

Auslegung des Energiemanagementsystems eines Brennstoffzellen-Batterie-Triebzuges

Mit alternativer Antriebstechnik in Schienenfahrzeugen verbindet sich die Hoffnung, dass sich Probleme herkömmlicher Antriebe wie Umweltbelastung oder die absehbare Erschöpfung fossiler Treibstoffquellen lösen lassen. Eine erfolgreiche Umstellung auf alternative Antriebe als Grundstein der Energiewende im Verkehr erfordert vorausschauende Energiemanagementsysteme auf den Fahrzeugen.



Dieser Beitrag beschreibt grundsätzliche Überlegungen zur Auslegung von Energiemanagementsystemen alternativ angetriebener Schienenfahrzeuge. Hierzu werden die entscheidenden Wirkprinzipien in einer regelungstechnischen Struktur dargestellt. Des Weiteren werden Randbedingungen sowie auf die Regelstrecke wirkende Störgrößen beschrieben. Um die prinzipielle Funktionsweise des Energiemanagementsystems zu erläutern, wird eine Beispielarchitektur des Antriebssystems eines Brennstoffzellen-Batterie-Triebzuges skizziert. Die Orchestrierung der verschiedenen Konstituenten des Antriebssystems wird anhand eines fiktiven Fahrspiels auf der Strecke zwischen Frankfurt-Höchst und Königstein (Taunus) erläutert.

1. Kybernetische Struktur der Automatisierungsaufgabe „Energiemanagement“

Das Management der Antriebs- und Bremsleistung eines Schienenfahrzeugs folgt dem Regelkreisprinzip. Hierbei liegen mehrere vermaschte Regelkreise vor. Die Struktur der vermaschten Regelkreise wird nachfolgend entlang der einzelnen Aufgaben gemäß des leittechnischen Schichtenprinzips beschrieben [1].

Die *Regelung der Fahrdynamik* des Schienenfahrzeugs folgt als unterste Schicht in Bild 1 dem Regelkreisprinzip. Über Sensoren des Schienenfahrzeugs werden Weg- und Geschwindigkeitsinformationen erfasst (Messglied). Das Zugsteuergerät verarbeitet die erfassten Messgrößen und

erhält darüber hinaus übergeordnete Führungsgrößen vom überlagerten operativen Energiemanagement des Schienenfahrzeugs. Als Stellglieder dieses Regelkreises werden die Bremssysteme des Fahrzeugs und die Antriebe angesteuert, um das Fahrzeug entsprechend der Vorgaben über die Strecke zu bewegen (Regelstrecke). Durch die rückgekoppelte Wirkstruktur wird die Wirkung der auf die Regelstrecke wirkenden Störgrößen kompensiert.

Das *operative Energiemanagement* kann ebenfalls durch einen eigenen Regelkreis beschrieben werden. Dieser ist dem zuvor dargestellten Regelkreis der Triebfahrzeugregelung überlagert (vgl. Bild 1). Die von den Sensoren des Fahrzeugs erfassten Weg- und Geschwindigkeitsinformationen (Messglieder) werden mit übergeordneten Führungsgrößen aus dem taktischen Energiemanagement verknüpft (Regeleinrichtung). Die Stellglieder sind auf dieser Ebene die verschiedenen Komponenten des Antriebssystems. Bei einem mit Wasserstoff angetriebenen Zug handelt es sich hierbei um die Brennstoffzelle und das Batteriesystem zur Zwischenspeicherung der Energie. Die Optimierungsaufgabe liegt hierbei darin, für beide Komponenten einen optimalen Arbeitspunkt zu finden. Die Optimierungsaufgabe wird im weiteren Verlauf des Beitrags anhand eines Beispiels näher erläutert.

Ein weiterer Regelkreis ist das *taktische Energiemanagement*. Dieser Regelkreis ist dem operativen Energiemanagement überlagert und stellt dessen Rahmen dar



PD Dr.-Ing. habil. Lars Schnieder

Geschäftsführer der ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH; Privatdozent am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen

Lars.schnieder@ese.de



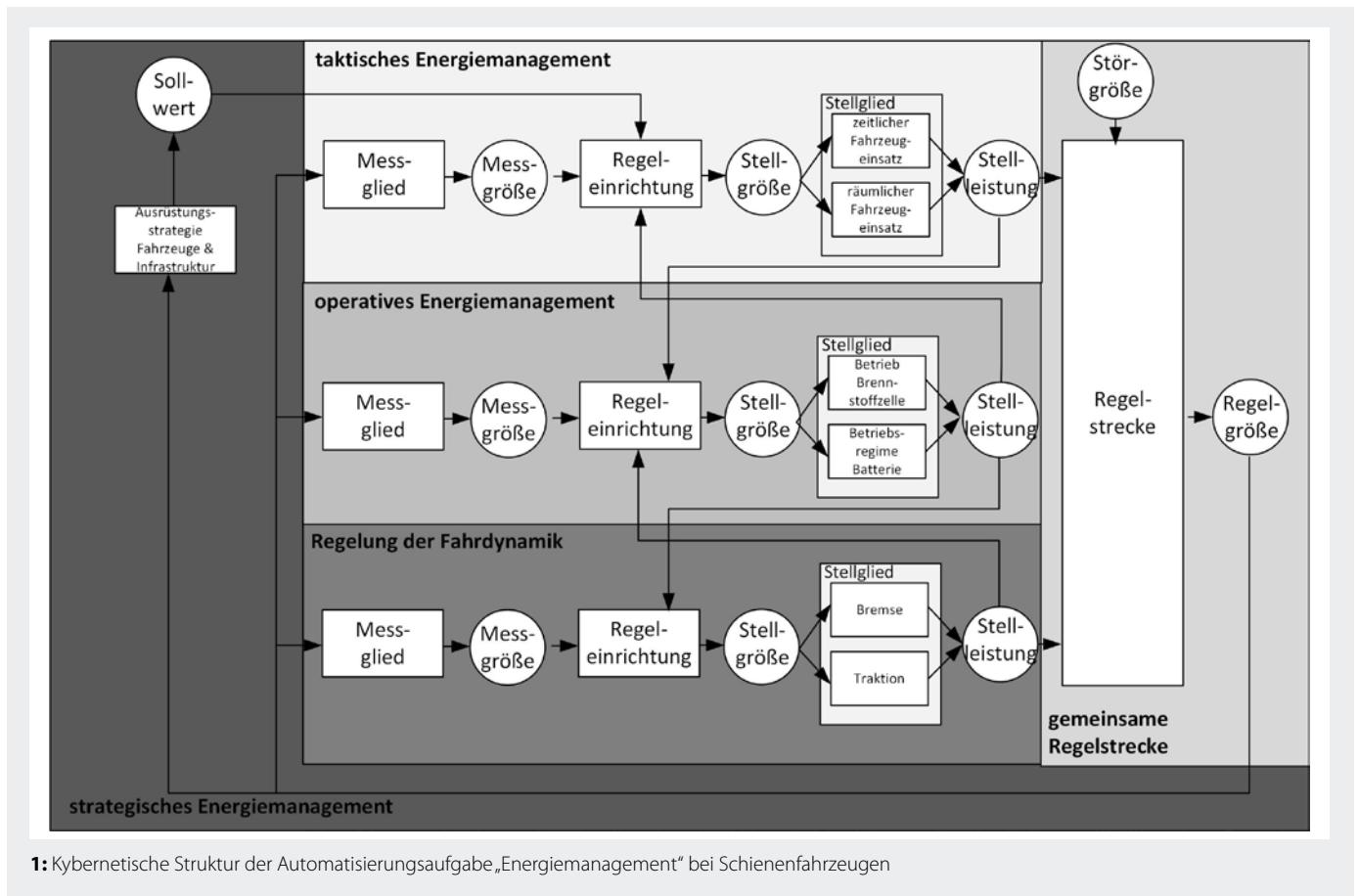
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Marco Brey

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Professur für spurgeführte Verkehrssysteme

m.brey@ostfalia.de

(vgl. Bild 1). Gleichzeitig werden vom strategischen Energiemanagement vorgegebene Führungsgrößen berücksichtigt. In dieser Hinsicht kann eine Einsatzentscheidung über den räumlichen Einsatz eines Schienenfahrzeugs (Laufwege) oder aber den zeitlichen Einsatz des Fahrzeugs (Fahrplan) erfolgen. Der Fahrplan berücksichtigt beispielsweise die erforderlichen Zeiten für das Laden des Triebfahrzeugs mit Energie unter Berücksichtigung der Streckentopografie sowie der Lage der Ladeinfrastruktur.

In einer weiteren *strategischen Ebene des Energiemanagements* (Ausrüstungsstrategie Flotte und Infrastruktur) werden die Randbedingungen selbst thematisiert. Hier werden beispielsweise Entscheidungen für die Änderung fahrzeugtechnischer



1: Kybernetische Struktur der Automatisierungsaufgabe „Energiemanagement“ bei Schienenfahrzeugen

Parameter getroffen werden (bspw. Einbau eines größeren Batteriespeichers) oder ob zusätzliche Ladeinfrastrukturen im Einsatzgebiet des in Frage kommenden Fahrzeugs installiert werden.

2. Randbedingungen des Energiemanagements von Schienenfahrzeugen

Bild 2 stellt die Bemessungsgrößen des Energiemanagements von Schienenfahrzeugen dar. Diese werden nachfolgend skizziert:

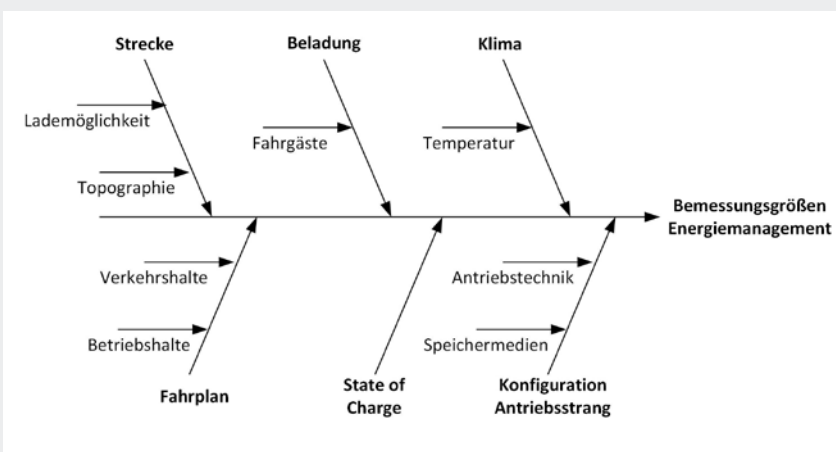
- **Strecke:** Die Anzahl, die Verortung aber auch die Dimensionierung der Ladeinfrastruktur ist im Sinne einer vorausschauenden Ermittlung der optimalen Fahr- und Ladestrategie von großer Bedeutung.
- **Beladung:** Die Fahrgastzahlen schwanken über den Tagesverlauf. Durch die unterschiedliche Zuladung verändert sich somit auch die Fahrzeugmasse. Um valide Vorhersagen über den voraussichtlichen Energiebedarf zu machen, ist eine Kenntnis der aktuell beförderten Fahrgäste, besser jedoch noch eine Prognose

der zu erwartenden Fahrgäste erforderlich. Je nach Konfiguration der Antriebstechnik ist hierbei möglicherweise auch die Menge an geladener Energie für die Masse des Fahrzeugs relevant.

- **Klimatisierung:** Neben der Energie, die zum Antrieb des Fahrzeugs bzw. zur Überwindung der Fahrtwiderstände erforderlich ist, sind auch die Energiebedarfe der Nebenaggregate relevant. Insbesondere im Sommer und im Winter fallen hier nicht unerhebliche Energiebedarfe für die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums ins Gewicht, die stark schwanken können.
- **Fahrplan:** Der Fahrplan ist eine weitere zu berücksichtigende Randbedingung im Energiemanagement [2]. Je nach gewähltem Antriebskonzept sind verschiedene Zeiten für die Ladevorgänge erforderlich. Hierbei kann zwischen verschiedenen Ladestrategien des Gelegenheitsladens (Opportunity Charging) oder des Ladens im Betriebshof (Overnight Charging) unterschieden werden. Bei Brennstoffzellen-Batterie-Triebfahrzeugen sind entsprechende Betankungszeiten ebenfalls im Regelkreis zu be-

rücksichtigen, da die H₂-Speichertanks aufgrund der hohen Druckwechselwirkung und des Joule-Thomson-Effekts auch Restriktionen unterworfen sind [4].

- **State of Charge (SoC):** Der Ladezustand von Batteriespeichern ist aus mehreren Gründen besonders relevant. Hieraus lassen sich beispielsweise Angaben für den Betrieb einer Brennstoffzelle extrahieren. Kritische Systemzustände der Batteriespeicher (bspw. die sogenannte „Tiefentladung“ oder aber hohe oder sehr niedrige Betriebstemperaturen) sind zu vermeiden. Eine zu vollgeladene Batterie verhindert die Nutzung der verschleißfreien elektrodynamischen Bremse und damit die Rekuperation beim Bremsen des Triebfahrzeugs.
- **Konfiguration Antriebsstrang:** Hier ist eine geeignete Konfiguration der Antriebstechnik auszuwählen. Beispiele umfassen Hybridfahrzeuge (Dieselhybride), wasserstoffbetriebene Fahrzeuge mit Batterie und Elektroantrieben sowie oberleitungsgespeiste Fahrzeuge mit zusätzlichen Batteriespeichern zur Überbrückung von nicht elektrifizierten Streckenabschnitten.



2: Bemessungsgrößen des Energiemanagements von Schienenfahrzeugen



3: Strecke Frankfurt-Höchst – Königstein mit Geschwindigkeitsangaben in km/h
Quelle: openrailwaymap.org 06.11.2022 – 14:39

Das Fahrzeugkonzept muss derart gestaltet sein, dass die in Bild 2 repräsentativ genannten Bemessungsgrößen in der kybernetischen Struktur des Energiemanagements berücksichtigt werden.

3. Energiemanagement am Beispiel der Strecke Frankfurt-Höchst – Königstein

Die Funktionsweise des Energiemanagementsystems (EMS) in einem fiktiven Brennstoffzellen-Batterie-Triebzug soll am Beispiel der realen eingleisigen Strecke der

Hessischen Landesbahn (HLB) Streckennummer 9360 Frankfurt-Höchst – Königstein, im Taunus, verdeutlicht werden. Die Streckenlänge beträgt rund 16 km und steigt von Frankfurt-Höchst (106 m ü. NHN) nach Königstein (344 m ü. NHN) mit einer maximalen Streckenneigung von 26 ‰ an. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt 60 km/h bzw. abschnittsweise 80 km/h. Es sind vier Bahnhöfe (Kreuzungsbahnhöfe) und vier Haltepunkte auf dieser Nebenbahn vorhanden [5]. Der Verlauf der Strecke ist exemplarisch in Bild 3 dargestellt.

3.1. Struktur der Antriebstechnik eines Brennstoffzellen-Batterie-Triebzugs

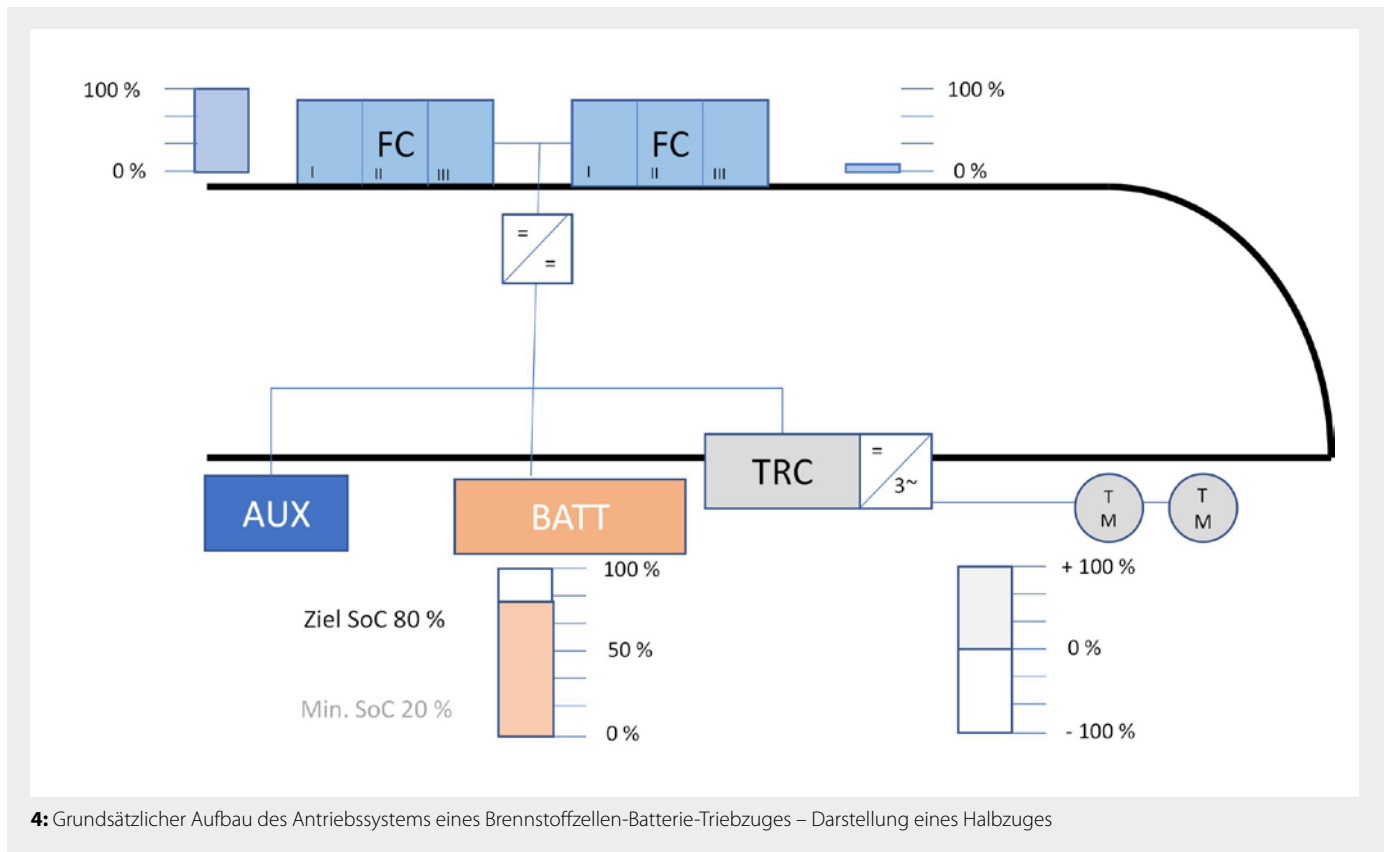
Der exemplarische Aufbau des Brennstoffzellen-Batterie-Triebzugs ist in der nachfolgenden Systemskizze (vgl. Bild 4) dargestellt.

Es handelt sich in diesem Beispiel um einen zweiteiligen Triebzug mit zwei Lauf- und zwei Kopffriedrehgestellen, wobei beide Kopfwagen A und B vom Aufbau der betrachteten Systeme identisch sind. Die Skalen mit den Säulen stellen die Leistungsanforderung (grau – positiv Traktions-/ negativ Bremsanforderung), den aktuellen Ladezustand (orange – SoC) und die Leistungsabgabe der Brennstoffzellen-Stränge (hellblau) dar (vgl. Bild 4).

Das Brennstoffzellensystem auf jedem Wagen verfügt über zwei Stränge (fuel cell – FC) mit mehreren Brennstoffzellen Stacks (I-III), sodass die Leistungsabgabe in mehreren Stufen erfolgen kann. An den Gleichspannungszwischenkreis des jeweiligen Wagens sind die Brennstoffzelleneinheiten (FC), die Hochvolt (HV)-Traktionsbatterie (BATT), der rückspeisefähige Antriebsstromrichter (TRC) mit den Fahrmotoren (traction motor – TM) und die Hilfsbetriebe (AUX, bestehend aus Druckluftkompressor, Bordnetzumrichter und Heizungs-Klima-Lüftungssystem) angeschlossen.

Das Energiemanagementsystem (EMS) überwacht die Energieflüsse im Fahrzeug und steuert die Leistungsabgabe der Brennstoffzellen sowie die Leistungsbegrenzung für die Hilfsbetriebe, insbesondere die des Heizungs-Klima-Lüftungssystems (HKL). Die HV-Batterie dient als Energiezwischenpeicher und soll optimalerweise in einem Betriebsbereich von 20 % bis 80 % SoC operieren. Der verbleibende Speicherinhalt bis 100 % SoC ist als Reserve für den Fall einer elektrodynamischen Bremsung aus Höchstgeschwindigkeit bis zum Stillstand vorgesehen.

Das Batteriesystem ist so dimensioniert, dass bei maximaler Traktionsanforderung und mittlerer Leistungsanforderung der Hilfsbetriebe die Batterie und das Brennstoffzellensystem zusammen genug Leistung zur Verfügung stellen können, um das Fahrzeug auf maximale Geschwindigkeit zu beschleunigen. Das EMS begrenzt ggf. die Leistung der Hilfsbetriebe für die Beschleunigungsphase und hebt diese bei Reduktion der Traktionsanforderung wieder auf. Nach dem Erreichen der Fahrzeug- bzw. Streckenhöchstgeschwindigkeit soll die Leistung der Brennstoffzelle ausreichen, um die Batterie wieder nachzuladen,



4: Grundsätzlicher Aufbau des Antriebssystems eines Brennstoffzellen-Batterie-Triebzuges – Darstellung eines Halbzuges

die Hilfsbetriebe mit erforderlicher Leistung zu versorgen und über die noch zur Verfügung stehende Traktionsleistung die Fahrwiderstände bei konstanter Geschwindigkeit (Beharrung) auszugleichen.

3.2. Energiemanagementszenarien im Verlauf des Fahrspiels

Das nachfolgende Schaubild (vgl. Bild 5) verdeutlicht die Orchestrierung der Konstituenten des Antriebssystems eines Brennstoffzellen-Batterie-Triebzuges im Verlauf des Fahrspiels zwischen Frankfurt-Höchst und Königstein. Auf der linken Hälfte der Abbildung ist die Bergfahrt von Frankfurt-Höchst nach Königstein vereinfacht dargestellt. Nach Ankunft im Endbahnhof der Strecke und einem kurzen Aufenthalt fährt der Triebzug gemäß Fahrplanvorgabe wieder zu Tal. Die Talfahrt ist auf der rechten Hälfte des Schaubildes dargestellt. Die einzelnen Teile des Fahrspiels zwischen den Haltepunkten und Kreuzungsbahnhöfen bei Berg- und Talfahrt sind zur Vereinfachung nicht dargestellt.

Das Energiemanagementsystem sorgt unmittelbar vor der Bergfahrt zunächst dafür, dass die HV-Batterie einen möglichst hohen Ladungszustand aufweist. In

der Vorausschau auf die stark ansteigenden Fahrwiderstände [6] bei der Bergfahrt in Richtung Königstein ruft das EMS die maximale Leistung der Brennstoffzellensysteme ab. Bezogen auf den Gesamtfahrwiderstand sind hier fahrdynamisch besonders der deutlich ansteigende Steigungswiderstand und auch der Krümmungswiderstand der Strecke im Regelkreislauf zu berücksichtigen.

Zusätzlich können die Leistungsbedarfe für die HKL-Anlage in Abhängigkeit der aktuellen Außentemperatur und des aktuellen Besetzungsgrads des Fahrzeuges für die Energiebedarfsberechnung durch das EMS berücksichtigt werden. Bei jedem Halt des Zuges und anschließendem Fahrgastwechsel kann durch Auswertung des Luftfederdrucks der aktuelle Beschleunigungswiderstand durch das EMS ermittelt werden.

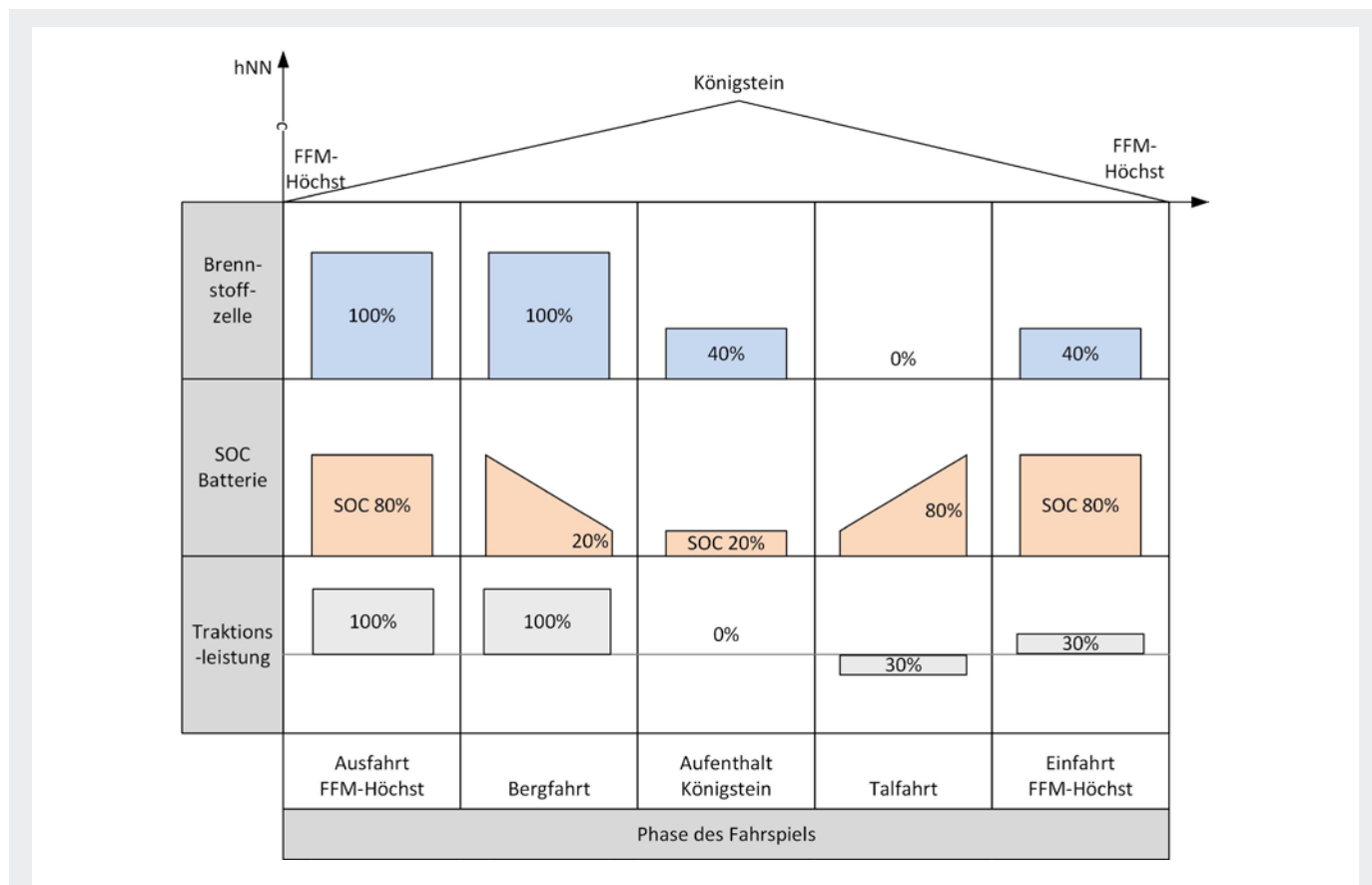
Ziele für das EMS auf diesem Streckenstück sind:

1. Die Brennstoffzellenleistung zum einen so früh wie möglich zu reduzieren bzw. abzuschalten und
2. die Ein- und Ausschaltzeitpunkte sowie die Laufzeiten für die Brennstoffzellen-Stacks so optimiert zu legen, dass mög-

lichst viel Wasserstoff gespart und die Lebensdauer der Systeme erhöht wird.

Während der Bergfahrt sinkt der SoC der HV-Batterie. Ohne EMS würde die Brennstoffzelle nun die Batterie schnellstmöglich wieder nachladen. Da das EMS aber die Streckeninformation und das geplante Fahrspiel für die Rückfahrt berücksichtigt, wird die Batterie für die anschließende Talfahrt nicht nachgeladen, um möglichst viel Rekuperationsenergie, die beim elektrodynamischen Bremsen des Triebzuges entsteht, für die Batterienachladung und die Hilfsbetriebeversorgung zu nutzen. Dies ermöglicht es, dass das Brennstoffzellensystem bereits kurz nach Beginn der Talfahrt komplett abgeschaltet werden kann. Auch hier können bei jedem Halt mit Fahrgastwechsel die aktualisierten Parameter für das EMS neu bestimmt werden. Gerade bei vielen geplanten Halten (Wiederholungen des Fahrspiels), großen Unterschieden im Belastungsband und auch der Integration von Bedarfshalten in den Betriebsablauf lohnt sich der Einsatz eines EMS unter Einbeziehung möglichst aller Bemessungsgrößen aus Bild 2.

Erst beim Übergang auf die Hauptstrecke bei Frankfurt-Höchst wird die Brenn-



5: Orchestrierung der Konstituenten des Antriebssystems eines Brennstoffzellen-Batterie-Triebzuges im Verlauf eines Fahrspiels

stoffzelle mit mittlerer Leistung vom EMS wieder dazugeschaltet.

4. Zukünftige Herausforderungen und Potenziale

Aus den Darstellungen zuvor wird deutlich, dass Fahrzeuge mit alternativen Antrieben sehr stark auf die spezifischen Belange der zu bedienenden Strecke zugeschnitten sind. Um Investitionen in innovative Antriebskonzepte zu ermöglichen, sind hier zukünftig die Aufgabenträger mehr als sonst gefordert. Aus Sicht der Eisenbahnverkehrsunternehmen fallen die Wiedereinsatzrisiken für die Fahrzeuge noch stärker ins Gewicht als schon bei konventionell angetriebenen Fahrzeugflotten [3]. Die Betriebskosten der Fahrzeugflotten werden maßgeblich durch die Kosten für Energie und Wartung und Instandhaltung bestimmt. Energiemanagementsysteme, die möglichst umfassend die relevanten Bemessungsgrößen des Fahrzeugeinsatzes berücksichtigen, senken zum einen die Betriebskosten, zum anderen werden Komponenten wie die Brennstoffzellen, Druck-

gas-Tanks und Batteriesysteme optimal betrieben. Dadurch wird die Lebensdauer der Komponenten und Bauteile erhöht und die Wartungs- und Instandhaltungskosten minimiert. Hinsichtlich der energetischen Optimierung der Fahrspiele bestehen weitere Potenziale in der geplanten Digitalisierung des Bahnbetriebs. Ein halbautomatischer Betrieb auf Basis des einheitlichen Zugbeeinflussungssystems ETCS („ATO over ETCS“) kann das Energiemanagementsystem von Schienenfahrzeugen auch im Sinne einer vorausschauenden Fahrweise weiter positiv beeinflussen [4].

Literatur

[1] Schnieder, Lars: Communications-Based Train Control (CBTC) - Komponenten, Funktionen und Betrieb. 3. Auflage. Springer (Berlin) 2022.
 [2] Schnieder, Lars: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr: Ziele, Methoden, Konzepte. 2. Auflage. Springer (Berlin) 2018.
 [2] Schnieder, Lars: Strategisches Management von Fahrzeugflotten im öffentlichen Personenverkehr - Begriffe, Ziele, Aufgaben, Methoden. Springer (Berlin) 2018.

[3] Schnieder, Lars: European Train Control System (ETCS) - Einführung in das einheitliche europäische Zugbeeinflussungssystem. 3. Auflage. Springer (Berlin) 2022.
 [4] Thermodynamische Analyse eines Betankungsprozesses mit Druckgas, Michael Striednig, Masterarbeit 2013, TU Graz.
 [5] Schienennetz-Nutzungsbedingungen der HLB Basis AG – Besonderer Teil, Stand 25.10.2021 https://www.hlb-online.de/fileadmin/hlb/dokumente/Infrastruktur/211212_SNB_BT_HLB_Basis_AG_2023.doc.pdf - 06.11.2022 12:36.
 [6] Ihme, Joachim: Schienenfahrzeugtechnik, 2. Auflage, Springer Vieweg (Wiesbaden) 2019.

Summary

Design of the energy management system of a fuel cell battery multiple-unit

The alternative drive technology in rail vehicles is associated with the hope that problems of the conventional drives such as environmental pollution or the foreseeable exhaustion of fossil fuel resources can be solved. A successful changeover to alternative drives as the cornerstone of the energy transition in the transport sector requires forward-looking energy management systems on the vehicles.