Optimale Gangschaltstrategie für wiederholte Fahrten auf bekannter Strecke

Autor: Tobias Marauli

Betreuer: Dipl.-Ing. Philipp Polterauer

Motivation und Konzept

- Motivation
  - Wachsender gebrauch von Automobilen
  - Steigende Emission von Treibhausgasen
  - Immer mehr Daten vorhanden

- Zentrale Fragestellung
  - Wie kann die Information bei wiederholten Fahrten in eine Gangschaltstrategie einfließen?

- Konzept
  - Approximation des Schaltverhaltens als implementierbaren Vergleich
  - Optimale Strategie einer Einzelfahrt unter der Kenntnis des Fahrzyklus
  - Optimale Strategie wiederholter Fahrten durch Verwenden einer Stochastik

Inhalt

- Motivation und Konzept
- Modell
- Optimale Schaltstrategie einer Einzelfahrt
- Optimale Strategie wiederholter Fahrten

Modell

- Antriebsstrang
- Approximation des Schaltverhaltens durch Schaltlinien

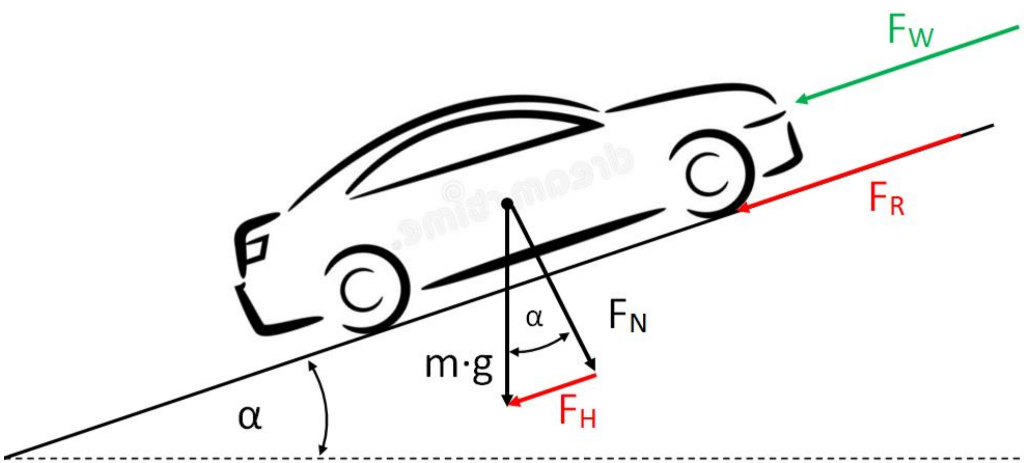
Modell

Antriebsstrang

$$T_k = \frac{r}{\gamma^{j_k} \cdot \eta} \cdot [m \cdot \lambda^{j_k} \cdot a_k + \underline{m \cdot g \cdot \{\cos(\alpha_k) \cdot c_r + \sin(\alpha_k)\}} + \underline{\frac{c_W \cdot \rho_{Luft} \cdot A}{2} \cdot v_k^2}]$$

$$\omega_k = \frac{\gamma^{j_k}}{r} \cdot v_k$$

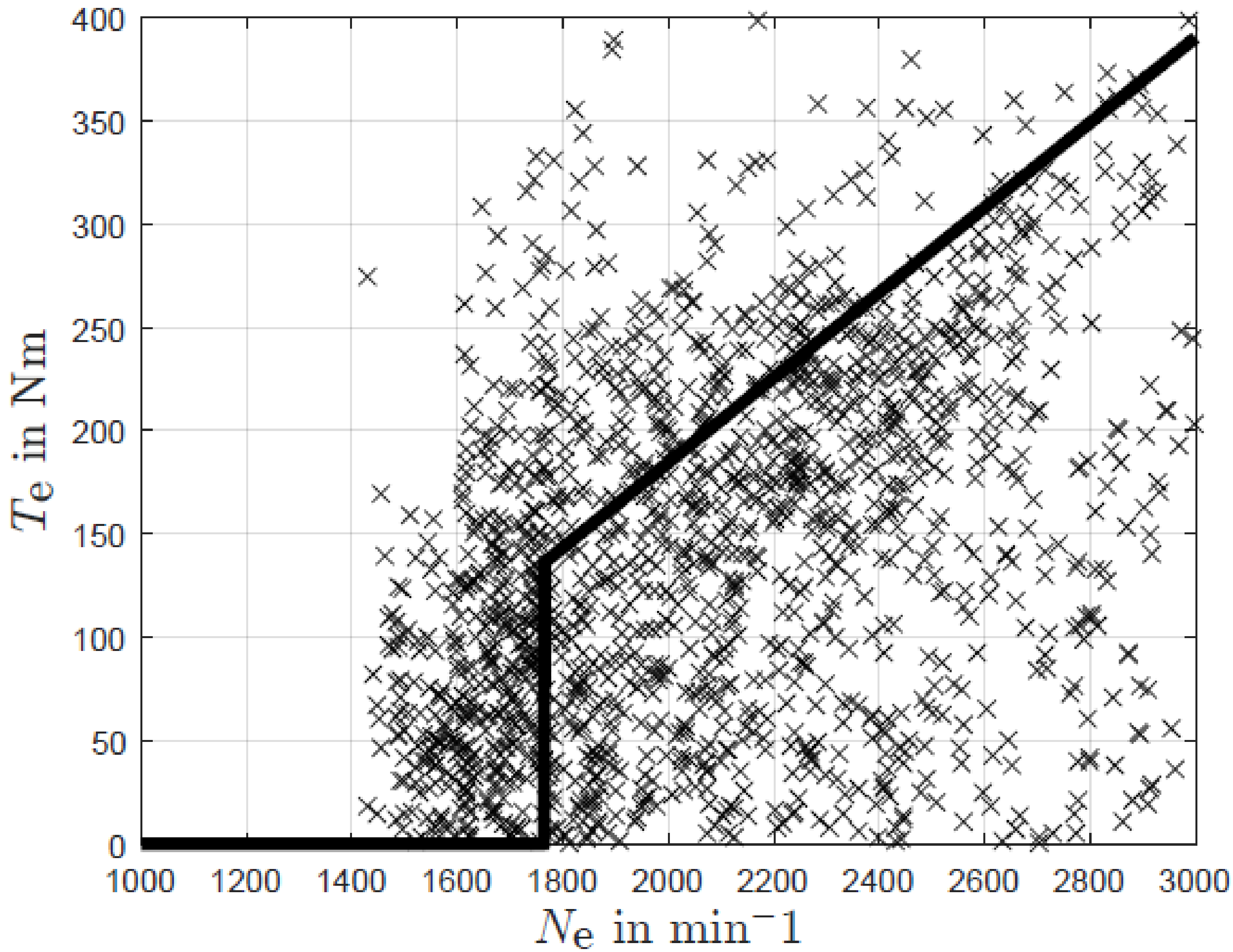
$$j_{k+1} = j_k + u_k$$



v_k	… aktuelle Geschw.
a_k	… aktuelle Beschl.
α_k	… aktuelle Steigung
j_k	…aktueller Gang
u_k	…Schaltsignal
T_k	…Motormoment
ω_k	…Motordrehzahl
c_w	…Luftreibbeiwert
c_r	…Rollreibbeiwert
ρ_{Luft}	… Dichte von Luft
A	… Luftangriffsfläche
r	… Reifenradius
m	…Fahrzeugmasse
g	…Erdbeschl.
η	…Wellenwirkungsgrad
γ^{jk}	... Getriebeübersetzung
λ^{jk}	…Getriebeträgheitsfaktor

Modell

- Approximation des Schaltverhaltens durch Schaltlinien



Optimale Schaltstrategie einer Einzelfahrt

- Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs
- Verbrauch $W_{\mathrm{fuel}} = f(\omega, T)$
- Drehzahl und Drehmoment durch Daten ermittelbar
- Eine Gangwahl steuer somit den Verbrauch
- Optimale Gangschaltstrategie durch dynamische Programmierung

Optimale Schaltstrategie einer Einzelfahrt

- Dynamische Programmierung nach Bellman
  - Optimierungsproblem

$$\min_{\pi \in \Pi} \{ g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k(x_k)) \}$$

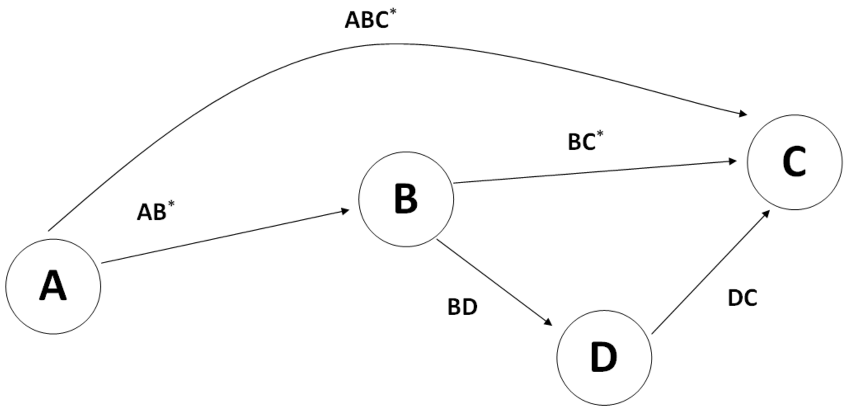
s.t.:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k(x_k))$$

$$c_k^{eq} = h_k^{eq}(x_k, u_k(x_k))$$

$$c_k^{ieq} \leq h_k^{ieq}(x_k, u_k(x_k))$$

$$\pi = \{u_0(x_0), u_1(x_1), \ldots, u_{N-1}(x_{N-1})\}$$



  - Minimierung durch den Algorithmus

$$k = N-1, \ldots, 1$$

$$J_N^* = g_N(x_N)$$

$$J_k^*(x_k) = \min_{u_k(x_k) \in U_k(x_k)} \{ g_k(x_k, u_k(x_k)) + J_{k+1}^*(x_{k+1}) \}$$

$$U_k(x_k) \subseteq \Pi$$

Optimale Strategie einer Einzelfahrt

- Vorliegendes Optimierungsproblem

$$\min_{\pi \in \Pi} \{ \sum_{k=0}^{N-1} W_{fuel}(\omega_k, T_k) \cdot \Delta t + \beta \cdot | u_k(j_k) | \cdot \Delta t \}$$

s.t.:

$$j_{k+1} = j_k + u_k(j_k) \qquad j_k \in \{1,2,\ldots, N_{\mathrm{Gang}}\}, u_k(j_k) \in U_k(j_k)$$

$$\omega_k = f_k(j_k, v_k) \qquad \omega_k \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$$

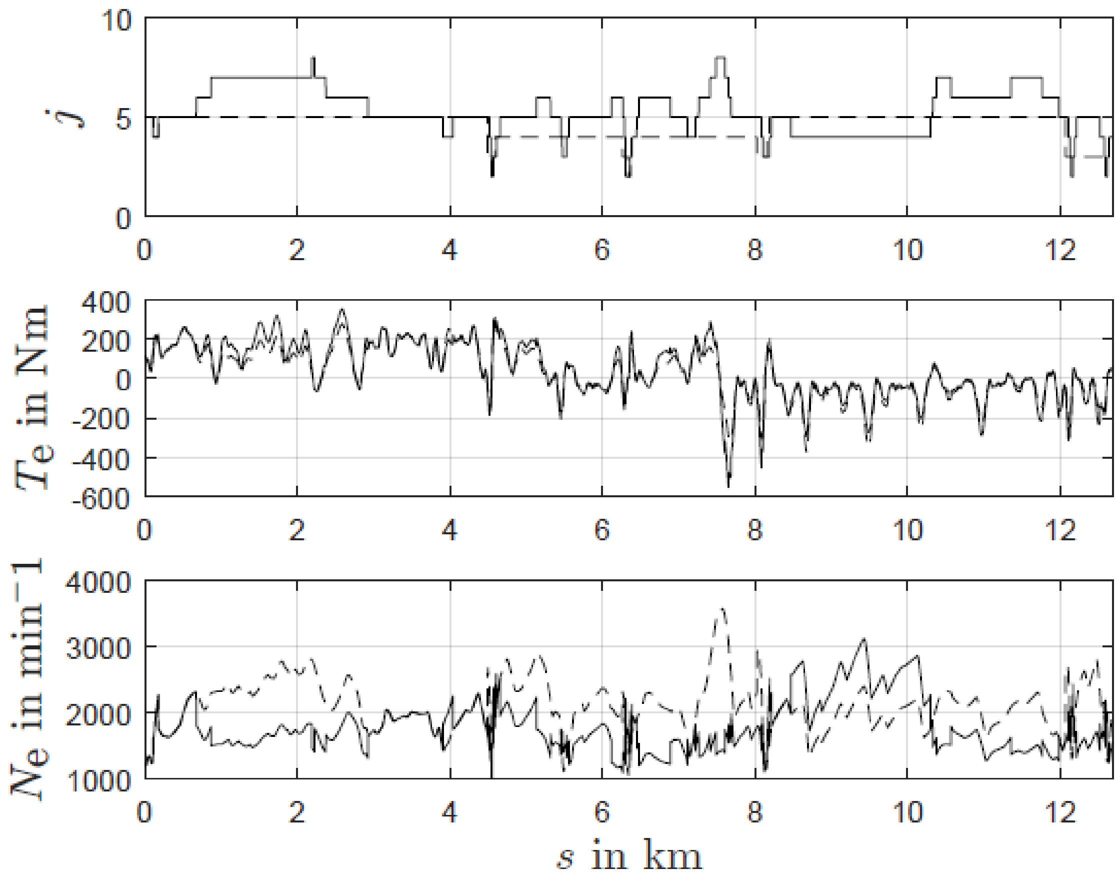
$$T_k = h_k(j_k, v_k, a_k) \qquad T_k \in [T_{\min}(\omega_k), T_{\max}(\omega_k)]$$

  - und der Menge des aktuell zulässigen Regelgesetzes

$$U_k(j_k) \begin{cases} \{0,1\} & \text{für} \quad j_k = 1 \\ \{-1,0,1\} & \text{für} \quad 1 < j_k < N_{\mathrm{Gang}} \\ \{-1,0\} & \text{für} \quad j_k = N_{\mathrm{Gang}} \end{cases}$$

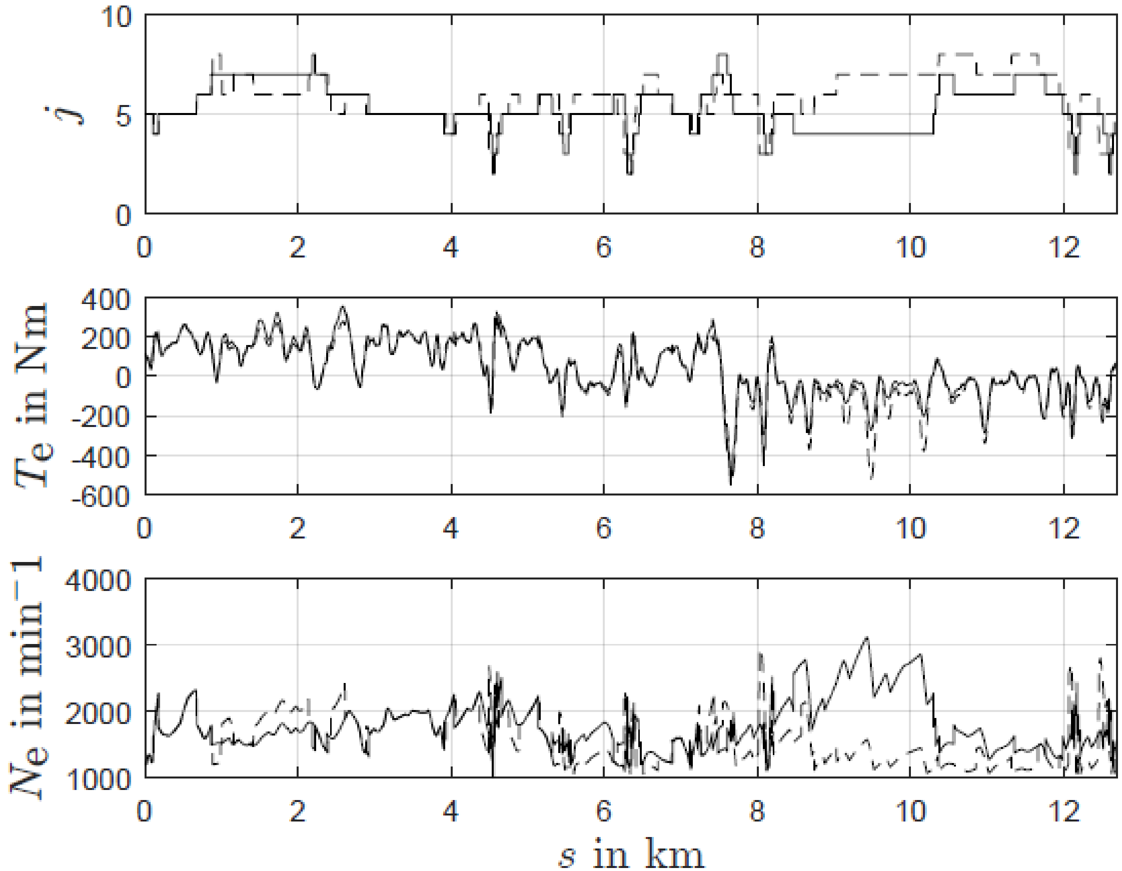
Optimale Strategie einer Einzelfahrt

- Vergleich des Schaltverhaltens der Testfahrt (Volllinien) mit der optimalen Strategie (strichlierte Linien) bei *β=0.005*



Optimale Strategie einer Einzelfahrt

- Vergleich des Schaltverhaltens der Testfahrt (Volllinien) mit der optimalen Strategie (strichlierte Linien) bei *β=0.0001*



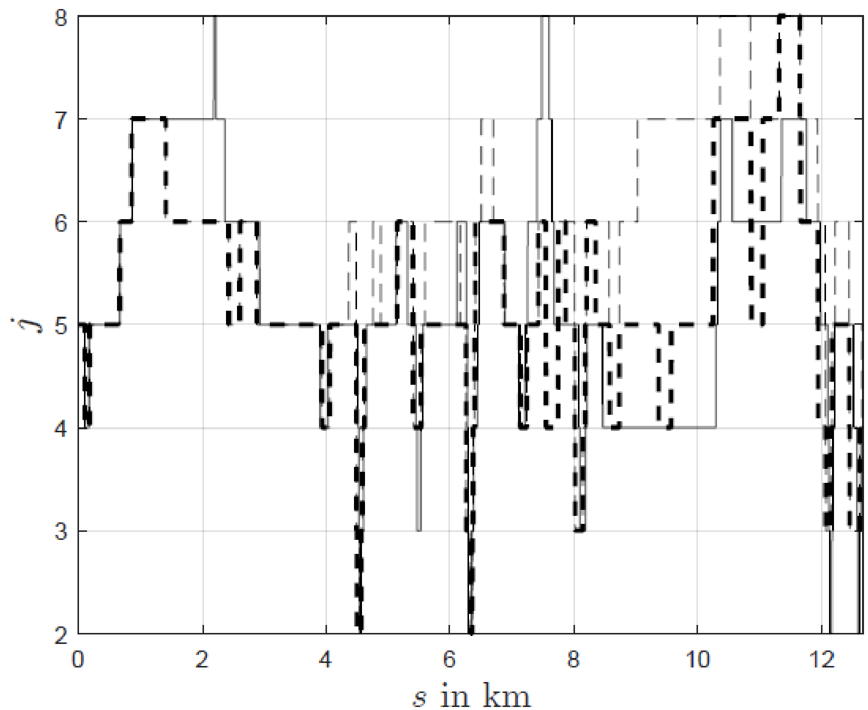
Optimale Strategie einer Einzelfahrt

- Ausnutzen der Motorbremswirkung
  - durch Adaption der laufenden Kosten mit der Bremsleistung

$$g_k(j_k, u_k(x_k)) = W_{fuel}(\omega_k, T_k)\cdot\Delta t + \beta\cdot|u_k(j_k)|\cdot\Delta t + \gamma\cdot\max(0, \Delta P_k)\cdot\Delta t$$

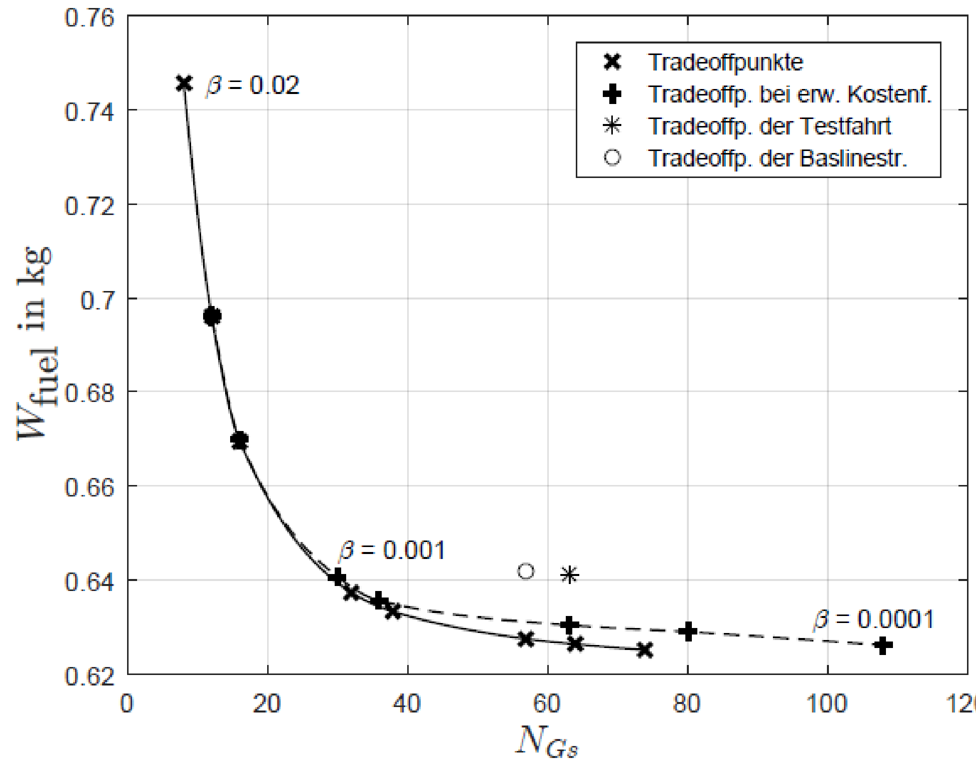
$$\Delta P_k = (T_{\min}(\omega_k) - T_k)\cdot\omega_k$$

  - Testfahrt (Volllinien)
  - Optimale Strategie (strichliert)
  - Motorbremswirkung (fett strichliert) $\gamma = 10^{-4}$
  - Bei ca. 63 Gangschaltvorgänger



Optimale Strategie einer Einzelfahrt

- **Trade-off Analyse**
  - Ersparnis der optimalen Strategie
    - 2.28% gegenüber der Testfahrt
    - 2.26% gegenüber der Schaltlinien
  - Ersparnis bei ausnutzen der Motorbremswirkung $\gamma = 10^{-4}$
    - 1.67% gegenüber der Testfahrt
    - 1.7% gegenüber der Schaltlinien
  - 0.63% Mehrverbrauch also ohne ausnutzen der Motorbremswirkung



Optimale Strategie wiederholter Fahrten

- Minimierung eines Stochastischen Prozesses
- Fahrerwunsch als stochastische Größe
- Dargestellt durch eine Markov-Kette

Optimale Strategie wiederholter Fahrten

- Markov-Kette
  - Die Folge $\{X_k\}_{k\geq 0}$ beschreibt einen stochastischen Prozess
  - Mit den Zuständen $i, j \in E \Rightarrow X_k = i$
  - Erfüllt der Prozess die Bedingung

    $$P(X_{k+1} = j \mid X_k = i, X_{k-1} = i_{k-1}, \ldots X_0 = i_0) = P(X_{k+1} = j \mid X_k = i)$$

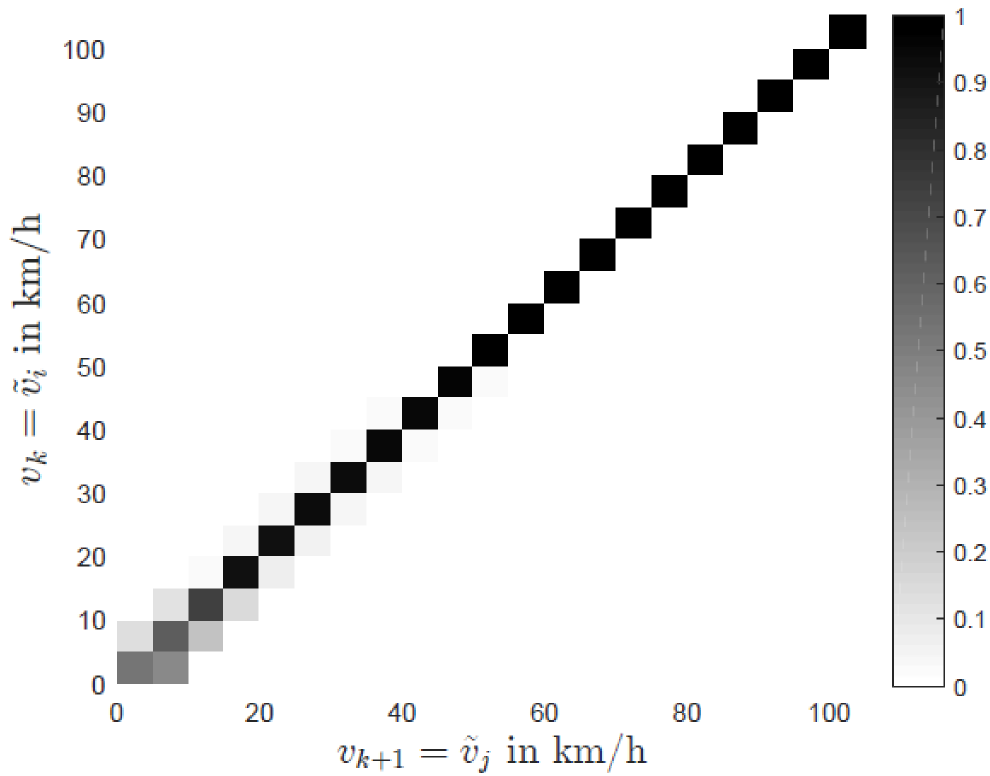
    so nennt man diesen Prozess Markov-Kette
  - Darstellung durch die Transitionsmatrix $\underline{P} = \{p_{ji}\}_{i,j\in E}$

    $$p_{ji} = P(X_{k+1} = j \mid X_k = i)$$

    für die $p_{ji} \geq 0, \quad \sum_{n\in E} p_{jn} = 1$ gilt

Optimale Strategie wiederholter Fahrten

- Anwendung
  - Fahrerwunsch repräsentiert durch die Geschwindigkeit
  - Verteilung $p_{ji} = P(v_{k+1} = v_j \mid v_k = v_i)$



Optimale Strategie wiederholter Fahrten

- Stochastische dynamische Programmierung
  - Gegebenes Optimierungsproblem

$$\min_{\pi\in\Pi} \mathop{\mathrm{E}}_{\substack{w_k \\ k=0,1,\ldots,N-1}} \{g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k(x_k), w_k)\}$$

s.t.:

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k(x_k), w_k)$$

$$c_k^{eq} = h_k^{eq}(x_k, u_k(x_k), w_k)$$

$$c_k^{ieq} \le h_k^{ieq}(x_k, u_k(x_k), w_k)$$

  - Angewandt:

$$\min_{\pi\in\Pi} \mathop{\mathrm{E}}_{\substack{v_{k+1} \\ k=0,1,\ldots,N-1}} \{\sum_{k=0}^{N-1} W_{fuel}(\omega_k, T_k)\cdot\Delta t + \beta\cdot|u_k(j_k)|\cdot\Delta t\}$$

s.t.:

$$j_{k+1} = j_k + u_k(j_k) \qquad j_k \in \{1,2,\ldots,N_{\mathrm{Gang}}\}, u_k(j_k) \in U_k(j_k)$$

$$P(v_{k+1} = v_j \mid v_k = v_i) \qquad v_i, v_j \in \{v_1, v_2, \ldots, v_{Nv}\}$$

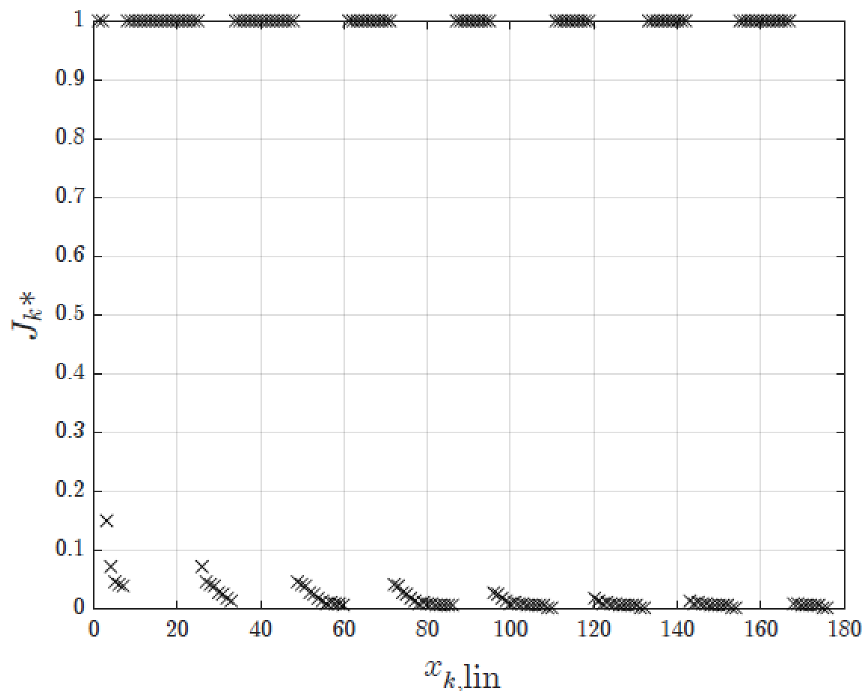
$$\omega_k = f_k(j_k, v_k) \qquad \omega_k \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$$

$$T_k = h_k(j_k, v_k, v_{k+1}) \qquad T_k \in [T_{\min}(\omega_k), T_{\max}(\omega_k)]$$

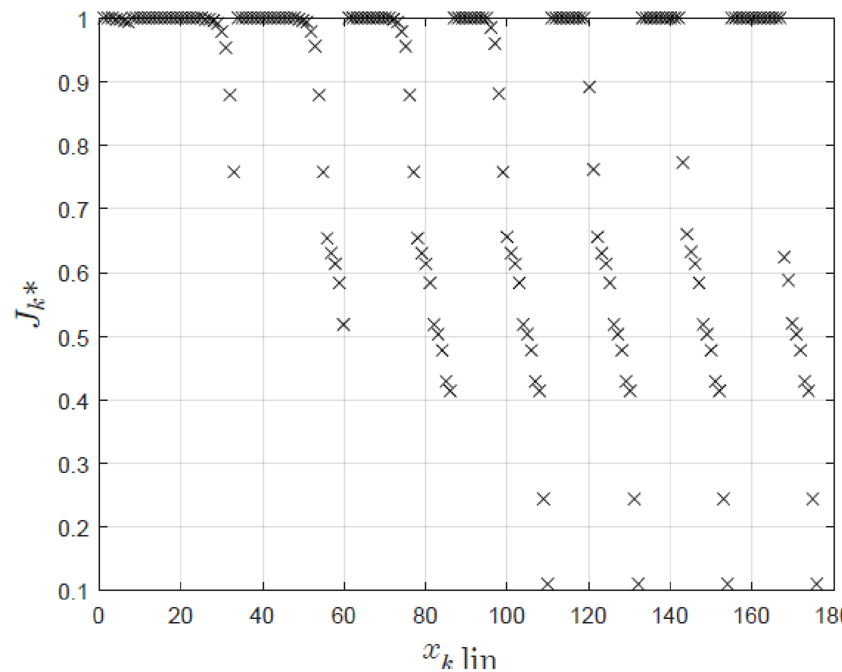
Optimale Strategie wiederholter Fahrten

- Problemanalyse bei der Anwendung

1 Optimierungsschritt

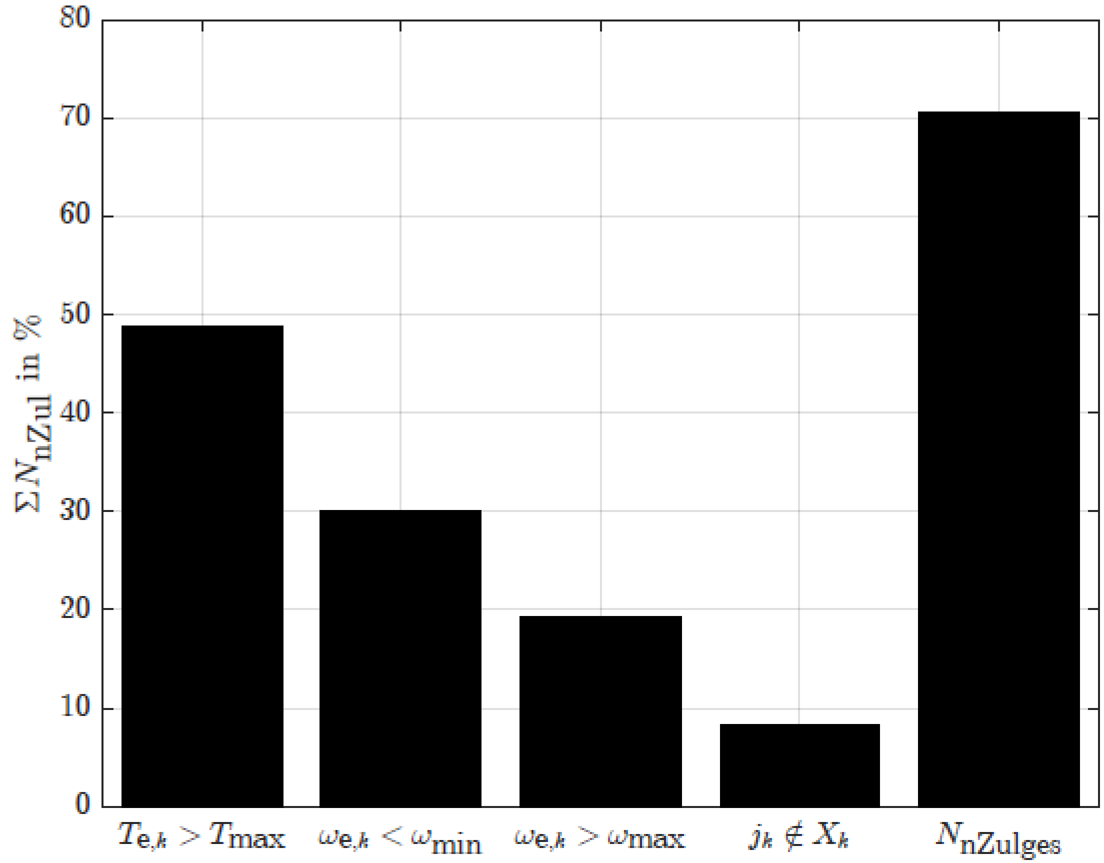


100 Optimierungsschritt



Optimale Strategie wiederholter Fahrten

- Problemanalyse bei der Anwendung



Optimale Strategie wiederholter Fahrten

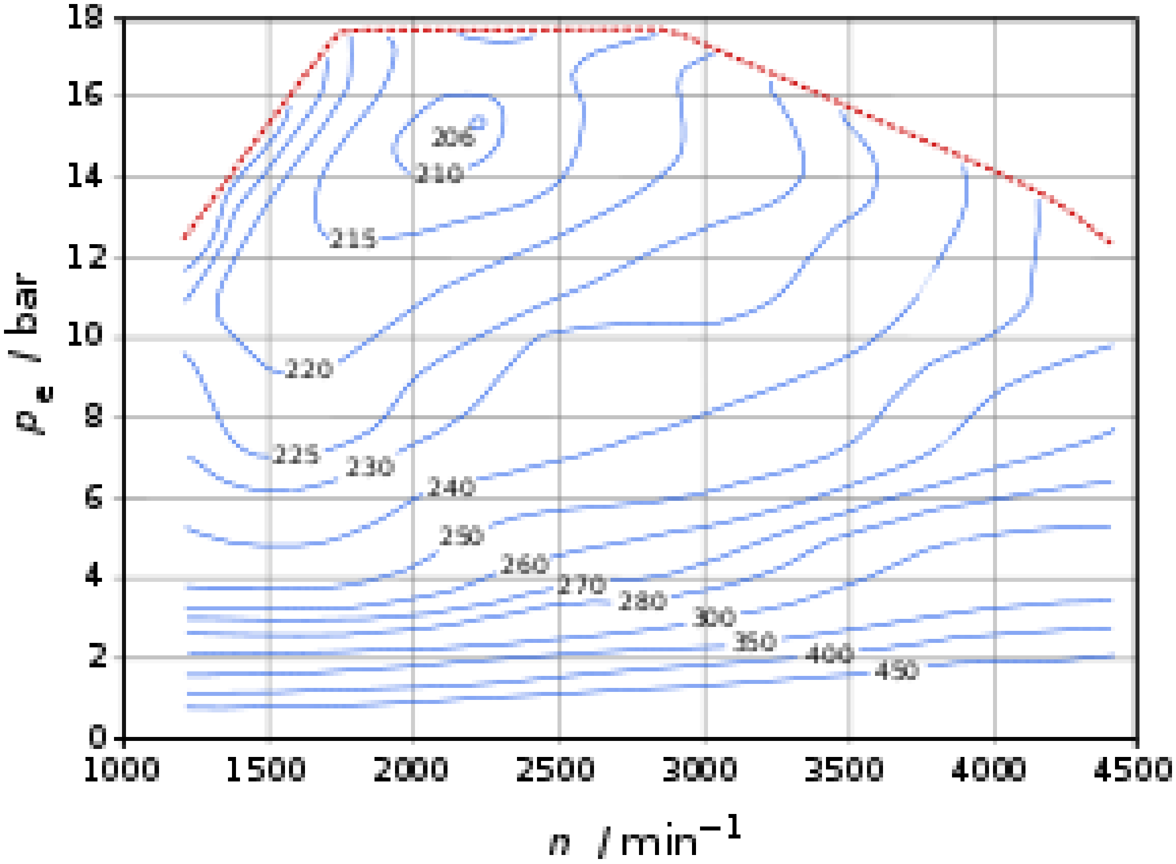
- Vernachlässigung der Systemdynamik bei der Modellierung der Stochastik
- Ergeben ungültige Zustandskombinationen
- Behebung durch Berücksichtigung der Dynamik in der Stochastik

$$p_{ji} = P(v_{k+1} = v_j \mid v_k = v_i, j_k = l, s_k = k)$$

Vielen Danke für eure Aufmerksamkeit

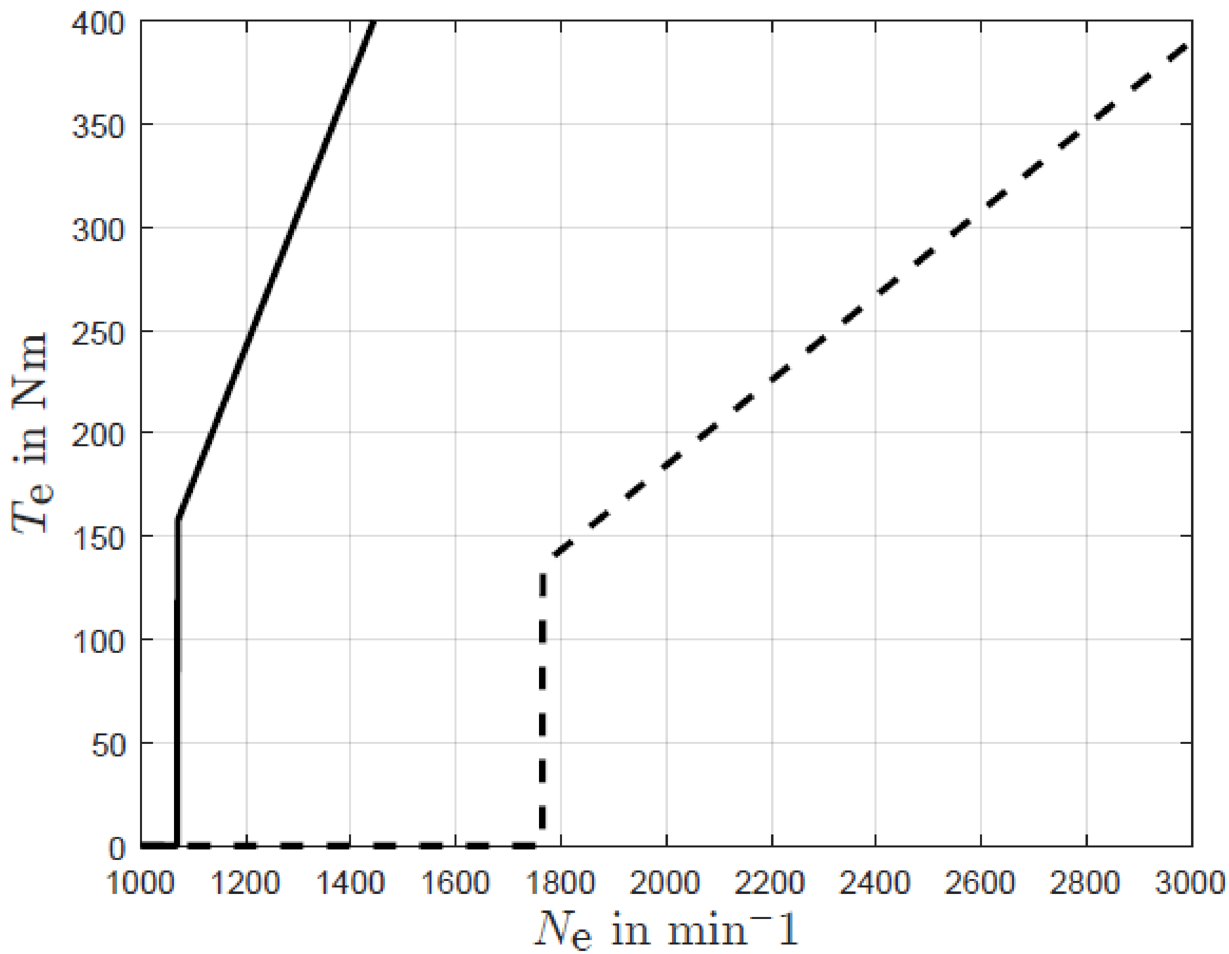
Anhang

- Verbrauchskennlinienfeld eines Verbrennungskraftmotors



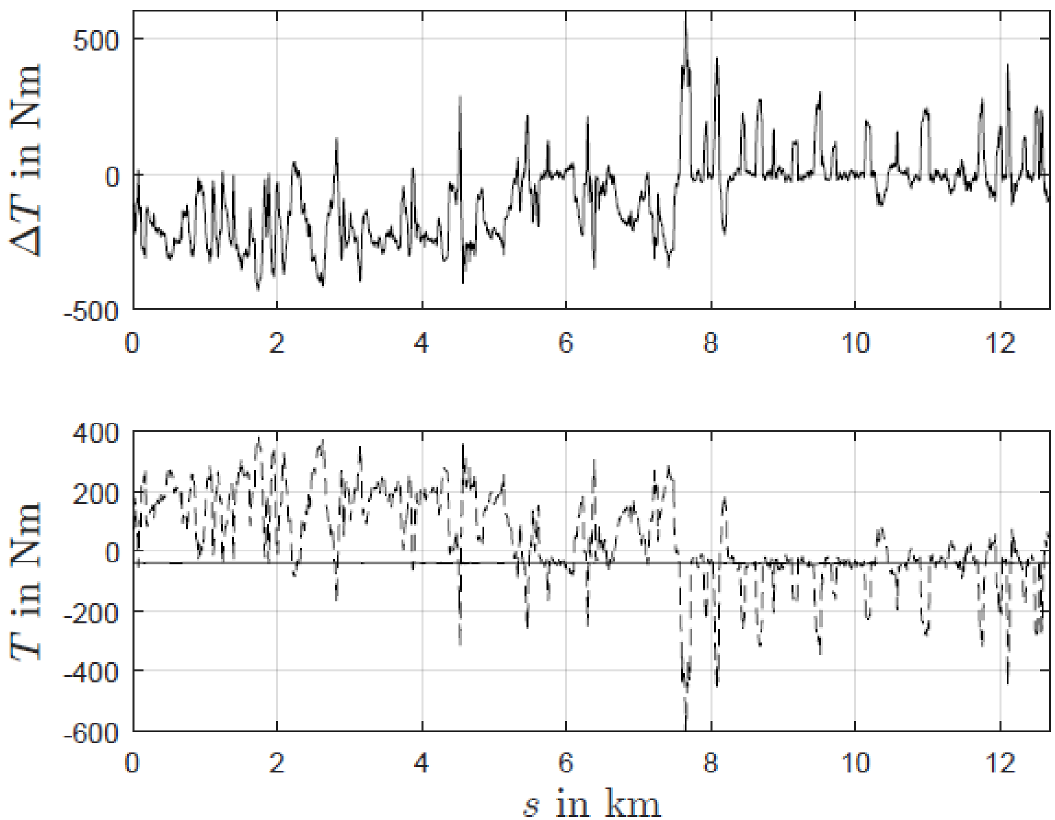
Anhang

- Approximierte Schalthysterese aus Messdaten



Anhang

- Erklärung der Maximalbildung in der Adaptierten Kostenfunktion



Anhang

- Optimale Gangschaltstrategie durch ausnutzen der Motorbremswirkung bei $\gamma = 10^{-4}$ und $\beta = 10^{-4}$