

Prädiktive Betriebsstrategie eines hybriden Energiespeichersystems in autonomen Elektrofahrzeugen

Dipl.-Ing. Leif Pinnecke, Dipl.-Ing. Arne Brix, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Elektrotechnisches Institut, Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe, TU Dresden

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine Betriebsstrategie für einen hybriden Energiespeicher vorgestellt, die sich der Vorhersage zukünftiger Fahrzustände durch ein autonomes Fahrzeug bedient. Dies ermöglicht ein zusätzliches Verringern der Verluste im Vergleich zu herkömmlichen Strategien, die keine Vorhersagen verwenden. Um diese Funktionen umzusetzen, wurden drei Hierarchieebenen definiert. Die oberste enthält die Energiestrategie und bestimmt den langfristigen Ladestandverlauf des Kondensators mit Hilfe der Vorhersagen. Sie gibt der Leistungsstrategie in der mittleren Ebene einen Sollladestand und eine Zielzeit vor, zu der dieser Ladestand erreicht werden soll. Die Leistungsstrategie ist als modellprädiktive Regelung ausgeführt, die den Ziel-ladegrad in einem Toleranzband führt und die Verluste des Energiespeichersystems minimiert. Die unterste Hierarchieebene enthält die Leistungsregelung des verwendeten DC/DC-Wandlers. Diese stellt die Kondensatorleistung nach der Vorgabe durch die Leistungsstrategie ein. Mit Hilfe dieses Ansatzes und einer Vorausschau von maximal 12 s konnten die Verluste im Vergleich zu einer regelbasierten Strategie ohne Vorausschau um 12 % verringert werden. Im Vergleich zu einer global optimierten Lösung, die mittels einer Dynamischen Programmierung erreicht wurde, erzeugt sie 8 % mehr Verluste.

Abstract

This paper presents an operating strategy for a hybrid energy storage system using the prediction of future driving conditions by an autonomous vehicle. This allows to reduce the losses compared to conventional strategies that do not use predictions. To implement these functions, three hierarchy levels have been defined. The top level is the energy strategy and determines the long-term state of charge of the capacitor using the predictions. It gives the power strategy, the middle level, a target charge level and a target time at which this state of charge should be reached. The power strategy determines the current power distribution using a model predictive approach and stationary loss optimization. The lowest hierarchical level is the power control of the DC/DC converter used. This adjusts the capacitor power according to the specification of the power strategy.

With the help of this approach and a forecast of maximum 12 s, the losses could be reduced by 12 % compared to a rule-based strategy without a forecast. In comparison to a globally optimized solution achieved by dynamic programming, the new strategy generates 8 % more losses.

1 Einleitung

Die Kernkomponente von Elektrofahrzeugen ist die Batterie, deren Lebensdauer abhängig von der Belastung ist. Um die Belastungen zu verringern, kann ein Hybrides Energiespeichersystem (HESS) entworfen werden, das aus einer Batterie, einem DC/DC-Wandler und einem Kondensator besteht. So können die großen Lade- und Entladeströme verringert werden, was die Lebenszeit der Batterie verlängert. Die Leistungsaufteilung zwischen Batterie und Kondensator wird von einer Betriebsstrategie umgesetzt. Durch Vorausschaudaten kann die Verwendung des Kondensators dabei besser geplant und die Verluste einem globalen Optimum angenähert werden. Ein autonomes Fahrzeug kann die benötigten Daten bereitstellen.

Nach [1] und [2] werden Betriebsstrategien in zwei Gruppen eingeteilt, regelbasierte und optimierende Strategien. Die regelbasierten Betriebsstrategien sind einfach zu implementieren und haben geringe Anforderungen an die Hardware. Sie sind kausal, benötigen also nur aktuelle und vergangene Werte, um eine Leistungsaufteilung zu bestimmen. Die implementierten Regeln werden durch Expertenwissen aufgebaut. Die optimierenden Betriebsstrategien sind aufwendig zu implementieren und haben hohe Anforderungen an die Hardware. Um eine global optimale Lösung zu finden, wird das gesamte Fahrprofil benötigt. Aus diesen Gründen sind optimierende Strategien meistens nicht echtzeitfähig und können nur unter besonderen Umständen in Fahrzeugen eingesetzt werden. Sie sind gut geeignet, eine global optimierte Lösung für ein aufgenommenes Fahrprofil zu generieren, um echtzeitfähige Strategien in ihrer Lösungsgüte zu bewerten.

2 Betriebsstrategie

2.1 Architektur

Zu Beginn wurde die Architektur der zu entwerfenden Betriebsstrategie festgelegt. Dabei wurde auf einen hierarchischen Aufbau zurückgegriffen, der z.B. in [3] gezeigt wird. Dort werden Betriebsstrategien in drei Ebenen aufgeteilt. Dabei trifft die Energiestrategie die langfristigen Entscheidungen. In der entwickelten Strategie wird hier ein zukünftiger Sollladestand des Kondensators bestimmt. Dieser wird an die Leistungsstrategie weitergegeben. Diese bestimmt die momentane Leistungsaufteilung und berücksichtigt dabei die Vorgabe der Energiestrategie. In der entwickelten Strategie stellt sie sicher, dass die Randbedingungen eingehalten werden und versucht den vorgegebenen Zielladegrad einzustellen. Die unterste Ebene ist für die Ansteuerung der Hardware zuständig. Im vorhandenen Aufbau ist sie als Leistungsregelung auf dem DC/DC-Wandler (einem bidirektionalen Hoch-/Tiefsetzsteller in Mehrphasenschaltung) umgesetzt und wird vom Hersteller bereitgestellt. Dementsprechend ist sie nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Die Energiestrategie stellt einen einfachen Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie des Fahrzeugs und dem Energieinhalt des Kondensators her. Um die Batterie zu entlasten, sollte die kinetische Energie des Fahrzeugs zu großen Teilen im Kondensator gespeichert werden können, also wird bei hohen Geschwindigkeiten ein niedriger Ladestand benötigt. Zum Antreiben ist

der Zusammenhang entgegengesetzt, da bei einer geringen Geschwindigkeit länger beschleunigt werden kann. Dementsprechend sollte in diesem Fall ein hoher Ladestand vorherrschen. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 1 dargestellt. Da die kinetische Energie proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit ist, kann durch den Quotienten $\frac{v^2}{v_{\max}^2}$ der Anteil der kinetischen Energie zur maximalen, kinetischen Energie dargestellt werden.

$$SoC_{\text{cap ref}} = (SoC_{\text{cap min}} - SoC_{\text{cap max}}) \cdot \frac{v^2}{v_{\max}^2} + SoC_{\text{cap max}} \quad (1)$$

2.2 Leistungsstrategie

Um die entstehenden Verluste berechnen zu können, werden Modelle der Komponenten benötigt. Für die Speicher wird dabei eine gesteuerte Spannungsquelle und ein Innenwiderstand verwendet, um ein Modell zu erstellen, das nur mit Datenblattangaben parametrisiert werden kann. Dabei wird die Ruhespannungskennlinie der Batterie hinterlegt und die Kondensatorspannung über die enthaltene Energie berechnet. Da die Batterie und der Kondensator aus mehreren Zellen bestehen, werden die Modelle einer Zelle auf den zusammenhängenden Speicher skaliert. Für eine stationäre Verlustberechnung des DC/DC-Wandlers wird auf [4] zurückgegriffen. Es werden Schalt- und Leitverluste der Leistungshalbleiter berücksichtigt, in Abhängigkeit der Eingangsspannung, Ausgangsspannung, Schaltfrequenz und des Laststroms.

Das Ziel der Leistungsstrategie ist, die Leistung so auf beide Speicher aufzuteilen, dass die Verluste minimiert werden. Dafür wird eine stationär optimale Leistungsaufteilung bestimmt. So setzt sich die Gesamtleistung des HESS (P_{ges}) aus der DC/DC-Leistung (P_{DCDC}) und der Batterieleistung (P_{bat}) zusammen. Die gesamte Verlustleistung ($P_{V \text{ ges}}$) besteht aus der Verlustleistung des DC/DC-Wandlers ($P_{V \text{ DCDC}}$), der Batterie ($P_{V \text{ bat}}$) und des Kondensators ($P_{V \text{ cap}}$). Der Aufbau des HESS ist, inkl. der wichtigen Größen, in Abb. 1 dargestellt. Die Leistungen sind das Produkt von Strom und Spannung eines Speichers, mit den eingezeichneten Zählpfeilrichtungen. So wirken positive Leistungen entladend, während negative Leistungen die Speicher aufladen.

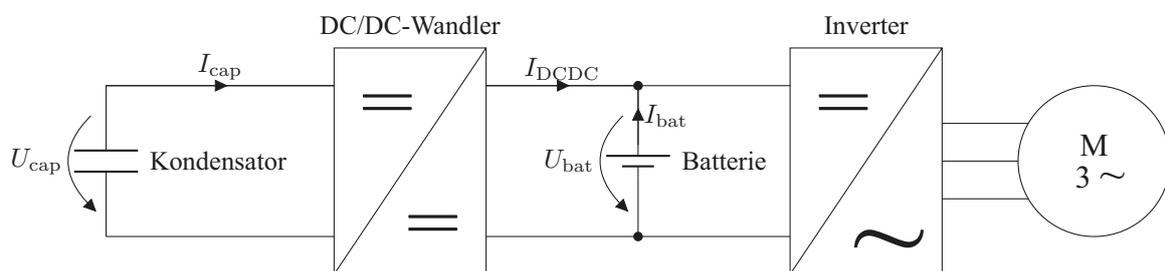


Abb. 1: Aufbau des verwendeten HESS

Über die Leistungsbilanz und den Maschensatz der Speichermodelle, kann die Verlustleistung der einzelnen Speicher in Abhängigkeit ihrer abgegebenen Leistung dargestellt werden:

$$P_{V \text{ bat}} = \frac{U_{0 \text{ bat}}^2}{2 \cdot R_{i \text{ bat}}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot P_{\text{bat}} \cdot R_{i \text{ bat}}}{U_{0 \text{ bat}}^2}} \right) - P_{\text{bat}} \quad (2)$$

$$P_{V \text{ cap}} = \frac{U_{0 \text{ cap}}^2}{2 \cdot R_{i \text{ cap}}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot P_{\text{cap}} \cdot R_{i \text{ cap}}}{U_{0 \text{ cap}}^2}} \right) - P_{\text{cap}} \quad (3)$$

$$P_{V \text{ DCDC}} = (1 - \eta_{\text{DCDC}}) \cdot P_{\text{cap}} \quad (4)$$

Mit Hilfe dieser Zusammenhänge kann die gesamte Verlustleistung für beliebige Kombinationen aus Gesamtleistung und DC/DC-Leistung berechnet und eine optimale Leistungsaufteilung gefunden werden [5]. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge der Ruhespannungen zum SoC und zum Wirkungsgrad des DC/DC-Konverters wird eine numerische Lösung der Optimierungsaufgabe gewählt. Dafür wird der Suchraum mit einer Auflösung von 500 W diskret abgetastet und das Minimum ausgelesen. Zusätzlich werden die Speicherströme auf Datenblattwerte begrenzt, um Überbelastungen der Speicher auszuschließen.

Das Ergebnis der Optimierung ist in Abb. 2 zu sehen. Auf der X-Achse ist die DC/DC-Leistung in kW dargestellt, auf der Y-Achse die Batterieleistung in kW. Durch das Einbeziehen des DC/DC-Wirkungsgrades gibt es einen Bereich der Gesamtleistung, in dem es nicht sinnvoll ist den Kondensator zu verwenden. In diesem Bereich entstehen durch den geringen Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers mehr Verluste als durch die Entlastung der Batterie eingespart werden. Erst bei größeren Gesamtleistungen sinken die Verluste bei der Verwendung von beiden Speichern. Im Bereich der negativen Leistungen fällt auf, dass ab einer Gesamtleistung von ca. -33 kW die Batterie nicht mehr stärker verwendet wird. Hier ist der maximale Ladestrom der Batterie erreicht, dementsprechend darf der Betrag der Batterieleistung nicht weiter erhöht werden. Die eingezeichneten Leistungsaufteilungen stellen die Grenzen dar und sind über die entgegengesetzten Ladegradgrenzen der Speicher definiert. Da ein komplett geladener Speicher eine höhere Ruhespannung aufweist, werden durch eine feste Leistung weniger Verluste erzeugt als bei einem leeren Speicher. Dementsprechend befinden sich alle optimierten Leistungsaufteilungen bei anderen Ladegraden der Speicher zwischen diesen Lösungen.

Mit Hilfe der vorgestellten Optimierung kann die geforderte Gesamtleistung auf beide Speicher verteilt werden. Wenn dabei nur auf die berechnete, stationär optimierte Aufteilung zurückgegriffen wird, werden sich Probleme einstellen. Beim Rekuperieren wird weniger Energie zurückgespeist als beim Antreiben benötigt wird. Dadurch wird der SoC des Kondensators bei einer Betriebsweise nach dem stationären Optimum immer weiter sinken, bis er an seinem minimalen Ladegrad angekommen ist. Um diese Nachteile auszugleichen, wird eine Möglichkeit benötigt, von der optimierten Leistungsaufteilung abzuweichen. Das Ziel dabei ist, den SoC des Kondensators mit Hilfe dieser Abweichung möglichst effizient zu ändern, um einen Ziel-SoC zu erreichen. Dafür wurde die, bei einer Abweichung vom Optimum zusätzlich entstehende, Verlustleistung untersucht. Diese wird als Maß genutzt, um zu entscheiden an welchen Stellen und

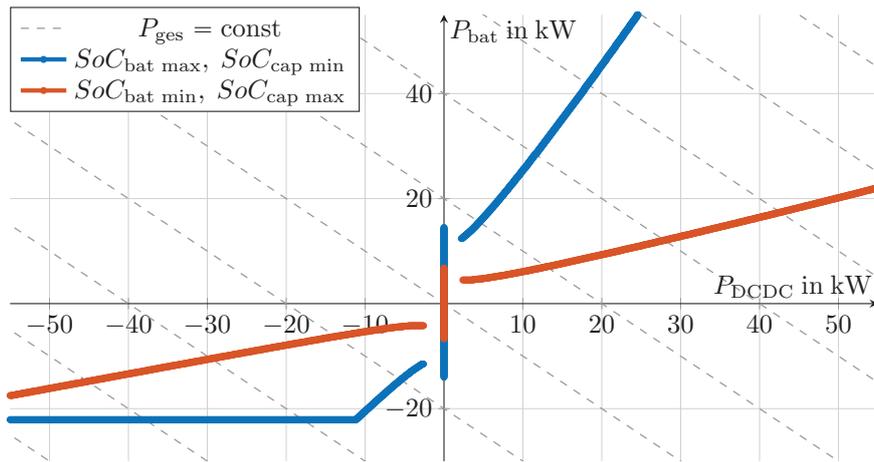


Abb. 2: Optimierte Leistungsaufteilung mit DC/DC-Wandlerwirkungsgrad

wie stark vom stationären Optimum abgewichen wird. Diese Stellgröße wird als K definiert und stellt das Verhältnis der zusätzlichen Verlustleistung bei einer Veränderung der DC/DC-Leistung dar:

$$K = \frac{\Delta P_V}{\Delta P_{\text{DCDC}}} \quad (5)$$

Die so berechneten Daten zur verlustoptimalen Leistungsaufteilung und zur Abweichung vom Optimum wurden in Lookup-Tabellen abgelegt, um den Rechenaufwand der Leistungsstrategie zu verringern. Der Ablauf des Algorithmus ist in Abb. 3 dargestellt. Am Anfang wird die Leistungsvorhersage des autonomen Fahrzeugs und der durch die Energiestrategie vorgegebene Zielladestand zur Verfügung gestellt. Danach werden zwei Stellgrößen K_1 und K_2 definiert, bei denen die erste gleich Null gewählt wird, stellvertretend für die stationär optimale Leistungsaufteilung. Die Zweite wird um den diskreten Schritt der abgespeicherten Werte erhöht, in diesem Fall 0,005. Mit diesen Eingangsgrößen wird die vorhergesagte Leistungsanforderung modellprädiktiv simuliert. Bei $K = 0$ wird zu jeder Leistungsanforderung die stationär optimale Aufteilung gewählt. Die nächste Simulation weicht entsprechend der gewählten Stellgröße von der optimalen Aufteilung ab. Die resultierenden Ladestände $SoC_{\text{end } 1}$ und $SoC_{\text{end } 2}$ werden mit dem vorgegebenen SoC des Kondensators verglichen. Wenn der Ladestand nach K_2 näher am Ziel-SoC ist, wird der Algorithmus mit weiter erhöhten Stellgrößen wiederholt. Sobald der Ladestand nach K_1 näher am Ziel-SoC ist, wird diese Leistungsaufteilung übernommen und eingestellt.

3 Simulation

3.1 Beschreibung der Simulationsumgebung

Um die entworfene Betriebsstrategie zu testen und mit anderen Strategien zu vergleichen, wird eine Simulation aufgebaut. Dafür werden von Simulink[®] bereitgestellte Modelle einer Li-Ionen-

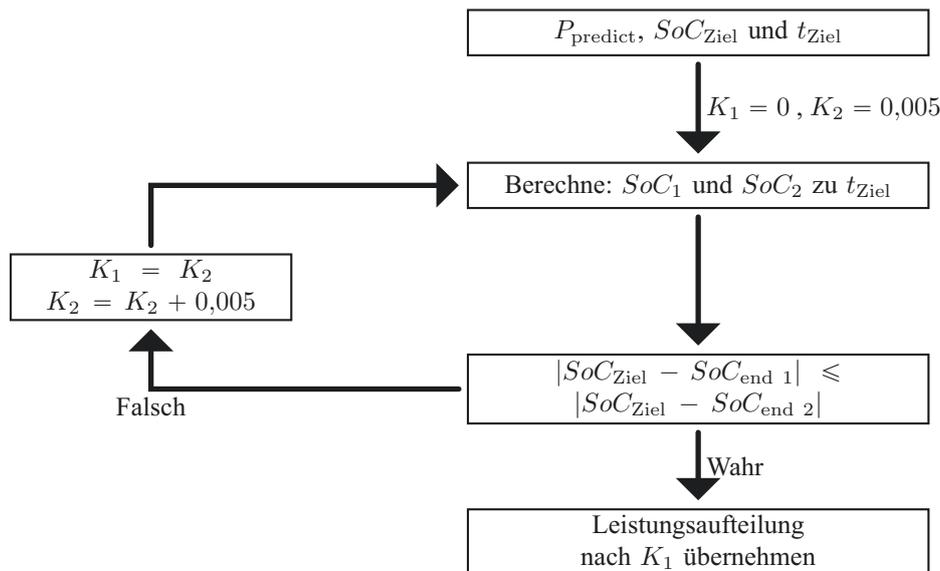


Abb. 3: Flussdiagramm der entwickelten Betriebsstrategie

Batterie und eines Doppelschichtkondensators parametrisiert und verwendet. Die Dynamik des DC/DC-Wandlers wird mit einem, aus Messungen parametrisierten, PT1-Glied abgebildet und die Verluste werden berücksichtigt.

Um zu starkes Rekuperieren zu verhindern, können Ladeleistungen verringert werden. Dies simuliert den Effekt einer mechanische Bremse. Muss sie eingreifen, wird die Differenz zur angeforderten Gesamtleistung als Verlustleistung erfasst. Der SoC des Kondensators steht bei späteren Prüfstandsversuchen nicht zur Verfügung, deswegen wird er durch das Quadrat des Quotienten der Ruhespannung zur Maximalspannung abgeschätzt. Die simulierte Betriebsstrategie gibt den Leistungssollwert für den DC/DC-Wandler vor. In der Simulation werden sechs Strategien untersucht, zwei regelbasierte Strategien, die entworfene, prädiktive Betriebsstrategie mit einer Vorausschau von 6 s, 9 s und 12 s, sowie eine global optimierte Lösung, die mit Hilfe einer Dynamischen Programmierung erreicht wurde.

Geschwindigkeitsbasierte Strategie (v) Die erste regelbasierte Strategie verwendet den gleichen Ansatz wie die beschriebene Energiestrategie. Die Geschwindigkeit wird in einen Zielladegrad des Kondensators umgerechnet. Um dem Ziel-SoC zu folgen, wird ein PI-Regler mit Vorsteuerung verwendet.

Frequenzbasierte Strategie (f) Die frequenzbasierte Strategie bestimmt die in der Leistungsanforderung enthaltenen Frequenzen und teilt sie auf die beiden Speicher auf. Die hohen Frequenzanteile sollen vom Kondensator bereitgestellt werden, während die Batterie die Grundlast, also die niedrigen Frequenzanteile beiträgt. Um aus der Leistungsanforderung die Kondensatorleistung zu erhalten, wird ein Hochpassfilter verwendet. Die Parameter des Filters wurden anhand der Fourier-Transformation der Leistungsanforderung ermittelt und mit Hilfe der Simulation angepasst.

Dynamische Programmierung (DP) Als global optimierende Strategie wird die DP von [6] verwendet. Da eine online-Berechnung aufgrund der Rechenintensivität nicht möglich ist, können die Ergebnisse nur als offline berechnete Wertetabelle bereitgestellt werden. Ergebnis der DP ist der Verlauf des optimierten Kondensatorladestandes über der Zeit. Die Berechnung der benötigten Kondensatorleistung wird analog zur geschwindigkeitsbasierten Strategie mit einem PI-Regler umgesetzt, um Modellunterschiede auszugleichen.

Prädiktive Betriebsstrategie (p6, p9, p12) Dies ist die neu entwickelte Strategie. Die Energiestrategie und die modellprädiktive Leistungsstrategie werden alle 500 ms neu berechnet. Die Leistungsaufteilung wird im Abstand von 200 ms ausgeführt. Es werden dabei Vorausschauhorizonte von 6 s, 9 s und 12 s betrachtet. Die entsprechenden Daten werden mit „p6“, „p9“ und „p12“ gekennzeichnet.

3.2 Ergebnisse

In Abb. 4 sind die Arbeitspunkte der entwickelten, prädiktiven Strategie und der DP dargestellt. Dabei fällt auf, dass die DC/DC-Leistungen, die von der DP gewählt wurden, in nahezu gleichen Abständen verteilt sind. Dies ist auf die Diskretisierung der Kondensatorladestände zurückzuführen. Die DP wählt zu jedem Zeitpunkt den Übergang zwischen diskretisierten SoC. So ergibt sich mit den betrachteten Zeitschritten eine benötigte Leistung, um diesen Unterschied im Ladezustand zu erzeugen. Da die Diskretisierungen des SoC äquidistant sind, wird für jeden Übergang ungefähr ein Vielfaches der benötigten Leistung des kleinsten Übergangs benötigt. So ergibt sich die Aufteilung der DC/DC-Leistungen in diesen fast konstanten Abständen. Der Vergleich der gewählten Arbeitspunkte der beiden Strategien zeigt eine sehr ähnliche Verteilung. Dies legt nahe, dass das Ergebnis der prädiktiven Strategie nahe an dem der DP liegt. So wird auch bei der globalen Optimierung das Aufladen des Kondensators gegenüber der momentan verlustoptimalen Leistungsaufteilung priorisiert, um sich dem globalen Optimum anzunähern.

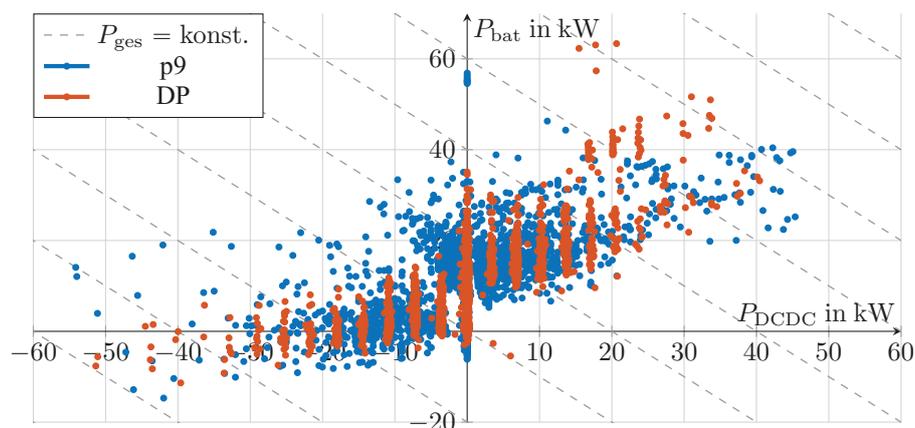


Abb. 4: Vergleich der Arbeitspunkte von DP und prädiktiver Strategie

In Abb. 5 sind die entstandenen Verluste der einzelnen Strategien aufgeführt. In der Simulation wurden die Batterieverluste $E_{V \text{ bat}}$, die Kondensatorverluste $E_{V \text{ cap}}$, die DC/DC-Verluste

$E_{V\ DCDC}$ und die Verluste der mechanischen Bremse $E_{V\ mech}$ betrachtet. Die mechanische Bremse wurde nur bei der geschwindigkeitsbasierten und der prädiktiven Strategie mit 6 s Vorausschauhorizont benötigt. In beiden Fällen ist die dadurch entstandene Verlustenergie mit einem Anteil von 0,18 % bzw. 0,04 % an den Gesamtverlusten allerdings vernachlässigbar.

Die geschwindigkeitsbasierte Strategie hat im Vergleich zur DP weniger Verluste in DC/DC-Wandler und Kondensator erzeugt, aber mehr Verluste in der Batterie. Die DC/DC-Wandlerleistung wird nur zwischen ca. -40 kW und 20 kW variiert (DP und prädiktive Strategie variieren zwischen -55 kW und 45 kW). Die meisten Arbeitspunkte liegen sogar nur in einem Bereich von -10 kW bis 10 kW . So muss die Batterie größere Leistungen abdecken.

Die frequenzbasierte Strategie erzeugt neben der DP die geringsten Batterieverluste. Dies zeigt, dass die Verteilung der Grundlast auf die Batterie und der Leistungsspitzen auf den Kondensator funktioniert. Es entstehen durch die häufige Verwendung des Kondensators erhöhte Verluste in DC/DC-Wandler und Kondensator, sodass diese Strategie im Vergleich die meisten Verluste verursacht.

Die prädiktive Strategie verringert mit steigendem Vorausschauhorizont die Belastung der Batterie und erhöht die Belastung des Kondensators. Die Unterschiede in den Werten sind allerdings gering. Alle Varianten sind in ihrem Ergebnis nahe an der DP, was die Vermutung bestätigt, die bei der Analyse der Arbeitspunkte aufgestellt wurde.

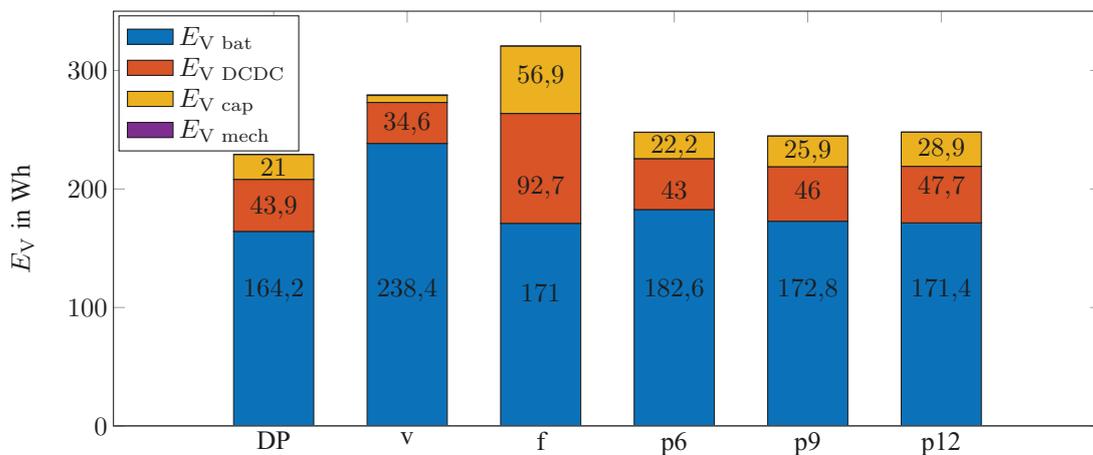


Abb. 5: Verlustvergleich der einzelnen Strategien

4 Prüfstand

4.1 Beschreibung des Prüfstandsbaus

Um die entwickelte Betriebsstrategie zu validieren, wurden Messungen am Prüfstand durchgeführt. Dafür wurde ein Kondensator mit DC/DC-Wandler an ein Quelle-Senke-System angeschlossen. Da keine Batterie in den notwendigen Dimensionen zur Verfügung stand, wurde ein Batteriemodell von dSpace[®] verwendet. Eine MicroAutoBox II simuliert dieses Modell in Echtzeit. Die Ausgangsspannung des Quelle-Senke Systems wird der simulierten Batteriespannung nachgeführt, um die Zwischenkreisspannung abzubilden. Ein zweites Steuergerät von dSpace[®],

ein DS1103, setzt die beschriebenen Betriebsstrategien um. Die bereitgestellte Sollleistung des Kondensators wird von der MicroAutoBox an den DC/DC-Wandler weitergegeben. Der Betriebsstrategie stehen der Batterieladegrad sowie Strom und Spannung des Kondensators zur Verfügung, um den Zustand des HESS zu bestimmen. Die frequenzbasierte Strategie wurde hier nicht umgesetzt, da sie den Kondensatorladegrad nur ungenügend nachführt und so keinen kontinuierlichen Betrieb gewährleisten konnte.

4.2 Ergebnisse

In der Tab. 1 sind die erreichten Extremwerte von Simulation und Messung aufgeführt. Die Strom- und Spannungswerte der DP und der geschwindigkeitsbasierten Strategie liegen in Simulation und Messung nahe beieinander. Die größten Abweichungen treten bei der geschwindigkeitsbasierten Strategie auf. Die Abweichung des maximalen Entladestroms liegt bei 9,8 A (4,1 %), der minimalen Batteriespannung bei 4,9 V (1,7 %). Die Stromwerte der prädiktiven Strategie zeigen größere Unterschiede. Hier ist die maximale Abweichung ebenfalls Ladestrom und beträgt 12,7 A. Diese Strategie versucht Abweichungen der Ladestände möglichst effizient auszugleichen und führt dies nicht immer kontinuierlich, sondern auch durch eine starke Veränderung der Leistung aus. So ergibt sich im Vergleich zu den beiden anderen Strategien keine kontinuierliche Anpassung der Leistung, um den Ladegrad nachzuführen, wie sie der PI-Regler dieser Strategien verursacht. Aus diesem Grund können sich die maximalen und minimalen Ströme stärker von der Simulation unterscheiden.

Tab. 1: Erreichte Extremwerte in Simulation und Messung

		SoC_{end}	I_{max}	I_{min}	U_{max}	U_{min}
DP	Simulation	35,6%	192,3 A	-79 A	347,6 V	290,9 V
	Messung	34,2%	191,1 A	-84,1 A	348,5 V	290,6 V
v	Simulation	35,5%	228,1 A	-88,3 A	347,7 V	275,2 V
	Messung	33,2%	237,9 A	-86,1 A	348,8 V	280,1 V
p	Simulation	35,6%	176,6 A	-57,9 A	344 V	289,6 V
	Messung	34,5%	185,4 A	-70,6 A	348,3 V	293,6 V

Die Abweichungen des erreichten Batterie-SoC sind durch eine nicht simulierte Selbstentladung und Verlustleistung im Symmetrierungsnetzwerk des Kondensators verursacht. Dieser ist durch eine Reihen- und Parallelschaltung mehrerer Zellen aufgebaut. Um sicherzustellen, dass sie eine gleiche Spannung besitzen, wird ein Symmetrierungsnetz benötigt. Dieses lädt und entlädt einzelne Kondensatoren und verursacht dabei Verluste, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurden.

Der größte verbleibende Ladestand der Batterie wird mit der entwickelten, prädiktiven Strategie erreicht. Das Ergebnis ist 0,3 % besser als bei der global optimierten Lösung der DP. Dies ist auf Unterschiede zwischen den angenommenen Modellen und dem Prüfstands Aufbau zu erklären. Zusätzlich konnte die Lösung der DP nicht direkt verwendet werden, sondern der erhaltene Ladestandverlauf musste mit Hilfe eines PI-Reglers eingestellt werden. Dies ergibt

eine Abweichung von der ermittelten optimalen Lösung, die weitere Verluste verursacht. Die geschwindigkeitsbasierte Strategie hat am Ende den geringsten Batterieladestand. Der Unterschied zu den anderen beiden Strategien ist größer als in der Simulation. Dieser Effekt ist auf das Symmetrierungsnetz zurückzuführen, das stärker eingreift, wenn vom Kondensator eine Leistung gefordert wird. Die Zeiten, in denen keine Kondensatorleistung eingestellt wird, ist bei den anderen beiden Strategien größer, wodurch bei ihnen weniger Verluste im Kondensator entstehen. Um Simulations- und Prüfstandsergebnisse der entwickelten, prädiktiven Strategie besser vergleichen zu können, sind in Abb. 6 die jeweils gewählten Arbeitspunkte dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die gewählten Leistungsaufteilungen ähnlich sind. Die Differenz in den Extremwerten entsteht durch die Unterschiede in den äußersten Arbeitspunkten. Die gewählten Arbeitspunkte mit DC/DC-Leistung gleich Null haben ähnliche Grenzen. Demnach passt das Ergebnis der prädiktiven Strategie gut zu der Simulation.

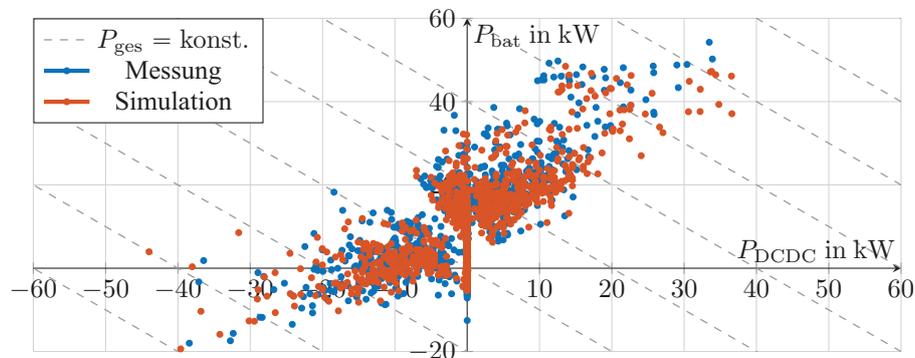


Abb. 6: Vergleich der gewählten Arbeitspunkte der prädiktiven Strategie

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, eine prädiktive Betriebsstrategie für ein hybrides Energiespeichersystem in einem autonom fahrenden Elektroauto zu entwerfen, diese zu simulieren und zu testen. Dafür stehen im Gegensatz zu den bisher umgesetzten Betriebsstrategien die Vorhersagen des autonomen Fahrzeugs zur Verfügung. Diese ermöglichen die Planung der nächsten Zustände, sodass eine echtzeitfähige Strategie sich dem globalen Optimum besser annähern kann als bisher. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden die Aufgaben der Betriebsstrategie auf drei Ebenen aufgeteilt. Die erste Ebene ist die Energiestrategie und optimiert den zukünftigen Verlauf über die vorhergesagten Geschwindigkeiten. Die zweite Ebene teilt die Leistungen über das stationäre Optimum auf Batterie und Kondensator auf. Diese Optimierung wurde offline vorausberechnet, um die Echtzeitfähigkeit zu gewährleisten. Die zukünftigen Zustände der Speicher werden über einfache Modelle abgeschätzt, die mit Datenblattangaben parametrisiert werden können. Eine modellprädiktive Regelung stellt den Zielladegrad unter Berücksichtigung der Abweichung vom stationären Optimum ein. Die letzte Ebene ist die Einstellung der vorgegebenen Leistung und ist als Leistungsregelung auf einem DC/DC-Wandler umgesetzt. Diese war nicht Bestandteil der Arbeit.

Die Funktionsfähigkeit der entworfenen Strategie wurde in einer Simulation und an einem Prüfstand nachgewiesen. Sie hält die Grenzwerte der Speicher ein und mit Hilfe der modellprädiktiven Regelung wird der Zielladegrad erreicht. Die Strategie wurde auf einem DS1103 (einem Rapid-Prototyping System der Firma dSpace) in Betrieb genommen.

Im Vergleich zu einer Referenzlösung, die mit Hilfe einer dynamischen Programmierung generiert wurde, stellen sich um 8 % höhere Verluste ein. Dabei wurde die Referenzlösung global optimiert unter Kenntnis des gesamten Lastprofils. Die entwickelte prädiktive Strategie verwendet hingegen Vorhersagen von maximal 12 s, die von der Fahrplanung eines autonomen Fahrzeugs bereitgestellt werden können. Im Vergleich zu anwendbaren regelbasierten Strategien wurden die Verluste um mindestens 12 % reduziert.

Danksagung Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung der Arbeit im Rahmen des Projektes „Kombinierte Logik für Energieeffiziente Elektromobilität“ (KLEE) und den Projektpartnern Freie Universität Berlin, IAV GmbH, Ibeo Automotive Systems GmbH und dem assoziierten Partner ZF Friedrichshafen AG für die produktive Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] GEETHA, A. ; SUBRAMANI, C.: A comprehensive review on energy management strategies of hybrid energy storage system for electric vehicles. In: *International Journal of Energy Research* 41 (2017), März, Nr. 13, S. 1817–1834. <http://dx.doi.org/10.1002/er.3730>. – DOI 10.1002/er.3730
- [2] SALMASI, F. R.: Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Evolution, Classification, Comparison, and Future Trends. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56 (2007), September, Nr. 5, S. 2393–2404. <http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2007.899933>. – DOI 10.1109/TVT.2007.899933. – ISSN 0018–9545
- [3] TROVÃO, J. P. ; SANTOS, V. D. N. ; PEREIRINHA, P. G. ; JORGE, H. M. ; ANTUNES, C. H.: Comparative study of different energy management strategies for dual-source electric vehicles. In: *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013, S. 1–9
- [4] WINTRICH, A. ; NICOLAI, U. ; TURSKY, W. ; (NÜRNBERG), SEMIKRON International GmbH & Co. K. ; REIMANN, T.: *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter*. ISLE, 2015. – ISBN 9783938843567
- [5] PINNECKE, Leif: *Prädiktive Betriebsstrategie eines hybriden Energiespeichersystems in autonomen Elektrofahrzeugen*, TU Dresden, Diplomarbeit, März 2019
- [6] BRIX, Arne ; HOFMANN, Wilfried: Fundamental Research on the Operating Strategy for a Hybrid Energy Storage System in the Electric Powertrain of Autonomous Vehicles. In: *EVS30 Symposium* (2017), Oktober