

Dezentrale optimale Betriebsstrategie für Hybridantriebe

Dipl.-Ing. Alexander Frenkel, Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik

Abstract: Der vorliegende Beitrag befasst sich mit einer dezentralen und optimalen Regelung von Hybridantrieben. Die Methode wird vorgestellt und in ihren wesentlichen Punkten hergeleitet. Am Beispiel eines parallelen Hybridantriebes mit Momentaddition für Flurförderzeuge wird die Methode angewandt. Zur Beurteilung der Güte wird für den gewählten Hybridantrieb und ein standardisiertes Fahrprofil der optimale Betrieb des Antriebstranges mit Hilfe der dynamischen Programmierung ermittelt. Im Vergleich dieser optimalen Lösung mit der dezentralen Betriebsstrategie zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag stellt eine Methode zur optimalen dezentralen Regelung von Hybridantrieben vor. Hybridantriebe stellen verteilte Energieflusssysteme dar, welche einen oder mehrere interne Freiheitsgrade aufweisen. Regelungen und Steuerungen solcher verteilter Systeme nehmen unter einer Optimalitätsforderung schnell sehr komplexe Formen an, wenn a priori zu jedem Zeitpunkt, für jeden Systemzustand und jede denkbare Fehlfunktion einzelner Subsysteme eine adäquate Systemreaktion implementiert werden soll. Hinzu kommt, dass eine Systemänderung eine äußerst aufwendige Anpassung der Regelung nach sich zieht. Aus diesem Grund werden die Steuerungen unter Verzicht auf strenge Optimalität häufig dezentral ausgelegt. Ausgezeichnete Subsysteme erhalten in diesem Fall eine lokale Steuerung. Durch Kommunikation untereinander und geschickter Auslegung der dezentralen Regeln kann ein emergentes Systemverhalten mit hinreichenden Eigenschaften bezüglich Optimalität, Robustheit und Flexibilität unter vertretbarem Aufwand implementiert werden.

Die im Folgenden vorgestellte und diskutierte Methode zur dezentralen Regelung wurde am konkreten Beispiel Hybridantrieb für Gabelstapler entwickelt, lässt sich aber prinzipiell auch auf andere geregelte und verteilte Netzwerke übertragen. Wie gezeigt werden wird, strebt das System trotz dezentraler Regelung zu jedem Zeitpunkt gegen den Zustand eines global definierten Optimums. Dabei geht in die Auslegung des lokalen Reglers nur Systeminformation der zu regelnden Instanz ein. Diese Vorgehensweise birgt den Vorteil, dass das Gesamtsystem verändert werden kann, ohne die Betriebsstrategie neu auslegen zu müssen.

2 Grundlagen Hybridantriebe

2.1 Antriebsstrang

Hybridantriebe für Fahrzeuge bestehen definitionsgemäß aus mindestens zwei unterschiedlichen Einzelantrieben und zwei unterschiedlichen Energiespeichern [UN03]. Die Motivation zum Einsatz derartiger komplexer und teurer Systeme gründet sich überwiegend in der Betriebskostensparnis, die durch die Kombination der Stärken zweier verschiedener Antriebe erwartet wird. Die eingesetzten Einzelantriebe müssen daher so miteinander kombiniert werden, dass der Energieverbrauch des Fahrzeugs gegenüber einem Vergleichbaren mit konventionellem Antrieb sinkt.

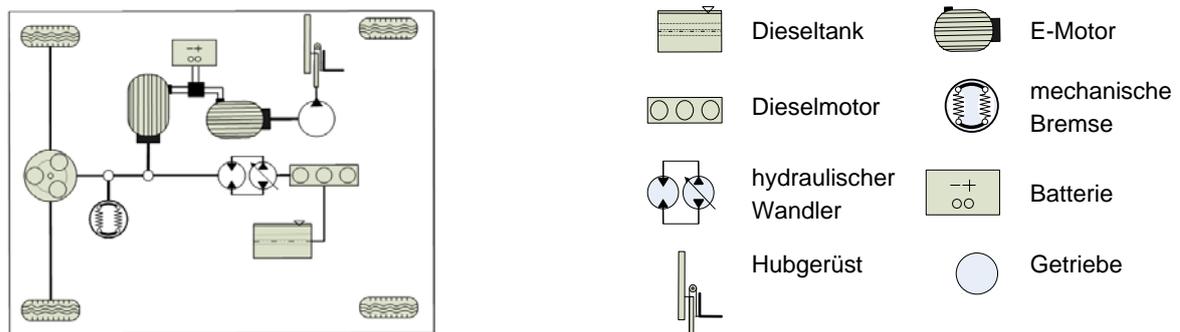


Abbildung 1: Schema des parallelen Hybridantriebes für einen Gegengewichtsstapler mit 2,5 t Tragkraft

Der im vorliegenden Beitrag als konkretes Beispiel dienende Hybridantrieb ist ein dieselektrischer Parallelhybrid mit Momentenaddition für einen Gegengewichtsstapler mit einer Tragkraft von 2,5 t (Abbildung 1). Zwischen dem Dieselmotor und dem Antriebsrad ist ein hydrodynamischer Trilokwandler angeordnet, der die Funktion einer Schaltkupplung übernimmt und als Momentwandler dient. Parallel dazu ist über ein Getriebe ein Elektromotor angeordnet, der das Fahrzeug beschleunigen oder unter Rekuperation abbremsen kann. Während die Momente der Antriebselemente am Getriebe addiert werden sind die Drehzahlen fest mit der Raddrehzahl gekoppelt. Eine mechanische Bremse kommt darüber hinaus zum Einsatz, wenn die Bremskraft des Elektromotors nicht ausreicht oder die Batterie geladen ist. Die Hubhydraulik wird durch einen zweiten E-Motor angetrieben. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Daten des Antriebsstranges zusammengefasst. Sie resultieren zum Teil aus Ergebnissen einer Optimierungsmethode für die Auslegung von Hybridantrieben für Gegengewichtsstapler, die am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik entwickelt worden ist [St07].

Tabelle 1: Fahrzeugdaten

| | | | |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Übersetzung E-Motor/Rad | $i_E = 19,4$ | Übersetzung Wandler/Rad | $i_W = 12,2$ |
| Leistung des E-Motors | $P_E = 24 \text{ kW}$ | Leistung des Dieselmotors | $P_D = 27,5 \text{ kW}$ |
| Fahrzeugmasse | $m_F = 4290 \text{ kg}$ | Radradius | $r_R = 0,306 \text{ m}$ |
| Tragkraft | $m_t = 2500 \text{ kg}$ | Rollwiderstand | $f_0 = 0,016$ |

2.2 Betriebsstrategie

Da jeder zusätzliche interne Motor des Antriebssystems einen zusätzlichen internen Betriebsfreiheitsgrad nach sich zieht, stellt sich gegenüber konventionellen Antrieben die Aufgabe der Auslegung der Betriebsstrategie. Dieser kommt die Funktion zu, die durch den Fahrer am Antriebsrad angeforderte Leistung auf die internen Motoren derart aufzuteilen, dass der Energieverbrauch minimiert wird. In nahezu allen Fällen wird diese Aufteilung durch die Nebenbedingung eingeschränkt, dass einer der Energiespeicher, sei es eine Batterie, ein Schwungrad, ein Druckspeicher oder ähnliches, eine begrenzte Kapazität aufweist. Insbesondere besitzt ein Parallelhybrid, der aus zwei mechanisch gekoppelten Motoren, die gleichzeitig auf das Antriebsrad wirken, besteht, einen Freiheitsgrad.

Die Betriebsstrategie hat zur Aufgabe, für ein gegebenes Geschwindigkeitsprofil bzw. Belastungsprofil einen zeitlichen Verlauf für die Leistungsteilung zu finden, so dass der Kraftstoffverbrauch minimiert wird. Da die Batterie im Gegensatz zum Kraftstofftank über einen begrenzten Energieinhalt verfügt und ein Vergleich zu konventionellen Antrieben gewährleistet werden soll, wird darüber hinaus gefordert, dass der Ladezustand der Batterie zum Ende eines vorgegebenen Fahrmanövers genauso hoch ist wie zu Beginn. Es ergibt sich dadurch ein sogenanntes Optimalsteuerungsproblem der Form

$$\int_0^{t_e} \dot{m}_{K_T}(u(t), \omega_R, M_R) dt = \min! \quad (1)$$

NB: $q(t = 0) = q(t = t_e)$

Hierbei stellt m_{K_T} den aktuellen Kraftstoffverbrauch, $0 \leq q \leq 1$ den relativen Ladezustand der Batterie und ω_R und M_R die Drehzahl bzw. das Moment des Antriebsrades dar. Der gesuchte Freiheitsgrad wird durch die Leistungsteilung $u(t)$ repräsentiert, die das Verhältnis der abgegebenen Leistung des Elektromotors zu der des Verbrennungsmotors repräsentiert.

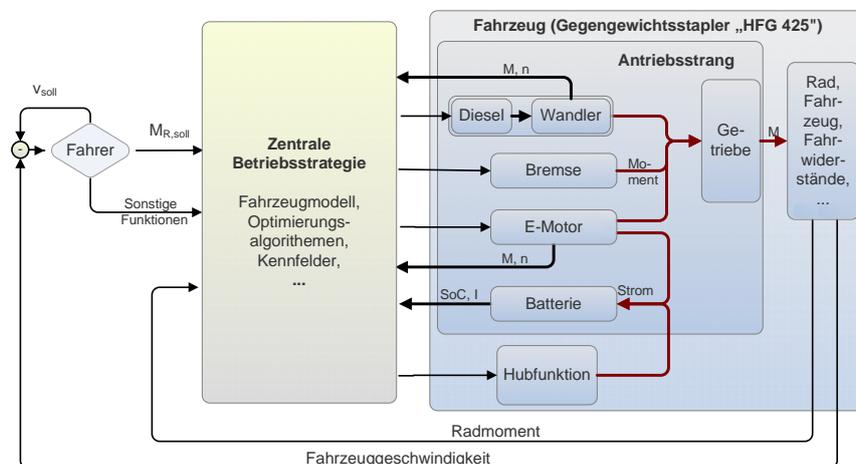


Abbildung 2: Struktur Paralleler Hybridantrieb mit zentraler Betriebsstrategie

Im Allgemeinen ist (1) nicht praktikabel bzw. online implementierbar, da der gesuchte optimale zeitliche Verlauf der Leistungsteilung auch von zukünftigen Ereignissen abhängt. Das unter Anwendung der dynamischen Programmierung lösbare Optimierungsproblem kann jedoch als Benchmark für online implementierbare Betriebsstrategien dienen.

In den letzten Jahren ist eine äußerst große Vielfalt an Lösungsansätzen für online implementierbare Betriebsstrategien publiziert worden [GS07]. Allen gängigen Betriebsstrategien gemeinsam ist dabei ihr zentraler Charakter. Abbildung 2 zeigt die prinzipielle Struktur einer Betriebsstrategie für den oben vorgestellten dieselektrischen Gegengewichtstapler. Aufgrund des zusätzlichen Freiheitsgrades fungiert sie als Mittler zwischen dem Fahrer, der lediglich ein Fahrsignal gibt, und dem Antriebstrang, der zwei Fahrsignale erhält. Aufgrund von aktuellen Messdaten über den Systemzustand sowie detaillierter Fahrzeugmodelle wird die Entscheidung bezüglich des Leistungssplit fortlaufend neu getroffen. Die internen Fahrzeugmodelle können verschiedene Detaillierungsgrade aufweisen. Je höher die Anforderungen an die Kraftstoffersparnis dabei sind, desto genauer müssen die Fahrzeugmodelle ausgearbeitet sein. Andererseits wächst dadurch der Änderungsaufwand des Fahrzeugmodells, wenn des Antriebssystems geändert werden.

2.3 Benchmark der Betriebsstrategie - Dynamische Programmierung

Die dynamische Programmierung hat sich in zahlreichen Fällen bewährt, um für ein gegebenes Fahrprofil den optimalen zeitlichen Verlauf der Leistungsabgabe der einzelnen Motoren eines Hybridantriebes zu bestimmen. Ihr wesentlicher Vorteil ist der im Vergleich zur direkten numerischen Lösung des nichtlinearen Problems stark reduzierter Rechenaufwand. Sie kann zwar nicht zur Echtzeitsteuerung des Systems angewandt werden, liefert aber hervorragende Ergebnisse, die im Vergleich mit online implementierbaren Betriebsstrategien als Benchmark dienen können.

Die dynamische Programmierung basiert auf dem Bellman'schen Optimalitätsprinzip und der daraus abgeleiteten Rekursionsformel [Be-57]. Es stellt sich dabei die Frage, wie man ein dynamisches System optimal von einem gegebenen Anfangszustand z_0 in einen gegebenen Endzustand z_n in einer vorgegebenen endlichen Anzahl n an Schritten u_k mit $z_k = p_k(z_{k-1}, u_k)$ und $k = 1, \dots, n$ überführen kann. Gibt es eine optimale Folge von Zuständen $z_0, z_1^*, \dots, z_{n-1}^*, z_n$, die die Kostenfunktion

$$S^*(z_0, z_n) = \sum_{k=1}^n s_k(z_{k-1}^*, u_k^*) \rightarrow \min \quad (2)$$

für den Systemübergang von z_0 nach z_n minimiert und die Nebenbedingungen $z_k \in Z_k$ und $u_k \in U_k(z_{k-1})$ erfüllt, dann ist entsprechend dem Optimalitätsprinzip von Bellman jede Teilfolge $z_\alpha^*, z_{\alpha+1}^*, \dots, z_{\beta-1}^*, z_\beta^*$ mit $0 > \alpha > \beta \geq n$ bezüglich des Zustandsübergangs von $z_{\alpha-1}^*$ zu z_β^* unter den gleichen Nebenbedingungen ebenfalls optimal. Unter Ausnutzung dieser Eigenschaft kann in absteigender Folge, ausgehend vom Zielzustand n , die optimale Folge mit Hilfe der Rekursionsformel

$$S^*(z_{k-1}^*, z_n) = \min_u \{s_k(z_{k-1}, u_k) + S^*(p_k(z_{k-1}, u_k), z_n) | u_k \in U_k(z_{k-1})\} \quad (3)$$

bestimmt werden.

Die Methode eignet sich sehr gut, um den optimalen Leistungssplitverlauf für einen gegebenen Hybridantrieb und ein gegebenes Fahrprofil zu ermitteln [KKJ⁺05]. Zu diesem Zweck werden die Zeit $t_k = k \frac{T}{n}$ mit $k = 0, \dots, n$ und der Endzeit T und der Batterieladezustand $q_l = l \frac{Q}{m}$ mit $l = 0, \dots, m$ und dem maximalen Batterieladezustand Q in hinreichend kleine Intervalle diskretisiert. Die Kostenfunktion wird dann durch den Kraftstoffverbrauch dargestellt, der Batterieladezustand entspricht dem Zustand z des Systems und die Variable u repräsentiert den Leistungssplit der beteiligten Motoren.

3 Dezentrale Betriebsstrategie

3.1 Dezentraler Optimaler Regler – Zerlegung paralleler Komponenten

Betrachtet man ein Optimierungsproblem der Form

$$F(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \rightarrow \min \quad (4)$$

$$NB: g(x_1, \dots, x_n) = \bar{x} - \sum_{i=1}^n x_i = 0$$

so lässt sich unter Verwendung Lagranger Multiplikatoren zeigen, dass in der Lösung des Optimierungsproblems gilt

$$\frac{df_k}{dx_k} = \frac{df_j}{dx_j} \quad (k, j = 1, \dots, n) \quad (5)$$

Dieser Zusammenhang kann zur Auslegung einer dezentralen optimalen Regelung für Hybridantriebe genutzt werden, wenn man die abgegebene Leistung der einzelnen Motoren des Antriebsystems $P_{m,i}$ mit den Variablen x_i und die vom Betriebspunkt abhängige Verlustleistung $P_{V,i}$ der einzelnen Motoren mit f_i gleichsetzt. In diesem Fall stellt die in der Nebenbedingung enthaltene Konstante \bar{x} die durch den Fahrer vorgegebene Sollleistung am Rad dar. Alternativ zur Besetzung der Funktionen f_i mit den Motorverlustleistungen können diese auch mit den jeweiligen Eingangsleistungen besetzt werden, da die Minimierung der Verlustleistung bei vorgegebener Ausgangsleistung äquivalent zur Minimierung der Eingangsleistung ist. Unter Anlehnung an den Zusammenhang (5) wird dann der Korrekturterm

$$c = \left(\frac{\partial P_e}{\partial P_m} \right)_\kappa \quad (6)$$

definiert [FB10]. Die Ableitung der Eingangsleistung P_e eines Motors nach dessen mechanischer Ausgangleistung P_m wird dabei unter „festhalten“ aller festen, von außen vorgegebenen, Zustandsvariablen κ gebildet. Für Motoren kommen dabei in

der Regel die Rotationsgeschwindigkeit ω und das Motormoment M in Frage, da diese beiden Zustandsvariablen über den Wirkungsgrad $\eta(\omega, M) = P_m/P_e$ maßgeblich den Zusammenhang von Eingangsleistung und Ausgangsleistung bestimmen. Insbesondere ist im Fall eines wie oben beschriebenen Parallelhybridantriebes mit Momentenaddition das Moment die freie Variable, da die Rotationsgeschwindigkeit durch die Raddrehzahl fest vorgegeben ist. Unter festhalten der Rotationsgeschwindigkeit führt (6) damit zu

$$c = \eta^{-1} + M \frac{\partial \eta^{-1}}{\partial M} \quad (7)$$

und somit zu einer Definition eines Korrektorterms c , der verwendet werden kann, um den Hybridantrieb dezentral und dennoch optimal zu regeln.

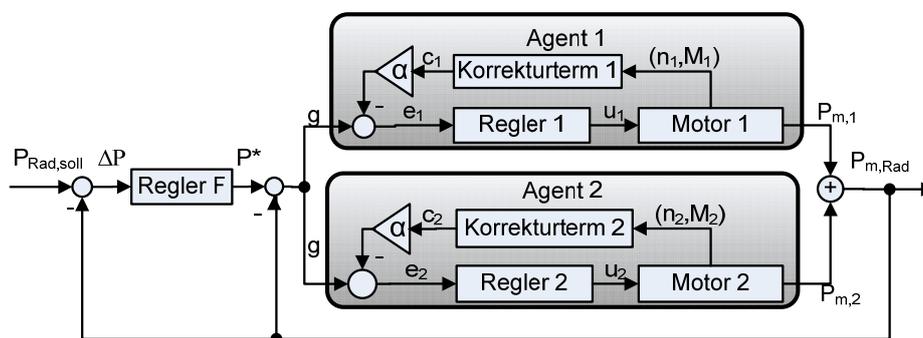


Abbildung 3: Reglerstruktur der dezentralen optimalen Regelung

Die konkrete Umsetzung dieser Vorgehensweise wird in Abbildung 3 deutlich. Dargestellt ist schematisch ein Parallelhybrid mit den Motoren 1 und 2, deren mechanische Ausgangsleistung sich über ein Getriebe zur Radausgangsleistung addiert. Über den Gesamtfahrzeugregler F wird die tatsächliche Radleistung auf die vom Fahrer vorgegebene Sollradleistung eingeregelt. Dies und ein weiterer Vergleich des Reglerausganges von F mit der Radleistung ist trotz der beiden lokalen Motorregler 1 und 2 notwendig, da der Eingang g aufgrund der Korrektortermine eine bleibende Regelabweichung aufweist. Bei adäquater Auslegung der beteiligten Einzelregler verschwindet sowohl die Leistungsdifferenz ΔP , wodurch die Nebenbedingung in (4) des oben vorgestellten Optimierungsproblems erfüllt ist, als auch die Eingänge der beiden lokalen Motorregler e_1 und e_2 . Daraus lässt sich aber wiederum folgern, dass die beiden Korrektortermine c_1 und c_2 gleich groß sind, die Bedingung (5) dadurch erfüllt und die Summe der Eingangsleistungen respektive der dissipierten Leistungen der beiden Motoren dementsprechend minimiert ist.

3.2 Zerlegung serieller Komponenten – Batterie und Elektromotor

Der dezentrale Regler aus dem oberen Abschnitt berücksichtigt das Batterielademanagement noch nicht. Um dieses zu implementieren, kann zunächst davon ausgegangen werden, dass einer der Motorblöcke aus Abbildung 3 sowohl den Elektromotor selbst als auch die Batterie umfasst. Die zugehörige Modelvorstellung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die dezentrale Implementierung des

Batterielademanagements erfolgt nun in zwei Schritten. Zunächst wird der kombinierte Korrektorterm in zwei voneinander unabhängige Korrektortermine jeweils für den Motor und die Batterie zerlegt. Anschließend wird ein vom Ladezustand abhängiger virtueller Batteriewirkungsgrad eingeführt, über den das Systemverhalten derart gesteuert werden kann, dass der Batterieladezustand jederzeit innerhalb vorgegebener Grenzen bleibt.

Die Batterie (Abbildung 4) ist durch einen reinen chemischen Energiespeicher und einen Energiewandler modelliert, der die chemisch gespeicherte Energie unter Verlust in elektrische Energie wandelt und umgekehrt. Darüber hinaus ist eine Abzweigung elektrischer Leistung modelliert, die durch Nebenverbraucher wie z.B. die Hubfunktion bedingt ist. Der Korrektorterm für diesen kombinierten Block aus Batterie und E-Motor, der die Summe der dissipierten Leistungen berücksichtigt, berechnet sich aus der Ableitung der chemischen Leistung der Batterie nach der mechanischen Leistung des E-Motors.

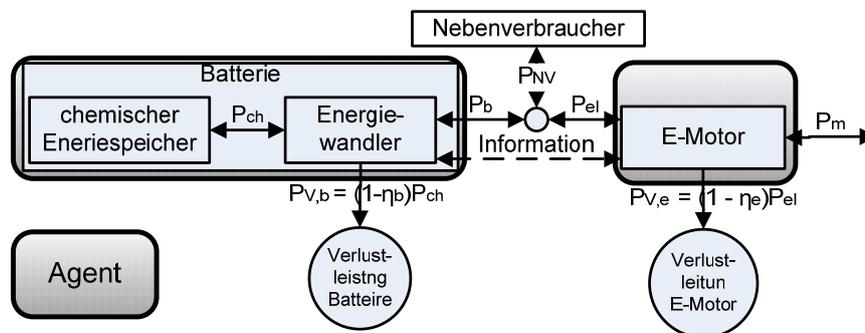


Abbildung 4: Batterie und E-Motor

Bezüglich der Zerlegung des Gesamtkorrekturterms $c_{m/b} = (\partial P_{ch}/\partial P_m)_\kappa$ lässt sich zeigen [Fr-10], dass sich dieser unabhängig von der Leistung der Nebenverbraucher P_{NV} als Produkt der beiden Einzelkorrektortermine für die Batterie $c_b = (\partial P_{ch}/\partial P_b)_\kappa$ und den Motor $c_m = (\partial P_{el}/\partial P_m)_\kappa$ darstellen lässt. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Spannung der Batterie konstant ist und unter der Annahme ‚Hybridantrieb mit Momentaddition‘ ergibt sich mit dem Batteriestrom I_b weiterhin

$$c_{m/b} = c_m \cdot c_b = \left(\eta_e^{-1} + M \frac{\partial \eta_e^{-1}}{\partial M} \right) \cdot \left(\eta_b^{-1} + I_b \frac{\partial \eta_b^{-1}}{\partial I_b} \right) \quad (8)$$

Damit lässt sich die Verlustleistung der Batterie zunächst unabhängig von der des Elektromotors betrachten.

3.3 Dezentrales Batteriemangement

Das für den zweiten Schritt angekündigte Batteriemangement lässt sich nun zunächst als These durch

$$\eta_b = \eta_{b,r}(I_b) \cdot \eta_{b,v}(q_b) \quad (9)$$

das Produkt des vom Batteriestrom abhängigen realen Wirkungsgrad $\eta_{b,r}$ und einem vom Batterieladezustand q_b abhängigen virtuellen Wirkungsgrad $\eta_{b,v}$ darstellen. Zur Darstellung des virtuellen Batteriewirkungsgrades kann die Eigenschaft des Systems ausgenutzt werden, zu jeder Zeit gegen den Betriebspunkt mit dem geringsten Energieverlust zu streben. Da Aufgrund von (8) nun die Summe der Verlustleistungen des Verbrennungsmotors, des E-Motors und der Batterie minimiert wird, reicht es aus, dem System einen hohen Batteriewirkungsgrad für gewünschte Batteriezustände und umgekehrt eine besonders schlechten Batteriewirkungsgrad für ungewünschte Batteriezustände vorzugeben. Dazu können zunächst sechs verschiedene Batteriezustände definiert und bewertet werden (Tabelle 2). Jedem Batteriezustand wird dann eine virtuelle Verlustleistung zugeordnet, die gegen negativ unendlich für gewünschte Zustände und positiv unendlich für ungewünschte Zustände strebt.

Tabelle 2: Batteriezustände und deren Bewertung

| | Batterieladezustand $q = 0..1$ | relative Batterieleistung $\rho = P_b/ P_{b,max} $ | Bewertung | virtu. Verlustleistung $\gamma = P_{V,b}/ P_{b,max} $ |
|---|-----------------------------------|---|-------------|--|
| 1 | $q = 1$ | $\rho = 1$ | gewünscht | $\gamma \rightarrow -\infty$ |
| 2 | $q = 1$ | $\rho = -1$ | ungewünscht | $\gamma \rightarrow \infty$ |
| 3 | $q = 0$ | $\rho = 1$ | ungewünscht | $\gamma \rightarrow \infty$ |
| 4 | $q = 0$ | $\rho = -1$ | gewünscht | $\gamma \rightarrow -\infty$ |
| 5 | $q = 0.5$ | $\rho = -1..1$ | neutral | $\gamma = 0$ |
| 6 | $q = 0..1$ | $\rho = 0$ | neutral | $\gamma = 0$ |

Für die Verlustleistung der Batterie kann dann der Zusammenhang $\gamma = \rho(0.5 - q)/[q(1 - q)]$ dienen, der auf eine batterieleistungsunabhängige Form für den virtuellen Wirkungsgrad führt.

$$\eta_{b,v}(q) = (q - q^2)(0,5 - q^2)^{-1} \quad (10)$$

Im Gegensatz zu der Zerlegung des Antriebsstranges in die Einzelkomponenten, bei der ein lokales und momentanes Energieoptimum sichergestellt ist, ist die Optimalität über einem Fahrprofil bei diesem Ansatz nicht sichergestellt. Die Güte des gewählten Ansatzes kann aber im Vergleich mit einem durch die dynamische Programmierung ermittelten optimalen Fahrprofil bewertet werden.

3.4 Zusammenfassung

Die Regelung des in Abbildung 1 dargestellten Hybridantriebes mit der so entwickelten Methode bedarf der drei Einzelregler für die Bremse, den Dieselmotor und den Elektromotor. Die Hubfunktion ist als Nebenverbraucher (siehe Abbildung 4) bereits integriert. Basierend auf den obigen Ergebnissen werden dann die Korrektortermine für die einzelnen Regler

$$c_{d/t} = \eta_{d/t}^{-1} + M_W \frac{\partial \eta_{d/t}^{-1}}{\partial M_W} \quad (11)$$

$$c_{m/b} = c_m \cdot c_b \cdot \eta_{b,v}^{-1} \quad (12)$$

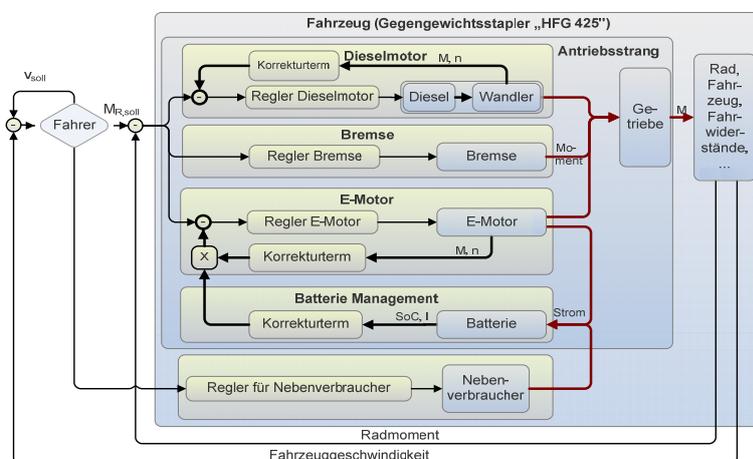


Abbildung 5: Gesamtfahrzeugregler der dezentralen optimalen Reglerstruktur

Der Korrektortermine für die Dieselmotor/Trilokwandler Einheit $c_{d/t}$ wird mittels des kombinierten Wirkungsgrades $\eta_{d/t}$ und des Ausgangsmomentes des Trilokwandlers M_W gebildet. Da die Eingangsleistung der Bremse zu jedem Zeitpunkt null ist, ist auch die Ableitung der Eingangsleistung und dementsprechend der

Bremskorrektortermine zu jedem Zeitpunkt null. Die so erhaltene dezentrale und optimale Fahrzeugreglerstruktur ist in Abbildung 5 dargestellt.

4 Vergleich der dezentralen Regelung mit dem optimalen Ergebnis

Im Folgenden wird der zeitliche Verlauf der Leistungsteilung der beiden Motoren eines parallelen Hybridantriebes, der sich durch die vorgestellte dezentrale optimale Betriebsstrategie einstellt, mit der optimalen Lösung, die mithilfe der dynamischen Programmierung ermittelt worden ist, verglichen. Der zugehörige Geschwindigkeitsverlauf des Fahrzeugs ist dem standardisierten Arbeitsspiel für Flurförderzeuge der Norm VDI 2198 [VD02] entnommen.

4.1 Fahrprofil

Das Arbeitsspiel setzt sich aus einer vorgegebenen Fahrtstrecke zwischen zwei 30 m voneinander entfernten Punkten A und B zuzüglich eines Wendevorganges und einem Hubvorgang mit Nennlast im Stillstand zusammen und wird 120-mal in einer Stunde durchgeführt. Da die benötigte Leistung für den Hubvorgang im Stillstand

aufgrund der Antriebsstrangarchitektur (Abbildung 1) lediglich der Batterie entspringt, befindet sich das Fahrzeug nur während der Fahrt im hybriden Betriebszustand. Die Simulation bezieht sich daher nur auf die ersten 16,7 s des Arbeitsspiels in denen sich das Fahrzeug bewegt. Die Batterie muss in dieser Zeit um genau den Betrag zusätzlich geladen werden, der für den Hubvorgang benötigt wird. Voruntersuchungen mit einem konventionellen Stapler auf Experiment- und Simulationsbasis haben ergeben, dass bei einer Nettohublast von 2,5 t auf eine Hubhöhe von 2 m inklusive Energierückgewinnung beim Senken ca. 61 kJ aufgebracht werden müssen. Dies ist gleichzusetzen mit einer zusätzlichen

Batterielastung von etwa 3,65 kW während der simulierten 16,7 s Fahrtzeit. Am Ende des Fahrprofils, nach dem abgeschlossenen Hubvorgang, ist dann der Batterieladezustand genauso hoch wie zu Beginn. Um Energie zu sparen sei in den Antriebsstrang eine Start-Stopp-Automatik implementiert, sodass der Verbrennungsmotor abgeschaltet ist während das Fahrzeug steht. Da die

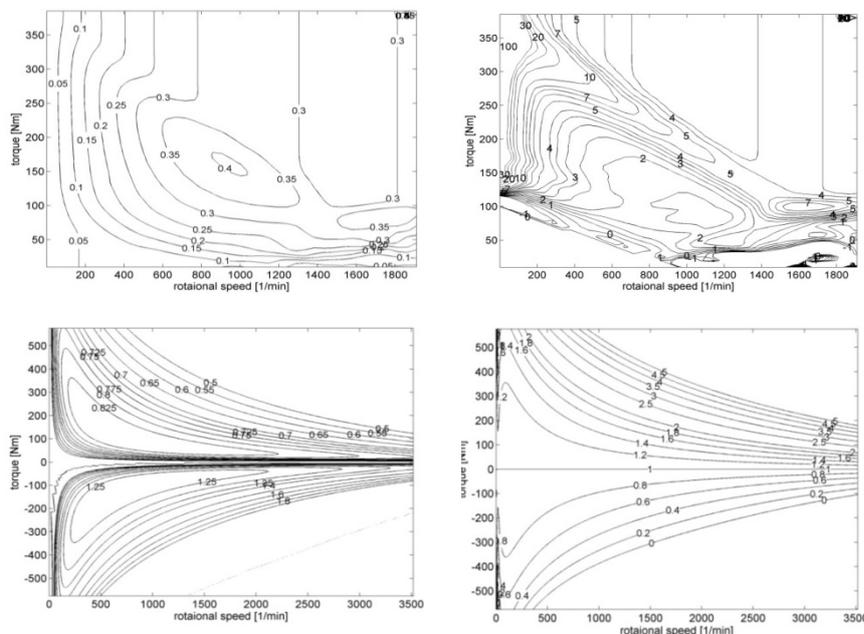


Abbildung 6: Oben links: Wirkungsgradkennfeld VKM/Wandler; oben rechts: Korrektorkennfeld VKM/Wandler; unten links: Wirkungsgradkennfeld E-Motor; unten rechts: Korrektorkennfeld E-Motor

Fahrtrichtung bei Staplern lediglich durch ein internes Wendegetriebe vorgegeben wird ist es für den Antriebsstrang irrelevant, ob der Stapler vorwärts oder rückwärts fährt. Zur Vereinfachung wurde die Rückwärtsbewegung des Staplers im gewählten Fahrprofil nach VDI 2198 durch eine Vorwärtsfahrt ersetzt.

4.2 Simulationsmodell

Der in 2.1 vorgestellte parallele Hybridantrieb dient als Basis. Dazu ist ein dynamisches Simulationsmodell des Fahrzeugs in Matlab-Simulink implementiert worden. Für die Einzelkomponenten Verbrennungsmotor, Trilokwandler, Getriebe, Hubhydraulik, Bremse und Fahrzeug standen bereits validierte Teilmodelle in Simulink zur Verfügung, die einem Simulationsmodell eines Gegengewichtsstaplers mit konventionellem Antrieb entnommen wurden. Das Modell für die Batterie basiert auf einer Reihenschaltung eines konstanten ohmschen Widerstandes und einer konstanten Spannungsquelle von 80 V sowie eines konstanten

Batterieladewirkungsgrades von 90 %. Der Elektromotor ist mithilfe eines Wirkungsgradkennfeldes für die Motorverluste modelliert.

Die Verluste der zum Motor gehörenden Leistungselektronik sind in das Motorkennfeld integriert. Zusammen mit dem kombinierten Wirkungsgradkennfeld von Verbrennungsmotor und Trilokwandler bilden die beiden Antriebseinheiten die Hauptverlustquellen des Antriebsstranges. Die beiden Wirkungsgradkennfelder sind zusammen mit den entsprechend Gleichung (7) ermittelten Korrektorkennfelder in Abbildung 6 dargestellt.

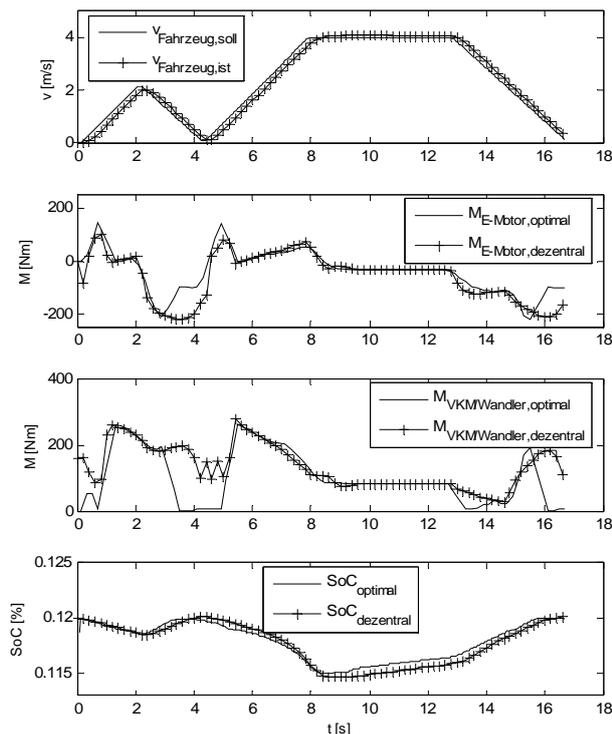


Abbildung 7: Vergleich der Ergebnisse der dynamischen Programmierung mit der dezentralen Regelung (oben: Geschwindigkeitsprofil soll und ist; 2. v. oben: Momentverlauf des Elektromotors; 3. v. oben: Momentverlauf des Trilokwandlers; unten: Batterieladezustand)

Die Reglerstruktur des Fahrzeugs ist so gewählt wie in Abbildung 5 dargestellt. Die Korrektortermine werden entsprechend den Gleichungen (11) und (12) bestimmt. Dabei können die Werte für die beiden Motoren und die Batterie mit Hilfe von Kennfeldern implementiert werden. Die Regler für die Motoren und die Bremse werden durch PI-Regler mit drehzahlabhängiger Drehmomentbegrenzung dargestellt. In der Regelung des Verbrennungsmotors kommt darüber hinaus eine Feedback-Linearisierung für das kombinierte Übertragungsverhalten von Motor und Trilokwandler zum Einsatz. Dadurch können die einzelnen Regler im dezentralen Sinne unabhängig voneinander ausgelegt werden. Der Fahrer ist über eine Vorsteuerung des Radmomentes und einen PID-Regler realisiert. Für die Ermittlung des optimalen Fahrprofils mit Hilfe der dynamischen Programmierung wurde

das Simulationsmodell des Hybridstaplers stark vereinfacht als statisches Modell [Gu07] und mit einem verschwindenden Batterieinnenwiderstand implementiert. Die Rechenzeit konnte damit trotz einer relativ feinen Diskretisierung von $\Delta t = 0,05 \text{ s}$ und $\Delta q = 5 \cdot 10^{-5}$ auf etwa 4 Stunden mit einem handelsüblichen PC gesenkt werden.

4.3 Simulationsergebnisse

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der dynamischen Programmierung mit denen der dezentralen Regelung im Vergleich. Es zeigt sich eine äußerst hohe Übereinstimmung zwischen der optimalen Lösung mit dem für dieses Fahrmanöver geringsten Kraftstoffverbrauch und dem Ergebnis der dezentralen Regelung.

Insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten zwischen der 5. und der 13. Sekunde ist die Leistungsteilung nahezu identisch. Demgegenüber steht die äußerst simple und hochflexible Reglerauslegung entsprechend Abbildung 5. Trotz der guten Ergebnisse ist hier kein zusätzliches Fahrzeugmodell notwendig. Die Ergebnisse untermauern damit das Potential der dezentralen optimalen Regelung einerseits und andererseits lässt sich der gewählte Ansatz für das dezentrale Batterielademanagement entsprechend (10) begründen.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag konnte gezeigt werden, wie die Regelung und das Batterielademanagement für einen Hybridantrieb dezentral ausgelegt werden kann. Dabei fließen bei der Auslegung einer Regelungskomponente für einen Motor des Antriebs keinerlei Informationen über den Rest des Systems wie Getriebe, Fahrzeug, Batterieeigenschaften oder weitere Motoren ein. Weiterhin konnte gezeigt werden wie es trotz des dezentralen Charakters der Regelung möglich ist, dass das System zu jedem Zeitpunkt gegen den internen Zustand mit dem globalen Wirkungsgradoptimum konvergiert. Schließlich konnte gezeigt werden, wie mit Hilfe eines dezentralen Ansatzes für das Batterielademanagement auch ein sehr guter Leistungsplitverlauf für ein gegebenes Fahrprofil implementiert werden kann, sodass der Batterieladezustand stets zwischen zwei vorgegebenen Grenzen gehalten wird. Da das Grundproblem (4) sehr allgemein gehalten ist, lässt sich der Ansatz nicht nur auf weitaus komplexere Antriebsstrukturen anwenden, sondern auch auf andere Regelungsaufgaben für verteilte Netzwerke mit internen Freiheitsgraden.

Literatur

- [Be57] Bellmann, R. E.: Dynamic Programming. Princeton: Princeton University Press, 1957.
- [FB10] Frenkel, A.; Bruns, R.: Decentralized optimal control strategy for parallel hybrid electric vehicles. VDI Berichte 2081, 2010.
- [GS07] Guzzella, L., Sciarretta, A.: Vehicle Propulsion Systems – Introduction to Modeling and Optimization. Berlin: Springer, 2007.
- [KKJ⁺05] Koot, M. W. T.; Kessels, J. T. B. A.; De Jager, A. G.; Heemels, W. P. M. H.; Van den Bosch, P. P. J.; Steinbuch, M.: Energy management strategies for vehicular power systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54 (3):771-782, 2005.
- [St07] Steiger, S.: Entwicklung eines innovativen hybriden Antriebssystems für Flurförderzeuge. Hamburg: HSU, Dissertation, 2007.
- [UN03] Reg. 83 - Rev.3: Emission of pollutants according to engine fuel requirements; by UN Economic Commission for Europe, 2003.
- [VD02] VDI 2198: Typenblätter für Flurförderzeuge. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2002.