

Powermanagement eines hybridelektrischen Antriebs - Auslegung, Optimierung und Leistungsregelung

Powermanagement of a Hybrid Electric Powertrain - Design Aspects, Optimization Targets and Power Flow Control

Dirk Söffker, Markus Özbek, Matthias Marx, Universität Duisburg-Essen

Dieser Beitrag diskutiert verschiedene Aspekte zur Bewertung hybridelektrischer Antriebe. Anhand eines brennstoffzellenbasierten Hybridsystems wird der Einfluss des Powermanagements auf Kenngrößen wie z. B. System- und Komponenteneffizienz und -verfügbarkeit erörtert. Durch experimentelle Untersuchungen wird für einen gegebenen Fahrzyklus anhand einfacher Betriebsstrategien ein Optimierungsansatz dargestellt, wobei mit verschiedenen Kennwerten das Systemverhalten bewertet und nachfolgende Iterationsschritte bestimmt werden. Dabei kann bereits mit wenigen Iterationen ein Optimum erzielt werden.

This paper discusses several aspects concerning the evaluation of hybrid electric powertrain systems. Using the example of a fuel cell-based hybrid electric powertrain system the influence of the powermanagement on typical evaluation parameters such as efficiency, availability of the system and its components is discussed. On the basis of experimental investigations applied on a given driving cycle an optimization approach is shown using the instance of simple operation strategies. It can be shown that after a few iteration steps a near-optimal solution is found.

Schlagwörter: Powermanagement, Supercaps, Range-Extender, Effizienz, Verfügbarkeit, Lebensdauer, DC/DC-Wandler, hybridelektrischer Antriebsstrang

Keywords: Powermanagement, supercapacitors, range extender, efficiency, availability, life time, DC/DC converter, hybrid electric powertrain

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat die Entwicklung von energieeffizienten Systemen vor allem im Bereich von Antriebssystemen von Fahrzeugen eine zunehmende Bedeutung erfahren.

Während bekannte Ansätze der Effizienzerhöhung zum Ziel haben, durch optimierte Auslegung von Komponenten die Effizienz und Verfügbarkeit des Gesamtsystems zu erhöhen, fokussieren die wesentlichen Forschungsschwerpunkte im Mobilitätskontext auf die Elektrifizierung und Hybridisierung des Antriebsstrangs sowie die Rekuperation von kinetischer Energie z. B. beim Bremsen.

Veränderte Anforderungen an Systeme und Komponenten erfordern die Auswahl neuer Systemkomponenten, zugleich aber auch zusätzliche Überlegungen zur Bewertung und Optimierung des Gesamtsystems. Neben den typischen Auslegungsfragen sind hierbei vor allem Aspekte zur Betriebsstrategie wesentlich.

Im Beitrag werden die grundlegenden Anforderungen und typische Problemstellungen im Kontext von hybridelektrischen Antriebssystemen mit Zweispeichertechnologie dargestellt und anschließend am Beispiel eines brennstoffzellenbasierten hybridelektrischen Antriebssystems für mittlere Leistungen verschiedene Lösungsansätze diskutiert.

2 Auslegungsaspekte und -konflikte

Für die Auslegung und die Bewertung von elektrischen und hybridelektrischen Antriebssystemen sind verschiedene Punkte bedeutend.

Zentral und entsprechend vieldiskutiert sind Aspekte der Systemeffizienz bzw. des Kraftstoffverbrauchs [1], häufig auch im Kontext mit der Minimierung von Emissionen. Prinzipiell ist zwischen der Effizienz von Systemkomponenten und der des Gesamtsystems zu unterscheiden. Da zur Realisierung der Dynamik des Antriebsstranges von Lastkollektiven bzw. Lastzyklen oder weiteren Anforderungen zur Antriebsdynamik auszugehen ist, sind diese bei den Betrachtungen zu berücksichtigen. Die Effizienz von Komponenten kann z. B. durch die Wahl des Arbeitspunktes im Bereich des höchsten Wirkungsgrades erzielt und beeinflusst werden. Die Effizienz des Gesamtsystems ergibt sich im Zusammenwirken zahlreicher Komponenten. Die geeignete Kombination der notwendigen Komponenten ist bei der Auslegung zu wählen, wobei es sich in der Summe als effizienter erweisen kann, einzelne Komponenten in einem ineffizienten Arbeitsbereich zu betreiben. Unabhängig von der durch die Wahl der Komponenten beeinflussten Effizienz (bezogen auf gegebene Anforderungen), wird die Effizienz eines hybridelektrischen Antriebssystems ebenfalls wesentlich durch die Energieflussregelung (und ggf. die Einzelkomponentenregelung) beeinflusst, welche sich jedoch der vorliegenden Lastsituation bzw. dem Komponentenstatus anpassen könnte.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zur Betrachtung der Effizienz des Gesamtsystems wird durch den aktuellen Zustand des Antriebssystems (samt Energiespeichern) in Kombination mit der vorliegenden Lastsituation bestimmt. Dies wird am Beispiel der Rekuperation von kinetischer Energie beim Bremsen deutlich. Typischerweise kann bei niedrigeren Ladezuständen der Energiespeicher mehr Energie rekuperiert werden [2], da hierbei einerseits das gesamte Rekuperationspotenzial höher ist, und zum anderen, da bei niedrigeren Ladezuständen der Energiespeicher typischerweise gleichzeitig auch deren Spannungen absinken, was höhere Rekuperationsströme ermöglicht.

Wird die Verfügbarkeit des Antriebssystems (samt Energiespeichern) betrachtet, ergeben sich weitere Auslegungsaspekte. Es kann einerseits bewertet werden, inwiefern und unter welchen Bedingungen das Antriebssystem hinsichtlich der Bereitstellung von kurzzeitigen Spitzenlasten geeignet ist und zum anderen, wie groß die Reichweite des Systems auf Grund seines aktuellen Energievorrates (in Zeit oder Strecke) ist. Die Frage der Verfügbarkeit steht dabei häufig im Konflikt mit der der Systemeffizienz.

Für die Auslegung eines Antriebssystems ist ebenfalls die Lebensdauer von Komponenten zu berücksichtigen. Die Lebensdauer der Komponenten wird typischerweise auf der Basis zeit- oder streckenbewerteter Last-

kollektive ermittelt oder gefordert, im Kontext der aktuellen Aufgabenstellungen werden jedoch mit den Primärenergiespeichern bzw. -wandlern, der lithiumbasierten Batterie bzw. der Brennstoffzelle, Komponenten diskutiert, deren Funktionalität und Lebensdauer stark durch die Art und Weise der dynamischen Nutzung beeinflusst wird. Hierzu sind zwei verschiedene Fragestellungen zu betrachten.

I: Inwiefern sind für das gealterte System bzw. für gealterte Komponenten Einbußen in der Leistungsfähigkeit zu erwarten [3], was sich hinsichtlich der Bewertung mit Aspekten der Verfügbarkeit überschneidet? Mit Hilfe geeigneter Alterungsmodelle kann beispielsweise auf das Leistungspotenzial des Systems geschlossen werden.

II: Hinsichtlich der komponentenschonenden Betriebsweise des Antriebssystems stellen sich Aufgaben hinsichtlich der Vermeidung oder Verringerung von schädigenden Einflüssen durch geeignete Betriebsstrategien bzw. eine entsprechende Auslegung, so dass typische Verschleißmechanismen vermieden oder zumindest minimiert werden. Hierbei spielen Alterungsmodelle [4] bzw. eine Verschleißzustandserkennung der Komponenten eine wichtige Rolle.

Neben der Auslegung des Antriebssystems kommt entsprechend dem Powermanagement eine wesentliche Bedeutung zu.

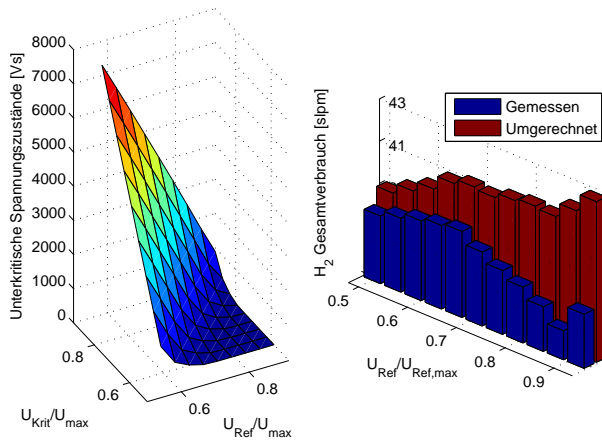
Bild 1 zeigt anhand verschiedener experimentell ermittelter Kennwerte verschiedene Systemeigenschaften in Abhängigkeit von der Betriebsstrategie. Während sich bei diesem Beispiel optimierte Verbräuche (Bild 1a, rechts) für Referenzbusspannung im Bereich niedriger Werte ergeben, ergibt sich die beste Verfügbarkeit für höhere Auslegungswerte (Bild 1c, rechts). Für vergleichbare Auslegungswerte lässt sich allerdings nur bedingt komponentenschonender Betrieb realisieren (Bild 1c, links).

Es wird deutlich, dass die verschiedenen Kriterien im Konflikt zueinander stehen, so dass die Auslegung mit der Lösung eines Optimierungsproblem es mit einer geeigneten Gewichtung der einzelnen Kriterien verbunden ist.

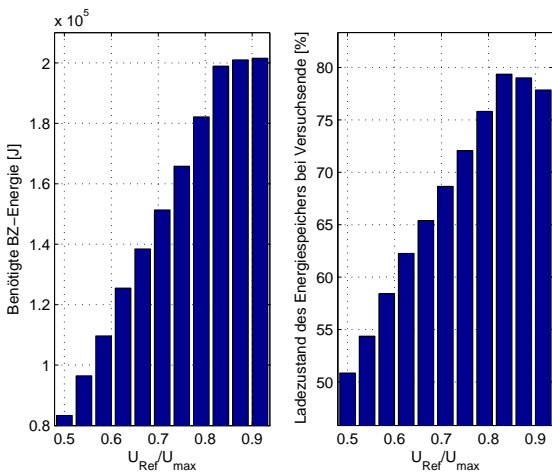
3 Hybridisierung von Antriebssträngen

Ein geeigneter Lösungsansatz zum Umgang mit den erwähnten Auslegungskonflikten entsteht ebenfalls durch die Hybridisierung von Antriebssystemen. Die Grundidee besteht darin, ausgewählte Stärken der Einzelkomponenten situativ zu nutzen.

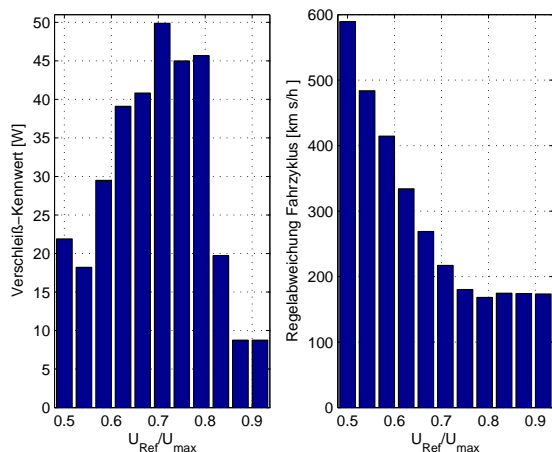
Ein bekanntes Beispiel für hybride Antriebssysteme ist die Kombination von Verbrennungs- und Elektromotoren bei Kraftfahrzeugen [5]. Hierbei können die Stärken des Elektromotors bei niedrigen Geschwindigkeiten und hohen Drehmomenten, z. B. beim Anfahren, mit der



(a)



(b)



(c)

Bild 1: Kennwerte zur Bewertung verschiedener Systemaspekte

höheren Energiedichte und Reichweite eines Verbrennungsmotors kombiniert werden. Es sind eine Vielzahl verschiedener Topologien wie die des seriellen Hybrid-systems, des Parallelhybrids sowie die des Range Extenders etc. bekannt, detaillierte Darstellungen finden

sich in [6].

Daneben existieren verschiedene Formen hybridelektrischer Systeme [1]. Bei diesen erfolgt die Bereitstellung der benötigten Energie über eine elektrische Zwischenebene. Hybridelektrische Systeme bestehen typischerweise aus einer elektrischen Primärenergiequelle sowie einem oder mehreren Energiespeichern. Beispiele für Primärenergiequellen sind Brennstoffzellen, Generatoren, die entweder über einen Verbrennungsmotor oder durch die kinetische Energie des Fahrzeugs angetrieben werden und Solarmodule. Typische Beispiele für Energiespeicher sind Akkumulatoren (z. B. Lithium-Ionen-, NiMH-, Bleiakumulatoren etc.) und Kondensatoren (Supercaps, klassische Doppelschichtkondensatoren etc.). Durch Hybridisierungsansätze ist es auch hier möglich, die Stärken von verschiedenen Energiequellen und -speichern zu kombinieren. So haben Brennstoffzellen eine vergleichsweise hohe gravimetrische Energiedichte, wohingegen sich Supercaps eher zur Bereitstellung kurzzeitig höherer Leistungsspitzen sowie zur schnellen Aufnahme von rekuperierter elektrischer Energie eignen (hohe Leistungsdichte), jedoch für längere Belastungszyklen aufgrund ihrer begrenzten Kapazität sowie von Ladungsverlusten nur bedingt geeignet sind, vgl. Bild 2.

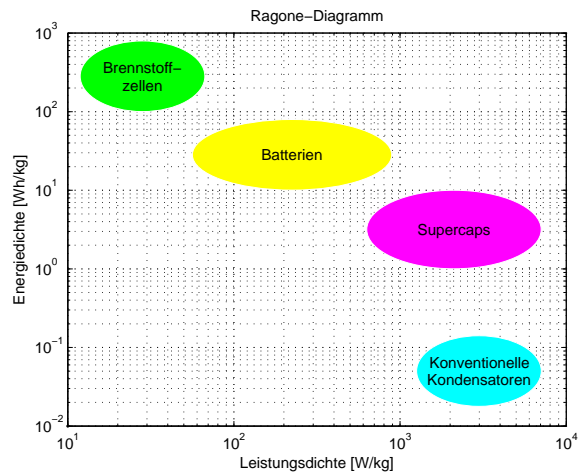


Bild 2: Ragone-Diagramm

Neben den elektrischen Quellen und Speichern besitzen hybridelektrische Systeme weitere Komponenten zur Wandlung von elektrischen Spannungen und Strömen wie z. B. DC/DC-Wandler, Wechselrichter, Gleichrichter etc., wodurch gesteuert oder regelnd Einfluss auf die elektrischen Leistungsflüsse genommen werden kann. Dies ist für das Powermanagement als Leistungsflussregelung zur Realisierung der oben genannten Aspekte von zentraler Bedeutung.

4 Powermanagement

Das Powermanagement beeinflusst über die Regelung oder Steuerung antriebstechnischer Komponenten die Energieflüsse innerhalb des Systems. Hierdurch wird, abhängig vom aktuellen Systemzustand, der Leistungsanteil der Energiequellen und -speicher geregelt. Voraussetzung hierzu sind die Verfügbarkeit vorhandener Freiheitsgrade bezüglich der Bereitstellung oder der Nutzung, d.h. es müssen entweder geeignete Energiequellen zur Verfügung stehen oder der Energiebedarf von Sensen gezielt beeinflusst werden können [7].

Wie in [8] beschrieben, wird durch das Powermanagement die Effizienz und die Verfügbarkeit des Antriebssystems sowie die Lebensdauer seiner Komponenten signifikant beeinflusst. Die Bewertung der Qualität des Powermanagements bzw. die Optimierung des Powermanagements ist immer im Kontext des zugrundeliegenden Lastprofils vorzunehmen. In der Literatur existieren zahlreiche Methoden zur Bestimmung und Auslegung von Powermanagementstrategien bei hybridelektrischen Antriebssystemen. Einige basieren auf modellbasierten Methoden und sind beispielsweise in verschiedenen Varianten des optimalen Reglers [9] realisiert, andere Strategien arbeiten rein regelbasiert [10] oder auf Basis Fuzzy-Logik-basierter Regeln [11]. Üblich sind zur Realisierung von effizienzoptimierten Strategien auch auf Kennfeldern [12] oder entsprechend modellbasierten Zusammenhängen [13] beruhende Ansätze.

Im Folgenden werden drei typische Vorgehensweisen zur Realisierung des Powermanagements (PM I, II und III) und deren Einfluss auf das Systemverhalten dargestellt.

4.1 Powermanagement PM I: Realisierung maximaler Leistung der Primärquelle bei niedrigem Ladezustand der Energiespeicher

Das Prinzip dieser Powermanagement-Methode ist es, dass, sobald ein zuvor definierter Ladezustand des Energiespeichers unterschritten ist, die Primärenergiequelle sofort auf maximale Leistung geregelt wird. Das Prinzip dieser Methode ist in Bild 3 dargestellt.

Das Ziel dieses Ansatzes ist es, die Verfügbarkeit des Systems auch bei relativ hohen Lasten sicherzustellen, da relativ schnell auf kritische Ladezustände reagiert wird. Die Nachteile dieser Strategie liegen darin, dass einerseits der Betrieb bei maximaler Leistung in der Regel mit einem ineffizienten Betrieb der Primärenergiequelle verbunden ist und zum anderen, dass vor allem durch die schnellen Wechsel zwischen Leerlaufbetrieb und maximaler Belastung sehr hohe Leistungsgradienten auftreten, die bei den meisten Primärenergiequellen verschiedene Alterungs- und Verschleißprozesse begünstigen.

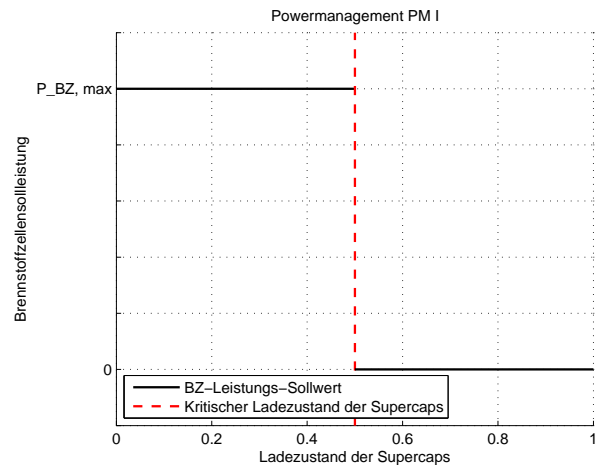


Bild 3: Schaltstrategie der Powermanagement-Methode I

4.2 Powermanagement PM II: Powermanagement durch Vorgabe von Spannungssollwerten

Bei diesem Powermanagementalgorithmus werden die Energieflüsse des Systems mit Hilfe von Spannungssollwerten im elektrischen Zwischenkreis geregelt. Dies erfolgt typischerweise mit Hilfe von Wandlern. In Bild 4 ist der Einsatz dieser Powermanagement-Methode unter dem Einfluss eines typischen Lastprofils bei Vorgabe eines konstanten Sollwertes aufgezeigt. Dargestellt ist auch der resultierende zeitliche Verlauf der gemessenen Spannungen während des Betriebs.

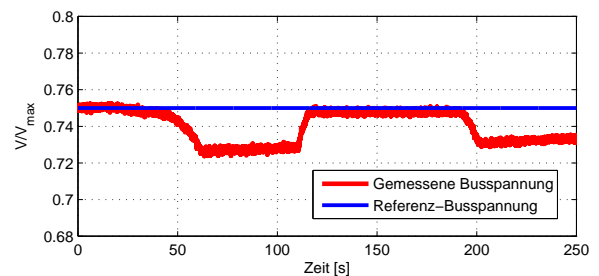


Bild 4: Prinzip der Powermanagement-Methode PM II

Bei dieser Methode sind die Leistungsgradienten der Primärenergiequelle typischerweise geringer als bei PM I, dies führt in der Regel zu einer komponentenschonenden Betriebsweise. Abhängig von der Anforderung an das Antriebssystem können durch Beeinflussung der Sollspannung verschiedene Aspekte positiv beeinflusst werden, so kann z. B. durch Senkung der Generatorspannung die Rekuperationsfähigkeit des Systems begünstigt und durch Erhöhung der Motorspannung die Bereitstellung kurzfristiger Leistungsspitzen verbessert werden.

4.3 Powermanagement PM III: Powermanagement durch Stromregelung

Eine weitere typische Methode des Powermanagements erfolgt über die Regelung von Stromflüssen. Hierdurch kann direkt der Leistungsfluss der Primärquelle oder die Be- und Entladung von Energiespeichern beeinflusst werden. Diese Methode kann daher auch verwendet werden, um den Stromfluss bzw. dessen Gradient direkt zu begrenzen. In Bild 5 ist als Beispiel für diese Powermanagementmethode eine Begrenzung des Stromgradienten abgebildet. Hierbei wird gleichzeitig auch der Einfluss auf die Leistungsentwicklung der Primärenergiequelle deutlich.

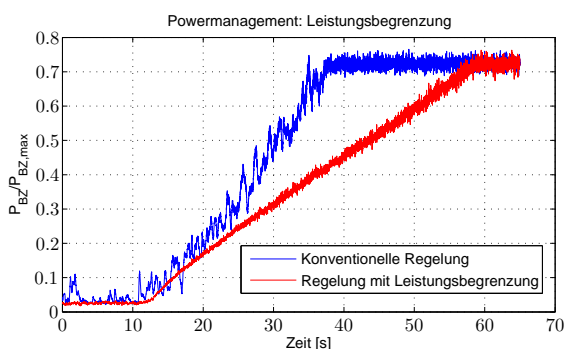


Bild 5: Leistungsregelung, klassisch und mit Begrenzung des Stromgradienten

Der Vorteil dieser Methode ist zum einen, dass durch den direkten Einfluss auf den Stromfluss die Sicherheit des Systems erhöht werden kann und zum anderen, dass durch gezielte Beeinflussung der Charakteristik des Stromflusses verschiedene Verschleißvorgänge beeinflusst bzw. vermindert werden können.

In vorhergehenden Untersuchungen [8] konnte festgestellt werden, dass durch diese Powermanagement-Methode Einfluss auf verschiedene Alterungsmechanismen von elektrischen Komponenten, v. a. dem Brennstoffzellensystem, genommen werden kann. Für die in diesem Beitrag diskutierten Zusammenhänge spielt sie jedoch nur eine untergeordnete Rolle und wird daher für die nachfolgenden Optimierungsbeispiele nicht verwendet.

5 Experimentelle Validierung

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird anhand experimenteller Untersuchungen eine praxistaugliche Vorgehensweise zur Optimierung des Powermanagements vorgestellt. Hierzu werden anhand zweier Beispiele für einen vorgegebenen Fahrzyklus verschiedene Bewertungskenngrößen definiert, gewichtet und hieraus optimale Parameter des Powermanagements bestimmt.

Die Untersuchungen werden an einem rekuperationsfähigen hybridelektrischen Antriebssystem mit einem Brennstoffzellensystem als Primärenergiequelle sowie Supercaps als Energiespeicher durchgeführt. Die prinzipiellen Wirkzusammenhänge sind auf andere Primärenergiequellen und Energiespeicher übertragbar.

5.1 Systemaufbau

Das hybride Antriebssystem ist als HiL-Prüfstand experimentell realisiert, welcher im Rahmen der Bearbeitung des IGF/AiF-Vorhabens für die Forschungsvereinigung Antriebstechnik unter der Nr. FVA 514 I [14] aufgebaut wurde. Die Versuchsanlage dient der Validierung von Entwurfsmethoden zur Auslegung von hybriden Antriebskonzepten einschließlich Komponentenregelung sowie des Powermanagements und ist für Antriebsleistungen typischer elektrisch betriebener Klein- und Fahrzeugen ausgelegt. Die Prüfstandsumgebung ist in Bild 6 dargestellt.



Bild 6: HiL-Prüfstandssystem

Für die Durchführung der Versuche werden zwei Elektromotoren verwendet, welche mechanisch über eine gemeinsame Welle gekoppelt sind. Hierbei wird der Antriebsmotor durch die Brennstoffzelle und die Supercaps versorgt und stellt topologisch den Antriebsmotor eines Fahrzeugs dar. Der Antriebsmotor kann im 4-Quadrantenbetrieb betrieben werden und ist entsprechend in der Lage bei Bremsvorgängen Energie in das System zu rekuperieren. Der Lastmotor wird von einer externen Spannungsquelle versorgt und dient zum Aufbringen von externen Widerständen (Bewegungswiderstände, Luftwiderstand, Reibungseinflüsse etc.) auf den Antriebsmotor. Brennstoffzellensystem und Supercaps sind in einer Range-Extender-Topologie verschaltet, wie in Bild 7 dargestellt.

Hierbei sind der Antriebsmotor, das Brennstoffzellensystem mit einem dazwischengeschalteten geregelten

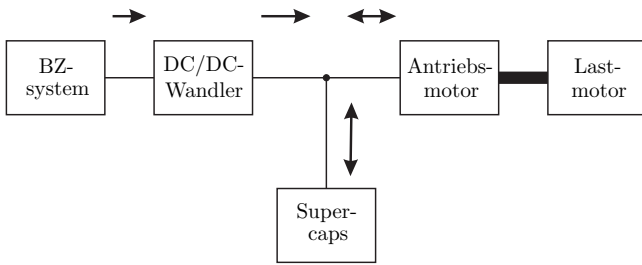


Bild 7: Range Extender-Topologie

DC/DC-Wandler sowie die Supercaps auf einen Bus zusammengeschaltet. Die Beeinflussung der gemeinsamen Busspannung U_{Bus} des Systems und damit indirekt auch die Regelung des Brennstoffzellensystems erfolgt hierbei durch den DC/DC-Wandler. In Bild 7 sind die möglichen Leistungsflussrichtungen gekennzeichnet.

5.2 Bewertungskriterien des Powermanagements

Die Bewertung des Powermanagements kann auf Grundlage zahlreicher Kriterien erfolgen. Zur vereinfachten Darstellung wird im Folgenden anhand eines Beispiels eine Optimierung hinsichtlich der Effizienz, der Verfügbarkeit und der Rekuperationsfähigkeit vorgenommen.

Die Effizienz eines Antriebssystems lässt sich auch über den zugehörigen Energieverbrauch definieren. Im vorliegenden Beispiel ist dieser zum einen durch den Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellensystems und zum anderen über die Entladung der Supercaps charakterisiert. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wird hierbei nach Versuchsende zum gemessenen Wasserstoffverbrauch diejenige Menge Wasserstoff addiert, die notwendig ist, um die Supercaps mit Hilfe des Brennstoffzellensystems wieder auf den Ladezustand zu Versuchsbeginn aufzuladen. Hieraus lässt sich ein Kennwert in der Form

$$K_{Eff} = V_{H_2} + f(SOC_{SC,init}, SOC_{SC,final}).$$

definieren, welcher die Effizienz des Systems für einen Versuchszyklus charakterisiert. Hierbei bezeichnet V_{H_2} den gemessenen Wasserstoffverbrauch, $SOC_{SC,init}$ den Ladezustand der Supercaps zu Versuchsbeginn und $SOC_{SC,final}$ den Ladezustand bei Versuchsende.

Die Verfügbarkeit eines Antriebssystems lässt sich leicht hinsichtlich der Umsetzung von Sollvorgaben quantifizieren. Diese können z. B. durch ein Leistungs- oder, wie in diesem Beispiel, durch ein Geschwindigkeitsprofil vorgegeben sein. Eine schlechte Verfügbarkeit des Systems zeigt sich entsprechend, wie in Bild 8 dargestellt, in Form einer starken Abweichung zwischen Soll- und Istgeschwindigkeit über einen vorausgesetzten Lastzyklus.

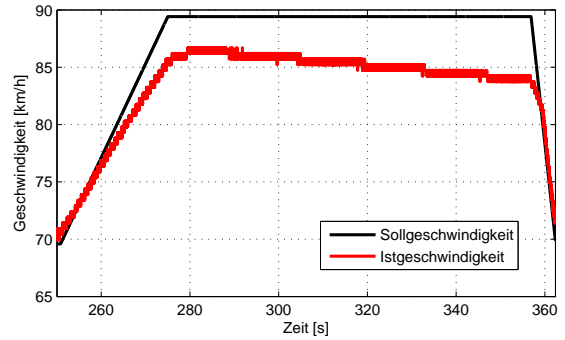


Bild 8: Geschwindigkeit - Soll- und Istverlauf

Als Kennwert für die Verfügbarkeit des Systems K_{Verf} kann daher die Abweichung der Geschwindigkeit von der Sollgeschwindigkeit definiert werden, z. B. als Funktion des IAE (*integral absolute error*) mit den beiden Größen

$$K_{Verf} = f\left(\int_t |v_{soll} - v_{ist}| dt\right).$$

Ein hoher Wert ist entsprechend mit einer schlechten Verfügbarkeit des Systems verbunden. In Bild 9 ist ein typischer Verlauf von K_{Verf} in Abhängigkeit einer gewählten Referenz-Busspannung abgebildet.

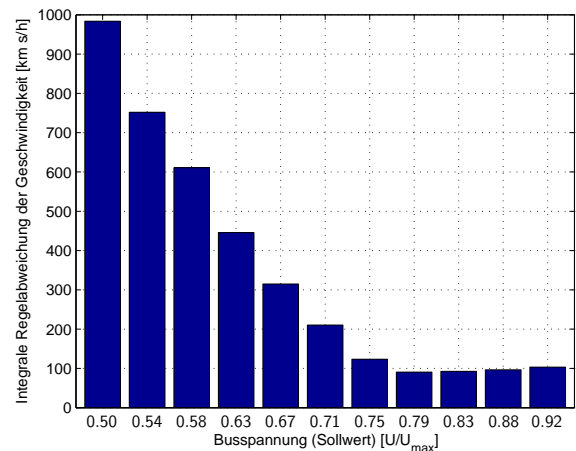


Bild 9: Integrale Regelabweichung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Referenz-Busspannung

Wie in Bild 10 dargestellt, treten vor allem bei Busspannungen unterhalb eines kritischen Wertes U_{krit} hohe Regelabweichungen bei der Geschwindigkeit auf, wobei die kritische Spannung je nach Geschwindigkeitsvorgaben variieren kann.

Um zu quantifizieren, wie oft und wie stark die kritische Spannung U_{krit} unterschritten wird, wird als weiterer Kennwert $K_{U_{Bus}}$ mit

$$K_{U_{Bus}} = f\left(\int_t U_{krit} - U(t) dt\right) \forall U(t) < U_{krit}$$

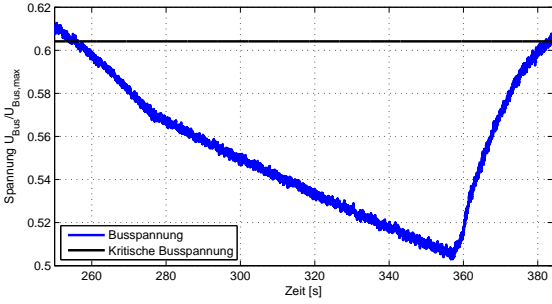


Bild 10: Busspannungsverlauf zu Bild 8

definiert.

Die Kennwerte K_{Verf} und $K_{U_{Bus}}$ verschlechtern sich typischerweise bei niedrigen Busspannungen unterhalb von U_{krit} . Das Rekuperationspotenzial des Systems dagegen verbessert sich, wie in Abschnitt 2 beschrieben, bei niedrigen Busspannungen und steht somit in direktem Konflikt zu den vorherigen Parametern. In diesem Beispiel wird der Kennwert K_{Rekup} zur Quantifizierung der Nutzung des Rekuperationspotenzials des Systems mit Hilfe des Minimums der Busspannung durch

$$K_{Rekup} = f(\min(U_{Bus}(t)))$$

bestimmt.

Mit Hilfe der vorgestellten Merkmale lassen sich für gegebene Topologien, Komponenten und Lastzyklen vergleichende Bewertungen vornehmen. Hierbei ist zu beachten, dass hinsichtlich der zyklusorientierten Bewertung die entsprechenden Energieflüsse ggf. auf die gegebenen Randbedingungen (Busspannung, Ladezustand der Supercaps etc.) umzurechnen sind. Eine detaillierte Vorgehensweise mit weitergehenden Aussagen auch zur Wahl von Komponenten bei gegebenen oder angenommenen Lastprofilen findet sich in [14], eine numerische Betrachtung und der Vergleich von exemplarischen Ergebnissen ist in [8] angegeben.

Unter Verwendung der vorgestellten vier Parameter kann in einfacher Weise eine optimale Referenzbusspannung ($U_{BusRef})_{opt}$ bestimmt werden. Aus den Kennwerten des jeweils aktuellen Fahrzyklus ergibt sich direkt mit Hilfe des Zusammenhangs

$$(U_{BusRef})_{n+1} = (\alpha K_{Eff} + \beta K_{Verf} + \gamma K_{U_{Bus}} + \delta K_{Rekup}) \Big|_{(U_{BusRef})_n}$$

der jeweils nächste Iterationsschritt einer einfachen Optimierungsschleife.

5.3 Realisierung der Fahrzyklen

Für die Realisierung von Fahrzyklen am Prüfstand wird ein Motor-Regelungssystem verwendet. Hierbei wird für den Antriebsmotor eine Drehzahlregelung verwendet, welche mit Hilfe eines Fahrermodells in

Abhängigkeit von der vorgegebenen Sollgeschwindigkeit realisiert wird, wohingegen beim Lastmotor eine Drehmomentenregelung verwendet wird. Hierbei wird ein Fahrzeugmodell hinzugezogen, welches auf die aktuellen Messwerte (ideal) zurückgreift. Die Funktionsweise des Motor-Regelungssystems ist in Bild 11 dargestellt.

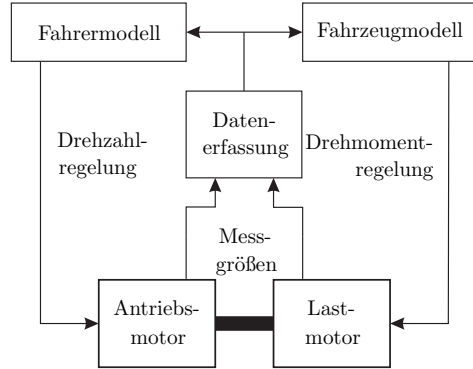


Bild 11: Schema zur Regelung der Motoren

Zur Evaluierung des Optimierungsalgorithmus wird der in Bild 12 dargestellte Abschnitt des EUDC (Extra Urban Driving Cycle)-Fahrzyklus verwendet.

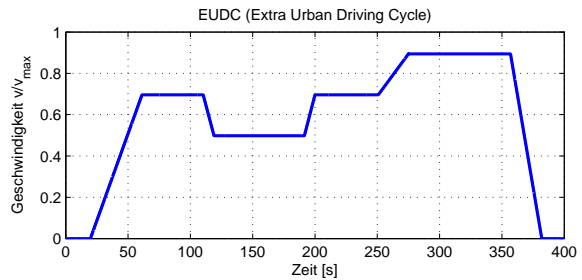


Bild 12: Betrachteter Abschnitt des EUDC-Zyklus

6 Ergebnisse

Die experimentelle Realisierung und Validierung der Powermanagementalgorithmen sowie die des Optimierungsalgorithmus wurden am vorgestellten Versuchstand durchgeführt. Die Validierung der Methode wird beispielhaft für zwei Powermanagement-Algorithmen durch jeweils zwei Optimierungsfolgen durchgeführt.

6.1 PM I

Die erste Versuchsreihe beinhaltet zwei Optimierungsläufe für den Powermanagementalgorithmus PM I, wobei als Anfangswerte Referenz-Busspannungen von 0,42 und 0,92 vorgegeben werden.

Es wird nach jedem Versuchsdurchlauf auf Grundlage der gemessenen Größen der Sollwert für den jeweils nächsten Durchlauf berechnet und eingestellt. In Bild 13 sind die Verläufe der Referenzbusspannungen für die beiden Optimierungsdurchläufe dargestellt.

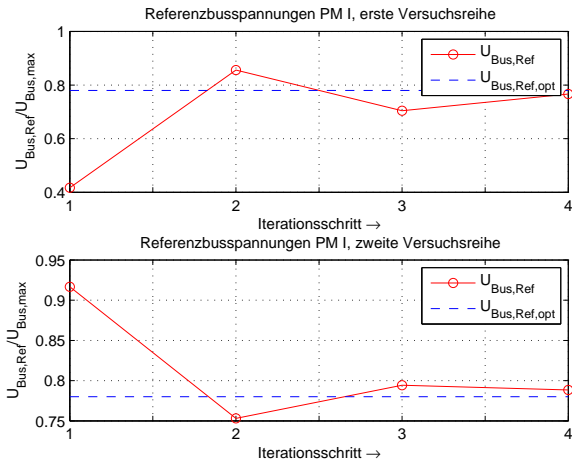


Bild 13: Optimierungsläufe mit Powermanagement PM I

Hierbei wird deutlich, dass der Algorithmus in beiden Durchläufen bereits nach wenigen Iterationsschritten auf eine Referenz-Busspannung von ca. 0,77 bzw. 0,79 konvergiert. Diese Werte sind vergleichbar zu optimalen Werten aus zuvor durchgeführten Vergleichsuntersuchungen [8].

In Bild 14 sind beispielhaft für den ersten Durchlauf die Verläufe der experimentell ermittelten Kennwerte gemäß Abschnitt 5.2 abgebildet.

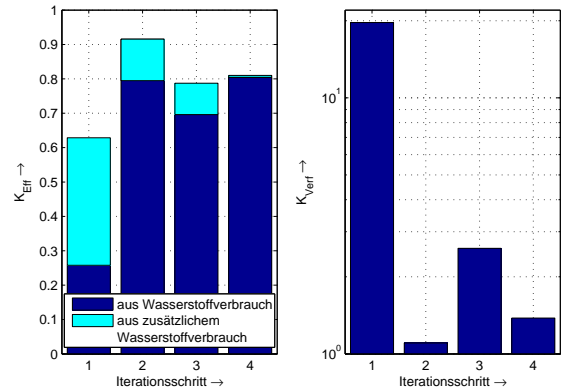
Hierbei wird deutlich, dass diese zum Teil in Konflikt zueinander stehen. Die Kennwerte K_{Eff} und K_{Rekup} , welche die Effizienz und das Rekuperationspotenzial charakterisieren, verbessern sich bei niedrigen Referenzwerten für die Busspannung, wohingegen sich für K_{Verf} und $K_{U_{Bus}}$, welche die Verfügbarkeit hinsichtlich Sollwertfolge der Geschwindigkeit und kritischer Busspannung bewerten, bei höheren Werten ein Optimum einstellt. Dieser Widerspruch erfordert eine entsprechende Gewichtung der Kennwerte zur Bestimmung der optimalen Gesamtperformance des Systems.

Durch die Wahl von geeigneten Gewichtsparametern ergeben sich für die zwei Versuchsreihen die in Bild 15 dargestellten Verläufe der Gütefunktionale.

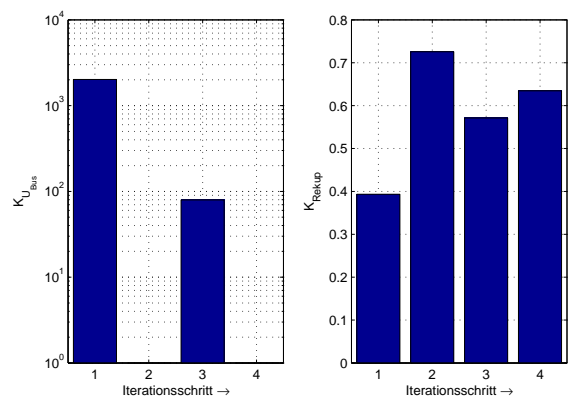
Es wird deutlich, dass das Gütefunktional in beiden Fällen bereits nach wenigen Schritten einen minimalen Wert erreicht.

6.2 PM II

Die gleichen Versuchsreihen mit denselben Anfangswerten wurden für den Powermanagement-Algorithmus



(a) Kennwerte K_{Eff} (aus Wasserstoffverbrauch) und K_{Verf} (aus Regelabweichung der Geschwindigkeit)



(b) Kennwerte $K_{U_{Bus}}$ und K_{Rekup}

Bild 14: Kennwertverläufe den ersten Optimierungsdurchlauf

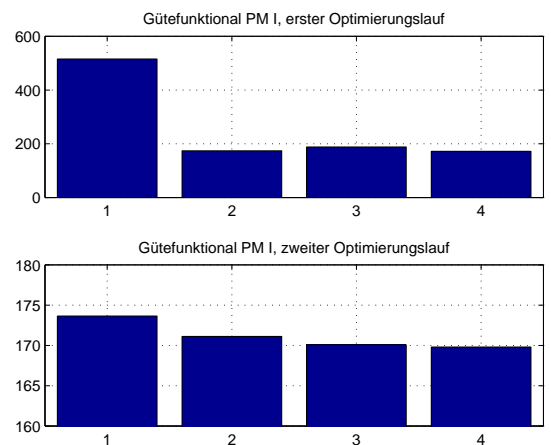


Bild 15: Gütefunktionale der Optimierungsdurchläufe bei Powermanagement PM I

PM II durchgeführt. Wie in Bild 16 dargestellt, stellt sich, trotz eines abweichenden Algorithmus und andersartiger Energieflüsse, auch hier bereits nach wenigen Schritten ein Optimum ein, welches bei einer Referenzbusspannung von jeweils ca. 0,78 liegt. Auch dieser

Wert entspricht den Ergebnissen der Vergleichsuntersuchungen [8].

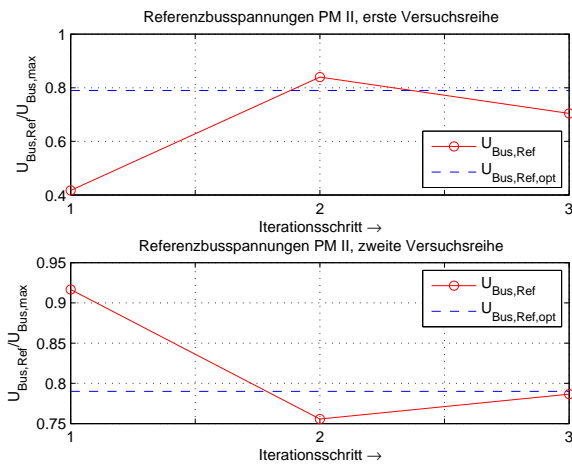


Bild 16: Optimierungsläufe mit Powermanagement PM II

Die entsprechenden Gütefunktionale, die sich hieraus für die jeweiligen Versuchsschritte ergeben, sind in Bild 17 dargestellt.

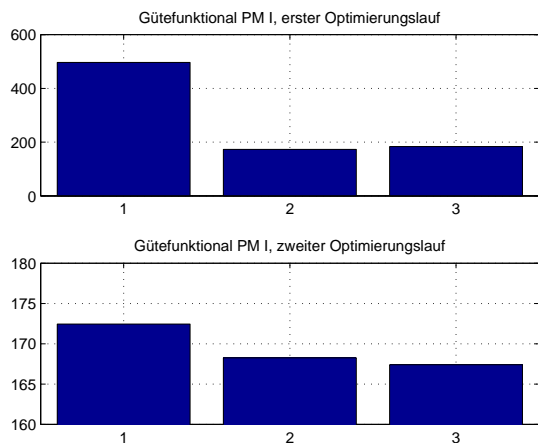


Bild 17: Gütefunktionale der Versuchsreihen mit Powermanagement PM II

Es ist zu beachten, dass eine andere Wahl oder Gewichtung von Bewertungskriterien auf andere Größen führt. Die vorgestellte Vorgehensweise kann daher nur prinzipiell in die systematische Betrachtung und Bewertung resultierender Auslegungskonflikte und deren numerische Optimierung einführen. Weitere Aspekte und Details sind in [8, 14, 15] angegeben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Beitrag wird ein Überblick über die verschiedenen Anforderungen zur Auslegung und zum Betrieb von

elektrischen und hybridelektrischen Antriebssystemen gegeben. Hierbei ist neben der Auslegung vor allem der Einfluss des Powermanagements von zentraler Bedeutung. Am Beispiel eines brennstoffzellenbasierten hybridelektrischen Antriebssystems für mittlere Leistungen wird anhand von vereinfachten Betriebsstrategien der Einfluss des Powermanagements vor allem auf Effizienz und Verfügbarkeit diskutiert sowie die Entwicklung und experimentelle Validierung eines entsprechenden Optimierungsalgorithmus dargestellt. Zusätzlich werden für einen gegebenen Fahrzyklus anhand der vorgestellten bewertenden Kennwerte die beispielhaft iterativ optimale Betriebsparameter bestimmt. Es wird deutlich, dass bereits mit einer einfachen Optimierung mit wenigen Iterationsschritten für Einfachoptimierungen Werte in unmittelbarer Nähe des Optimums erzielt werden können.

Weitere Validierungsschritte können anhand der Implementierung weiterer Fahrzyklen erfolgen. Weitergehend könnte der Einfluss weiterer Systemeigenschaften sowie von verschiedenen Fahrer- und Fahrzeugmodellen untersucht werden. Die Integration von erweiterten Algorithmen, z. B. unter Verwendung modellbasierter Methoden führt definitiv zu verbesserten Detailergebnissen. Beachtung sollte bei Optimierungsproblemen grundsätzlich die Gewichtung der verschiedenen Aspekte finden. Anhand von weitergehenden systematischen Untersuchungen und Modellen können entsprechend präzise Aussagen getroffen werden.

Im hier verwendeten Beispiel wurden als Energiespeicher Supercaps verwendet. Hierbei lässt sich mit Hilfe der anliegenden Spannung relativ leicht der Ladezustand identifizieren. Eine Übertragbarkeit der in diesem Beitrag geschilderten Zusammenhänge auf Systeme mit Batterien als Speicher ist zwar möglich, jedoch muss hierbei die veränderte Spannungscharakteristik abhängig vom Ladezustand beachtet werden.

Es ist zudem zu beachten, dass bei den hier beschriebenen Experimenten ein strom geregelter DC/DC-Wandler verwendet wurde. Bei spannungs- oder leistungsgeregelten Wandlern müssten entsprechende Anpassungen durchgeführt werden.

Abschließend sei jedoch der angenommene oder vorausgesetzte Lastzyklus als zentraler Aspekt erwähnt. Dieser beeinflusst alle Kriterien der Auslegung von Komponenten und des Systems sowie des Powermanagements.

Entsprechend wird die Weiterentwicklung aller Algorithmen zum Powermanagement einem adaptiven Powermanagement gelten, welches entsprechend weniger Zielvorgaben (Effizienter Betrieb, komponentenschonender Betrieb, ...) die verbleibenden Regelgrößen belastungs- und beanspruchungsorientiert selbstständig optimiert, z. B. als Weiterentwicklung des vorgestellten Iterationsansatzes.

Literatur

- [1] L. C. Rosario: Power and Energy Management of Multiple Energy Storage Systems in Electric Vehicles. PhD Thesis. Department of Aerospace Power & Sensors, Cranfield University, DCMT Shrivenham, Swindon, Wiltshire, UK, 2007.
- [2] R. Apter, M. Präßler: Regeneration in Hybrid Vehicles. - In: Proc. of the IEEE 55th Vehicular Technology Conference, Birmingham, AL, 2002.
- [3] F. Herb, A. Frank, C. Nitsche, A. Jossen: Optimierung der Regelung zwischen Brennstoffzelle und Batterie in Bezug auf Komponentenalterung. - In: *at-Automatisierungstechnik* 57 (1), S. 40-47, 2009.
- [4] D. Liu: Durability Study of Proton Exchange Membrane Fuel Cells via Experimental Investigations and Mathematical Modeling, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia / USA, 2006.
- [5] W. Steiger, T. Böhm, B.-G. Schulze: Direkthybrid - eine Kombination von Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Getriebe. 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik 2006.
- [6] L. Guzzella, A. Sciarretta: Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization. 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [7] A. Wagener: Adaptives Energiemanagement für einen Pkw-Antrieb mit dezentraler Reglerstruktur, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Ulm, 2004.
- [8] M. Marx, M. Özbek, D. Söffker: Comparison and Evaluation of Power Management Approaches applied to a Fuel Cell-based Hybrid HiL Powertrain. - In: Proc. IAR/ACD Workshop on Advanced Control and Diagnosis, URL: <http://www.issi.uz.zgora.pl/ACD.2009/> [Zugriff am 28.02.2010], Zielona Góra, Poland, November 19-20th, 2009.
- [9] A. Sciarretta, M. Back, L. Guzzella: Optimal Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles.- In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12 (3), 2004.
- [10] T. Hofman, M. Steinbuch, R. van Druten, A. Serrans: Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles.- In: *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* 1 (1), 2007.
- [11] C.-Y. Li, G.-P. Liu: Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles.- In: *Journal of Power Sources* 192 (2), S. 525-533, 2009.
- [12] D. Feroldi, M. Serra, J. Riera: Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles.- In: *Journal of Power Sources* 190, S. 387-401, 2009.
- [13] S. J. Boyd: Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Based on Power Loss Calculations.- In: Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2006.
- [14] D. Söffker, M. Özbek: Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines neuen Antriebskonzeptes mittlerer Leistung mit Brennstoffzellentechnik, Abschlussbericht zum Vorhaben FVA Nr. 514 I, 2009.
- [15] M. Özbek, D. Söffker: Modeling and simulation of a fuel cell-based hybrid powertrain.- In: Proc. IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Beijing, China, October 12-15, 2008.

Manuskripteingang: xx. xx 2010.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Söffker ist Lehrstuhlinhaber für Steuerung, Regelung und Systemdynamik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften an der Universität Duisburg-Essen. Neben der Realisierung von elektrischen Hybridantrieben sind seine Hauptarbeitsgebiete Modellbildung, Diagnose und Regelung elastischer mechanischer Systeme, Optimierung und Entwicklung sicherer und verfügbarer mechatronischer Systeme sowie Kognitive Technische Systeme.

Adresse: Universität Duisburg Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, D-47057 Duisburg, Fax: + 49-(0)203-379-3027, E-Mail: soeffker@uni-due.de



Dr.-Ing. Markus Özbek war Doktorand am Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik und beschäftigte sich in diesem Zusammenhang mit der Auslegung und der HiL-Simulation brennstoffzellenbasierter hybrider Antriebssysteme.

Adresse: Universität Duisburg Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, D-47057 Duisburg, E-Mail: markus.oezbek@uni-due.de



Dipl.-Ing. Matthias Marx ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik und beschäftigt sich mit der Entwicklung sowie der experimentellen Erprobung und Optimierung von Powermanagementalgorithmen bei elektrischen und hybridelektrischen Antriebssystemen.

Adresse: Universität Duisburg Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Lehrstuhl Steuerung, Regelung und Systemdynamik, D-47057 Duisburg, E-Mail: matthias.marx@uni-due.de