

# **Ruckfreie Reglerumschaltungen und direkte Reglerparametrierung aus Messdaten**

Helmuth Stahl  
hstahl@expertcontrol.com  
ExpertControl GmbH  
Strittholzstraße 31, 82211 Herrsching

## **1 Einleitung**

Das Auslegen von Regelsystemen ist oft schwierig und zeitintensiv, weil optimierte und aufeinander abgestimmte Regelalgorithmen und Parametrierungen gefunden werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass reale Komponenten und Systeme aus den Industriefeldern Automotive, Aerospace, Verfahrenstechnik oder Antriebstechnik sowie bei den dort vorhandenen Prüfständen nichtlineare Effekte beinhalten, die zusätzlich zu beachten sind. Der Betrieb dieser Systeme wird daher in mehrere als linear betrachtbare Arbeitsbereiche untergliedert und die Auslegung der Regelsysteme für den jeweiligen Arbeitsbereich separat durchgeführt. Hierbei entstehen oft sogenannte Kennlinienregler. Ein gravierender Nachteil dieser Regler ist die aufwendige Ermittlung der Daten und die hohe Anzahl der Daten, um beim Wechseln in die verschiedenen Arbeitsbereiche eine möglichst ruckarme Parameter-Umschaltung überhaupt zu ermöglichen. In der überwiegenden Mehrzahl von Anwendungen sind allerdings die entstehenden Stellsignalausschläge aufgrund der Umschaltungen inakzeptabel hoch und schwingungsbehaftet.

Ein direkt anwendbarer Weg zur Lösung dieser Problematik ist mit den Engineering Software Paketen ecICP und ecCST verfügbar: a) ecICP erzeugt aus Messdaten direkt einsetzbare Reglerstrukturen und deren Parametrierungen. Verschiedene Arbeitsbereiche werden dabei ebenso berücksichtigt wie Anforderungen an die gewünschte Regelkreisdynamik, sogar bei Vorgabe von Sollwert-Profilen. Stark verrauschte Meßdaten sind direkt verarbeitbar, b) der ecCST-Regelalgorithmus ist ein direkt in Simulations- und Prototyping-Umgebungen sowie in Steuergeräten einsetzbarer Algorithmus, der ruckfreies Umschalten zwischen Parametersätzen für verschiedene Arbeitsgebiete und Regelgrößen/Aktuatoren ermöglicht. Begrenzungen in Aktuatoren werden dabei ebenfalls berücksichtigt. Präzises Nachfahren vorgegebener Sollwert-Profile ist sichergestellt. ecICP kann dabei genutzt werden, um alle erforderlichen Reglerparametersätze zu bestimmen.

Der ecCST-Regelalgorithmus erlaubt nicht nur ein ruckfreies Umschalten zwischen zwei Reglerparametersätzen bei gleicher Regelgröße sondern auch bei unterschiedlichen und physikalisch unabhängigen Regelgrößen bei gleichem Stellsignal (z.B. Umschalten zwischen einer Drehzahlregelung und einer Temperaturregelung). Er ist zudem sowohl in Offline-Anwendungen (Non-Realtime) als auch in Online-Anwendungen (Realtime) einsetzbar. Wichtig ist dabei, dass der Rechenzeitbedarf im Umschaltzeitpunkt nur unwesentlich erhöht ist. Eine Auswahl der unterstützten Zielsysteme ist nachfolgend aufgeführt: Simulink S-Function, LabVIEW, RT-Lab, Morphee-Prüfstandstreiber, QNX-Treiber, Windows-Treiber, Infineon C16x / Thompson ST10-Microcontroller.

In zahlreichen Simulationen und in realen Anwendungen sind die Unterschiede und Vorteile des neuen Regelungskonzepts gegenüber den aktuell eingesetzten Verfahren (Kennfeldregler) erfolgreich nachgewiesen. Im vorliegenden Beitrag wird die Vorgehensweise zur Erreichung der oben genannten Anforderungen anhand eines Drehzahl-/Temperaturmodells für einen Verbrennungsmotor diskutiert.

## 2 Simulationsmodelle

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Komponenten der modellierten Blockschaltbilder und die Regler-Einbindung erläutert. Das Simulationsmodell ist dabei in Simulink so aufgebaut, dass folgende Fälle untersucht werden können: (a) Variation oder Umschalten der Reglerparameter in Abhängigkeit des Arbeitsbereichs (gleitende Parameteranpassung, Kennfeldregelung) und (b) Umschalten der Reglerparameter für unterschiedliche Regelgrößen bei gleichem Stellsignal.

Wie gezeigt wird, tritt schon bei arbeitsbereichabhängigem Parameterumschalten mit wenigen Schaltstufen unter Anwendung von Standardverfahren (z.B. Kennlinienregelung) ein oszillierendes Verhalten des Stellsignals auf, das sogar zur Instabilität des Gesamtsystems führen kann. Deshalb wird die Kennlinienregelung nur für die gleitende Parameteranpassung betrachtet.

Die im ecCST-Regelalgorithmus enthaltene optimierte Umschaltstrategie erlaubt dagegen neben betriebspunktabhängigen Parameteranpassungen auch den Wechsel der Regelung zwischen physikalisch unabhängigen Größen wie z.B. der Drehzahl und der Temperatur bei gleichem Stellsignal – und dies bei bester Qualität.

### Modell-Übersicht

Bild 1 zeigt die Übersicht der modellierten Teilsysteme. Diese bestehen aus der Regelstrecke zur Realisierung des Drehzahl- und Temperaturverhaltens, der Umschaltlogik, der Sollwert-Generierung und dem ecCST-Regler.

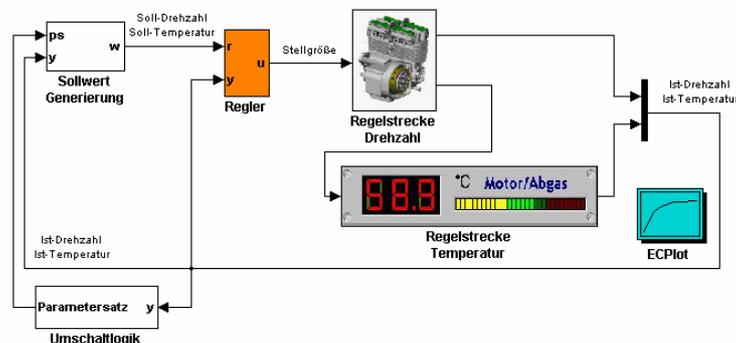


Bild 1: Übersichtsdiagramm

### Teilregelstrecken „Drehzahl“ und „Temperatur“

Die Modellkomponente zur Beschreibung des Drehzahlverhaltens besteht aus einem nichtlinearen und einem linearen Teilsystem. Aufgrund der Nichtlinearitäten kann die Regelstrecke nicht im gesamten Arbeitsbereich mit einem einzigen Standardregler (PID-T1) zufriedenstellend geregelt werden. In Abhängigkeit vom Arbeitspunkt sind deshalb die Parameter des Reglers zu variieren. Das Teilmodell ‚Temperatur‘ wird durch ein lineares System repräsentiert.

Anhand der beiden Teilregelstrecken soll das Umschalten zwischen Drehzahl- und Temperaturregelung simuliert werden. Bereits eingangs ist erläutert, warum hier die Kennlinienregelung nur für die gleitende Parameteranpassung betrachtet wird, nicht aber bei einer „Komplettumschaltung“ wie sie hier in Verbindung mit dem gezeigten Temperaturmodell erforderlich wäre.

### **Umschaltlogik**

Mit der Umschaltlogik wird der aktive Parametersatz in Abhängigkeit von Drehzahl und Temperatur festgelegt. Es ist darauf zu achten, dass kein ständiges Wechseln zwischen den Zuständen aufgrund ungünstig gewählter Bedingungen entsteht.

Im betrachteten Beispiel existieren drei unterschiedliche Parametersätze. Dabei sind die Parametersätze 1 und 2 für die Drehzahlregelung (in unterschiedlichen Drehzahlbereichen) und der Parametersatz 3 für die Temperaturregelung zuständig.

### **Sollwertgenerierung**

Bild 1 zeigt einen Block zur Sollwertgenerierung. Das vektorielle Ausgangssignal beinhaltet die Führungsgrößen für Drehzahl und Temperatur.

Beim Umschalten von der Drehzahl- zur Temperaturregelung wird der Temperatursollwert zunächst gleich dem aktuellen Temperaturwert gesetzt. Während die Temperaturregelung aktiv ist, wird dieser Sollwert dann rampenförmig mit einer frei definierbaren Steigung verringert, um eine Abkühlung des Motors/Abgases zu erreichen. Unterschreitet die Temperatur eine bestimmte untere Grenze, erfolgt wieder ein Umschalten zur Drehzahlregelung.

### **ecCST-Regler mit optimierten Parameterumschaltungen**

In Bild 1 ist der ecCST-Regler als S-Function hinter dem Block ‚Regler‘ hinterlegt. Zum Betrieb benötigt er am Eingang die Nummer des aktiven Parametersatzes, den Führungsgrößenvektor  $w$  (Drehzahl- und Temperatur-Führungsgröße) und den Regelgrößenvektor  $y$  (Drehzahl u. Temperatur). Der Reglerausgang ist das Stellsignal  $u$ .

Die mit ecICP ermittelten Regler-Parametersätze werden dem ecCST-Algorithmus bereitgestellt. Auf Details wird hier allerdings nicht weiter eingegangen.

## **3 Reglerauslegung**

Zur Regelung des oben beschriebenen Modells werden für die Drehzahlregelung zwei und für die Temperaturregelung ein Regler ermittelt. So lässt sich der Wechsel zwischen zwei Reglerparametersätzen für zwei Arbeitsbereiche innerhalb der Drehzahlregelung und der Wechsel zwischen der Drehzahl- und der Temperaturregelung simulieren. Diese Reglerparameter bilden die Basis für den ecCST-Regelalgorithmus und für einen Kennlinienregler, der als Vergleich dienen soll. Die Ermittlung der einzelnen Reglerparametersätze erfolgt in Matlab mit der ecICP-Umgebung, die vollautomatisiert mit den Messdaten (bzw. hier simulierten Daten) des ‚ungeregelten System‘ die benötigten Reglerdaten bestimmt.

### **Reglerparametrierung mit ecICP**

Mit Hilfe von ecICP lassen sich die optimierten Parameter u.a. für PID-T1-Reglerstrukturen mit Anti-Windup-Struktur (AWS) ermitteln. Begrenzte Stellsignale sind in realen Systemen der Normalfall (z.B. maximale Heizleistung, Menge des Kraftstoff-Luftgemisches, Ankerspannung, etc) und müssen geeignet behandelt werden. Die

bereitgestellte AWS berücksichtigt bei Regeln mit Integral-Anteil die Stellsignalbegrenzungen und sorgt dafür, dass kein ‚Windup‘ des Integralanteils stattfindet und gleichzeitig eine stabile und optimale Dynamik entsteht.

ecICP wählt die erforderliche Reglerstruktur auch automatisch und ermöglicht so stets gute Ergebnisse im jeweiligen Arbeitsbereich, auch bei begrenzten Stellsignalen. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel sollen zudem zur Abdeckung des gesamten Arbeitsbereichs bei der Drehzahlregelung zwei Regler und bei der Temperaturregelung ein Regler verwendet werden.

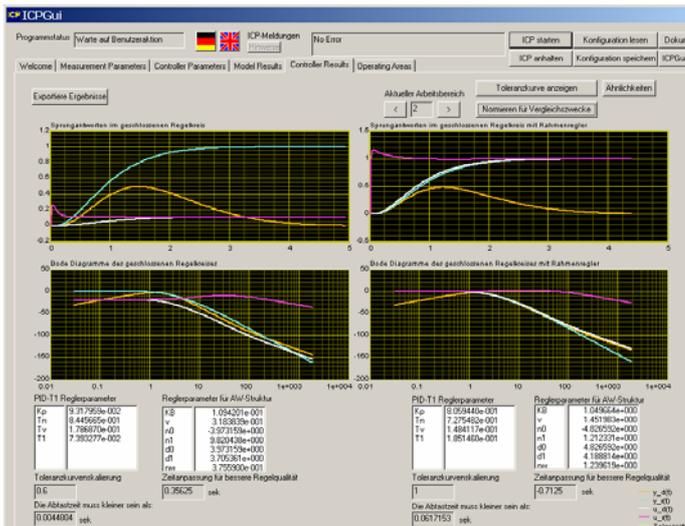


Bild 2 zeigt die ecICP-Bedienungsoberfläche, auf der die ermittelten Parameter eines Reglers für einen Drehzahlarbeitsbereich (Bereich 2) zu sehen sind.

**Bild 2:** Ergebnis der automatisierten Reglerparametrierung mit ecICP Kennlinienregler

Zur Überprüfung und quantitativen Einschätzung der Leistungsfähigkeit des ecCST-Regelalgorithmus wird ein Kennlinienregler

entwickelt, der die mit ecICP ermittelten Reglerparameter verwendet. Es hat sich gezeigt, dass eine Verbesserung der Regelgüte nur mit erhöhter Stufung zu erreichen ist. Diese Vorgehensweise stellt die Realisierung eines Kennlinienreglers mit variabler Auflösung dar.

## 4 Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse des Kennlinienreglers und der Regelung mit ecCST-Regler werden im folgenden erläutert. Die zusätzliche Korrektur des Schleppfehlers (dauerhafte Abweichung zwischen rampenförmiger Sollwertvorgabe und dem Istwert) wird beim Kennlinienregler nicht durchgeführt, wohl aber beim ecCST-Regler. Der Grund liegt darin, dass die für den Kennlinienregler erforderlichen Anpassungen sehr zeitintensive Veränderungen der Reglerstruktur erfordern würden. Die Beibehaltung des Schleppfehlers hat aber auf das Gesamtergebnis und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen keinen Einfluss.

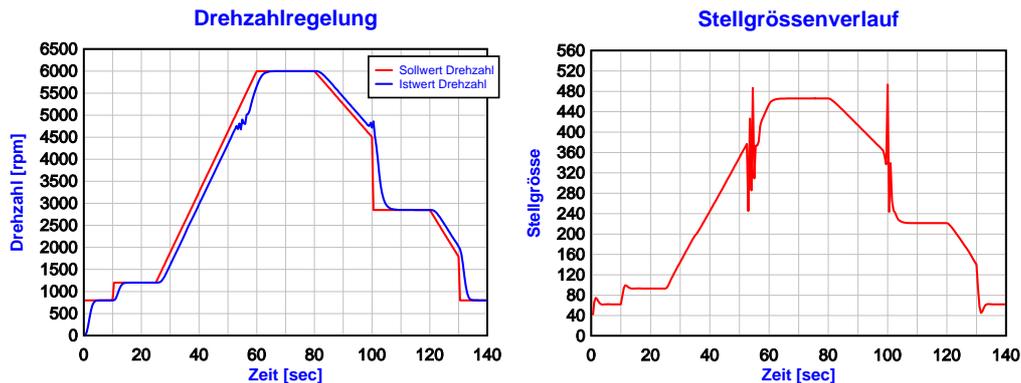
### Kennlinienregelung

Im folgenden wird die Parameteranpassung mit 3 Stufen betrachtet (s. Bild 3). Das Stellgrößendiagramm zeigt bei 55 und 100 Sekunden ein sehr stark oszillierendes Verhalten, das durch den Parameterwechsel verursacht wird. Die Stellgröße hat in diesen Bereichen eine Abweichung von  $\pm 30\%$  vom erwarteten Wert.

Erhöht man die Stufenzahl, dann zeigt die Stellgröße im gesamten Arbeitsbereich ein abnehmendes oszillierendes Verhalten, das wiederum durch die Parameterwechsel verursacht wird. Der Drehzahlverlauf hat in diesen Bereichen eine abnehmende

Abweichung vom erwarteten Wert. Eine starke Erhöhung der Stufung verbessert zwar die Regelgüte, allerdings sollte der Aufwand zur Ermittlung, Verwaltung und Speicherung der Kennliniendaten nicht unterschätzt werden. Die erzielten Ergebnisse lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

Die Ergebnisse der **Kennlinienregelung sind nicht zufriedenstellend**, da die Anzahl der notwendigen Stufungen für den Parameterübergang sehr hoch sein muß, um eine akzeptable Regelgüte und eine akzeptable Stellsignaldynamik zu erhalten.



**Bild 3:** Drehzahlregelung (links) u. Stellgröße (rechts) mit Kennlinienregler

Würde man diesen Weg weiter verfolgen, wäre die Anzahl der Kennliniendaten, die ermittelt, verarbeitet und gespeichert werden müssten, sehr groß.

### ecCST-Regler

In Bild 4 ist die Drehzahlregelung und in Bild 5 die Temperaturregelung dargestellt. Der Verlauf der Stellgröße ist zusammen mit dem aktiven Parametersatz in Bild 6 zu finden. Parametersätze 1 und 2 sind den beiden Drehzahlreglern und Parametersatz 3 dem Temperaturregler zugeordnet.

Bei der Analyse des Signalverlaufs ‚Parametersatz‘ erkennt man vier Umschaltvorgänge der Reglerparameter. Die interessantesten erfolgen bei ca. 30, 60, 85 und 130 Sekunden. Bei 30 und 130 Sekunden wird zum zweiten bzw. ersten Drehzahlregler-Parametersatz umgeschaltet, bei den anderen beiden Zeitpunkten findet ein Wechsel zwischen der Drehzahl- und Temperaturregelung statt.

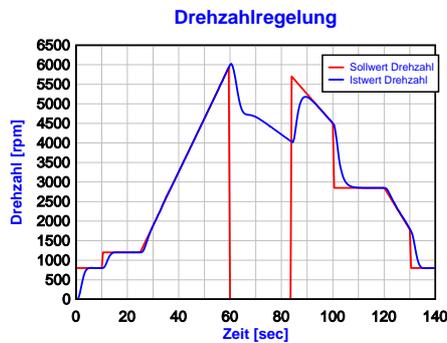
Im Vergleich zu anderen Verfahren wie z.B. die Kennlinienregelung verlaufen alle Übergänge praktisch unmerklich bzw. ohne zusätzliche Schwingungen der Stellgröße und ruckfrei. - Damit ist das angestrebte Ziel erreicht.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zusätzlich auch starke Störungen an den Ausgang der Teil-Regelstrecken hinzugefügt, um die Robustheit der ecCST-Regler zu prüfen. Die Regelgüte hat sich dabei nur etwas verschlechtert (was auch zu erwarten ist), im Vergleich zur ‚Kennlinienregelung mit großer Stufung‘ sind die Ergebnisse selbst in diesem Fall mit ‚sehr gut‘ zu bewerten. Der ecCST-Regler eignet sich somit hervorragend zur Regelung technischer Anlagen mit verrauhten Messdaten.

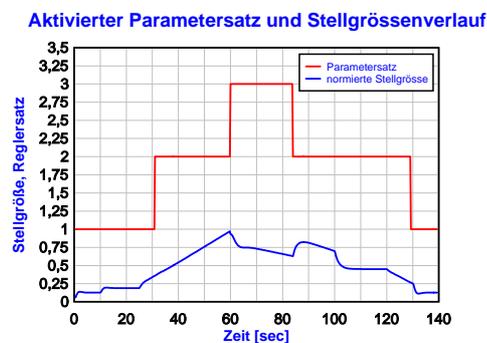
### ecCST Regelalgorithmus / Simulation und Echtzeit

Der ecCST-Regelalgorithmus steht für Simulink, RT-Lab, LabVIEW und ST10-Microcontroller unmittelbar zur Verfügung. Zudem ist er auch in vorkompilierter Form in

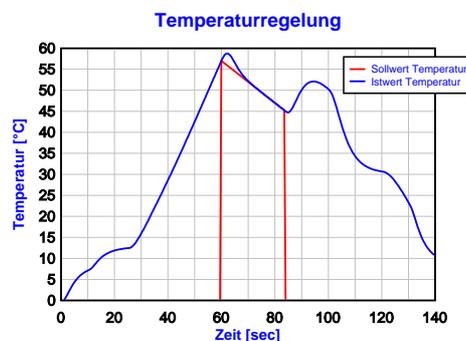
anderen (Echtzeit-) Umgebung einsetzbar. Einzige Voraussetzung ist, dass ein ANSI C-Compiler verfügbar sein muss. Der Algorithmus ist auf geringste Rechenzeiten optimiert und daher auch unter harten Echtzeitbedingungen effektiv einsetzbar.



**Bild 4:** Drehzahlregelung mit ecCST-Regler



**Bild 6:** Aktiver Parametersatz und Stellgrößenverlauf



**Bild 5:** Temperaturregelung mit ecCST-Regler

Mögliche Anwendungsgebiete sind HIL – Umgebungen, Prüfstände, Steuergeräte und Automatisierungssysteme in Industrien wie z.B. Automotive, Aerospace, Werkzeugmaschinen, Robotik oder Antriebstechnik.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde der ecCST-Regelalgorithmus in seiner Wirkungsweise vorgestellt. Er erwies sich als optimal, da er nicht nur robust

die benötigte Regeldynamik realisiert, sondern auch das Umschalten von Reglerparametern ruckfrei bezüglich des Stellsignals ermöglicht. Hierbei war es gleichgültig, ob es sich um ein Umschalten bei gleicher Regelgröße (Arbeitspunkt-Umschaltung) handelte oder um ein Umschalten zwischen verschiedenen Regelgrößen, das z.B. aus Sicherheitsgründen erforderlich werden kann. Sämtliche Reglerparameter wurden dabei vollautomatisch aus Messdaten (bzw. simulierten Daten) mit Hilfe des Programmpakets ecICP gewonnen.

Zur Einordnung der Qualität und Leistungsfähigkeit des ecCST-Algorithmus wurde ein Kennlinienregler ausgelegt und mit diesem Vergleichssimulationen durchgeführt. Der Kennlinienregler konnte keine gleichwertigen Ergebnisse liefern. Vielmehr wurde der Aufwand zur Ermittlung, Verarbeitung und Speicherung der Kennliniendaten, bei dem überhaupt ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erhalten war, sehr hoch.

An den Ausgängen der Teilregelstrecken wurden in Verbindung mit den ecCST-Reglern zusätzlich Störungen hinzugefügt, um das reale Verhalten technischer Systeme nachzubilden. Im Vergleich zur Kennlinienregelung (ohne Störung) waren die Ergebnisse weiterhin sehr gut, da sich auch in diesem Fall eine gute Dynamik und ein ruckfreies Umschalten ergab. Die ecCST-Regler können bestehende Kennlinienregler mit drastisch weniger Daten ersetzen. Zudem verbessern sie die Qualität der Regelung spürbar.