

Regelungstechnische Methoden zur Funktions- integration

Dr.-Ing. Alexander Bollig
Dipl.-Ing. Felix Richert
Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen

Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen
Steinbachstraße 54

52074 Aachen

Tel: 0241 / 80 27503

Fax: 0241 / 80 22296

Email: A.Bollig@irt.rwth-aachen.de

<http://www.irt.rwth-aachen.de>

1 Regelungstechnik im Automobil

Wesentliche Fortschritte bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen konnten in den letzten Jahren durch die Integration von elektrischen bzw. elektronischen Systemen in das ursprünglich mechanische System erzielt werden. Hierdurch wurde auf der einen Seite eine Optimierung des Gesamtsystems erzielt (z. B. im Bereich des Antriebs), auf der anderen Seite sind neue Teilsysteme integriert worden, die für den Kunden eine Erweiterung des Funktionsumfangs darstellen (z. B. Fahrerassistenzsysteme).

Die Elektronik hat sich damit als Innovationsmotor im Automobil etabliert, womit jedoch – speziell in der Koordination des Zusammenwirkens einzelner Systeme – eine stark gestiegene Komplexität einhergeht. Ergebnis einer Studie von Mercer und der HypoVereinsbank ist, dass innerhalb der nächsten zehn Jahre der Wertanteil der Elektronik im PKW um 13% auf 35 % steigen wird, wobei heute schon 30% der Entwicklungskosten auf Elektronik und Software entfallen [1]. Speziell der Software – welche die eigentlich neue Funktion beinhaltet – kommt dabei ein wachsender Anteil zu (Bild 1); fast 90% der Innovationen im Kraftfahrzeug gehen heute bereits mit Softwareentwicklung einher.

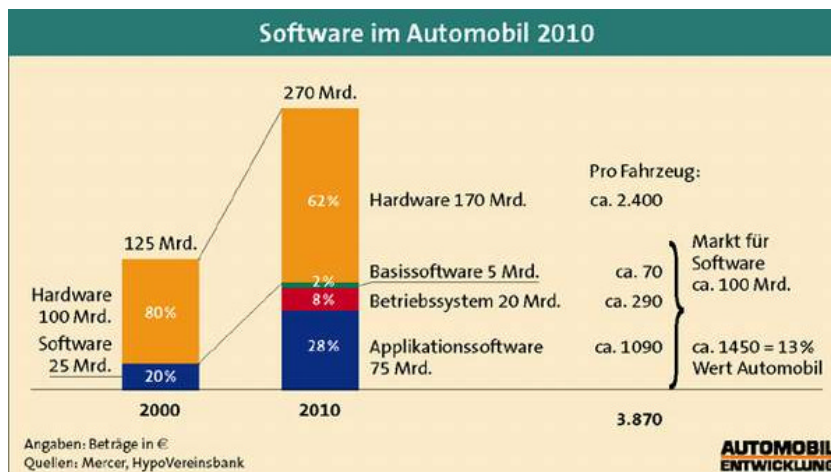


Bild 1: Software im Automobil

Um die Komplexität des Gesamtsystems beherrschbar zu machen, wird zunehmend eine modellbasierte Funktionsentwicklung verfolgt. Dabei bietet sich speziell bei der Entwicklung von Regelungssystemen die Möglichkeit, das Zusammenspiel von Funktionen neu zu betrachten und deren Integration durch Anwendung gehobener Methoden zur Mehrgrößenregelung zu untersuchen.

2 Modellbasierter Regelungsentwurf

Der Entwurf von Regelungssystemen findet bei der traditionellen Systementwicklung zu einem vergleichsweise späten Zeitpunkt statt, wobei üblicherweise versucht wird, durch konventionelle Regelungen dem entworfenen Gesamtsystem ein geeignetes Verhalten aufzuprägen. Oftmals wird dabei ein – aus regelungstechnischer Sicht – unzureichendes Design des Systems erkennbar, beispielsweise durch Wahl von dynamisch ungünstigen Sensoren und Aktoren. Ein modellbasierter Regelungsentwurf, der parallel zur Entwicklung des Systems stattfindet, ermöglicht bereits in der Designphase entsprechende Spezifikationen zu berücksichtigen und geeignete Reglerstrukturen zu finden.

2.1 Klassische Verfahren

Die meisten technischen Prozesse, speziell das Automobil, sind Mehrgrößensysteme, d. h. weisen mehrere (beeinflussbare) Eingangs- oder Stellgrößen und mehrere (i. d. R. messbare) Ausgangs- oder Regelgrößen auf, die gekoppelt sind (d. h. sich wechselseitig beeinflussen). Der klassische PID-Regler ist jedoch für SISO-Systeme (single input, single output) gedacht, die Anwendung auf gekoppelte Mehrgrößensysteme erfordert spezielle strukturelle Anpassungen für den jeweils vorliegenden Fall. Bild 2 zeigt ein solches Beispiel für die Regelung von Luftmassenstrom m_L und Ladedruck p_2 für einen Motor mit Turbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) und Abgasrückführung (AGR).

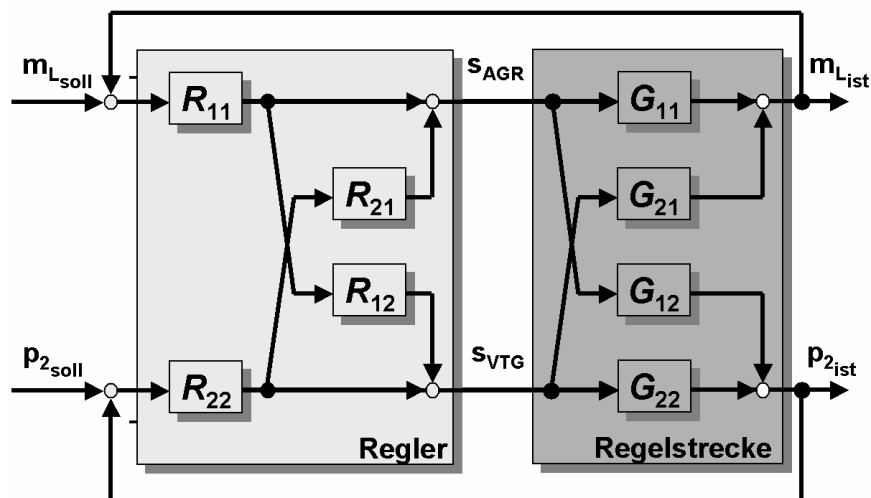


Bild 2: PID-basierte Mehrgrößenregelung für einen aufgeladenen Motor

Neben den genannten Kopplungen – die im obigen Fall durch die Entkopplungsregler R_{21} und R_{12} berücksichtigt werden – stellen nichtlineares Verhalten der Regelstrecke (z. B. quadratische Reibeinflüsse) sowie Begrenzungen in den Stellgrößen (z. B. maximal stellbares Antriebsmoment) und Ausgangsgrößen (z. B. minimaler, von der Regelung zu beachtender Mindestabstand bei der automatischen Längsführung) weitere Anforderungen an die zu verwendenden Regelungsverfahren, so dass der effektive Einsatzbereich für klassische Regelungen begrenzt bzw. der zusätzliche Aufwand für die jeweilige Erweiterung auf den speziellen vorliegenden Fall hoch ist. Eine Methode, die sich effizient auch auf die beschriebene Problemstellung anwenden lässt, stellt die Modellbasierte Prädiktive Regelung (MPR) dar, die im Folgenden beschrieben wird.

2.2 Modellbasierte Prädiktive Regelung

Mit Modellbasierter Prädiktiver Regelung (engl. Model Predictive Control, MPC) wird ein Regelungsverfahren bezeichnet, welches ein Modell des zu regelnden Prozesses verwendet, um - ausgehend vom aktuellen Zustand des Prozesses - eine optimale Stellgrößenfolge zu bestimmen, die den Prozess durch Minimierung des geschätzten zukünftigen Fehlers in einen gewünschten Zustand überführt.

Der prädiktive Regler gibt zu jedem Abtastschritt nur den ersten Wert $u(t)$ der optimalen zukünftigen Stellgrößenfolge an die Regelstrecke aus. Im nächsten Abtastschritt wird die Berechnung der optimalen zukünftigen Stellfolge wiederholt. Dabei wird das Zeitfenster, über das eine Gütefunktion (welche zu erwartende Regelabweichung und aufzubringende Stellenergie gewichtet) gebildet wird, mit jedem Abtastschritt um ein Abtastintervall verschoben (receding horizon). Dabei bezeichnen N_1 und N_2 die Grenzen des Zeitraums, innerhalb dessen der prädizierte zukünftige Verlauf der Regelgröße mit der Referenz verglichen wird, und N_u die Anzahl der zu optimierenden Stellschritte. Oftmals wird N_1 der Streckentotzeit und N_2 dem Maximum der Gewichtsfolge des Modells entsprechend gewählt, wenngleich dies nicht zwingend erforderlich ist. Um die Dimension des Optimierungsproblems zu reduzieren, kann N_u kleiner als N_2 gewählt werden, da nur der jeweils erste optimierte Wert $u(t)$ ausgegeben wird. Das Prinzip ist in Bild 3 dargestellt.

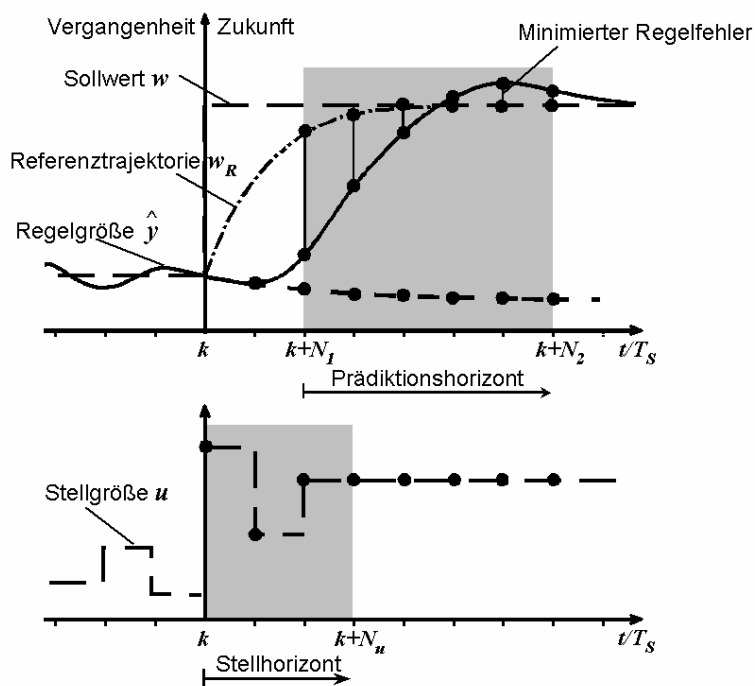


Bild 3: Grundprinzip der prädiktiven Regelung

Dem dargestellten Prinzip entsprechend kommt bei prädiktiven Regelungen zwei Aspekten eine besondere Bedeutung zu. Zum einen wird ein Modell des Prozesses benötigt, um das zukünftige Prozessverhalten hinreichend genau abschätzen zu können. Für die Motorenregelung können hier beispielsweise Mittelwertmodelle Anwendung finden, für die Fahrzeuglängsführung Einspurmodelle. Zum anderen muss ein geeigneter Optimierungsalgorithmus unter Echtzeitbedingungen die optimalen Stellgrößen bestimmen. Die verwendete Modellstruktur prägt das Optimierungsproblem maßgeblich. Es wird mit der zu minimierenden Kostenfunktion J definiert, die oftmals quadratisch gewählt wird.

$$J(\Delta u, t) = \sum_{k=N_1}^{N_2} (w(t+k|t) - \hat{y}(t+k|t, \Delta u))^2 + \rho \sum_{k=0}^{N_u-1} (\Delta u(t+k|t))^2$$

Allgemein ergibt sich hierbei die in Bild 4 dargestellte Struktur des Reglers.

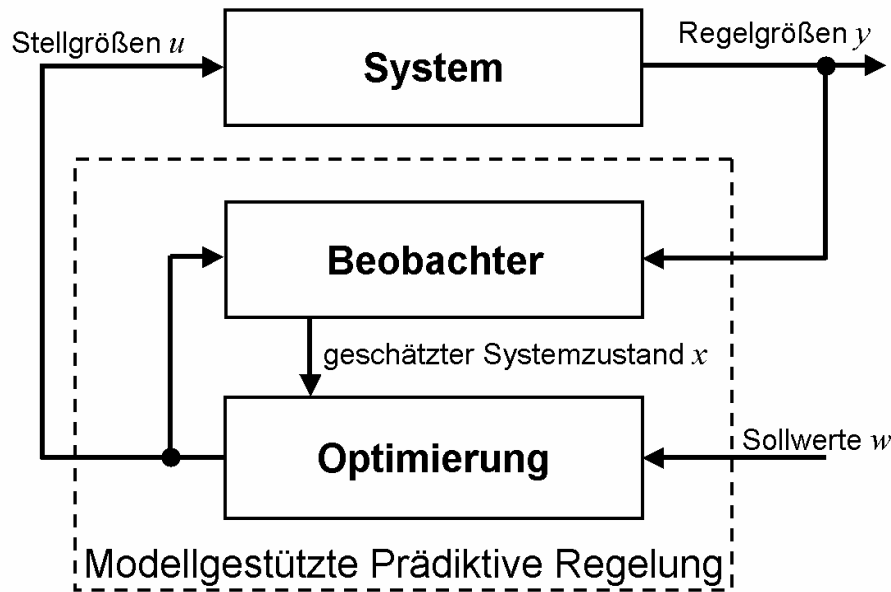


Bild 4: Struktur eines MPR

Werden bei der Minimierung der Kostenfunktion zunächst keine Begrenzungen als Nebenbedingungen berücksichtigt, und ist das verwendete Prädiktionsmodell linear (entspricht dem Streckenmodell der klassischen linearen Reglerauslegung), kann das Optimum direkt bestimmt werden, und es ergibt sich eine Reglerstruktur, die einem linearen Zustandsregler entspricht. Falls bei linearem Prädiktor Begrenzungen berücksichtigt werden sollen, lassen sich softwaretechnisch breit unterstützte Verfahren zur quadratischen Optimierung anwenden. Wird ein nichtlinearer Prädiktor verwendet, müssen angepasste nichtlineare Optimierungsverfahren verwendet werden. Zur allgemeinen Darstellung von Modellbasierten Prädiktiven Regelungen wird z. B. auf [2] verwiesen. Mit dem dargestellten Prinzip ist also ein skalierbares Regelungskonzept vorhanden, das sich auf lineare und nichtlineare Systemen mit und ohne Berücksichtigung von Begrenzungen anwenden lässt.

Wesentliche Vorteile sind hierbei:

- Möglichkeit zur Nutzung eines expliziten Modells (z. B. zur Kombination mit OBD)
- Bei Mehrgrößenprozessen automatische Berücksichtigung von Kopplungen, die in der Gütefunktion priorisiert werden können (Gewichtung von Regelzielen)
- Möglichkeit der Berücksichtigung zukünftigen gewünschten Verhaltens (Trajektorienvorgabe aus z. B. Assistenzsystem)
- Explizite Verwendung von Nebenbedingungen erlaubt Integration von Überwachungsfunktionen in die Regelungsfunktion

2.3 Rapid Control Prototyping

Moderne Entwurfsmethoden orientieren sich sehr häufig an der Vorgehensweise nach dem so genannten V-Modell (Bild 5). Ein typischer Entwicklungsprozess für die Regelung eines komplexen Systems beginnt mit der Modellbildung, gefolgt von einem ersten Reglerentwurf in der Simulation. Hier können unterschiedliche Regelungsstrukturen untersucht und durch Anwendung entsprechender Entwurfsverfahren eingestellt und verifiziert werden. Dies kann man als Systemsimulation bezeichnen; oftmals stellt diese das wesentliche Entwicklungswerkzeug der regelungstechnischen Arbeit dar.

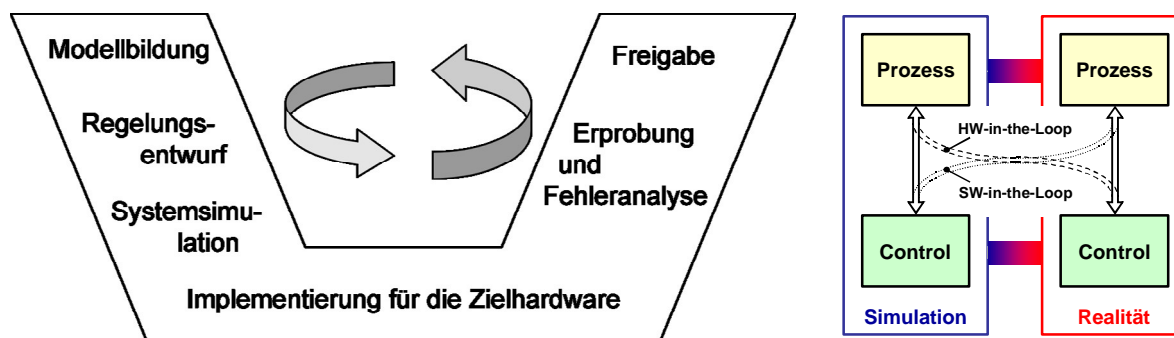


Bild 5: V-Modell für die Reglerentwicklung, HIL- und SIL-Strukturen

In dieser Umgebung kann ebenfalls sukzessive die erforderliche Rechenleistung und Genauigkeit untersucht werden, um das notwendige Hardwareprofil definieren zu können. Sind hierdurch geeignete Algorithmen gefunden und in der Simulation erprobt worden, beginnt häufig die Phase der händischen Software-Entwicklung für die Zielhardware, also das Steuergerät. Ziel ist es, zunächst die gefundenen Algorithmen unter Einhaltung der Restriktionen wie Rechengenauigkeit und Echtzeit nachzubilden. Hieran anschließend findet eine Erprobung am Prozess statt; der bereits realisierte Algorithmus wird auf seine Nutzbarkeit hin getestet. In den meisten Fällen treten dann Abweichungen des Verhaltens des Prozesses von dem Verhalten des in der Simulation verwendeten Modells auf, wodurch eine neue Iteration in diesem Entwicklungsprozess durch Modifikation des Modells für die Systemsimulation gestartet wird.

Mittlerweile ist es möglich, weitestgehend durchgängige Toolketten zu nutzen, die von der Modellbildung bis zur Codegenerierung und -verifikation den Regelungstechnik-Ingenieur unterstützen. Damit wird es prinzipiell möglich, bereits in der Entwurfsphase den Gesamtprozess zu betrachten und gegebenenfalls nicht nur auf der Steuerungs- und Regelungsebene Anpassungen zu erproben, sondern auch am zu regelnden Prozess. Damit rückt die Regelungstechnik vom Ende des Entwicklungsprozesses, welches häufig durch "heilende" Anforderungen aufgrund von Designfehlern geprägt ist, in eine Entwicklungsphase, in der eine dynamische Gesamtoptimierung zumindest noch möglich ist.

Diese modellbasierten Vorgehensweisen sind unter den Stichworten Rapid Control Prototyping (RCP) oder HW/SW-in-the-Loop zu finden. Sie dienen dazu, eine komfortable, bedienerfreundliche grafisch programmierbare Simulationsoberfläche durch automatisierte Code-Generierung mit einer Zielhardware zu verbinden.

Methodisch nutzen diese Ansätze auf der abstrakten Modellebene häufig dieselben grafischen Beschreibungsformen wie in der Systemsimulation. Diese stammen meist aus dem jeweiligen Anwendungsgebiet und erleichtern damit den Transfer des Wissens in die verwendeten Modelle.

Der wesentliche Schritt besteht nun in der Möglichkeit der automatischen Code-Generierung. Ist der reale Prozess verfügbar, kann z.B. für die gefundene Regelungsstruktur direkt ausführbarer Code erzeugt und mithilfe einer leistungsfähigen skalierbaren Echtzeit-Hardware mit Prozessankopplung eine Erprobung durchgeführt werden. Diesen Schritt, bei dem der Prozess real und die Regelung auf einer leistungsfähigen Plattform „simuliert“ wird, kann als „Software-in-the-loop“ bezeichnet werden. Iterationen lassen sich auf diese Art und Weise zwar nicht umgehen, aber durch die Beschleunigung der einzelnen Zyklen und die Entlastung des Ingenieurs bei der Implementierung ist die Entwicklung schneller und kostengünstiger durchführbar.

Analog ist auch die Codegenerierung des Prozessmodells möglich – hierdurch eröffnen sich zwei wesentliche Möglichkeiten. Die erste ähnelt der Systemsimulation, findet jedoch unter Echtzeitbedingungen auf zwei Plattformen statt. Hierbei ist man nicht an die Verfügbarkeit und die Beschränkungen der realen Prozesse gebunden, kann u.a. aber schon auf die später verwendeten Kommunikationsstrukturen zurückgreifen. So lassen sich z. B. auch sicherheitskritische Untersuchungen durchführen und solche zu Komponenten, die real (noch) nicht verfügbar sind. Die zweite Möglichkeit ist in Bild 5 als „Hardware-in-the-loop“ bezeichnet und erleichtert die Erprobung und Freigabe. Ist ein auf der Zielhardware lauffähiger Algorithmus generiert worden, kann mithilfe der Echtzeit-Prozesssimulation über entsprechende Versuche eine risikoarme Verifikation von allen auftretenden sicherheitskritischen Prozesszuständen simuliert werden.

Auf der Seite der Codegenerierung bestehen die methodischen Vorteile darin, dass das Wissen über die Umsetzung formaler (grafischer) Beschreibungen in effizient ausführbaren Code an zentraler Stelle gesammelt und verwaltet werden kann und somit Anforderungen wie z.B. die Fehlerfreiheit und Reproduzierbarkeit einfacher zu erfüllen sind als bei händischer Umsetzung.

Die wesentlichen inhaltlichen Vorteile bestehen darin, dass der jeweilige Entwickler sich ausschließlich auf seine Kernkompetenzen konzentrieren kann. Die Verwaltung von Modellen und zugehörigen bzw. abgeleiteten Regelungsstrukturen und deren Dokumentation ist somit leichter möglich.

3 Anwendungen

3.1 Motorenregelung

Im Hinblick auf die Einhaltung zukünftiger Emissionsgrenzwerte in Verbindung mit neuen hochdynamischen Testzyklen kommt der Regelung des Verbrennungsmotors eine steigende Bedeutung zu, da kennfeldbasierte, stationär abgestimmte Steuerstrategien die wachsenden Anforderungen nicht mehr erfüllen können.

Im Folgenden ist der Entwurf einer prädiktiven Mehrgrößenregelung zur geregelten Hochdruck-Abgasrückführung in Kombination mit einem Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie kurz dargestellt [3,7,8], der in gemeinsamen Projekten mit den aic-Partnern VKA und FEV entwickelt wurde. Im Sinne der im vorangehenden Abschnitt vorgestellten Methodik wurde die Regelung zunächst anhand eines echtzeitfähigen Mittelwertmodells entworfen, welches durch aufwändige Prozessrechnungen und Prüfstandsversuche validiert wurde. Die Reglerstruktur wird in Bild 6 dargestellt.

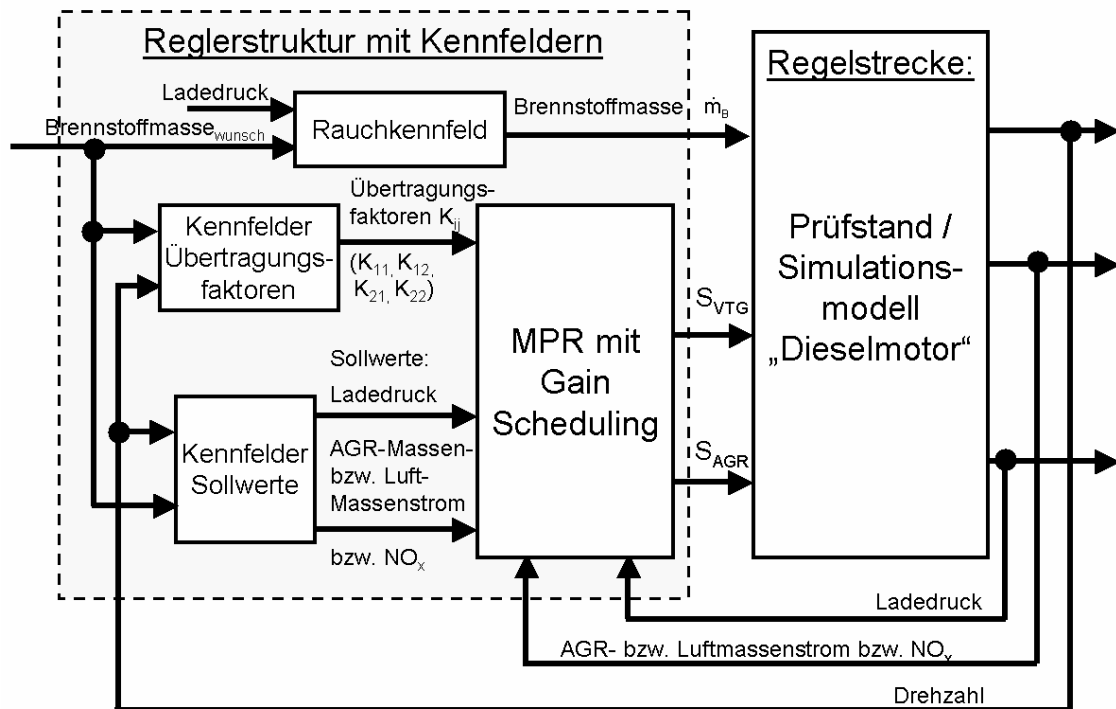


Bild 6: Reglerstruktur für die prädiktive Mehrgrößen-Motorenregelung

Ausgehend vom Fahrerwunsch nach einem Moment bzw. einer – über das Rauchkennfeld limitierten – einzuspritzenden Brennstoffmasse ergeben sich Sollwerte für den aktuellen Motorbetrieb in Form der Größen von Ladedruck und AGR-Massen- bzw. Luft-Massenstrom. Die Aufgabe des Reglers besteht nun darin, durch Stellen der Turbinenschaukeln und des AGR-Ventils diese Größen einzustellen. Um sowohl der begrenzten auf dem Steuergerät verfügbaren Rechenzeit als auch den nichtlinearen Eigenschaften des Prozesses zu genügen, ist ein linearer MPR-Ansatz gewählt worden, der mit einer so genannten Gain Scheduling-Erweiterung kombiniert wurde. Die für die Applikation erforderlichen Kennfelder für die Übertragungsfaktoren beinhalten – im Gegensatz zu Parameterkennfeldern für z. B. adaptive PID-Strukturen – jedoch keine heuristischen Werte, sondern physikalische Systeminformationen, die aus einer genauen Prozessrechnung bzw. einer Motorvermessung unmittelbar gewonnen werden können. Untersuchungen mit transiente Testzyklen zeigen das Potenzial der Regelung zur Abstimmung des NO_x -Partikel-Trade-Offs [3].

3.2 Stauassistent

Im Rahmen des bmbf-Projekts „Invent“ ist mit dem ic-Partner fka ein Stauassistent als Erweiterung der klassischen Systeme zur Adaptiven Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (ACC) erforscht worden [4,6]. Hierbei wird die Aufgabe der Längsführung betrachtet und die heute verfügbare ACC-Funktionalität um ein automatisiertes Anhalten und Anfahren sowie die Fahrt im niedrigen Geschwindigkeitsbereich erweitert. Das prinzipielle Regelungsziel besteht in der Regelung des Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug, jedoch treten bei z. B. Einscherern durch Verwendung einer klassischen geschwindigkeitsabhängigen Abstandsregelung unkomfortable Verzögerungsvorgänge auf. Daher ist ein Konzept verfolgt worden, welches auf einer Analyse des menschlichen Fahrverhaltens speziell im niedrigen Geschwindigkeitsbereich im Stau aufbaut. Hierbei wurden verschiedenen Situationsklassen identifiziert, in denen sich ein Fahrer in typischer, für die jeweilige Situation charakteristischer und reproduzierbarer Weise verhält. Mittels der von der Fahrzeugsensorik erfassten Da-

ten lässt sich für die jeweilige Fahrsituation eine Klasse (z. B. „Anfahren“ oder „Folgen“) identifizieren, und aus dem beobachteten Fahrerverhalten eine Sollwerttrajektorie für das dem menschlichen Fahrer nachempfundene Fahrverhalten für die nächsten Augenblicke generieren. Diese Trajektorie stellt die ideale Vorgabe für die Nutzung eines Prädiktiven Regelungskonzepts dar, Bild 7.

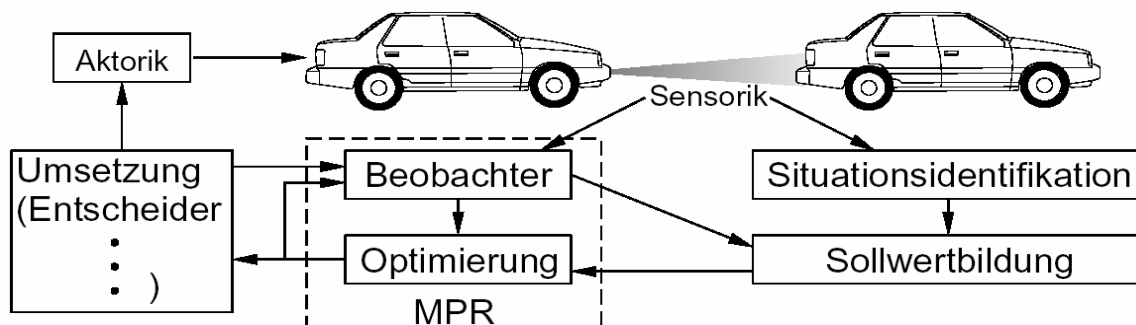


Bild 7: Struktur des Stauassistenten

Der Prädiktive Regler hat nun die Aufgabe, die optimalen Stellgrößen durch Betätigung von Gas oder Bremse zu bestimmen, welche das Fahrzeug in der Längsbewegung diesem Wunsch folgen lassen. Eine automatische Überwachung des Mindestabstandes ist als Nebenbedingung in der Optimierung realisiert worden, wodurch beispielsweise eine Fehlinterpretation der Fahrsituation abgefangen werden kann.

3.3 Potenzial zur Funktionsintegration

Neben der Verbesserung der einzelnen Regelungsfunktionen, die durch geeignete regelungstechnische Entwurfs- und Applikationsmethoden erzielt werden kann, besteht eine zentrale Herausforderung in der Funktionsintegration, d.h. der Koordination der Einzelfunktionen untereinander. Hierbei muss zukünftig ein höherer Vernetzungsgrad erreicht werden, um die Funktionalität zu erweitern und die Zuverlässigkeit zu erhöhen.

Eine regelungstechnische Maßnahme kann in der Zusammenfassung einzelner, bislang mehr oder weniger autarker Regelungen zu einem umfassenderen Führungssystem auf Basis der prädiktiven Regelung darstellen. Hierbei ist die intuitive Verständlichkeit des Ansatzes, die Skalierbarkeit und die Applizierbarkeit auf gekoppelte Mehrgrößenprozesse unter Berücksichtigung von Begrenzungen und Nichtlinearitäten von entscheidender Bedeutung. Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen.

Im Bereich des Antriebsstrangs machen sowohl die Anforderungen an das Emissionsverhalten als auch erweiterte Beeinflussungsmöglichkeiten (z.B. variabler Ventilttrieb, Einspritzung) klar erkennbar, dass die Koordination des Gesamtsystems nur noch durch eine entsprechend mächtige Regelung, die gemäß der Komplexität nur modellbasiert entworfen werden kann, möglich ist. Durch beispielsweise Ausbau zu Hybrid-Konzepten ist eine online-Optimierung, wie sie innerhalb der Prädiktiven Regelung durchgeführt wird, als Betriebsstrategie unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen wie SOC der Batterie erforderlich. Informationen über die zukünftig zu erwartende Fahrsituation, wie sie aus Assistenzsystemen gewonnen werden können, können hierbei unmittelbar innerhalb der Optimierung verwendet werden.

Im Bereich der Fahrzeugführung wird der Aspekt der Integration einzelner Assistenzfunktionen, wie z. B. der kombinierten Längs- und Querregelung [5], weiter an Bedeutung gewinnen. Wie auch im Bereich des Antriebsstrangs sind hier neue Beeinflussungsmöglichkeiten (z. B. Überlagerungslenkung, aktive Fahrwerkselemente)

verfügbar, über die die Fahrzeugbewegung beeinflusst werden kann. Speziell durch die erweiterte situationsspezifische Interpretation von Fahrzeugumfeldinformationen (u.a. Spurerkennung) lässt sich eine Erweiterung des skizzierten Stauassistenten um sicherheitsrelevante Funktionen wie Notbremsungen, automatisches Ausweichen oder auch ein optimiertes Fahren im dichten Verkehr erzielen, was jedoch auch hier eine online-Optimierung über alle Stellmöglichkeiten unter Berücksichtigung der vorhandenen Nebenbedingungen erfordert.

4 Literatur

- [1] Hartmann, J.: „Wo viel Licht ist, ist starker Schatten – Softwareentwicklung in der Automobilindustrie“, at – Automatisierungstechnik 52 (2004), Heft 8, Oldenbourg Verlag
- [2] Maciejowski, J. M.: „Predictive Control with Constraints“, Prentice Hall, 2002.
- [3] Rückert, J.; Richert, F.; Schloßer, A.; Abel, D.; Herrmann, O. E.; Pfeifer, A.; Pischinger, S.: "Ein Modellgestützter Prädiktiver Ansatz zur Regelung von Ladedruck und AGR.Rate beim Nutzfahrzeug-Dieselmotor", Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2004, VDI-Berichte 1828, VDI-Verlag, Düsseldorf 2004, ISBN 3-18-091828-4, S. 131-141
- [4] Zambou, N., Richert, F., Schloßer, A., Abel, D., Sandkühler, D.: "Modellgestützte Prädiktive Regelung zur Längsführung von Kraftfahrzeugen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich", Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2004, VDI-Berichte 1828, VDI-Verlag, Düsseldorf 2004, ISBN 3-18-091828-4, S. 361-370
- [5] Weilkes, M., Bürkle, L., Rentschler, T., Scherl, M.: "Zukünftige Fahrzeugführungsassistenten – Kombinierte Längs- und Querregelung", Steuerung und Regelung von Fahrzeugen und Motoren - AUTOREG 2004, VDI-Berichte 1828, VDI-Verlag, Düsseldorf 2004, ISBN 3-18-091828-4, S. 405-416
- [6] Richert, F. ; Zambou, N; Bollig, A. Abel, D.; Sandkühler, D.: „Modellbasierte Stop-and-Go-Regelung für den INVENT-Stauassistenten“. VDE-Kongress 2004, 18.-20..10.2004, Berlin.
- [7] Rückert, J.; Richert, F.; Schloßer, A.; Abel, D.; Herrmann, O. E.; Pischinger, S.; Pfeifer, A. (2004). „A Model Based Predictive Attempt to Control Boost Pressure and ERG_Rate in a Heavy Duty Diesel Engine“. IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, April 19.-23. 2004, Salerno, Italy, p. 127-133
- [8] Herrmann O.E., Pischinger S., Pfeifer A., Krüger M., Rückert J., Richert F., Schloßer A., Abel D.: „Transient Emission Control for Heavy Duty Diesel Engines within the European Test Cycle“. SAE-NR 2003-01-59
- [9] Guzzella, L.: „Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine“. Springer, 2004, ISBN 3-540-22274-x
- [10] Clarke, D. W.; Mohtadi, C.; Tuffs, P. S.: „Generalized Predictive Control - Part I and Part II“, Automatica, Volume 23, Nr. 2, 1987.