für die Programmierung der Fahrzeugkontrolleinheit gegeben.
- Die Entwicklung unterschiedlicher Nutzerszenarien führte zu einem modularen Fahrzeugaufbau. Das Antriebsmodul kann Personenmodule sowie Cargomodule transportieren.

ⁱ Literatur:

- Claudia Polli**, Intelligent Transport Cube mit H2E Antrieb, 2018, Bachelorarbeit Industrial Design, ZHdK
- Dario Fontana**, Virtual Concept of a Fuel-Cell Based Powertrain for Urban Transport Cubes, Layout of the fuel-cell with peripherals and state machine modelling, 2017, Masterarbeit IVP Nr. 17-181
- Marco Schneider**, Virtual Concept of a Fuel-Cell Based Powertrain for Urban Transport Cubes, Evaluation of motor and battery, analysis of the energy Management using a vehicle model, 2017, Masterarbeit IVP Nr. 17-182
- Tamara Weissenbach**, Mathematical basics for PEM fuel cell modelling, 2018, Semesterarbeit IVP Nr. 18-178
- Flurin Theus**, Experimentale Grundlagen zum Prüfen unterschiedlicher Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzellen mit Graphit- und Titanbipolarplatten, 2018, Bachelorarbeit IVP Nr. 18-179

