

# Masterarbeit

## Ecodriving-Regelung für konventionelle Fahrzeuge unter Verkehr

**Autor:** Gunda Obereigner  
**Betreuer:** Univ.-Prof. DI Dr. Luigi del Re  
 DI Philipp Polteraer  
**Fertiggestellt:** April 2019

### Kurzfassung

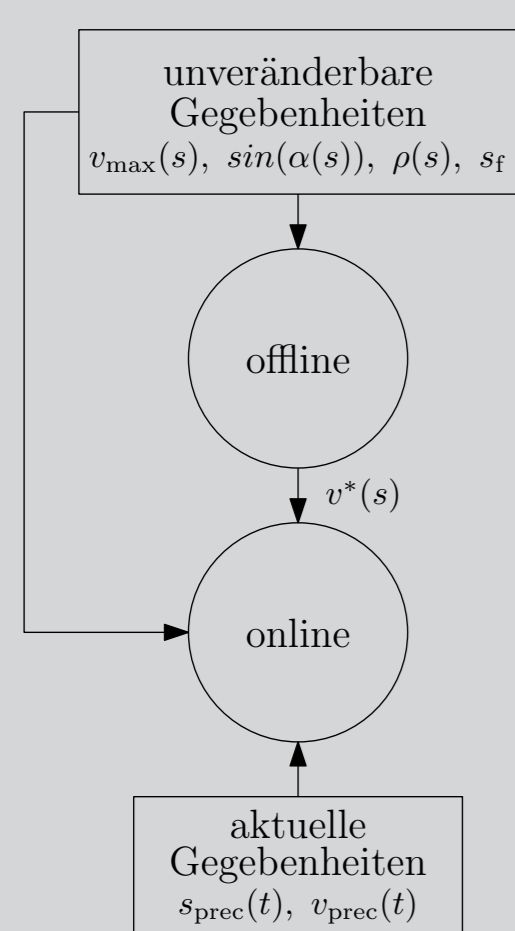
Ecodriving bedeutet, ein Fahrzeug ökonomisch, also mit geringem Kraftstoffverbrauch zu betreiben. Es existieren bereits Verfahren zur Berechnung einer Offline-Ecodriving-Lösung (O.E.L.) unter Ausnutzung des Wissens über topologische Gegebenheiten, jedoch ohne Berücksichtigung des Einflusses anderer Verkehrsteilnehmer. Die Präsenz anderer Verkehrsteilnehmer führt dazu, dass die offline berechnete Lösung im realen Betrieb nicht direkt angewandt werden kann, sondern Regelungskonzepte benötigt werden, die auch diese externen Einflüsse berücksichtigen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, festzustellen, ob eine onlinefähige Regelung für ein konventionelles Fahrzeug unter realen Verkehrsbedingungen durch Verwendung der O.E.L. als Referenztrajektorie zu einem kraftstoffsparenden Fahrverhalten führt. Hierzu werden verschiedene Online-Regelungskonzepte entworfen, basierend auf existierenden, offline berechneten Ecodriving-Lösungen für eine vollständig definierte Route. Ein kritischer Aspekt ist hierbei die benötigte Prädiktion des Verhaltens des vorausfahrenden Fahrzeuges. Dabei werden zwei Extremfälle betrachtet: einerseits wird eine perfekte Prädiktion des Vorausfahrenden angenommen, andererseits wird das Fahrverhalten aufgrund der aktuellen Messung als konstant angenommen.

Evaluiert wird, in welchem Ausmaß Kraftstoffeinsparungen im realen Verkehrsbetrieb durch die Kombination der O.E.L. mit der Online-Regelung erzielt werden können. Die Performance der verschiedenen Regelungen wird zum einen mit der O.E.L. für den ungestörten Fall und zum anderen mit dem Verkehr selbst verglichen.

Es zeigt sich, dass durch die entwickelten Regelungskonzepte, trotz Störung der idealen Trajektorie durch andere Verkehrsteilnehmer, nennenswerte Kraftstoffeinsparungen erzielt werden. Somit wird belegt, dass die Verwendung der O.E.L. als Referenz für eine Online-Regelung eine geeignete Methode ist, um Kraftstoffverbrauchseinsparungen auch im realen Verkehrsbetrieb zu erzielen.

### Regelungskonzept



Die Grundidee der Ecodriving-Regelungen besteht darin, zuerst, vor dem Antritt der Fahrt, offline eine optimale Geschwindigkeitstrajektorie  $v^*(s)$  zu generieren, um diese im Anschluss, während der Fahrt, online mit Hilfe eines Reglers zu tracken. Die Regelung besteht also aus einem Offline-Part und einem Online-Part. Der Offline-Part erhält lediglich unveränderbare Gegebenheiten, der Online-Part hingegen zusätzlich die optimale Trajektorie des Offline-Parts und aktuelle Bedingungen.

In diesem konkreten Fall sind die unveränderbaren Gegebenheiten sämtliche Routendaten: die Länge der Route  $s_f$ , die Steigung  $\sin(\alpha(s))$ , die Kurvenradien  $\rho(s)$  und das gesetzliche Geschwindigkeitslimit  $v_{\max}(s)$ . Der Verkehr stellt eine veränderliche bzw. aktuelle Bedingung dar und wird beschrieben durch die Position des vorausfahrenden Verkehrsteilnehmers  $s_{\text{prec}}(t)$  sowie dessen Geschwindigkeit  $v_{\text{prec}}(t)$ . Er wird im Offline-Part nicht berücksichtigt.

### Theorie

**Offline-Part:** Mit Hilfe von Dynamic Programming wird ein optimales Regelgesetz  $\pi^*$  für ein System durch Minimierung einer Kostenfunktion berechnet.  $\pi^*$  gibt den optimalen Eingang für das System, abhängig vom aktuellen Zustand  $x_i$  des Systems zum Zeitpunkt  $i$  an. Durch Vorwärtssimulation ausgehend von einem Initialzustand und Anwendung von  $\pi^*$  auf diesen, wird die für den Online-Part zu trackende Geschwindigkeitstrajektorie generiert.

**Online-Part:** Es werden verschiedene Online-Regler untersucht. Zum einen wird ein Tracking-Regler in Kombination mit ACC, in weiterer Folge TR-ACC genannt, formuliert. Zum anderen wird ein beschleunigungsbasierter MPC untersucht, einerseits unter der Annahme einer perfekten Prädiktion des vorausfahrenden Fahrzeuges (MPC-a) und andererseits unter der Annahme einer konstanten Prädiktion des vorausfahrenden Fahrzeuges (MPC-a FT).

Zur Bestimmung der optimalen Eingangsfolge wird ein optimales Regelproblem mit einer Tracking-Kostenfunktion formuliert. Es wird einerseits die Abweichung des prädierten Ausgangs des Modells  $\hat{y}_k$  zur Offline-Referenz  $v_k^*$  während des Prädiktionshorizontes  $n_{\text{ph}}$ , und andererseits der „nötige Aufwand“ der Referenz zu folgen, also der Betrag der Regelgröße gewichtet. Die Referenz muss dabei während des gesamten Prädiktionshorizontes  $n_{\text{ph}}$  bekannt sein.

$$\min_{a_{x,k}} \sum_{i=1}^{n_{\text{ph}}} (\hat{v}_{k+i} - v_{k+i}^*)^2 Q + \sum_{i=0}^{n_{\text{ph}}-1} a_{x,k+i}^2 R + \sum_{i=1}^{n_{\text{ph}}} (\epsilon_{d,k} P_d + \epsilon_{v,k} P_v)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{bmatrix} s_{k+1} \\ v_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_k \\ v_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix} a_{x,k}$$

$$s_{\text{prec},k} - s_k \geq v_k \cdot t_h + d_0 - \epsilon_{d,k}, \quad v_k + \epsilon_{v,k} \geq v_{\min}$$

$$\epsilon_{d,k} \geq 0, \quad \epsilon_{v,k} \geq 0.$$

### Messungen



© OpenStreetMap - Mitwirkende  
 (www.openstreetmap.org/copyright)

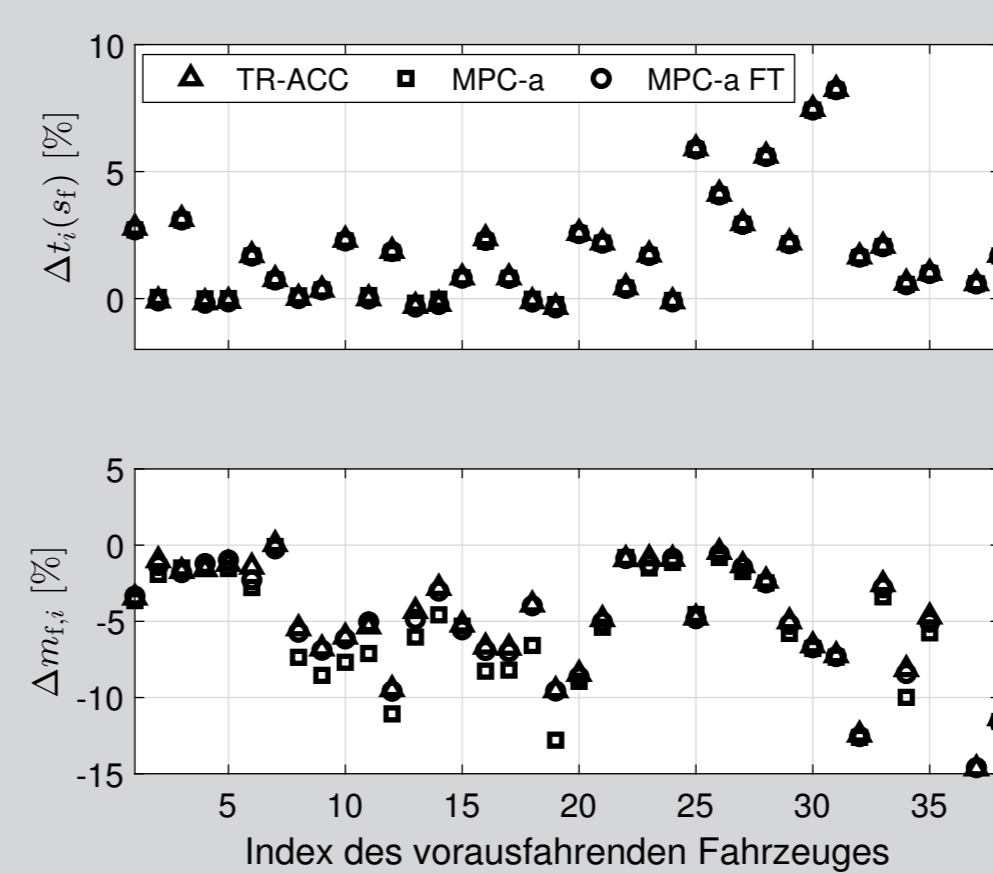
Die untersuchte Route führt von der Johannes Kepler Universität Linz nach Altenberg und wieder zurück. Bei der gewählten Route handelt es sich um eine kurvenreiche und hügelige Strecke. Sämtliche Daten der Route stehen zur Verfügung: die Länge der Route  $s_f$ , die Steigung  $\sin(\alpha(s))$ , die Kurvenradien  $\rho(s)$  und das gesetzliche Geschwindigkeitslimit  $v_{\max}(s)$ .

Mit Hilfe eines mit Messsystemen ausgestatteten Fahrzeuges (BMW 320d) wurden 39 Messfahrten auf der Route durchgeführt. Um die Ecodriving-Regelungen unter Vorhandensein von Verkehr untersuchen zu können, wird dieser durch die 39 Messungen repräsentiert. Jede Messung beschreibt ein vorausfahrendes Fahrzeug, welches gegebenenfalls das geregelte Fahrzeug in seiner Geschwindigkeit limitiert.

### Ergebnisse

Die vorgestellten Ecodriving-Regelungen TR-ACC, MPC-a und MPC-a FT werden mit den  $i$  vorausfahrenden Fahrzeugen getestet. Untersucht wird die Performance des geregelten Fahrzeuges, dazu wird es mit den vorausfahrenden Fahrzeugen verglichen. Die Kriterien zur Beurteilung der Performance sind der Kraftstoffverbrauch  $m_f$  und die benötigte Zeitdauer zum Fahren der Strecke  $t(s_f)$ . Ist  $\Delta m_{f,i}$  negativ, so weist das geregelte Fahrzeug einen geringeren Kraftstoffverbrauch als das vorausfahrende Fahrzeug auf.

Die unten stehende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Abweichungen der Performancekriterien der Regler zum Verkehr. Die unten stehende Tabelle gibt Auskunft über die durchschnittlichen Abweichungen. Der TR-ACC und MPC-a FT weisen ähnliche Ergebnisse auf, die konstante Prädiktion des Vorausfahrenden liefert also keinen nennenswerten Vorteil gegenüber der einfachen Regelstrategie TR-ACC. Wie erwartet liefert der MPC-a mit perfekter Prädiktion des vorausfahrenden Fahrzeuges die größte Kraftstoffeinsparung. Es ist also möglich, mit einem Regler, der der O.E.L. unter Verkehr folgt, im Durchschnitt mit ca. 1.8% mehr Zeitaufwand bis zu knapp 6% Kraftstoff zu sparen. Natürlich könnte an dieser Stelle argumentiert werden, dass mit mehr Zeitaufwand eine sparsamere Fahrweise durch geringere Beschleunigungen bewirkt werden kann. An dieser Stelle wird aber explizit auf die Fälle 2, 4, 5, 8, 11, 13, 14, 18, 19 und 24 verwiesen. In diesen Einzelfällen ist deutlich ersichtlich, dass selbst bei gleicher Streckenfahrzeit im Vergleich zum vorausfahrenden Fahrzeug mit dem MPC-a Regler zwischen -1.13% und -12.80% Kraftstoff gespart wird.



Regler	$\Delta t_i(s_f)$ [%]	$\Delta m_{f,i}$ [%]
TR-ACC	1.84	-5.08
MPC-a	1.84	-5.94
MPC-a FT	1.81	-5.23

### Zusammenfassung

Mit Hilfe der vorgestellten Ecodriving-Regelungen ist es möglich, bei Beschränkung durch ein vorausfahrendes Fahrzeug, weniger Kraftstoff als das vorausfahrende Fahrzeug selbst zu verbrauchen. Die Regelstrategie MPC-a benötigt im Durchschnitt 6% weniger Kraftstoff als die vorausfahrenden Fahrzeuge. Die anderen beiden Regelstrategien erzielen mit ca. 5% weniger Kraftstoffverbrauch als der Verkehr ein zufriedenstellendes Ergebnis. Erwartungsgemäß weist der MPC-a mit dem perfekten Prädiktionsmodell des Vorausfahrenden einen geringeren Kraftstoffverbrauch auf als jener mit dem konstanten Prädiktionsmodell. Die konstante Prädiktion des Vorausfahrenden des MPC-a FT bringt keine nennenswerten Vorteile gegenüber der einfachen TR-ACC Regelstrategie. Abschließend lässt sich festhalten, dass unter Verwendung der O.E.L. im Onlinebetrieb im Durchschnitt bis zu 6% Kraftstoff gespart werden kann. Dadurch ist belegt, dass es wertvoll ist, das Optimierungsproblem offline zu lösen und online zu tracken.