Reglerparameter Tuning, Sensitivitäts- und Robustheitsbewertung eines PID-Reglers

OptiY e.K., Aschaffenburg
www.optiy.de

OptiY-Datei: *...\OptiY\CAE Integration\Matlab\PIDController.opy*

1. Auto-Tuning der Reglerparameter

Der Proportional-Integral-Derivative-Regler (PID-Regler) ist ein allgemeines rückgekoppeltes Regelmechanismus, der in der industriellen Regelungstechnik sehr häufig eingesetzt wird. Ein PID-Regler versucht mit der Berechnung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Signal und Einstellung des Sollsignals, das Fehlersignal zwischen einer gemessenen Prozessvariablen und einem gewünschten Entwurfspunkt zu korrigieren. Der PID-Regler besteht aus den Anteilen des Proportional-Gliedes Kp, des Integral-Gliedes Ki und des Ableitungs-Gliedes Kd. Er kann sowohl aus reiner Parallelstruktur oder aus einer gemischten Reihen- und Parallelstruktur definiert werden. Kd bestimmt die Reaktion zur aktuellen Differenz zwischen Soll- und Ist-Signal. Ki bestimmt die auf die Summer der Differenzen basierte Reaktion und Kd bestimmt den Änderungsrate der Differenzen.

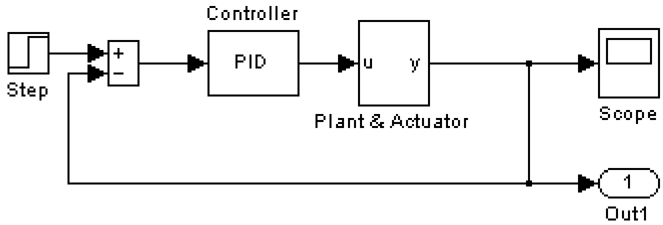

Bild1: PID-Regler

Der PID-Regler mit einer vorgegebenen Regelstrecke wird in Matlab/Simulink *optsim.mdl* modelliert (Bild1). Das Streckenmodell wird in dem nächsten Abschnitt ins Detail gegangen. Der Regler soll die Ausgangssignal der Regelstrecke von der Position 0 auf die Position 1 so schnell wie möglichst regeln und dann stabil ohne Schwingungen halten. Dazu sollen die Regelparameter Ki, Kd, Kp eingestellt werden, um diese Aufgabe optimal zu erfüllen. Das Tuning der Reglerparameter führt zu einer Optimierungsaufgabe, welche die optimalen Werte der Optimierungsvariablen Ki, Kd, Kp zur Übereinstimmung zwischen dem Ausgangssignal *y* der Regelstrecke und dem vorgegebenen Soll-Signal 1 sucht. Im Matlab-Scriptdatei *callsim.m*, wo die Simulation des Simulink-Modells ausgeführt wird, definiert man die Zielfunktion:

$$F = \int \left| y - 1 \right| dt \tag{1}$$

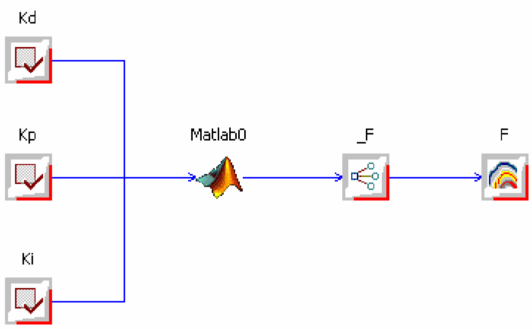

Bild2: OptiY-Workflow zum Tuning der Reglerparameter

Das Integral (1) zwischen dem Ist-Signal *y* und Soll-Signal 1 bestimmt die Differenzfläche zwischen beiden zeitlichen Verläufen. Die Optimierung soll diese Zielfunktion minimieren, damit beide Signale möglichst übereinstimmen.
In OptiY wird ein Experiment mit dem Matlab-Modell *callsim.m* aufgebaut (Bild2). die Optimierungsvariablen Ki, Kd, Kp sind mit den entsprechenden Reglerparametern verbunden. Dem Kriterium der Optimierungsaufgabe wird die Zielfunktion F zugeordnet.

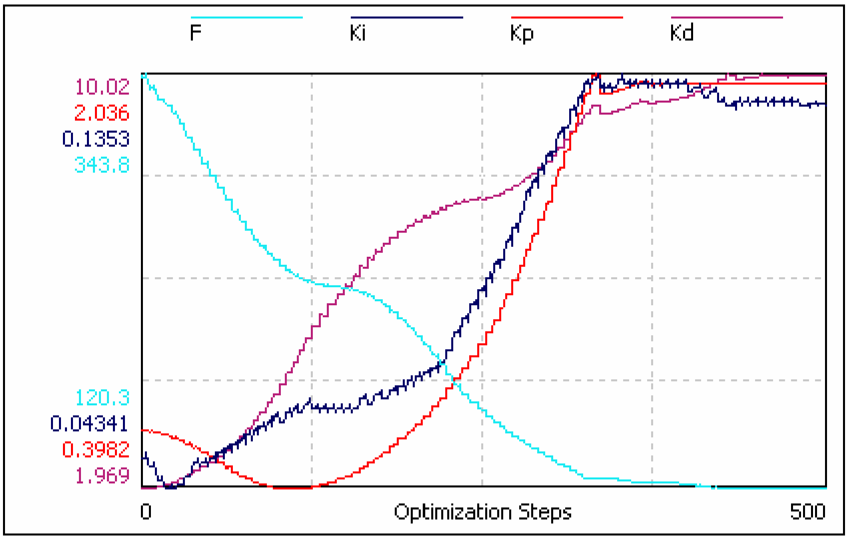

Bild3: Optimierungsprozess

Dei Anfangswerte und Suchbereiche der Optimierungsvariablen werden festgelegt (Tabelle1). Die Optimierung wird mit den Standardparametern (Hooke-Jeeves-Verfahren) in OptiY durchgeführt. Nach ca. 500 Optimierungsschritten erreicht die Zielfunktion F das Minimum (Bild3). Beim Optimierungsprozess kann man die Änderung der Reglerparameter live erleben. Die Ergebnisse der Optimierung sind in Bild4 und Bild5 sowie Tabelle1 anzuschauen.

Bild4: Vor der Optimierung

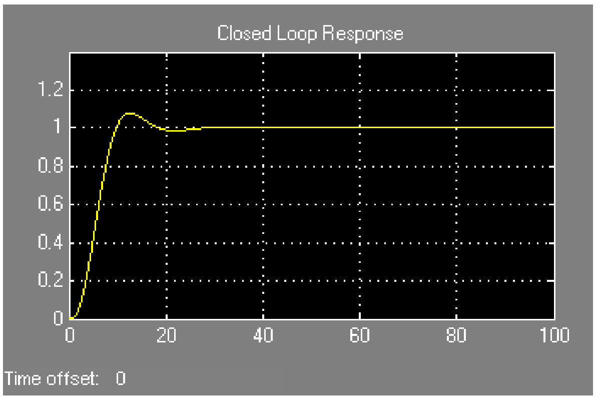

Bild5: Nach der Optimierung

Parameter	*Startwert*	*Suchbereich*	*Optimaler Wert*
Kp	0.63	[0.1 ; 2]	1.9999
Kd	1.9688	[0.2 ; 10]	9.9999
Ki	0.0504	[0.001 ; 1]	0.128822

Tabelle1: Optimierungsdaten

2. Sensitivitäts- und Robustheitsbewertung des Reglers

Die Regelstrecke stellt eine allgemeine Arbeitsmaschine mit einem Motor dar. Die mathematische Beschreibung der Regelstrecke beinhaltet die Differentialgleichung 3. Ordnung (Bild6). Aber auch beliebige Modelle können behandelt werden.

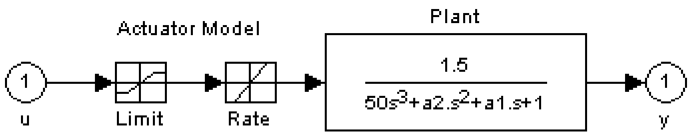

Bild6: Streckenmodell

Die Reglerauslegung erfolgt mit idealen Parametern der Regelstrecke. Es ist auch nur möglich unter idealen Arbeitsbedingungen der zu regelnden Maschine. In der Realität ist es leider nicht so. Alle Parameter der Regelstrecke unterliegen den natürlichen und stochastischen Streuungen, welche die Unsicherheiten für die gewünschte Arbeitsweise des Reglers darstellen. Folgende Aspekte stellen die Unsicherheiten bzw. Zufälligkeiten für die Regelstrecke dar:

- Schwankende und wechselnde Last: Masse, Momente, usw.
- Umweltbedingungen: unterschiedliche Temperatur, Luftfeuchtigkeit, usw.
- Materialeigenschaften: Alterung, Verschleiß, Reibung, usw.
- Fertigungsungenauigkeiten: Geometrieabweichungen, Toleranzen, usw.

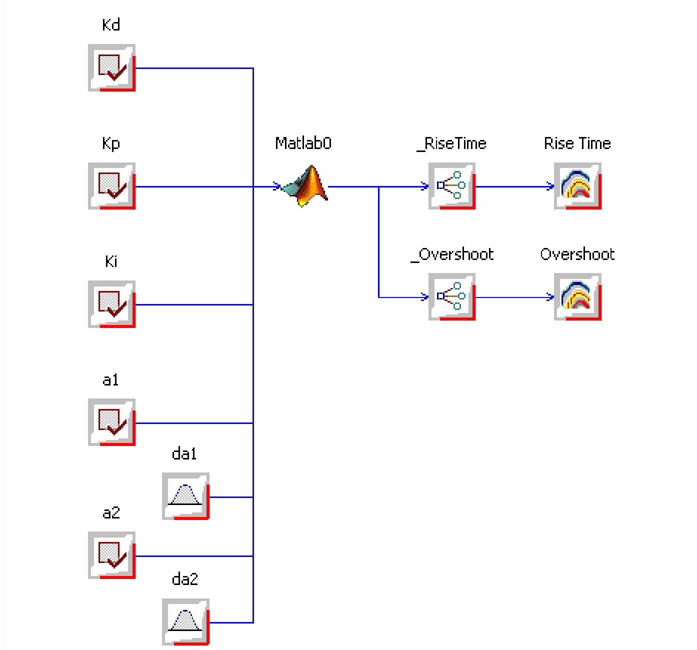

Bild7: OptiY-Worklfow zur probabilistischen Simulation

Die behandelte Regelstrecke enthält 2 allgemeine Unsicherheitsparameter a1 und a2, welche einige der oben genannten Eigenschaften darstellen können. Folgende Daten werden für die probabilistische Simulation zur Beurteilung der Robustheit und Sensitivität des Reglers angenommen, wobei die Toleranzen immer 10% der Nennwerte betragen:

Unsicherheitsparameter	*Nennwert*	*Toleranz*	*Verteilung*
a1	3	0.3	Normal
a2	43	4.3	Normal

Tabelle2: Unsicherheitsdaten

Diese Unsicherheiten führen dazu, dass der PID-Regler nicht mehr so ideal arbeiten könnte. Die Fragen lauten hier:

- Wie robust ist die Regelung mit den gegebenen Reglerparametern?
- Welche Unsicherheitsparameter wirken meist auf die Streuung der Reglergüte?

Als Reglergüte werden die Anregelzeit (Rise Time) und die Überschwingweite (Overshoot) betrachtet. Um diese Aspekte zu analysieren, wird in OptiY ein Experiment aufgebaut (Bild7). Neben den Reglerparametern Ki, Kp, Kd werden auch die Unsicherheitsparameter da1 und da2 sowie deren Nennwerte a1 und a1 gemäß der Tabelle 2 eingeführt. Die Gütekriterien der Analyse sind die Anregelzeit und Überschwingweite des PID-Reglers. Die Unsicherheitsanalyse erfolgt mit der Second-Order-Methode als Versuchsplanung in OptiY.

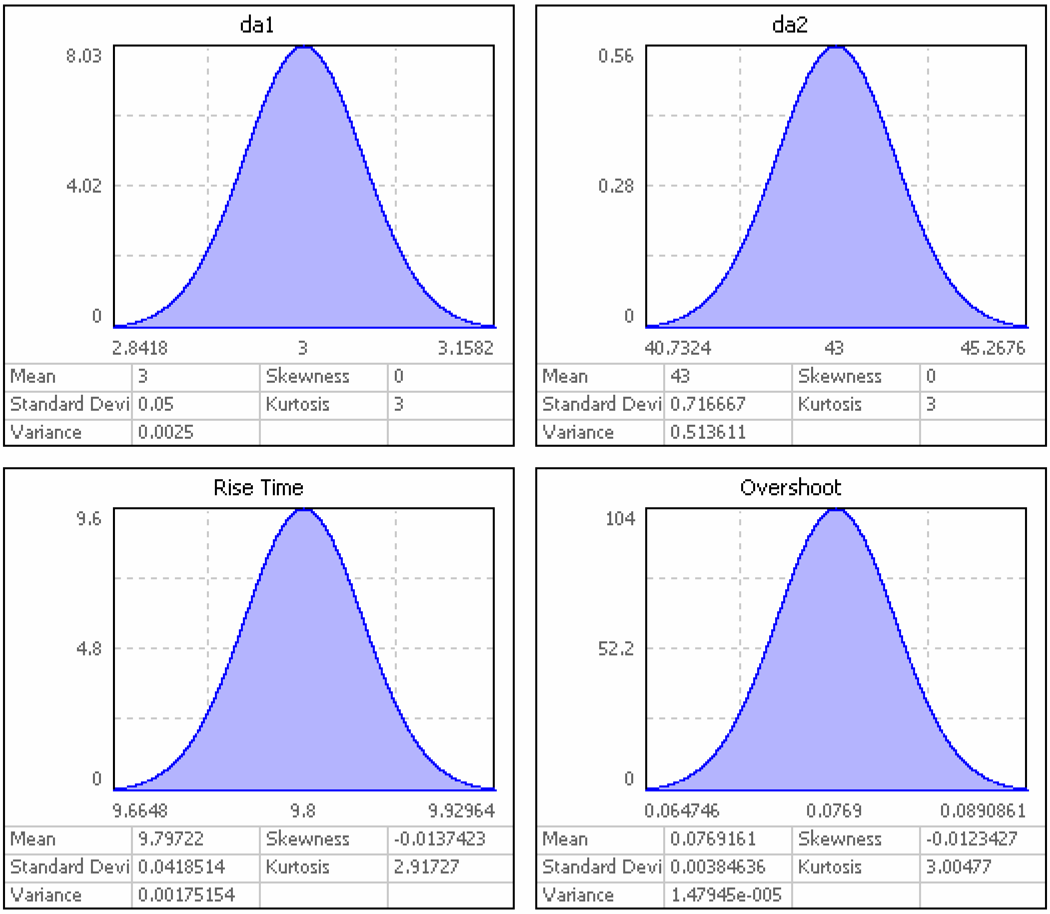

Bild8: Streuungen der Ein- und Ausgangsgrößen

Als Ergebnisse erhält man die statistischen Verteilungen der Anregelzeit und der Überschwingweite. Diese sind alle Normalverteilung. Die Anregelzeit schwankt zwischen 9.6648 bis 9.9296 Sekunde. Die Standardabweichung beträgt 0.041 Sekunden. Der Mittelwert liegt bei 9.79 Sekunden. Die Überschwingweite bewegt sich zwischen 0.065 bis 0.089 mit der Standardabweichung von 0.0038 und dem Mittelwert von 0.0769. Mit den Unsicherheitsfaktoren a1, a2 von 10% zu Nennwerten arbeitet der Regler also sehr robust und stabil. Die Streuungen der Reglergüte unterliegen nur kleinen und unbeachtlichen Bereichen

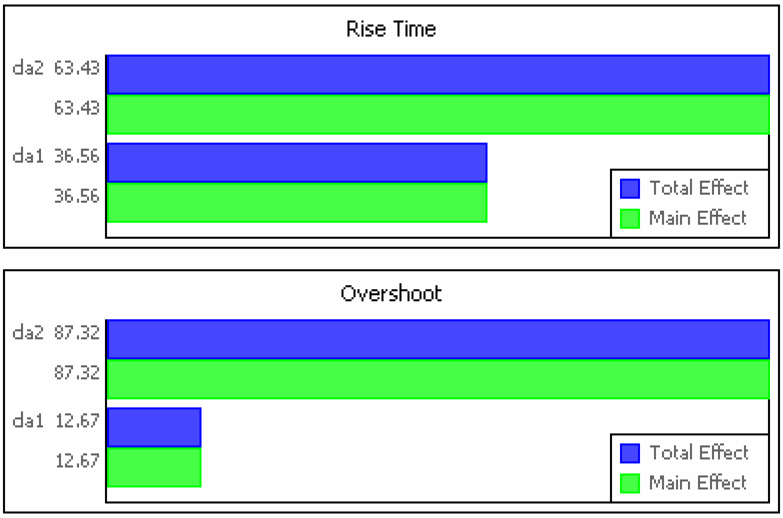

Bild9: Globale Sensitivitäten

Mit dem Pareto-Chart (Bild9) kann man dann die globalen Sensitivitäten betrachten. Die Streuung a2 wirkt meist auf die Streuung der Anregelzeit und der Schwingweite aus. Wenn man gelingen würde, die Streuung des Unsicherheitsparameters a1 zu minimieren, könnte man also sehr schnell und stark die Streuung der Reglergüte reduzieren. Damit sollte die Regelung noch robuster und stabiler arbeiten. Der Totaleffekt und der Haupteffekt sind gleich. das bedeutet, dass es keine Interaktionen zwischen den beiden Unsicherheitsfaktoren existieren.

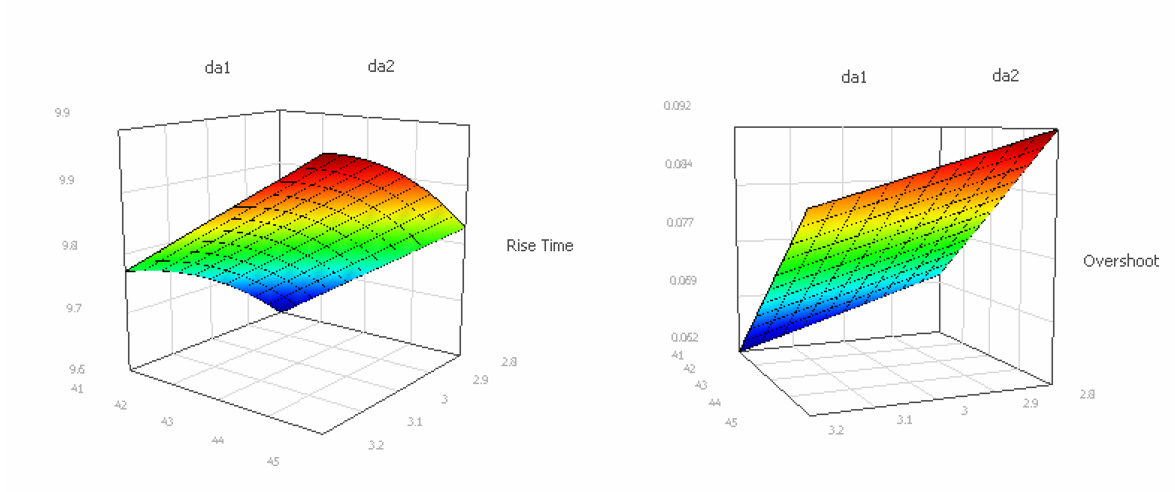

Bild10: Antwortflächen

Weiterhin steht auch Information über den Zusammenhang wischen den Regelgüte und den Unsicherheitsparametern in Form von Antwortflächen zur Verfügung (Bild10). Hier sieht man, dass sich die Anregelzeit quadratisch zu den Unsicherheitsparametern verhält, währen die Überschwingweite linear ist. Mit der Appoximation erhält man die Werte der Ausgangsgröße bei der Eingabe der Eingangsgrößen sofort ohne eine erneute aufwendige Simulation.