

Exakte Füllungssteuerung am aufgeladenen Verbrennungsmotor

Robert Beckmann, IAT, Universität Rostock
robert.beckmann@uni-rostock.de

Wolfgang Drewelow, IAT, Universität Rostock
wolfgang.drewelow@uni-rostock.de

Zusammenfassung

Basierend auf einem umfangreichen Modell des Luft- und Abgaspfades eines aufgeladenen Ottomotors wird eine Vorsteuerung entworfen mit der über die Stellgrößen *Drosselklappenposition*, *Einlassnockenwellenposition* sowie *Wastegatetastverhältnis* die Massen von Frischluft und Restgas in den Zylindern exakt eingestellt werden. Der Vorsteuerungsentwurf orientiert sich dabei weitgehend am Konzept der exakten Ein- Ausgangslinearisierung nach [1].

1 Einleitung

Ziel dieses Beitrages ist der Entwurf einer Füllungsvorsteuerung für einen aufgeladenen Ottomotor nach dem Prinzip der *exakten Linearisierung* [1], [2]. Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Motor handelt es sich um einen 1.4l TSI Motor von Volkswagen. Es werden mit den drei Stellgrößen Drosselklappenposition, Einlassnockenwellenposition und Wastegatetastverhältnis, die zwei primären Regelgrößen Frischluftmasse und die Restgasmasse in den Zylindern eingestellt. Die Motivation dieser Problemstellung liegt in der Bedeutung dieser Massen für den ottomotorischen Prozess.

Über die Frischluftmasse (oder auch Füllung) ist definiert, wie viel Drehmoment z.B. für den Vortrieb eines Kraftfahrzeugs zur Verfügung steht. Zwar kommt die für die Momentenerzeugung erforderliche Energie aus dem Kraftstoff, doch wird die eingespritzte Kraftstoffmasse in vielen Betriebspunkten entsprechend der Luftmasse bemessen. Dadurch wird die Luftmasse im Zylinder indirekt zu einer der wichtigsten Einflussgrößen in der Momentenerzeugung.

Über die Restgasmasse, also das Verbrennungsgas bzw. Abgas im Zylinder, wird die Verbrennung hinsichtlich der Abgaszusammensetzung optimiert, um so gesetzlichen Emissionsbestimmungen gerecht zu werden.

Bei reinen Saugmotoren wird die maximale Frischluftfüllung insbesondere durch den Druck vor der Drosselklappe also den Umgebungsdruck begrenzt. Wird durch eine geeignete konstruktive Maßnahme dieser Druck auf ein Niveau über dem Umgebungsdruck

gehoben, ist es möglich eine größere Frischluftmasse in den Zylindern zu realisieren. Eine solche Einrichtung ist beispielsweise ein Abgasturbolader. In frühen Realisierungen dieses Konzeptes ist keine Stelleinrichtung für den Abgasturbolader vorgesehen, was einen reduzierten Wirkungsgrad und eine erhöhte Klopfneigung zur Folge hat. [3] Zur Steuerung des Abgasturboladers und damit des Drucks vor der Drosselklappe haben sich im Wesentlichen zwei Konzepte durchgesetzt. Während in Dieselmotoren häufig Turbolader mit verstellbaren Turbinenschaufeln (VTG) eingesetzt werden, hat sich im Ottobereich das Konzept des Wastegates mit einem zugeordneten Tastverhältnis als Stellgröße durchgesetzt.

Innerhalb einer Motorsteuerung ist die Füllungssteuerung ein Bestandteil der Füllungsregelung. Diese ist wiederum das Bindeglied zwischen der übergeordneten Momentenkoordination und den Positionsregelungen der Aktuatoren. Betätigt der Fahrer das Gaspedal, kann dies im Fahrbetrieb vom Motorsteuergerät als Momentenwunsch interpretiert werden. Diese Momentenänderung kann auf verschiedenen Stellpfaden wie beispielsweise dem Zündwinkel, dem Verdichtungsverhältnis oder der Füllung realisiert werden. Die einzelnen Stellpfade besitzen verschiedene Trägheiten bzw. Verzögerungen. Der Zündwinkel ist ein sehr schneller Stellpfad. Er kann praktisch ohne Verzögerung von Verbrennung zu Verbrennung variiert werden. Sein Nachteil ist, dass er den Wirkungsgrad der Verbrennung (negativ) beeinflusst und dass er starken Stellbegrenzungen unterliegt. Dagegen ist die Füllung als zentraler Stellpfad, wenn sie durch die Drosselklappe und Wastegatetastverhältnis gestellt wird, vergleichsweise träge.

Aus diesem Grund ist es für die Füllungssteuerung umso wichtiger Sollfüllungsänderungen unter Ausnutzung des gesamten Stellbereichs zu realisieren. In vielen Veröffentlichungen wird entweder die Luftmasse oder die Restgasmasse im Rahmen einer Regelung dem Sollwert nachgeführt. [4], [5], [6], [7] Und dies entweder im Saug- oder im Ladebetrieb.

Die in diesem Beitrag vorgestellte dynamische Vorsteuerung ist eine modellgestützte Vorsteuerung. Bei dem verwendeten Modell handelt sich es um ein nulldimensionales Mittelwertmodell (*mean value engine model - MVEM*) das bedeutet, es werden weder die räumliche Anordnung noch einzelne Arbeitstakte des verbrennungsmotorischen Prozesses aufgelöst. Dieser Ansatz ist weitverbreitet und vor allem aus Steuerungssicht hinreichend detailliert.

Durch unbekannte Anfangszustände, Störungen, Modellunsicherheiten, und Prozessalterung kommt es zu Abweichungen zwischen Modell- und Prozessgrößen. Um Stellfehler durch Unsicherheiten dieser Art zu kompensieren, wird die Vorsteuerung zusätzlich in eine Regelungsstruktur eingebettet. Diese wird jedoch nicht Gegenstand dieses Beitrages sein.

Im folgenden Abschnitt wird das Prozessmodell beschrieben und es werden erste einfache Modellanpassungen eingeführt um grundlegende Strukturvoraussetzungen der exakten Ein- Ausgangslinearisierung zu erfüllen. Im dritten Abschnitt wird, basierend auf einer strukturellen Modellanalyse, eine Steuerungsstrategie bestimmt. Zur Umsetzung dieser Strategie werden zusätzlich zahlreiche Zustandserweiterungen eingeführt. In Un-

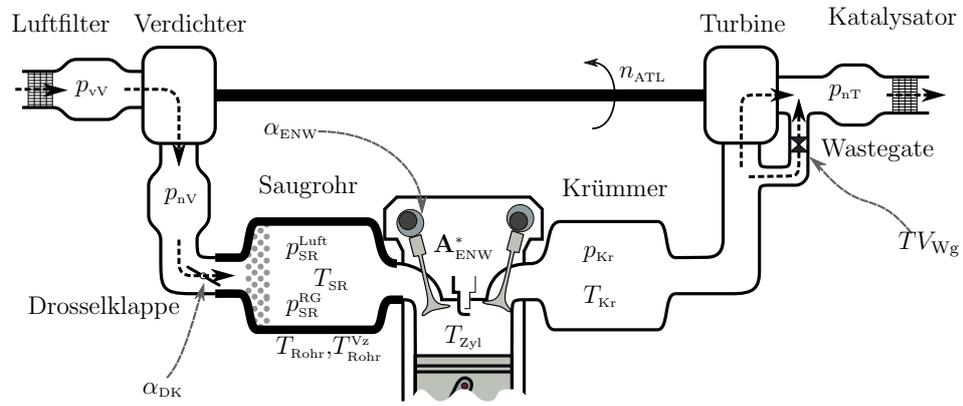


Abbildung 1: Übersicht der Prozesskomponenten sowie der Zustände des Prozessmodells

terabschnitt 3.1 wird schließlich der Ansatz für das Stellgesetz angegeben. Die simulative Untersuchung der Vorsteuerung in Verbindung mit dem Entwurfs- und dem Prozessmodell findet sich im vierten Abschnitt. Den Abschluss dieses Beitrages bildet der fünfte Abschnitt, hier wird eine kurze Zusammenfassung gegeben.

2 Modellbeschreibung

Bei dem eingesetzten Modell des Luft- und Abgaspfades des aufgeladenen Ottomotors handelt es sich um ein zeitkontinuierliches Mittelwertmodell (MVEM - mean value engine model). Ansatz bei Modellen dieser Art ist in den Rohrstücken zwischen den einzelnen thermodynamisch relevanten Komponenten den Druck und gegebenenfalls auch die Temperatur des Gases über gewöhnliche Differentialgleichungen zu beschreiben. Diese Differentialgleichungen sind beispielsweise über den Strömungswiderstand der angrenzenden Komponenten verkoppelt. Der Modellierungsansatz wird allgemein als *Füll- Entleermethode* bezeichnet. [8], [9] Auf diese Weise entsteht ein System gekoppelter Differentialgleichungen. In dieser Arbeit wird auf die Einführung und Erörterung der Modellgleichungen verzichtet. Stattdessen wird über die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Differentialgleichungen ausschließlich die Modellstruktur angegeben.

Im Betrieb eines aufgeladenen Verbrennungsmotors können zwei Betriebsarten unterschieden werden. In der ersten, dem *Saugbetrieb*, wird die Drosselklappenposition α_{DK} derart gewählt, dass sich die vom Fahrer geforderte Luftmasse in den Zylindern einstellt. Übersteigt die geforderte Luftmasse die mit dem Grundladedruck realisierbare Luftmasse, wird in den *Ladebetrieb* gewechselt. Hier wird über den Abgasturbolader der Ladedruck (Druck vor Drosselklappe bzw. Druck nach Verdichter) p_{nV} über das Niveau des Grundladedrucks erhöht. Dabei ist es unter ökonomischen Gesichtspunkten vorteilhaft die Drosselklappe vollständig zu öffnen. Die Steuerung des Turboladers und damit des Ladedrucks erfolgt über das Wastegatetastverhältnis TV_{Wg} .

Durch das Turbinenrad wird im Abgasturbolader dem heißen Abgas ein Teil seiner Energie entnommen, um damit im Verdichter auf der Frischluftseite die angesaugte Luft zu komprimieren und den geförderten Luftmassenstrom sowie den Druck vor der Drossel-

klappe zu erhöhen. In vielen Arbeitspunkten stellt ein Abgasturbolader eine mechanische Mitkopplung dar. Ein höherer Luftmassenstrom bedingt einen höheren Abgasmassenstrom und damit mehr Energie zur Kompression der Frischluft. Um diese Mitkopplung aufzulösen und den Abgasturbolader zu steuern wird in Ottomotoren häufig ein Bypass um die Turbine, das *Wastegate*, verbaut. Der Massenstrom durch diesen Bypass wird über ein Ventil gesteuert. Ist es geöffnet sinkt die Turbinenleistung, ist es geschlossen steigt sie. Die Ansteuerung des Ventils erfolgt über den Druck in der *Wastegatedruckdose*. (in Abbildung 1 nicht dargestellt.) In dieser wird über das *Wastegatetastverhältnis* ein Mischdruck zwischen Ladedruck p_{nV} und Umgebungsdruck p_{amb} eingestellt werden. Ein steigender Ladedruck bewirkt die Öffnung des Ventils und so ein Absinken der Turbinenleistung. Wird der Druck in der Druckdose über das Tastverhältnis abgelassen, schließt das Bypassventil, wodurch die Turbinenleistung und dadurch der geförderte Luftmassenstrom steigt. [10] Der Stellbereich des *Wastegatetastverhältnis*' ist dabei $0\% \leq TV_{Wg} \leq 100\%$. Durch die Konstruktion am betrachteten Motor, wird die Öffnung und damit die durchströmte Fläche A_{WG} am Wastegate nicht allein durch das Tastverhältnis TV_{Wg} , den Ladedruck p_{nV} und dem Umgebungsdruck p_{amb} bestimmt, sondern zusätzlich durch den Druckgradienten über dem Wastegate $p_{Kr} - p_{nT}$. Durch die zahlreichen Beziehungen zu den Modellzuständen ist die Steuerung des Ladedrucks eine anspruchsvolle Aufgabe.

Die Kompression der angesaugten Luft bedingt je nach Arbeitspunkt eine z.T. erhebliche Erhöhung der Temperatur nach Verdichter. Durch diesen Effekt nimmt die Luftdichte und damit in der Folge auch die realisierbare Luftmasse in den Zylindern ab. Zur Kühlung des Luftmassenstroms wird in aufgeladenen Motoren ein Ladeluftkühler verbaut. Da die Kenntnis der Gastemperatur an den Einlassventilen des Motors von besonderer Bedeutung ist, wird auch die Temperatur der Saugrohrwand durch ein Modell zweiter Ordnung T_{Rohr} , T_{Rohr}^{Vz} berücksichtigt. Mit dieser kann ein Wärmestrom in Richtung Saugrohrtemperatur T_{SR} modelliert, und dadurch zusätzliche Freiheitsgrade in der Modellierung gewonnen werden.

Die Turboladerdrehzahl n_{ATL} ist ein weiterer wichtiger Zustand im Modell des aufgeladenen Ottomotors. Ihre Änderung ist eine Funktion der Leistungsbilanz an der Turboladerwelle. Von der Turboladerdrehzahl hängt insbesondere der geförderte Massenstrom, und damit der Druck vor der Drosselklappe p_{nV} ab. Im Saugbetrieb wird der Grundladedruck gedrosselt, um einen Saugrohrdruck p_{SR} zu realisieren, mit dem dann die vom Fahrer angeforderte Luftmasse im Zylinder erreicht wird. Die Strategie des Abdrosselns ist auch im Ladebetrieb möglich, aber wie bereits erwähnt, aus ökonomischen Gründen unerwünscht. Die Drosselklappe ist damit ein sehr wichtiges Stellglied im fremd gezündeten Verbrennungsmotor.

In vielen Otto- und Dieselmotoren wird das Konzept der Abgasrückführung eingesetzt. Bei dem betrachteten Motor wird dies über eine interne Abgasrückführung realisiert. Dabei kann über die Phasenlage der Einlassnockenwelle der Zeitpunkt, an dem die Einlassventile öffnen in jedem Arbeitsspiel variiert werden. Werden die Einlassventile bereits geöffnet, wenn die Auslassventile noch nicht geschlossen sind, bildet sich über diese *Ven-*

tilüberschneidung ein Abgasmassenstrom vom Auslasskrümmer in Richtung Saugrohr aus. So gelangt ein gewisser Restgasanteil in das Saugrohr, welcher dann in den folgenden Ansaugtakten in die Zylinder gesogen wird. Über die Stärke der Ventilüberschneidung wird der Massenstrom und somit der Restgasanteil im Saugrohr und den Zylindern gesteuert. Ziel des Konzeptes ist über den Restgasanteil im Zylinder die Verbrennungstemperatur, den Brennverlauf und damit schließlich die Abgaszusammensetzung derart zu beeinflussen, dass strenger werdende gesetzliche Abgasnormen eingehalten werden können.

Da sich zwei Gase mit unterschiedlichen Wärmekapazitäten im Saugrohr befinden, und diese Gase mit sehr unterschiedlichen Temperaturen in das Saugrohr strömen, wird neben der Massen- auch die Energiebilanz für diesen Behälter betrachtet. Zusätzlich zu den Partialdrücken von Luft $p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}$ und Restgas $p_{\text{SR}}^{\text{RG}}$ im Saugrohr, wird die Saugrohrtemperatur T_{SR} zur Modellierung des Saugrohrs genutzt. [11]

Das angesaugte und verbrannte Gasgemisch wird während des Ausstoßtaktes in den Auslasskrümmer gepumpt, wo sich der *Druck vor Turbine (Krümmerdruck)* p_{Kr} ausbildet. Dieser bestimmt die Turbinenleistung also die Leistung, mit der der Abgasturbolader betrieben wird. Ein Schließen des Wastegateventils hat einen steigenden Krümmerdruck p_{Kr} und damit eine größere Turbinenleistung zur Folge.

Damit ist die Struktur des nichtlinearen Differentialgleichungssystems vollständig beschrieben. Dieses wird ergänzt durch die regelungstechnisch relevanten Ausgänge des Modells. Wie im ersten Abschnitt beschrieben sind dies die Massen von Luft $m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}$ und Restgas $m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}$ in den Zylindern. Diese sind Funktionen der umgebenden Zustände und sind im Wesentlichen proportional zu den Massenströmen in die Zylinder und der Motordrehzahl n_{Mot} . Neben der Ventilüberschneidung hat die Einlassnockenwellenposition und damit der Zeitpunkt an dem die Einlassventile öffnen auch einen erheblichen Einfluss auf das Pumpverhalten des Motors, und damit in der Folge auf die Massen im Zylinder. Durch diese Überlegungen können die Abhängigkeiten

$$m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}} = F_1(p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}, p_{\text{SR}}^{\text{RG}}, T_{\text{Zyl}}, p_{\text{Kr}}, T_{\text{Kr}}, \alpha_{\text{ENW}}, n_{\text{Mot}}) \quad (1)$$

$$m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}} = F_2(p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}, p_{\text{SR}}^{\text{RG}}, T_{\text{Zyl}}, p_{\text{Kr}}, T_{\text{Kr}}, \alpha_{\text{ENW}}, n_{\text{Mot}}) \quad (2)$$

für die Modellausgänge angegeben werden. Damit ist das physikalisch motivierte Modell des aufgeladenen Ottomotors vollständig. In den folgenden Unterabschnitten wird das Modell hinsichtlich des Steuerungsentwurfs erweitert, es wird auf Realisierungsaspekte eingegangen und außerdem wird das zugehörige Strukturmodell angegeben.

2.1 Modellanpassung

Das im vorherigen Abschnitt beschriebene Modell enthält elf Zustände, drei Eingänge und zwei Ausgänge. Für die exakte Ein- Ausgangslinearisierung, muss das Modell abweichende strukturelle Voraussetzungen erfüllen. Das Modell muss erstens quadratisch sein, dass bedeutet die Anzahl der Eingänge muss der Anzahl der Ausgänge entsprechen und zweitens darf das Modell keinen Durchgriff haben. [1]

2.1.1 Einführung der Ladereserve

Die Entkoppelung der Ein- und Ausgänge und damit die exakte Ein- Ausgangslinearisierung ist nach [1], [12] nur für quadratische Systeme möglich. Das in Abschnitt 2 beschriebene Modell des Luft- und Abgaspfades mit drei Eingängen α_{DK} , α_{ENW} , TV_{Wg} und den zwei Ausgängen m_{Zyl}^{Luft} , m_{Zyl}^{RG} ist jedoch nicht quadratisch. Die beiden Stellgrößen α_{DK} und TV_{Wg} wirken beide insbesondere auf die Füllung m_{Zyl}^{Luft} . Um das System quadratisch zu machen, wird als zusätzlicher, steuerungstechnisch sinnvoller Ausgang die *Ladereserve*

$$p_{LR} = p_{nV} - p_{SR}^{Luft} - p_{SR}^{RG} \quad (3)$$

als Differenz zwischen dem Ladedruck und dem Saugrohrdruck eingeführt. Die Relevanz dieses Ausgangs liegt in dem Ziel des entdrosselten Ladebetriebs begründet. Für einen maximal entdrosselten Betrieb ($p_{SR} \approx p_{nV}$) wird in der Steuerung der Referenzwert der Ladereserve auf $\check{p}_{LR} = 0$ gesetzt. Dieser Arbeitspunkt ist ausschließlich mit einer vollständig geöffneten Drosselklappe realisierbar.

2.1.2 Approximation des Durchgriffs

Nach (1) und (2) sind die zwei Ausgänge m_{Zyl}^{RG} , m_{Zyl}^{RG} Funktionen des Eingangs α_{ENW} . Das bedeutet, das System hat Durchgriff. Dies ist nach [1] nicht vorgesehen. Um die exakte Ein- Ausgangslinearisierung dennoch auf das System anwenden zu können, wird in der Berechnung der Zylindermassen von der verzögerten Einlassnockenwellenposition

$$\frac{d}{dt} A_{ENW}^* = \lambda_{ENW} (\phi_{ENW}(\alpha_{ENW}) - A_{ENW}^*) \quad (4)$$

ausgegangen. In Verbindung mit einem genügend großen Parameter λ_{ENW} werden mit

$$m_{Zyl}^{Luft} = F_1(p_{SR}^{Luft}, p_{SR}^{RG}, T_{Zyl}, p_{Kr}, T_{Kr}, A_{ENW}^*, n_{Mot}) \quad (5)$$

$$m_{Zyl}^{RG} = F_2(p_{SR}^{Luft}, p_{SR}^{RG}, T_{Zyl}, p_{Kr}, T_{Kr}, A_{ENW}^*, n_{Mot}) \quad (6)$$

die ursprünglichen Ausgangsfunktionen (1) und (2) approximiert.

<i>Bez.</i>	Bedeutung	<i>Bez.</i>	Bedeutung
p_{vV}	Druck vor Verdichter	p_{nV}	Druck nach Verdichter
p_{SR}^{Luft}	Partialdruck Luft	p_{SR}^{RG}	Partialdruck Restgas
T_{SR}	Gastemperatur im Saugrohr	T_{Zyl}	Gastemperatur im Zylinder
T_{Rohr}	Saugrohrwandtemperatur	T_{Rohr}^{Vz}	verzögerte Saugrohrwandtemperatur
p_{Kr}	Druck im Auslasskrümmer	T_{Kr}	Temperatur im Auslasskrümmer
n_{ATL}	Turboladerdrehzahl	A_{ENW}^*	verzögerte Einlassnockenwellenfläche

Tabelle 1: Modellzustände und ihre Bedeutung

2.2 Modellrealisierung

Das beschriebene Modell des Luft- und Abgaspfades des aufgeladenen Ottomotors ist in Matlab/Simulink implementiert. Es enthält, wie bei steuergeräteorientierten Modellen üblich, zahlreiche Kennlinien und Kennfelder um komplexe statische, physikalische Zusammenhänge empirisch zu beschreiben. Beispielsweise wird der Zusammenhang zwischen dem Druckabfall im Luftfilter und dem Massenstrom durch den Luftfilter durch eine Kennlinie beschrieben. Während Kennlinien dieser Art in seriennahen Motorsteuergeräten in Form von grob aufgelösten Tabellen abgelegt sind, in denen im Betrieb interpoliert wird, werden in dem hier verwendeten Modell ausschließlich glatte, also hinreichend oft stetig differenzierbare funktionale Ansätze verwendet. Zusätzlich wurde im Hinblick auf die spätere Steuerung darauf geachtet, dass alle erforderlichen Kennlinien und Kennfelder, mindestens im relevanten Definitions- und Wertebereich, umkehrbar eindeutig sind. Teilmodelle, die im Rahmen der Steuerung nicht invertiert werden müssen, werden mit einem *Support Vector Regression* - Ansatz [13] realisiert. Durch die Berücksichtigung der Invertierbarkeit und der Glattheit ist später die Exaktheit der Vorsteuerung sehr einfach nachzuweisen. Alle Teilmodelle wurden basierend auf umfangreichen Prüfstandsmessungen kalibriert.

Grundsätzlich kann die Modellstruktur nur in der allgemeinen Form expliziter, nicht-linearer Systeme

$$\frac{d}{dt}x = f(x, \gamma, u) \quad (7a)$$

$$y = h(x, \gamma) \quad (7b)$$

angegeben werden, wobei externe, zeitvariable Parameter in $\gamma = (n_{Mot}, T_{Mot}, p_{amb}, T_{amb})$ zusammengefasst werden. Aufgrund des Modellumfangs ist eine analytische Modellanalyse schwierig. Deswegen wird zunächst die Modellstruktur untersucht. Dazu wird nach [12] das korrespondierende Strukturmodell (2.2) aufgestellt. Dieses ist linearisierten Modellen sehr ähnlich. Der Unterschied ist, dass statt der analytischen Zusammenhänge in den einzelnen Zellen der System-, Eingangs- und Ausgangsmatrix ausschließlich festgehalten ist, ob die entsprechende Zelle besetzt ist oder nicht. Damit beschreibt das Strukturmodell zwischen welchen Prozessgrößen eine Beziehung besteht.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{vV} \\ \dot{p}_{hV} \\ \dot{p}_{SR}^{Luft} \\ \dot{p}_{SR}^{RG} \\ \dot{T}_{SR} \\ \dot{T}_{Rohr} \\ \dot{T}_{Rohr}^{Vz} \\ \dot{T}_{Zyl} \\ \dot{p}_{Kr} \\ \dot{T}_{Kr} \\ \dot{n}_{ATL} \\ \dot{A}_{ENW}^* \\ m_{Zyl}^{Luft} \\ m_{Zyl}^{RG} \\ p_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{vV} \\ p_{hV} \\ p_{SR}^{Luft} \\ p_{SR}^{RG} \\ T_{SR} \\ T_{Rohr} \\ T_{Rohr}^{Vz} \\ T_{Zyl} \\ p_{Kr} \\ T_{Kr} \\ n_{ATL} \\ A_{ENW}^* \\ m_{Zyl}^{Luft} \\ m_{Zyl}^{RG} \\ p_{LR} \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} 0_{DK} \\ 0_{ENW} \\ TV_{Wg} \end{bmatrix} \cdot u$$

Abbildung 2: Strukturmodell des Luft- und Abgaspfadmodells

3 Vorsteuerungsentwurf

Bevor die Vorsteuerung basierend auf dem Modell des aufgeladenen Ottomotors entworfen werden kann, wird zunächst die Vorsteuerungsstrategie definiert. Aufgrund der Prozess- und Modellstruktur und damit den Beziehungen zwischen den Modellzuständen, sind grundsätzlich zwei verschiedene Steuerungsstrategien möglich.

Um zu zeigen welche davon realisierbar ist, werden zunächst die Begriffe des Differenzgrades und des relativen Grades eingeführt.

Definition 3.1 (nach [14]) *Ein Mehrgrößen System der Form (7) hat den Vektordifferenzgrad d für alle x in einer Umgebung \mathcal{U}_0 von x_0 :*

$$d = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}. \quad (8)$$

Die Zahlen d_i mit $i = 1 \dots m$ entsprechen jeweils dem kleinsten $k \in \mathbb{N}^+$, für das die Bedingung

$$\frac{\partial y_i^{(k)}}{\partial u} = \frac{\partial d^k y_i}{\partial u dt^k} \begin{cases} = 0 & \text{für } k = 1, 2, \dots, d_i - 1 \\ \neq 0 & \text{für } k = d_i \end{cases} \quad (9)$$

erfüllt ist.

Danach wird jede Ausgangskomponente solange abgeleitet, bis sie eine Funktion mindestens eines Stelleingangs ist. Werden die Zeilendifferenzgrade d_i zu einer Matrix zusammengefasst, ergibt sich die *Entkopplungsmatrix* zu:

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1^{(d_1)}}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial y_1^{(d_1)}}{\partial u_m} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial y_m^{(d_m)}}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial y_m^{(d_m)}}{\partial u_m} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Ist die Entkopplungsmatrix zusätzlich regulär, geht der Differenzegrad d in den wohldefinierten *vektoriellen relativen Grad* r über. [12] Die Matrix (10) ist die für die Entkoppelbarkeit eines Systems damit von fundamentaler Bedeutung.

Für umfangreiche Systeme, wie dem Modell des aufgeladenen Ottomotors, kann die Bildung der Ableitungen mit dem in [15] vorgestellten Ansatz vollständig in der Simulationsumgebung Matlab/Simulink automatisiert werden. Danach enthält die strukturelle Entkopplungsmatrix

$$D^*(x) = \begin{bmatrix} \star & \star & \star \\ \star & \star & \star \\ \star & \star & \circ \end{bmatrix}. \quad (11)$$

bereits für Vektordifferenzegrad $d = \{1, 1, 1\}$ keine unbesetzten Spalten. Dies ist jedoch nur eine notwendige und keine hinreichende Bedingung für die Regularität der analytischen Entkopplungsmatrix. Aufgrund des großen Umfangs der Matrix ist eine analytische Untersuchung sehr aufwendig. Aus diesem Grund wird Entkoppelbarkeit des Systems heuristisch untersucht.

Dazu wird überprüft ob drei Zustände $p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}$, $p_{\text{SR}}^{\text{RG}}$, p_{Kr} gefunden werden können, mit denen die drei Ausgänge $m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}$, $m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}$, p_{LR} eingestellt werden. Dies ist anstrebenswert, denn alle drei Zustände können durch eine Stellgröße gesteuert werden. Tritt der Fall ein, dass bereits das System der Ausgangsgleichungen nicht nach diesen Zuständen aufgelöst werden kann, ist der Steuerungsentwurf über diese Zustände hinfällig. Eine Aussage über die Lösbarkeit eines Gleichungssystems kann über den *Satz von der Umkehrabbildung* [16] gemacht werden. Ist die Jacobimatrix des Gleichungssystems regulär, kann auch das Gleichungssystem gelöst werden. Für die drei Ausgangsgleichungen:

$$m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}} = F_1(p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}, p_{\text{SR}}^{\text{RG}}, T_{\text{Zyl}}, p_{\text{Kr}}, T_{\text{Kr}}, A_{\text{ENW}}^*, n_{\text{Mot}}) \quad (12a)$$

$$m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}} = F_2(p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}, p_{\text{SR}}^{\text{RG}}, T_{\text{Zyl}}, p_{\text{Kr}}, T_{\text{Kr}}, A_{\text{ENW}}^*, n_{\text{Mot}}) \quad (12b)$$

$$p_{\text{LR}} = F_3(p_{\text{nV}}, p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}, p_{\text{SR}}^{\text{RG}}) \quad (12c)$$

hat die analytische Jacobimatrix

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}} & \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{RG}}} & -\varphi(x) \\ \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}} & \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{RG}}} & \varphi(x) \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \varphi(x) = \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{Kr}}} = -\frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{Kr}}} \quad (13)$$

zunächst eine reguläre Struktur. Trotzdem ist J singulär, denn die Elemente der Saugrohrteilmatrix erfüllen in jedem Arbeitspunkt die Bedingung $\frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}} + \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}} - \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{RG}}} - \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{RG}}} = 0$, wodurch die Determinante

$$\det(J) = \varphi(x) \cdot \left(\frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}} + \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}} - \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{Luft}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{RG}}} - \frac{\partial m_{\text{Zyl}}^{\text{RG}}}{\partial p_{\text{SR}}^{\text{RG}}} \right) = 0 \quad (14)$$

in allen Arbeitspunkten verschwindet. Daraus folgt, dass das Gleichungssystem (12) nicht nach den Zuständen $p_{\text{SR}}^{\text{Luft}}$, $p_{\text{SR}}^{\text{RG}}$, p_{Kr} aufgelöst werden kann und dadurch mit dem Abgasge-

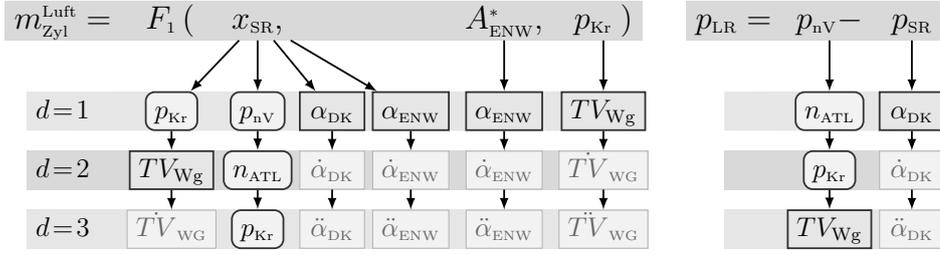


Abbildung 3: Darstellung kritischer Beziehungen von Stellgrößen sowie Eingängen zu Ableitungen der Ausgänge m_{Zyl}^{Luft} , p_{LR} (Ordnung d). Durch die Symmetrie der Ausgänge kann das Ergebnis von m_{Zyl}^{Luft} auf m_{Zyl}^{RG} übertragen werden.

gendruck p_{Kr} als Zwischenstellgröße, die Ausgänge (12) nicht gestellt werden können. Aus diesem Ergebnis folgt das auch die Entkopplungsmatrix (11) für $d = \{1, 1, 1\}$ singularär ist.

Um das System dennoch zu steuern, wird statt des Abgasgedrucks p_{Kr} der Ladedruck p_{nV} als möglicher Steuerzustand neben den Partialdrücken p_{SR}^{Luft} , p_{SR}^{RG} in Betracht gezogen. Um auch hier die Lösbarkeit des Gleichungssystems (12) bezüglich der Zustände p_{SR}^{Luft} , p_{SR}^{RG} , p_{nV} zu überprüfen, wird der Rang der Jacobimatrix

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial m_{Zyl}^{Luft}}{\partial p_{SR}^{Luft}} & \frac{\partial m_{Zyl}^{Luft}}{\partial p_{SR}^{RG}} & 0 \\ \frac{\partial m_{Zyl}^{RG}}{\partial p_{SR}^{Luft}} & \frac{\partial m_{Zyl}^{RG}}{\partial p_{SR}^{RG}} & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

über die Determinante

$$\det(J) = \frac{\partial m_{Zyl}^{Luft}}{\partial p_{SR}^{Luft}} \cdot \frac{\partial m_{Zyl}^{RG}}{\partial p_{SR}^{RG}} - \frac{\partial m_{Zyl}^{RG}}{\partial p_{SR}^{Luft}} \cdot \frac{\partial m_{Zyl}^{Luft}}{\partial p_{SR}^{RG}} \quad (16)$$

berechnet. Wie in [11] bereits nachgewiesen wurde, ist diese Determinante in allen physikalisch sinnvollen Arbeitspunkten ungleich null. Das bedeutet, es können immer zwei Partialdrücke p_{SR}^{Luft} , p_{SR}^{RG} gefunden werden, die zwei Partialmassen m_{Zyl}^{Luft} , m_{Zyl}^{RG} einstellen. Zu diesen Partialdrücken kann weiterhin ein Ladedruck gefunden werden, der die Ladereserve p_{LR} einstellt.

Damit ist die Steuerungsstrategie festgelegt. Über die drei Zustände p_{SR}^{Luft} , p_{SR}^{RG} und p_{nV} werden die drei Komponenten des Ausgangs $y = (m_{Zyl}^{Luft}, m_{Zyl}^{RG}, p_{LR})$ gesteuert. Der Ladedruck wird dabei über die Turboladerdrehzahl n_{ATL} , diese über den Abgasgedruck p_{Kr} und dieser schließlich über das Wastegatetastverhältnis TV_{Wg} eingestellt. Daraus folgt, dass zumindest auf diesem Pfad ein Differenzegrad von $d_3 = 3$ angestrebt wird. Abbildung 3 zeigt von welchen Zuständen und Eingängen die ersten drei Ableitungen der Ausgangskomponenten m_{Zyl}^{Luft} , p_{LR} unter anderem abhängen.

Beispielsweise ist die dritte Ableitung der Ladereserve eine Funktion des Tastverhältnisses TV_{Wg} und der zweiten Ableitung des Drosselklappenwinkels. Da die Ableitungen der Ausgangskomponenten keine Funktionen der Ableitungen der Eingangsgrößen sein dürfen, werden mit dem Konzept der *dynamischen Erweiterung* [1] vor die Eingänge

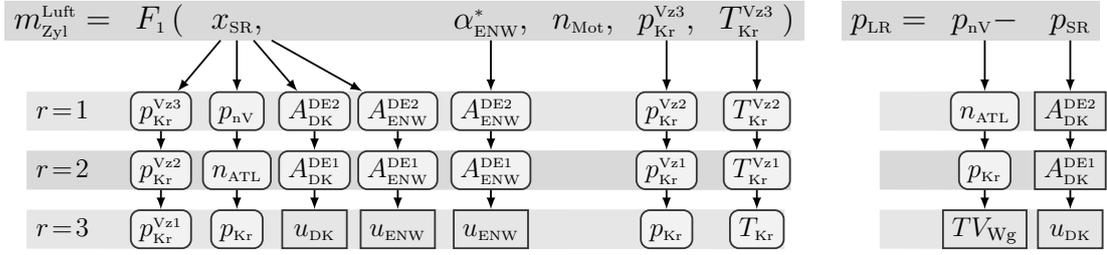


Abbildung 4: *Erweitertes Modell*: Darstellung kritischer Beziehungen von Stellgrößen sowie Eingängen zu Ableitungen der Ausgänge m_{Zyl}^{Luft} , p_{LR} (Ordnung d). Durch die Symmetrie der Ausgänge kann das Ergebnis von m_{Zyl}^{Luft} auf m_{Zyl}^{RG} übertragen werden.

α_{DK} und α_{ENW} jeweils zwei ($A_{DK}^{DE1}, A_{DK}^{DE2}, A_{ENW}^{DE1}, A_{ENW}^{DE2}$) zusätzliche Zustände geschaltet. Diese können im einfachsten Fall Integratoren sein. Hier werden zwei, jeweils frei konfigurierbare, lineare Systeme zweiter Ordnung ohne Nullstellen mit den neuen Steuereingängen u_{DK} , u_{ENW} angesetzt. Sie können genutzt werden, um das Übertragungsverhalten der Aktuatorpositionsregelungen abzubilden.

Durch die zwei neuen Zustände vor den Eingängen müssen nun auch die Ausgangskomponenten m_{Zyl}^{Luft} , m_{Zyl}^{RG} dreifach abgeleitet werden, bis sie Funktionen der neuen Stelleingänge u_{DK} , u_{ENW} sind. (vgl. Abbildung 4) Damit diese dritten Ableitungen keine Funktionen von $T_{WG}^{\ddot{V}}$ sind, wird der Abgasgedruck p_{Kr} von den Ausgängen dynamisch entkoppelt werden. Dies wird durch die neuen Ausgangsfunktionen

$$\begin{aligned}
 m_{Zyl}^{Luft} &= F_1(p_{SR}^{Luft}, p_{SR}^{RG}, T_{Zyl}, p_{Kr}^{Vz3}, T_{Kr}^{Vz3}, A_{ENW}^*, n_{Mot}) \\
 m_{Zyl}^{RG} &= F_2(p_{SR}^{Luft}, p_{SR}^{RG}, T_{Zyl}, p_{Kr}^{Vz3}, T_{Kr}^{Vz3}, A_{ENW}^*, n_{Mot}) \\
 p_{LR} &= F_3(p_{nV}, p_{SR}^{Luft}, p_{SR}^{RG})
 \end{aligned} \tag{17}$$

mit den sechs Verzögerungsgliedern

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_{KrVz3} &= \Lambda_{Kr} (p_{Kr}^{Vz2} - p_{Kr}^{Vz3}) & \dot{T}_{Kr}^{Vz3} &= \Lambda_{Kr} (T_{Kr}^{Vz2} - T_{Kr}^{Vz3}) \\
 \dot{p}_{KrVz2} &= \Lambda_{Kr} (p_{Kr}^{Vz1} - p_{Kr}^{Vz2}) & \dot{T}_{Kr}^{Vz2} &= \Lambda_{Kr} (T_{Kr}^{Vz1} - T_{Kr}^{Vz2}) \\
 \dot{p}_{KrVz1} &= \Lambda_{Kr} (p_{Kr} - p_{Kr}^{Vz1}) & \dot{T}_{Kr}^{Vz1} &= \Lambda_{Kr} (T_{Kr} - T_{Kr}^{Vz1})
 \end{aligned}$$

erreicht. Aufgrund der sehr geringen Wirkung des Drucks und der Temperatur im Auslasskrümmer auf die Partialmassen, erzeugt die dynamische Entkopplung insbesondere für große Λ_{Kr} nur sehr geringe dynamische Fehler, stationär hat sie am Modell des aufgeladenen Ottomotors keinen Einfluss.

Die Analyse des Modells zeigt weiterhin, dass die Inversion der statischen Temperaturteilmodelle des Verdichters sowie des Ladeluftkühlers auf umfangreiche implizite Gleichungen führt. Diese impliziten Gleichungen werden durch die zusätzlichen Zustände T_{nLLK}^{Vz} , T_{nV}^{Vz} aufgelöst. Das so erweiterte dynamische System hat 25 Zustände sowie einen Vektordifferenzegrad von $d = \{3, 3, 3\}$ der zusätzlich dem wohl definierten relativen Grad entspricht.

3.1 Modellinversion

In diesem Abschnitt wird, basierend auf dem erweiterten Modell des aufgeladenen Ottomotors, ein Stellgesetz entwickelt, mit dem die Ausgänge beliebigen aber realisierbaren Referenztrajektorien exakt folgen. Für eine bessere Lesbarkeit wird noch einmal das erweiterte Modell des aufgeladenen Ottomotors in der allgemeinen Struktur nichtlinearer Systeme

$$\frac{d}{dt}x = f(x, \gamma, u) \quad (18a)$$

$$y = h(x, \gamma), \quad (18b)$$

mit den Zuständen

$$x = (p_{vV}, p_{nV}, p_{SR}^{Luft}, p_{SR}^{RG}, T_{SR}, T_{Rohr}, T_{Rohr}^{Vz}, T_{Zy1}, p_{Kr}, T_{Kr}, n_{ATL}, A_{ENW}^*, A_{ENW}^{**}, p_{Kr}^{Vz1}, p_{Kr}^{Vz2}, p_{Kr}^{Vz3}, T_{Kr}^{Vz1}, T_{Kr}^{Vz2}, T_{Kr}^{Vz3}, A_{DK}^{DE1}, A_{DK}^{DE2}, A_{ENW}^{DE1}, A_{ENW}^{DE2}, T_{nLLK}^{Vz}, T_{nV}^{Vz}), \quad (19)$$

den Parametern $\gamma = (n_{Mot}, T_{Mot}, p_{amb}, T_{amb})$ den Eingängen $u = (u_{DK}, u_{ENW}, TV_{Wg})$ und den Ausgängen $y = (m_{Zy1}^{Luft}, m_{Zy1}^{RG}, p_{LR})$ angegeben. Der Entwurf der Vorsteuerung erfolgt in den Ein- Ausgangskordinaten z . Mit dem Diffeomorphismus

$$T(x, \gamma) = [m_{Zy1}^{Luft}, \dot{m}_{Zy1}^{Luft}, \ddot{m}_{Zy1}^{Luft}, m_{Zy1}^{RG}, \dot{m}_{Zy1}^{RG}, \ddot{m}_{Zy1}^{RG}, p_{LR}, \dot{p}_{LR}, \ddot{p}_{LR}, \eta]^T. \quad (20)$$

mit

$$\eta = [p_{vV}, T_{SR}, T_{Rohr}, T_{Rohr}^{Vz}, T_{Zy1}, T_{Kr}, A_{ENW}^*, A_{ENW}^{**}, p_{Kr}^{Vz1}, p_{Kr}^{Vz2}, p_{Kr}^{Vz3}, T_{Kr}^{Vz1}, T_{Kr}^{Vz2}, T_{Kr}^{Vz3}, T_{nLLK}^{Vz}, T_{nV}^{Vz}]^T \quad (21)$$

wird das erweiterte Modell aus den Originalkoordinaten x in die Ein- Ausgangskordinaten z transformiert. Es kann gezeigt werden, dass die Dynamik in den Koordinaten z mit

$$\frac{d}{dt}m_{Zy1}^{Luft} = \dot{m}_{Zy1}^{Luft} \quad (22a) \quad \frac{d}{dt}m_{Zy1}^{RG} = \dot{m}_{Zy1}^{RG} \quad (22d) \quad \frac{d}{dt}p_{LR} = \dot{p}_{LR} \quad (22g)$$

$$\frac{d}{dt}\dot{m}_{Zy1}^{Luft} = \ddot{m}_{Zy1}^{Luft} \quad (22b) \quad \frac{d}{dt}\dot{m}_{Zy1}^{RG} = \ddot{m}_{Zy1}^{RG} \quad (22e) \quad \frac{d}{dt}\dot{p}_{LR} = \ddot{p}_{LR} \quad (22h)$$

$$\frac{d}{dt}\ddot{m}_{Zy1}^{Luft} = \phi_1(z, \gamma, u) \quad (22c) \quad \frac{d}{dt}\ddot{m}_{Zy1}^{RG} = \phi_2(z, \gamma, u) \quad (22f) \quad \frac{d}{dt}\ddot{p}_{LR} = \phi_3(z, \gamma, u) \quad (22i)$$

$$\frac{d}{dt}\eta = q(z, \gamma, u) \quad (22j)$$

beschrieben wird. (vgl. [1]) Der Ausgang $y = (m_{Zy1}^{Luft}, m_{Zy1}^{RG}, p_{LR})$ entspricht in diesen Koordinaten den Ausgängen der drei Integratorketten. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass wenn es gelingt, ein Stellgesetz für $u = (u_{DK}, u_{ENW}, TV_{Wg})$ mit (23) zu definieren, sodass nach Einsetzen in (22c), (22f), (22i) die Bedingung (24) erfüllt ist,

$$u_{DK} = \psi_1(v, z, \gamma) \quad (23a) \quad \frac{d}{dt}\ddot{m}_{Zy1}^{Luft} = \phi_1(z, \gamma, u) = v_{DK} \quad (24a)$$

$$u_{ENW} = \psi_2(v, z, \gamma) \quad (23b) \quad \frac{d}{dt}\ddot{m}_{Zy1}^{RG} = \phi_2(z, \gamma, u) = v_{ENW} \quad (24b)$$

$$TV_{Wg} = \psi_3(v, z, \gamma) \quad (23c) \quad \frac{d}{dt}\ddot{p}_{LR} = \phi_3(z, \gamma, u) = v_{WG} \quad (24c)$$

das gesteuerte System bezüglich des neuen Eingangs $v = (v_{\text{DK}}, v_{\text{ENW}}, v_{\text{WG}})$ das Ein- Aus- gangsverhalten von drei entkoppelten Integratorketten, dritter Ordnung, besitzt. Die drei Funktionen $\psi_{1,2,3}$ bilden zusammen mit dem erweiterten Modell eine statische Zustands- rückführung. Diesen Integratorketten kann über eine weitere Zustandsrückführung (im Rahmen der Systembegrenzungen) eine beliebige Eigendynamik aufgeprägt werden. (vgl. [1]).

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf einer Vorsteuerung. Dafür werden in den identifi- zierten Stellgesetzen (23) die Zustände z nicht als vom Prozess rückgekoppelt betrachtet, sondern als von außen aufgeprägt. Dies ist problemlos möglich, denn soll der Ausgang dem Referenzverlauf $\hat{y} = (\hat{m}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}}, \dot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}}, \hat{p}_{\text{LR}})$ folgen, müssen nur dessen Ableitungen $\dot{\hat{y}}$ und $\ddot{\hat{y}}$ bekannt sein und über Referenzzustandsvektor

$$\hat{z} = \left(\hat{m}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}}, \dot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}}, \ddot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}}, \hat{m}_{\text{Zy1}}^{\text{RG}}, \dot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{RG}}, \ddot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{RG}}, \hat{p}_{\text{LR}}, \dot{\hat{p}}_{\text{LR}}, \ddot{\hat{p}}_{\text{LR}}, \eta_{\circ} \right), \quad (25)$$

aufgeprägt werden. Darin sind η_{\circ} die Lösungen Differentialgleichungssystems

$$\frac{d}{dt}\eta_{\circ} = q(\hat{z}, \gamma, u(v, \hat{z}, \gamma)), \quad (26)$$

die Zustände in η_{\circ} entsprechen denen in (21). Da das Differentialgleichungssystem inner- halb der Vorsteuerung gelöst wird, wird es als interne Dynamik bezeichnet. Der noch offene Steuereingang v wird mit den dritten Ableitungen der Führungsgrößen belegt $v = \left(\overset{\cdot\cdot\cdot}{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}}, \overset{\cdot\cdot\cdot}{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{RG}}, \overset{\cdot\cdot\cdot}{\hat{p}}_{\text{LR}} \right)$. Damit sind alle Größen in den Stellgesetzen (23) bekannt, und die Vorsteuerung des aufgeladenen Ottomotors vollständig. Die dreifach stetig differenzierba- re Führungstrajektorie wird für jede Ausgangskomponente über ein frei konfigurierbares lineares System, mit Polüberschuss 3, definiert. Wobei für den Eingang (gekennzeichnet durch $\check{\cdot}$) auch sprungförmige Signale zulässig sind.

$$\dot{x} = Ax + B \check{m}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}} \quad (27a) \quad \dot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}} = CAx \quad (28a)$$

$$\hat{m}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}} = Cx \quad (27b) \quad \ddot{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}} = CA^2x \quad (28b)$$

$$\overset{\cdot\cdot\cdot}{\hat{m}}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}} = CA^3x + CA^2B \check{m}_{\text{Zy1}}^{\text{Luft}} \quad (28c)$$

Die Referenzdynamik (A, B, C) wird so ausgelegt, dass für definierte Führungsgrößen- änderungen die zulässigen Stellbereiche vollständig ausgenutzt werden. Damit ist die Vor- steuerung der Luft- und Restgasmasse des aufgeladenen Ottomotors vollständig. Im fol- genden Abschnitt wird anhand von Simulationsstudien deren Exaktheit nachgewiesen und eine wichtige Modifikation der motiviert und implementiert.

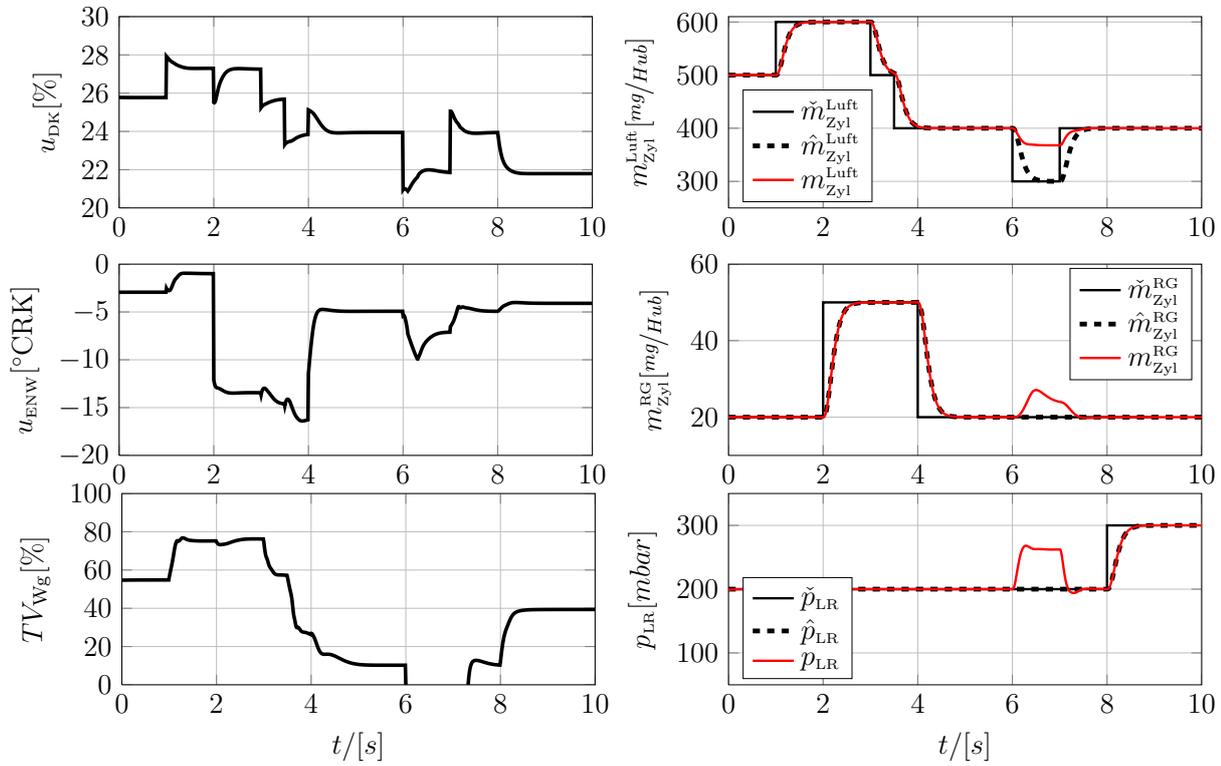


Abbildung 5: Erstes Simulationsszenario, Solltrajektorien werden durch Stellbegrenzung des Wastegatetastverhältnisses nicht eingehalten.

4 Simulationsergebnisse

Im ersten Simulationsszenario wird die Exaktheit des Steuerungsansatzes beispielhaft überprüft, dazu wird das erweiterte Modell, mit den Zuständen (19), sowohl im Lade- als auch im Saugbetrieb, gesteuert. In dieser und allen folgenden Simulationen ist die Motordrehzahl $n_{\text{Mot}} = 3000 \text{ 1/min}$ und die Anfangszustände von Modell und Steuerung stimmen nicht überein. Das bedeutet, es kommt zu Beginn der Simulation zu einem Einschwingen der Ausgänge auf Führungstrajektorien. Diese Phase ist in den Abbildungen zum großen Teil nicht dargestellt.

Die in Abbildung 5 gezeigten Ergebnisse belegen, dass die Modellausgänge sicher auf die Führungsgrößenverläufe einschwingen und diese bis zur Zeit $t = 6 \text{ s}$ nicht verlassen. Das stark verkoppelte Modell ist vollständig entkoppelt, für die Änderung einer Ausgangskomponente werden alle Eingänge angepasst. Wird zur Zeit $t = 6 \text{ s}$ die Referenzluftmasse auf 300 mg/Hub gesenkt, erfordert dies ein absenken des Saugrohrdrucks p_{SR} . Dadurch steigt bei gleichem Ladedruck p_{nV} die Ladereserve $p_{\text{LR}} = p_{\text{nV}} - p_{\text{SR}}$. Um diesen Zusammenhang zu kompensieren, muss der Ladedruck p_{nV} über das Tastverhältnis TV_{Wg} reduziert werden. Erreicht das Wastegatetastverhältnis die untere Stellgrenze, entspricht der Ladedruck dem Grundladedruck und kann nicht weiter abgesenkt werden. Die Ausgangskomponente p_{LR} verlässt zwangsläufig die Solltrajektorie. Durch die Divergenz von Soll- und Istladedruck werden auch falsche Stellgrößen für die Drosselklappe u_{DK} und die Einlassnockenwellen u_{ENW} berechnet. In der Folge verlassen sämtliche Ausgangskomponenten die Führungsverläufe. Dabei sind die Stellbereiche der Drosselklappe und der Einlassnockenwelle nicht

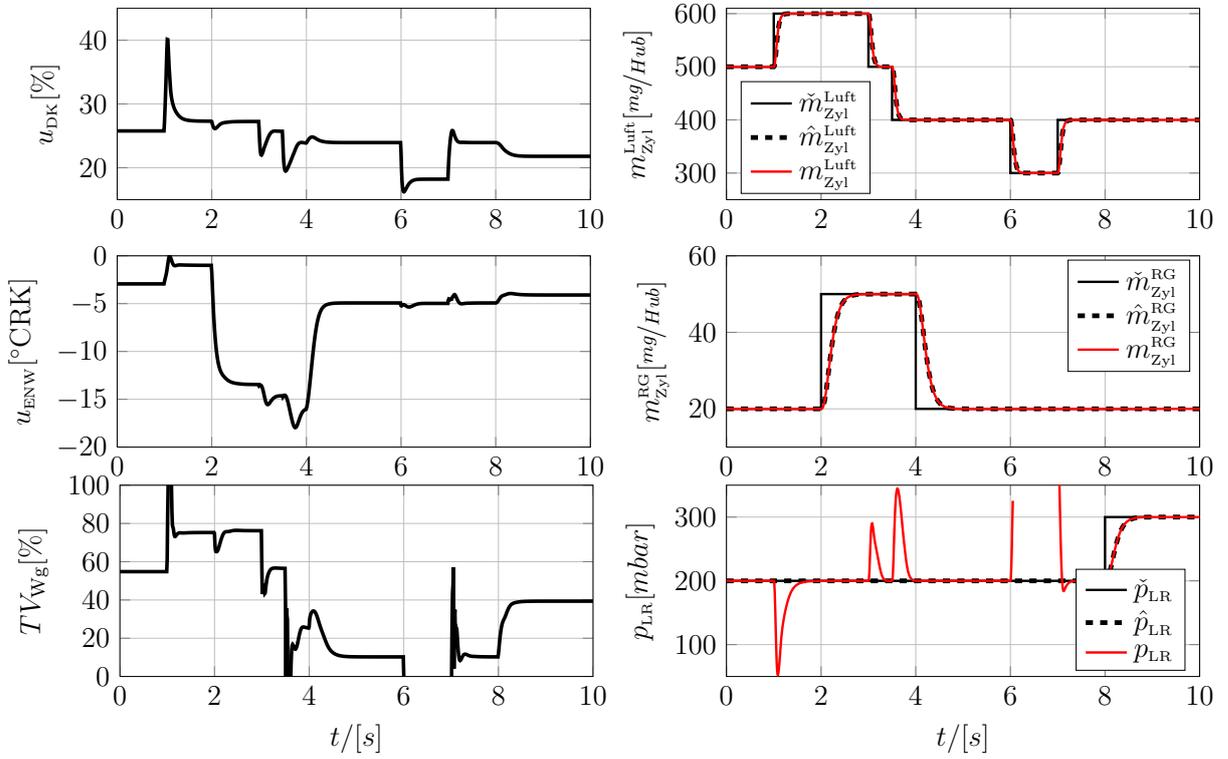


Abbildung 6: Zweites Simulationsszenario, untere Stellbegrenzung des Wastegatetastverhältnisses stört die Partialmassentrajektorien nicht. Relativer Stellfehler liegt im Bereich der relativen Simulationsgenauigkeit.

ausgeschöpft. Daraus ist zu schließen, dass die geforderten Führungsgrößen realisierbar wären.

Um auch im reinen Saugbetrieb die Partialmassen einzustellen, ist der Ladedruck aus Sicht des Drosselklappen- und Einlassnockenwellenstellpfades der internen Dynamik zuzuordnen. Daraus folgt, dass auch die Turboladerdrehzahl n_{ATL} und der Krümmerdruck p_{Kr} hier der internen Dynamik zuzurechnen sind. Innerhalb des Wastegatepfades sind diese Zustände weiterhin Referenzgrößen. So ist sichergestellt, dass im Fall eines begrenzten Tastverhältnisses, u_{DK} und u_{ENW} aus dem korrekten, dem modellierten Ladedruck berechnet werden. Abbildung 6 zeigt das Simulationsergebnis mit einer derartigen Steuerungsstruktur. Die Massen werden bis in den tiefen Saugbereich exakt eingestellt, wobei toleriert wird, dass die Ladereserve ungesteuert frei ist. Erst beim Übergang in den Ladebetrieb konvergieren die Referenzladereserve des Wastegates und die Ladereserve der internen Dynamik des Drosselklappenstellpfades wieder.

Die in den zwei gezeigten Simulationsszenarien angenommenen Referenztrajektorien sind aufgrund der großen Ladereserve wenig praxisrelevant. Zwar ermöglicht eine große Ladereserve niedrige Anstiegszeiten in den Führungsgrößen, doch geht sie mit einem reduzierten gesamtmotorischen Wirkungsgrad und einer größeren Klopfneigung einher. Im dritten Simulationsszenario beträgt die Referenzladereserve konstant $\check{p}_{LR} = 1 \text{ mbar}$, was praktisch einer Entdrosselung entspricht. In der zugehörigen Abbildung 7 ist zu erkennen, dass über das Wastegate nur sehr viel niedrigere Führungsgradienten realisiert werden können. Die Drosselklappe ist im Ladebetrieb vollständig geöffnet und wird nur bei

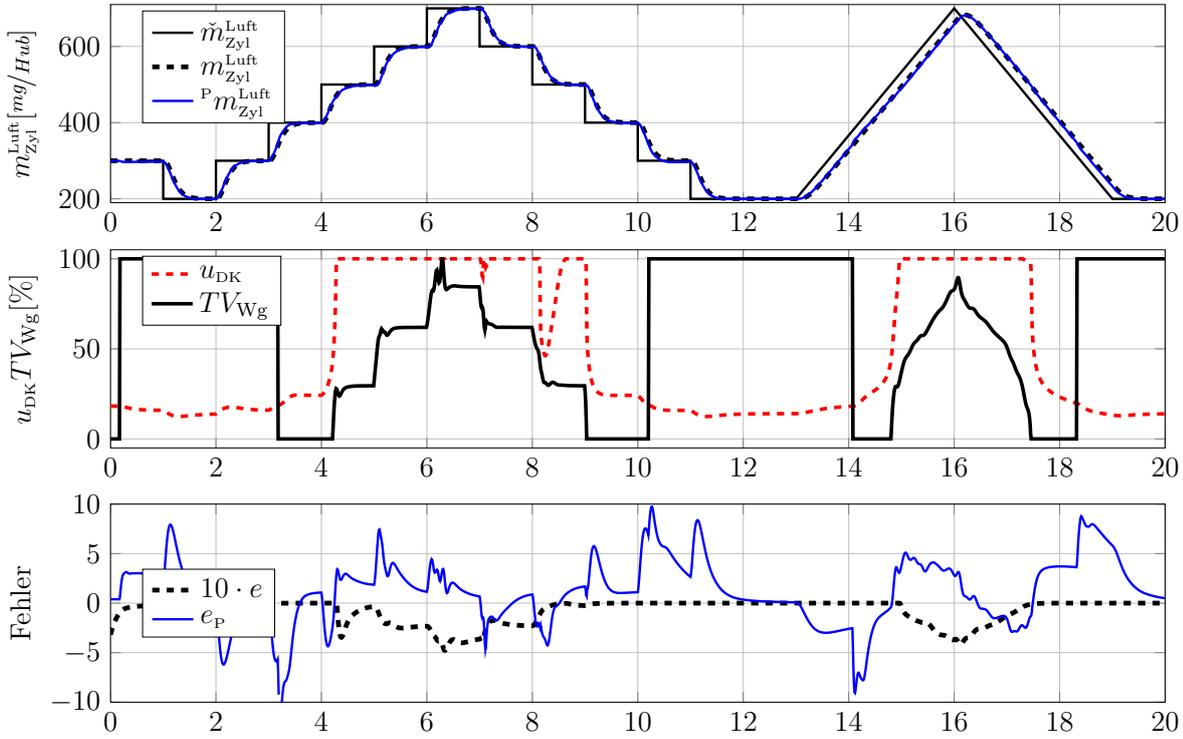


Abbildung 7: Drittes Simulationsszenario, $\check{p}_{LR} = 1 \text{ mbar}$, $\check{m}_{Zyl}^{RG} = 20 \text{ mg/Hub}$, Das Einlassnockenwellensignal ist nicht dargestellt.

negativen Luftgradienten gestellt. In der gleichen Abbildung ist auch das Steuerungsergebnis des nominalen, also nicht erweiterten, Modells mit ${}^P m_{Zyl}^{Luft}$ dargestellt. Die Abweichungen zwischen der Referenztrajektorie und den Modellausgängen $e = \hat{m}_{Zyl}^{Luft} - m_{Zyl}^{Luft}$, $e_P = \hat{m}_{Zyl}^{Luft} - {}^P m_{Zyl}^{Luft}$ sind gering und verschwinden stationär. Insbesondere ist hervorzuheben, dass der durch die zahlreichen zusätzlichen Zustände erzeugte Stellfehler am unmodifizierten Prozessmodell sehr niedrig ist. Eine signifikante Dynamikverbesserung kann mit arbeitspunktabhängigen dynamischen Filtern (27) erreicht werden. Auf diese Weise können im Saugbetrieb sehr viel kürzere Anstiegszeiten realisierbar. Das Wastegatetastverhältnis $TV_{Wg} = 100 \%$ im tiefen Saugbetrieb ist ein Stellwert, der keinen Einfluss auf den Ladedruck hat. Er kann sehr einfach durch eine arbeitspunkt abhängige übergeordnete Funktion mit $TV_{Wg} = 0 \%$ überschrieben werden.

5 Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Vorsteuerung wird das stabile Modell des aufgeladenen Ottomotors stabil gesteuert. Für die interne Dynamik der Vorsteuerung sind keine instabilen Arbeitspunkte bekannt. Ein analytischer Stabilitätsnachweis ist aufgrund des Modellumfangs schwierig. Der Vorteil dieser Steuerung gegenüber einer vergleichbaren Zustandsregelung ist, dass Modellunsicherheiten und Messstörungen die Gesamtstabilität nicht gefährden. Im praktischen Einsatz auftretende Abweichungen von den Führungstrajektorien können durch überlagerte Regelungen kompensiert werden. Die dabei eingesetzten Regler können von einfacher Struktur sein, da das Modell und damit auch die Vorsteuerung bereits das gesamte Prozesswissen enthält.

Der gewählte Ansatz der exakten Ein- Ausgangslinearisierung entkoppelt die Eingänge und Ausgänge des Prozesses vollständig. Mit der Einführung der Ladereserve als Hilfsausgang wird das eigentlich überbestimmte Steuerungsproblem lösbar. Die erweiterte interne Dynamik für die Stellpfade der Drosselklappe und Einlassnockenwelle ermöglicht einen glatten Übergang vom Saug- in den Ladebetrieb.

Sowohl der rechnerische Aufwand im Betrieb als auch der Aufwand für den Entwurf der Vorsteuerung sind sehr hoch. Bereits während der Modellierung ist auf eine spätere Invertierbarkeit zu achten. Dies erfordert viel Erfahrung in der Modellierung und Steuerung des Luftpfades. Dennoch ist dieser Aufwand gerechtfertigt. Erste Prüfstandsmessungen mit dem Wastegatestellpfad bestätigen die gezeigten Simulationen. Mit der exakten mehrgrößen Ein- Ausgangslinearisierung wird der betrachtete Prozess entkoppelt und linearisiert wodurch die bekannten linearen Regelungskonzepten anwendbar werden.

Literatur

- [1] A. Isidori. *Nonlinear control systems*. Springer Verlag, 1995.
- [2] J. Emonts, R. Schmidpeter, and H. Vogele. Elektronische Steuer- und Regeleinrichtungen am neuen BMW-Turbomotor. 1983.
- [3] Heinz Niggemeyer Karlheinz Lange, Adolf Fischer. Ein aufgeladener bmw-sechszylinder-ottomotor. *MTZ*, 40(12):575–578, 1979.
- [4] A.Y. Karnik, J.H. Buckland, and J.S. Freudenberg. Electronic throttle and wastegate control for turbocharged gasoline engines. In *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, pages 4434–4439. IEEE, 2005.
- [5] Donghoon Lee, Li Jiang, H. Yilmaz, and A.G. Stefanopoulou. Air charge control for turbocharged spark ignition engines with internal exhaust gas recirculation. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 1471–1476, 30 2010-july 2 2010.
- [6] Chauvin, J., Moulin, P., Youssef, B., and Grondin, O. Contrôle expérimental des boucles d’air et d’egr d’un moteurhcci suralimenté. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 63(4):553–561, 2008.
- [7] T. Leroy, J. Chauvin, and N. Petit. Controlling air and burned gas masses of turbocharged vvt si engines. In *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on*, pages 5628–5634, dec. 2008.
- [8] Rudolf Pischinger, Manfred Klell, and Theodor Sams. *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*. Springer, Wien, 2002.
- [9] Günter P. Merker, Christian Schwarz, and Gunnar Stiesch. *Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*. Teubner, 2004.

- [10] Andreas Thomasson. Wastegate actuator modeling and tuning of a PID controller for boost pressure control. Master's thesis, Linköping University, SE-581 83 Linköping, 2009.
- [11] Robert Beckmann and Wolfgang Drewelow. Modellierung und exakte vorsteuerung der luft- und restgasmasse in den zylindern eines ottomotors. In *Modellierung, Regelung und Simulation in Automotive und Prozessautomation*, page 183, 2011.
- [12] Torsten Wey. *Nichtlineare Regelungssysteme: Ein differentialalgebraischer Ansatz ; mit 13 Tabellen*. Teubner, Stuttgart and , Leipzig and , Wiesbaden, 1 edition, 2002.
- [13] Bernhard Schölkopf and Alexander J. Smola. *Learning with kernels: Support vector machines, regularization, optimization, and beyond*. MIT Press, Cambridge, Mass. [u.a.], 2002.
- [14] Helmut Schwarz. *Nichtlineare Regelungssysteme: Systemtheoretische Grundlagen*. Oldenbourg, München [u.a.], 1991.
- [15] Robert Beckmann. Erzeugung analytischer ableitungen von signalen in simulink - modellen. In *Symposium Maritime Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Rostock*, pages 239–244, 2010.
- [16] I.N.Bronstein, K.A. Semendjajew, G. Musiol, and H. Mühlig. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, 5 edition, 2001.