

Simulation und Prüfstandsbetrieb des Antriebsstrangs eines Batterie- und Brennstoffzellen Hybrid-Schienenfahrzeuges

Fabian Meishner¹, Cem Ünlübayir¹, Kai Deng², Hujun Peng², Andreas Thul², Steffen Dirkes³, Sören Tinz³, Dirk Uwe Sauer¹

¹Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen University, Germany

²Lehrstuhl für Elektromagnetische Energiewandlung und Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Germany

³Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA), RWTH Aachen University, Germany

Zusammenfassung

Um die globalen Treibhausgasemissionen zu reduzieren und internationale Klimaziele zu erreichen, nimmt der Transportsektor eine wichtige Rolle ein. Elektrische Eisenbahnen sind ein energieeffizientes Verkehrsmittel und verursachen, bei entsprechendem Strommix, deutlich geringere spezifische CO₂-Emissionen als die Alternativen auf der Straße und in der Luft. In Deutschland sind aktuell etwa 50 % des Streckennetzes nicht elektrifiziert. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Nebenabschnitte des Regional- und Nahverkehrsnetzes. Auf diesen werden dieselmotorisch betriebene Züge eingesetzt, von denen ein nicht unerheblicher Teil bereits seit Jahrzehnten im Betrieb ist, und in naher Zukunft ersetzt werden muss. Da ein Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur auf weniger frequentierten Strecken oft keine wirtschaftliche Option ist, gleichzeitig aber emissionsarme Antriebe in den Ausschreibungen zum Betrieb der Strecken gefordert werden, müssen Alternativen für einen emissionsärmeren Betrieb gefunden werden. Eine Möglichkeit, der sich diese Arbeit widmet, ist der elektrische Antrieb mit Energieversorgung aus hochleistungsfähigen Brennstoffzellen und Batterien. Im Rahmen eines öffentlich geförderten Projektes wird am CMP (Center for Mobile Propulsion) der

RWTH Aachen University ein Prüfstand mit solch einem neuartigen Antriebsstrang, bestehend aus Brennstoffzellen, Batterien und Umrichtern aufgebaut und erprobt. Die beteiligten Komponenten und der Gesamtaufbau werden echtzeitfähig modelliert, um verschiedene Betriebsarten theoretisch zu testen und im realen System anzuwenden.

Für Hybridelektrofahrzeuge spielt die Energiemanagementstrategie für die Leistungsverteilung zwischen den Brennstoffzellen und Batterien, eine zentrale Rolle zur Minimierung des Wasserstoffverbrauches. Dafür wird eine adaptive regelbasierte Strategie entwickelt, optimiert und mit der Referenzstrategie verglichen.

Die vorgestellte Arbeit gewährt einen Einblick in die verschiedenen Komponenten und den Aufbau des Prüfstands. Außerdem werden erste Simulationsergebnisse präsentiert.

Keywords: Brennstoffzelle, Batterie, Hybridzug, Oberleitungsfrei, Prüfstand, Modellierung

1 Einleitung

Die vorgestellte Arbeit beschäftigt sich mit der Integration einer Kombination aus Brennstoffzelle und Batterie in ein modulares Traktionsbaukastensystem für Schienenfahrzeuge (Siemens-Zugplattform Mireo®, siehe Abbildung 28). Die Züge sind für Geschwindigkeiten bis zu 160km/h ausgelegt und sollen hauptsächlich auf Pendlerstrecken zum Einsatz kommen [1]. An der RWTH Aachen University (Institut für Verbrennungskraftmaschinen (VKA), Institut für Elektrische Maschinen (IEM) und Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA)) wird in Kooperation mit der Siemens AG eine universell einsetzbare Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfumgebung entwickelt, in welcher die realen Komponenten sowie deren Modelle integriert, weiterentwickelt und evaluiert werden können.



Abbildung 28: Nahverkehrszug „Mireo“, Siemens AG [1]

Das Konzept eines brennstoffzellenbetriebenen Nahverkehrszuges wird neben Siemens auch von anderen Herstellern verfolgt. So hat Alstom in seine bestehende Baureihe von

Nahverkehrsdieseltriebwagen einen Brennstoffzellenantrieb mit Batterie eingebaut („Coradia iLint“). Die Züge befinden sich bereits in Niedersachsen im regulären Linienbetrieb [2]. Der chinesische Schienenfahrzeughersteller China Railway Rolling Stock Company (CRRC) hat die erste Wasserstoff-Straßenbahn entwickelt [3]. Des Weiteren arbeitet auch Bombardier an oberleitungsfreien elektrischen Zügen [4].

Siemens wählte einen systemischen Ansatz und strebt an, die Komponenten des Gesamtsystems einzeln und im Zusammenspiel zu optimieren. Die Komponenten und ihre jeweilige Modellierung, die als wichtige Grundlage für den Einsatz in der HiL-Umgebung dient, werden in Kapitel 2 vorgestellt. In Kapitel 3 wird auf den Aufbau des Prüfstands eingegangen. Der optimale Betrieb eines solchen Hybridsystems ist abhängig von zahlreichen Bedingungen und eine wichtige Forschungsfrage. In Kapitel 4 werden verschiedene Strategien und erste Erkenntnisse vorgestellt.

2 Komponenten- und Systemmodellierung

Im vorgestellten Forschungsvorhaben kommen grundsätzlich zwei Modellvarianten zum Einsatz. Zum einen wird ein Gesamtmodell, welches alle Komponenten abbildet, für reine Simulationsuntersuchungen benötigt. Die zweite Variante wird für den Prüfstandsbetrieb verwendet, um die nicht am Prüfstand vorhandenen Komponenten zu emulieren. Dabei wird die Struktur für beide Modellvarianten gleich gehalten, damit identische Modellteile gemeinsam weiterentwickelt werden können und austauschbar sind. Die resultierende Struktur und die wesentlichen Schnittstellen des Modells sind in Abbildung 29 dargestellt. Hierbei handelt es sich um die rein simulative Variante. Für das Prüfstandsmodell entfallen die Teilmodelle für Batterie, Brennstoffzelle sowie der Batteriezwischenkreis und der DC/DC-Wandler. Die simulierte Traktionsleistung ist dann die Modellausgangsgröße, welche am Prüfstand durch einen Laststeller emuliert wird. Im Folgenden wird die Modellierung der wesentlichen Teilkomponenten näher beschrieben.

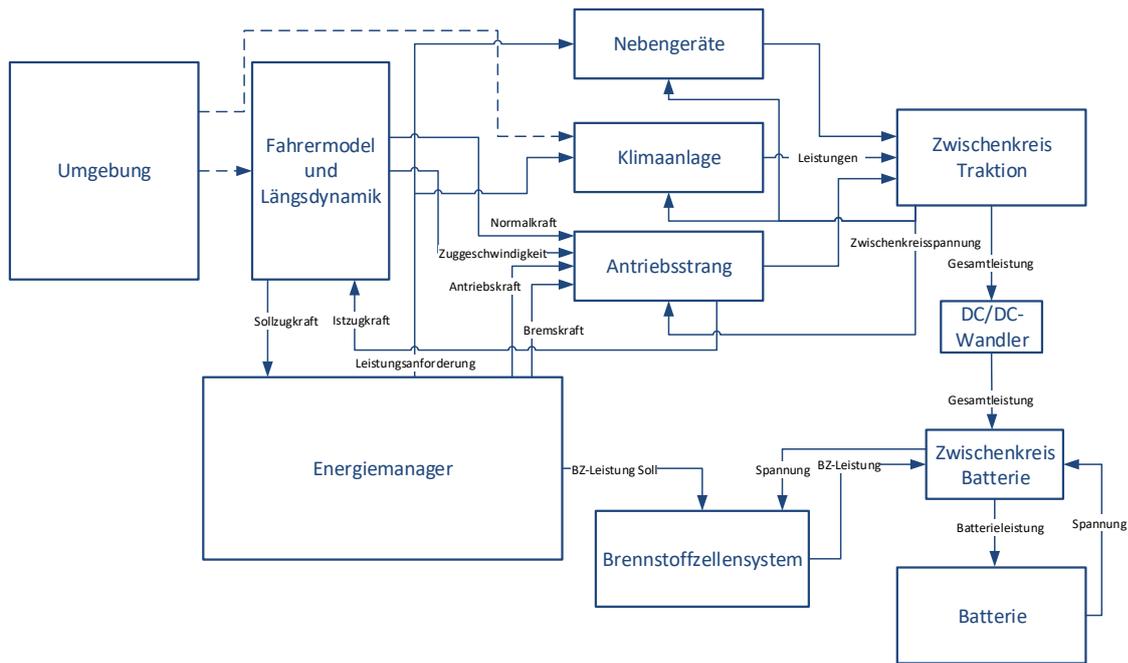


Abbildung 29: Aktueller Stand der Fahrzeug-Modellstruktur.

2.1 Umgebungsmodell

Im Umgebungsmodell werden die Streckeneigenschaften sowie alle für die Simulation relevanten Parameter der Fahrzeugumgebung nachgebildet. Um in der Simulation zunächst bestimmte Fahrtverläufe vergleichend zu untersuchen, werden zeitbasierte Fahrprofile für Geschwindigkeit und Längsneigung der Strecke vorgegeben. Diese Profile wurden anhand der Streckendaten und Haltezeiten unter Berücksichtigung der Maximalbeschleunigung im Voraus berechnet und sind die primären Eingangsdaten für die Simulation. Andere relevante Umgebungsparameter sind die Anzahl der Fahrgäste, die Umgebungstemperatur sowie die Sonneneinstrahlung. Letztere werden für die Simulation der Fahrzeugklimatisierung benötigt.

2.2 Gesamtfahrzeug und Längsdynamik

Dieser Modellteil bildet das längsdynamische Verhalten des simulierten Gesamtfahrzeuges ab, und bestimmt so dessen tatsächliche Geschwindigkeit. Dabei werden an dieser Stelle alle auf das Gesamtfahrzeug einwirkenden Kräfte berücksichtigt. Dies sind zum einen die aus dem Luftwiderstand, der Hangabtriebskraft, der Beschleunigungskraft und der Schwingungsdämpfung resultierenden Kräfte sowie die Summe aller Zugkräfte. Da die Rollwiderstände am Rad-Schiene-Kontakt wirksam sind, werden diese in dem entsprechenden Teilmodell bei der Berechnung der Raddrehzahl berücksichtigt. Demnach

sind die hier einfließenden Zugkräfte schon um den Rollwiderstandsanteil bereinigt. Effekte von Kurvenfahrten werden nicht berücksichtigt, da entsprechende Daten nicht für alle zu simulierenden Profile vorliegen.

2.3 Antriebsstrang

In diesem Teilmodell werden die elektrische Maschine sowie der zugehörige Traktionsstromrichter und das Getriebe nachgebildet. Da transiente Vorgänge in Maschine und Umrichter deutlich schneller ablaufen als das hier interessierende Gesamtverhalten des Fahrzeuges, ist eine transiente Modellierung dieser Komponenten nicht notwendig. Wesentliche Aufgabe ist die Bestimmung der in den Komponenten anfallenden Verluste, um die gesamte aufgenommene oder abgegebene Leistung des Gesamtantriebes bestimmen zu können. Das Verhalten dieser Komponenten wird daher stationär nachgebildet, vorhandene unterlagerte Regelungen für Umrichter und Motor sind entsprechend nicht enthalten. Da in einem Fahrzeug mehrere separat angetriebene Radsätze vorhanden sind, wird die geforderte Zugkraft als Eingangsgröße auf einen Antrieb herunterskaliert. Neben den genannten Komponenten werden außerdem das dynamische Verhalten des angetriebenen Radsatzes und der zugehörige Rad-Schiene-Kontakt modelliert. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Teilmodelle eingegangen.

Für die elektrische Maschine wird ein kennfeldbasierter Modellierungsansatz gewählt. Eingangsgrößen sind die aktuelle Drehzahl der Maschine und das geforderte Drehmoment, welches aus der Sollzugkraft berechnet wird. In den Kennfeldern (vgl. Abbildung 30 sind für alle Betriebspunkte der elektrischen Maschine die Verlustleistung, der Statorstrom, die Grundwellenspannung und der Leistungsfaktor hinterlegt. Die letzten drei Größen benötigt das Umrichtermodell zur Berechnung der anfallenden Umrichterverluste. Die Kennfelder selbst wurden aus elektromagnetischen FE-Simulationen einer Asynchronmaschine mit für die Anwendung passenden Leistungs- und Drehzahleckdaten bestimmt.

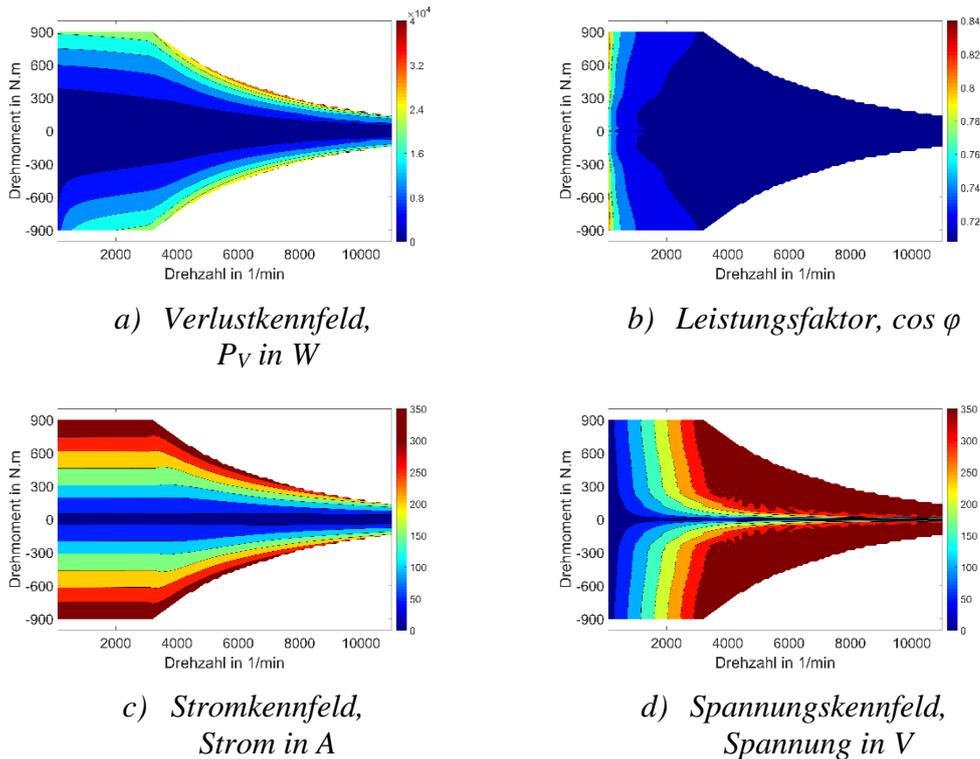


Abbildung 30: Motorkennfelder einer Antriebseinheit mit Asynchronmaschine.

Im Umrichtermodell werden anhand von Maschinenstrom und -spannung sowie Leistungsfaktor die entstehenden Verluste berechnet. Es kommt ein analytisches Verfahren nach [5] zum Einsatz, welches auf folgenden Annahmen basiert:

- Durch die Ansteuerung bedingte Verlustleistungen werden nicht berücksichtigt (z.B. durch Treiberschaltungen).
- Das PWM-Verfahren ist sinusförmig und im linearen Aussteuerbereich.
- In der Maschine fließen rein sinusförmige Ströme ohne Oberschwingungen.

Aufgrund des gewählten quasistationären Modellansatzes sind diese Vereinfachungen zulässig. Die Summe aus Umrichter- und Maschinenverlusten sowie der abgegebenen mechanischen Leistung ist die gesamte vom Antriebsstrang aufgenommene elektrische Leistung. Diese wird mit der Gesamtzahl der Antriebe skaliert und dem Gesamtmodell übergeben.

2.4 DC/DC-Wandler

Zur Kopplung von Traktionszwischenkreis und Traktionsbatterie kommt ein DC/DC-Wandler zum Einsatz. Der Aufbau des Wandlers mit IGBTs (Insulated-Gate Bipolar Transistor) und Dioden ist in Abbildung 31 dargestellt. Analog zur Motorstromrichter-

modellierung wird ein quasistationärer Ansatz gewählt. Die in Halbleiterschalter und Diode auftretenden Verluste werden nach [5] berechnet. Zusätzlich wird das thermische Verhalten mit einem Wärmequellennetzwerk (vgl. Abbildung 32) nachgebildet. Auf diese Weise kann die Temperatur der Halbleiter berechnet und deren Einfluss auf die elektrischen Verluste mitberücksichtigt werden.

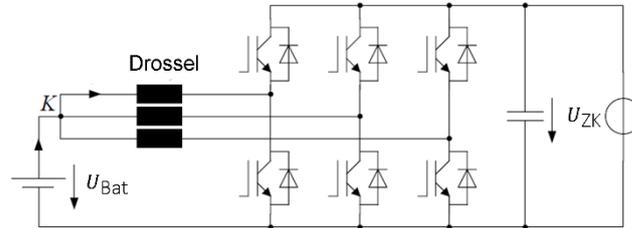


Abbildung 31: DC/DC-Wandler.

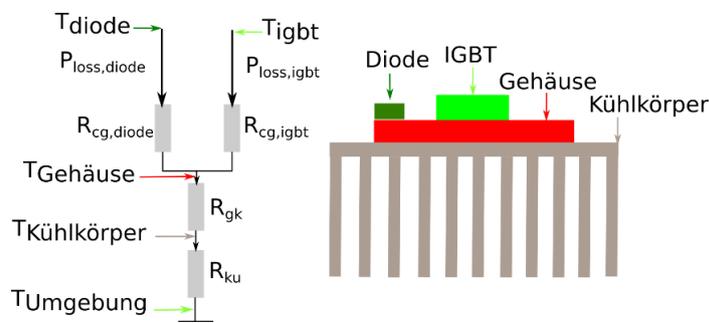


Abbildung 32: Thermisches Modell der IGBT-Module.

2.5 Brennstoffzelle

Als Bestandteil des Simulationsmodells für den gesamten hybriden Antriebsstrang wird am VKA ein Modell für das Brennstoffzellensystem entwickelt. Neben dem Zellstapel, dessen Verhalten durch ein semi-empirisches Modell beschrieben wird, besteht das Brennstoffzellensystem aus diversen Komponenten, die ebenfalls abgebildet werden müssen. Das vorliegende System ist vereinfacht in Abbildung 33 dargestellt.

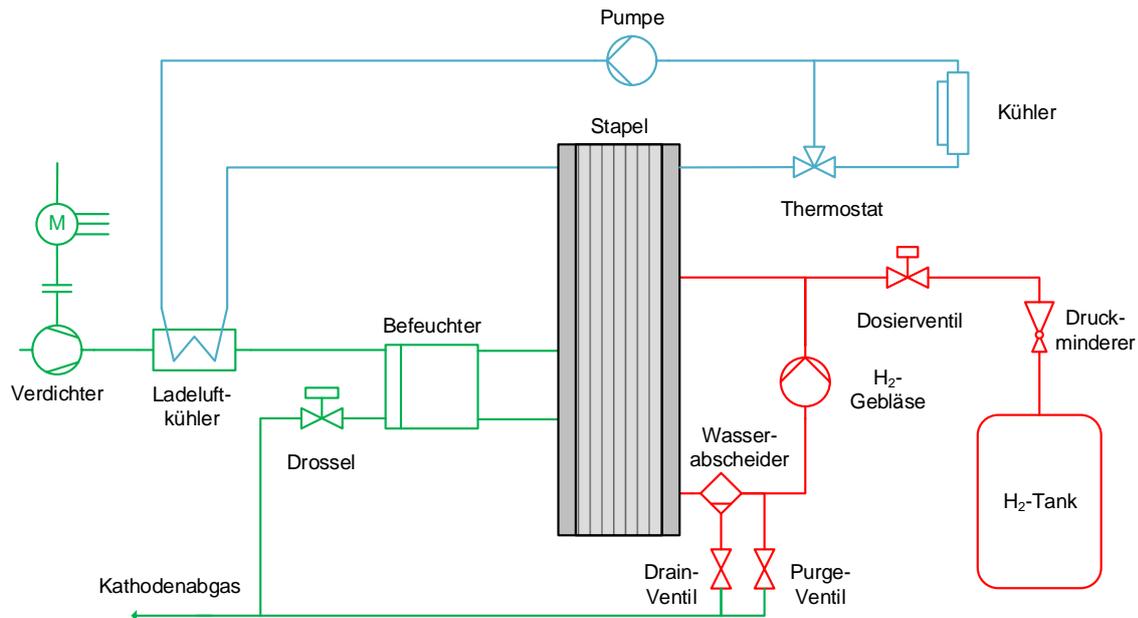


Abbildung 33: Vereinfachte Darstellung des Brennstoffzellensystems: Luft (grün), Wasserstoffpfad (rot), Kühlmittelpfad (blau)

Diese Komponenten umfassen den Luftpfad, den Wasserstoffpfad, sowie den Kühlmittelpfad. Die der Zelle zugeführte Luft wird zunächst verdichtet, um höhere Partialdrücke und damit Leistungsdichten und Wirkungsgrade zu erzielen. Daran schließt sich eine Wärmeabfuhr im Ladeluftkühler an. Im vorliegenden Brennstoffzellensystem wird eine externe Befeuchtung der Zuluft in einem Membranbefeuchter unter Nutzung der Feuchte der Kathodenabluft eingesetzt. Eine Drossel nach dem Stapel dient dazu, das Druckniveau aufrechtzuerhalten. Auf der Wasserstoffseite wird der Wasserstoff vom Speicherdruck in mehreren Stufen entspannt auf etwa Kathodendruckniveau. Um die Konzentrationen der Reaktanten sowie des Wassers entlang der Kanäle zu homogenisieren, sowie um Flüssigwasser mit Hilfe hoher Strömungsgeschwindigkeiten aus dem Stapel auszutreiben, wird mehr Wasserstoff dem Stapel zugeführt, als in der Reaktion umgesetzt wird. Um den überschüssigen Wasserstoff nicht zu verschwenden, wird dieser mittels elektrischem Gebläse rezirkuliert und dem Frischwasserstoffmassenstrom beigemischt. Der Kühlmittelkreislauf dient dazu, Wärme aus dem Stack, aber auch aus der Ladeluft abzuführen.

Für das Simulationsmodell sind Modelle jeder einzelnen Komponente erstellt worden. Diese wurden in ein Gesamtmodell des Brennstoffzellensystems integriert. Außerdem wurde eine erste Regel- und Betriebsstrategie entworfen, die die Grundlage für weitere simulative Untersuchungen des Systems bildet. Messergebnisse vom Prüfstand dienen als Grundlage für die Parametrierung und Validierung des detaillierten Modells.

2.6 Batterie

Das Batteriemodell der verwendeten Lithium-Ionen Hochleistungszelle wird aus realen Messdaten parametrisiert, bestehend aus Pulstests und elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS, [8]). Anschließend werden die Elemente eines vorher definierten Ersatzschaltbildes der Zelle parametrisiert (s. Abbildung 34), welche die physikalischen Vorgänge repräsentieren sollen.

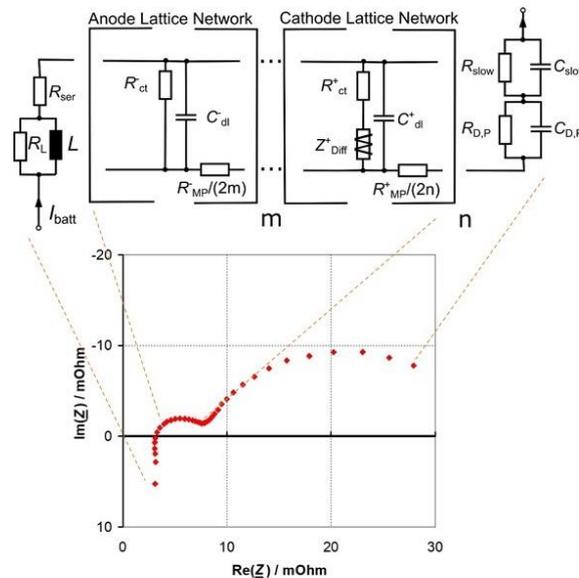


Abbildung 34 Schaubild: Parametrierung eines Ersatzschaltbildes aus EIS-Spektren (hier dargestellt für ein Spektrum bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten SOC)

Aus thermischer Sicht wird die Zelle in Blöcke mit bekannter Wärmekapazität und Wärmeübergangswiderständen unterteilt. Über die Kenntnis der Verlustleistung, welche ebenfalls experimentell bestimmt wird, sowie der Umgebungsbedingungen, kann die Zelltemperatur simuliert werden.

Die Zellen werden zu Modulen verschaltet, welche wiederum zu einem Pack verbunden werden. Die Verlustwärme wird über eine aktive Flüssigkühlung abgeführt. Tabelle 11 zeigt die Spezifikation der Traktionsbatterie für einen Halbzug. Diese wird sowohl echtzeitfähig simuliert, als auch im Prüfstand betrieben.

Tabelle 11: Spezifikation der Traktionsbatterie für einen Halbzug

Nominelle Spannung	850 V
Energieinhalt	ca. 200 kWh

3 Prüfstandsaufbau und –betrieb

3.1 Systemprüfstand

Auf dem Systemprüfstand sollen die Energieflüsse zwischen Batterie, Brennstoffzelle und den elektrischen Verbrauchern des Fahrzeuges experimentell untersucht werden. Der gesamte Prüfstand ist am Center for Mobile Propulsion (CMP) der RWTH Aachen University aufgebaut.

Die Wasserstoffversorgung wird durch Tankauflieger mit einem Fassungsvermögen von ca. 350 kg Wasserstoff gewährleistet. (siehe Abbildung 35, links). Bis zu zwei dieser Tankauflieger können an die Betriebsgasleitung angeschlossen werden. Im Vergleich zu der Verwendung von Wasserstoffflaschenbündeln mit einem Fassungsvermögen von lediglich ca. 9 kg Wasserstoff wird so ein kostengünstiges, unterbrechungsfreies Testen der Brennstoffzellensysteme über Zeiträume von mehreren Tagen ermöglicht. Hierdurch kann die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzellensysteme während eines längeren Zeitraums untersucht werden. Des Weiteren können sowohl reversible als auch irreversible Leistungsverluste analysiert werden.

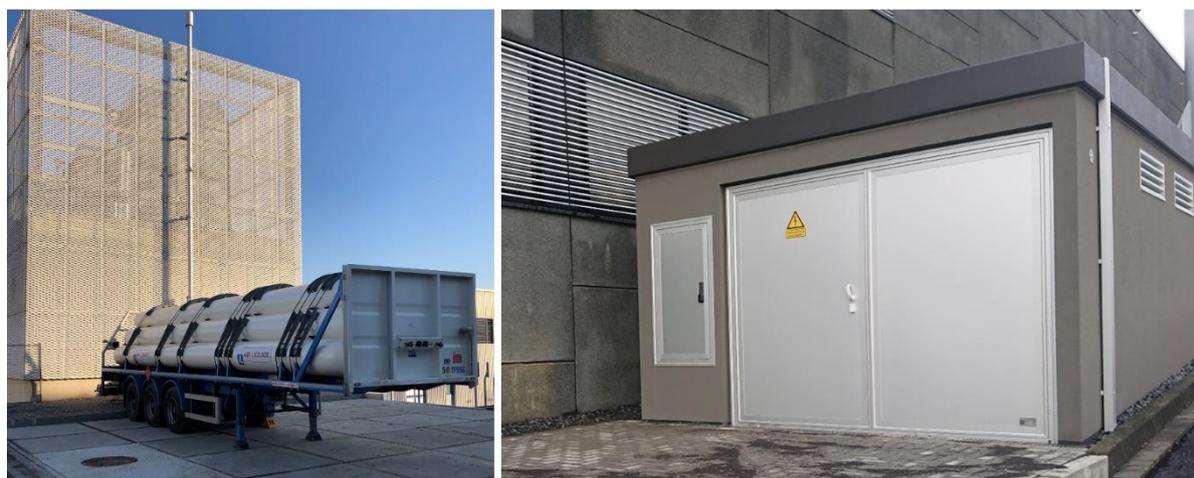


Abbildung 35: Wasserstoffinfrastruktur mit Tankaufliegern (links) und Batteriegarage (rechts).

Auf Basis einer Risikoanalyse und der Sicherheitsanforderungen im Prüffeld des CMP sind die im Hybridsystem verwendete Traktions- und Lastbatterie in eine Batteriegarage außerhalb des Gebäudes untergebracht (Abbildung 35, rechts).

Im Zuge der ersten Phase der Inbetriebnahme wurden beide Brennstoffzellensysteme ($100 \text{ kW}_{\text{net}}$) mit einer Lasteinheit der Fa. Digatron ($160 \text{ kW}_{\text{max}}$ Batteriesimulator) in Betrieb genommen, welche die elektrische Leistung der Brennstoffzellensysteme in das öffentliche Stromnetz einspeist (Abbildung 36). Die Tests der Brennstoffzellensysteme zeigen auch im Fehlerfall ein sicheres und kontrolliertes Abschalten.

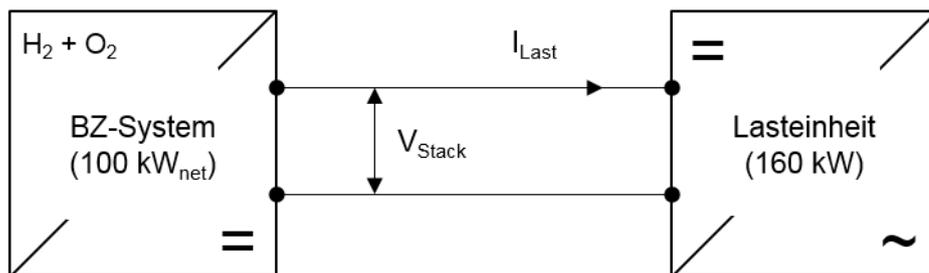


Abbildung 36: Erste Phase: Testen des Brennstoffzellensystems durch direkte Anbindung an eine Lasteinheit.

In der zweiten Phase wird nach dem Prüfen der Software und der Sicherheitsmechanismen der DC/DC-Steller sowie der Batterien das Gesamtsystem in Betrieb genommen. Dieses setzt sich aus der in Abbildung 37 dargestellten Traktions- und Lastseite zusammen. Auf der Traktionsseite sind Batterie und Brennstoffzelle als reale Komponenten vorhanden. Die Brennstoffzelle wird dabei über einen internen DC/DC-Steller an die Batterie angeschlossen. Die Batterie ist wiederum über einen weiteren DC/DC-Steller mit dem Traktionszwischenkreis des Fahrzeuges verbunden. Auch dieser DC/DC-Steller ist als reale Komponente am Systemprüfstand vorhanden. Die restliche Traktionsanlage wird auf der Lastseite mit einem Laststeller emuliert, die Traktionsleistung wird dazu mittels des zuvor vorgestellten Systemmodells berechnet. Der Laststeller wird mit einer Versorgungseinheit aus dem Versorgungsnetz gespeist. Zur Reduzierung der Netzleistung ist auf der Lastseite zusätzlich eine Pufferbatterie mit dem Laststeller verbunden. Diese ist mit der Traktionsbatterie baugleich, sodass der größte Teil der Traktionsleistung in dieser zwischengespeichert werden kann.

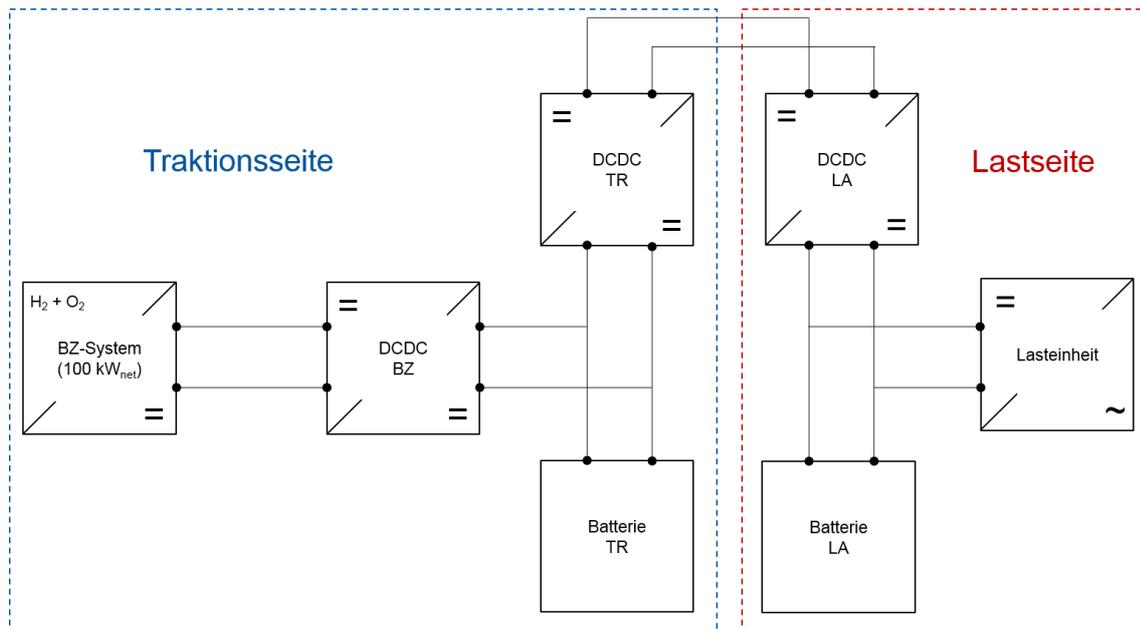


Abbildung 37: Zweite Phase: Testen des Hybridsystems mit Brennstoffzellensystem.

Da aus Sicherheitsgründen die Batterien außerhalb des CMP in der eigens für diesen Zweck errichteten Batteriegarage untergebracht sind, soll sowohl die Länge der elektrischen Leitungen als auch der Signalleitungen zwischen den weiteren Komponenten möglichst geringgehalten werden, um Störeffekte zu minimieren. Aus diesem Grund wurde ein Zwischenboden in den Prüfstand integriert, der die Aufnahme aller weiteren Komponenten innerhalb der Prüfwelle ermöglicht. Während die DC/DC-Steller der Brennstoffzelle (DCDC BZ), der Traktionsseite (DCDC TR) und der Lastseite (DCDC LA) aufgrund ihres hohen Gewichts direkt auf dem Fundament des Prüfstandes stehen, sind die Brennstoffzellensysteme direkt darüber auf dem Zwischenboden installiert (s. Abbildung 38).

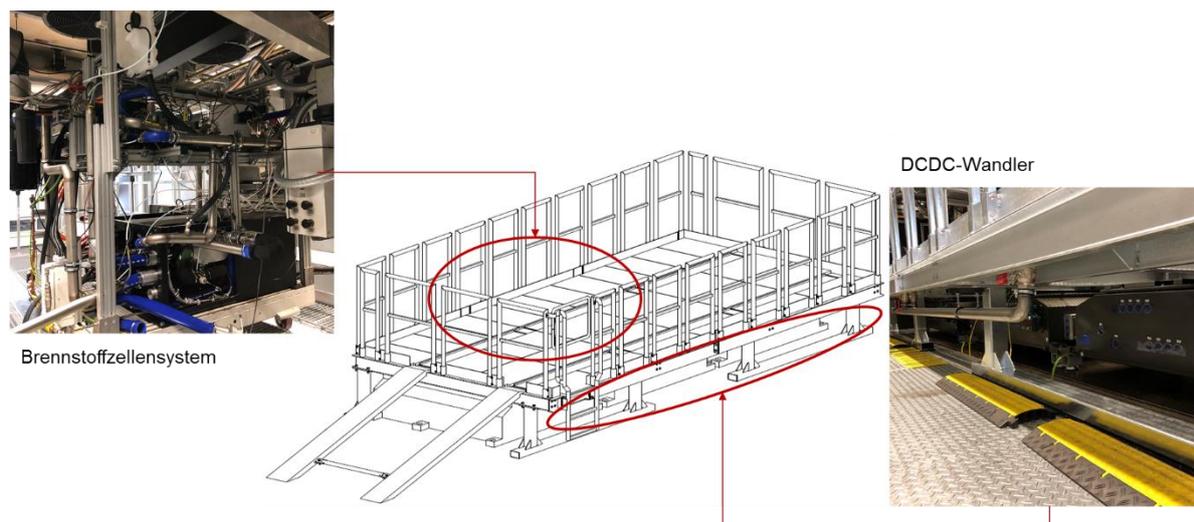


Abbildung 38: Aufbau des Gesamtsystems im Prüfstand

In naher Zukunft soll ein noch leistungsfähigeres Brennstoffzellensystem mit einer Leistung von $210 \text{ kW}_{\text{net}}$ in das Hybridsystem integriert werden.

4 Erforschung optimaler Betriebsstrategien

Das Ziel der Betriebsstrategie ist es, zu jedem Zeitpunkt die benötigte Leistung so auf Brennstoffzelle und Batterie zu verteilen, dass während des betrachteten Zeitraumes der Wasserstoffverbrauch minimiert wird. Hierzu wird stets ein bestimmter Fahrzyklus bzw. ein Fahrprofil betrachtet. Neben der Verbrauchsminimierung sind zudem gegebene Einschränkungen zu beachten. So kann z. B. die Brennstoffzelle nur Energie abgeben und muss deshalb immer eine Mindestleistung in das System einbringen, um nicht abgeschaltet werden zu müssen. Außerdem sind die Grenzen für den zulässigen Batterieladezustand (SoC) einzuhalten. Des Weiteren sollte der SoC zu Beginn und zum Ende des Zyklus gleich sein, da ein Streckenumlauf in der Regel mehrfach gefahren werden muss. Die Erstellung einer Betriebsstrategie kann als Optimierungsproblem mit dem Ziel der Verbrauchsminimierung aufgefasst werden. Die zu beachtenden Einschränkungen stellen die Nebenbedingungen dar.

Für jeden Zyklus bzw. jeden Streckenumlauf gibt es theoretisch jeweils eine Verteilung mit minimalen Wasserstoffverbrauch, die aber zusätzlich von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Umgebungsbedingungen (Temperatur, Gleiskonditionen usw.)
- Beladung des Fahrzeuges
- Betriebliche Einflüsse wie Verspätungen

Es werden grundsätzlich die folgenden zwei Kategorien von Lösungsansätzen untersucht:

1. Identifikation der für das jeweilige Fahrprofil optimalen Verteilung. Es handelt sich um das globale Optimum, welches alle Nebenbedingungen einhält. Solche Ansätze sind allgemein rechenintensiv und nicht echtzeitfähig. Da im Falle eines Schienenfahrzeugs die Fahrtstrecke aufgrund des Fahrplans i.d.R. feststeht, ist es aber denkbar, optimale Verteilungen im Voraus zu berechnen. Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine global-optimale Strategie implementiert und als Referenzlösung zur Bewertung anderer Strategien verwendet.
2. Regelbasierte Strategien, welche z.B. die Brennstoffzellenleistung nach Kennlinien abhängig vom Batterieladezustand festlegen. Regelbasierte Strategien sind einfach umzusetzen und benötigen wenig Rechenaufwand. Allerdings kann die Einhaltung mancher Nebenbedingungen nicht sichergestellt werden und ist im Wesentlichen von der Parametrierung, d.h. von Erfahrungswerten abhängig.

Im Folgenden wird für jede der beiden Kategorien eine Implementierung beschrieben und analysiert. Dazu wurde das in Abbildung 39 dargestellte Fahrprofil verwendet.

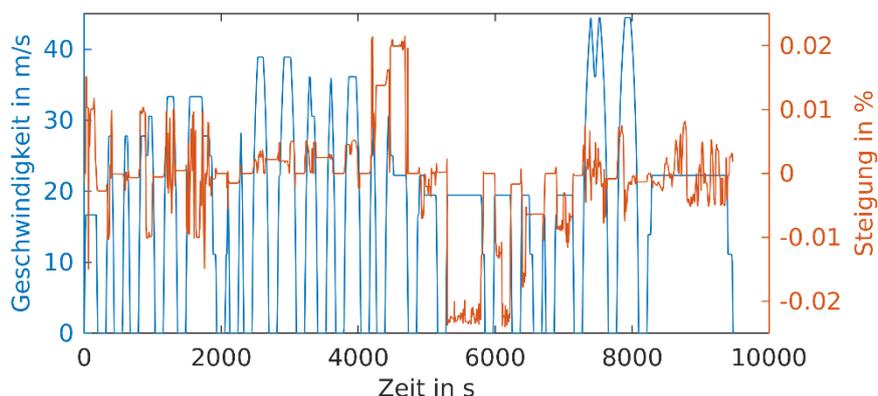


Abbildung 39: Geschwindigkeit und Steigungsverlauf des untersuchten Fahrprofils

4.1 Dynamische Programmierung (DP) als global-optimale Strategie

Dynamische Programmierung basiert auf „Bellmans Optimalitätsprinzip“ und löst das optimale Steuerungsproblem numerisch. Dieses Problem kann wie folgend beschrieben werden:

$$J(x_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{N-1} c(x_k, \pi(x_k))$$

$$x_{k+1} = x_k + f(u_k, x_k) \cdot \Delta t$$

$$SoC_{end} = SoC_0 = 0,5$$

$$x_{min} \leq x_k \leq x_{max}$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}$$

$$\dot{u}_{min} \leq \dot{u}_k \leq \dot{u}_{max}$$

Wobei J die Gesamtkosten, c die Schrittkosten, k die Zeitpunkte, x die Zustandsgröße und u die Steuereingabe sind. Die Implementierung verwendet im Allgemeinen geschachtelte Schleifen über Zeitpunkte, Zustandsgrößen und Steuereingaben. Die rechnerische Komplexität steigt exponentiell mit der Anzahl der Zustandsvariablen. Hier wird der Ladezustand der Batterie (SoC) als die Zustandsvariable definiert. Die Leistung aus der Brennstoffzelle wird als die Steuervariable u ausgewählt.

Bei der Implementierung der dynamischen Programmierung wird eine Kostenfunktion je nach Anwendung und Zielen definiert. Zur Minimierung des Wasserstoffverbrauchs und Schutz der Brennstoffzellen wird die Kostenfunktion c wie folgend definiert:

$$c = w_{bat} \left(x_1(t_f) - x_1(t_0) \right)^2 + \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} \dot{m}_{H_2} + \lambda \left(\sum_{k=0}^{N-1} |Sign(x_1[k] - Sign(x_2[k+1]))| \right) + \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} (\sigma |u[k]|) \quad (1)$$

Durch einen hinreichend groß gewählten Gewichtungsfaktor w_{bat} wird erzwungen, dass der SoC auf den Anfangswert zurückzukehrt, um diese Nebenbedingung einhalten zu können. Der zweite Term stellt den Wasserstoffverbrauch dar. Um ein häufiges Ein- und Ausschalten der Brennstoffzelle zu vermeiden, wird zudem der Straffaktor λ ergänzt. Der letzte Term bringt einen Straffaktor σ für die Leistungsänderungsrate der Brennstoffzelle

in die Kosten ein, um diese zur Steigerung der Lebensdauer der Brennstoffzelle zu begrenzen. Die Kostenfunktion kann durch weitere Straffaktoren ergänzt werden, um den Einfluss weiterer Kenngrößen z.B. auf die Komponentenlebensdauer in der Optimierung zu berücksichtigen. Durch diese Straffaktoren wird das Problem zu einer Optimierung mit mehreren, unterschiedlich gewichteten Zielen erweitert. Zunächst wird σ jedoch zu Null gesetzt, d.h. nur der Verbrauch wird optimiert.

In Tabelle 12 sind die berechneten Verbrauchswerte für verschiedene Start- und Entladezustände zusammengefasst. Verbräuche mit unterschiedlichen Start- und Zielwerten dienen dabei nur als Vergleichswerte für andere Strategien, da hier ggf. Abweichungen zwischen Start- und Endwert des SoC auftreten können. In Abbildung 40 sind der Verlauf des SoC für die Annahme SoC-Startwert = SoC-Endwert = 80 % sowie verschiedene Leistungsanteile dargestellt.

Tabelle 12: Wasserstoffverbrauch in Abhängigkeit des Ladezustands der Batterie für den in Abb. 13 dargestellten Fahrzyklus bei dynamischer Programmierung.

H ₂ (kg)	SoC-Endwert				
		50 %	60 %	70 %	80 %
SoC- Startwert	50 %	13,08	15,12	17,33	19,69
	60 %	11,15	13,06	15,13	17,39
	70 %	9,26	11,12	13,05	15,16
	80 %	7,34	9,18	11,06	13,03

Es ist zu erkennen, dass Beschleunigungs- und Bremsvorgänge kurzzeitig zu hohen Lastspitzen führen (oben links). Auch die Brennstoffzellenleistung weist viele schnelle Änderungen auf (unten rechts), welche zugunsten eines möglichst niedrigen Verbrauchs ausgeführt werden. Diese schnellen Lastwechsel können mit dem Straffaktor σ gemindert werden, wie in Abbildung 42 aufgezeigt wird. Dazu muss aber, wie Abbildung 82 zeigt, ein höherer Verbrauch in Kauf genommen werden.

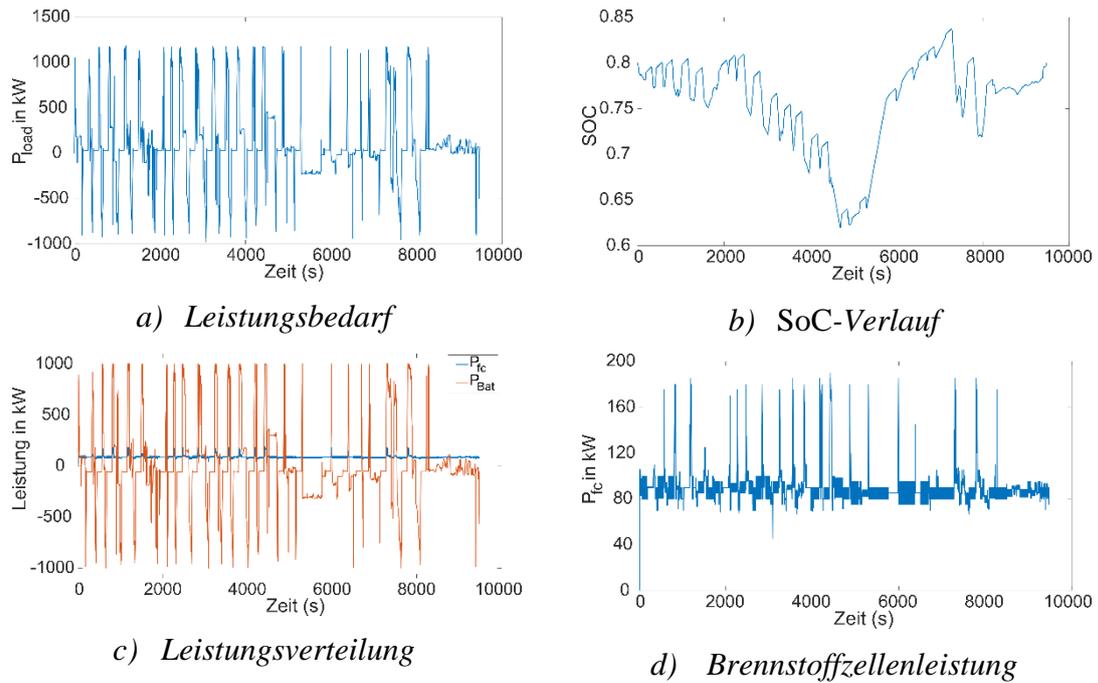


Abbildung 40: Leistungs- und Ladestandverläufe bei dynamischer Programmierung.

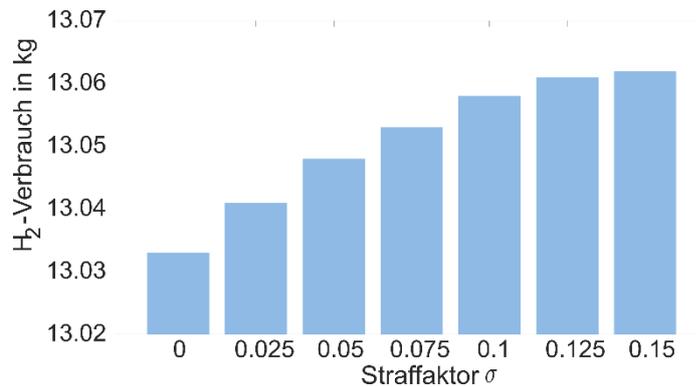


Abbildung 82: Wasserstoffverbrauch unter verschiedenen Straffaktoren

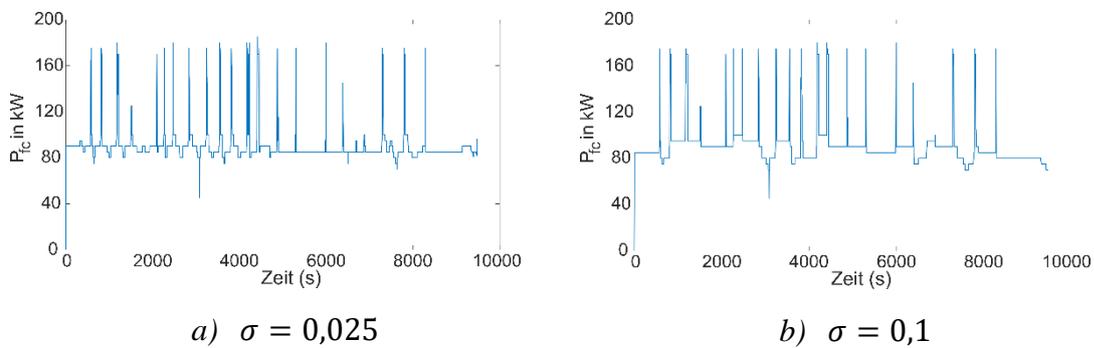


Abbildung 42: Brennstoffzellenleistungsverläufe unter verschiedenen Straffaktoren

4.2 Regelbasierte Strategie

Als regelbasierte Strategie wird, basierend auf [12], die Brennstoffzellenleistung nach festen Regeln abhängig vom Batterieladezustand bestimmt. Dazu wird der nutzbare SoC-Bereich in drei Abschnitte oder Modi eingeteilt. Um häufiges Wechseln zwischen zwei Bereichen zu vermeiden, wird für den Übergang zwischen zwei Bereichen eine Schalthysterese definiert. Innerhalb der drei Bereiche wird die Brennstoffzellenleistung gemäß den Kennlinien in Abbildung 84 bestimmt. Die Kennlinien sind dabei nach den folgenden Prinzipien gewählt:

- Bei hohem bzw. niedrigem Ladezustand wird die Brennstoffzellenleistung verringert bzw. erhöht, um die Batterie wieder in den mittleren SoC-Bereich zu bewegen.
- Die Brennstoffzelle wird möglichst lange mit wirkungsgradoptimaler Leistung betrieben.

Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Im Vergleich zur dynamischen Programmierung ergibt sich ein maximaler Wasserstoff-Mehrverbrauch von 2,6 %. Die SoC-Endwerte zeigen, dass die Batterie über den Zyklus hinweg geladen wird und erst bei einem SoC von ca. 80 % der SoC gehalten werden kann. Die gewählte Parametrierung führt also für das gegebene Fahrprofil im Mittel zu einer zu hohen Batterieladung. Dies verdeutlicht nochmals, dass für eine sinnvolle Parametrierung einer regelbasierten Strategie weitere Erfahrungswerte bzw. Vorversuche notwendig sind.

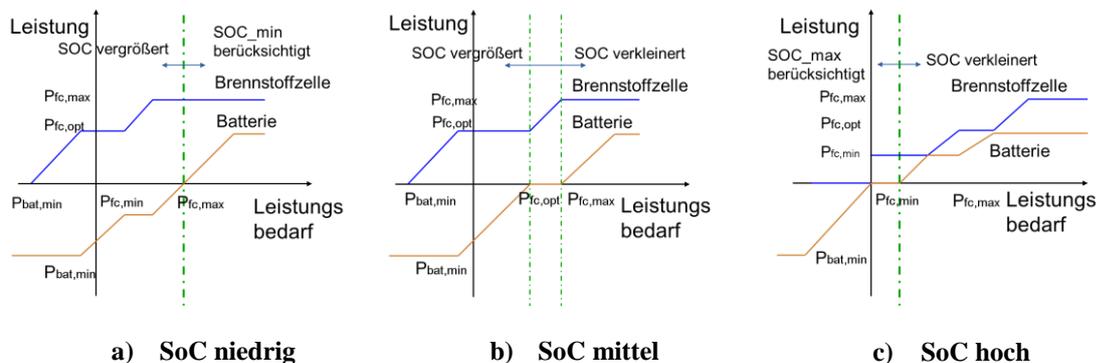


Abbildung 84: Regelbasierte Strategie.

Tabelle 13: Wasserstoffverbrauchsvergleich zwischen regelbasierter Strategie und dynamischer Programmierung.

Anfangs-SoC	Ende-SoC	H ₂ (kg)	Ref. DP(kg)	Mehrverbrauch
80 %	81,7 %	13,64	13,38	1.91%
70 %	73,8 %	14,08	13,84	1.79%
60 %	67,0 %	14,68	14,49	1.33%
50 %	61,5 %	15,85	15,44	2.62%

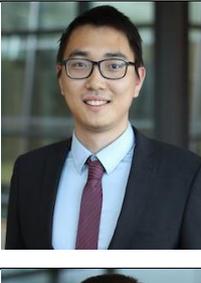
5 Zusammenfassung und Ausblick

Das finale Ziel des beschriebenen Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines modularen Traktionsbaukastens für Schienenfahrzeuge, welcher in Zukunft hauptsächlich in Pendlerzügen zum Einsatz kommen soll. Die vorliegende Arbeit gibt hierbei einen Einblick in die Modellierung und den Prüfstands Aufbau des Antriebsstrangs eines Brennstoffzellen-/Batterie-Hybridtriebwegs. Die vorgestellten Komponenten, namentlich Antrieb, Umrichter, Brennstoffzelle und Batterie, beziehen sich dabei auf einen Halbzug. Es wurde ein echtzeitfähiges Modell erstellt, um die realen Komponenten im noch ausstehenden HiL-Test zu erproben und verschiedene Betriebsstrategien zu evaluieren. Der vorgestellte Prüfstands Aufbau am CMP der RWTH Aachen University besteht aus drei DC/DC-Konvertern, einer Brennstoffzelle, zwei Batterien (von denen eine als Lastbatterie arbeitet, um das Fahren hoher Leistungen zu ermöglichen) sowie einer 160 kW Lasteinheit (Netzspeisung). In der vorliegenden Arbeit werden zudem erste Ansätze für eine optimale Leistungsaufteilung, basierend auf unterschiedlichen Optimierungsansätzen, vorgestellt. In einem nächsten Schritt wird Untersuchung um weitere Parameter, wie z.B. das Alterungsverhalten der beteiligten Komponenten, ergänzt werden, um eine gesamtheitliche Bewertung der Ergebnisse zu gewährleisten.

Literatur

- [1] electrive.net. <https://www.electrive.net/2017/11/15/siemens-plant-brennstoffzellen-zug-mit-ballard/>, 2017. [Accessed 24.06.2019].
- [2] ingenieur.de. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/der-weltweit-erste-wasserstoff-zug-faehrt-im-regulaeren-linienbetrieb/>, 2018. [Accessed 24.06.2019].
- [3] <http://german.people.com.cn/n3/2017/1027/c209054-9285817.html>. [Accessed 24.06.2019].
- [4] <https://edison.handelsblatt.com/erleben/e-zuege-draengen-den-diesel-von-der-schiene/23139354.html>. [Accessed 24.06.2019].
- [5] Pohlenz, D. (2012). Wirkungsgradoptimale Regelung eines elektrischen Fahrantriebes mit variabler Zwischenkreisspannung (Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek).
- [6] POLACH, Oldrich. Rad-schiene-modelle in der simulation der fahrzeug-und antriebsdynamik. Elektrische Bahnen, 2001, 5. Jg., S. 219-230
- [7] LIU, Weiwei, et al. Variation in cooling load of a moving air-conditioned train compartment under the effects of ambient conditions and body thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31. Jg., Nr. 6-7, S. 1150-1162.
- [8] Anup Barai, Kotub Uddin, Matthieu Dubarry, Limhi Somerville, Andrew McGordon, Paul Jennings, and Ira Bloom. A comparison of methodologies for the non-invasive characterisation of commercial li-ion cells. *Progress in Energy and Combustion Science*, 72:1 – 31, 2019.
- [9] Meinert Lewerenz, Philipp Dechent, and Dirk Uwe Sauer. Investigation of capacity recovery during rest period at different states-of-charge after cycle life test for prismatic $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$ -graphite cells. *Journal of Energy Storage*, 21:680 – 690, 2019.
- [10] Ansarey, M., Panahi, M. S., Ziarati, H., & Mahjoob, M. (2014). Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming. *Journal of Power Sources*, 250, 359-371.
- [11] Jeong, J., Lee, D., Kim, N., Zheng, C., Park, Y. I., & Cha, S. W. (2014). Development of PMP-based power management strategy for a parallel hybrid electric bus. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 15(2), 345-353.
- [12] Ahmadi, S., & Bathaee, S. M. T. (2015). Multi-objective genetic optimization of the fuel cell hybrid vehicle supervisory system: Fuzzy logic and operating mode control strategies. *international journal of hydrogen energy*, 40(36), 12512-12521.
- [13] Rezaei, A. (2017). An Optimal Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles.

Autoren

	<p>Meishner, Fabian</p> <p>hat an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg Elektro- und Informationstechnik studiert. Seit August 2014 promoviert er am Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antrieb (ISEA) der RWTH Aachen University. Seine Promotion beschäftigt sich mit dem Einsatz von stationären Energiespeichersystemen in DC-Stadtbahnnetzen. Des Weiteren beschäftigt er sich mit batterieelektrischen Zügen.</p>
	<p>Ünlübayir, Cem</p> <p>geboren 1990, hat an der RWTH Aachen Elektrotechnik, Informationstechnik und Technische Informatik mit dem Studienschwerpunkt Energietechnik studiert. Seit Februar 2018 promoviert er am Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antrieb (ISEA) der RWTH Aachen University. Er beschäftigt sich unter anderem mit der Auslegung und Dimensionierung von Speichern für mobile Anwendungen, sowie mit Batteriesystemdesign.</p>
	<p>Peng, Hujun</p> <p>geboren 1991, studierte Elektrotechnik, Informationstechnik und Computertechnik an der TU Dresden mit dem Schwerpunkt elektrische Energietechnik. Seit April 2018 promoviert er am Institut für elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen. Er beschäftigt sich unter anderem mit der Energiemanagementstrategie für Hybridfahrzeugsysteme sowie mit evolutionären Algorithmen.</p>
	<p>Deng, Kai</p> <p>geboren 1991, hat an der RWTH Aachen Fahrzeugtechnik und Transport studiert. Seit März 2018 promoviert er am Institut für elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen. Er beschäftigt sich unter anderem mit der Modellierung, Simulation und Betriebsstrategie für Hybridfahrzeug.</p>
	<p>Thul, Andreas</p> <p>hat an der RWTH Aachen University Elektrotechnik mit dem Fokus auf elektrische Maschinen und Antriebe studiert. Seit Oktober 2013 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen University. Seit November 2017 leitet er die Gruppe „Mechatronik und Antriebe“ am IEM. Seine Forschungsschwerpunkte sind Regelverfahren für elektrische Antriebe sowie die Messtechnik zur Charakterisierung von weichmagnetischen Materialien.</p>

	<p>Dirkes, Steffen hat an der RWTH Aachen Maschinenbau mit der Fachrichtung Energietechnik studiert. Seit 2018 promoviert er am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen im Bereich "Prognostics and Health Management" und Degradation von Brennstoffzellensystemen.</p>
	<p>Tinz, Sören hat an der RWTH Aachen Maschinenbau mit der Fachrichtung Energietechnik studiert. Seit 2017 promoviert er am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA) der RWTH Aachen. Dort beschäftigt er sich mit Design und Betriebsstrategien von Brennstoffzellensystemen.</p>
	<p>Sauer, Dirk Uwe Dirk Uwe Sauer studierte Physik an der TH Darmstadt und schloss das Studium 1994 mit dem Diplom ab. Nach seiner Promotion 2003 an der Universität Ulm erhielt er den Ruf als Juniorprofessor für „Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik“ an der RWTH Aachen und wurde 2009 zum Universitätsprofessor berufen.</p>