

Praktische Umsetzung einer modellprädiktiven Momenten- und Drehzahlregelung im Fahrzeug

Stefan Behrendt, Peter Dünow, Hochschule Wismar

E-Mail: stefan.behrendt@hs-wismar.de

Bernhard P. Lampe, Universität Rostock

E-Mail: bernhard.lampe@uni-rostock.de

5. April 2011

Zusammenfassung

Die Koordination der verfügbaren Aktorik in modernen Verbrennungskraftmaschinen erfolgt gegenwärtig zumeist auf Basis von Look-Up-Tabellen und einfachen Reglerstrukturen (z.B. PI-Regler). Die Aktoren werden dabei oftmals als entkoppelt angesehen. Eine modellbasierte Regelungsstruktur, die sowohl die Verkopplung der Aktoren als auch deren Stellbegrenzungen berücksichtigt, ist die modellprädiktive Regelung. Aufgrund des hohen numerischen Aufwandes zur Lösung des integrierten Optimierungsproblems ist eine speziell angepasste Implementierung notwendig, um der Echtzeitbedingung zu entsprechen. Im Beitrag werden die numerischen Eigenschaften des Algorithmus simulativ ermittelt und die praktische Relevanz anhand der Echtzeitregelung des Verbrennungsmotors eines Fahrzeuges im Leerlauf und während der Fahrt auf einer Teststrecke gezeigt.

1 Einleitung

Die steigenden Anforderungen an die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch moderner Verbrennungsmotoren führten zu einer steigenden Anzahl an Aktorik, um den Verbrennungsprozess dahingehend beeinflussen zu können. Die Koordination der vorhandenen Aktoren (z.B. Drosselklappe, Zündung, Abgasrückführung und Turbolader) stellt eine Herausforderung dar. Das Motorsteuergerät berechnet die notwendigen Stellsignale zumeist auf der Basis von Look-Up-Tabellen und berücksichtigt nicht die vorhandenen Querkopplungen zwischen den Aktoren. Die Tabellen werden hierbei in der Regel händisch bedatet, was zu einem hohen Zeitbedarf und somit auch zu hohen Kosten führt.

Eine Alternative bildet die modellprädiktive Regelung (MPR), die modellbasiert und somit systematisch arbeitet. Durch die Überlagerung dieses Reglers können die bestehenden Teilsteuerungen effizient koordiniert werden, wobei jeweilige Stellbegrenzungen inhärent berücksichtigt werden.

Aufgrund der notwendigen kleinen Abtastzeiten in Motorsteuergeräten ist die MPR für dieses System schwierig anzuwenden. Die notwendige Lösung eines Optimierungsproblems in jeden Abtastschritt und der damit einhergehende numerische Aufwand wird als Hindernis für die Implementierung dieses Regelungsverfahrens in eingebettete Systeme gesehen. Das Interesse ist jedoch auch in der Automobilindustrie groß und die Vorteile des Verfahrens zum Beispiel durch [11] bereits gezeigt.

Dieser Beitrag soll zeigen, dass die MPR von Verbrennungsmotoren auf regulären Motorsteuergeräten bereits möglich ist, wenn ein speziell angepasster Algorithmus und eine begrenzte Anzahl an Aktoren verwendet wird. Dies wird im Folgenden anhand simulativer Ergebnisse und Messungen unter realen Bedingungen in einem Fahrzeug gezeigt.

Der Beitrag gliedert sich in eine kurze Einführung in den Basisalgorithmus der MPR in Abschnitt 2 und der Darstellung der verwendeten Modellstruktur in Abschnitt 3. In Abschnitt 4 werden die numerischen Eigenschaften des Algorithmus anhand einer Hardware-In-The-Loop Simulation ermittelt und die praktische Relevanz durch die Regelung des Verbrennungsmotors eines Fahrzeuges im Leerlauf und während der Fahrt auf einer Teststrecke gezeigt.

2 Basisalgorithmus

In diesem Abschnitt wird der Basisalgorithmus des modellprädiktiven Standardregelungsverfahrens beschrieben. Für eine detaillierte Darstellung wird auf die einschlägige Fachliteratur [4, 9] verwiesen.

Die Berechnung optimaler Stellgrößen erfolgt durch Minimierung des Gütefunktional

$$J(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \|\hat{y}(k+i|k) - w(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta u(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \quad (1)$$

in jedem Abtastschritt. Darin sind die Parameter H_p der Prädiktionshorizont, H_u der Stellhorizont, Q die Gewichtungen der Regeldifferenzen und R die Gewichtungen auf die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgrößen. Die prädizierten Regelgrößen \hat{y} , die Führungsgrößen w und die Differenzstellgrößen Δu sind zeitdiskrete Signale und vom aktuellen Abtastzeitpunkt k abhängig.

Die Prädiktion der Regelgrößen \hat{y} erfolgt mittels der wiederholten Anwendung des linearen zeitdiskreten Zustandsraummodells

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) \quad (2a)$$

$$y(k) = \mathbf{C}x(k) \quad (2b)$$

durch

$$\hat{y}(k+1|k) = \mathbf{C}\mathbf{A}x(k) + \mathbf{C}\mathbf{B}u(k-1) + \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k|k) \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+2|k) &= \mathbf{C}\mathbf{A}^2x(k) + \mathbf{C}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{B}u(k-1) + \mathbf{C}(\mathbf{I} + \mathbf{A})\mathbf{B}\Delta u(k|k) + \\ &\quad \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k+1|k) \end{aligned} \quad (3b)$$

\vdots

mit

$$\Delta u(k+i|k) = \begin{cases} u(k+i) - u(k+i-1) & \forall i \in \{0, \dots, H_u - 1\} \\ 0 & \forall i \in \{H_u, \dots, H_p\} \end{cases} \quad (4)$$

über den Prädiktionshorizont. Die Prädiktionsgleichungen (3) lassen sich kompakt in Matrixform darstellen als

$$Y(k) = \Psi x(k) + \Upsilon u(k-1) + \Theta \Delta U(k). \quad (5)$$

Darin ist $\Delta U(k) = [\Delta u(k|k), \dots, \Delta u(k+H_u-1|k)]^T$ der Vektor der Differenzstellgrößen und $Y(k) = [\hat{y}(k+1|k), \dots, \hat{y}(k+H_p|k)]^T$ der Vektor der prädizierten Regelgrößen.

Mit Gleichung (5) kann das Gütefunktional (1) in der Form

$$J(k) = \Delta U(k)^T H \Delta U(k) - g(k)^T \Delta U(k) \quad (6)$$

mit den Parametern

$$H = \Theta^T \mathcal{Q} \Theta + \mathcal{R} \quad \text{und} \quad g(k) = 2\Theta^T \mathcal{Q} \varepsilon(k) \quad (7)$$

angegeben werden. Mithilfe der Prädiktion der Regelgrößen wird die Regeldifferenz über den Prädiktionshorizont $\varepsilon(k)$ berechnet. Durch die Wahl der Diagonalmatrizen \mathcal{Q} und \mathcal{R} , deren Diagonalelemente aus $Q(i)$ mit $i = 1, \dots, H_p$ bzw. $R(i)$ mit $i = 0, \dots, H_u - 1$ bestehen, wird die Regelung parametrisiert. Im Kontext der modellprädiktiven Regelung und mit den Einschränkungen, dass $\mathcal{Q} \geq 0$ und $\mathcal{R} > 0$ sind, liegt ein konvexes, quadratisches Gütefunktional vor.

Durch eine Nebenbedingung in Form einer linearen Matrixungleichung

$$A \Delta U(k) \leq b(k) \quad (8)$$

können Beschränkungen der Stellgröße u berücksichtigt werden.

Die Minimierung des quadratischen Gütefunktional (6) unter der Nebenbedingung (8) ist ein Standardproblem, das mittels quadratischer Programmierung (QP) lösbar ist.

Dieses Optimierungsproblem kann formal durch

$$\min_{\Delta U(k)} \left\{ \Delta U(k)^T H \Delta U(k) - g(k)^T \Delta U(k) : A \Delta U(k) \leq b(k) \right\} \quad (9)$$

beschrieben werden. In der Literatur werden für die Lösung dieses Problems verschiedene Ansätze und Verfahren verwendet [10]. Der entwickelte Algorithmus beruht auf dem Verfahren der aktiven Menge beschrieben in [5], ist aber hinsichtlich der speziellen Anwendung innerhalb der MPR optimiert. Die Erweiterungen umfassen

Ausnutzung der Struktur der Nebenbedingung Da ausschließlich Stellbegrenzungen berücksichtigt werden, entspricht das Matrixprodukt $A\Delta U(k)$ in (8) einer kumulierten Summe. Des weiteren kann aus diesem Grund ohne hohen numerischen Aufwand ein zulässiger Startwert ermittelt werden.

Einschränkung auf spezielle Prozessklasse Die Implementierung beruht auf einer speziellen Prozessklasse, wie sie in der Verbrennungsmotorsteuerung vorkommt [6]. Diese Maßnahme ermöglicht die Anpassung der Parameter des Gütefunktional während des Betriebes.

Verbesserter Warm-Start Die Nutzung der Lösung des vorhergehenden Abtastschrittes zur Initialisierung kann bei Führungsgrößenänderungen und Störungen zu einer hohen Laufzeit führen. Eine verbesserte Initialisierungsroutine kann diesen Umstand verhindern [3].

Vorausberechnung des Gleichungssystems In jeder Iteration des Verfahrens der aktiven Menge ist ein Gleichungssystem veränderlicher Dimension zu lösen. Die verwendete LDL^T -Zerlegung kann teilweise vorausberechnet werden, was zu einer signifikant geringeren Laufzeit führt [2].

Multiple Aktivierung und Deaktivierung von Restriktionen Die aktiven Restriktionen in der Lösung werden iterativ identifiziert. Aufgrund der Unabhängigkeit von Δu -Termen in (8), die zu verschiedenen Stellgrößen gehören, können in einer Iteration mehrere Restriktionen aktiviert oder deaktiviert werden. Dies führt oftmals zu einer reduzierten Rechenzeit und verbessert das Ergebnis im Falle eines frühzeitigen Abbruchs des Verfahrens.

Diese Erweiterungen schränken das Einsatzgebiet ein, aber erlauben die Echtzeitregelung einer bestimmten Prozessklasse.

3 Modellbildung

Die betrachtete Modellstruktur ist in Abbildung 1 dargestellt. Es werden zwei Aktoren zur Regelung des Verbrennungsmotors verwendet. Das Moment auf dem Luftpfad wird durch die Frischluftmenge im Zylinder aufgrund des Drosselklappenwinkels bestimmt. Das Delta-Moment auf dem Zündwinkelpfad (ZW-Pfad), das durch den Zündwinkel determiniert ist, dient zur Bildung eines Momentenvorhaltes. Da der Zündwinkel in jedem Arbeitsspiel verändert werden kann, ist eine zeitnahe Reaktion auf Führungsgrößenänderungen oder auftretende Störungen möglich. Zusätzlich sind beide Aktoren Stellbegrenzungen unterlegen. Im Falle des Luftpfades resultieren diese aus Sicherheitsbestimmungen,

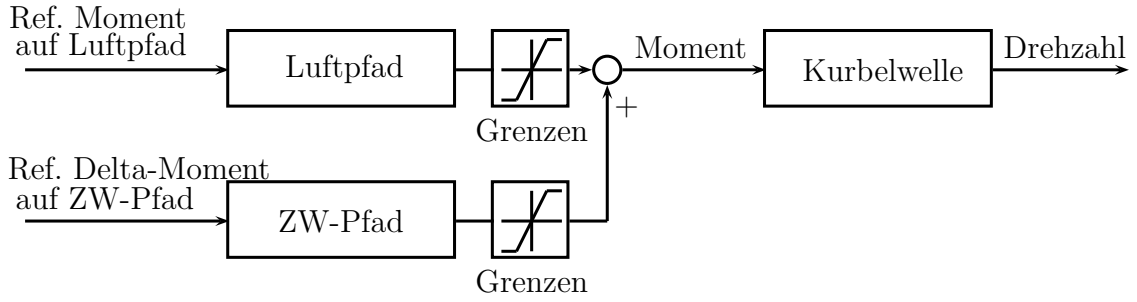


Abbildung 1: Modellstruktur

um eine Beschädigung der Maschine durch ein überhöhtes Moment zu vermeiden. Der ZW-Pfad ist begrenzt, um das Klopfen des Zylinders zu verhindern. Für eine Erklärung dieses Begriffes wird auf [7] verwiesen.

Mit den verwendeten Regelgrößen des resultierenden Momentes M und der Drehzahl n ergibt sich das Modell zu

$$\begin{bmatrix} M(z) \\ n(z) \\ \Delta M_{ZW}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{M_Luft}(z) & G_{M_ZW}(z) \\ G_{n_Luft}(z) & G_{n_ZW}(z) \\ 0 & z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{Luft}(z) \\ \Delta M_{ZW}(z) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Da das Moment und die Drehzahl nicht unabhängig voneinander geregelt werden können, wird vom Regler nur jeweils eine der Regelgrößen geregelt. Dies wird durch die Wahl der Gewichtung der Regelabweichung erreicht. Wird ein Element darin zu Null gewählt, so wird die Regelabweichung der entsprechenden Regelgröße nicht berücksichtigt.

Aus diesem Grund ist die vorgeschlagene Reglerstruktur in der Lage verschiedene Regelgrößen in Abhängigkeit eines Parameters zu regeln. Im Falle der Verbrennungsmotorsteuerung könnten somit der Momentenregler, der den Wunsch des Fahrers umsetzt, und der Leerlaufregler innerhalb einer Struktur zusammengefasst werden.

4 Ergebnisse

Die folgend präsentierten Ergebnisse basieren auf dem Modell (10) und sind durch experimentelle Messungen im Fahrzeug parametrisiert.

4.1 Hardware-In-The-Loop Simulation

Anhand einer Hardware-In-The-Loop (HiL) Simulation auf der Zielplattform Tricore TC1796 von [8] werden die numerischen Eigenschaften des Algorithmus ermittelt.

Die experimentell ermittelten Regelparameter der MPR sind in Tabelle 1 zusammengefasst und die resultierende Regelung wird in Abbildung 2a gezeigt. Bis zu dem Zeitpunkt $t = 5\text{ s}$ erfolgt die Momentenregelung. Dies wird erreicht, indem das Element der Gewichtung der Regeldifferenz q_2 zu Null gesetzt wird. Anschließend ändert sich das Regelungsziel und die Drehzahl wird auf ihren Sollwert geführt. Dazu werden die Gewichtungen in Tabelle 1 gewählt und zusätzlich das Element q_1 zu Null gesetzt.

Tabelle 1: Regelparameter and Details der Implementierung

Parameter	Value
Prädiktionshorizont H_p	20
Stellhorizont H_u	3
Gewichtung der Regelgrößen q	[0.1 0.004 0.05]
Gewichtung der Stellaktivität r	[10 1]
Min. Stellgrößen	[10 -10]
Max. Stellgrößen	[55 0]
Prozessortaktung	150 MHz
Programmspeicher (ohne FP Bibliotheken)	6.3 KB
Programmspeicher (mit FP Bibliotheken)	13.2 KB
Datenspeicher	2.0 KB

Das Delta-Moment auf dem ZW-Pfad unterstützt aktiv das Moment auf dem Luftpfad, um die Regeldifferenz in transienten Phasen zu reduzieren (Abbildung 2b). Im stationären Betrieb wird das Delta-Moment auf dem ZW-Pfad auf die Führungsgröße von -2 Nm eingeregelt und somit eine Momentenreserve realisiert. Die Stellbeschränkungen werden stets berücksichtigt.

In Anlehnung an dem geplanten Einsatz in einem Motorsteuergerät wird eine Abtastzeit von 10 ms gewählt, da dies die fundamentale Abtastzeit für die Luftpfadfunktionalitäten bildet. Die Abbildung 3 zeigt, dass die notwendige Rechenzeit ausreichend ist, um die Echtzeitberechnung der MPR zu gewährleisten. Die maximale Ausführungszeit liegt bei circa $180\text{ }\mu\text{s}$ zu Beginn der Simulation. Zu dem Zeitpunkt $t = 5\text{ s}$ wird das Regelungsziel geändert und zum Zeitpunkt $t = 9\text{ s}$ werden die Streckenparameter adaptiert, was zu einem moderaten Anstieg der Rechenzeit führt. Die Echtzeitfähigkeit bleibt erhalten. Im unteren Teil der Abbildung ist der Vorteil des Warm-Starts der Optimierung zu sehen. Die notwendige Anzahl an Iterationen des Verfahrens der aktiven Menge orientiert sich an der notwendigen Anzahl der Änderungen an der Menge, aber nicht an der eigentlichen Anzahl restringierter Stellgrößen.

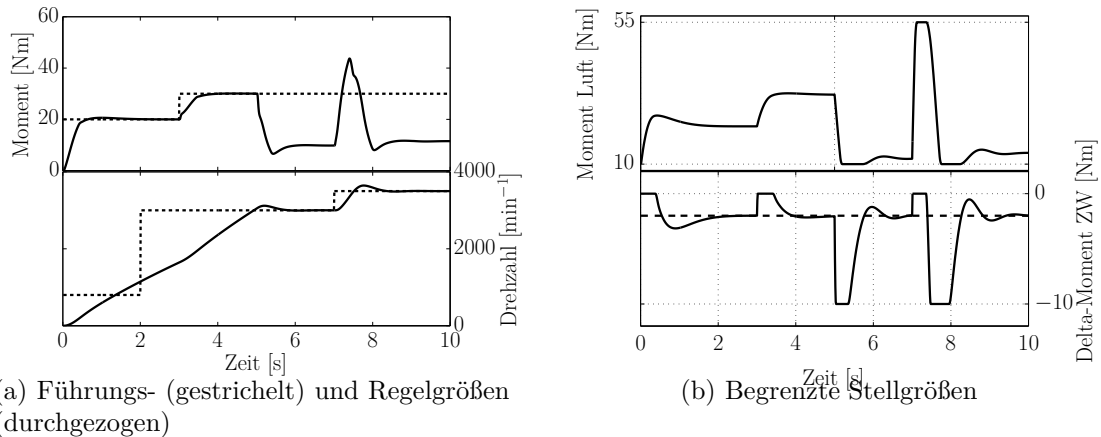


Abbildung 2: Simulatives Regelungsszenario

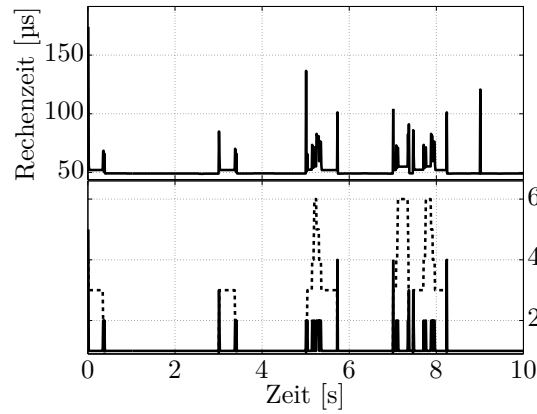


Abbildung 3: Die notwendige Rechenzeit zur Berechnung der Stellgrößen ist im oberen Teil zu sehen und der untere Teil zeigt die Anzahl der Iterationen des Verfahrens der aktiven Menge (durchgezogen) und die Anzahl der aktiven Restriktionen (gestrichelt)

4.2 Evaluierung im Fahrzeug

Das Konzept des internen Bypasses von [1] ermöglicht die einfache Erweiterung bestehender Software um zusätzliche Funktionalität ohne den Quellcode der Software ändern zu müssen. Durch dieses Verfahren kann die Software des Motorsteuergerätes um die MPR erweitert werden. Die MPR berechnet die notwendigen Stellsignale und die Funktionen des Steuergerätes zur Berechnung des Momentes auf Luftpfad und ZW-Pfad werden umgangen. Durch diese Technik ist die Beurteilung der MPR auf der Zielplattform und im Zielumfeld möglich und erlaubt eine Aussage über die generelle Einsatzfähigkeit der MPR für die Verbrennungsmotorsteuerung.

Die ersten Messungen sind im Leerlauf des Verbrennungsmotors erfolgt. Die Abbildung 4 zeigt das geregelte Moment (grün) und dessen Referenz (rot). Im Falle einer Änderung der Referenz ist die aktive Unterstützung des Momentes auf dem Luftpfad (blau) durch das Delta-Moment auf dem ZW-Pfad (magenta) zu erkennen, z.B. zum Zeitpunkt $t = 452$ s. Im stationären Betrieb wird das Delta-Moment auf dem ZW-Pfad auf dessen Referenz (cyan) zurückgeführt. Die Änderungen der Referenz des Delta-Momentes auf dem ZW-Pfad werden stationär durch das Moment auf dem Luftpfad kompensiert und zeigen geringfügige Auswirkung auf das resultierende Moment selbst, z.B. zum Zeitpunkt $t = 477$ s.

Der genutzte MPR-Algorithmus ermöglicht die Änderung von Regelparametern während der Laufzeit. In Abbildung 5 ist die Anpassung der Gewichtung der Stellaktivität dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 594$ s wird das Moment auf Luftpfad dynamisch genutzt, um die Regelabweichung durch die Führungsgrößenänderung zügig zu reduzieren. Im Gegensatz ist zum Zeitpunkt $t = 620$ s die Gewichtung adaptiert, sodass nur eine moderate Nutzung des Luftpfades stattfindet. Als Konsequenz verweilt auch das Delta-Moment auf ZW-Pfad länger außerhalb ihrer Referenz. Die Anpassung der Gewichtung des Luftpfades kann als Sport- und Ökonomiemodus angesehen werden, wie es in modernen Fahrzeugen Stand der Technik ist.

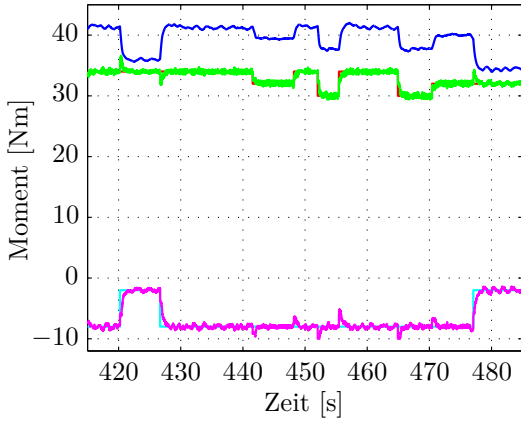


Abbildung 4: Momentenregelung im Fahrzeug während des Leerlaufes und sich ändernder Führungsgröße des Delta-Momentes auf ZW-Pfad

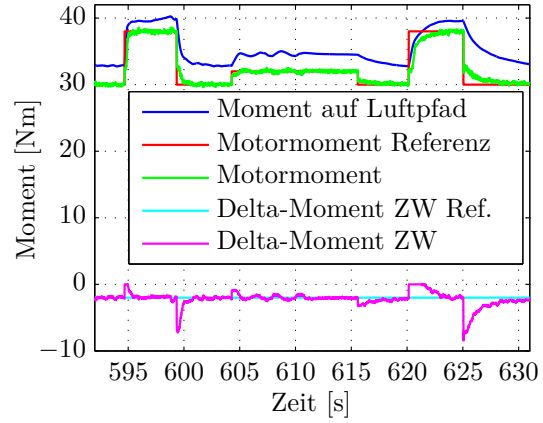


Abbildung 5: Momentenregelung im Fahrzeug während des Leerlaufes und sich ändernder Gewichtung der Stellaktivität auf dem Luftpfad

Die Abbildung 6 zeigt die Änderung des Regelungszieles während der Laufzeit. Bis zum Zeitpunkt $t = 128\text{s}$ wird das Moment (grün) auf dessen Referenz (rot) geregelt. Anschließend wird auf die Regelung der Drehzahl (magenta) auf dessen Referenz (cyan) gewechselt, wie es im vorangegangenen Abschnitt erläutert wird.

Die Evaluierung der MPR auf einer Teststrecke zeigt die Fähigkeit auch Fahrszenarien dynamisch zu regeln. Der Momentensollwert in Abbildung 7 ist vom Fahrer mittels des Gaspedals vorgegeben. Die Stellgrößen werden entsprechend des Sollwertes vom MPR berechnet und der Prozess wird erfolgreich geführt. Da es keine statischen Phasen im gezeigten Fahrszenario gibt, ist das Delta-Moment auf dem ZW-Pfad stets ungleich dessen Referenz. Die Stellgrenzen werden aber zu jeder Zeit berücksichtigt und auch das Moment auf dem Luftpfad bleibt unterhalb der gewählten Sicherheitsgrenze von 200 Nm . Das Fahrzeug beschleunigt von 20 km h^{-1} auf 66 km h^{-1} und zum Zeitpunkt $t = 209\text{s}$ findet ein Gangwechsel statt. Es ist keine Adaption des Prozessmodells notwendig, um trotz der Änderung des Prozessverhaltens eine erfolgreiche Regelung zu gewährleisten.

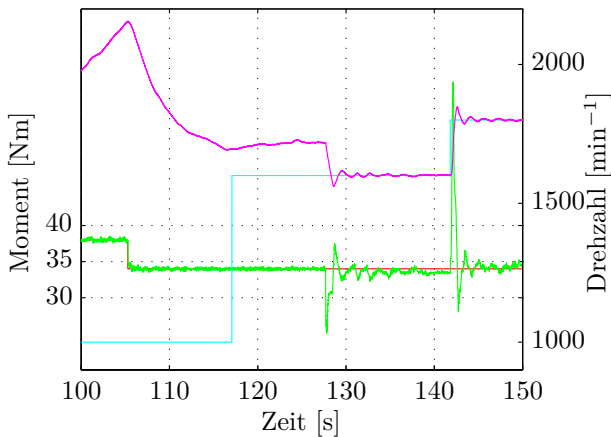


Abbildung 6: Wechsel von Momenten- zu Drehzahlregelung im Fahrzeug während des Leerlaufes

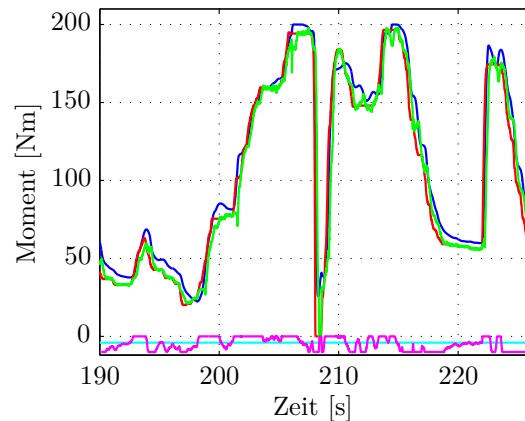


Abbildung 7: Momentenregelung im Fahrzeug auf der Teststrecke

5 Zusammenfassung

Während die Eigenschaften der MPR speziell in der Automobilindustrie von Interesse sind, wird die numerische Komplexität des Regelungsverfahrens als Hindernis für dessen Einsatz in eingebetteten Systemen, wie dem Motorsteuergerät, gesehen. Diese Bedenken haben diesen Beitrag motiviert und es wird gezeigt, dass die MPR von bestimmten Verbrennungsmotorprozessen möglich ist, wenn ein speziell angepasster Algorithmus verwendet und die Anzahl der Stellgrößen begrenzt wird. Die maximale Rechenzeit von 180 μ s während eines beispielhaften Regelungsszenarios gewährleistet die Echtzeitfähigkeit und garantiert eine ausreichende Rechenzeit für die verbleibenden Funktionen des Motorsteuergerätes. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass eine maximale Rechenzeit von 800 μ s resultiert, wenn vier Aktoren verwendet werden. Dies kann ebenfalls als akzeptabel erachtet werden.

Die Evaluierung der MPR im Fahrzeug hat gezeigt, dass das Verfahren für die Verbrennungsmotorsteuerung von praktischer Relevanz ist. Die Stellgrößen werden effizient manipuliert und die Möglichkeit sowohl das Moment als auch die Drehzahl durch einen einzelnen MPR zu regeln, kann die existierende Struktur in aktuellen Motorsteuergerät signifikant vereinfachen. Trotz dessen ist der Ansatz noch nicht einsatzbereit in Seriensteuergeräten. Weitere Arbeit ist notwendig, um beispielsweise die Schubabschaltung und die Zylinderausblendung zu berücksichtigen.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Malte Köller und Christian Steinbrecher von der IAV GmbH für die technische und organisatorische Unterstützung bedanken. Ihre Kenntnisse des Motorsteuergerätes waren ausschlaggebend für die erfolgreiche Umsetzung im Fahrzeug.

Literatur

- [1] ACCURATE TECHNOLOGIES: *No-Hooks Software*. [http://www. accuratetechnologies.com/en/products/no-hooks-software-246-243.html](http://www accuratetechnologies.com/en/products/no-hooks-software-246-243.html). Version: 2011
- [2] BEHRENDT, Stefan: *Echtzeitfähige Modellprädiktive Regelung für Verbrennungskraftmaschinen*, Hochschule Wismar, Diplomarbeit, 2009
- [3] BEHRENDT, Stefan ; DÜNOW, Peter ; LAMPE, Bernhard: Simulation study of parallel model predictive control. In: *Proceeding of 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*. Prague, Czech Republic, 6. - 10. September 2010
- [4] CAMANCHO, E.F. ; BORDONS, C.: *Model Predictive Control*. Springer, 2004
- [5] FLETCHER, R.: *Practical Methods of Optimization*. Bd. 2: Constrained Optimization. John Wiley & Sons, 1981

- [6] FRITZSCHE, C. ; DÜNOW, P. ; BEHRENDT, S. ; SEEMANN, P. ; SCHNAUBELT, M. ; SCHULTALBERS, M.: Predictive Speed and Torque Control. In: *Proceedings of 7. Symposium „Steuerungssysteme für den Antriebsstrang“*. Berlin, Germany, 2009
- [7] GUPTA, H.N.: *Fundamentals of Internal Combustion Engines*. Prentice Hall, 2006
- [8] INFINEON TECHNOLOGIES AG: *TC1796 (Auto-NextGeneration)*. <http://www.infineon.com>. Version: 2010
- [9] MACIEJOWSKI, Jan M.: *Predictive Control with Constraints*. Pearson Education Limited, 2002
- [10] NOCEDAL, Jorge ; WRIGHT, Stephen J.: *Numerical Optimization*. Second. Springer, 2006
- [11] RE, L. del ; ALLGÖWER, F. ; GLIELMO, L. ; GUARDIOLA, C. ; KOLMANOVSKY, I. (Hrsg.): *Automotive Model Predictive Control*. Springer, 2010