

Peer-Review: 02.08.2021

Störgrößenkompensation in geregelten Systemen

Eine einfache Methode

Peter Zentgraf, Michaela Huber, Technische Hochschule Rosenheim

Ein gutes Modell der Regelstrecke erhöht die Erfolgsaussicht, eine in der Simulation gut funktionierende Regelung in der Praxis genauso gut betreiben zu können. Gute Modelle eröffnen auch noch weitere Perspektiven: Sind die störenden Einflüsse auf den Regelkreis, die Störgrößen, die Messfehler und die Ungenauigkeiten im Simulationsmodell insgesamt kleiner als die Genauigkeitsanforderungen an die Regelgröße, dann kann man durch entsprechende Filterung des Eingangssignals sogar auf eine Rückführung der Regelgröße sogar verzichten. Andernfalls lassen sich deren Auswirkung auf die Regelgröße durch eine Rückführung verkleinern. Der Prozess kann für schnelle und hochgenaue Anwendungen durch die vorgestellte Methode weiter verbessert werden, wenn die störenden Einflüsse auf den Regelkreis direkt geschätzt und gleich kompensiert werden, bevor sie sich in der Regelgröße bemerkbar machen können.

#Modelle #Regelungstechnik #Lineare Systeme

Compensating for disturbances in control systems

Demonstrating the practical benefits of a simple method

Control design engineers prefer precise models of a plant because these increase the chances to successfully transfer the design from simulation to reality. Furthermore, if the influence of disturbances, the noise content of the signals, and the model inaccuracy are small enough, then an open loop control might be sufficient. Otherwise, a feedback control loop is required to reduce the impact of the disturbances on the controlled variable. Using the method presented here, the time needed to reduce the impact during the process can be shortened significantly by directly estimating and compensating for the effects caused by disturbances and noise before these become noticeable in the controlled variable.

#simulation models #feedback control #linear systems

1. Einleitung

Das Kompensieren von unbekanntem Störsignalen ist ein zentrales Thema in der Regelungstechnik. Verfahren zur Störgrößenschätzung gibt es viele [1]. Ihnen ist gemein, dass sie auf Zustandsraumdarstellungen und Beobachter-Verfahren aufsetzen. Das setzt einen theoretischen Hintergrund voraus, der meistens erst in Spezialvorlesungen im Master gelehrt wird. Die Verfahren zur Störgrößenaufschaltung bauen darauf, dass die Störgrößen selbst messbar sind [2]. Dieser Fall ist wesentlich einfacher und wird hier nicht behandelt.

In diesem Artikel wird ein Verfahren vorgestellt, das mit dem Wissen aus einem Bachelor-Studium auskommt. Die grundlegende Idee dabei ist, die unbekannte Störung selbst so schnell wie möglich zu schätzen und gleichzeitig zu kompensieren, bevor sie sich auf die Regelgröße auswirken kann. Dies geschieht mit Hilfe eines Simulationsmodells der Regelstrecke, welches in die Reglerstruktur eingebaut wird. Dies ist kein Mehraufwand: Ein Simulationsmodell der Regelstrecke wird üblicherweise in regelungstechnischen

Verfahren verwendet [1], um die Parameter eines Reglers festzulegen. Ein experimentelles Identifikationsverfahren für lineare Regelstrecken, das ebenfalls nur auf Bachelorwissen aufsetzt, wurde in [3] vorgestellt.

2. Der Temperaturversuch als reales Anwendungsbeispiel

Temperaturregelungen werden häufig in der Industrie verwendet, wie z. B. bei Klimaanlageanlagen und bei Spritzgussmaschinen in der Kunststofftechnik [4]. Die dabei auftretenden Störgrößen können gut veranschaulicht werden. So kann z. B. Sonneneinstrahlung, Wind oder auch die Zufuhr von neuem, kälterem Material bei Schmelzanlagen die Ist-Temperatur beeinflussen. Dank einer Regelung kann diese durch das Anpassen der Stellgröße konstant gehalten werden.

Im hier verwendeten Versuchsaufbau wird eine Temperaturregelung nachgebaut: Dazu wird ein Leistungswiderstand bestromt und setzt die am Widerstand umgesetzte Energie in Wärmeenergie um. Die aufgebrauchte Leistung dient dabei

als Eingangsgröße U der Regelstrecke. Ein Temperaturfühler (LM35cz) ist direkt am Widerstand angebracht und misst die aktuelle Temperatur, Y_{mess} , die die Ausgangsgröße der Regelstrecke darstellt. Ein Entwurfskriterium des Versuchsaufbaus war eine kleine Bauform mit kostengünstigen Bauteilen. Der Aufbau entstand im Rahmen einer Projektarbeit und kann anhand dieser Anleitung nachgebaut werden [5]. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau mit einem Ventilator, welcher als D_u fungiert.

Zuerst ist es notwendig, ein mathematisches Modell der Regelstrecke aufzustellen. Dies geschieht durch die in [3] beschriebene experimentelle Methode.

Der Systemeingang $U(s)$ ist die Leistung in Watt, welche am Widerstand umgesetzt wird; hierbei bezeichnet s die Laplace-Variable des transformierten Zeitsignals $u(t)$, $U(s)$ [1]. Das gemessene Ausgangssignal ist Y_{mess} , welches das messfehlerbehaftete Ausgangssignal $Y(s)$ darstellt. Zur Identifikation wird eine konstante Leistung an der Regelstrecke angelegt und die Erwärmung des Widerstandes gemessen; Störungen dürfen auf das System dabei nicht wirken, da sonst die Modellbildung verfälscht würde. Das Ergebnis ist die Übertragungsfunktion in Gleichung (2), die einen Fit-Wert von 95,1 % hat, berechnet durch die MATLAB- Funktion *goodnessoffit* [6].

$$G_M(s) = K_S \frac{(1 + T_0 \cdot s)}{(1 + T_1 \cdot s)(1 + T_2 \cdot s)(1 + T_3 \cdot s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (1)$$

$$G_M(s) = 36,752 \frac{(1 + 176,6 \cdot s)}{(1 + 7,621 \cdot s)(1 + 50,07 \cdot s)(1 + 405,9 \cdot s)} \quad (2)$$

Das Ergebnis der Identifikation ist in Abbildung 2 zu sehen: Man erkennt an der unteren Grafik, dass der maximale Fehler zwischen Messung und Simulation nur 0,5 °C beträgt. Die Übertragungsfunktion von Gleichung (2) wird in allen Simulationen als das Modell $G_M(s)$ der realen Regelstrecke $G_S(s)$ verwendet.

3. Modellbasierte Regelung des Ausgangssignals

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, kann man mit der klassischen Regelkreisstruktur den Einfluss von Störgrößen durch entsprechendes Anheben oder Senken des Stellsignals ausgleichen. Dieser Prozess dauert aber eine gewisse Zeit, denn eine Reaktion kann erst dann erfolgen, wenn es schon eine nennenswerte Abweichung zwischen gewünschtem Sollwert und der gemessenen Regelgröße gibt – aber gerade eine solche Abweichung zu vermeiden wäre gewinnbringend.

Daher wird in diesem Abschnitt der Frage nachgegangen, ob man diesen Prozess nicht beschleunigen kann.

3.1 Entwicklung des Verfahrens

Nun verwenden wir das Modell der Regelstrecke, $G_M(s)$ aus Gleichung (2), direkt im Regelkreis in Abbildung 3 zusammen mit der realen Strecke $G_S(s)$; zur Erinnerung sei erwähnt, dass die Identifikation der Regelstrecke störungsfrei, aber einschließlich der Messfehler durch Anregung mit dem bekannten Eingangssignal (hier der Sprung auf 0,27 W), erfolgte.

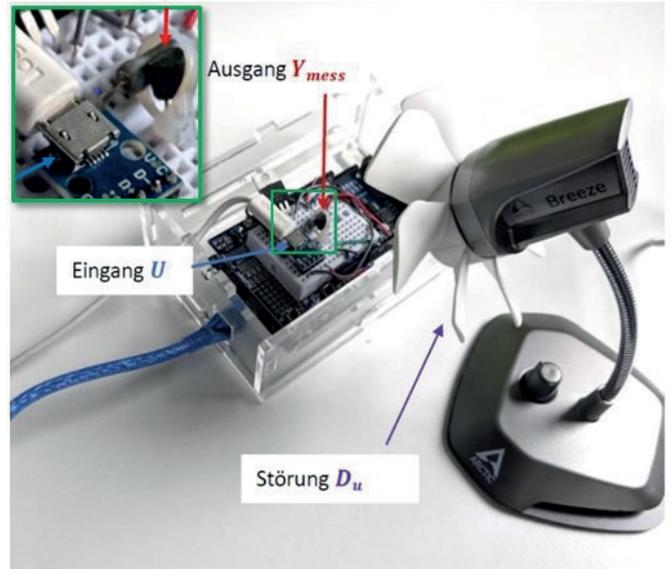


Abbildung 1: Versuchsaufbau der Temperatur-Regelstrecke [5] mit Ventilator als Störgröße D_u .

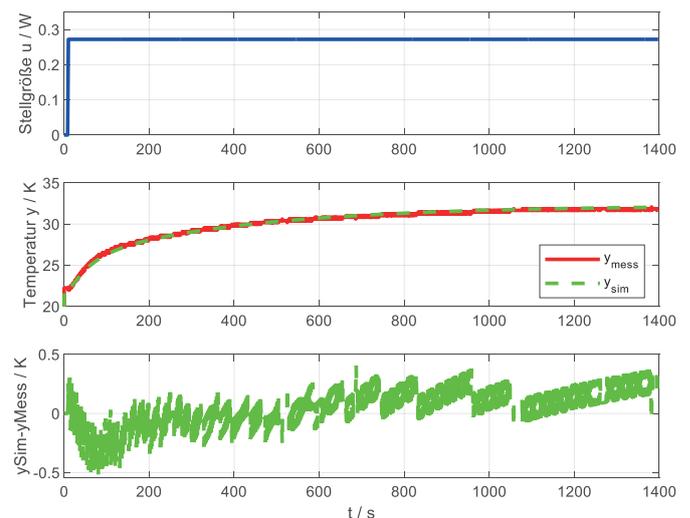


Abbildung 2: Gemessene und simulierte Sprungantwort der Temperatur-Regelstrecke.

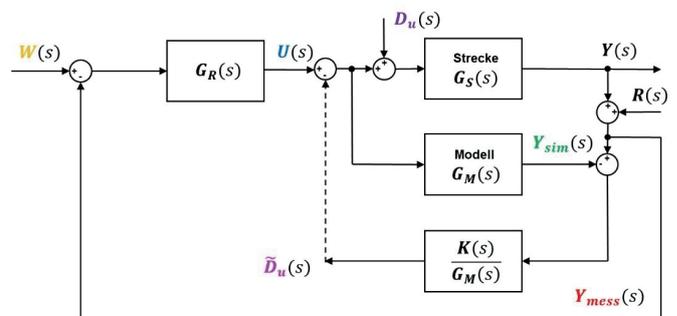


Abbildung 3: Regelkreis mit alleiniger Schätzung der Störgrößen aber ohne Kompensation.

Die Regelgröße Y wird nun durch die unbekannte Störgröße D_u sowie den unbekanntem Messfehler R gestört.

3.1.1 Schätzen von Störgrößen

Das Blockschaltbild in Abbildung 3 stellt die verwendete Reglerstruktur dar: Dabei wird die Stellgröße $U(s)$ sowohl der realen Regelstrecke $G_S(s)$ als auch dem Modell der Regelstrecke $G_M(s)$ zugeführt. Somit stehen zwei Ausgangssignale zur Verfügung, das gemessene Signal Y_{mess} und das simulierte Signal Y_{sim} . Im ungestörten Betrieb sind die beiden Signale nahezu identisch. Tritt hingegen eine Störung auf, so stellt sich eine deutliche Differenz ein. Mit dieser Differenz lässt sich dann die tatsächliche Eingangsstörung D_u abschätzen, die geschätzte Größe wird dabei mit \tilde{D}_u bezeichnet. Das ist die Kernidee des Verfahrens.

Dieser Vorgang ist ebenfalls in Abbildung 3 dargestellt: Die Differenz $Y_{mess} - Y_{sim}$ wird auf das invertierte Modell $G_M(s)$ geschaltet; die invertierte Regelstrecke, $1/G_M(s)$, wurde um die Übertragungsfunktion

$$K(s) = \frac{1}{(1 + T_1 \cdot s)^n} \quad (3)$$

erweitert, damit die neue Übertragungsfunktion $K(s)/G_M(s)$ zur Erhaltung der technischen Realisierbarkeit [1] wieder mindestens so viele Pole wie Nullstellen hat. Die darin enthaltene Eckfrequenz $1/T_1$ wird größer als die Bandbreite von $G_M(s)$ gewählt, so dass bis zur Frequenz $\omega \leq 1/T_1$ ungefähr gilt:

$$\frac{K(j\omega)}{G_M(j\omega)} \cong \frac{1}{G_M(j\omega)}. \quad (4)$$

Nun lässt sich gemäß Abbildung 3 das Signal $\tilde{D}_u(s)$ berechnen zu

$$\tilde{D}_u(s) = \frac{K(s)}{G_M(s)} (G_S(s) - G_M(s)) U(s) + \frac{K(s)}{G_M(s)} G_S(s) D_u(s) + \frac{K(s)}{G_M(s)} R(s) \quad (5)$$

bzw. bei sehr guter Modellierung mit $G_S(s) = G_M(s)$

$$\tilde{D}_u(s) = K(s) \cdot D_u(s) + \frac{K(s)}{G_M(s)} \cdot R(s). \quad (6)$$

In Gleichung (6) wird deutlich, dass auch die Messfehler $R(s)$ mit der Übertragungsfunktion $K(s)/G_M(s)$ in die Schätzung der Störgröße eingehen. Das ist nicht erwünscht, denn gerade auf die Messfehler soll eben *nicht* reagiert werden. Eine gute Schätzung für die Störung $\tilde{D}_u(s)$ setzt also voraus, dass die Messfehler nur hochfrequent jenseits der Eckfrequenz von $1/T_1$ auftreten und somit nicht in die Schätzung eingehen; im anderen Fall, wenn Messfehler innerhalb der Eckfrequenz $1/T_1$ vorhanden sind, werden diese als „Störung“ fehlinterpretiert und der Schätzung aufgeschlagen. Ansonsten gilt wie gewünscht, dass die geschätzte Störung $\tilde{D}_u(s)$ der tatsächlichen Störung D_u entspricht:

$$\tilde{D}_u(s) \cong D_u(s). \quad (7)$$

Die unbekannte Störung $D_u(s)$ lässt sich demnach dynamisch abschätzen, wenn parallel in Echtzeit eine Simulation der Regelstrecke mitläuft. Eine Auswirkung auf die Regelgröße in Abbildung 3 hat die Schätzung der Störgröße $\tilde{D}_u(s)$ aber noch nicht. Dies wäre erst dann der Fall, wenn die gestrichelte Linie durchgezogen wäre. Die Auswirkung der Aufschaltung von $\tilde{D}_u(s)$ auf das Verhalten des Regelkreises wird im nächsten Abschnitt untersucht.

3.1.2 Schätzen und gleichzeitige Kompensation von Störgrößen

Dadurch, dass die Störgröße durch \tilde{D}_u in Echtzeit bekannt ist, sollte es prinzipiell möglich sein, sie auch in Echtzeit zu kompensieren, bevor sie sich negativ auf die Regelgröße auswirken kann. Dazu wird die geschätzte Störung wieder in den Regelkreis eingespeist, d.h. in Abbildung 3 wird die gestrichelte Linie zu einer durchgezogenen Linie: Es ist offensichtlich, dass der Regelkreis nun eine weitere Rückführung besitzt. Das hat zur Folge, dass die Stabilität des geschlossenen Systems erneut überprüft werden muss.

Dazu werden die Übertragungsfunktionen der um die Störgrößenschätzung erweiterte Regelkreis neu berechnet. Die Regelgröße Y kann nun z.B. durch Blockschaltbildumformungen von Abbildung 3 in Abhängigkeit vom Sollwert W , von der Störung D_u und vom Messfehler R errechnet werden:

$$Y(s) = \left((E(s) \cdot G_R(s) \cdot \frac{1}{1 - K(s)} + D_u(s)) \cdot G_S(s) \right) \quad (8)$$

$$Y(s) = \left((W(s) - (Y(s) + R(s)) \cdot \left(1 + \frac{K(s)}{G_M(s) \cdot G_R(s)} \right) \cdot G_R(s) \cdot \frac{1}{1 - K(s)} \right) \cdot G_S(s) + D_u(s) \cdot G_S(s) \quad (9)$$

$$Y(s) = \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 - K(s)} \cdot W(s) - \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 - K(s)} \cdot Y(s) - \frac{K(s)}{1 - K(s)} \frac{G_S(s)}{G_M(s)} \cdot Y(s) - \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 - K(s)} \cdot R(s) - \frac{K(s)}{1 - K(s)} \frac{G_S(s)}{G_M(s)} \cdot R(s) + G_S(s) \cdot D_u(s) \quad (10)$$

$$Y(s) \left(1 + \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 - K(s)} + \frac{K(s)}{1 - K(s)} \frac{G_S(s)}{G_M(s)} \right) = \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 - K(s)} \cdot W(s) - \left(\frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 - K(s)} + \frac{K(s)}{1 - K(s)} \frac{G_S(s)}{G_M(s)} \right) \cdot R(s) + G_S(s) \cdot D_u(s) \quad (11)$$

Nachfolgend soll wieder gelten, dass $G_S(s) \cong G_M(s)$

$$Y(s) \left(1 + \frac{G_R(s) \cdot G_M(s)}{1 - K(s)} + \frac{K(s)}{1 - K(s)} \frac{G_S(s)}{G_M(s)} \right) = \frac{G_R(s) \cdot G_M(s)}{1 - K(s)} \cdot W(s) - \left(\frac{G_R(s) \cdot G_M(s)}{1 - K(s)} + \frac{K(s)}{1 - K(s)} \frac{G_S(s)}{G_M(s)} \right) \cdot R(s) + G_M(s) \cdot D_u(s) \quad (12)$$

$$Y(s) = \frac{G_R(s) \cdot G_M(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_M(s)} \cdot W(s) - \left(\frac{G_R(s) \cdot G_M(s) + K(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_M(s)} \right) \cdot R(s) + \frac{G_M(s)(1 - K(s))}{1 + G_R(s) \cdot G_M(s)} \cdot D_u(s) \quad (13)$$

In Gleichung (13) wird deutlich, dass die Stabilität des geschlossenen Systems sich nach wie vor aus den Nullstellen der ursprünglichen charakteristischen Gleichung $1 + G_R(s) \cdot G_M(s) = 0$ errechnet. Unabhängig davon gehen zusätzlich die neuen Pole durch die frei wählbare Filter-Übertragungsfunktion $K(s)$ mit in die Stabilität des Gesamtsystems ein. Das liegt daran, dass $K(s)$ in Gleichung (13) nur als Teil der Übertragungsfunktion $K(s)/(1 + G_R(s) \cdot G_M(s))$ enthalten ist und somit in Serie mit $1/(1 + G_R(s) \cdot G_M(s))$ geschaltet ist. Hier gilt also ein Separationsprinzip zwischen den Polen der klassischen Rückführung, $1/(1 + G_R(s) \cdot G_M(s))$, und den Polen der Filter-Übertragungsfunktion, $K(s)$.

Dieses Ergebnis hat eine *vorteilhafte praktische Konsequenz*: Es ist also mit einem guten Modell der Regelstrecke erlaubt, auch nach einem „klassischen“ Reglerentwurf und völlig unabhängig davon die Störgrößenunterdrückung weiter zu verbessern durch eine Verschaltung von einem „guten“ Streckenmodell $G_M(s)$ mit der Filter-Übertragungsfunktion $K(s)$ wie in Abbildung 3 dargestellt, ohne die Stabilität des Gesamtsystems zu gefährden. Denn die Stabilität des rückgekoppelten Systems ist automatisch erfüllt, wenn die Pole der nachträglich hinzugefügten Filter-Übertragungsfunktion $K(s)$ stabil sind. Das Führungsverhalten bleibt dabei gemäß Gleichung (13) gänzlich unberührt von $K(s)$.

3.2 Die Grenzen des Verfahrens bei gleichzeitiger

Unterdrückung von Störgrößen und Messrauschen

In Gleichung (13) wird ebenfalls deutlich, wie die Filter-Übertragungsfunktion $K(s)$ zu wählen ist, um perfekte Störunterdrückung bzw. perfekte Messrauschunterdrückung zu erhalten.

Perfekte Störunterdrückung: Die Design-Vorschrift ergibt sich aus dem Faktor $1 - K(s)$ neben der unbekanntenen Störung $D_u(s)$. Offensichtlich sollte Folgendes gewählt werden:

$$K(s) = 1 \quad (14)$$

Dies ist aber nur exakt möglich, wenn die Regelstrecke genauso viele Pole wie Nullstellen hat. Ist dies nicht der Fall, dann lässt sich der Amplitudengang nur in einem begrenzten Frequenzbereich innerhalb der Bandbreite des Reglers mit 0 dB vorgeben.

Allerdings wirkt sich die Wahl $K(s) = 1$ negativ auf die *Rauschunterdrückung* aus: $K(s) = 1$ bewirkt gemäß Gleichung (13), dass die Übertragung des Messfehlers genau „eins“ wird und der Messfehler ungefiltert der Regelgröße aufgeschaltet wird, so als wäre gar keine Regelung aktiv.

Perfekte Messrauschunterdrückung: Die Design-Vorschrift ergibt sich nun aus der Übertragung des Messfehlers auf die Regelgröße: Die Übertragung $(K(s) + G_R(s) \cdot G_M(s))/(1 + G_R(s) \cdot G_M(s))$ ist genau dann vollständig zu Null unterdrückt, wenn gilt:

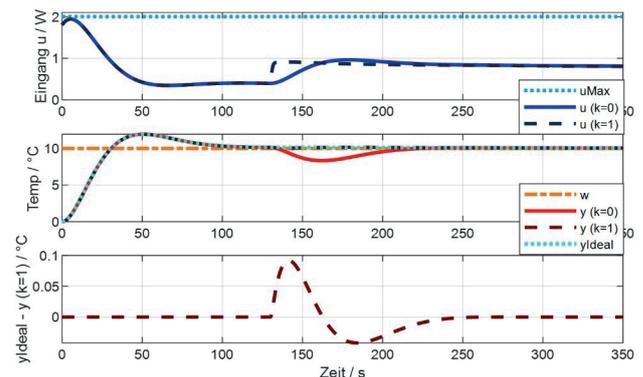
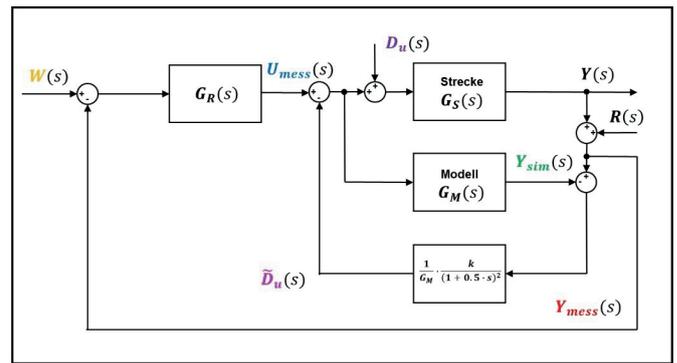


Abbildung 4: Vergleich der Regelung ohne ($k=0$) und mit ($k=1$) Störgrößenkompensation.

$$K(s) = -G_R(s) \cdot G_M(s) \quad (15)$$

Diese Wahl wirkt sich jetzt aber negativ auf die *Störunterdrückung* aus: Aus der Übertragung der Störung $D_u(s)$, $(G_M(s)(1 - K(s)))/(1 + G_R(s) \cdot G_M(s))$, wird nun

$$\frac{G_M(s)(1 - K(s))}{1 + G_R(s) \cdot G_M(s)} = \frac{G_M(s)(1 + G_R(s) \cdot G_M(s))}{1 + G_R(s) \cdot G_M(s)} = G_M(s)$$

Nun werden die Störungen ungefiltert auf die Regelgröße übertragen, so als wäre keine Regelung aktiv.

Ergebnis: Störungen und Messfehler, die beide im gesamten Frequenzbereich das geregelte System beeinträchtigen, lassen sich nicht gleichzeitig perfekt unterdrücken. Es muss eine Priorität festgelegt werden bzw. es sollten die störenden Einflüsse analysiert und gewichtet werden.

3.3 Überprüfen der Methode am simulierten System

3.3.1 Überprüfen der Störgrößenkompensation

Die vorgestellte Methode wird nun am simulierten System in Abbildung 4, obere Grafik, überprüft, in dem nun die „reale“ Strecke das Streckenmodell selbst ist. Das heißt, es liegt eine perfekte Modellbildung vor, und die zu erwartenden Schätz-Ergebnisse müssten dann ebenfalls gut sein.

Bei der konkreten Wahl von $K(s)$ wurde angenommen, dass jenseits der Eckfrequenz von 2.0 rad/s keine Störungen auftreten. Wie in Abschnitt 3.1 bedeutet das, dass die Filterfunktion $K(s)$ bis zu dieser Frequenz möglichst den Wert eins (entspricht 0 dB) haben soll. Zudem wurde in Abschnitt 3.2

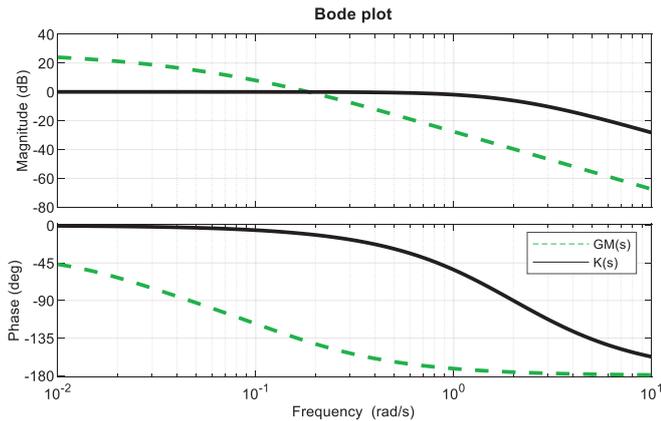


Abbildung 5: Bode-Diagramm der Regelstrecke $G_M(s)$ und der Filterfunktion $K(s)$.

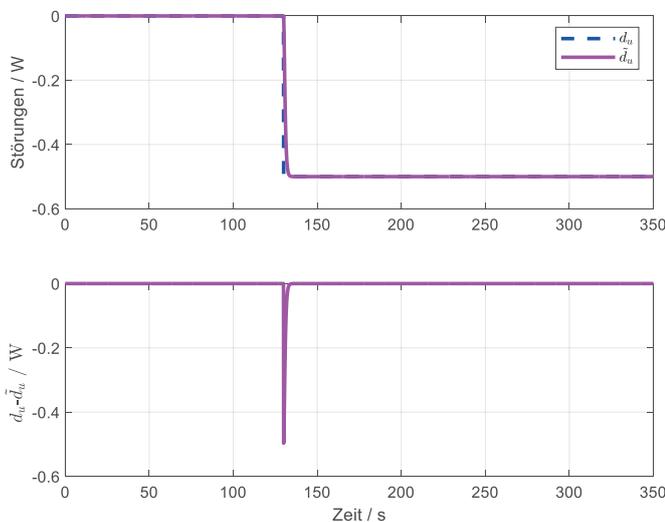


Abbildung 6: Vergleich der geschätzten Störgröße \tilde{d}_u und der wahren Störgröße d_u .

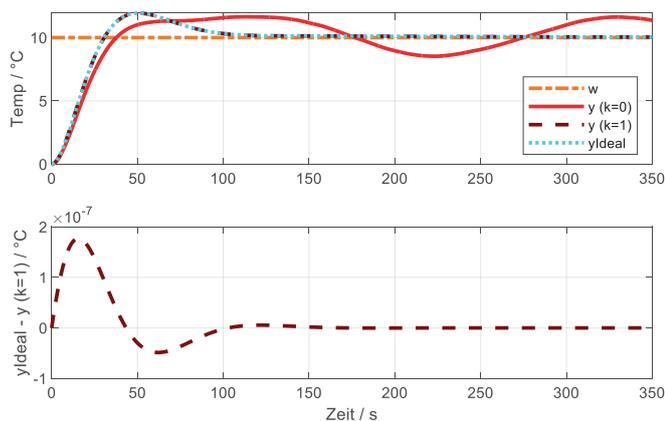


Abbildung 7: Perfekte Kompensation des Messrauschens.

gezeigt, dass mit der vorgestellten Methode bis zu dieser Frequenz etwaige Messfehler nicht unterdrückt werden können. Diese Annahme wurde bereits bei der störungsfreien aber mit Messfehler behafteten Identifikation in Abbildung 2 verwendet, siehe untere Grafik, welche die Differenz aus Messung und Simulation darstellt: Die niederfrequenten

Messfehler werden automatisch durch die experimentelle Modellbildung dem Modell zugeschlagen und übrig bleiben höherfrequente Anteile. Konsequenterweise werden die Messfehler als höherfrequentes Messrauschen verstanden. Diese können gemäß Abschnitt 3.2 dann besonders gut unterdrückt werden, wenn ab der gewählten Eckfrequenz die Filterfunktion $K(s)$ in Gleichung (3) den Wert null hat. Diese Überlegungen führen auf die Filter-Übertragungsfunktion

$$K(s) = \frac{k}{(1 + 0.5 \cdot s)^2}, \quad (16)$$

welche wegen der besseren Vergleichbarkeit der Konzepte um den Faktor k erweitert wurde: Dabei ist der Wert von $k = 0$, wenn die Kompensation nicht verwendet wird, und der Wert von $k = 1$, wenn die Kompensation verwendet wird. Ob der hier gewählte Wert für die Eckfrequenz für das zu regelnde System mit seinen tatsächlich wirkenden unbekanntem Störungen auch der bestmögliche ist, kann nur am realen System durch Experimentieren herausgefunden werden.

In dem vorliegenden Test allerdings werden Messfehler nicht berücksichtigt, d. h. in Abbildung 5 wird $R = 0$ gesetzt. In Abschnitt 3.3.2 werden dann entsprechend nur Messfehler kompensiert; der Exponent 2 im Nenner soll dabei die Rauschunterdrückung verstärken. In Abschnitt 3.3.3 werden gleichzeitig mit derselben Filter-Übertragungsfunktion gleichzeitig sowohl Störungen als auch Messfehler unterdrückt und die Ergebnisse mit dem klassischen Vorgehen verglichen.

Als „unbekannte“ Störung wird ein Leistungssprung von -0.5 W ab $t=130 \text{ s}$ durchgeführt, welcher das Einschalten des Ventilators simulieren soll. Der geschätzte Wert der Störgröße wird der Stellgröße aufgeschaltet, siehe obere Grafik in Abbildung 4. Die kleine Verzögerung zum Beginn des Eingreifens der Störung kommt durch die Eckfrequenz der Filterfunktion $K(s)$, die man erhöhen könnte, wenn eine noch genauere Schätzung nötig wäre und das Messrauschen in dem erweiterten Frequenzbereich immer noch gering ist. Insgesamt ergibt sich eine sehr schnelle und vorausschauende Reaktion auf den drohenden Temperaturabfall (mittlere Grafik in Abbildung 4), so als sei die Störgröße gar nicht vorhanden: Zu diesem Vergleich ist das Signal y_{Ideal} gezeigt, welche die Regelgröße ohne die Störung darstellt. Es ist ersichtlich, dass der Verlauf der gestörten Regelgröße $y(k=1)$ und das Signal y_{Ideal} bis auf eine Abweichung von $0,1 \text{ °C}$ gleich sind. Die Verläufe sind also kaum zu unterscheiden – besser geht es nicht.

Der Grund dafür liegt in der sehr guten Schätzung $\tilde{D}_u(s)$ der Störgröße $D_u(s)$ (Abbildung 6).

3.3.2 Überprüfen der Messfehlerkompensation

In Abbildung 4 wird nun die Störung $D_u = 0$ gesetzt und das Verfahren selbst auf das korrekte Herausrechnen der Messfehler getestet. Dazu wird wie in Gleichung (15) ausgeführt

$$K(s) = -k \cdot G_R(s) \cdot G_M(s) \quad (17)$$

gesetzt; dabei ist der Wert von $k = 0$ oder $k = 1$, wenn die Kompensation aus- oder eingeschaltet ist. Da in diesem Fall die Strecke nicht invertiert werden muss, entsteht kein Fehler und die Kompensation des — aus Darstellungs- und Demonstrationsgründen viel größer als real — angesetzten Messfehlers wird nahezu exakt geschätzt: Die Temperatur ist bei der Regelung mit Kompensation, $y(k = 1)$, und in dem Fall ohne Messrauschen, y_{ideal} , nahezu identisch (s. Abbildung 7).

3.3.3 Test der Methode bei gleichzeitig auftretenden realistischen Störungen und Messfehlern

Nun werden ein Leistungs-Störsprung, wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, sowie gleichzeitig die Messfehler des Temperatursensors berücksichtig. Die am realen Temperatursensor beobachteten Schwankungen von ca. $0,07\text{ °C}$ wurden als normalverteilte erwartungswertfreie Zufallszahlen mit Standardabweichung σ von $0,07/6 = 0,012\text{ °C}$ simuliert; bekanntermaßen befinden sich dann mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.7 % die Zufallszahlen in einem $\pm 3 \cdot \sigma$ Band um die wahren physikalischen Werte. Das Ergebnis des Tests ist in Abbildung 8 zu sehen. Man erkennt die deutliche Verbesserung der Kompensationsmethode Regelung gegenüber der klassischen Regelung beim Aufbringen der Störung bei $t=130\text{ s}$ (s. Abbildung 6).

3.4 Anwenden der Methode am realen System

Die in Abschnitt 6.1 vorgestellte Methode wird nun am realen System aus Abschnitt 2 überprüft. Das Regelungskonzept ist in Abbildung 9 oben dargestellt. Es wird dieselbe Filter-Übertragungsfunktion wie in Abschnitt 3.3, Gleichung (16), verwendet

$$K(s) = \frac{k}{(1+0.5 \cdot s)^2} \tag{18}$$

Zunächst wurde der Sollwert mit einem Sprung um 10 °C beaufschlagt. Die Regelung bringt die Regelgröße nach ca. 100 s auf den gewünschten Wert. Nach 130 s wird der Ventilator als kühlende Störgröße D_u eingeschaltet. Die rote, durchgezogene Kurve in der mittleren Grafik zeigt die Reaktion der klassischen Regelung, die Filterfunktion wird dabei nicht verwendet: Die Temperatur sinkt um ca. 2 °C und eine Regelabweichung baut sich auf, welche eine Reaktion des Reglers hervorruft und die Temperatur des Widerstandes so lange erhöht, bis der Sollwert wieder erreicht ist. Anschließend wurde derselbe Test durchgeführt, dieses Mal mit aktiver Störgrößenschätzung und -Kompensation. Das gute Ergebnis ist in der mittleren Grafik in Abbildung 9 unten durch das gestrichelte Signal $y_{mess}(k = 1)$ dargestellt: Eine Änderung der Temperatur während der angreifenden Störung ist nicht festzustellen. Der Grund dafür ist, dass sich die geschätzte Störgröße \hat{D}_u beim Einschalten des Ventilators schnell auf negative Werte verändert, wie es in der ersten Grafik (magenta, gestrichelt) dargestellt ist. Die Stellgröße $u_{mess}(k = 1)$ (Dunkelblau gestrichelt) reagiert dadurch deutlich schneller als in der klassischen Regelung ($u_{mess}(k = 0)$) (Blau gepunktet). Dadurch, dass die benötigte Heizleistung unter den maximalen 2 W liegt, kann die Methode auch uneingeschränkt funktionieren. Würde diese

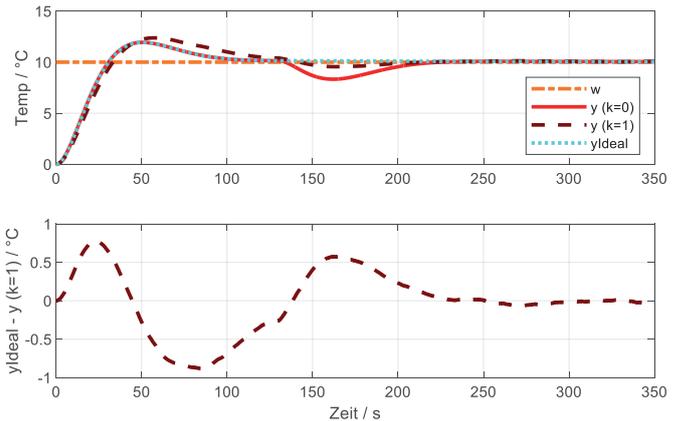


Abbildung 8: Test der Methode am realistisch simulierten Demonstrationsversuch.

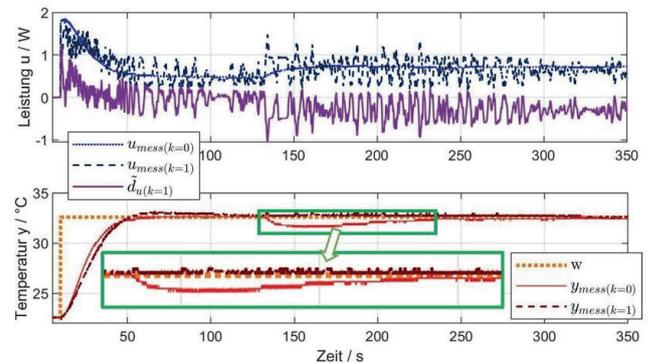
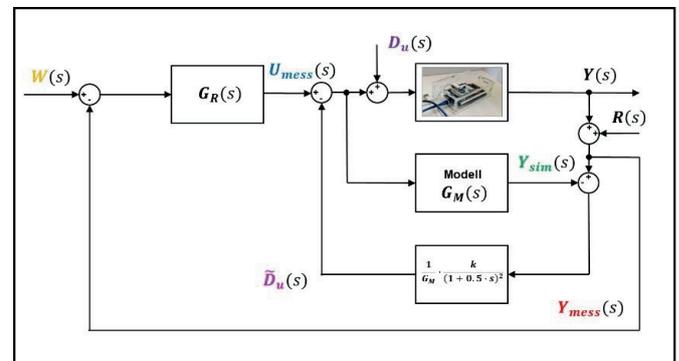


Abbildung 9: Störgrößenschätzung und gleichzeitige Störgrößenkompensation.

Stellgrößenbeschränkung verletzt z.B. durch einen Sollwert-Sprung von 20 °C statt nur von 10 °C , dann kann die Methode nicht mehr richtig funktionieren, weil das vom linearen Regler gewünschte Stellsignal durch das nichtlineare Begrenzen nicht mehr bereitgestellt werden kann. Mit anderen Worten ist hier der Bereich optimaler Störgrößen-Kompensation bereits ausgereizt.

Ein weiterer Vorteil der Methode besteht auch darin, dass nun nicht-messbare Störungen auf einmal „sichtbar“ bzw. quantifizierbar werden. Das bedeutet, dass man mehr über das zu regelnde System erfährt. Zudem können die Regler nun für realistische Störungen ausgelegt werden, was dazu beiträgt, das System optimal — und nicht etwa „over-designed“ — auszulegen.

4. Zusammenfassung

Für eine erfolgreiche Regelung sind viele Faktoren ausschlaggebend: Neben der richtigen Auswahl und der Qualität der Sensoren und Aktuatoren spielt auch der Reglerentwurf eine wichtige Rolle: Dieser kann in der Praxis aber nur so gut sein wie das Modell, das ihm zur Verfügung steht. Modellbildung ist also ein kostengünstiger Hebel für eine erfolgreiche Regelung.

In Abschnitt 3.1 wurde eine Methode vorgestellt, mit der sich auch bereits entworfene und realisierte Regelungen im Nachhinein noch einmal deutlich verbessern lassen; zu ihrem theoretischen Verständnis reicht ein Bachelor-Studium aus. Kern der Methode ist das gezielte Schätzen und gleichzeitige Kompensieren von unbekanntem Störgrößen sowie das gezielte Unterdrücken von Messfehlern. Dazu läuft während des Prozesses parallel ein Simulationsmodell, mit dem sich

durch geschickte Anbindung an das reale System und durch Verwendung einer stabilen Filterübertragungsfunktion gute Schätzwerte für Störgrößen bzw. Messfehler finden lassen. Die Stabilität des Gesamtsystems bleibt dabei unangetastet. Die Methode wurde an einem in diesem Artikel durchgängig verwendeten Temperaturregelungsversuch sowohl am simulierten als auch am realen System demonstriert. Der Erfolg des Konzeptes ist auch in der praktischen Anwendung groß: Das geregelte System kann sich mit dem vorgestellten Verfahren so verhalten, als wären gar keine Störgrößen vorhanden. Dieses Vorgehen könnte auch wegen seiner Transparenz bei hochpräzisen regelungstechnischen Anwendungen, wie z. B. der Wafer-Herstellung von Microchips [7] oder raumfahrttechnischen Anwendungen, von großer Bedeutung sein.

Referenzen

- [1] Lutz, H., Wendt, W. (2007). *Taschenbuch der Regelungstechnik*, 7. Auflage. Harri Deutsch.
- [2] Lunze, J. (2010). *Regelungstechnik 2*, 6. Auflage. Springer.
- [3] Zentgraf, P. (2019). Ein neues Verfahren zur Modellierung linearer Systeme: Experimentelle Modellbildung mit Ein- und Ausgangsdaten. *atp magazin*, 61(11-12), 78-91.
- [4] Zillmer, M., Karlinger, P., Zentgraf, P., Würtele, M., Grimm, G., Wolf, W. (2016). Vorausschauende Zylindertemperierung: Modellprädiktive Regelung verkürzt den Aufheizvorgang und erhöht die Energieeffizienz. *Kunststoffe*, (10/2016).
- [5] Fischer, S. (2018). Anleitung zum Aufbau eines mobilen Temperatur Regelungsversuchs, Projektarbeit 1+2, Master Angewandte Forschung und Entwicklung (AFE).
- [6] The MathWorks, Inc. (2021). *Goodness of fit between test and referene data*. Abgerufen von: <https://de.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html>
- [7] Wikimedia Foundation Inc. (2022). *Wafer*. Abgerufen von: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wafer> (Aufruf 26.6.2021)

AUTOREN

Prof. Dr. Peter Zentgraf, M.Sc., (geb. 1965) arbeitet seit 2010 als Professor für Simulation und Regelungstechnik an der Technischen Hochschule Rosenheim. Nach seiner Promotion 1994 am Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) war er bei Airbus in der Satelliten-Lageregelung und anschließend bei der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) tätig. Seine aktuellen Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung von Verfahren zur robusten Stabilisierung und Verfahren zur Störgrößenunterdrückung, die mit dem Grundwissen eines Bachelor-Ingenieurs verstanden werden können.



Prof. Dr. Peter Zentgraf
Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstraße 1
83024 Rosenheim
☎ +49 (0) 8031 805 26 60
@ peter.zentgraf@th-rosenheim.de

Dipl.-Ing. (FH) Michaela Huber (geb. 1984) ist seit 2012 an der Technischen Hochschule Rosenheim als Laboringenieurin im Labor für Mess- und Regelungstechnik tätig. Dort erstellt und betreut sie die Versuche zur Regelungstechnik und arbeitet am Forschungsprojekt RO-BERTA zur Hagelbekämpfung. Durch die Betreuung vieler Projekt und Abschlussarbeiten entstand die Motivation zur Verbesserung der gelehrteten regelungstechnischen Verfahren.



Dipl.-Ing. Michaela Huber
Technische Hochschule Rosenheim
Hochschulstraße 1
83024 Rosenheim
☎ +49 (0) 8031 805 26 64
@ michaela.huber@th-rosenheim.de