

Eco-ACC für Elektro- und Hybridfahrzeuge

DR. FOLKO FLEHMIG | FRANK KÄSTNER | DR. KOSMAS KNÖDLER | DR. MICHAEL KNOOP



Die Regelungsstrategien des ACC lassen sich für Hybrid- und Elektrofahrzeuge im Hinblick auf den Energieverbrauch verbessern. Dazu arbeiten Bosch-Ingenieure an einem Eco-ACC, das sich mehr Zeit für die Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug lässt. Nach einer kurzen Rekuperationsphase wird ein beträchtlicher Teil des Manövers im Segelbetrieb ohne Energieverbrauch für den Vortrieb zurückgelegt.

Szenarien

Entscheidend für die Akzeptanz von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist die Steigerung ihrer Reichweite. Dazu trägt neben der Weiterentwicklung der Batterietechnik auch die Verbesserung der Energieeffizienz bei, zum Beispiel durch Rückgewinnung elektrischer Energie beim Verzögern. Dabei ist der Einsatz der hydraulischen Reibbremse soweit wie möglich zu vermeiden. Stattdessen sollte die Verzögerung über Fahrwiderstände im Segelbetrieb [1] und/oder über generatorisches Bremsen mit den elektrischen Maschinen eingestellt werden [2, 3].

Ein Ansatz für die Verbesserung der Energieeffizienz besteht darin, das Verzögerungsprofil als gegeben anzunehmen und es durch Segel- oder Rekuperationsbetrieb möglichst gut auszunutzen. Zusätzliches Potenzial erschließt sich jedoch durch eine optimale Gestaltung des Verzögerungsprofils, wie bereits in [4] für Szenarien ohne Segelphase gezeigt wurde.

Segeln ist effizienter als Rekuperieren, weil die Verluste im elektrischen System entfallen. Auf der anderen Seite führt eine Segelphase zu längeren Manöverzeiten; aufgrund der geringen Verzögerung werden große Vorausschauweiten von mehreren 100 m bis zu 1 km benötigt, um die Geschwindigkeit vor Tempobegrenzungen oder stehenden Hindernissen zu reduzieren. Für bewegliche Hindernisse wie vorausfahrende Fahrzeuge sind die Vorausschauweiten allerdings geringer, sodass Segeln mit typischen ACC-Sensoren realisiert werden kann. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem klassischen ACC-Szenario der Annäherung an ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug. Die optimalen Trajektorien werden numerisch mit einer geeigneten Optimierungsmethode berechnet. Die vorliegenden Ergebnisse wurden im

Rahmen des EU-Förderprojekts OpEneR (Optimal Energy consumption and Recovery based on a system network [5]) erarbeitet. Zwei Versuchsfahrzeuge Peugeot 3008 wurden mit je einer elektrischen Maschine an Vorder- und Hinterachse ausgerüstet. Darüber hinaus wurde ein Radarsensor für ACC eingebaut.

Formale Darstellung der Optimierungsaufgabe

Die Optimierungsaufgabe wird als Mehrzieloptimierung gestellt, bei der eine gewichtete Summe aus Kostenfunktionen für die Energie J_E und die Manöverzeit J_T minimiert wird. Mit dem Wichtungsfaktor ρ lässt sich der Schwerpunkt zwischen Energie- und Zeitminimierung verschieben, Gl. 1.

GL. 1	$\begin{aligned} &\min \rho J_E + (1 - \rho) J_T \\ &\text{s.t. } 0 = f_0(t, x, \dot{x}, v_x, \dot{v}_x, a_x) \\ &\quad 0 = v_x(0) - v_0 \\ &\quad 0 = v_x(t_a) - v_1 \\ &\quad 0 = x(0) \\ &\quad 0 = \Delta x_1 + x(t_a) - x_p(t_a, \Delta x_0, \dots) \\ &\quad 0 \leq t \leq t_a \end{aligned}$
-------	---

Als Randbedingung wird ein einfaches Fahrzeugmodell f_0 für die Längsbewegung des Fahrzeugs berücksichtigt. Weitere Randbedingungen ergeben sich aus der Anfangsgeschwindigkeit v_0 , der Endgeschwindigkeit v_1 , die nach der Annäherungszeit t_a erreicht sein soll, und dem Initialabstand Δx_0 und dem Zielabstand Δx_1 zum vorausfahrenden Fahrzeug. Die prädiizierte Trajektorie des vorausfahrenden Fahrzeugs ist durch die Funktion x_p gegeben.

Gütemaß für die Energie

Ein Elektrofahrzeug kann aktiv verzögert werden, indem man die Reibbremse betätigt und damit kinetische Energie als Wär-

meenergie dissipiert oder indem man die elektrischen Maschinen als Generatoren betreibt und dabei elektrische Energie in die Batterie zurückspeist.

Als Vorstufe zur aktiven Verzögerung kann das Fahrzeug im Segelbetrieb durch die Fahrwiderstände verzögert werden. Dazu werden die Elektromotoren über schaltbare Kupplungen abgekoppelt. Es entstehen keine Energieverluste im elektrischen System, sodass der Segelbetrieb effizienter als die aktive Verzögerung durch Rekuperation ist.

Die Energiekosten werden als Summe aller Energieverluste angesetzt. Dazu zählen die Verluste aufgrund der Fahrwiderstände, die Verluste bei der Rekuperation und die Verluste durch die Nutzung der Reibbremse. Der Vollständigkeit halber werden auch die Verluste beim Vortrieb berücksichtigt, Gl. 2.

GL. 2	$J_E = J_{\text{res}} + J_{\text{recup}} + J_{\text{brake}} + J_{\text{prop}}$
-------	--

Gütemaß für die Zeit

Häufig sind energieoptimale Trajektorien mit einer deutlichen Verlängerung der Manöverzeit verbunden, was vom Fahrer eher negativ aufgenommen werden kann. Auch der nachfolgende Verkehr wird unter Umständen zu unsicherem Fahrverhalten verleitet [6]. Deshalb wird die Annäherungszeit t_a als zusätzliches Gütemaß verwendet, Gl. 3.

GL. 3	$J_T = t_a$
-------	-------------

Globale Optimierung mit der Dynamischen Programmierung

Die Dynamische Programmierung gemäß Bellman ist ein bekanntes Verfahren zur Optimierung dynamischer Systeme

[7], das die global optimale Lösung liefert. Die Anwendung zur Berechnung optimaler Verzögerungsprofile vor stationären Hindernissen wurde in [4] beschrieben. Ein ähnlicher Ansatz wird hier verfolgt, um das Problem Gl. 1 zu lösen.

Optimierungsergebnisse

In einem ersten Beispiel wird eine Verzögerung von 100 auf 80 km/h mit dem Initialabstand $\Delta x_0 = 80$ m und dem Zielabstand $\Delta x_1 = 40$ m betrachtet. Der Energieverbrauch wird stets für die Manöverdistanz 600 m berechnet. Falls Zielgeschwindigkeit und -abstand früher erreicht werden, fährt das Ego-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug, bis die Manöverdistanz erreicht ist.

Bild 1 stellt den Geschwindigkeitsverlauf v_x für das energieoptimale und für das zeitoptimale Manöver dar. Die energieoptimale Variante beginnt mit einer kurzen Rekuperationsphase und geht dann in eine Segelphase über. Nur mit Segeln würde man in dem Beispiel die erforderliche Abbremsung wegen des relativ geringen Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug nicht erreichen.

In der zeitoptimalen Variante behält das Ego-Fahrzeug zunächst die Initialgeschwindigkeit bei und bremst dann per Rekuperation und Reibbremse mit dem maximal zulässigen Wert der Verzögerung ab. Die Zielgeschwindigkeit wird deutlich früher erreicht als mit der energieoptimalen Variante.

Bild 2 zeigt die Pareto-Front, die sich bei Variation des Gewichtungsparameters ρ ergibt. Das zeitoptimale Manöver ($\rho = 0$) weist den höchsten Energieverbrauch auf, weil das Fahrzeug länger mit hoher Geschwindigkeit und damit auch hohen Fahrwiderstandskräften fährt. Außerdem wird die Reibbremse eingesetzt. Beim energieoptimalen Manöver ($\rho = 1$) ist der Zeitbedarf höher; allerdings ge-

Bild 1
Geschwindigkeits-
profile für energie-
und zeitoptimale
Verzögerung

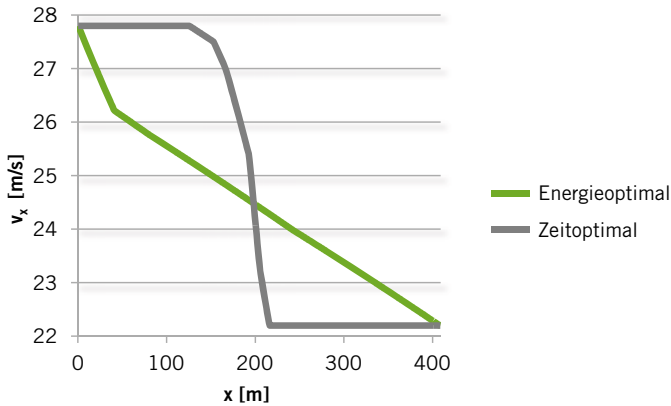
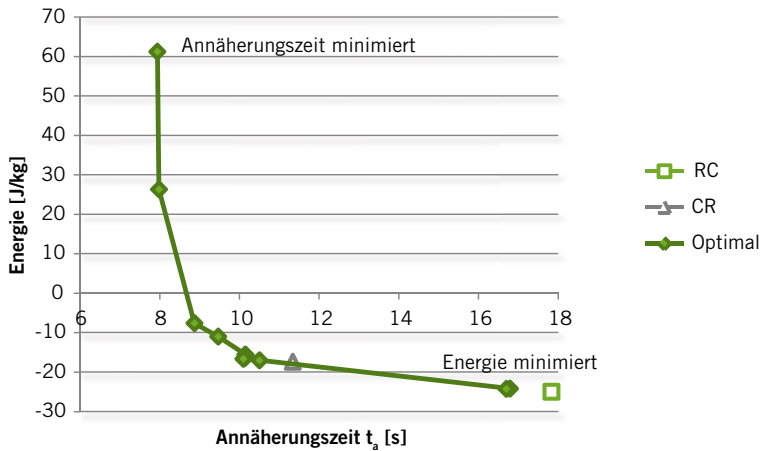


Bild 2
Energieverbrauch
bezogen auf die
Masse für eine Ver-
zögerung von 100
auf 80 km/h, Pare-
to-optimale Lösun-
gen und heuristi-
sche Strategien



winnt man Energie zurück, wie am negativen Vorzeichen auf der Energiekoordinate zu erkennen ist.

Außerdem wird in **Bild 2** die optimale Lösung mit zwei heuristischen Verzögerungsstrategien verglichen: RC rekuperierte zunächst und geht dann in den Segelbetrieb über. CR beginnt mit einer Segelphase und rekuperierte danach. RC liegt sehr nahe der energieoptimalen Lösung der Pareto-Front, während CR eine kürzere Annäherungszeit aufweist, dafür aber mehr Energie verbraucht. Der Grund liegt in der kürzeren Strecke, die zurückgelegt wird, bis die Zielgeschwindigkeit erreicht wird.

Bild 3 zeigt die Manöverzeit t_a und die Zeit t_c , die das Fahrzeug mit der konstanten Zielgeschwindigkeit von 80 km/h fährt, um die Manöverendposition zu erreichen. Bei der zeitoptimalen Strategie ist die Annäherungszeit am geringsten. Auf der anderen Seite ist dann die Zeit, in der das Ego-Fahrzeug mit der Zielgeschwindigkeit hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug fährt, größer. Mit der RC-Strategie und der energieoptimalen Strategie schließt man langsamer zum vorausfahrenden Fahrzeug auf.

Die Gesamtzeit bis zum Erreichen der Referenzposition berechnet sich als Summe von t_a und t_c . Sie ist für alle Stra-

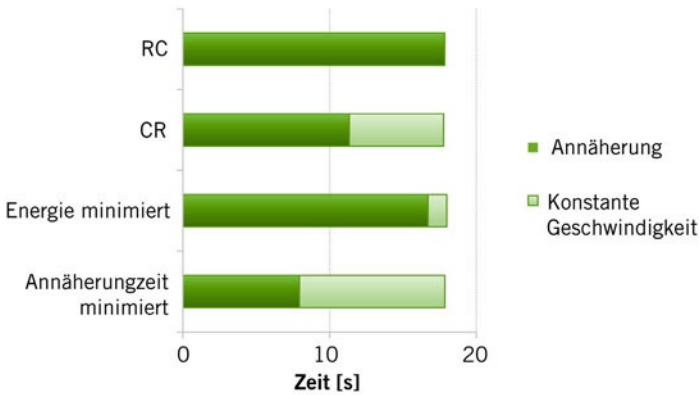


Bild 3
Annäherungszeit t_a und Zeit t_c , in der das Ego-Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug fährt

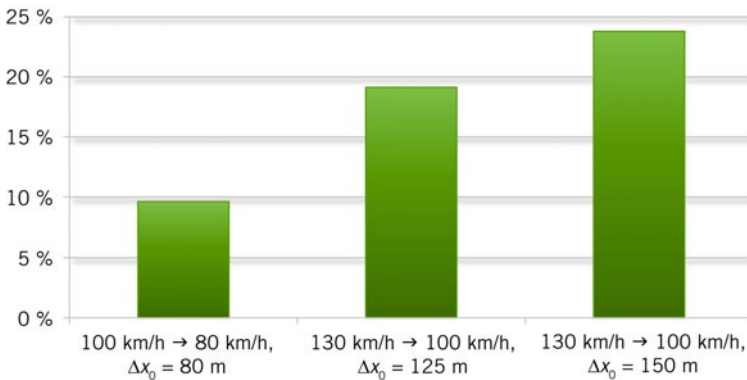


Bild 4
Einsparpotenzial der energieoptimalen Strategie im Vergleich zum Standard-ACC (simuliert)

tegien gleich, weil die Endposition und -zeit des Ego-Fahrzeugs durch das vorausfahrende Fahrzeug und den Zielabstand zu ihm bestimmt werden. Damit sind letztlich alle Strategien gleich schnell wie die zeitoptimale Strategie. Diese Aussage gilt nur, wenn Auswirkungen auf andere Verkehrsteilnehmer nicht betrachtet werden, wie zum Beispiel die geänderte Wahrscheinlichkeit eines Einschervorgangs anderer Verkehrsteilnehmer in die vorübergehend größere Lücke zum vorausfahrenden Fahrzeug. Im Vergleich zu einem simulierten Standard-ACC kann eine energieoptimale Strategie bis zu 25 % Energie einsparen, **Bild 4**. Das Einsparpotenzial wächst mit höherer Geschwindigkeitsdifferenz und höherer Vorausschauweite des ACC-Sensors.

Implementierung in einem Steuergerät

Die Ergebnisse der Dynamischen Programmierung zeigen, dass die optimale Strategie mit einer Rekuperationsphase beginnt. Daran schließt sich eine Segelphase an, die startet, sobald das Segeln ohne zu starke Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug ausgeführt werden kann. Diese Strategie kann in Form von Tabellen effizient in einem Steuergerät für Eco-ACC abgelegt werden.

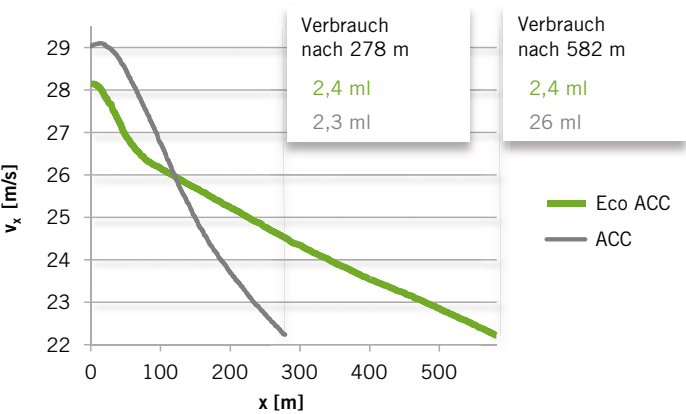


Bild 5
Gemessene Geschwindigkeitsprofile bei einem Annäherungsmanöver mit Standard- und Eco-ACC

Ergebnisse von Messungen im Versuchsfahrzeug

Ausgehend von einer Initialgeschwindigkeit von circa 100 km/h nähert man sich einem vorausfahrenden Fahrzeug, das mit 80 km/h fährt, mit aktiviertem ACC an. **Bild 5** zeigt die gemessene Geschwindigkeit über dem zurückgelegten Weg mit Standard-ACC und mit Eco-ACC. Das Standard-ACC erreicht die Zielgeschwindigkeit nach einer kurzen Distanz von circa 300 m. Auf der Reststrecke von 300 m wird Energie aufgewendet, um die Fahrwiderstände bei der Zielgeschwindigkeit 80 km/h zu überwinden.

Die Rekuperationsphase und die Segelphase lassen sich beim Eco-ACC deutlich abgrenzen, **Bild 5**; dabei wird die kinetische Energie effizient ausgenutzt. Dagegen rekuperiert das Standard-ACC zunächst Energie und nutzt sie danach für den Vortrieb mit konstanter Geschwindigkeit.

Insgesamt ist der Kraftstoffverbrauch des Standard-ACC deutlich höher als der des Eco-ACC, das für das gesamte Manöver nahezu keinen Kraftstoff benötigt.

Die hier gezeigten Ergebnisse wurden in einem Hybridfahrzeug gemessen; dabei ist der Nutzen der optimalen Strategie höher, weil der Verbrennungsmotor nicht auf rekuperierte Energie zurückgreifen kann. Die optimalen Trajektorien sind jedoch grundsätzlich vergleichbar mit den Trajektorien für ein reines Elektrofahrzeug.

Bild 6 zeigt den für das OpEneR-Versuchsfahrzeug berechneten Energieverbrauch für die Trajektorien in ⑤. Dabei wurde die kinetische Energie im Versuch mit dem Standard-ACC um die höhere Startgeschwindigkeit korrigiert. Das Standard-ACC rekuperiert zunächst mehr Energie als die optimale Strategie, verbraucht diese Energie aber vollständig, um die Geschwindigkeit bis zu dem Punkt zu halten, bei der das Eco-ACC die Zielgeschwindigkeit erreicht. Das Eco-

Bild 6
Berechneter Energieverbrauch für die Trajektorien in **Bild 5** für das OpEneR-Versuchsfahrzeug nach Korrektur auf dieselbe Initialgeschwindigkeit

	Zurückgelegte Distanz bis zum Erreichen der Zielgeschwindigkeit	Energieverbrauch nach 278 m	Energieverbrauch nach 582 m
Eco-ACC	582 m	-51,0 kJ	-51,0 kJ
Standard-ACC (höhere kinetische Energie korrigiert)	278 m	-157,4 kJ	8,1 kJ

ACC rekuperiert zwar zunächst weniger Energie, verbraucht aber in der Segelphase keine Energie, sodass die rekuperierte Energie erhalten bleibt. Nebenbei verringert sich auch die Zahl der Teilladungszyklen der Batterie mit möglicherweise positivem Einfluss auf die Lebensdauer.

Zusammenfassung

Die Regelungsstrategien des ACC lassen sich für Hybrid- und Elektrofahrzeuge im Hinblick auf den Energieverbrauch verbessern. Das zeigt sich am Beispiel der Annäherung an ein vorausfahrendes, langsames Fahrzeug. Ein Standard-ACC nähert sich relativ schnell an das vorausfahrende Fahrzeug an, rekuperiert dabei zwar einen hohen Energiebetrag, verbraucht aber die rekuperierte Energie für die anschließende Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit. Ein Eco-ACC lässt sich mehr Zeit für die Annäherung; nach einer kurzen Rekuperationsphase wird ein beträchtlicher Teil des Manövers im Segelbetrieb ohne Energieverbrauch für den Vortrieb zurückgelegt. In Summe liegt der Energieverbrauch für Eco-ACC deutlich unter dem Verbrauch mit Standard-ACC.

Literaturhinweise

- [1] Dornieden, B.; Junge, L.; Pascheka, P.: [] Vorausschauende energieeffiziente Fahrzeuglängsregelung. In: ATZ 114 (2012), Nr. 3, S. 230-235
- [2] Jones, S.; Huss, A.; Kural, E.; Albrecht, R.; Massoner, A.; Knödler, K.: Optimal electric vehicle energy efficiency & recovery in an intelligent transportation system. Proc. 19th ITS World Congress, Wien 2012
- [3] Köhler, S.; Viehl, A.; Bringmann, O.; Rosenstiel, W.: Optimized recuperation strategy for (hybrid) electric vehicles based on intelligent sensors. Proc. 12th Int. Conf. Control, Automation and Systems, Jeju Island (Korea) 2012
- [4] Knoop, M.; Kern, A.: Deceleration profiles for optimal recuperation and comfort. Proc. 13th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, Band 2, S. 85-98, Stuttgart 2013
- [5] Homepage des OpEneR-Projekts: <http://www.fp7-opener.eu>
- [6] Hülsebusch, D.; Salfeld, M.; Ponomarev, I.; Gauterin, F.: The impact of energy efficient driving strategies on rear-end safety. Proc. 16th IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), S. 1644-1649, Den Haag 2013
- [7] Kirk, D. E.: Optimal control theory. Dover Publications, Mineola, New York 2004

DANKE

Die Autoren danken für die Förderung der vorliegenden Arbeiten im Rahmen des OpEneR-Projekts (7. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission, FP7-2011-ICT-GC, Förderkennzeichen 285526).

Fahrerassistenzsysteme und Effiziente Antriebe

Siebenpfeiffer, W. (Hrsg.)

2015, XV, 161 S. 122 Abb. Book + eBook., Softcover

ISBN: 978-3-658-08160-7