

Modellbasierte Regelung des Luftverhältnisses unter Berücksichtigung der Sauerstoffspeicherfähigkeit des Dreiwege-Katalysators

Michael Tomforde, Hochschule Wismar

m.tomforde@stud.hs-wismar.de

Wolfgang Drewelow, Universität Rostock

wolfgang.drewelow@uni-rostock.de

Zusammenfassung

Eine der größten Herausforderungen für die Automobilindustrie ist gegenwärtig die Einhaltung der strikten gesetzlichen Grenzwerte für den Schadstoffausstoß. Die derzeit wirkungsvollste Maßnahme zur Verringerung der Schadstoffemissionen eines Ottomotors ist die Abgasnachbehandlung mittels Dreiwege-Katalysator. Die Konvertierungsfähigkeit des Katalysators wird wesentlich von der Sauerstoffbeladung bestimmt. Diese Größe wird bei den momentan im Serieneinsatz befindlichen Regelungen des Luftverhältnisses üblicherweise nicht berücksichtigt. In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Regelung des Luft-Kraftstoff-Gemisches präsentiert, bei dem die Sauerstoffbeladung als Regelgröße verwendet wird. Da die Sauerstoffbeladung nicht direkt messbar ist, wird sie mittels eines neu entwickelten Modells des Katalysators geschätzt, das die räumliche Verteilung des Sauerstoffes im Katalysator berücksichtigt. Um einen vorgegebenen Sollwert der Sauerstoffbeladung einzustellen dient ein über einen Optimalregleransatz entworfener Zustandsregler. Das vorgestellte Regelungskonzept wurde erfolgreich an einem aufgeladenen Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung erprobt.

1 Einleitung

Der Ottomotor ist die weltweit dominierende Antriebsquelle für Personenkraftwagen. Er wandelt die im Kraftstoff gebundene chemische Energie durch Verbrennung in mechanische Arbeit um, die zum Vortrieb des Kraftfahrzeuges dient. Bei der Verbrennung in den Zylindern des Verbrennungsmotors reagieren die kohlenwasserstoffhaltigen Kraftstoffbestandteile mit dem Sauerstoff der Luft. Im Falle einer vollständigen stöchiometrischen Verbrennung entstehen als Reaktionsprodukte lediglich Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Dazu müssen Kraftstoff und Luft in einem bestimmten Verhältnis zueinander im Brennraum vorliegen. Für die Verbrennung eines Kilogramms Benzin werden ca. 14,7 kg Luft benötigt. Häufig weicht die der motorischen Verbrennung zugeführte Luftmenge von diesem stöchiometrischen Luftbedarf $L_{st}=14,7 \text{ kg / kg Kraftstoff}$ ab. Eine wichtige Kennzahl zur Charakterisierung dieser

Abweichung ist das Luftverhältnis λ , das sich anhand der zugeführten Luft- und Kraftstoffmengen m_L bzw. m_K sowie des stöchiometrischen Luftbedarfs L_{st} ermitteln lässt:

$$\lambda = \frac{m_L}{14,7 \cdot m_K}. \quad (1)$$

Enthält ein Luft-Kraftstoff-Gemisch mehr Luft als für die Verbrennung benötigt wird, d.h. $\lambda > 1$, so wird das Gemisch als mager bezeichnet. Ein Gemisch in dem Luftmangel herrscht, d.h. $\lambda < 1$, wird als fett bezeichnet. Gilt für das Luftverhältnis $\lambda = 1$, so handelt es sich um ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Gemisch.

Bei technischen Anwendungen entstehen bei der Verbrennung aufgrund der nicht idealen Prozessbedingungen neben Kohlenstoffdioxid und Wasser unerwünschte Nebenprodukte, die Schadstoffe. Bei diesen unerwünschten Verbrennungsprodukten handelt es sich hauptsächlich um Kohlenmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x). Die Bildung der Schadstoffe wird maßgeblich vom Luftverhältnis λ beeinflusst. Ein fettes Gemisch fördert die Bildung von CO und HC, bei einem mageren Luft-Kraftstoff-Gemisch entstehen vornehmlich Stickoxide. Es lassen sich jedoch auch bei einem stöchiometrischen Luft-Kraftstoff-Gemisch Schadstoffe im Abgas nachweisen. Ursachen hierfür sind beispielsweise Gemischinhomogenitäten, Wall- und Flame-Quenching und Dissoziations-Effekte bei hohen Verbrennungstemperaturen [1-6].

Das derzeit wirkungsvollste Verfahren zur Reduzierung der Schadstoffe stellt für Ottomotoren die katalytische Nachbehandlung des Abgases mit Dreiwege-Katalysatoren dar. An den im Katalysator enthaltenen Edelmetallpartikeln reagieren Kohlenmonoxid, unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Stickoxide zu ungiftigen Verbindungen wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff. Moderne Katalysatoren erreichen dabei im aufgeheizten Zustand Konvertierungsraten von über 98% [2].

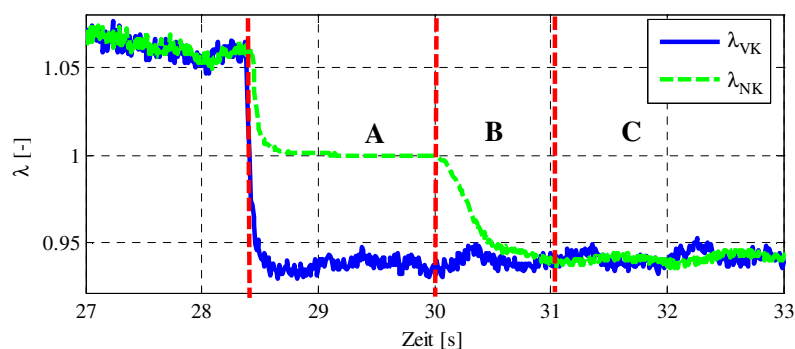


Abbildung 1: Sauerstoffspeicherfähigkeit

Dreiwege-Katalysatoren besitzen jedoch eine weitere interessante Eigenschaft, sie können Sauerstoff speichern und abgeben. Dies soll Abbildung 1 verdeutlichen, die den zeitlichen Verlauf des Luftverhältnisses vor und hinter dem Katalysator (λ_{VK} bzw. λ_{NK}) zeigt. Es ist zu erkennen, dass der Lambdawert nach Kat jenem vor Kat nicht direkt folgt. Im Bereich A ist λ_{NK} stöchiometrisch. In diesem Bereich wird der im Katalysator gespeicherte Sauerstoff zur

Oxidation der einströmenden unverbrannten Kohlenwasserstoffe sowie des Kohlenmonoxids verwendet. Dadurch bleibt die Schadstoffkonzentration nach Kat gering. Der Katalysator kann jedoch nicht unbegrenzt Sauerstoff abgeben. In Bereich B nähert sich der Lambdawert nach Kat jenem vor Kat an, da die vom Katalysator bereitgestellte Sauerstoffmenge nicht mehr ausreicht um den Sauerstoffmangel des einströmenden fetten Abgases vollständig auszugleichen [7]. Nach Erschöpfung des gespeicherten Sauerstoffes sind die Lambdawerte vor und nach Kat identisch (Bereich C). Sobald mageres Gemisch in den Katalysator einströmt wird der Sauerstoffspeicher wieder gefüllt.

Bei den momentan im Serieneinsatz befindlichen Regelungen für das Luft-Kraftstoff-Gemisch wird die Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators üblicherweise nicht berücksichtigt. Abbildung 2 zeigt die Struktur eines weit verbreiteten Regelungskonzeptes.

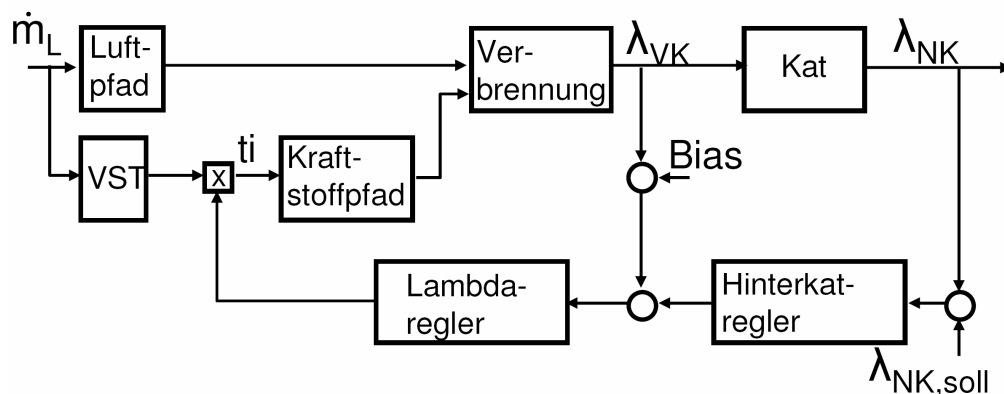


Abbildung 2: Struktur der Regelung des Luftverhältnisses

Zunächst wird in einer Vorsteuerung (VST) anhand des gemessenen Luftmassenstroms die zukünftige Luftmasse im Zylinder unter Berücksichtigung der Dynamik des Luftpfades geschätzt. Anschließend wird die für ein stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Gemisch erforderliche Kraftstoffmenge berechnet und die für die Einbringung dieser Kraftstoffmasse in den Brennraum benötigte Öffnungszeit des Einspritzventils t_i bestimmt. Allein durch die Vorsteuerung kann jedoch nicht die erforderliche Genauigkeit der Gemischbildung erreicht werden [2]. Ursachen dafür sind beispielsweise ungenaue Modelle bei der Prädiktion der Zylinderfüllung, wechselnde Kraftstoffqualitäten oder Alterungseffekte. Deshalb wird das Signal einer vor dem Katalysator angebrachten Lambdasonde vom so genannten Lambda-regler (üblicherweise ein PI- oder PID-Regler) zur Korrektur der Kraftstoffmassenberechnung verwendet. Die Lambdasonde vor Kat ist jedoch hohen Temperaturen und Abgas ausgesetzt, das noch nicht das chemische Gleichgewicht erreicht hat. Dies führt zu einem arbeitspunktabhängigen Offset in der Messung des Luftverhältnisses vor Kat. Zur Kompensation dieses Offsets wird eine weitere, hinter dem Katalysator angebrachte Lambdasonde sowie ein zusätzlicher Regler verwendet. Dieser Regler wird als Hinterkatregler bezeichnet und ist üblicherweise als PI-Regler ausgeführt. Er liefert die Führungsgröße für den Lambda-regelkreis vor Kat.

Das Ziel der beschriebenen, konventionellen Regelung des Luftverhältnisses ist es Lambdaabweichungen vor dem Katalysator möglichst schnell auszuregeln. Die Sauerstoffspeicher-

fähigkeit des Katalysators wird dabei nicht berücksichtigt. Doch gerade die Sauerstoffbeladung beeinflusst maßgeblich die Schadstoffkonzentration hinter dem Katalysator. Solange der Katalysator noch Sauerstoff aufnehmen bzw. abgeben kann (Bereich A in Abbildung 1) sind die Schadstoffemissionen gering (siehe beispielsweise [7]). Eine Regelungsstrategie, die die Sauerstoffbeladung auf einen mittleren Wert hält und dadurch eine Kompensation zukünftiger fetter oder magerer Gemischphasen ermöglicht, bietet das Potential zur Verringerung des Schadstoffausstoßes. Die Grundidee der in diesem Beitrag vorgeschlagenen Regelung des Luftverhältnisses ist es die Sauerstoffbeladung als Regelgröße zu verwenden.

Ähnliche Ansätze wurden bereits von anderen Autoren präsentiert [8-11]. Da die Sauerstoffbeladung nicht direkt gemessen werden kann, kommen bei diesen Ansätzen Modelle des Katalysators zur Schätzung der Sauerstoffbeladung zur Anwendung. Hierbei werden im Allgemeinen relativ einfache Katalysatormodelle basierend auf einem einzelnen Integrator verwendet. Da die erzielbare Regelgüte stark von der Güte der Schätzung der Sauerstoffbeladung abhängt, sollten mit einem genaueren Modell für die Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators bessere Ergebnisse erzielt werden können. Bei der in diesem Beitrag vorgestellten Regelung kommt ein neu entwickeltes Katalysatormodell zur Anwendung, das im Gegensatz zu anderen Sauerstoffspeichermodellen die räumliche Verteilung des gespeicherten Sauerstoffes im Katalysator berücksichtigt. Dieses Modell wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

2 Modellierung

Im Laufe der Jahre wurde eine Vielzahl von Modellierungsansätzen für Katalysatoren entwickelt, die von einfachen empirischen [12] bis zu komplexen physikalisch-chemischen Modellen reichen [13]. Diese Modelle lassen sich grob in drei Klassen einteilen: Physikalisch-chemische Modelle, vereinfachte physikalisch-chemische Modelle und Sauerstoffspeichermodelle. Der Rechenaufwand zur Lösung des Systems gekoppelter, partieller Differentialgleichungen, mit dem bei physikalisch-chemischen Modellen der Massen- und Energietransport sowie die chemischen Reaktionen beschrieben werden, ist jedoch zu groß um vom Motorsteuergerät bewältigt zu werden [7,14,15]. Für reduzierte physikalisch chemische Modelle muss üblicherweise die Konzentration einiger Abgaskomponenten vor dem Katalysator bekannt sein. Dies ist ein Problem, da Serienfahrzeuge im Allgemeinen nicht mit Abgasmess-technik ausgestattet sind. In Bezug auf eine modellbasierte Regelung ist somit insbesondere die Klasse der Sauerstoffspeichermodelle von Interesse.

Bei diesen Modellen (z.B. [10,16-23]) wird davon ausgegangen, dass die Dynamik des Katalysators vom Prozess der Sauerstoffeinlagerung bzw. Sauerstoffabgabe dominiert wird. Eine Massenbilanz für den Sauerstoff bildet die Grundlage dieser Modelle. Der Lambdawert nach Kat wird im Allgemeinen als nichtlineare Funktion der Sauerstoffbeladung des Katalysators modelliert. Der Vorteil dieser Modelle ist der aus ihrer einfachen Struktur resultierende geringe Rechenaufwand.

Aus der Literatur bekannte Sauerstoffspeichermodelle ([10, 16, 17, 21-23]) wurden in unterschiedlichen Motorbetriebspunkten und im realen Fahrbetrieb validiert. Dieser Benchmark [24,25] zeigte, dass keines der untersuchten Sauerstoffspeichermodelle das Verhalten des Ka-

talysators in seiner Gesamtheit (sprungförmige Gemischwechsel von fett nach mager oder umgekehrt, realer Fahrbetrieb, Gemischwechsel im fetten Bereich) hinreichend genau beschreiben kann. Ein weiteres Problem stellen diskontinuierliche Strukturumschaltungen dar, die zu unplausiblen sprungförmigen Verläufen von Lambda nach Kat führen. Daneben kann ein Satz von Modellparametern das Verhalten des Katalysators nur in einem sehr eingeschränkten Arbeitsbereich abbilden.

Da keiner der untersuchten Modellierungsansätze sämtliche Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit, Rechenaufwand und Applizierbarkeit erfüllte, wurde ein neuer Ansatz zur Modellierung des Katalysators entwickelt [25,26]. Ausgangspunkt für dieses Modell ist, wie bei anderen Sauerstoffspeichermodellen, die Massenbilanz für Sauerstoff:

$$\dot{\Phi} = 0,23 \cdot \dot{m}_A \cdot (\Delta\lambda_{VK} - \Delta\lambda_{NK}). \quad (2)$$

Die Sauerstoffbeladung Φ ist relativ zu dem Wert der Sauerstoffbeladung definiert, der sich bei einem stöchiometrischen Luftverhältnis vor dem Katalysator ($\lambda_{VK}=1$) stationär einstellen würde (wie auch in [22,23]). Das bedeutet, dass Φ sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Die Konstante 0,23 entspricht dem Massenanteil von Sauerstoff in Luft. In der Gleichung (2) sind die Luftverhältnisse vor und hinter dem Katalysator relativ zum stöchiometrischen Luftverhältnis definiert, d.h.

$$\Delta\lambda = \lambda - 1. \quad (3)$$

Lambda nach Kat wird als nichtlineare Funktion der Sauerstoffbeladung modelliert:

$$\Delta\lambda_{NK} = N(\Phi). \quad (4)$$

Zur Beschreibung der Funktion $N(\Phi)$ wird eine Kennlinie verwendet, die anhand von Messungen parametrisiert wurde.

Die Besonderheit, die das neu entwickelte Modell von anderen Sauerstoffspeichermodellen unterscheidet, ist die Berücksichtigung der räumlichen Verteilung des Sauerstoffes im Katalysator. Angenommen der Katalysator wurde mit fettem Gemisch betrieben und es hat sich eine einheitliche Sauerstoffbeladung im Katalysator eingestellt. Erfolgt nun ein Wechsel auf mageres Gemisch, so wird der überschüssige Sauerstoff zunächst im vorderen Teil des Katalysators gespeichert, da dort die Reaktionsraten aufgrund der hohen Sauerstoffkonzentration am größten sind [27]. Zum Ende des Katalysators hin nimmt die Sauerstoffbeladung ab, da auf Grund der Speicherung im vorderen Teil kein überschüssiger Sauerstoff das Ende des Katalysators erreicht. Erst nachdem die Sauerstoffspeicherplätze im vorderen und mittleren Teil des Katalysators gefüllt sind, dringt überschüssiger Sauerstoff zum Ende des Katalysators hin vor. Es entsteht somit eine Sauerstofffront, die sich durch den Katalysator bewegt. Um diesen Effekt zu berücksichtigen besteht das Modell aus mehreren Zellen, die jeweils auf der Massenbilanz für Sauerstoff basieren. Ein Modell bestehend aus drei Zellen hat sich als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand erwiesen. Die Zustandsraumdarstellung dieses Modells ist nachfolgend angegeben:

$$\begin{aligned}
\Phi_1 &= 0.23 \cdot \dot{m}_A \cdot (\Delta\lambda_{VK} - N(\Phi_1)) \\
\Phi_2 &= 0.23 \cdot \dot{m}_A \cdot (N(\Phi_1) - N(\Phi_2)) \\
\Phi_3 &= 0.23 \cdot \dot{m}_A \cdot (N(\Phi_2) - N(\Phi_3)) \\
\Delta\lambda_{NK} &= N(\Phi_3)
\end{aligned}
\tag{5}$$

Das Modell wurde in unterschiedlichen Betriebspunkten und unter realen Fahrbedingungen getestet. Abbildung 3 zeigt den Verlauf von gemessenen und modellierten Luftverhältnis hinter dem Katalysator bei sprungförmigen Änderungen des Luftverhältnisses vor dem Katalysator. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Modell ist sehr gut, sogar in den Bereichen, in denen der Gemischwechsel erfolgt, bevor die Sauerstoffbeladung einen Stationärwert erreicht hat (rechter Teil der Abbildung). Dies war bei den zuvor validierten Sauerstoffspeichermodellen nicht der Fall. Ein weiterer Vorteil des neuen Modells ist der große Arbeitsbereich. Die gleiche Kennlinie $N(\Phi)$ ist für eine Vielzahl von Betriebspunkten gültig.

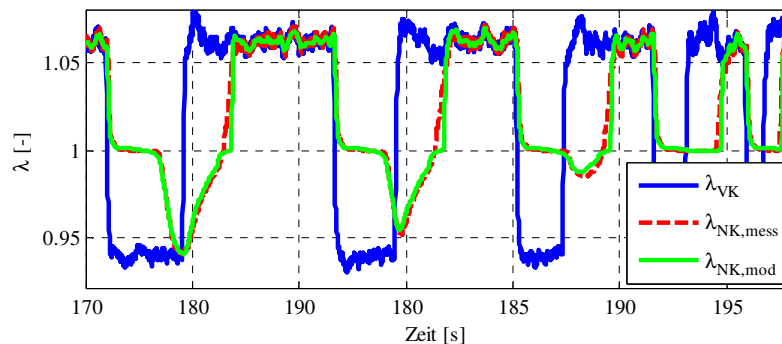


Abbildung 3: Vergleich gemessene und modellierte Lambdaverläufe nach Kat

3 Regelung

Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Regelung des Luftverhältnisses ist die Sauerstoffbeladung des Katalysators auf einen mittleren Wert zu halten, der die Kompensation von kurzzeitigen fetten oder mageren Gemischphasen ermöglicht. Dazu wird auf die Struktur des traditionellen Regelungskonzeptes (Abbildung 2) zurückgegriffen. Die Vorsteuerung und der Lambda-regler werden nicht verändert. Letzterer bietet eine schnelle Ausregelung von Störungen im Luft- oder Kraftstoffpfad, wie beispielsweise variierende Kraftstoffqualitäten. Es wird lediglich der bisherige Hinterkatregler (PI-Regler) durch eine neue Regelung ersetzt.

Der Hauptbestandteil dieser neuen Regelung ist das im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Modell mit dem die Sauerstoffbeladung des Katalysators geschätzt wird. Da beim Einschalten der Regelung die tatsächliche Sauerstoffbeladung des Katalysators im Allgemeinen nicht bekannt ist, werden die vom Modell geschätzten Beladungen anhand der Differenz zwischen gemessenen und geschätzten Lambdawert nach Kat korrigiert. Durch diese Maßnahme können zusätzlich Modellunsicherheiten ausgeglichen werden. Die Wahl von drei gleichen Faktoren für diese Beobachterverstärkung hat sich als am geeignetsten herausgestellt.

Während Schubabschaltung (gesteuerte Unterbrechung der Kraftstoffzufuhr) und während der anschließenden gesteuerten Katalysatorräumphase ist der Katalysator jedoch nicht beobacht-

bar, da das Lambdasignal nach Kat auf den Wertebereich 0,95-1,05 begrenzt ist. In diesen Phasen wird die Beobachterkorrektur abgeschaltet. Um dennoch eine gute Schätzung der Sauerstoffbeladung und des Lambdawertes nach Kat zu ermöglichen wird eine zusätzliche Korrektur der Zustände am Ende der Katasträumphase vorgeschlagen. Dazu werden die vom Modell geschätzten Sauerstoffbeladungen mit einem Korrekturterm multipliziert. Der Wert dieses Faktors für die einzelnen Beladungen wurde mittels Optimierung bestimmt.

Zur Einstellung einer vorgegebenen Sauerstoffbeladung wird ein Zustandsregler vorgeschlagen. Für den Entwurf dieses Reglers wird die Dynamik des Lambdaregelkreises vor Kat vernachlässigt. Dies ist gerechtfertigt, da dieser Regelkreis deutlich schneller ist als der Prozess von Sauerstoffaufnahme oder Sauerstoffabgabe. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass sich durch den Reglereingriff die Sauerstoffbeladungen in der Nähe der Sollwerte bewegen und dadurch ein linearer Regelungsansatz anwendbar ist.

Als Regelungsansatz wird eine Linear-Quadratisch-Optimale Zustandsrückführung vorgeschlagen. Dazu muss zunächst das nichtlineare System (5) linearisiert werden. Die Linearisierung erfolgte hier nicht direkt in dem Gleichgewichtspunkt der dem Sollwert entspricht ($\Phi_1=\Phi_2=\Phi_3=\Delta\lambda_{VK}=\Phi_{soll}=0$), sondern in einem Bereich um diesen Punkt herum, mit dem Ziel den Bereich zu vergrößern in dem der erstellte Regler gültig ist. Das Ergebnis ist ein lineares Zustandsraummodell der Form:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx.\end{aligned}\tag{6}$$

Gesucht wird nun ein Steuergesetz, das das folgende Gütefunktional minimiert:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt.\tag{7}$$

Die Zustandsrückführung soll den Anfangszustand $x(0)$ der einen beliebigen Punkt im Zustandsraum des Systems darstellt wieder in den gewünschten Arbeitspunkt $x=0$ bringen. Der erste Term des Gütefunktional bestraft große Abweichungen der Zustandsvariablen vom gewünschten Arbeitspunkt, d.h. er drückt die Forderung aus, dass der Übergangsvorgang schnell erfolgen und nicht zu stark oszillieren soll. Über den zweiten Term wird die für den Übergangsvorgang benötigte Stellenergie berücksichtigt. Wenn die Wichtungsmatrizen Q und R wie folgt gewählt werden:

$$Q = C^T \rho C, \quad R = 1\tag{8}$$

ergibt sich für das Gütefunktional:

$$J = \int_0^{\infty} [\rho \cdot y^2(t) + u^2(t)] dt = \int_0^{\infty} [\rho \cdot \Delta\lambda_{NK}^2(t) + \Delta\lambda_{VK,soll}^2(t)] dt.\tag{9}$$

Über ρ erfolgt eine Gewichtung des Verhältnisses von Regelabweichung und Stellaufwand. Der Faktor ρ wurde so gewählt, dass auch bei größeren Abweichungen der Zustandsva-

riablen vom Sollwert die Stellgröße (Sollwert für $\Delta\lambda_{VK}$) den Wertebereich +/- 0,02 nicht überschreitet. Hintergrund hierfür ist, dass das Luftverhältnis auch das vom Motor erzeugte Drehmoment beeinflusst. Große Stelleingriffe des Reglers könnten somit zu Problemen hinsichtlich der Fahrbarkeit führen. Das Stellgesetz, das das Gütefunktional (7) minimiert lautet (unter der Voraussetzung eines stabilisierbaren Systems (A,B)):

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}. \quad (10)$$

Die Matrix P ist dabei die Lösung der algebraischen Matrix-Riccatigleichung:

$$\mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{Q} = 0. \quad (11)$$

Um den Offset der Lambdasonde vor dem Katalysator auszugleichen wird die Verwendung eines einfachen I-Reglers vorgeschlagen, der von der Differenz zwischen Lambda nach Kat und Sollwert (üblicherweise Eins) gespeist wird. Zur Bestimmung der massenstromabhängigen Integratorverstärkung kam eine modellbasierte Applikationsstrategie zum Einsatz, auf die hier aus Platzgründen nicht näher eingegangen werden kann.

4 Praktische Implementierung

Der Test der entwickelten Regelung erfolgte an einem Versuchsfahrzeug, das mit einem aufgeladenen Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung ausgestattet ist. Zum Test der Regelung kamen unterschiedliche Fahrprofile zum Einsatz. Dazu gehörten sowohl Messungen in stationären Arbeitspunkten als auch unter realen Fahrbedingungen im Stadtverkehr oder auf der Autobahn. Für die in diesem Beitrag gezeigten Messergebnisse (Abbildung 4) wurde ein Geschwindigkeits- und Lastprofil ähnlich dem innerstädtischen Teil des Neuen Europäischen Fahrzyklus abgefahren. Dieser Fahrzyklus wird auch angewendet, um zu überprüfen, ob der Schadstoffausstoß den gesetzlichen Vorschriften (Euro-Normen) entspricht.

Abbildung 4 zeigt Lambdaverläufe nach Kat mit konventioneller Hinterkatregelung und bei Verwendung der in diesem Beitrag vorgestellten neuen Regelung des Luftverhältnisses, die die Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators berücksichtigt. Beim konventionellen Regler handelt es sich um einen nichtlinearen PI-Regler, dessen Parameter vom aktuellen Betriebspunkt des Motors abhängen.

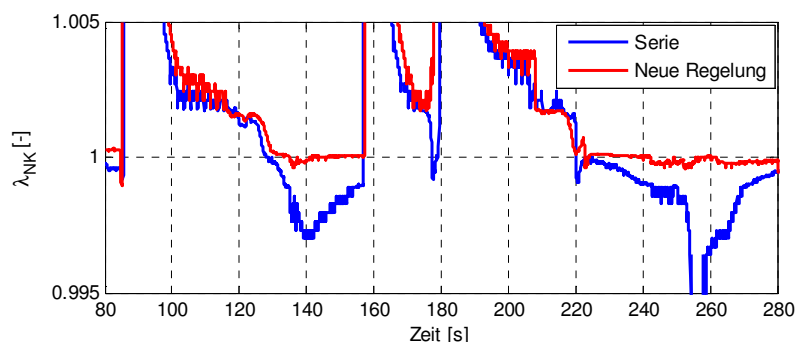


Abbildung 4: Vergleich Lambdaverläufe nach Kat

In den drei Schubabschaltphasen bei 90, 160, 190 Sekunden wird die Hinterkatregelung abgeschaltet. Um eine Vergleichbarkeit der beiden Regelungskonzepte zu gewährleisten wurden die gleichen Einschaltbedingungen für beide Hinterkatregelungen verwendet.

Beide Regelungen streben nach einer Schubabschaltphase etwa gleich schnell in Richtung des Sollwertes $\lambda_{\text{NK}}=1$. Allerdings weist die konventionelle Hinterkatregelung ein großes Überschwingen Richtung fett auf, während die neu entwickelte Hinterkatregelung den Sollwert nach Erreichen bis zur nächsten Schubabschaltphase beibehält. Die Lambdaabweichungen Richtung fett sind bei der neuen Hinterkatregelung somit deutlich geringer als bei der konventionellen Regelung. Die Abweichungen im mageren Bereich sind etwa gleich groß.

Um die Regelgüte quantitativ bewerten zu können, wurde als Kriterium die Betragsregelfläche gewählt:

$$A_{\text{abs}} = \int_{t_0}^{t_{\text{end}}} |\lambda_{\text{NK}} - \lambda_{\text{NK,soll}}| dt \quad (6)$$

Das Kriterium der Betragsregelfläche bildet das Integral über den Betrag der Regeldifferenz, d.h. der Unterschied zwischen dem gemessenen Lambdawert nach Kat λ_{NK} und seinem Sollwert $\lambda_{\text{NK,soll}}$ wird aufintegriert. Die Schadstoffemissionen sind bei einem stöchiometrischen Lambdawert nach Kat am geringsten, d.h. $\lambda_{\text{NK,soll}}=1$. Durch die Betragsbildung wird vermieden, dass sich positive und negative Flächenanteile, d.h. Lambdaabweichungen in Richtung fett und in Richtung mager, aufheben. Das Integral wird lediglich in den Bereichen der Messungen berechnet, in denen die Hinterkatregelungen aktiv sind.

Die Abbildung 5 zeigt die berechneten Betragsregelflächen für beide Regelungskonzepte im Vergleich. Dabei ist anzumerken, dass es sich um Mittelwerte über eine Messreihe bestehend aus mindestens fünf Messungen handelt. Weiterhin wurden die berechneten Betragsregelflächen auf den Wert der Betragsregelfläche der konventionellen Regelung normiert. Dadurch lassen sich die Unterschiede der Regelflächen direkt in Prozent ablesen. Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass mit der in diesem Beitrag vorgestellten Regelung des Luftverhältnisses die Betragsregelfläche gegenüber einer serienmäßig eingesetzten PI-Regelung nahezu halbiert werden konnte.

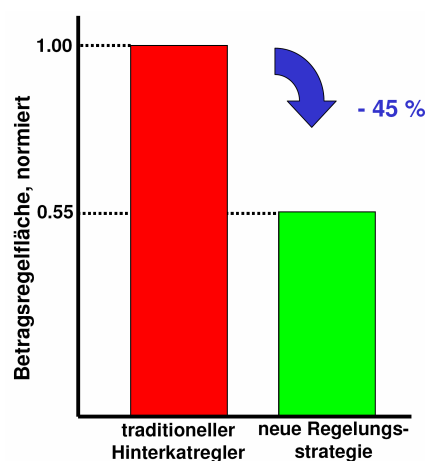


Abbildung 5: Vergleich Betragsregelfläche der Reglervarianten

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine modellbasierte Regelung für das Luftverhältnis präsentiert, die die Sauerstoffspeicherfähigkeit des Katalysators explizit berücksichtigt. Der Kern dieser Regelung bildet ein neu entwickeltes Modell des Dreiwege-Katalysators, das die räumliche Verteilung des gespeicherten Sauerstoffes einbezieht. Um eine vorgegebene Sauerstoffbeladung einzustellen kommt ein Zustandsregler zur Anwendung, dessen Reglerverstärkung über einen Optimalreglerentwurf (LQR) bestimmt wurde. Obwohl es sich um einen linearen Regler handelt, ist die Regelgüte sehr gut. Die Betragsregelgröße der Lambdaabweichungen nach Kat konnte gegenüber einem serienmäßig verwendeten, nichtlinearen PI-Regler um nahezu 50% reduziert werden.

Diese Ergebnisse zeigen das Potential einer Regelung der Sauerstoffbeladung. Momentan werden Regelungs- und Beobachtungsansätze untersucht, die die starke Nichtlinearität des Prozesses besser berücksichtigen. Diese Regler könnten in Zukunft zu einer weiteren Verringerung der Lambdaabweichungen nach Kat und damit zu einer Minimierung des Schadstoffausstoßes beitragen.

Literatur

- [1] Eichlseder, H. ; Klüting, M. ; Pioock, W. F.: *Grundlagen und Technologien des Ottomotors*, Springer, 2008
- [2] Robert Bosch GmbH (Hrsg.): *Ottomotor-Management*, 3. überarb. u. erg. Aufl., Vieweg 2005
- [3] Merker, G. ; Schwarz, Ch. ; Stiesch, G. ; Otto, F.: *Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*. 3., überarb. u. akt. Aufl., Teubner 2006
- [4] Heywood, J. B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, 1988
- [5] Gruden, D.: *Umweltschutz in der Automobilindustrie. Motor, Kraftstoffe, Recycling*, Teubner+Vieweg, 2008
- [6] Joos, F.: *Technische Verbrennung. Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*, Springer, 2006
- [7] Jackson, R. A. ; Peyton Jones, J. C. ; Pan, J. ; Roberts, J. B. ; Childs, P. R. N.: *Chemical Aspects of the Dynamic Performance of a Three-Way Catalyst*, SAE Paper 1999-01-0312, 1999

- [8] Guzzella, L. ; Onder, Ch. H.: *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*, Springer, 2010
- [9] E. Shafai, E. ; Roduner C. ; Geering, H. P.: *Indirect Adaptive Control of a Three-Way Catalyst*, SAE Paper 961038, 1996
- [10] M. Balenovic, M. ; Backx, A. C. P. M. ; Hoebink, J. H. B. J. : *On a Model-based Control of a Three-way Catalytic Converter*, SAE Paper 2001-01-0937, 2001
- [11] Muske, K. R. ; Peyton Jones, J. C.: *Multi-objective model-based control for an automotive catalyst*, *Journal of Process Control*, vol. 16, 2006, pp. 27-35
- [12] Peyton Jones, J. C. ; Roberts, J. B. ; Pan, J. ; Jackson, R. A.: *Modeling the Transient Characteristic of a Three-Way Catalyst*, SAE Paper 1999-01-0460, 1999
- [13] Chatterjee, D.: *Detaillierte Modellierung von Abgaskatalysatoren*, Universität Heidelberg, PhD Thesis, 2001
- [14] Glielmo, L. ; Santini S. ; Serra, G.: *A Two-Time-Scale Infinite-Adsorption Model of Three Way Catalytic Converters*, Proceedings of the American Control Conference, 1999
- [15] Peyton Jones, J. C. ; Jackson, R. A. ; Roberts, J. B.: *The Importance of Reversible Deactivation Dynamics for On-Board Catalyst Control and OBD Systems*, SAE Paper 2002-01-0067, 2002
- [16] Brandt, E. P. ; Wang, Y. ; Grizzle, J. W.: *Dynamic Modeling of a Three-Way Catalyst for SI Engine Exhaust Emission Control*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, 2000, pp. 767-776
- [17] Brandt, E. P. ; Wang, Y. ; Grizzle, J. W.: *A Simplified Three-Way Catalyst Model for Use in On-Board SI Engine Control and Diagnostics*, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control, 1997
- [18] Cioffi, V. ; Scala, S. ; Sepe, E.: *Control Oriented Modeling of the Exhaust Gas After-Treatment System*, MECA01, International Workshop on Modeling, Emissions and Control of Automotive Engines, 2001

- [19] Fiengo, G.: *Emissions Control for the Spark Ignition Internal Combustion Engine equipped with Three-Way Catalytic Converter*, Università degli Studi di Napoli Federico II, PhD Thesis, 2001
- [20] Fiengo, G. ; Grizzle, J. W. ; Cook, J. A. ; Karnik, A. Y.: *Dual-UEGO Active Catalyst Control for Emissions Reduction: Design and Experimental Validation*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, 2005, pp. 722-736
- [21] Balenovic, M.: *Modeling and Model-Based Control of a Three-Way Catalytic Converter*, Technische Universität Eindhoven, PhD Thesis, 2002
- [22] Peyton Jones, J. C. ; Roberts, J. B. ; Bernard, P. ; Jackson, R. A.: *A Simplified Model for the Dynamics of a Three-Way Catalytic Converter*, SAE Paper 2000-01-0652, 2000
- [23] Peyton Jones, J. C.: *Modeling Combined Catalyst Oxygen Storage and Reversible Deactivation Dynamics for Improved Emissions Prediction*, SAE Paper 2003-01-0999, 2003
- [24] Tomforde, M. ; Drewelow, W. ; Kusserow, E. ; Schultalbers, M.: *Control-Oriented Models for Three-Way Catalysts*. In: Cieslinski, J. T. ; Barylski, A. (Hrsg.): *Developments in mechanical engineering*, volume 3. Gdansk University of Technology Publishers, 2009, S. 143-156
- [25] Tomforde, M.: *Vergleich von Modellierungsansätzen für Dreiwege-Katalysatoren unter dem Gesichtspunkt einer modellbasierten Regelung*, Hochschule Wismar, Master-Thesis, 2009
- [26] Tomforde, M.: *Three-way catalyst models for oxygen storage based control of the air-fuel ratio*, Proceedings XI International PhD Workshop OWD 2009, 2009
- [27] Ohsawa, K. ; Baba, N. ; Kojima, S.: *Numerical Prediction of Transient Conversion Characteristics in a Three-Way Catalytic Converter*, SAE Paper 982556, 1998