

Masterarbeit

Erweiterung und Echtzeitimplementierung einer linearen optimalen Schaltstrategie für Hybridfahrzeuge

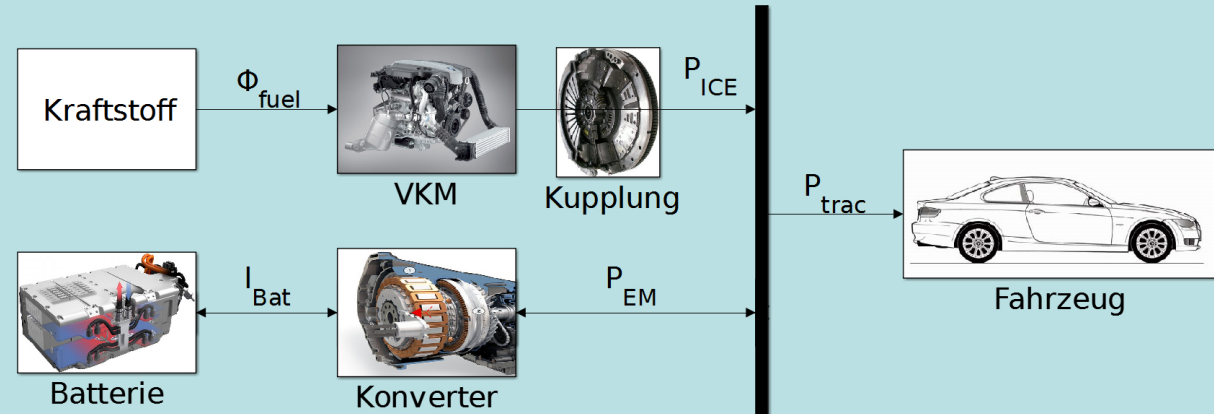
Autor: Sebastian Hahn

Betreuer: Luigi del Re
Harald Waschl

Fertiggestellt: Jänner 2015

Kurzfassung

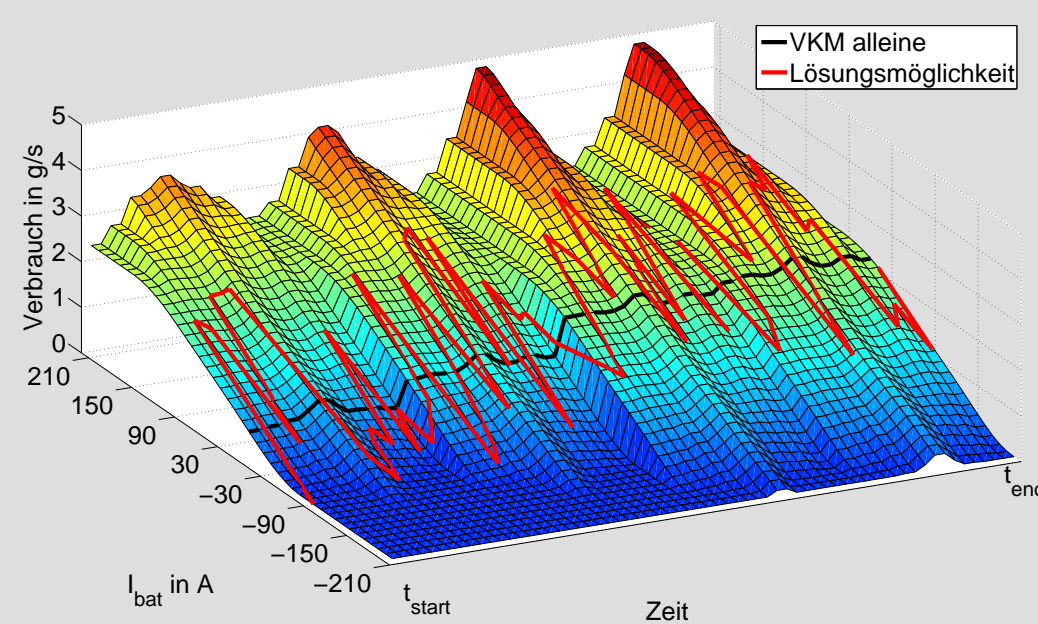
Seit dem letzten Jahrzehnt werden von der Automobil-Industrie zunehmend Hybridfahrzeuge (HEV - hybrid electric vehicle) eingeführt, da diese, abhängig vom System-Setup und Anwendung, wesentliche Verbesserungen vor allem im Bereich des Kraftstoffverbrauchs ermöglichen. Um dabei eine hohe Effizienz zu erreichen stellt sich das nicht-triviale Problem der optimalen Leistungsaufteilung zwischen den beiden Leistungsquellen im Hybridfahrzeug.



In Hinblick auf die Implementierbarkeit auf einem Echtzeitsystem wurde in dieser Arbeit mit der Idee einer zweistufigen Optimierung in Form von LP bzw. MILP die Aufgabe der Leistungsaufteilung unter dem Aspekt den Kraftstoff $\phi(x, t)$

zu reduzieren, umgesetzt. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Schalt-Strategien zu gewährleisten ist eine Nebenbedingung der Optimierung, dass die Batterieladung (SoC-state of charge) am Ende des Fahrzyklus dem Startwert entspricht. Die Strategie berücksichtigt dabei ebenfalls die Auskuppel- bzw. Start-Stop-Möglichkeit der VKM. Um einen eventuellen Model-Plant-Mismatch und Nichtlinearitäten des realen Systems zu kompensieren wurde eine Receding-Horizon Strategie, mit dem aktuellen SoC als Rückführung, für eine Schätzung des zukünftigen Leistungswunsches am Antriebsstrang eines kurzen Horizonts, implementiert.

Problemstellung



Optimierungsaufgabe:

$$\min_x \int_{t_{start}}^{t_{end}} \phi(x, t) dt$$

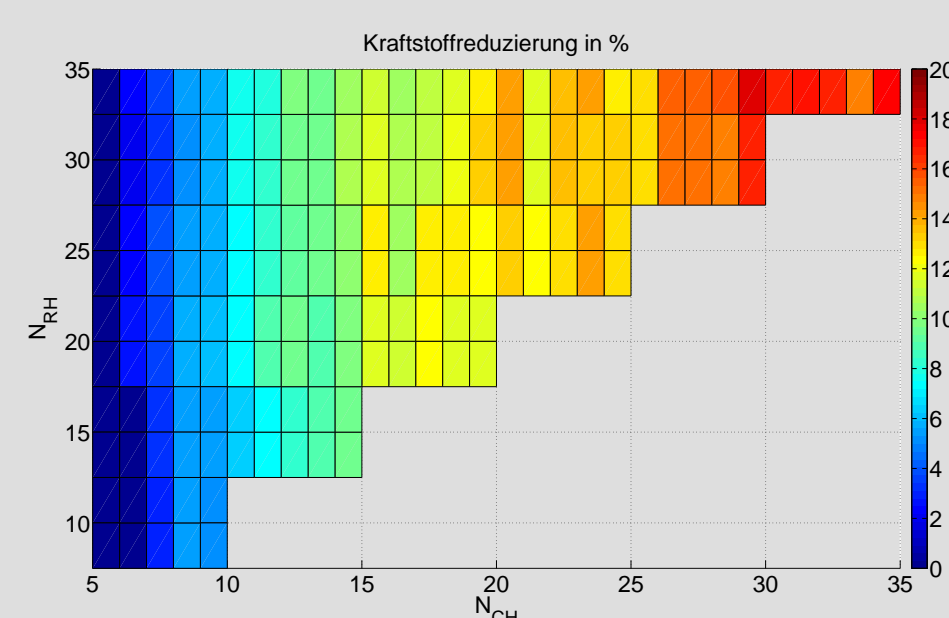
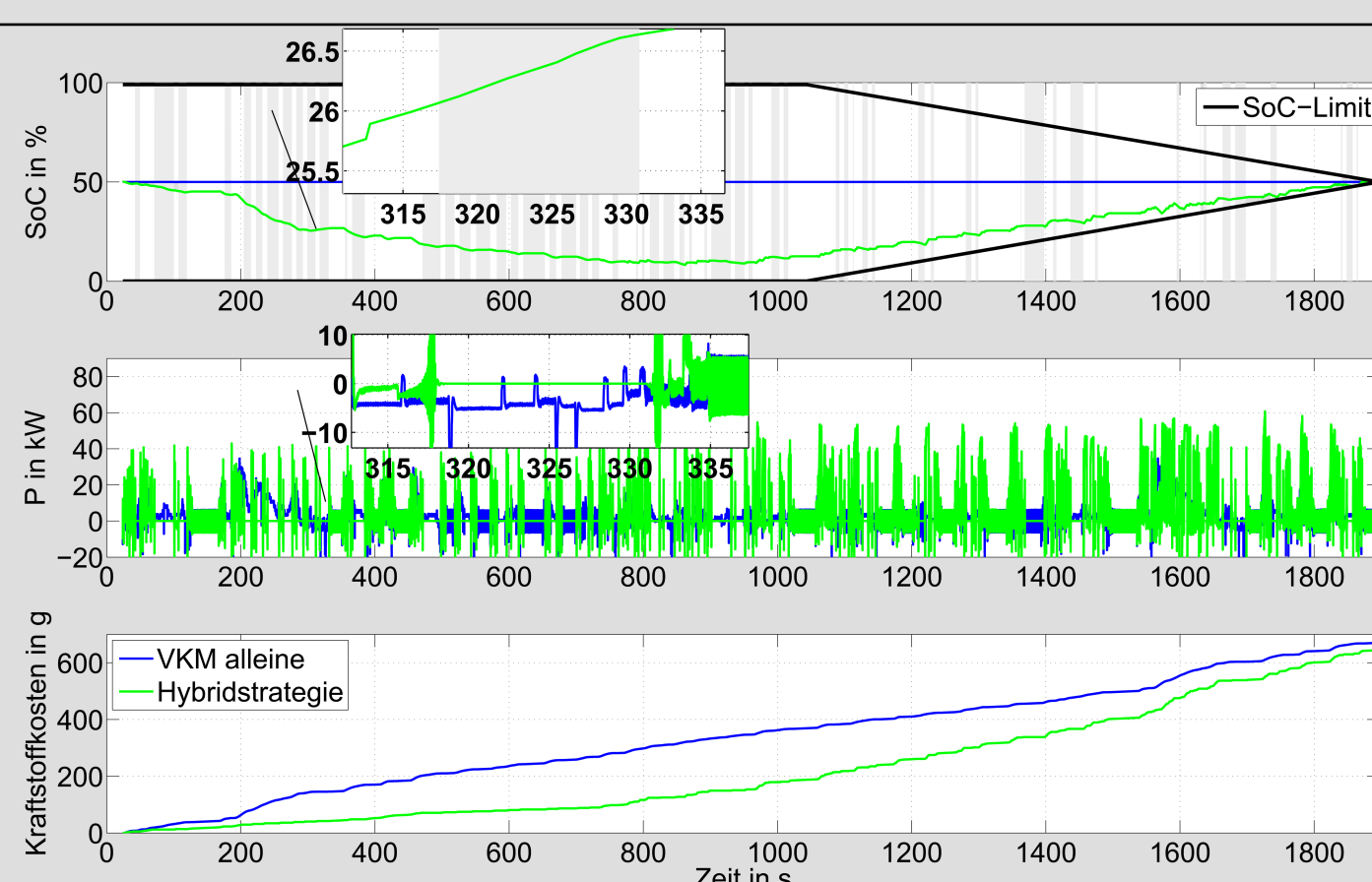
$$P_{trac} = P_{ICE} + P_{EM}$$

$$SoC(t_{start}) = SoC(t_{end})$$

Die obere Abbildung zeigt beispielhaft den Kraftstoffverbrauch über einen bekannten Fahrzyklus in dem Zeitintervall $[t_{start}; t_{end}]$. Dabei sind die Kostenfunktionen zu jedem Zeitpunkt über die Batterieleistung^a aufgetragen. Ziel ist es nun, den integralen Kraftstoffverbrauch über die Gesamtzeit zu minimieren. Dabei muss der Leistungswunsch am Antriebsstrang durch die Kombination der beiden Leistungsquellen der VKM (P_{ICE}) und des elektrisch-mechanischen Zweiges (P_{EM}) garantiert werden. Ebenso soll die Batterieladung (SoC) am Ende des Zyklus wieder dem Anfangswert entsprechen. Dies ergibt eine nicht-konvexe Optimierungsaufgabe.

^amit $P_{bat} > 0$ als Leistungsaufnahme und $P_{bat} < 0$ als Leistungsabgabe der Batterie

Ergebnisse



- Simulationsergebnisse für die Variation der Horizonte der Receding Horizon Strategie

	SoC_{end}	f_{rel}
Simulation		
RH-Ansatz	49.99%	5.6%
$N_{RH} = 15$	Prüfstandsergebnisse	
$N_{CH} = 10$	50.22%	4.83%

Lösungsansatz

Das Problem der Eindeutigkeit der optimalen Lösung wurde mittels einer 2-stufigen Optimierung gelöst. In Hinblick auf die Implementierbarkeit am Prüfstand wurden hier LP bzw. MILP aufgrund der vergleichsweise geringen Berechnungszeit gewählt.

Lösungsalgorithmus:

$$\min_x \int_{t_{start}}^{t_{end}} \phi(x, t) dt$$

grobe Diskr.

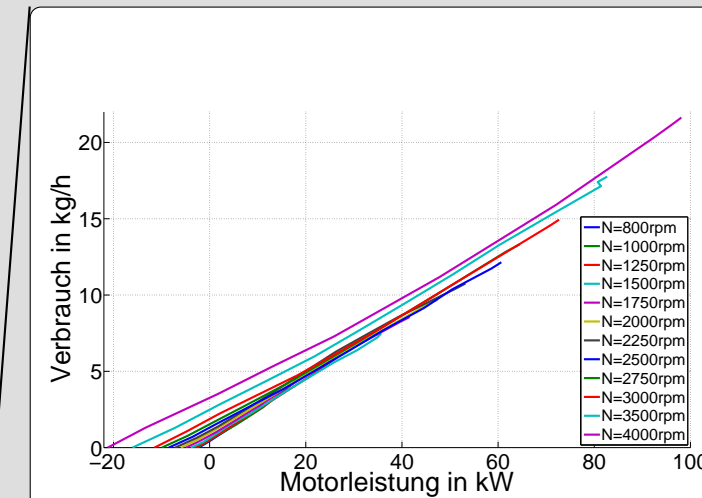
LVL1-Optimierung

feine Diskr.

LVL2-Optimierung

Zeitvektor \tilde{t}_j

Sollwertgenerierung für x



$$\phi(P_{ICE}) \rightarrow \phi \approx c_{0,i} + c_i \delta_i$$

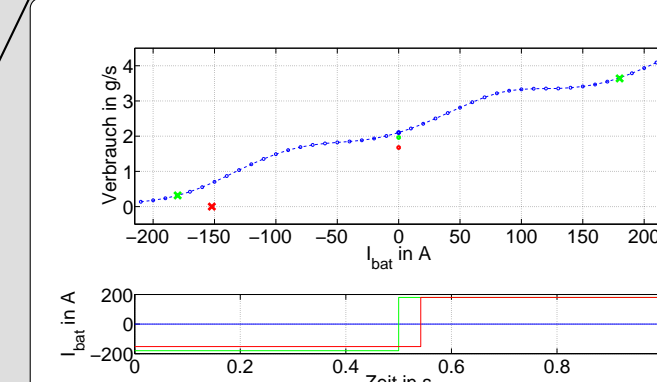
LP-Formulierung:

$$\min_{\delta_i} \sum (c_{0,i} + c_i \delta_i)$$

$$\sum \delta_i = \Delta Q$$

$$\delta_{min}(\cdot) \leq \delta_i \leq \delta_{max}(\cdot)$$

- Optimale Leistungsaufteilung zwischen VKM & EM-Zweig mittels linearer Approximation der Willians-Linien
- Batterieladung δ_i für jeden Zeitschritt aus Leistungsaufteilung zwischen P_{EM_i} & P_{ICE_i} berechenbar



$$\tilde{\phi}_i = [0 \ \phi_{start_i} \ 0 \ \phi_i]^T$$

$$\tilde{t}_i = [y_{EM} \ y_{hyb} \ t_E \ t_i]^T$$

MILP-Formulierung:

$$\min_{\tilde{t}_i} \tilde{\phi}_i^T \tilde{t}_i$$

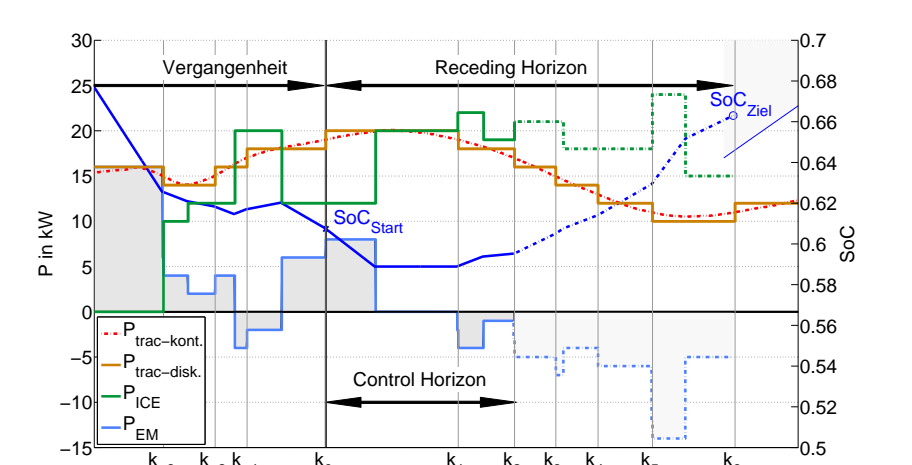
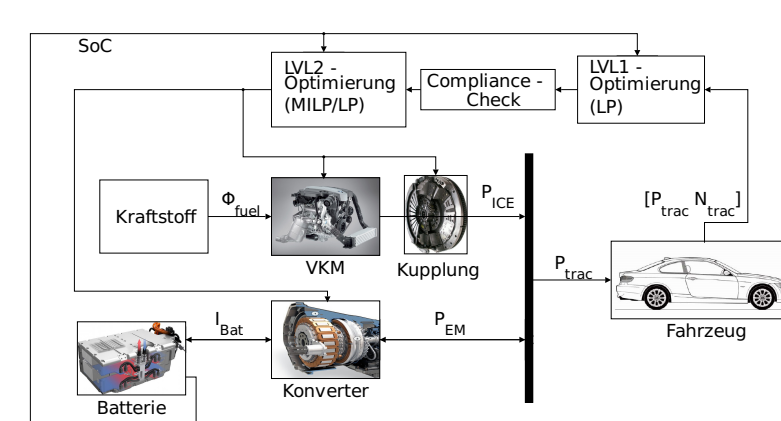
$$\tilde{A} \tilde{t}_i = \begin{bmatrix} t_{trac_i} \\ \delta_i \end{bmatrix}$$

- Mittels binärer Schaltvariablen können Abstell- und Startkosten bzw. -Zeiten der VKM berücksichtigt werden
- Kraftstoffoptimierung unter Berücksichtigung der Batterieladung δ_i aus LVL1-Optimierung

Receding-Horizon Strategie

- Nichtlinearitäten und Dynamik des realen Systems wurden in den LP bzw. MILP der Optimierung nicht berücksichtigt
- Implementierung einer Receding-Horizon Methode mit $SoC(t)$ -Feedback (Closed Loop) für eine zukünftige Schätzung des Fahrerwunsches

- LVL1-Optimierung über den RH mit dem SoC_{Ziel} als Nebenbedingung
- LVL2-Optimierung über den CH mit Berechnung der Stellgrößen welche auf die Systeme aufgeschaltet wird



Zusammenfassung

Das nicht-triviale Problem der optimalen Leistungsaufteilung in einem Hybridfahrzeug konnte in dieser Arbeit durch eine 2-stufige Optimierung konvexifiziert werden. Durch die Formulierung als LP bzw. MILP konnte aufgrund der geringen Berechnungszeiten in weiterer Folge eine echtzeitfähige Implementierung auf einem dSPACE-Rapid-Prototyping System am Prüfstand durchgeführt. Dabei wurde ebenfalls die Möglichkeit des Auskuppelns und Abstellens der VKM im Lösungsalgorithmus berücksichtigt. Dadurch wurde ebenfalls eine Start-Stop-Automatik für den Prüfstand entwickelt. Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit der Validation am Prüfstand überein. Mit der somit entwickelten Strategie, bei welcher der $SoC(t)$ auf seinen Anfangswert zurückgeführt wird, ist eine Kraftstoffreduzierung auch am realen System erreicht worden.