

# Ein Verfahren zur güteindexbasierten Selbsteinstellung einer Regelungsstruktur

Dipl. Ing. Jonas Esch,  
Prof. Dr.-Ing. S. X. Ding,  
AKS Universität Duisburg-Essen  
jonas.esch@uni-due.de

Dr. rer. nat. Claus Kirchner,  
Dipl. Ing. D. Leineweber,  
Dipl. Ing. M. Schultalbers  
IAV GmbH Gifhorn  
claus.kirchner@iav.de

## **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wird ein innovatives Verfahren zur Selbsteinstellung präsentiert, mit dem der Zeitaufwand für die Parametrierung der Raildruckregelung verringert und darüber hinaus die Qualität der Applikation verbessert werden kann. Die Grundlage für die im vorliegenden Tool umgesetzte Methodik bilden anwendungsspezifische Güteindizes, die zur Selbsteinstellung der Reglerparameter genutzt werden. Im Ergebnis erhält man eine transparente, in ihrer Entstehung nachvollziehbare und reproduzierbare Reglerparametrierung. Das Verfahren konnte für die Applikation des Hochdruck-Kraftstoffsystems erfolgreich implementiert werden und steht im Rahmen eines Software-Tools für den Praxiseinsatz zur Verfügung.

## **1 Einleitung**

Automobilhersteller sehen sich heute bei der Entwicklung von Serienkonzepten unter anderem mit folgenden gegenläufigen Rahmenbedingungen konfrontiert: einerseits steigen die Anforderungen an Qualität, Verfügbarkeit und Komfort, andererseits verkürzen sich die Entwicklungszeiten. Im Hinblick auf das Kraftstoffversorgungssystem ergibt sich ein Handlungsbedarf neben den angesprochenen allgemeinen Erfordernissen insbesondere auch aus den steigenden gesetzlichen Anforderungen bzgl. des Emissionsverhaltens von Fahrzeugen. Hier sind bezogen auf die Qualität der Kraftstoffzumessung weitere Optimierungen erforderlich. Dazu zählt auch, dass die Raildruckregelung den Kraftstoffsollwert möglichst gut und schnell einregelt, um den Verbrennungsablauf in der Nähe des Optimums zu halten.

Um eine qualitativ hochwertige Applikation der Reglerparameter zu gewährleisten, sind neue automatisierte Verfahren zu entwickeln und abzusichern. Im Rahmen der Kooperation zwischen der Universität Duisburg Essen und der IAV GmbH ist es gelungen, eine Software zu erstellen, mit deren Hilfe sich die Raildruckregelung effizient parametrieren lässt. Das Besondere an dem Verfahren ist, dass es ohne explizite Streckenidentifikation einen Reglerparametersatz mit Hilfe von Güteindizes bestimmt und eine Aussage über die Qualität der Regelung liefert. Das entstandene Rapid-Calibration (RC) Werkzeug ist sowohl für den Einsatz am Prüfstand als auch im Fahrzeug geeignet.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Beschreibung der Regelstrecke

Die hier betrachtete Hochdruckkraftstoff-Strecke besteht aus einer Kraftstoffhochdruckpumpe (1) mit Mengensteuerventil (1a), Kraftstoffverteilerrohr (Rail, 2) und Injektoren (3) und ist in diesem Aufbau der Stand der Technik in heutigen Großserien Ottomotoren.

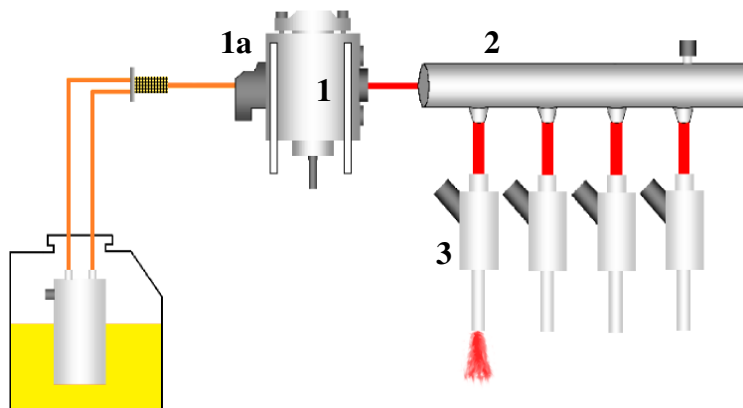


Bild 1: Schema Hochdruckkraftstoff-Regelstrecke

Als Stellgröße wird dem Aktor ein zu förderndes Kraftstoffvolumen übergeben, welches in einer nachgeschalteten Funktion in ein Ansteuersignal für das Mengensteuerventil der Pumpe umgesetzt wird. Durch Variation des Fördervolumens lässt sich der im Verteilerrohr herrschende Druck beeinflussen. Der gemessene Kraftstoffdruck bildet den Streckenausgang. Der durch die Injektoren entnommene Kraftstoffmassenfluss wird als bekannte Störgröße aufgefasst.

Um das Streckenverhalten zu beschreiben lässt sich wie in (Blath 2006) dargestellt ausgehend von der Summe über die zu- und abfließenden Massenströme das integrierende Verhalten der Strecke mitsamt nichtlinearem Verstärkungsterm als Hammerstein-Modell herleiten.

$$p_{rail}(t) = f(u(t), rpm, ZF) * \Theta(t) \quad (1)$$

Zur theoretischen Betrachtung kann das Modell (Blath 2006) der Strecke wie in (Yang 2011) beschrieben in einem Drehzahl-Zylinderfüllungs-Arbeitspunkt (rpm-ZF AP) linearisiert werden und man erhält ein P-T<sub>1</sub>-T<sub>i</sub> Modell. Der Aufwand zur Modell- und Parameteridentifikation könnte durch die Vorteile gerechtfertigt werden, die eine modellbasierte Regelung und Steuerung bietet. Jedoch ist dies meist zu zeitaufwendig, zudem zeigen sich modellbasierte Regelungen meist sensitiv auf Parameteränderungen wie sie durch die Seriensteuerung der verbauten Komponenten auftreten können. Im folgenden wird daher der Fokus auf die modellfreie Einstellung eines gain-scheduling Reglers gelegt, der das arbeitspunktabhängige Verhalten der Strecke berücksichtigt.

## 2.2 verwendete Regelungsstruktur

Zur Regelung der Hochdruckregelstrecke wird die im Bild 2 abgebildete Struktur verwendet. Sie besteht aus einem offenen Vorsteuerungs- und einem geschlossenen Regelzweig, wobei sich die auf die Strecke wirkende Stellgröße als Summe der von Regler und Vorsteuerung erzeugten Stellgrößen berechnet.

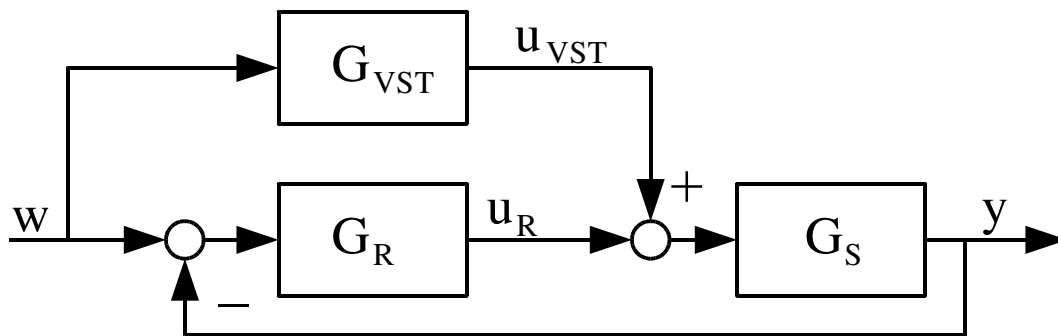


Bild 2: Schema der Regelungsstruktur

Eine so aufgebaute Regelungsstruktur bietet eine, für eine modellfreie Struktur, gute Trennung des Einflusses ihrer Komponenten auf Stör- und Führungsverhalten (Horowitz 1963). Die Vorsteuerung garantiert ein gutes Verhalten bei Sollwertänderungen und die Reglerauslegung erfolgt auf die optimale Ausregelung von Störungen.

Der in diesem Beitrag betrachtete Regler ist ein PI-Regler mit drehzahlabhängigen Parametern, dessen Übertragungsfunktion sich schreiben lässt als

$$G_r = K_p(rpm) \left( 1 + \frac{1}{T_i(rpm) \cdot s} \right). \quad (2)$$

Die oben beschriebene Abhängigkeit der Streckenparameter von der aktuellen Zylinderfüllung ist in den Reglerparametern nicht direkt abgebildet. Indirekt wird die Auflösung dieser Abhängigkeit über die Generierung des Drucksollwertes aus Kennfeldern übernommen, welche von der Zylinderfüllung abhängen. Da die Vorsteuerung keine exakte Modellinvertierung gewährleistet, kann die Zylinderfüllung als Störgröße für den Regler interpretiert werden, auf deren Unterdrückung dieser später eingestellt wird.

## 2.3 Bisherige Vorgehensweise zur Reglerbedatung

Das bisherige Vorgehen zur manuellen Bedatung der Parameter des oben beschriebenen PI-Reglers durch den Applikateur lässt sich anhand des folgenden Zweischnitt-Verfahrens erklären:

*Schritt 1: Erstbedatung der Reglerparameter, entweder aus*

*a.) Datenübernahme aus Reglern für ähnliche Strecken oder*

*b.) Rückrechnen auf Streckenparameter aus der stationär bedateten Vorsteuerung  $F$  und anschließender modellbasierter Erstbedatung nach z.B. Ziegler-Nichols*

*Schritt 2: Feinjustierung der Reglerparameter durch Nach-Applikation am Motorprüfstand und im Fahrzeug. Hierbei wird die Regelgüte in verschiedenen Situationen durch den Applikateur bewertet und die Reglerparameter intuitiv angepasst.*

Die bisherige Vorgehensweise zur Bedatung der Reglerparameter bietet kaum einen systematischen Zugang zum Prozess der Parameterfindung. Des Weiteren war es bisher nicht möglich und üblich die Güte der Regelung quantitativ zu bewerten. Der Applikateur orientiert sich an Grenzen, wie z.B. der Stellgrößenbegrenzung, die die Signale im Regelkreis nicht überschreiten dürfen und nutzt innerhalb dieser sein persönliches Ermessen um die Qualität der Regelung zu bewerten. Basierend auf seiner Bewertung der Regelgüte verstellt er die Reglerparameter nach einem empirisch angeeigneten Verfahren solange, bis die Regelgüte seinen Anforderungen entspricht.

Die erreichte Qualität der Reglerbedatung hängt damit von Geschick und Güteverständnis des Applikateurs ab und ist schwer reproduzierbar. Um den Reglerparameter-Bedatungsprozess nachvollziehbarer und unabhängiger vom Applikateur zu machen, kann das im Folgenden beschriebene güteindexbasierte Selbsteinstellungsverfahren genutzt werden.

## 3 Selbsteinstellung

Ziel der hier beschriebenen Arbeit war es, die angesprochene Abhängigkeit der zu erreichenden Regelgüte vom Expertenwissen des jeweiligen Applikateurs zu entkoppeln. Hierzu wurden Möglichkeiten untersucht, die zu erreichende Güte möglichst praxisnah und prägnant quantifizieren zu können und anschließend den Regler automatisiert und ohne Streckenmodell-Kenntnisse so einstellen zu können, dass die erwünschte Güte erreicht wird. Im folgenden werden die dazu betrachteten Güteindizes sowie der darauf basierende Einstellalgorithmus beschrieben.

### 3.1 Güteindizes

Für den Einsatz eines Bewertungsverfahrens muss zum einen die Quantifizierung der Regelgüte sowie zum anderen eine Vorgabe der von der Regelung zu erreichenden Güte möglich gemacht werden.. In der Prozessindustrie haben sich die sogenannten „Control Performance Monitoring“ (CPM, (Huang 1999), (Harris 1999), (Qin 1998), (Jelali 2010)) Verfahren zur Regelgüteverfolgung etabliert. Sie bewerten an Hand von bestimmten signalbasierten Indizes die Qualität der verwendeten Regelung. Als Basis für klassische CPM-Methoden werden Referenzwerte für Indizes genutzt, wie sie sich mit einem idealen Regler für die betrachtete Strecke ergeben würden. Somit kann die aktuelle Güte als Verhältnis hierzu angegeben werden. Die von uns gewählten und nachfolgend genauer vorgestellten Indizes beschreiben die Güte der Regelung absolut und für den Applikateur intuitiv verständlich. Zur Auswahl der verwendeten Indizes geben wir hier zunächst die von der betrachteten Hochdruckregelung geforderten Eigenschaften qualitativ und in ihrer Priorität absteigend geordnet an:

- keine durch den Regler erzeugten Schwingungen im System
- verbrauchs- und verschleißoptimaler Betrieb der Kraftstoffhochdruckpumpe
- schnelles Ausregeln von Störungen.

Schwach- oder ungedämpfte Schwingungen, die durch falsche Parametrierung des Reglers erzeugt werden, sowie große Überschwingweiten in der Stellgröße tragen zu einer unnötig hohen Förderleistung der Hochdruckpumpe bei. Dadurch kommt es zu einem erhöhten Leistungsbedarf und Verschleiß des Bauteils. Aus diesem Grund sollen die Schwingungen und das Überschwingen anhand eines Index quantifiziert und später durch die Selbsteinstellung vermindert werden. Das schnelle Ausregeln von Störungen, welches das eigentliche Ziel einer Reglereinstellung auf Störunterdrückung ist, ist hier nur unter der Voraussetzung zu optimieren, dass die ersten beiden Anforderungen erfüllt sind.

Um beschreiben zu können wie gut die genutzten Reglerparameter die oben genannten Anforderungen erfüllen, werden die folgenden drei Güteindizes verwendet:

- der Flächenindex  $FI_u$  der Stellgröße als Maß für Schwingungen
- die Überschwingweite  $\ddot{U}SW_u$  der Stellgröße
- die Stör-Ausregelzeit  $T_{aus}$  des geschlossenen Kreises.

Der Flächenindex (3) ergibt sich nach (Visioli 2005) für die Stellgröße wie folgt: die durch Unter- und Überschwingen entstehenden Flächen zwischen dem Signalverlauf und dem stationären Endwert des Signals werden berechnet.

$$FI_u = \frac{\max\{A_1, \dots, A_{n-2}\}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_i} \quad (3)$$

Anschließend wird bei mehr als 4 erkannten Nulldurchgängen das Verhältnis zwischen der größten Fläche und der Summe der  $i$ -ten Flächen ab Sprungantwortbeginn bestimmt und somit eine Maßzahl über die Oszillationen in der Stellgröße gewonnen.

Die Überschwingweite der Stellgröße (4) wird wie in (Lutz 2005) beschrieben gebildet und in Prozent angegeben. Dazu wird der Endwert einer Sprungantwortreaktion der Stellgröße ins Verhältnis zu ihrem Maximalwert gesetzt.

$$\dot{U}SW_u = \frac{\max\{u\}}{u_\infty} - 1 \quad (4)$$

Die Ausregelzeit (5) wird ebenfalls wie in (Lutz 2005) beschrieben bestimmt und kennzeichnet den erstmaligen Eintrittszeitpunkt der Istgröße in ein Toleranzband um den stationären Endwert.

$$T_{aus} = \arg \min_t (|y(t) - y_\infty| < \varepsilon) \quad (5)$$

### 3.2 Einstellalgorithmus

Nicht zuletzt aufgrund des nicht vorhandenen Streckenmodells, lassen die hier behandelten Indizes keinen direkten Schluss auf die optimalen Stellgrößen beziehungsweise Reglerparameter zu. In den bisherigen Veröffentlichungen zur CPM finden sich deshalb wenn überhaupt nur rudimentäre Anleitungen zur Verstellung von Reglerparametern basierend auf ermittelten Indizewerten beziehungsweise deren Abweichung vom normalen Wert.

Bereits in (Visioli 2005) wurde jedoch gezeigt, dass der Wert des Flächenindex einen Rückschluss auf die vorzunehmenden Änderungen an den Reglerparametern zulässt. Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeit wurden darüber hinaus auch die Auswirkungen geänderter Reglerparameter auf die Überschwingweite und die Ausregelzeit untersucht. Basierend auf den Erkenntnissen über die Auswirkung der veränderten Reglerparameter auf die verwendeten Güteindizes wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus den ermittelten Indizewerten die jeweiligen Änderungen an den Reglerparametern iterativ vornimmt.

Der im Folgenden beschriebene dreistufige Algorithmus stellt ein regelbasiertes Expertensystem dar, dessen Regeln aus (Visioli 2005) und dem Expertenwissen der Applikateure zusammengetragen wurden.

#### Abschnitt 1:

- a) *Detektiere eine Anregung und berechne den Flächenindex sowie das Überspringen des Reglerausgangs*
- b) *Wenn die Güteanforderungen an Oszillation und Überschwingweite erfüllt sind, erhöhe  $K_p$  und wiederhole Schritt a), wenn nicht gehe zu Abschnitt 2*

#### Abschnitt 2:

- c) *Detektiere eine Anregung und berechne Flächenindex, Überspringen und die Ausregelzeit.*
- d) *Wenn die Güteanforderungen nicht erfüllt sind, reduziere  $K_p$  ansonsten reduziere  $T_i$*

- e) Prüfe die durch die Einstellungsziele vorgegebene Abbruchbedingung. Wenn diese nicht erfüllt ist, gehe zurück zu Schritt c) ansonsten gehe zu Abschnitt 3

*Abschnitt 3:*

Setze  $K_p$  und  $T_i$  auf Werte, die der optimalen Ausregelzeit entsprechen und beende die Selbsteinstellung.

Zu einem Parameterpaar  $(K_{p,1}, T_{i,1})$  des Reglers wird die Störsprungantwort analysiert und die Indizes  $I_{A,1}$  berechnet; sie setzen sich aus dem Tripel  $(FI_u, \ddot{U}SW_u, T_{aus})$  zusammen. Nach dem im Folgenden beschriebenen Verfahren wird automatisiert ein Parameterpaar  $(K_{p,2}, T_{i,2})$  bestimmt und es ergeben sich durch Auswertung der Sprungantwort die zugehörigen Indizes  $I_{A,2}$ . Auf diese Weise erhält man eine Folge  $I_{A,n}$  von Indizes, die mit den jeweiligen Reglerparametern korrespondieren, und den Verlauf der mit diesen Parametern zu erreichenden Güte beschreiben. Aufgabe des Algorithmus ist es, durch iteratives Verstellen der Reglerparameter den oben beschriebenen Indizeverlauf zu erzeugen und dessen Minimum mit den dazugehörigen Reglerparametern zu finden.

Als Abbruchkriterium für den Algorithmus dient ein Vergleich der berechneten Indizes  $I_{A,n}$  mit den vom Applikateur vorgegebenen, zu erreichenden Indizewerten  $I_z$ , die die gewünschte Regelgüte beschreiben.

Damit der Algorithmus zuverlässig beendet werden kann, müssen die a priori festgelegten Zielwerte der Indizes  $I_z$  in einem realisierbaren Bereich liegen. Des Weiteren wird der Algorithmus auch beendet, wenn über mehrere Schritte keine Veränderung in den aus den Anregungen berechneten Indizewerten zu beobachten ist. Eine mehrstufige Adaption mit angepasster Schrittweite zur Genauigkeitssteigerung ist weiterhin vorgesehen.

Um den beschriebenen Algorithmus einsetzen zu können muss bereits zu Beginn eine Initialbedatung des Reglers vorhanden sein, die die Stabilität des geschlossenen Kreises garantiert und die Auswirkungen der zur Indizewertgenerierung genutzten Störsprünge so dämpft, dass die Strecke hierdurch nicht beschädigt wird. Die von dieser Initialbedatung erlangte Regelgüte hat keinen Einfluss auf das Ergebnis der Selbsteinstellung, jedoch kann die Laufzeit der Selbsteinstellung durch schlecht gewählte Initialparameter erheblich verlängert werden.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Tool

Der auf den vorgestellten Güteindizes basierende Einstellalgorithmus wurde für den effektiven Praxiseinsatz in ein Software-Tool unter Matlab<sup>1</sup> implementiert. Das entwickelte Programm ermöglicht es, eine automatisierte und reproduzierbare Bedatung des PI-Reglers für die Raildruckregelung am Motorprüfstand, auf einer Leistungsrolle und auch direkt im Fahrbetrieb zu erstellen.

---

<sup>1</sup> © The MathWorks

Durch die möglichst einfach gehaltene Nutzeroberfläche wird dem Nutzer ein schneller Einstieg ermöglicht. Für alle einstellbaren Parameter, wie zum Beispiel Schwellwerte der Güteindizes oder Startwerte der Reglerparameter, gibt es voreingestellte Standardwerte, mit welchen im Normalfall die automatisierte Bedatung durchgeführt werden kann. Wenn es erforderlich ist, können die Einstellungen vor Beginn einer Adaption an das jeweilige Motorprojekt und gegebenenfalls weitere Vorgaben angepasst werden.

Das Programm erzeugt periodisch sprungförmige Störanregungen für das Hochdruck-Kraftstoffsystem. Nach der ersten Anregung wird durch eine Plausibilisierung der gemessenen Daten überprüft, ob eine fehlerfreie Kommunikation zu dem Motorsteuergerät besteht. Danach wird mit der stets vorhandenen Grundbedatung des Fahrzeugs jeweils eine Sprungantwort einer positiven und einer negativen Anregung aufgezeichnet, zwecks späteren Vergleichs. Im Anschluss daran beginnt der zuvor beschriebene Einstellalgorithmus. Um diesen iterativen Prozess verfolgen und bei Auffälligkeiten eingreifen zu können, wird das in Bild 3 dargestellte Übersichtsfenster angezeigt. Alle relevanten Informationen wie z.B. der Verlauf der Parameter und der Güteindizes, getrennt für positive und negative Anregungen, werden visualisiert.

Wenn die Abbruchbedingung des Einstellalgorithmus erreicht ist, wird die Reglerbedatung mit der höchsten Güte, unter Berücksichtigung der eingestellten Vorgaben, ausgegeben.

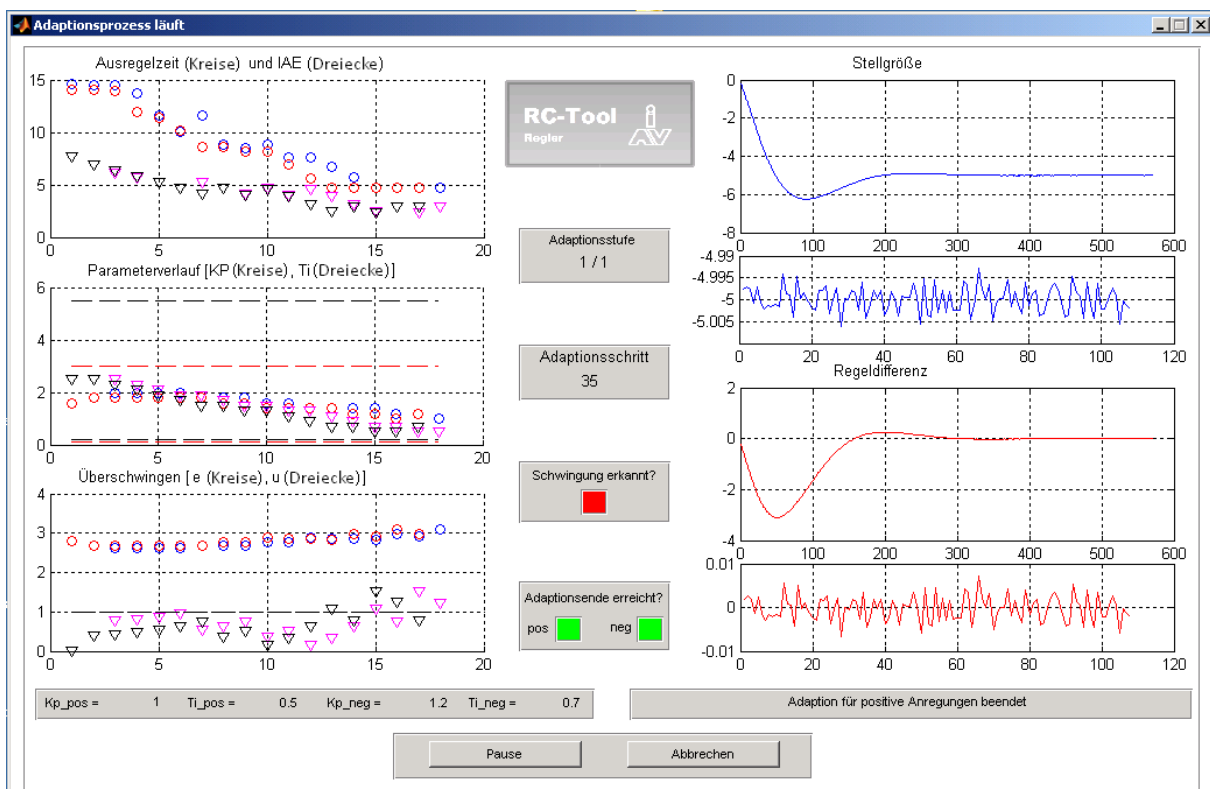


Bild 3: Ansicht Ergebnisfenster des Rapid-Calibration-Tools



## 4.2 Straßenfahrtmessungen mit Rapid Calibration-Tool Prüfstandsbedatung

Mit dem zuvor beschriebenen Tool wurde an einem Motorprüfstand an allen Drehzahl-Stützstellen der Reglerparameterkennlinie eine vollständige Reglerbedatung erstellt. Ein Vergleich der Störsprungantworten der Referenzbedatung und der Toolbedatung bei Volllast und einer Drehzahl von 3000 1/min für den Fall einer negativen Anregung, ist in Bild 4 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der iterative Adaptionprozess des Tools eine Bedatung mit höherer Güte als die Referenzbedatung liefert. Sowohl die Ausregelzeit, als auch der IAE sind geringer.

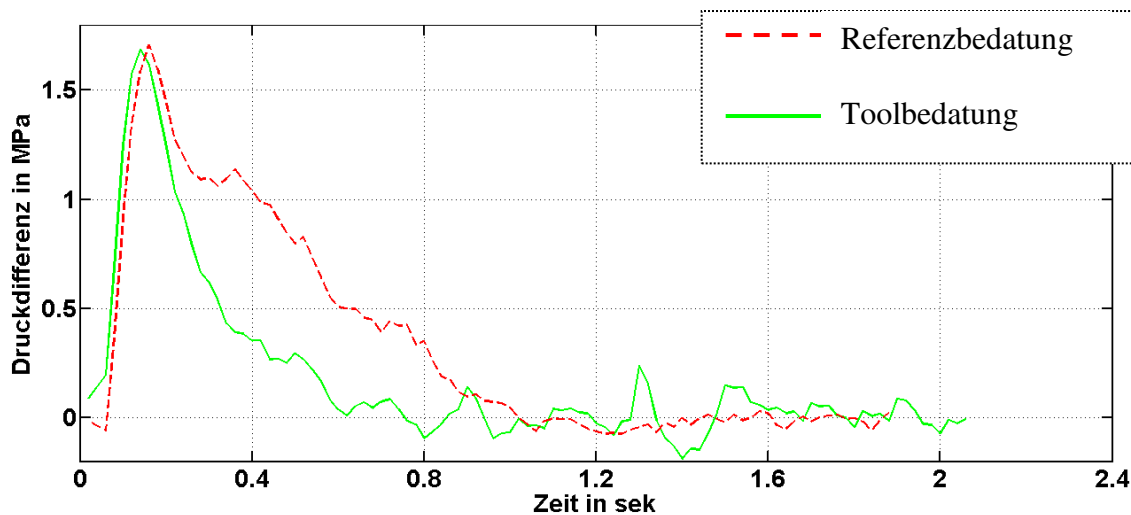


Bild 4: Vergleich der Störsprungantwort

Die mit dem Tool am Prüfstand erstellte Parametrierung wurde in einer Straßenfahrt der Referenzbedatung gegenübergestellt. Der Soll- und Ist-Raildruckverlauf einer Volllastbeschleunigung mit der Referenzbedatung ist in Bild 5 und mit der Toolbedatung in Bild 6 gezeigt.

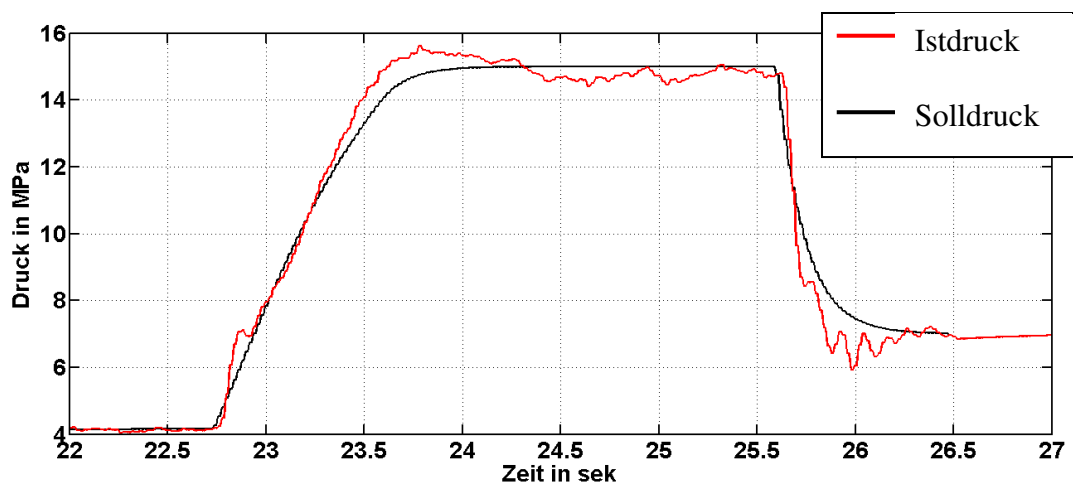


Bild 5: Raildruckverlauf mit Referenzbedatung

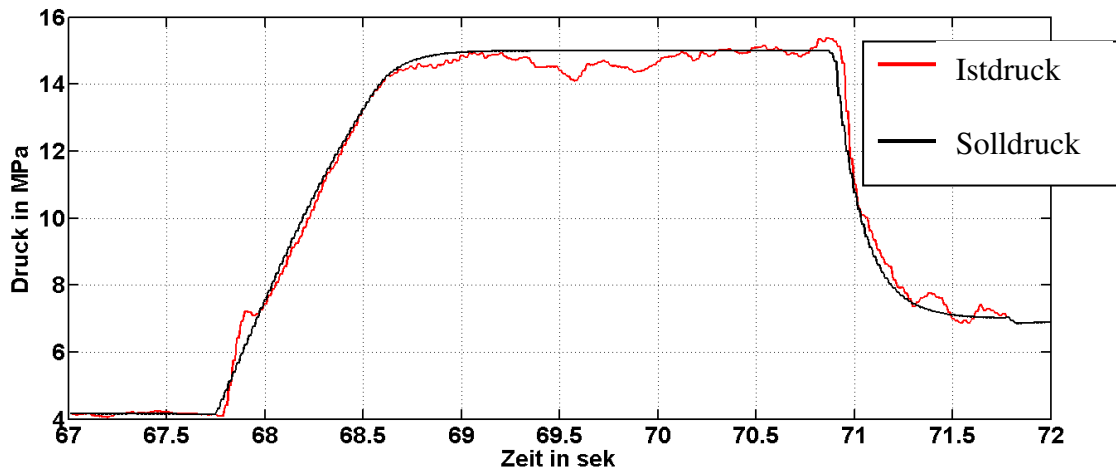


Bild 6: Raildruckverlauf mit Rapid-Calibration-Tool Bedatung

Auch in der Straßenfahrt ist eine höhere Güte der Toolbedatung im Vergleich zur Referenzbedatung deutlich sichtbar. In den kritischen Punkten am Ende des Druckauf- und abbaus ist das Überschwingen deutlich reduziert. Auch die Ausregelzeit fällt bei der Toolbedatung geringer aus.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein auf Güteindizes basierendes Selbsteinstellungsverfahren für die Parametrierung eines PI-Reglers im Hochdruck-Kraftstoffsystem vorgestellt.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die in der Prozessindustrie beheimateten CPM-Methoden auch in den Anwendungsgebieten der Automobilindustrie erfolgversprechend genutzt werden können. So konnte mit dem Einsatz des Software-Tools der Applikationsaufwand deutlich reduziert werden, da nun mit wenigen Vorkenntnissen eine nach bestimmten Gütekriterien festgelegte und reproduzierbare Bedatung der Raildruckregelung möglich ist.

Die Grundlage für die Weiterentwicklung des Programms bilden die im Rahmen der Entwicklung des Software-Tools gewonnenen Erkenntnisse über die wirkungsvolle Kombination der Indizes. So hat sich gezeigt, dass ein Einsatz direkt im Fahrzeug ebenfalls zu sehr guten Ergebnissen führt, wodurch weiteres Potential zur Optimierung der Applikationsabläufe identifiziert werden konnten.

Auch die Erweiterung des Tools auf weitere Regelstrecken wird aufgrund der positiven Ergebnisse in Zukunft angestrebt.

## 6 Danksagung

Die der Universität Duisburg-Essen angehörenden Autoren möchten sich hiermit bei der IAV GmbH und ihren Mitarbeitern für die finanzielle und kollegiale Unterstützung bedanken, ohne die die hier beschriebene Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

## Literatur

- [1] Blath, J.P., 2006. Modelling of Fuel Pressure Dynamics. In 3. ASIM Workshop Wismar – Modellierung, Regelung und Simulation in Automotive und Prozessautomation.
- [2] Harris, T., 1999. A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems. *Journal of Process Control*, 9(1), S.1-17.
- [3] Horowitz, I.M., 1963. *Synthesis of feedback systems*, Academic Press Inc. London.
- [4] Huang, B., 1999. *Performance assessment of control loops: theory and applications*, London; New York: Springer.
- [5] Jelali, M., 2010. *Control System Performance Monitoring: Theory and Applications*. Habilitation. Universität Duisburg Essen.
- [6] Lutz, H., 2005. *Taschenbuch der Regelungstechnik* 6th Aufl., Frankfurt am Main: Deutsch.
- [7] Qin, J.S., 1998. Control performance monitoring - a review and assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 23(2), S.173-186.
- [8] Visioli, A., 2005. Assessment of tuning of PI controllers for self-regulating processes. In P. Zítek, hrsg. 16th IFAC World Congress. S 1615-1615.
- [9] Yang, G., 2011. *Methoden zur effizienten Selbsteinstellung und ressourcenschonenden Residuengenerierung für Regelungssysteme von Verbrennungsmotoren am Beispiel des Hochdruck-Kraftstoffsystems*. Dissertation. Duisburg: Universität Duisburg-Essen.