Dr. Lothar Wenzel

Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei

Teil 6: Systeme, Feedback und PID-Regler

Dieser Teil der Serie verläßt nun das Gebiet der Grundlagen und beginnt mit dem Kapitel „Systeme“. Systeme beschreiben allgemein das Verhältnis von Signalen untereinander und sind nun Gegenstand der nächsten vier Artikel dieser Reihe.

Dieser Teil befaßt sich mit dem Zusammenspiel von Signalen, kurz auch als System bezeichnet. Insbesondere kommen auch Rückkopplungsstrukturen zur Sprache, deren Bedeutung in der Praxis der digitalen Signalverarbeitung nicht überschätzt werden kann.

Signale und Systeme

Im folgenden gilt folgende Definition für ein Signal: Ein Signal ist eine Funktion der Zeit und liefert entweder zu diskreten Zeitpunkten oder zu kontinuierlichen Zeiten reelle Werte. Die zwei großen Hauptklassen sind demnach diskrete sowie zeitkontinuierliche Signale. Diese Definition ist in mancherlei Hinsicht nicht allgemein genug. So ist es nicht immer die Zeit, welche die Rolle der unabhängigen Größe übernimmt. Zuweilen sind die Funktionswerte auch mehrdimensional. Zusätzlich kann auch der Ursprungsbereich diese Eigenschaft besitzen. Diese Vereinbarung führt dazu, daß auch Objekte wie Bilder oder ortsabhängige Größen als Signale aufgefaßt werden können. Der große Vorteil dieser Sichtweise liegt darin, daß man dann auf eine reichhaltige Theorie zurückgreifen kann. Für die weiteren Betrachtungen genügt jedoch die Vorstellung, daß Signale zeitabhängige, reellwertige Funktionen sind.

Der Begriff des Systems stützt sich im einfachsten Fall auf zwei Signale. Systeme beschreiben das Verhalten dieser beiden Signale zueinander. Ein Signal ist hierbei die Eingabegröße, das andere die Ausgabegröße. Ein- und Ausgaben sind aber als Gesamtinformation zu sehen, d.h., nicht einzelne Zeitpunkte sind entscheidend. Vielmehr geht es um das Verhalten dieser beiden Signale zueinander. Fast alles und jedes im täglichen Leben läßt sich als System interpretieren:

(1) Der Fahrer eines Autos betätigt das Gaspedal, woraus sich eine Beschleunigung des Fahrzeugs ergibt. Eingabesignal ist hierbei z.B. die Stellung des Gaspedals, die Ausgabe wird von der zeitabhängigen Geschwindigkeit übernommen.
(2) Die Position des Heizungsreglers bestimmt bis zu einem gewissen Grad die Temperatur im Zimmer.
(3) Nachrichten über Firmen beeinflussen deren Aktienpreise.
(4) Die Temperatur in einem Reaktor bestimmt die Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktionen.

Viele Systeme sind von enormer Komplexität. So kann im Beispiel (4) eine erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit wiederum und gar nicht selten die Temperatur beeinflussen, was indirekt zu rückgekoppelten Systemen führt. Sieht man von diesen Seiteneffekten zunächst einmal ab, stellen sich insbesondere zwei Eigenschaften von Systemen als

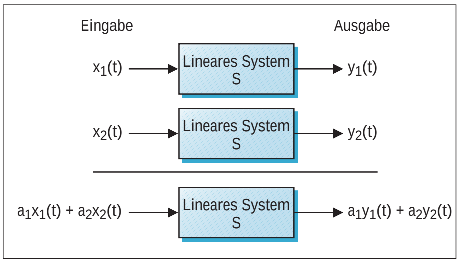

Bild 1. Lineare Systeme lassen sich über Beziehungen zwischen den Ein- und Ausgabesignalen charakterisieren.

sehr wichtig heraus. Systeme, die diese Bedingungen erfüllen, sind aus Sicht der Theorie vollständig beherrschbar und dementsprechend beliebt in Praxis und Wissenschaft. Man ahnt es vielleicht schon, Börsenkurse fallen nicht unter diese Kategorie. Im übrigen ist der Begriff der Nachricht auch kaum zu quantifizieren. Nun also zu diesen zentralen Begriffen.

Lineare zeitinvariante Systeme

Der Term „linear" kann anfangs zu etwas Verwirrung führen. Gemeint ist damit keinesfalls, daß sich das Ausgabesignal y(t) durch eine einfache lineare Operation aus dem Eingang x(t) gemäß $y(t) = ax(t) + b$ für alle Zeiten t mit gegebenen und festen Größen a und b ergibt. Wenn das alles wäre, könnte man sich das Gebiet der Systeme in einer Stunde aneignen. Vielmehr wird ein System genau dann linear genannt, wenn zwei Eigenschaften nachgewiesen werden können:

(A) Für alle möglichen Eingabesignale x(t), Ausgabesignale y(t) und für alle reellen Zahlen a muß folgendes gelten: Ist ax(t) das neue Eingabesignal, so muß ay(t) das daraus generierte Ausgabesignal sein.

(B) Für alle möglichen Eingabesignale $x_1(t)$ und $x_2(t)$ und für die jeweils dazugehörigen Ausgabesignale $y_1(t)$ und $y_2(t)$ (d.h. y_1 gehört zu x_1 sowie y_2 zu x_2) muß gelten: Das zu $x_1(t) + x_2(t)$ gehörige Ausgabesignal ist $y_1(t) + y_2(t)$.

Das klingt sehr theoretisch, ist aber auf der anderen Seite leicht interpretierbar. Lineare Effekte im Eingabeverhalten müssen sich in einem ebensolchen Verhalten der Ausgabesignale widerspiegeln. Um es ganz klar zu machen, die formulierte Definition abstrahiert vollkommen von speziellen Zeitpunkten t, wichtig ist nur die Beziehung der gesamten Signale untereinander. Wie *Bild 1* belegt, muß zwischen dem Eingabesignal x(t) und dem dazugehörigen y(t) keine offensichtliche Beziehung bestehen.

Repräsentieren die weiter oben genannten Beispiele lineare Systeme? Die Antwort ist, daß sich zumindest die Beispiele (1) und (2) ganz gut in dieses Konzept einordnen lassen, wenngleich man sagen muß, daß aus rein mathematischer Sicht z.B. nicht jedes ax(t) in der Praxis realisierbar ist. Zumindest in bestimmtem Maße ist Linearität aber garantiert. Das Beispiel (3) sieht ganz schlecht aus, da Nachrichten nicht quantifizierbar sind. Nimmt man ein anderes Eingangssignal, exemplarisch die Zahl der Angestellten einer Firma, so könnte zwar eine ganz versteckte Beziehung zwischen beiden Signalen bestehen (wenn überhaupt), aber linear ist diese bestimmt nicht.

Der zweite zentrale Begriff ist der der Zeitinvarianz. Damit ist gemeint, daß sich bei einer zeitlichen Verzögerung im Eingangssignal dieselbe Verzögerung auch im Ausgabeverhalten zeigt. Das Gaspedal-Beispiel erfüllt sicher diese Beziehung, und auch die Heizung gehorcht diesem Prinzip, zumindest dann, wenn man von bisher ungenannten äußeren Störfaktoren absieht. Ein System ohne Zeitinvarianz läßt sich beispielhaft durch Treibstoffgaben einer Rakete und deren Position im All beschreiben. Will man den Mars von der Erde aus erreichen, müssen nämlich auch der Startzeitpunkt und die Treibstoffgaben exakt stimmen.

Lineare zeitinvariante Systeme sind mit Hilfe leistungsstarker Werkzeuge vollständig beherrschbar. Das schließt auch Fragestellungen wie Stabilität und optimale Gestaltung der Systeme ein. In der Praxis dominieren lineare zeitinvariante Systeme in weiten Teilen der Anwendungen. Zusätzlich werden 80 bis 90 % dieses Marktes bereits von den eher einfachen Vertretern dieser Gattung abgedeckt.

Notation für Systeme

Einen gewissen Formalismus kann man beim Umgang mit Signalen und Systemen kaum vermeiden. Hierbei gibt es viele Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede in der Behandlung von zeitkontinuierlichen und diskreten Systemen. Die mathematischen Werkzeuge sind sehr ähnlich, die Schreibarten weisen hingegen deutliche Unterschiede auf.

Das vielleicht allerwichtigste Resultat ist, daß sich lineare zeitinvariante Systeme vollständig mit Hilfe bereits seit Jahrzehnten verfügbarer Werkzeuge beherrschen lassen. Die Beschreibungsmittel für derartige Systeme sind sogar aus einer ganzen Sammlung frei zu wählen. Ob man die Notation in Form von Differentialgleichungen, Transferfunktionen, Pol-Nullstellen bzw. „State-Space"-Darstellungen oder etwas anderes bevorzugt, hängt teilweise vom Geschmack des Anwenders ab, hat aber zuweilen auch etwas mit der zu lösenden Aufgabenstellung zu tun. Was aber insbesondere zählt, ist, daß man lineare zeitinvariante Systeme vollständig mit Hilfe relativ einfacher Beschreibungsmittel unter Kontrolle bekommt.

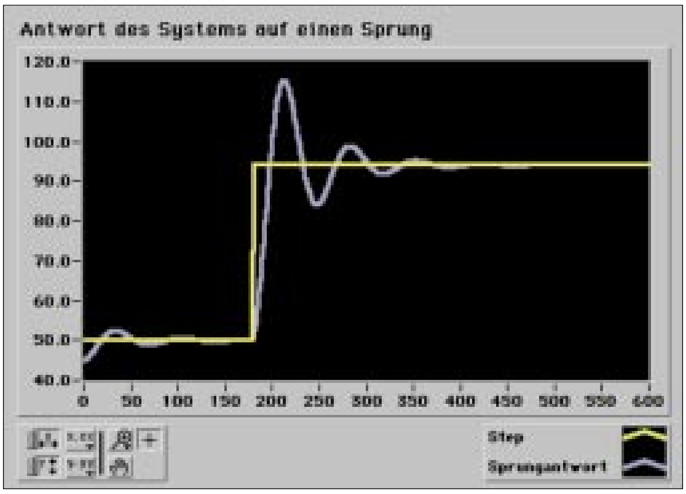

Bild 2. Sprungfunktionen liefern wertvolle Hinweise über das Verhalten vorgegebener Systeme.

Das Programm SYSTEM

Dem Thema „System" kann man sich nur durch umfangreiche Übung nähern. Diesem Zweck dient das vom Server zu ladende Programm SYSTEM. Die Funktionalität dieses Programms ist sehr umfangreich, und nicht alles kann an dieser Stelle detailliert erläutert werden. Grundidee ist jedoch, daß das Übertragungsverhalten des Systems zumindest dem Prinzip nach bekannt sein muß. Das ist durchaus eine übliche Herangehensweise bei konkreten Anwendungen. Das wohl berühmteste und wichtigste lineare und zeitinvariante System ist der PID-Regler. Obwohl drei Parameter frei wählbar sind, ist doch eines klar: Unabhängig von

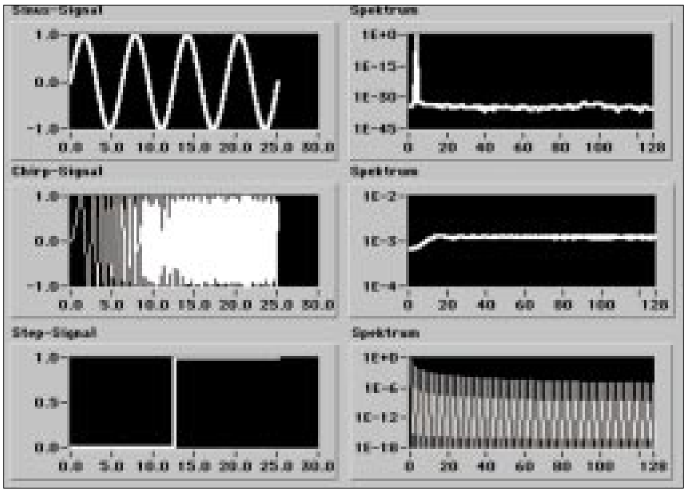

Bild 3. Eingangssignale mit möglichst breiter spektraler Information sind für eine erfolgreiche Systemerkennung unerläßlich.

der konkreten Wahl des Beschreibungsmittels ist das System denkbar einfach aufgebaut. Übrigens sollte man die PID-Problematik trotzdem nicht unterschätzen. Diese drei Freiheitsgrade im P-, I- und D-Anteil des Reglers haben unzählige Artikel und Bücher und ganz nebenbei eine ganze Industrie entstehen lassen.

In diesem Sinne hat man im Programm SYSTEM grundlegende Informationen über das zu untersuchende System vorzugeben. Das könnte prinzipiell in all den weiter oben genannten Formen geschehen, d.h., man könnte sich z.B. frei zwischen der Darstellung als Transferfunktion und der als Pol-Nullstellen-Beschreibung hin und her bewegen. Um die Dinge aber zu vereinfachen, kann SYSTEM ausschließlich mit Transferfunktionen umgehen. Hierbei lassen sich die Zähler- und Nennerpolynome sowohl über Felder reeller Zahlen als auch symbolisch eingeben.

Bezüglich der Ein- und Ausgabesignale sind vom Nutzer nur wenige Regeln einzuhalten. Signale können vorgegeben werden als:

(1) Datenmaterial aus einer Textdatei (alles muß im ASCII-Format vorliegen, mit Zeilenvorschub als Trennzeichen zwischen zwei Signalwerten, siehe Teil 1 der Serie).
(2) Formeln, eingeschlossen ist die Angabe eines interessierenden Intervalls sowie die Vorgabe der Anzahl der Signalwerte.
(3) reale Meßwerte, dazu werden jedoch analog arbeitende Zusatzboards benötigt.

Signalausgaben sind frei wählbar als:

(4) Textdatei (gemäß der Konvention aus (1)),
(5) Grafik,
(6) reale Spannungsausgaben (s. Bemerkung unter (3)).

Spezielle Eingabesignale sind von besonderer Bedeutung. So sagt das Verhalten eines Systems auf die Eingabe einer Stufen-Funktion (Step) bereits eine ganze Menge über das insgesamt zu erwartende Verhalten aus. Aus der Sicht der Praxis ist die sogenannte Sprungantwort in gewisser Hinsicht der kritischste aller denkbaren Fälle. Man bringt dabei ein eingeschwungenes System durch die abrupte Änderung des Eingangssignals vollständig aus dem Gleichgewicht.

Ein typisches Systemverhalten ist in *Bild 2* gezeigt. Je nach konkretem System kann das Verhalten sehr unterschiedlich aussehen. Die sehr bekannte „Ziegler-Nichols“-Methode befaßt sich exemplarisch nur mit einer Frage: Wie muß man die PID-Parameter wählen, so daß Sprungantworten möglichst undramatisch aussehen?

Andere Eingabesignale sind ebenfalls gut geeignet, Aussagen über das Gesamtverhalten zu generieren. Man beachte dabei, daß ein spezielles Signal niemals alle Informationen über ein System gewinnen kann, aber oftmals relativ viel. Eine Rampe ist in diesem Sinne ein interessantes Signal, Chirps (d.h. Funktionen der Art sin(t×t)) ebenfalls. Vielleicht etwas überraschend sind reine Sinussignale eher ungeeignet. Der tiefere Grund dafür hat etwas mit dem Spektrum von Signalen zu tun. Je mehr spektrale Information in einem Signal steckt, um so besser wird die Ausbeute im Hinblick auf eine erfolgreiche Systemerkennung sein. *Bild 3* wird somit sofort verständlich: Ein Sinussignal untersucht das System auf einer einzigen Frequenz. Die eher harmlos aussehende Stufen-Funktion ist ungleich aktiver auf diesem Gebiet. Obwohl die ursprüngliche Motivation für den Einsatz der Stufen-Funktion eher eine möglichst offensichtliche Störung eines eingeschwungenen Systems war, ist die eigentliche Ursache für die Eignung dieses Signals im Frequenzverhalten zu sehen.

Stabilität von Systemen

In aller Regel wird man die Konstruktion stabiler Systeme anstreben. Damit ist gemeint (es gibt genau genommen unterschiedliche Arten der Stabilität), daß das Ausgabesignal zeitlich gesehen beschränkt bleibt, sofern das Eingangssignal diese Eigenschaft ebenfalls besitzt. Es ist nicht erforderlich und zumeist auch nicht der Fall, daß die Ausgangssignale gegen einen bestimmten Wert konvergieren. Stabilität läßt sich am besten anhand der Lage der Polstellen entscheiden. Das ist übrigens genau die genannte Eigenschaft linearer zeitinvarianter kontinuierlicher Systeme, wonach bereits einfache algebraische Beziehungen alles über das zu untersuchende System aussagen. Ein solches System ist stabil, wenn die Realteile aller Polstellen ganz in der linken Hälfte der komplexen Ebene liegen.

Ein interessanter Grenzfall ist hierbei eine Transferfunktion ohne Nullstellen und mit genau der einen Polstelle im Nullpunkt. Die Wirkungsweise dieses Systems ist wohlvertraut. Ein Eingangssignal wird durch die Integration in das Ausgangssignal transformiert. Nimmt man als Eingangssignal die konstante Funktion 1, so wächst das Integral, d.h. das Ausgangssignal, im Laufe der Zeit über alle Grenzen. Mit der eingeführten Bezeichnung ist die Integration demnach nicht stabil.

System-Identifikation

Die zweite Problemgruppe, die in diesem Teil der Serie untersucht werden soll, betrifft gerade die Umkehrung der bisher zur Debatte stehenden Aufgabenstellung. Vorgegeben sind ab jetzt Eingangs- sowie Ausgangssignale, das System ist unbekannt. Beide Signale sollen aus jeweils einzelnen Punkten bestehen und dieselbe Länge besitzen. Formal ist das ein Verstoß gegen das hier vorausgesetzte Prinzip der kontinuierlichen Zeitabtastung. Man kann aber quasi-kontinuierliche Abtastung als äquivalent zum reinen Vertreter ansehen, sofern man ausreichend viele Werte aufnimmt. Diese unscharfe Klassifizierung hängt naturgemäß stark von der konkreten Anwendung ab und kann je nach Situation Millisekunden oder Stunden bedeuten.

Zur Erläuterung der eigentlichen Problematik liege ein unbekanntes System vor. Damit ist gemeint, daß das Übertragungsverhalten nicht spezifiziert ist, man hat jedoch Zugriff zu mehr oder weniger vielen Eingangs- mit den dazugehörigen Ausgangssignalen. Um die Dinge zu vereinfachen, sei hier angenommen, daß Werte-Paare, bestehend aus Eingangs- und Ausgangssignalen, vorliegen. Um noch etwas mehr Anschauung ins Spiel zu bringen, sei eine Lampe in einem Kasten vorgegeben, die je nach anliegender Spannung für eine Temperaturerhöhung innerhalb der Box sorgt. Jeder korrekte Spannungsverlauf wird zu einem bestimmten Temperatureffekt führen (*Bild 4*). Die geschilderte Situation ist sehr deskriptiv, d.h., man weiß so gut wie nichts über das Systemverhalten, egal wie lange man auch immer Daten sammelt.

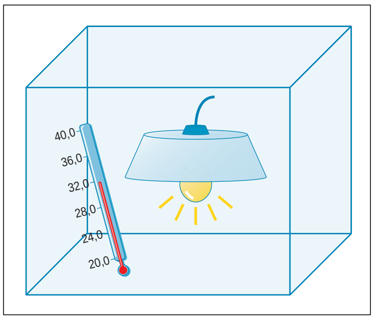

Bild 4.
Ein Lampenexperiment: An der Lampe anliegende Spannungen spiegeln sich mit einem entsprechenden Zeitversatz in der Temperatur innerhalb eines abgeschlossenen Raums (Box) wider.

Hat man nun den begründeten Verdacht, daß ein lineares zeitvariantes System zur Debatte steht, liegt bereits eine echte Herausforderung vor. Diese lautet: Man finde ein möglichst einfaches System, das mit geeignet hoher Präzision das vorliegende Signalverhalten von Ein- und Ausgabe nachbilden kann. Einige Erläuterungen sind an dieser Stelle unerläßlich. Zunächst einmal ist von möglichst einfachen Systemen die Rede. Gemeint sind damit Transferfunktionen mit möglichst wenig Koeffizienten bzw. mit geringer Zahl von Null- und Polstellen, „State-Space"-Darstellungen mit Matrizen geringer Dimensionen. Da aufgrund unvermeidbarer Störeinflüsse eine absolute Übereinstimmung der genannten Art nicht zu erwarten ist, sind relativ einfache Systeme doppelt geeignet. Sie sind im Regelfall gutmütiger und liefern trotzdem bereits akzeptable Resultate. Die Einstufung als „möglichst gering" wird meistens dadurch erleichtert, daß zumindest Anhaltspunkte über die Komplexität des Systems in der Praxis existieren.

Eine zweite Bemerkung betrifft die Art und Weise, wie man sich passendes Datenmaterial besorgen kann. Es gibt dabei zwei prinzipielle Vorgehensweisen: Der Idealzustand ist, daß man Eingabesignale nach eigenem Ermessen generieren kann. Man hat dann nur die Ausgabesignale aufzuzeichnen, und die eigentliche Identifikation des Systems kann beginnen. Leider ist das in der Praxis mit Regelmäßigkeit verboten. Will man beispielsweise die Körpertemperatur als Antwort auf Nahrungsgaben studieren, so sind aus signal- und systemtheoretischer Sicht Stufen-

Funktionen sicherlich sehr gute Kandidaten. Es sind aber unschwer Schreckensszenarien auf seiten des Probanden zu erkennen, insbesondere dann, wenn die Stufen über Gebühr hoch und lang sind. Anders gesagt, die Identifikation von Systemen muß oftmals das akzeptieren, was ihr als Datenmaterial angeboten wird. Zuweilen reicht das nicht zu einer vollständigen Entschlüsselung aus, ein Rest an Unsicherheit ist somit unvermeidbar und einzukalkulieren.

Warum ist man eigentlich an einer möglichst exakten Systemidentifizierung interessiert? Nun, zum einen besitzt

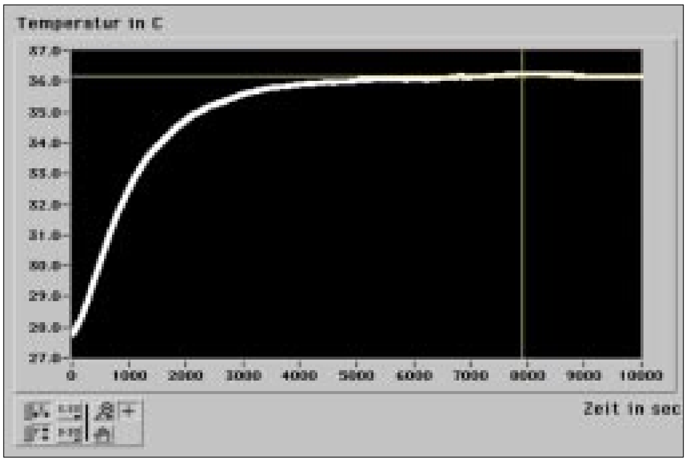

Bild 5. Konkrete Untersuchung des Systemverhaltens der Temperaturbox. Nach einigen Minuten ist der Einschwingprozeß vollzogen. Die Lampe leuchtet zwar weiter, jedoch resultiert daraus keine weitere Temperaturerhöhung mehr. Es hat sich ein neues thermisches Gleichgewicht eingestellt.

man dann ein exzellentes Hilfsmittel, um das Antwortverhalten auf ein beliebiges und bislang nicht vorliegendes Eingangssignal vorherzusagen. Anwendungen im Sinne von Vermeidung extremer oder gefährlicher Ausgabezustände dürften naheliegen. Zum anderen, und das ist aus praktischer Sicht zumeist wichtiger, kann man im wahrsten Sinne des Wortes die Kontrolle über ein einmal analysiertes System übernehmen. Um im Bild der Temperaturbox zu bleiben, man kann z.B. nach der Identifizierung dieses Systems die Lampe gezielt mit Spannung versorgen, so daß ein sanfter Anstieg um 5 °C erreicht wird. Ohne derartige Hintergrundinformationen würde man vielleicht auf eine primitive Strategie, bestehend aus den zwei Lampenzuständen an/aus setzen.

Lösung des Fitting-Problems mit Parameterbestimmung

Hat man die Komplexität des Systems fixiert, bleibt im Rahmen der Identifikation nur noch eines zu tun, man muß ein Fitting-Problem lösen. Anders gesagt, es sind Parameter zu bestimmen, so daß die Ausgabe möglichst perfekt aus dem Eingabesignal berechnet werden kann. Es wurde bereits erwähnt, daß diese Parameter z.B. die Null- und Polstellen der Übertragungsfunktion sein können. Genausogut kann man aber auch die Koeffizienten der Transferfunktion selbst wählen. Alle Ansätze dieser Art sind sehr ähnlich.

Dabei ergibt sich aber sofort eine weitere Problematik. Im Regelfall ist die Anzahl der Koeffizienten gering, die Signallänge jedoch groß. Eine Konsequenz daraus ist, daß man es mit weitaus mehr Gleichungen als Unbekannten zu tun hat. Aus der linearen Algebra ist bekannt, daß derartige Systeme kaum eine Chance haben, exakt lösbar zu sein. Bestenfalls kann man Lösungen ermitteln, für die insgesamt gesehen alle Gleichungen möglichst gut erfüllt werden. „Möglichst gut“ bezieht sich hierbei auf das sogenannte quadratische Mittel. Seitens der Mathematik setzt man zur Bestimmung derartiger Fast-Lösungen zumeist den sogenannten Single-Value-Decomposition-Algorithmus (SVD) ein, der schnell und präzise arbeitet.

Der andere Extremfall liegt dann vor, wenn nur sehr wenige Daten vorliegen, das System-Modell aber komplex sein soll. Mit ganz wenigen Ausnahmen ist diese Aufgabe aber sinnlos. Liegen sogar mehrere Paare von Ein- und Ausgabesignalen vor, entstehen Fitting-Probleme der zweiten Stufe, d.h., man kann z.B. für jedes einzelne Paar Parameter ermitteln und dann insgesamt nochmals über alle so berechneten Parametersätze zu Kompromißentscheidungen kommen.

Das Programm SYSIDENT

Das zweite ladbare Programm mit Namen SYSIDENT läßt sich zur Erläuterung der Systemidentifikation einsetzen. Um die Dinge nicht übermäßig zu komplizieren, wird in SYSIDENT ausschließlich der Ansatz über die Transfunktion zugelassen. Festzulegen ist dabei nur die gewünschte Ordnung, d.h. die maximale Ordnung des Zähler- und Nennerpolynoms. Bei der Systemidentifikation muß man ja sowohl die Ein- als auch die Ausgangssignale vorgeben. Das kann prinzipiell über Formeln bzw. über vordefinierte Dateien der weiter oben beschriebenen Art geschehen. Wählt man den Weg über Formeln, ist für beide Signale das gleiche Umfeld (Start, Ende, Anzahl der Signalpunkte) bereits garantiert. SYSIDENT berechnet eine optimale Transferfunktion und stellt das wirkliche Ausgangsverhalten dem vorhergesagten entgegen. Hierzu kann man das Eingangssignal und eine Transferfunktion vorgeben, woraus das Ausgangssignal automatisch generiert wird. Wählt man dann bei der Identifikation des Systems die Ordnung korrekt, müßte die Optimierung die Transferfunktion vollkommen wiederentdecken. Eine zu kleine Ordnung verschlechtert die Qualität der Rekonstruktion, eine zu große Ordnung führt im Regelfall zu numerischer Instabilität und ist somit wertlos.

Temperaturbox als Beispiel zur Systemidentifikation

Die bereits erwähnte Temperaturbox läßt sich aus Sicht der Systemidentifikation untersuchen. Bei einem einfachen Sprung der Lampenspannung von 4 V auf 9 V, was im vorliegenden Fall die Lampe vom Glimmzustand in die volle Leuchtkraft bringt, läßt sich gleichzeitig ein Temperatureffekt registrieren. Man erkennt dabei zweierlei (*Bild 5*): Zum einen ist die Klimaanlage im Büro des Autors nicht in bester Verfassung, da die Starttemperatur weitgehend der Raumtemperatur entspricht. Wichtiger jedoch ist, daß nach einigen Minuten der Einschwingprozeß vollzogen ist. Die Lampe leuchtet zwar weiter, jedoch resultiert daraus keine weitere Temperaturerhöhung mehr. Es hat sich ein neues thermisches Gleichgewicht eingestellt.

Programme ähnlich zu SYSIDENT haben keinerlei Probleme, eine erfolgreiche Systemidentifikation auszuführen. Die Übereinstimmung zwischen wirklichem Temperaturverlauf und dem sich aus der Optimierung ergebenden ist bereits bei einem System erster Ordnung perfekt. Es erscheint wenig sinnvoll, höhere Ordnungen auch noch zu untersuchen. Dieses Resultat ist ein starkes Argument dafür, daß man die Temperaturbox mit einem geeigneten PID-Regler voll beherrschen kann. Und tatsächlich läßt sich mit der bereits genannten Methode nach Ziegler-Nichols ein derartiger Parametersatz für den P-, I- und D-Anteil ableiten, der seine Arbeit zufriedenstellend tun wird. Man beachte, daß man mit dem Programm SYSTEM und mit entsprechender Zusatzhardware bereits einen PID-Regler prinzipiell realisieren könnte.

Wissenswertes am Rande

Die Theorie und Praxis der Systeme und deren Identifikation sind äußerst gut entwickelt, d.h., es liegen zahlreiche Ergebnisse und auch praktisch einsetzbare Algorithmen vor. Lineare zeitinvariante Systeme sind dabei von überragender Bedeutung. So decken die einfachen PID-Regler etwa 90 % aller praktisch relevanten Anwendungen ab. Selbstverständlich werden aber auch viel kompliziertere Systeme, die zudem weder linear noch zeitinvariant sind, erfolgreich untersucht und eingesetzt. Erwähnt wurden auch Verfahren, die im Zeitbereich agieren. Viele Algorithmen zur Systemidentifikation nehmen hingegen den Weg über Frequenzanalysen. In diesem Zusammenhang sind auch Begriffe wie Bode- oder Nyquist-Diagramme zu nennen, die Systeme im Frequenzbereich charakterisieren.

Der nächste Teil der Serie befaßt sich mit der Abtastung von Signalen, der Laplacetransformation und mit der Signalrekonstruktion. *gs*

Dr. Lothar Wenzel ist gebürtiger Berliner und hat Mathematik und Informatik in Greifswald und Dresden studiert. Nach Tätigkeiten in einem Kernkraftwerk und bei der BASF AG, Ludwigshafen, beschäftigt er sich zur Zeit bei National Instruments in Austin, Texas, mit dem Design von Algorithmen auf den Gebieten Simulation, Regelung, Mathematik und Bildverarbeitung.

Literatur

[1] *Wenzel, L.*: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 1. *Elektronik* 1998, H. 23, S. 96ff.

[2] *Wenzel, L.*: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 2. *Elektronik* 1998, H. 25, S. 86ff.

[3] *Wenzel, L.*: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 3. *Elektronik* 1999, H. 1, S. 52ff.

[4] *Wenzel, L.*: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 4. *Elektronik* 1999, H. 3, S. 48ff.

[5] *Wenzel, L.*: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 5. *Elektronik* 1999, H. 5, S. 60ff.

[6] Die im Text angegebenen Programme stehen zum Download bereit unter: *www.natinst.com/germany*