

# Numerische Optimierung des Einspritzprofils eines Diesel Motors für ein definiertes Manöver

Abschlusspräsentation

Jakob Holzinger

Institut für Design und Regelung mechatronischer Systeme



**JYU**

# Motivation





# Motivation

- Zunehmend strengere Abgasnormen. Emissionseinsparung (Dieselmotor:  $NO_x$ , Ruß)



# Motivation

- Zunehmend strengere Abgasnormen. Emissionseinsparung (Dieselmotor:  $NO_x$ , Ruß)
- Beibehaltung von Fahrbarkeit und Komfort (z.B. Geräusentwicklung)



# Motivation

- Zunehmend strengere Abgasnormen. Emissionseinsparung (Dieselmotor:  $NO_x$ , Ruß)
- Beibehaltung von Fahrbarkeit und Komfort (z.B. Geräusentwicklung)
- Motoren werden hauptsächlich für stationäre Arbeitspunkte abgestimmt



# Motivation

- Zunehmend strengere Abgasnormen. Emissionseinsparung (Dieselmotor:  $NO_x$ , Ruß)
- Beibehaltung von Fahrbarkeit und Komfort (z.B. Geräusentwicklung)
- Motoren werden hauptsächlich für stationäre Arbeitspunkte abgestimmt
- Durch unterschiedliche Zeitkonstanten der Teilsysteme entstehen bei transienten Manövern Abweichungen → Verbesserungspotenzial

# Aufgabenstellung





# Aufgabenstellung

- Analyse des möglichen Verbesserungspotenzials (Emissionen) durch einen Eingriff ins Einspritzsystem des Dieselmotors.

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} x_{\text{opac}}(t) \\ x_{\text{NO}}(t) \end{bmatrix}$$





# Aufgabenstellung

- Analyse des möglichen Verbesserungspotenzials (Emissionen) durch einen Eingriff ins Einspritzsystem des Dieselmotors.

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} x_{\text{opac}}(t) \\ x_{\text{NO}}(t) \end{bmatrix}$$

- Betrachtet wird ein Tip-In Manöver (Gaspedalsprung bei konstanter Drehzahl)



# Aufgabenstellung

- Analyse des möglichen Verbesserungspotenzials (Emissionen) durch einen Eingriff ins Einspritzsystem des Dieselmotors.

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} x_{\text{opac}}(t) \\ x_{\text{NO}}(t) \end{bmatrix}$$

- Betrachtet wird ein Tip-In Manöver (Gaspedalsprung bei konstanter Drehzahl)
- Optimiert werden ausschließlich folgende Einspritzparameter:

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \phi_{\text{MI}}(t) \\ p_{\text{rail}}(t) \end{bmatrix}$$



# Aufgabenstellung

- Analyse des möglichen Verbesserungspotenzials (Emissionen) durch einen Eingriff ins Einspritzsystem des Dieselmotors.

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} x_{\text{opac}}(t) \\ x_{\text{NO}}(t) \end{bmatrix}$$

- Betrachtet wird ein Tip-In Manöver (Gaspedalsprung bei konstanter Drehzahl)
- Optimiert werden ausschließlich folgende Einspritzparameter:

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \phi_{\text{MI}}(t) \\ p_{\text{rail}}(t) \end{bmatrix}$$

- Andere Trajektorien (z.B. Luftpfadgrößen, Einspritzmenge, etc.) bleiben unverändert und werden durch die bestehende Motorregelung vorgegeben.

# Modellierung: Allgemein

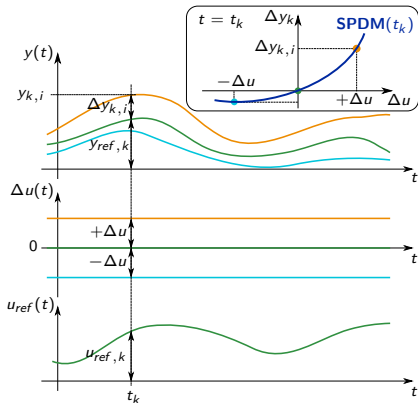


# Modellierung: Allgemein

- Zur Auswertung einer Kosten- und Beschränkungsfunktion werden mathematische Modelle benötigt.

# Modellierung: Allgemein

- Zur Auswertung einer Kosten- und Beschränkungsfunktion werden mathematische Modelle benötigt.
- Gewählt wurden statische Modelle welche die Abweichung von der Referenztrajektorie beschreiben (SPDM).



# Modellierung





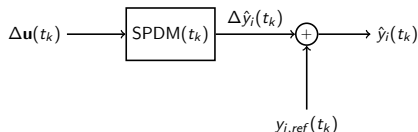
# Modellierung

- Identifiziert wird zu jedem Abtastzeitpunkt mittels WLS.



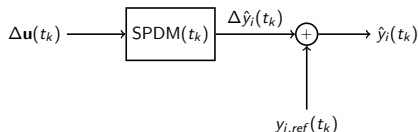
# Modellierung

- Identifiziert wird zu jedem Abtastzeitpunkt mittels WLS.
- Quadratische Modelle (ohne Offset) erfüllen die Anforderung an Genauigkeit und Einfachheit.

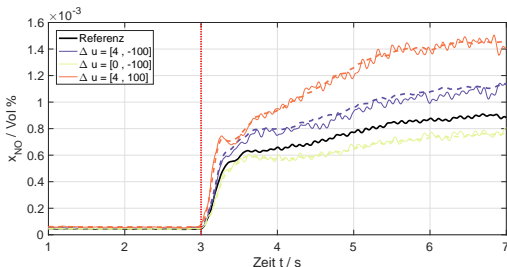


# Modellierung

- Identifiziert wird zu jedem Abtastzeitpunkt mittels WLS.
- Quadratische Modelle (ohne Offset) erfüllen die Anforderung an Genauigkeit und Einfachheit.



- Vergleich: Modell mit Messung für NO



# Optimierungen: Allgemeines





# Optimierungen: Allgemeines

- Eingangsabweichungen werden direkt vorgegeben  
→ Optimalsteuerung



# Optimierungen: Allgemeines

- Eingangsabweichungen werden direkt vorgegeben  
→ Optimalsteuerung
- Definitionsmenge für Eingangsabweichungen gleich wie bei der Identifikation

$$\mathcal{U} = \{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^2 \mid \Delta \underline{\mathbf{u}} \leq \Delta \mathbf{u}_k \leq \Delta \bar{\mathbf{u}}\}$$



# Optimierungen: Allgemeines

- Eingangsabweichungen werden direkt vorgegeben  
→ Optimalsteuerung
- Definitionsmenge für Eingangsabweichungen gleich wie bei der Identifikation

$$\mathcal{U} = \{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^2 \mid \Delta \underline{\mathbf{u}} \leq \Delta \mathbf{u}_k \leq \Delta \bar{\mathbf{u}}\}$$

- Optimierungsintervall:  $[t_0, t_1] = [3, 6]\text{s}$



# Optimierungen: Allgemeines

- Eingangsabweichungen werden direkt vorgegeben  
→ Optimalsteuerung
- Definitionsmenge für Eingangsabweichungen gleich wie bei der Identifikation

$$\mathcal{U} = \{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^2 \mid \Delta \underline{\mathbf{u}} \leq \Delta \mathbf{u}_k \leq \Delta \bar{\mathbf{u}}\}$$

- Optimierungsintervall:  $[t_0, t_1] = [3, 6]$ s
- Kostenfunktion:

$$J(\Delta \mathbf{u}_k) = \sum_{k=1}^N l(\Delta \mathbf{u}_k)$$



# Optimierungen: Allgemeines

- Eingangsabweichungen werden direkt vorgegeben  
→ Optimalsteuerung
- Definitionsmenge für Eingangsabweichungen gleich wie bei der Identifikation

$$\mathcal{U} = \{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathbb{R}^2 \mid \Delta \underline{\mathbf{u}} \leq \Delta \mathbf{u}_k \leq \Delta \bar{\mathbf{u}}\}$$

- Optimierungsintervall:  $[t_0, t_1] = [3, 6]$ s
- Kostenfunktion:

$$J(\Delta \mathbf{u}_k) = \sum_{k=1}^N l(\Delta \mathbf{u}_k)$$

mit

$$l(\Delta \mathbf{u}_k) = \beta \frac{\Delta x_{\text{opac},k}(\Delta \mathbf{u}_k)}{x_{\text{opac},\text{max}}} + (1 - \beta) \frac{\Delta x_{\text{NO},k}(\Delta \mathbf{u}_k)}{x_{\text{NO},\text{max}}}$$



# Optimierung mit Drehmomentenbedingung





# Optimierung mit Drehmomentenbedingung

- Drehmomentenrajektorie soll genau der Referenzrajektorie entsprechen:

$$\Delta \tau_k(\Delta \mathbf{u}_k) = 0 \text{ mit } k = 1 \dots N, N = \frac{t_1 - t_0}{T_s}$$



# Optimierung mit Drehmomentenbedingung

- Drehmomententrajektorie soll genau der Referenztrajektorie entsprechen:

$$\Delta\tau_k(\Delta\mathbf{u}_k) = 0 \text{ mit } k = 1 \dots N, N = \frac{t_1 - t_0}{T_s}$$

- Da die Modelle zu den Abtastzeitpunkten voneinander unabhängig sind, ergibt sich folgendes Optimierungsproblem (für einen Zeitpunkt):

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} & \quad I(\Delta\mathbf{u}_k) \\ \text{s.t.:} & \quad \Delta\tau_k(\Delta\mathbf{u}_k) = 0 \end{aligned}$$



# Optimierung mit Drehmomentenbedingung

- Drehmomentenrajektorie soll genau der Referenztrajektorie entsprechen:

$$\Delta\tau_k(\Delta\mathbf{u}_k) = 0 \text{ mit } k = 1 \dots N, N = \frac{t_1 - t_0}{T_s}$$

- Da die Modelle zu den Abtastzeitpunkten voneinander unabhängig sind, ergibt sich folgendes Optimierungsproblem (für einen Zeitpunkt):

$$\begin{aligned} \min_{\Delta\mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} & \quad I(\Delta\mathbf{u}_k) \\ \text{s.t.:} & \quad \Delta\tau_k(\Delta\mathbf{u}_k) = 0 \end{aligned}$$

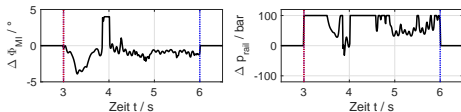
- Wird zu jedem Zeitpunkt im Intervall ausgewertet.



# Ergebnisse am Bsp Rußminimierung

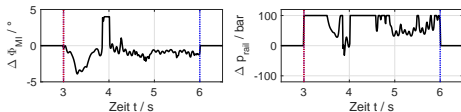
# Ergebnisse am Bsp Rußminimierung

- Die Optimierung liefert die Abweichungen  $\Delta \mathbf{u}_k^*$  von den Referenztrajektorien der definierten Eingangsgrößen.

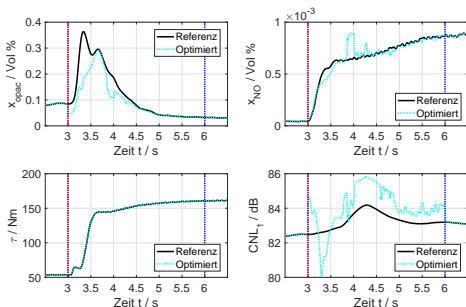


# Ergebnisse am Bsp Rußminimierung

- Die Optimierung liefert die Abweichungen  $\Delta \mathbf{u}_k^*$  von den Referenztrajektorien der definierten Eingangsgrößen.



- Modellauswertung:



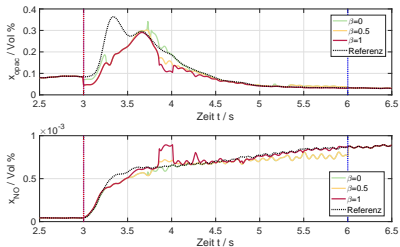


# Ergebnisse im Vergleich



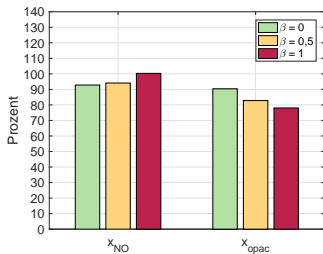
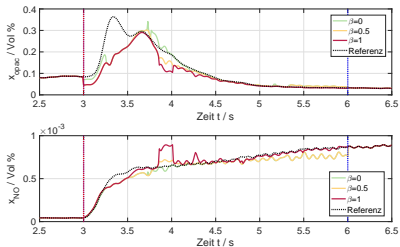
# Ergebnisse im Vergleich

- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



# Ergebnisse im Vergleich

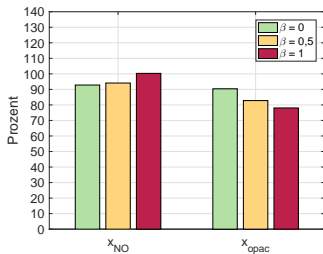
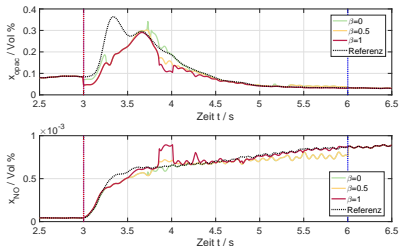
- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)

# Ergebnisse im Vergleich

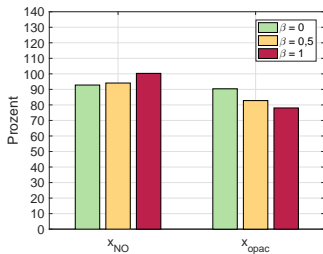
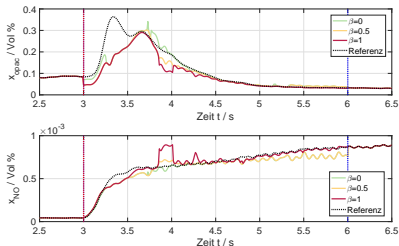
- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)
- Rußentwicklung kann in jedem Fall verringert werden.

# Ergebnisse im Vergleich

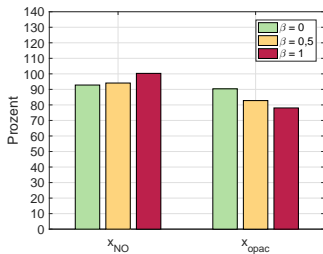
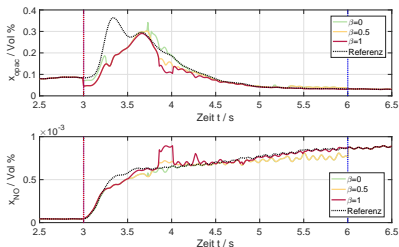
- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)
- Rußentwicklung kann in jedem Fall verringert werden.
- NO-Ausstoß wird nie schlechter als bei der Referenz.

# Ergebnisse im Vergleich

- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)
- Rußentwicklung kann in jedem Fall verringert werden.
- NO-Ausstoß wird nie schlechter als bei der Referenz.
- Trotz Reduktion beider Größen ist ein Trade-off erkennbar.



# Optimierung mit Energiebedingung



# Optimierung mit Energiebedingung

- Die Energiebedingung entspricht einem zusätzlichen Freiheitsgrad



# Optimierung mit Energiebedingung

- Die Energiebedingung entspricht einem zusätzlichen Freiheitsgrad
- Im definierten Intervall muss die gleiche Energie umgesetzt werden.

$$\sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k) = 0$$





# Optimierung mit Energiebedingung

- Die Energiebedingung entspricht einem zusätzlichen Freiheitsgrad
- Im definierten Intervall muss die gleiche Energie umgesetzt werden.

$$\sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k) = 0$$

- Problemformulierung:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} \quad & \sum_{k=1}^N I(\Delta \mathbf{u}_k) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^N \Delta \tau_k(\Delta \mathbf{u}_k) \cdot \omega_{\text{ref},k} \cdot T_s = 0 \end{aligned}$$



# Optimierung mit Energiebedingung

- Die Energiebedingung entspricht einem zusätzlichen Freiheitsgrad
- Im definierten Intervall muss die gleiche Energie umgesetzt werden.

$$\sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k) = 0$$

- Problemformulierung:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} \quad & \sum_{k=1}^N I(\Delta \mathbf{u}_k) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{k=1}^N \Delta \tau_k(\Delta \mathbf{u}_k) \cdot \omega_{\text{ref},k} \cdot T_s = 0 \end{aligned}$$

- Durch die integrale Energiebedingung, muss das gesamte Problem auf einmal gelöst werden. → quadratisches nicht konvexes Problem hoher Dimension ⚡



# Lösungsansatz



# Lösungsansatz

- Ansatz über Lagrange Dualität und Separation



# Lösungsansatz

- Ansatz über Lagrange Dualität und Separation
- Die Energiebedingung wird gewichtet in die Kostenfunktion aufgenommen.

$$L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu) = \sum_{k=1}^N I(\Delta \mathbf{u}_k) + \nu \sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k)$$



# Lösungsansatz

- Ansatz über Lagrange Dualität und Separation
- Die Energiebedingung wird gewichtet in die Kostenfunktion aufgenommen.

$$L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu) = \sum_{k=1}^N l(\Delta \mathbf{u}_k) + \nu \sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k)$$

- duale Kostenfunktion (immer konkav)

$$d(\nu) = \inf_{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu)$$



# Lösungsansatz

- Ansatz über Lagrange Dualität und Separation
- Die Energiebedingung wird gewichtet in die Kostenfunktion aufgenommen.

$$L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu) = \sum_{k=1}^N l(\Delta \mathbf{u}_k) + \nu \sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k)$$

- duale Kostenfunktion (immer konkav)

$$d(\nu) = \inf_{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu)$$

- Vereinfachung erst durch Separation. Infimum und Summe können vertauscht werden. N 2-dim Probleme statt einem 2N-dim Problem.



# Lösungsansatz

- Ansatz über Lagrange Dualität und Separation
- Die Energiebedingung wird gewichtet in die Kostenfunktion aufgenommen.

$$L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu) = \sum_{k=1}^N l(\Delta \mathbf{u}_k) + \nu \sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k)$$

- duale Kostenfunktion (immer konkav)

$$d(\nu) = \inf_{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu)$$

- Vereinfachung erst durch Separation. Infimum und Summe können vertauscht werden. N 2-dim Probleme statt einem 2N-dim Problem.
- Lösen des dualen Problems

$$\max_{\nu} d(\nu) \rightarrow \nu^*$$





# Lösungsansatz

- Ansatz über Lagrange Dualität und Separation
- Die Energiebedingung wird gewichtet in die Kostenfunktion aufgenommen.

$$L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu) = \sum_{k=1}^N l(\Delta \mathbf{u}_k) + \nu \sum_{k=1}^N \Delta E_k(\Delta \mathbf{u}_k)$$

- duale Kostenfunktion (immer konkav)

$$d(\nu) = \inf_{\Delta \mathbf{u}_k \in \mathcal{U}} L(\Delta \mathbf{u}_k, \nu)$$

- Vereinfachung erst durch Separation. Infimum und Summe können vertauscht werden. N 2-dim Probleme statt einem 2N-dim Problem.
- Lösen des dualen Problems

$$\max_{\nu} d(\nu) \rightarrow \nu^*$$

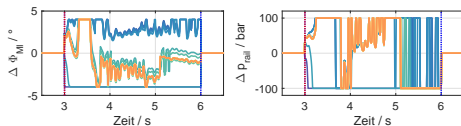
- Optimaler Lagrange-Multiplikator führt zu den optimalen Eingangsabweichungen  $\Delta \mathbf{u}_k^*$



# Ergebnisse am Bsp NO-Minimierung

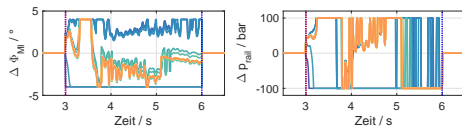
# Ergebnisse am Bsp NO-Minimierung

- Entwicklung der optimalen Eingangsabweichungen

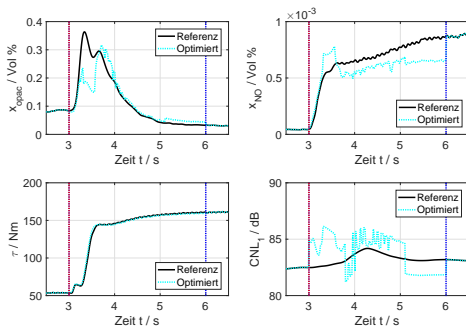


# Ergebnisse am Bsp NO-Minimierung

- Entwicklung der optimalen Eingangsabweichungen



- Modellauswertung:

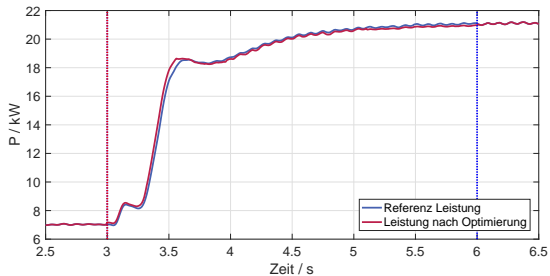




# Energiebedingung im Detail

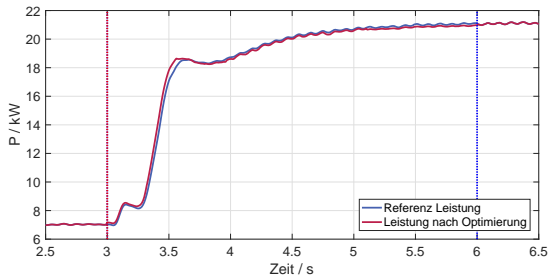
# Energiebedingung im Detail

- Leistungsverlauf bei  $\beta = 0$  (NO-Minimierung)



# Energiebedingung im Detail

- Leistungsverlauf bei  $\beta = 0$  (NO-Minimierung)



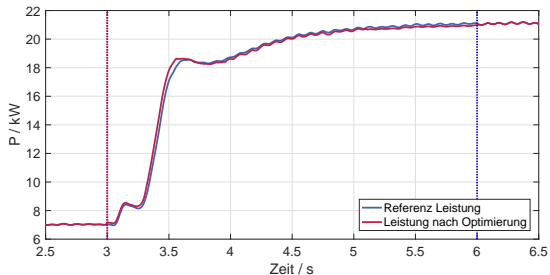
- Leistungen wurden numerisch integriert  $\rightarrow$  Energie

$$E_{ref} = 55.0204 \text{ kJ}$$

$$E_{opt} = 55.0203 \text{ kJ}$$

# Energiebedingung im Detail

- Leistungsverlauf bei  $\beta = 0$  (NO-Minimierung)



- Leistungen wurden numerisch integriert  $\rightarrow$  Energie

$$E_{ref} = 55.0204 \text{ kJ}$$

$$E_{opt} = 55.0203 \text{ kJ}$$

- rel. Fehler:  $< 2 \times 10^{-6} \rightarrow$  Energiebedingung eingehalten  $\checkmark$

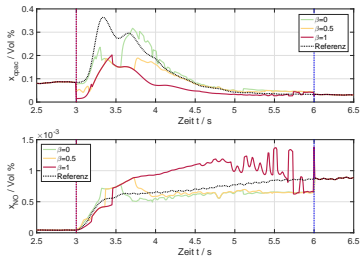




# Ergebnisse im Vergleich

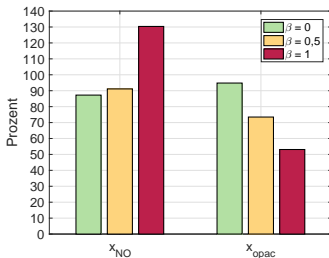
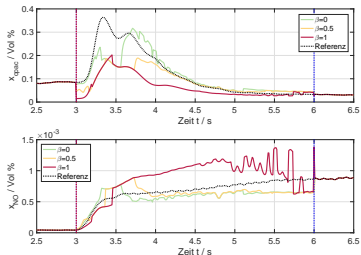
# Ergebnisse im Vergleich

- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



# Ergebnisse im Vergleich

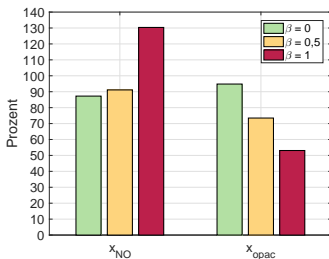
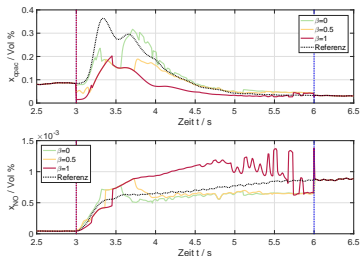
- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)

# Ergebnisse im Vergleich

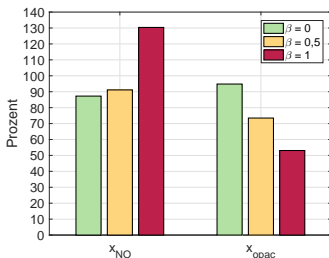
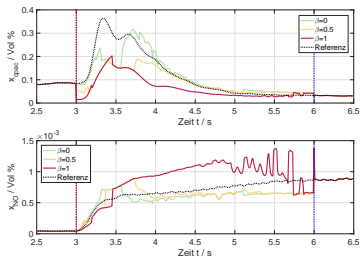
- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)
- Rußentwicklung kann auch hier in jedem Fall verringert werden.

# Ergebnisse im Vergleich

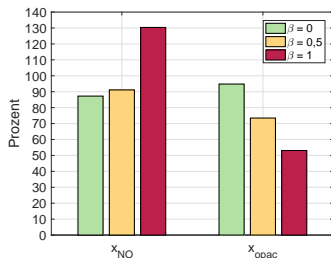
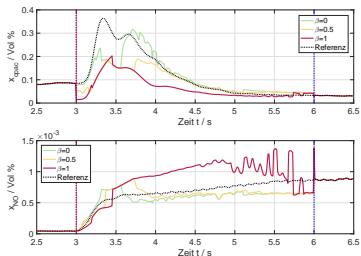
- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)
- Rußentwicklung kann auch hier in jedem Fall verringert werden.
- Gewichtung  $\beta = 1$  ist nicht sinnvoll (NO sehr hoch)

# Ergebnisse im Vergleich

- Emissionstrajektorien bei verschiedenen Gewichtungen  $\beta$  (linke Abb.)



- Integrierte Emissionsverläufe bezogen auf die Referenz (rechte Abb.)
- Rußentwicklung kann auch hier in jedem Fall verringert werden.
- Gewichtung  $\beta = 1$  ist nicht sinnvoll (NO sehr hoch)
- Für die anderen Gewichtungen bessere Ergebnisse als bei der Drehmomentenbedingung

# Validation: Allgemeines





# Validation: Allgemeines

- Beurteilung des Verbesserungspotenzials am realen System





# Validation: Allgemeines

- Beurteilung des Verbesserungspotenzials am realen System
- Bisherige Ergebnisse basieren auf den Modellen



# Validation: Allgemeines

- Beurteilung des Verbesserungspotenzials am realen System
- Bisherige Ergebnisse basieren auf den Modellen
- Motor wird in Open-Loop betrieben

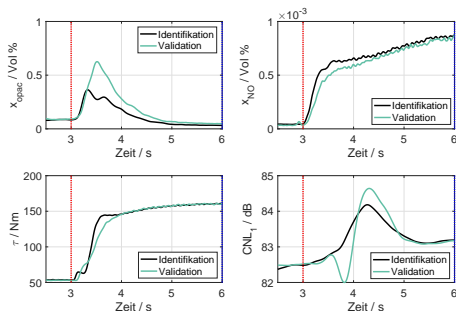


# Validation: Allgemeines

- Beurteilung des Verbesserungspotenzials am realen System
- Bisherige Ergebnisse basieren auf den Modellen
- Motor wird in Open-Loop betrieben
- Die ermittelten optimalen  $\Delta u^*$ -Trajektorien werden zu den Referenzen addiert.

# Validation: Allgemeines

- Beurteilung des Verbesserungspotenzials am realen System
- Bisherige Ergebnisse basieren auf den Modellen
- Motor wird in Open-Loop betrieben
- Die ermittelten optimalen  $\Delta u^*$ -Trajektorien werden zu den Referenzen addiert.
- Vergleich der Referenztrajektorien zeigte deutliche Abweichungen zur Identifikationsmessung ⚡

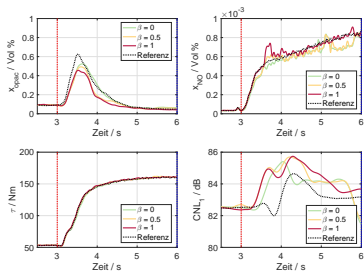




# Drehmomentenbedingung

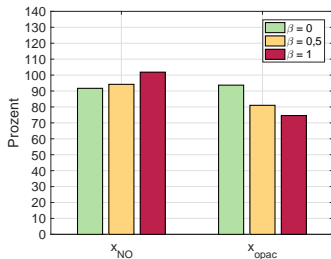
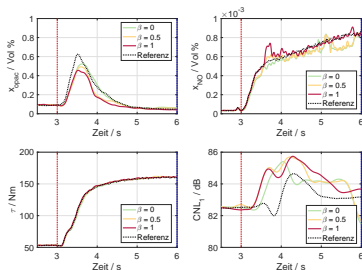
# Drehmomentenbedingung

- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.



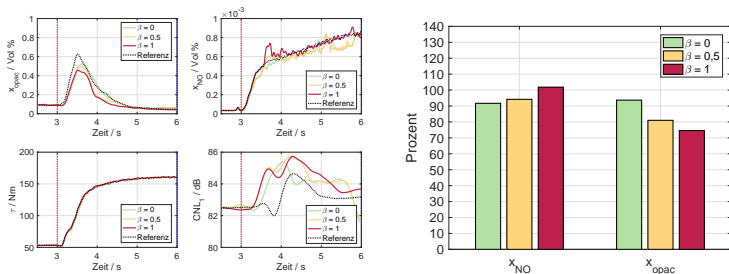
# Drehmomentenbedingung

- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.



# Drehmomentenbedingung

- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.

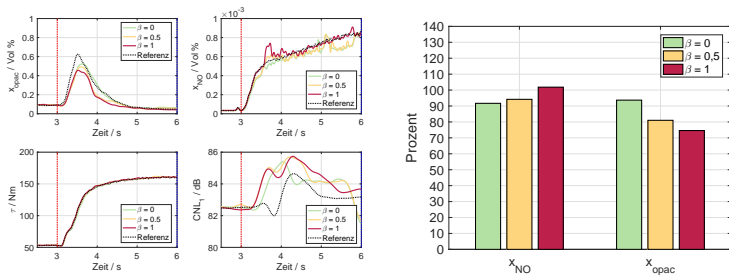


- Zeigt trotz anderer Modelle das gewünschte Verhalten



# Drehmomentenbedingung

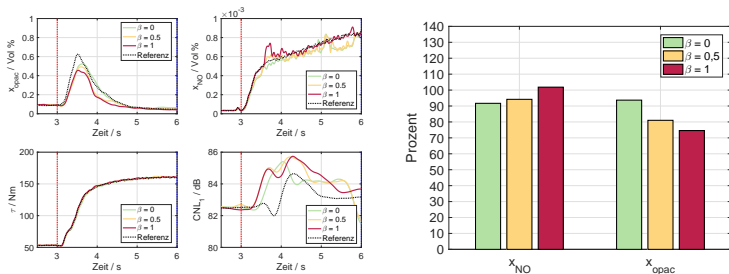
- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.



- Zeigt trotz anderer Modelle das gewünschte Verhalten
- Drehmomentenbedingung eingehalten (m. rel. Fehler:  $< 0.9\%$ )

# Drehmomentenbedingung

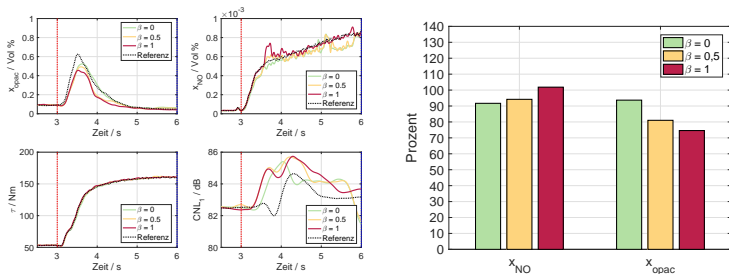
- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.



- Zeigt trotz anderer Modelle das gewünschte Verhalten
- Drehmomentenbedingung eingehalten (m. rel. Fehler:  $< 0.9\%$ )
- NO Verlauf ähnlich zur Simulation (Modell gut)

# Drehmomentenbedingung

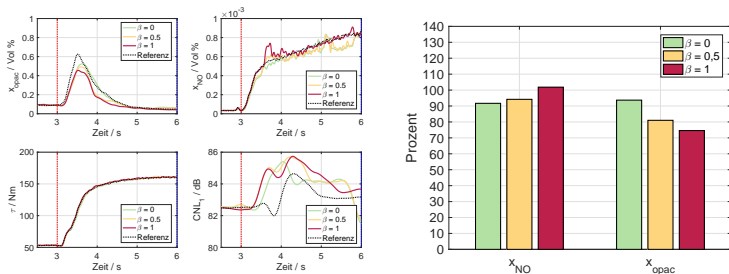
- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.



- Zeigt trotz anderer Modelle das gewünschte Verhalten
- Drehmomentenbedingung eingehalten (m. rel. Fehler:  $< 0.9\%$ )
- NO Verlauf ähnlich zur Simulation (Modell gut)
- Integrierte relative Emissionen sehr ähnlich zur Simulation

# Drehmomentenbedingung

- Die zuvor modellierten Größen wurden gemessen und für unterschiedliche Gewichtungen der Kostenfunktion dargestellt.



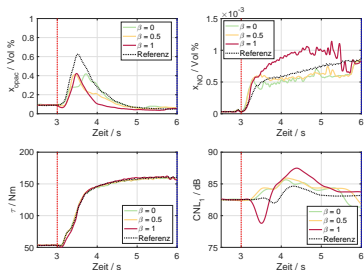
- Zeigt trotz anderer Modelle das gewünschte Verhalten
- Drehmomentenbedingung eingehalten (m. rel. Fehler:  $< 0.9\%$ )
- NO Verlauf ähnlich zur Simulation (Modell gut)
- Integrierte relative Emissionen sehr ähnlich zur Simulation
- Durchschnittlich höherer Geräuschpegel



# Energiebedingung

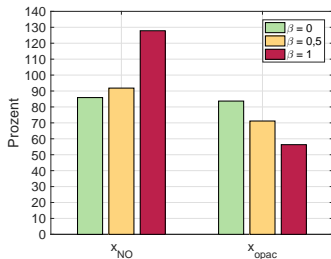
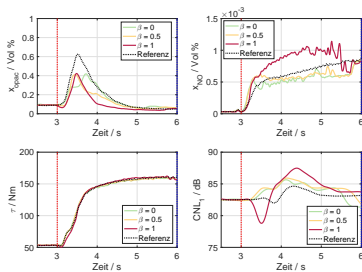
# Energiebedingung

- Erneuter Vergleich der gemessenen Größen bei unterschiedlichen Gewichtungen der Kostenfunktion



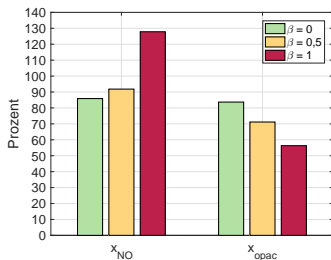
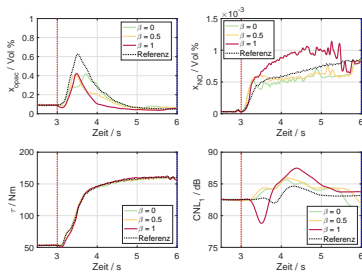
# Energiebedingung

- Erneuter Vergleich der gemessenen Größen bei unterschiedlichen Gewichtungen der Kostenfunktion



# Energiebedingung

- Erneuter Vergleich der gemessenen Größen bei unterschiedlichen Gewichtungen der Kostenfunktion

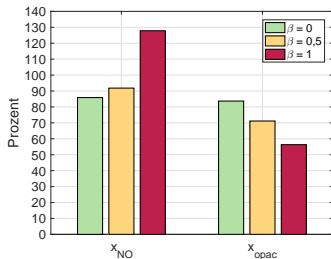
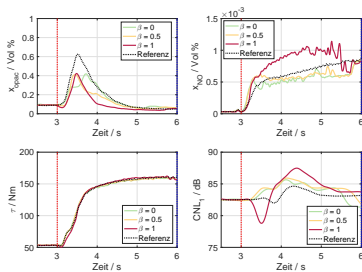


- Die Optimierung zeigt ebenfalls gewünschtes Verhalten



# Energiebedingung

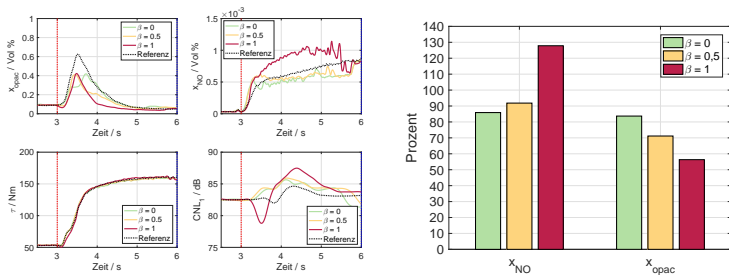
- Erneuter Vergleich der gemessenen Größen bei unterschiedlichen Gewichtungen der Kostenfunktion



- Die Optimierung zeigt ebenfalls gewünschtes Verhalten
- Energiebedingung ausreichend eingehalten (rel. Fehler:  $< 0.3\%$ )

# Energiebedingung

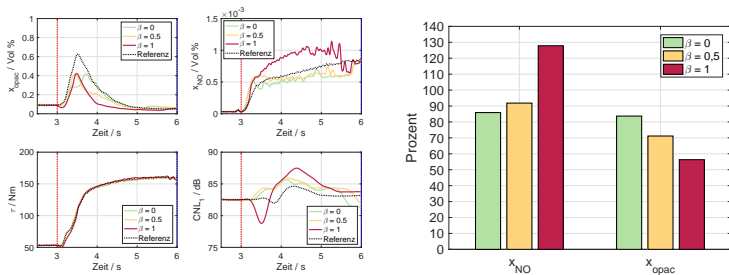
- Erneuter Vergleich der gemessenen Größen bei unterschiedlichen Gewichtungen der Kostenfunktion



- Die Optimierung zeigt ebenfalls gewünschtes Verhalten
- Energiebedingung ausreichend eingehalten (rel. Fehler:  $< 0.3\%$ )
- Integrierte relative Emissionen sehr ähnlich zur Simulation

# Energiebedingung

- Erneuter Vergleich der gemessenen Größen bei unterschiedlichen Gewichtungen der Kostenfunktion



- Die Optimierung zeigt ebenfalls gewünschtes Verhalten
- Energiebedingung ausreichend eingehalten (rel. Fehler:  $< 0.3\%$ )
- Integrierte relative Emissionen sehr ähnlich zur Simulation
- Für Gewichtungen  $\beta \in \{0, 0.5\}$  wieder bessere Ergebnisse als bei der Drehmomentenbedingung

# Zusammenfassung



# Zusammenfassung

- Übergang von Drehmomenten- auf Energiebedingung am realen System:

Gewichtung	$x_{NO}$ / %	$x_{Opac}$ / %
$\beta = 0$	-5,8	-10,0
$\beta = 0.5$	-2,4	-9,8
$\beta = 1$	+25,8	-18,3

# Zusammenfassung

- Übergang von Drehmomenten- auf Energiebedingung am realen System:

Gewichtung	$x_{NO}$ / %	$x_{Opac}$ / %
$\beta = 0$	-5,8	-10,0
$\beta = 0.5$	-2,4	-9,8
$\beta = 1$	+25,8	-18,3

- Die Energiebedingung birgt weiteres Potenzial zur Reduktion der Emissionen.

# Zusammenfassung

- Übergang von Drehmomenten- auf Energiebedingung am realen System:

Gewichtung	$x_{NO}$ / %	$x_{Opac}$ / %
$\beta = 0$	-5,8	-10,0
$\beta = 0.5$	-2,4	-9,8
$\beta = 1$	+25,8	-18,3

- Die Energiebedingung birgt weiteres Potenzial zur Reduktion der Emissionen.
- Diese Erkenntnis kann für zukünftige Regel-/Optimierungsalgorithmen des transienten Betriebs verwendet werden.

# Zusammenfassung

- Übergang von Drehmomenten- auf Energiebedingung am realen System:

Gewichtung	$x_{NO}$ / %	$x_{Opac}$ / %
$\beta = 0$	-5,8	-10,0
$\beta = 0.5$	-2,4	-9,8
$\beta = 1$	+25,8	-18,3

- Die Energiebedingung birgt weiteres Potenzial zur Reduktion der Emissionen.
- Diese Erkenntnis kann für zukünftige Regel-/Optimierungsalgorithmen des transienten Betriebs verwendet werden.
- kürzeres Optimierungsintervall könnte weitere Verbesserungen bewirken.