

Anleitung zum Minimalen Zustandsregler

von Rüdiger Kress*

29. Juli 2019
3. angepasste Ausgabe

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	2
2	Ein kleiner Überblick zum technischen Regeln	3
2.1	Einige Grundbegriffe	3
2.2	Warum mathematische Funktionen?	5
2.3	Eine Typisierung bezüglich der Anwendung	5
3	Zum Regler selbst	7
3.1	Die grundsätzliche Funktionsweise	7
3.2	Ein kurzer Vergleich mit dem gängigen PID-Regler	10
3.3	Die Stufung der Stellgröße	11
3.3.1	Warum die Vielstufigkeit der Stellgröße?	11
3.3.2	Zweipunktregler und Zweipunkt-Schaltbetriebsart	12
3.4	Was besonders zu beachten ist	14
4	Anmerkungen zur Reglereinstellung	14
4.1	Die zwei Einstellparameter des Reglers	14
4.2	Die Einstellung des Reglers im Besonderen	16
4.2.1	Die Gewichtung der Stellgröße	20
5	Weitere Hinweise	20

*Autor und Herausgeber, Wilhelm-Weitling-Str. 18, 81377 München
(Die Broschüre kann zum Eigenbedarf gespeichert und ausgedruckt werden.)

1 Allgemeines

Diese Anleitung assistiert beim Aufbau eines digitalen Reglers besonderer Bauart, ungeachtet lizenzrechtlicher Einlassungen. Sie kann dem Experten als Verweis zur *originären Beschreibung* und zugleich mit dem Abschnitt 3.1 zur Vorinformation dienen, doch vor allem dem handwerklich Interessierten, Orientierung beim Ausprobieren geben. Voraussetzende Kenntnisse von Regelungen sind dabei nicht unbedingt erforderlich, jedoch hilfreich.

Vielerorts stößt man auf für den Beobachter verborgene regelungstechnische Vorgänge. Bei deren Einsatz auch Kosten abzuwägen sind, zulasten eher Erleichterung bezweckenden Erweiterungen. Im Hobbyrahmen wird man lieber diese oder jene Unbequemlichkeit in Kauf nehmen, als zeitlich und experimentell anspruchsvollere Automatisierungen mit regelungstechnischen Herausforderungen anzugehen. Das müsste nicht sein. Denn dieses hier vorgestellte adaptive Regelungsverfahren vermeidet einzelne rechnerische und experimentelle Regleranpassungen, indem sich der Regler approximativ einer Regelstrecke selbsttätig anpasst, ohne dass ihm die Regelstrecke genauer bekannt gemacht ist.

Der sogenannte Minimale Zustandsregler unterscheidet sich in seinem Aufbau und der Regelstreckeneinbeziehung grundlegend vom bekannten Zustandsregler und anderen etablierten Regelungsverfahren. Nicht aber das äußere Regelungsschema an sich. Wollte man sich mit dem Verfahrenshintergrund beschäftigen, so sind - für Sachkundige sicher überraschend - allenfalls Kenntnisse der Schulmathematik voraussetzend. Oft ist der adaptive Regler sofort wie vorliegend, in seiner Grundeinstellung zu verwenden. Wer für seine persönlichen Aufbauten etwas Erfahrung mit Computerprogrammen hat und der Elektronik nicht abgeneigt ist, bringt gute Voraussetzungen mit. Denn Handlungsfolgen sind nicht im Detail erläutert, sondern Hinweise mehr als einführende Informationen artikuliert. Diese Anleitung bezieht sich nur auf regelungstechnische Vorgänge und nicht im Einzelnen auf die Verwendung elektronischer Bauteile und dem Kompilieren der Software.

Der digitale, sukzessiv approximativ arbeitende Minimale Zustandsregler ist in der 7. Ausgabe vom Juli 2019 beschrieben. Sie ist als Netzpublikation auch bei der DNB (Deutsche Nationalbibliothek) zu finden unter <http://d-nb.info/1191494357/34>, zum Herunterladen (kurze Wartezeit) und vom Leser gleich abspeicherbar. Alle Beschreibungshinweise dieser Anleitung beziehen sich auf die genannte Ausgabe. Wegen der im Inhaltsverzeichnis vorliegenden Hypertext-Querverweise, springt der Cursor beim Anklicken der Inhaltszeile gleich auf die richtige Seite in der Beschreibung. Und zurück, wenn die Alt-Taste und die Pfeil-links-Taste gleichzeitig, nämlich **[Alt] + [←]**, betätigt werden.

Man sollte sich zum Ausprobieren nicht von der *originären Beschreibung* abschrecken lassen, denn für den Nachweis der Funktionalität müssen eben entsprechende Aussagen gemacht werden. In dieser vorliegenden Anleitung sind zum einen wichtige regelungstechnische Begriffe und zum anderen die prinzipielle Arbeitsweise des Reglers nochmals rudimentär geschildert, sodass dadurch die *originäre Beschreibung* für jeden Interessierten wohl etwas vertrauter wirken dürfte. Weitere Hinweise für den Testaufbau sind im Abschnitt 5, am Ende dieser Anleitung zu finden.

2 Ein kleiner Überblick zum technischen Regeln

Die Regelungstechnik erfährt selten öffentliche Beachtung, obwohl sie, abgesehen von historischen Vorlagen, in ihren systematischen Anfängen bis ins 19. Jahrhundert zurückgeht. Sie tritt vorwiegend nur in Fachbeiträgen in Erscheinung, wenngleich wir sie ständig nutzen, in Gebrauchsgeräten mehr oder weniger aufwändig eingebettet. Es seien nur Küchenherd, Boiler und der diffizilere CD-Player erwähnt. Überdies anspruchsvolle digitale Einrichtungen im Auto und die für unsere Gütererzeugung unabdingbaren Industrieregler.

2.1 Einige Grundbegriffe

Im Gegensatz zu einer **Steuerung** weist die **Regelung** eine **Rückführung** auf, die der Regler kontrollierend nutzt. Deshalb spricht man bei der funktionellen Beschreibung einer Regelung mit all ihren Bestandteilen vom **Regelkreis**, ganz unabhängig davon, was geregelt wird und wie die technische Ausführung aufgebaut ist. Vorab einige wichtige Begriffe wie **Regelgröße** (Istwert der gemessenen Einheit), **Führungsgröße** (benennt den Sollwert), die einwirkende Stellgröße und schließlich die **Regelabweichung** (gebräuchlich ist eigentlich **Regeldifferenz**). Das Einwirken der **Stellgröße** treibt die Regelgröße zur Führungsgröße. Die Regeldifferenz ergibt sich, indem man die Regelgröße von der Führungsgröße abzieht. Dadurch entsteht, als eine Grundlage für die mathematische Formulierung, die Regeldifferenz mit der Abweichung null, wenn die Führungsgröße genau erreicht ist. Der Regelungszweck ist, die Regeldifferenz sicher, möglichst schnell und schwingungsarm, im Idealfall genau auf null zurückzuführen und zu halten, entgegen aller möglichen Störungen. Was mit der geradlinigen Steuerung ohne permanente Eingriffe nicht möglich ist.

Regler können in *analoger* oder *digitaler* Technik ausgeführt sein. Bei analogen Bauteilen liegt der Signalfluss so vor, wie er beispielsweise in einer elektronischen Schaltung physikalisch erzeugt wurde. Während in digitaler Technik dessen numerische Werte mit einem Rechnerprogramm bearbeitet werden und über Schnittstellen die analogen Größen in numerische Werte und diese am Ende der Verarbeitung wieder in ihre Quellgrößen umgesetzt sind. Eine Recheneinheit arbeitet eine die Arbeitsschritte ausführende Befehlsfolge ab und am Beginn wird das Eingangssignal angenommen und am Ende das Ausgangssignal ausgegeben. Der Zeitraum zwischen Eingabe und Ausgabe steht dann für die Bearbeitung neuer Eingaben nicht zur Verfügung. Diese Antwortzeit genügt beim Digitalregler der **Abtastzeit**. Bei Abweichungen liegt sie jedenfalls über der vorgeannten Antwortzeit.

Erhitzt man zur Veranschaulichung, unter Kontrolle eines Reglers, Wasser mit einem elektrischen Heizkörper, sagen wir z. B. von 20 auf 70 Grad Celsius, dann wird sich mehr oder weniger schnell die Temperatur erhöhen, abhängig von der Wassermenge und der zugeführten Wärmeenergie. Es spielen auch noch andere Faktoren wie Wärmeverluste eine Rolle. Die ansteigende Ist-Temperatur ist die Regelgröße, der Sollwert von 70 Grad Celsius ist die Führungsgröße. Sie wurde zu guter Letzt von der Regelgröße nur deshalb erreicht, weil sich die Stellgröße, mittels des elektrischen Heizkörpers als bauliches **Stell-**

glied, durch vom Regler kontrollierte, zeitlich geeignet dosierte Energiezuführung erhöhte. Mit der sich folglich ändernden Regelgröße wurde abhängig von der Regeldifferenz, vom Regler wiederum die Stellgröße nach *bestimmten Kriterien* bemessen und damit schließt die die Auswirkung meldende Regelgröße den Regelkreis. Je mehr die sich aufgrund der Stellgrößeneinwirkung der Führungsgröße nähert, desto kleiner wird der Betrag der Regeldifferenz. Diese nimmt null an, wenn die Regelgröße der Führungsgröße entspricht. Die Regeldifferenz wird negativ, wenn die Regelgröße die Führungsgröße überschreitet. Gewöhnlich überschreitet die Regelgröße, bei gewolltem möglichst steilen Anstieg, kurzzeitig die Führungsgröße mit der **Überschwingweite**. Anschließend sollte der Regler die Regelgröße bei möglichst wenig Schwingungen, in kurzer Zeit mit der Führungsgröße in Übereinstimmung bringen, mit dann recht geringer Unter- bzw. Überschreitung der Führungsgröße (bleibende Regelabweichung). Regelgröße und Führungsgröße werden mit einem Messfühler (hier ein Thermometer als **Messeinrichtung**) gemessen. Die Örtlichkeit zwischen Einwirkung der Stellgröße und der die Auswirkung ermittelnden Messwertfassung der Regelgröße, bezeichnet man als **Regelstrecke**. Sie umfasst im Beispiel den Wasserbehälter mit Füllung und seine konstruktiven Gegebenheiten. Sie ist neben dem Regler ein Bestandteil des Regelkreises und man könnte ihr modellhaft das Zeitverhalten der Messeinrichtung und des Stellglieds zurechnen. Es gibt ebenso die **Störgröße** als eine externe, auf den Regelkreis zurückwirkende, störende Beeinflussung der Regelstrecke.

Die oben erwähnten *bestimmten Kriterien* des Reglers hängen von der Regelstrecke ab und sie zu ermitteln, steht im Fokus jedes Regelns. Denn die Auswirkung der Änderung der Stellgröße in Abhängigkeit von der Regeldifferenz, ist vom Verhalten des zu regelnden Geschehens bestimmt. Aus dem Temperaturbeispiel ist ersichtlich, worin die ursächliche Problematik bei Regelungsvorgängen besteht, nämlich den Zeitbedarf und weitere Eigenheiten der zu beeinflussenden Prozesse, *vorab konzeptionell* zu berücksichtigen. Deshalb ist eine Regelstrecke mit geringer Verzögerung im Prinzip leichter zu handhaben.

Die Einhaltung des Temperatursollwerts im obigen Beispiel ließe sich sehr einfach, aber mit deutlichen Pendelbewegungen um den Sollwert, mit einem sogenannten unstetigen Regler, den als Zweipunktregler bezeichneten Schaltthermostat lösen. Doch flexibler wären stetige Regler wie der PI-Regler (vom oft verwendeten Typ PID-Regler, für diese Temperaturregelung ohne D-Anteil) mit viel geringeren schwankenden Abweichungen um den Sollwert. Die Stetigkeit des Reglers umschreibt das sich weitgehend kontinuierlich ändernde Verhalten der Stellgröße. Probleme begännen allerdings mit der Reglereinstellung, wenn immer unterschiedliche Sollwerte und Wassermengen genauer zu regeln wären, weil dann die Regelstrecken auch verschieden sind. Dafür wäre ein aufwändigerer adaptiver Regler optimal. Er passt sich ändernden Regelstrecken nach festgelegten Instrumentarien selbsttätig an. Diese Fähigkeit besitzt der hier behandelte Minimale Zustandsregler, hingegen mit geringerem konzeptionellen Aufwand als bei herkömmlichen Regelungen.

2.2 Warum mathematische Funktionen?

Wollte man in obigem Beispiel Abschnitt 2.1, die Regelgröße von Hand durch Ein- und Ausschalten des elektrischen Heizkörpers auf 70 Grad bringen, so würde das nicht sofort zufriedenstellend gelingen. Hierbei zeichnen sich hauptsächlich zwei Hinderungsgründe ab:

1. Aufgrund des Zeitverzugs und der Verschiedenheit des Prozessverhaltens von Regelstrecken, muss man im Voraus die Stellgröße für den jeweils nächsten Regelschritt abschätzen. Selbst unter unvorhergesehenen Störeinflüssen, wäre die reguläre vorausschauende Kenntnis der Stellgröße eine vorteilhaftere Ausgangslage.
2. Ist einmal der Sollwert erreicht, muss er möglichst konstant, entgegen zum Teil unbekannten Störeinflüssen, gehalten und Regel- bzw. Stellgröße nachgeführt werden.

Woher sollte man also wissen, mit welchen Schaltzyklen der Stellgrößenansteuerung, der Regelgrößenanstieg optimal steil und damit nicht mit zu großer Überschwingweite sein würde. Deshalb wird üblicherweise eine mathematische Funktion eingesetzt, die die Stellgröße, abhängig von der Regeldifferenz, sicher leitet. Diese Funktion muss auf die gewünschte Regelstrecke weitgehend abgestimmt sein und damit dem Regler bekannt gemacht werden. Aufgabe des Entwicklers von technischen Regelungen ist es nun, die Art eines Reglers und sein Regelverhalten hinsichtlich der Regelstrecke, mathematisch zu modellieren. Diese Entwicklungsarbeit gehört zum Kernbereich des Umgangs mit der Regelungstechnik. Hierzu haben sich im Laufe der Zeit die unterschiedlichsten Verfahren mit ihren mathematischen Grundlagen immer weiter verfeinert. Bedeutend ist der Beweis der Stabilität, dass z. B. die Funktionen auch sichere Nullstellen aufweisen, also die Regeldifferenz null wirklich durchgehend zu erreichen ist. Ebenso müssen auftretende Schwingungsansätze schnell abklingen. Eine viel verwendete Regeleinrichtung wie der sogenannte PID-Regler, beinhaltet bereits eine vorgegebene Funktion, deren P-I-D-Parameter allerdings für jede Regelstrecke zu konfigurieren sind. Für weitere Anwendungen ist es mit größerem Aufwand über Einzelabstimmungen oder gleich Modellbildungen möglich, Funktionen veränderlichen Regelstrecken anzupassen. Die umrissenen Verfahrensweisen sind heutzutage hauptsächlich in der Digitaltechnik etabliert und begründen angepasste technische Regelungen, ob offen als Kompaktregler oder implementiert und nicht sofort sichtbar.

2.3 Eine Typisierung bezüglich der Anwendung

Eine Typisierung zum Verhalten von Regelkreisen geschieht beispielsweise über verallgemeinernde Gleichungen der Regelkreiselemente, soweit sich die technischen Vorgänge im Detail nicht zufriedenstellend als mathematisch beschreibbar erweisen. Im Regelkreis lässt sich unterscheiden zwischen der Regelstreckenbeschreibung und der betreffenden Auslegung des Reglers. So deckt der PID-Regler allein durch Parameteränderungen verschiedenste Regelstrecken ab. Bei weitergehenden Anforderungen können Zustandsregler eingesetzt werden, die ganze Gleichungssysteme nutzen und eng auf ihre Regelstrecken

bezogen sind. Der Minimale Zustandsregler nutzt Prozesszustände andersartig und wollte man seine Regelstreckenabdeckung allgemein ausdrücken, so könnte man sich an der weniger gebräuchlichen jedoch umfassenderen Regelstreckencharakterisierung orientieren wie

- *verzögerungsarme Strecken* und *Speicherstrecken*, mit und ohne Ausgleich. Demnach gelten Regelstrecken dann als verzögerungsarm, wenn die zu regelnden Prozesse kürzere Reaktionszeiten¹ aufweisen. Andererseits liegen Speicherstrecken vor, wenn spürbare Energiespeicherungen die Rückwirkung der Stellgröße auf die Richtungsbeziehung der Regelgröße, beeinflussen. Die Abgrenzung ist unscharf. Speicherstrecken, bei denen Ausgleichsvorgänge der zugeführten Energie Auswirkungen auf die Regelgröße haben und durch höhere Führungsgrößen bedingt, selbst bei anliegender Stellgröße zum Stillstand der Regelgröße führen können, sind *mit Ausgleich*. Dagegen weisen Speicherstrecken *ohne Ausgleich* keine wirksamen Ausgleichsvorgänge auf und zeigen deshalb eine nahezu gleichbleibende Steigung der Regelgröße. Bei unserem Temperaturbeispiel handelt es sich um eine Speicherstrecke mit Ausgleich, weil irgendwann (bei passender und andauernder Energiezufuhr) vielleicht die 70 Grad überschritten werden, aber z. B. 85 Grad nicht mehr, weil die Wärmeenergieverluste schließlich überhandnehmen und der Wärmeenergiezuführung entsprechen. Dagegen steigt bei einer Regelstrecke ohne Ausgleich, wie z. B. die Füllstandsregelung eines Wasserbehälters, selbst bei einem wenig aber dauerhaft geöffnetem Ventil als Stellglied, der Wasserstand beständig bis zum Überlauf. Wieder konventionell, sind
- *nichtlineare Regelstrecken* mathematisch schwieriger erfassbar und sie stehen im Gegensatz zu den *linearen Regelstrecken*. Großenteils ist anpassende Linearisierung machbar bzw. sind die Auswirkungen der Nichtlinearitäten gering. Bei nichtlinearen Regelstrecken ist die Gleichläufigkeit von Stellgröße und deren Auswirkung auf die Regelgröße nicht gegeben (wie z. B. bei Magnetregelstrecken, bei Sättigungseffekten, diversen Strecken zu Zweipunktreglern etc.), während bei linearen Regelstrecken das Ausgangsverhalten proportional zum Eingangsverhalten in Zeit und Amplitude steht.
- *Zeitvariante* Regelungssysteme zeigen unterschiedliches Prozessverhalten innerhalb gleicher Zeitmarken und sie sind ebenfalls schwieriger zu handhaben. Geringe Veränderungen im Zeitverhalten bleiben in der Regel unberücksichtigt und das Regelungssystem wird dann als *zeitinvariant*, also zeitstabil behandelt.

Seit Ende der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte sich verstärkt die Rechner- und Programmieretechnik zur Unterstützung von Abläufen in Organisation und Technik. Jetzt ist es möglich geworden, weitläufig technische Prozesse digital so zu gestalten, dass die Verfahren bezüglich ihrer zweckgebundenen Abfolgen freier handhabbar wurden und

¹Im Abschnitt „3.3.2 Zweipunktregler und Zweipunkt-Schaltbetriebsart“ auf Seite 13 ist verdeutlicht was damit gemeint ist.

nicht unmittelbar an physikalisch wirksame Schalt- und Steuereinrichtungen gebunden blieben. Damit ist infolge des Elektronikfortschritts und der Digitalisierung der Regelungstechnik im Allgemeinen, auch die hier benutzte Regelungsmethode realisierbar geworden.

3 Zum Regler selbst

3.1 Die grundsätzliche Funktionsweise

Der im Gegensatz zu etablierten technischen Reglern andersartige Minimale Zustandsregler bedarf lediglich zwei Einstellwerte, um sich auf einen ganzen Regelstreckenbereich selbsttätig einzustellen. Seine Funktionsweise ist zudem genauer in der *originären Beschreibung*, nämlich der Konzeptübersicht im Kapitel 1 unter Abschnitt 1.1 nachzulesen.

Das im Kern doch überraschend einfache Arbeitsprinzip des Reglers bewirkt die selbsttätige, sukzessiv approximative Anpassung an verschiedene Regelstrecken in Echtzeit, ohne Vorabmodellierung des Regelverhaltens, selbst bei relativ schnellen Prozessen. Dies wird erreicht durch nur eine einzige, standardisierte mathematische Funktion mit eindeutiger Nullstelle. *Die Funktion beschreibt einerseits den Regeldifferenzverlauf mithilfe eines Parameters und stabilisiert diesen zugleich mit seinem Mittelwert durch Synchronisation. Der mittelwertige Verlauf fungiert dabei als eigentliche Führungsfunktion, während nun der aktuelle Regeldifferenzverlauf ein beständiges Echtzeitkorrektiv bildet.* Es ist immer gleich ein ganzer Regelstreckenbereich festgelegt und seine zwei Parameter definieren jeweils den Beginn desselben. Jeder Bereich umfasst eine potentielle Folge von Regelstrecken mit kontinuierlich steigender Verzugszeit. Was die stark vereinfachte Konzeption adaptiver, nämlich sich an verändernde Regelstrecken anpassende, Regler erlaubt.

Der Minimale Zustandsregler passt somit seine Führungsfunktion über das Antwortverhalten der Regelstrecke an, unter Heranziehung der Regeldifferenz. (Weil eben die Regeldifferenz wegen des Nullbezugs, geeigneter ist als die unmittelbare Regelgröße.) Dies geschieht zwar relativ schnell aber in kleineren Stufen, um eine gute Anpassung zu erzielen. *Der Regler gibt den Abbau der Regeldifferenz, nach Maßgabe der dem Regelstreckenverzug angepassten Führungsfunktion, Schritt für Schritt mit einem internen Regeltakt vor und passt zugleich die Führungsfunktion (genauer ihren prägenden Parameter) erneut der Regelstrecke an. Die Einhaltung dieser Vorgabe ist durch die Synchronisation des Verlaufs der Regeldifferenz mit dem Graph der Führungsfunktion, gewährleistet.* Und zwar zweidimensional hinsichtlich Regelstreckenverzug auf der Zeitebene, neben der Vorgabe der Annäherung zur Führungsgröße. *Letztlich besteht der tatsächliche Regelungsvorgang aus der abverlangten Synchronisation des Verlaufs der Regeldifferenz mit dem Graph der dynamisch angepassten, standardisierten Führungsfunktion.* Anstatt sich auf einzelne vorgegebene Regelstreckenspezifikationen und deren gesonderte ausweisende Absicherung zu stützen. Womit einer der Hauptpfeiler der etablierten Regelungstechnik entfällt. Die Stellgröße wirkt indessen auf die

Regelstrecke ein, bis die iterative Reglervorgabe erfüllt ist. Würde sich beim Temperaturbeispiel im Abschnitt 2.1 die Regelgröße (Temperatur) nicht adäquat ändern, dann würde der Regler den Stellwert (Heizleistung), dem *Regelstreckenverzug angepasst* solange bei positiver Regeldifferenz erhöhen oder bei negativer Regeldifferenz senken, bis die Regelgröße geeignet reagiert oder aber der maximale bzw. minimale Stellwert erreicht ist. Dieses Spezifikum der Stellgröße ist charakteristisch für die adaptive Auslegung des Reglers.

Was passiert nun im Regler genauer?

Jede Regelstrecke reagiert verschieden auf Änderungen der Stellgröße. Das begründet die mehr oder weniger aufwändigen, speziellen Maßnahmen für die einzelnen Regelstrecken. Eine hervortretende Eigenschaft der Regelstrecke ist ihr Zeitverzug, sowohl vor- als auch nachlaufend. Ist er gering, tut man sich leichter. Aber gerade bei Industrieanwendungen trifft das oft nicht zu. Erstaunlicherweise lassen sich die Anforderungen an die Entwurfsarbeit doch mehr reduzieren, als es ein praktizierter Anspruch vorgibt. So werden mit diesem Regler sogar Beeinflussungen durch prozessrelevante Störgrößen oder Regelstreckenkopplung, bauartbedingt kompensiert und müssen nicht vordringlich zu dauerhaften Regelabweichungen führen. Dazu rückt ebenso dieser Zeitverzug in den Vordergrund: Von einem parametrisch festgelegten geringsten Streckenverzug am Rande einer Folge von Regelstrecken zunehmenden Verzugs ausgehend, ergibt sich mit kontinuierlich ansteigenden Verzugsseigenschaften ein Regelstreckenbereich, dessen Parameter nicht weiter bestimmt werden müssen. Man kann es auch so sehen, dass nur die Parameter für die erste Regelstrecke, das ist diejenige mit dem geringsten Verzug, festzulegen sind. Regelstrecken, die in dem doch breiten Folgeverzugsbereich liegen, werden von einem dieses Regelungsprinzip nutzenden Regler adaptiv, sprich selbstanpassend, ohne weitere Spezifizierung abgedeckt.

Hierzu ist die die Regeldifferenz zurückführende und die Stellgröße steuernde mathematische Festlegung, anstatt an die Eigenart jeder Regelstrecke gebunden zu sein, als standardisierte sogenannte Führungsfunktion für alle Regelstrecken fest vorgegeben, in der trivialen Grundform $a \cdot t^n$ (aufgeteilt in zwei – in der *originären Beschreibung* näher erläuterte – Abschnitte mit $n=2$ und $n=4$). Diese Führungsfunktion weist eine eindeutig nutzbare reelle Nullstelle auf und ihr **steigungsprägender** Parameter a ist ein Maß für den **Regelstreckenverzug**. Der Parameter a ist aus praktikablen Gründen umgeformt und soll hier als Hilfsparameter a_h bezeichnet sein². Je größer a_h , desto steiler der Funktionsverlauf. Seine Steigung bestimmt, wie schnell jeder Regeltaktabschnitt durchlaufen und demzufolge die Nullstelle erreicht wird. Zur Stabilisierung wird die korrektive Zurückführung der Regeldifferenz gegen null, durch die Synchronisation ihres Verlaufs mit dem Graphen der Führungsfunktion abgesichert. Dafür wird mit jedem Regeltakt, aus den zwei jeweils letzten Regeldifferenzwerten, der bereits genannte Hilfsparameter a_h neu berechnet. Die Synchronisation geschieht durch Vergleich des Hilfsparameters a_h mit seinem

²Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es sich dabei um den Wurzelwert aus a handelt, dem sogenannten Steigungsindikator $\sqrt{a}$ in der *originären Beschreibung*.

Mittelwert a_m , auf dessen Betrag sich jetzt die Führungsfunktion stützt, weil er eindeutiger und stabiler ist als der Einzelwert a_h selbst. Dessen Ungenauigkeit kompensiert sich über die Vergleichsperioden hinweg.

Je nachdem, ob der aktuelle Hilfsparameter a_h den Parameter a_m der Führungsfunktion über- oder unterschreitet, geschieht eine schrittweise kleine Senkung oder Erhöhung der Stellgröße. Denn die Parameter a_m und a_h beschreiben den Steigungsgesamtverlauf mit verschiedener Aktualität und Genauigkeit. Während sich der Hilfswert a_h einerseits durch die Synchronisation an seinem Mittelwert a_m orientiert, wirkt er andererseits mit seiner Berücksichtigung im Mittelwert wieder darauf zurück. Für den nächsten Vergleich wird deshalb zur Nachführung, der jeweils neue Mittelwert a_m unter Einschluss des Hilfsparameters a_h neu berechnet. Das schafft Stabilität für den Regler bei gleichzeitiger Flexibilität. Was die unverzügliche Steilheitsanpassung des Graphen der Führungsfunktion und damit die Angleichung an den Regelstreckenverzug bedeutet, eben durch die Rückwirkung der Regelstrecke.

Die Regelung geschieht also durch die Stellgrößen bedingte Erzwingung der Übereinstimmung des Regeltakt aktuellen Verlaufs der Regeldifferenz mit dem ebenso gekrümmten, immer zu null führenden Graphen der Führungsfunktion, der sich an den Regelstreckenverzug mit jedem Vergleichsschritt anpasst. Deshalb bedient der Regler auch Regelstrecken, die sich während des laufenden Betriebs ändern. Die Zurückführung der Regeldifferenz selbst verläuft zusammen mit der Verzugsanpassung. Man kann sagen, die Führungsfunktion bildet Stück für Stück die der Regelstrecke angegliche Regeldifferenz ab. Eine besondere Parametervorgabe ist nur nötig, für die am Rand des Regelstreckebereichs gelegene Regelstrecke geringsten Verzugs. Diese Randregelstrecke weist zwei zugrunde liegende Größen auf. Es sind das der Anfangswert und zugleich größter Betrag des Parameters a_h und ein ihm zugeordneter Zeitschritt, der als fester Grundtakt dient und der sich zur Verzugsanpassung, reglerintern zeitgleich mit dem Parameter a_h ganzzahlig multiplikativ ändert. Die zwei Einstell-Parameter können vorher aus der am Bereichsrand liegenden Regelstrecke konventionell (mithilfe der sogenannten Sprungantwort) gewonnen werden und das Produkt der beiden Parameter hat ebenso für den Regler eine verhaltensweisende Bedeutung. Auch ist mit den Parametern festgelegt, ob der Regler ausgehend von Sekundenbruchteilen oder viel größeren Zeitbereichen genutzt werden soll, was freilich auch von seinen Bauteilen abhängt. Daneben gibt es zwar weitere festlegende Größen in Form von Konstanten der Software, die jedoch aus dem Gerüst der Vorgehensweise selbst resultieren und weniger aus den Regelstrecken. Es sei noch erwähnt, dass sich die Zeit t der Grundform der Führungsfunktion selbstverständlich nicht statisch auf den Nullursprung der Zeitabszisse bezieht, sondern umgeformt mithilfe des erwähnten festen Grundtakts, in den multiplikativ erweiterten internen Regeltakt $td = \Delta t$ eingeht³.

Die konzeptionelle Auswahl der zwei Einstell-Parameter kann viel allgemeiner als sonst, in einem Zug mit ganzen Regelstreckenbereichen erfolgen, wenn nicht schon Voreinstellungen sofort zu verwenden sind. Denn ab einer eingestellten Regelstrecke gilt gleichzeitig

³Er ist in der *originären Beschreibung* als Rahmenabtastrung td bezeichnet.

ein weiter Bereich nachfolgender, kontinuierlich trägerer Regelstrecken als mit eingestellt. Es lassen sich verzögerungsarme Strecken und Speicherstrecken, sowohl ohne als auch mit Ausgleich, in linearer und nichtlinearer Ausformung sowie zeitinvariante und zeitvariante Prozesse handhaben. Davon abgesehen sind Positionsregelungen möglich, insbesondere wenn beim Erreichen der Führungsgröße, der Regler aus- und eine Laufblockierung eingeschaltet wird. Die selbsttätige Anpassung an Regelstrecken ohne besondere Vorgaben impliziert eine prädiktive (vorgreifend einstellende) Eigenschaft. Der Algorithmus bewirkt außerdem einen günstigeren Verlauf der Regelgröße, was ihr dynamisches Verhalten, ihre Steilheit und Überschwingweite betrifft. Dies geschieht Regelstrecken übergreifend, sodass man von einem robusten Regler sprechen kann. Summarisch ist der Entwicklungsaufwand erheblich reduziert, weil die Regelstrecke weniger im Blickpunkt stehen muss. Dafür rückt die Ausstattung des Stellglieds, abhängig von der Anwendung, wegen in der Regel höherer Beanspruchung mehr in den Fokus.

Für den Einsatz des programmgesteuerten Reglers reicht insofern eine Schätzung der beiden Einstell-Parameter aus, als dann die Anwendung innerhalb des vorgabelosen, selbstanpassenden Regelstreckenbereichs zu liegen kommt. Die Regelstrecken übergreifende Adaption erleichtert wiederum die Automatisierung der Handhabung von Regelstrecken. Das gemeinsame mit dem herkömmlichen Zustandsregler ist lediglich die Orientierung am Prozesszustand, allerdings mit unterschiedlichem Umgang.

3.2 Ein kurzer Vergleich mit dem gängigen PID-Regler

Man findet z. B. in Bügeleisen oder Elektroherden einfache Zweipunktregler vor, die Heizdrähte ein- und ausschaltend und in etwa die eingestellten Temperaturen haltend. Das ist bei der entsprechenden Anwendung zweckmäßig und muss nicht allzu genau sein. Anders ist das mit dem PID- bzw. in Abwandlungen PI- und PD-Regler. In diesem Zusammenhang muss man nicht im Besonderen auf die für diesen Regler typischen Funktionen genauer eingehen um darzulegen, wo die Unterschiede zum Minimalen Zustandsregler liegen. Es reicht, sich die benutzten Parameter anzuschauen. Generell ist für jeden Regeltakt die Stellgröße aus der aktuellen Regeldifferenz e_0 und ihren Vorgängern e_1 und (noch eine zurück) e_2 gewonnen. Des Weiteren ist sie aus den PID-Konstanten K , T_0 , T_I und T_D ermittelt, die von der Eigenschaft der gewählten Regelstrecke abhängen und angepasst werden müssen. So stehen der Parameter K für die Verstärkung und den P-Anteil, T_I für die Größe des I-Anteils sowie T_D für den D-Anteil (falls vorhanden) und T_0 für den Regeltakt. Das ist die Abtastung bei digitaler Ausführung. Der beim PID-Regler einer bestimmten Regelstrecke eigenen, statischen vierparametrischen PID-Vorgabesteuerung inklusive Regeltakt, steht mit dem Minimalen Zustandsregler eine iterative und zweiparametrische Anpassung gegenüber, ausgehend von der Regelstrecke mit dem geringsten Verzug. Ohne weitere Voreinstellungen, eben beim adaptiven Streckenbereich mit den ansteigend längeren Verzugszeiten. Der Regler verwendet lediglich die Regeldifferenzen e_0 und e_1 , ohne e_2 .

Der Anlauf der Nullstelle, die den Sollwert wegen der vorangehenden Subtraktion darstellt, lässt sich demgemäß abhängig vom Aufbau einer Regelung, ganz verschieden abbilden. Denn bekanntlich ist jede algorithmische Formulierung von Naturvorgängen lediglich eine Modellierung derselben, aber nicht die Wesensart des natürlichen Ablaufs selbst.

Der PID-Regler ist in seiner Grundform auf eine seinen Parametern gemäße, festgelegte Regelstrecke eingestellt. Der Minimale Zustandsregler nutzt hingegen zwei Einstellwerte und handhabt davon ausgehend, ein breiteres Spektrum weiterer Regelstrecken, nur vom Regelprozess selbst gelenkt. Weshalb sich auch ganze Führungsgrößenprofile vorgeben lassen. Zwar arbeitet der Regler mit einem längeren Programmcode, aber auch mit kürzerer Anstiegszeit⁴ bei zugleich geringerer Überschwingweite. Dagegen rücken wie schon erwähnt, die Anforderungen an das Stellglied mehr in den Vordergrund. Abgesehen davon eröffnen sich Einsatzmöglichkeiten für Anwendungen, die kostenbedingt von z. B. modellbasierten prädiktiven Regelungen gewöhnlich ausgeschlossen sind. Das bedeutet die vorausschauende Anpassung an Regelstrecken- bzw. Störgrößenänderungen. Die sich nun ohne Prädiktionsmodell, kurzerhand infolge Selbstanpassung, weitgehend kompensieren lassen.

3.3 Die Stufung der Stellgröße

Das bereits erwähnte **Stellglied** ist die Stalleinrichtung (auch als Aktor bezeichnet), die schließlich die Stellgröße an der Regelstrecke wirksam werden lässt. Im Beispiel ist das, wie oben im Abschnitt 2.1 angeführt, der elektrische Heizkörper mit leistungselektronisch realisiertem Aktor. Die vielstufige, quasikontinuierliche und sukzessiv approximative Stellgliedansteuerung erlaubt eine gute Auflösung der Stellgröße. Was andererseits für das Stellglied eine durchgängig fehlende Ruhelage bedeutet. Standardmäßig sind über den gesamten Stellwert regulär 1000 Schritte bzw. Stufungen vorgesehen. Bei Speicherstrecken wäre die Nullabsenkung und dazu zur vereinfachten Stellwertausgabe oder in Sonderfällen (wie z. B. bei Magnetregelstrecken), der Zweipunkt-Schaltbetrieb für das Stellglied zu überlegen. Beide Verfahrensweisen werden unten in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 kurz erläutert. Auf den Zweipunkt-Schaltbetrieb ist in der *originären Beschreibung* im Abschnitt 3.1 bei den einzelnen Bearbeitungsschritten des Musterprogramms im Schritt 5 auf Seite 97 hingewiesen. Der durch die Stufung unterteilte, numerisch festgelegte Ausgabebetrag zur Stellgröße, ist für die Abstimmung mit der Regelstrecke zu gewichten, wie auch unten im Abschnitt 4.2.1 angemerkt. Es sei noch auf die im Kapitel 2 der *originären Beschreibung* unter Abschnitt 2.2 angeführte Musteranwendung verwiesen.

3.3.1 Warum die Vielstufigkeit der Stellgröße?

Die Verzugsanpassung des Reglers an die Regelstrecke ergibt sich aus dem vergangenen Steigungsverlauf der Regelabweichung bzw. der Regeldifferenz. Der Steigungsverlauf ver-

⁴In der *originären Beschreibung* ist der Begriff Anregelzeit vorgezogen, da die Regelgröße im Allgemeinen steiler verläuft und ein Vergleich mit herkömmlichen Anstiegszeiten, infolge geringerer Krümmung, weniger aussagt.

mittelt hingegen nicht eindeutig seine ursächliche Stellgröße. Lediglich mithilfe der Synchronisation des Steigungsverlaufs mit dem Graph der Führungsfunktion, lässt sich der nötige Stellgrößenzuwachs und folglich seine Summierung iterativ gewinnen. Das geschieht über die sukzessiv approximative Stellgrößenanpassung, mithilfe komparativer Prüfung des vergangenen Verlaufs der Regeldifferenz mit ihrem aktuellen Verlauf (den vergangenen Verlauf repräsentiert der der Regelstrecke angepasste Mittelwert a_m nach Seite 8). Dieser Vorgang bildet die eigentliche Regelung. Deshalb muss der Stellgrößenzuwachs für die Stellgrößenanpassung klein genug sein, um nicht mit zu großen Stellschritten die Synchronisation zu erschweren. Ebenso erlaubt eine gute Auflösung des Stellwerts und die damit verbundene Vielzahl der das Stellglied ansteuernden Stellschritte, einen breiteren adaptiven Regelbereich mit verschiedensten Führungsgrößen. Der klein gestufte Stellwert erbringt so gut wie einen stetigen Verlauf. Ganz allgemein stellt sich bei allen Regelungen die Aufgabe, die ausgegebene Stellgröße konkret mit dem Stellglied umzusetzen.

Die geforderte Stufungsanzahl der Stellgröße ist bei nichtlinearen Regelstrecken, bei denen sich die Regelgrößenbewegung unverhältnismäßig stark ändert (z. B. bei Magnetregelstrecken), kleiner als bei linearen Regelstrecken und es wird fallweise eine Zweipunktansteuerung des Stellglieds (nur zwei Schaltstellungen: null und Hochpegel) in Betracht zu ziehen sein.

Für die Ansteuerung der Stellgröße ist zusätzlich die nur für Speicherstrecken geeignete, gesonderte Nullabsenkung des Stellwerts vorhanden. Ist sie im Musterprogramm der *originären Reglerbeschreibung* aktiviert (Konstante $nullab = 1$), so wird bei jeder Stufenrücknahme (Abwärtszählung des Stellwerts) der Stellwert null ausgegeben, während im Hintergrund der sich verkleinernde Zählerstand des Stellwerts erhalten bleibt. Bei Stellwerterhöhung ist wieder der reguläre Zählerstand wirksam. Damit wird für Sonderanwendungen ein schnellerer Abbau der bei einer Speicherstrecke wirksamen Stellenergie erreicht und dennoch die verzögerte Nachwirkung der Speicherelemente der Regelstrecke, zur Aufrechterhaltung eines kontinuierlichen Regelgrößenverlaufs genutzt.

3.3.2 Zweipunktregler und Zweipunkt-Schaltbetriebsart

Ein unstetig arbeitender Zweipunktregler kennt nur die zwei Zustände „ein“ und „aus“ der Stellgröße, was das Stellglied vereinfacht. Gemeinhin weist ein Zweipunktregler eine Hysterese auf, indem der Einschaltpunkt zum Ausschaltpunkt verschoben ist. In unserem Temperaturbeispiel im Abschnitt 2.1 könnte der Zweipunktregler, einfach um Zahlen zu nennen, bei 71 Grad aus- und bei 69 Grad wieder einschalten. In seiner Grundform wird mit definierten Schaltepunkten, die Anpassung an eine Speicherstrecke und somit an deren Schalt- und Regelgenauigkeit erreicht. Dabei ist bei Speicherstrecken mit Ausgleich, die Hysterese-Anpassung (entspricht einer Schaltfrequenzänderung) von der Führungsgröße, der Umgebungstemperatur und sonstigen Eigenheiten der Regelstrecke abhängig. Zusammenfassend beschreibt die Hysterese die Ein-Aus-Schaltperioden und ein Zweipunktregler ist gewöhnlich mithilfe der Schaltperioden und der Stellgröße einstellbar.

Die dazu *unterschiedliche* Zweipunkt-Schaltbetriebsart dieses Reglers unterscheidet sich infolge ihrer permanent komparativen Arbeitsweise, von der Grundform des herkömmlichen Zweipunktreglers und entspricht in der Wirkung eher dessen aufwändigeren quasi-stetigen Abwandlungen. Die Dauerbeanspruchung des Stellglieds bleibt zugunsten der Regelgenauigkeit, nach wie vor bestehen. Bei jedem Regeltakt wird der tatsächliche Verlauf der Regelabweichung, faktisch mit dem Graphen der Führungsfunktion verglichen, wodurch die Zeitintervalle vom selbsttätig Zeit angepassten Regeltakt abhängen. Dessen ungeachtet kann über mehrere Regeltakte hinweg, der Stellwert null sein. Bereits während der Anstiegszeit ist die Schaltbetriebs typische Stellwertabsenkung wirksam. Eine Hysterese-Anpassung muss beim Zweipunkt-Schaltbetrieb nicht vorgenommen werden. Denn die Anpassung der Führungsfunktion des Reglers an die Regelstrecke, ist weiterhin aktiv.

Wie bereits angemerkt, ist der Einsatz des Zweipunkt-Schaltbetriebs nur bei Speicherstrecken angebracht, da dort während der Absenkung auf den Stellwert null, infolge der Speicherelemente der Regelstrecke, die Regelgröße nicht so leicht kurzzeitig absinkt. Je kleiner die Speicherwirkung der Regelstrecke ist, desto eher sinkt die Regelgröße innerhalb eines Regeltakts ab. Deshalb können verzögerungsarme Regelstrecken im Zweipunkt-Schaltbetrieb bei gleichwertigem Grundtakt, den Pegel der Regelgröße nicht konstant halten. Dies ließe sich oft durch Beschleunigung der Schaltvorgänge (Erhöhung der Schaltfrequenz durch Minderung der Grundtaktzeit) kompensieren, soweit Anteile von Speicherwirkung vorhanden sind. Dennoch ist immer die Sinnhaftigkeit im Hinblick auf die technische Lösung einer Aufgabenstellung zu hinterfragen.

Verdeutlichung: In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die Benennung und Unterscheidung von verzögerungsarmen Strecken und Speicherstrecken noch aus der vordigitalen Zeit stammt. Die Bezeichnungen dienen in Verbindung mit dem Minimalen Zustandsregler dazu, überhaupt ein griffiges Unterscheidungsmerkmal für die Ansteuerung des Stellwerts zu haben. Oben im Abschnitt 2.3 zur Typisierung ist die Reaktionszeit bei verzögerungsarmen Strecken dahingehend zu verstehen, dass sich diese bei digitalen Regelungen, auf eine Faustregel orientierte Abtastzeit beziehen soll. Verändert sich eine Regelgröße Regelstrecken bedingt schnell, so bedarf es kürzerer Abtastzeiten, die bei linearen Regelstrecken mehr variieren können als bei nichtlinearen mit markanten Veränderungsunterschieden der Regelgröße. Je kürzer so eine Abtastzeit innerhalb ihres Variationsspielraums ausfällt, desto mehr kommt die Rückwirkung vorhandener Speichereffekte zur Geltung. Die Typisierung spielt bei linearen Regelstrecken praktisch keine Rolle, weil die Nullabsenkung des Stellwerts lediglich eine Sondermaßnahme darstellt. (Die „Abtastzeit“ des Reglers ist die sich selbst einstellende Rahmenabtastung, auf der Basis der Einstellparameter *Grundtakt* und *oberer Eckwert*.) Würde bei einer Faustregel dimensionierten Abtastung, eine spürbare Langzeitspeicherwirkung über die Abtastzeit hinaus auftreten, dann wäre die Strecke nach den üblichen Ansprüchen nicht regelbar. Beim Testen der Sprungantwort wird ein gesuchter Verzugszeitanteil nur unter konstanter Stellwert*einwirkung* sichtbar und nicht unter Stellwertrücknahme.

3.4 Was besonders zu beachten ist

Für jede Regelung sollte eine einwandfreie Erfassung der Messgrößen wie die der Regelgröße gelten. Der Vergleich der Verläufe der Regeldifferenz erfordert eine gute Messwertauflösung. Denn es ist zu bedenken, dass der Regler im Gegensatz zu dedizierten Regelstrecken, die anliegende Regelstrecke vorab nicht kennt. Er gewinnt aus der Regelantwort erst bei jedem Regeltakt, sein „Wissen“ zur Gestaltung der unmittelbar anfallenden Stellgröße.

Im Übrigen stellt sich die Frage, ob ein Prozess überhaupt gut zu regeln ist. Wäre die Forderung, die Regelung einer Regelstrecke schneller nachzuführen als die Regelstrecke aufgrund ihrer Verzögerung selbst zu reagieren im Stande ist, dann kann das nicht klappen. Mit der Annäherung an so eine Verzögerungsgrenze steigt die Schwierigkeit zu regeln.

4 Anmerkungen zur Reglereinstellung

In diesem Abschnitt sind begleitende Handhabungen für den Reglerbetrieb erläutert und es wird auf die entsprechenden Stellen der *originären Reglerbeschreibung* hingewiesen. Sie beziehen sich auch auf das dort in Abschnitt 3.2 angegebene Musterprogramm. Wozu auch dessen Konstanten- und Variablenbenennungen vereinzelt angeführt sind.

4.1 Die zwei Einstellparameter des Reglers

Allgemeine Hinweise zur Einstellung des Reglers sind in der *originären Beschreibung* unter Kapitel 1 im Abschnitt 1.10 zu finden, insbesondere beginnend mit Unterabschnitt 1.10.1. Dafür sind die zwei Einstellwerte „Grundtakt“ und „oberer Eckwert“ vorgesehen:

1. Der *Grundtakt* (eigentlich Grundtaktzeit) ist die verwendete Abtastung, die sogenannte **Abtastzeit**. Denn im Gegensatz zur analogen Technik, wo sich alles in den Bauteilen gleichzeitig abspielt, wird die Reglersoftware des digitalen Reglers schrittweise immer von Neuem durchlaufen. Innerhalb dieser Abtastzeit muss die verwendete Recheneinheit einen kompletten Durchlauf der Software, inklusive Messwertauflösung, bewerkstelligen können. Die Benennung von Abtastzeit und Grundtakt ist unterschiedlich, obwohl beide im Betrag gleichwertig sind. Denn mit der (äußeren) Abtastzeit errechnet sich aus dem Grundtakt als kleinster interner Regeltakt, der vom Regler selbst intern dynamisch generierte Regeltakt, die sogenannte Rahmenabtastung. Sie beträgt jeweils von „1“ beginnend, ein ganzes Vielfaches des Grundtakts und um sie muss sich der Anwender nicht kümmern. Wichtig für den Anwender zur Einstellung eines Regelstreckenbereichs, ist der der Abtastzeit entsprechende Grundtakt. Zur hier nicht weiter erläuterten Bestimmung der Abtastzeit mithilfe der Sprungantwort gibt es Faustregeln, die von den herkömmlichen digitalen Regelungen übernommen werden können. Im Zweifelsfall kann die Abtastzeit etwas kleiner ausfallen, als bei Faustregeln empfohlen. Der vorliegende Regler weist eine Grundeinstellung auf, die für viele Anwendungen ausreicht, aber auch unkompliziert zu ändern ist.

2. Der *obere Eckwert* ist das Maß des größten Anstiegs der Regelgröße (genauer der größten Steigung der Regelabweichung bzw. Regeldifferenz) und fungiert als Anfangswert des oben unter Abschnitt 3.1 auf Seite 8 angeführten Hilfsparameters a_h . Der obere Eckwert sollte von den Betriebsdaten nicht überschritten werden, da sonst keine Regleradaption erfolgen kann. Er ist das Maß für den Beginn eines Einstellbereichs für die Steigung der Regelgröße beim angegebenen Grundtakt nach Punkt 1, dem er zugeordnet ist. Der *obere Eckwert* stellt sich als Wurzelwert dar, was aber den Anwender insofern nicht interessiert, da dieser den Betrag dafür einfach numerisch einträgt (oder gleich die Voreinstellung verwendet). Er kann aus der maximal geforderten Steigung der Regelgröße leicht berechnet werden (siehe Formel (1.52) der *originären Beschreibung*). Es ist immer ein ganzer Regelstreckenbereich abgedeckt und die eingestellte Regelstrecke steht beim *oberen Eckwert* zusammen mit dem Grundtakt, an der Spitze bzw. am äußeren Rand aller nachfolgenden Regelstrecken des Bereichs, als diejenige mit der geringsten Verzögerung. Der *obere Eckwert* sollte immer größer/gleich (besser nur größer) als die maximal auftretende Regelgrößensteigung sein (ausgedrückt als besagter Wurzelwert). Diese Steigung kann über die nicht normierte Sprungantwortfunktion – nämlich so wie sie unmittelbar vorliegt – ermittelt werden, indem der geplante Stellwert ohne Regelung eingeschaltet, d. h. nur das Stellglied voll aktiviert und die Regelgröße eine Weile beobachtet wird. Der Winkel ihres steilsten Verlaufs ist nun zu messen (bitte Maßstab bzw. Zeitebene des Grundtakts beachten, meistens Sekunden). Beim obigen Beispiel hieße das, den Temperaturanstieg maximal bis vor die Führungsgröße von hier 70 Grad zu verfolgen. Dazu lässt sich feststellen, dass der Anstieg flach beginnt, je nach benutzten Stell- und Sollwerten schließlich steiler ansteigt und dann vor allem langsam wieder flacher verläuft. Denn es handelt sich um eine Speicherstrecke mit Ausgleich.

Bei der Software selbst sollten die anderen Programmkonstanten zuerst einmal belassen werden. Es sei denn, es liegen Sonderfälle vor, für die vereinzelte Konstanten und Programmteile vorgesehen sind. Als Beispiel bewirkt die Senkung des Startfaktors (Konstante y_{hstr}) eine längere Anstiegszeit der Regelgröße, weil die Startanregung der Stellgröße gemindert ist. Wollte man von der Grundeinstellung der Startanregung abweichen, so könnte man sie allenfalls bei trägeren Speicherstrecken verkleinern mit dem Effekt kleinerer Überschwingweite und bei den schnelleren verzögerungsarmen Regelstrecken noch erhöhen.

Für Magnetregelstrecken ist die Zweipunktsteuerung des Stellglieds insofern zu überlegen, als in der Regel bei einer somit sehr geringen, dem Grundtakt entsprechenden Abtastzeit, bereits eine einzige Stufung für genügend Bewegung im Magnetfeld ausreichen kann. Man könnte zwar die 1000er Stufung belassen, aber dann wird wohl auf Dauer bei passender Gewichtung, nur eine einzige Stufe (oder wenige) genutzt werden. Um einen klaren Bezug zur Maximalstufung herzustellen, könnte man der Einfachheit halber gleich den Zweipunkt-Schaltbetrieb wählen. Wäre die im Abschnitt 4.2 angeführte

Magnetregelstrecke (Grundtakt etwa 0,001 Sekunden) mit einer noch schnelleren Recheneinheit auslegbar, so ließe sich der Grundtakt weiterhin senken und mit ihm der Regelgrößenfortschritt. Deshalb könnte evtl. die Stellgröße wieder vielstufig, mit potentiell größerer Adaptionodynamik betrieben werden. Die Auslegung bleibt letztlich der Konzeption des Entwicklers überlassen.

Eine signifikante Bedeutung hat das dem Regler eigene **Arbeitsprodukt**, als Produkt aus *Grundtakt* und *oberem Eckwert*. Sind nämlich beide Größen ermittelt bzw. bekannt, dann können deren Werte infolge der Reglereigenschaften, ohne große Auswirkung verändert werden, wenn nur ihr Arbeitsprodukt gleich bleibt. Ausnahmen bilden diejenigen Fälle wo offensichtlich ist, dass technische Gründe dagegen sprechen, wie z. B. grobe Verletzungen der Abtastregeln digitaler Systeme durch überhöhte Abtastzeiten.

Im Musterprogramm sind **Grundtakt** und **Arbeitsprodukt** als Voreinstellung eingetragen, womit das notierte Arbeitsprodukt als funktionelle Größe bei Angabe des Grundtakts, mit dessen Vorgabe als Konstante den oberen Eckwert rechnerisch angleicht.

4.2 Die Einstellung des Reglers im Besonderen

Von Vorteil sind Grundkenntnisse der Programmiersprache C. Trotzdem reichen auch Kenntnisse anderer, vorzugsweise für technische Zwecke geeignete Programmiersprachen aus, soweit man die Systematik der Programmierung verinnerlicht hat.

Der Einsatz einer Regelung hängt naturgemäß von der Regelstrecke ab, nämlich was, wie geregelt werden soll. Was die Hardware angeht, sind für den breiten Einsatz die analogen Bausteine des PID-Reglers am kostengünstigsten. Die Einstellung der P-I-D-Parameter verdient dann besondere Beachtung und bezüglich des Einstellaufwands, werden die Einstellparameter mehr im Vordergrund stehen. Wenn es allein darum geht, den vorliegenden Algorithmus auszuprobieren, wird man anwendungsbezogen mehr der Ausführung des Aktors Aufmerksamkeit schenken.

So wäre, die Magnetregelstrecke betreffend, eine schwebende Stahlkugel auch mit einem PID-Regler zu realisieren. Dabei ist der Umgang bei gleichwertigen baulichen Voraussetzungen diffiziler, als mit dem vorliegenden Algorithmus. Die Probleme begännen da, wo sich ein PID-Regler einer sich verändernden Regelstrecke anpassen sollte. Grundsätzlich wird man bei der Verwendung des hier vorliegenden Algorithmus zuerst schauen, ob überhaupt der Sonderfall einer von der Linearität stark abweichenden Regelstrecke vorliegt. Bei nicht markanten Abweichungen von der Linearität, wird man eine Regelstrecke einfach als linear betrachten. Selbst bei Regelstrecken, die üblicherweise schon als nichtlinear gelten würden. Eine sicher als nichtlinear zu behandelnde Regelstrecke ist die angeführte Magnetregelstrecke. Bei ihr sollte der Grundtakt möglichst klein sein, was bei knapp ausgefallenem Grundtakt die unterstützende Nullabsenkung bei Speicherstrecken empfiehlt. Und wo eventuell die Verwendung des zur Magnetregelstrecke erwähnten Zweipunkt-Schaltbetriebs angebracht wäre, schon aus Überlegungen der Vereinfachung.

Die Frage nach dem Vorliegen von verzögerungsarmen Strecken oder Speicherstrecken,

tritt bei diesem Regler mehr in den Hintergrund, wenn Speicherstrecken nicht durch Besonderheiten auffallen. Denn allein auf die Regelbarkeit bezogen, lässt sich hier die Unterscheidung meistens ignorieren. Die Abgrenzung von zeitvarianten und zeitinvarianten Regelstrecken ist gewöhnlich nicht nötig, wegen der selbsttätigen Anpassung der internen Rahmenabtastung. Auch der professionelle Entwickler wird für seinen einer Regelstrecke zugeordneten traditionellen Entwurf, Abschätzungen zu seinem Konzept vornehmen, aber es zudem mit einer Simulation des Regelkreises, in seinem Entwurfs- und Modellierungssystem austesten, schon weil es herkömmliche Regler im Ansatz nahe legen.

Will man den Regler für Regelstrecken im gängigeren Abtastzeitbereich von einigen Sekunden bis in den unteren Minutenbereich einsetzen, dann kann man es mit der Grundeinstellung versuchen. Die Eingangsgrößen w_i (Sollwert) und x_i (Regelgröße, als der jeweils gemessene Istwert) des Musterprogramms im Abschnitt 3.2 der *originären Beschreibung*, müssen zu jedem Grundtaktzyklus zum Abruf zur Verfügung stehen. Der Reglerausgang ist der numerische Wert y_i für das Stellglied, das als einwirkende Verbindung zur Regelstrecke fungiert. Das Stellglied erbringt eine vom Regler vorgegebene Heizleistung über einen elektrischen Heizkörper. Nach dem Musterprogramm ist er mit einem leistungselektronischen Schalter angesteuert.

Die maximale gewünschte Heizleistung ist festzulegen und sie bezieht sich auf die Konstante y_{max} . Anschließend wird man zur gewünschten fest eingestellten Führungsgröße, die Gewichtung nach Abschnitt 4.2.1 unten so bemessen, dass bei erreichtem Sollwert etwa 50% bis 60% der maximal möglichen Heizleistung anliegt. Das heißt, dass bei $y_{max} = 1000$ die Stellwertvariable y_i beim Sollwert den Betrag von etwa 500 bis 600 annimmt. Bei variabler Führungsgröße könnte man für einen mittleren Sollwert, auch einen mittleren Stellwert gewichtend einsetzen. Das Stellglied selbst ist zwar aus funktionaler Sicht ein Bestandteil des Regelkreises, aber damit ist die ***technische Ausführung des Aktors als Schnittstelle zur Regelstrecke nicht festgelegt***. Denn das abstrakte Regelungsprinzip, veranschaulicht im obigen Beispiel Abschnitt 2.1 einer thermischen Regelstrecke, gilt ganz allgemein. Es bleibt dem Entwickler vorbehalten, wie er die Einwirkung auf seine ausgewählte, konkrete Regelstrecke realisiert und in diesem Falle den skalierten Reglerausgang y_i beim Stellglied umsetzt. Im Übrigen sind die verschiedenen Konstanten beim Musterprogramm am Zeilenende kommentiert.

Erst wenn die Einstellwerte *Grundtakt* und *oberer Eckwert* (die zwei Faktoren des Arbeitsprodukts) nach dem ersten Versuch wirklich nicht passen sollten, können über die Bestimmung der Abtastzeit und/oder der maximalen Steigung der Regelgröße, z. B. aufgrund der Abtastzeitabschätzung und/oder der Sprungantwortfunktion (siehe Abschnitt 4.1 bei Punkt 2 dieser Anleitung), die Einstellwerte neu gewählt werden. Sie gelten dann ab der eingestellten Regelstrecke, für alle vom maximalen oberen Eckwert abnehmenden, weiteren hypothetischen Eckwerten einer Reihe von nachfolgenden trägeren Regelstrecken. Den abfallenden hypothetischen Eckwerten ordnet der Regler intern eine als Rahmenabtastung bezeichnete höhere Abtastzeit zu, in Form einer mit dem Grundtakt multiplizierten, aus dem gegenwärtigen Regelstreckenverhalten ermittelten Ganzzahl.

Zum Zweipunkt-Schaltbetrieb

Beim nach Bedarf einzustellenden Zweipunkt-Schaltbetrieb, der sich bei Speicherstrecken quasi wie ein stetiger Regler auswirkt, ist zuerst zur Nullabsenkung des Stellwerts die Konstante $nullab = 1$ zu setzen. Zur zusätzlichen Aktivierung des Zweipunkt-Schaltbetriebs, ist der Hinweis zu einer kleinen Programmzeilenmodifikation des Musterprogramms, in der *originären Beschreibung* im Abschnitt 3.1 bei den einzelnen Bearbeitungsschritten im Schritt 5, zu beachten (die Zeile $yi = \dots$ mit der Stellwertrundung, ist durch $yi = y_{max}$; auszutauschen). Dabei bleibt einzig die stufenweise Stellwertaufsummierung unwirksam und der maximale Stellwert wird dafür beim Wert ungleich null ausgegeben. Eventuell könnte mit einer Erhöhung des Grundtakts (bei gleichem Arbeitsprodukt), der bestehende Rechnerdurchsatz gemindert werden. (Zum Arbeitsprodukt gibt es hier im Abschnitt 4.1, im Besonderen auf Seite 16 einen Hinweis.)

Die Reglereinstellung im Zweipunkt-Schaltbetrieb hat wegen geringerer Stellgrößendynamik, mit einer diffizileren Festlegung des Stellgrößenbereichs zu geschehen. So wird sich im regulären Betrieb bei einer Speicherstrecke mit der bereits erreichten Führungsgröße und eingeschalteter Nullabsenkung ($nullab = 1$), am Sollwert ein bestimmter Stellwert einpendeln. Würde man alternativ diesen Stellwert als maximalen Stellwert mit der Konstante y_{max} , für den Zweipunkt-Schaltbetrieb verwenden, dann könnte die Einstellung bereits eine geringe Überschwingweite aufweisen. Bei stark nichtlinearen Speicherstrecken wie einer Magnetregelstrecke, wäre der Effekt sicherlich stärker. Man kennt freilich bei Absicht der Verwendung des Zweipunkt-Schaltbetriebs, den passenden Stellwert nicht vorab. Deshalb ist er erst durch Berechnung des Bedarfs zu ermitteln oder durch Versuch auszutariieren, um dann aus der Sprungantwortfunktion die beiden Einstellparameter des Reglers zu gewinnen (siehe oben Abschnitt 4.1). Die Abweichung vom ideal passenden Stellwert könnte im Zweifelsfall umso größer gewählt werden, je träger die Regelstrecke ausfällt, was gemeinhin mit steigender Speicherwirkung einhergeht (abgesehen von Totzeiten, innerhalb derer es keine spürbare Reaktion der Regelstrecke gibt). Indessen wäre bei Zweipunktreglern die Vorgabe eines geeigneten Stellwerts ebenso nötig, weil ihm die Hysterese-Zyklen Anpassungsgrenzen setzen. Auch im Zweipunkt-Schaltbetrieb dieses Reglers ist allein wegen der Fixierung des Stellwerts, die Anpassungsdynamik an die Regelstrecke eingeschränkt, doch die Handhabung stark vereinfacht, bei trotzdem guter Regelgenauigkeit.

Wollte man mit dem Algorithmus einen noch steileren Anstieg der Regelgröße als Sonderfall bei *fest eingestellter Führungsgröße* erreichen, so ließe sich wenn zulässig, die Grundtaktzeit verkürzen und/oder während der Anstiegszeit mit größerem Stellwert arbeiten. In letzterem Fall senkt man kurz vor dem Sollwert den erhöhten Stellwert wieder ab. Mit einer kleinen Programmänderung lässt sich dies trivial bewerkstelligen: In der *originären Beschreibung* im Abschnitt 3.2 bei der Programmkodierung, wäre beim Schritt 5. *Summierung zu y_h und Stellwert y_i* , nur die Zeile dieser Stellwertzuweisung

```
yi = (int) floor(yh + 0.5);    /* Stellwert aufrunden */
```

anstatt durch die Änderung $y_i = y_{max}$; , nun erweitert zu ersetzen durch

```
{ if ( e0 > e0f ) yi = ymax;    /* außerhalb Übergangsschwelle */  
  else yi = 600; /* Muster effektiver Stellwert bei ymax=1000 */  
}
```

und die Beträge der Variable y_i und der Konstante y_{max} entsprechend einzusetzen. Im Musterprogramm bleibt die alternative Nullausgabe darunter bestehen (mit $y_i = 0$). Als Übergangsschwelle ist die Konstante $e0f$ mitbenutzt. Bei allen kleineren Werten ab dem Betrag der positiven Regeldifferenz der Konstante $e0f$, wird dadurch der tatsächlich nötige Stellwert ausgegeben (hier beispielhaft der Betrag 600, entspricht 60% bei $y_{max} = 1000$).

Das Beispiel Magnetregelstrecke

Gesetzt den Fall, man wollte eine Stahlkugel unter Verwendung des Musterprogramms Abschnitt 3.2 der *regulären Beschreibung* schweben lassen (es sei dahingestellt ob mit Abstandsmessung geregelt oder ob es sogar mit vermutlich störanfälligerer Magnetspulenstrommessung funktioniert), so muss man mit einer nichtlinearen Regelstrecke und einem Grundtakt von mindestens $t_0 = 0,001$ (in Sekunden) rechnen, bei belassenem Arbeitsprodukt (Konstante pa). Innerhalb eines Grundtakts muss der Programmcode nebst Messwerterfassung abgearbeitet werden können. Was eine entsprechend schnelle Recheneinheit erfordert. Außerdem wäre, insbesondere bei einer schlechten Erfüllung des sehr kleinen Grundtaktbedarfs der Regelstrecke, die Konstante $nullab = 1$ (mit Nullabsenkung des Stellwerts) zu setzen und wenn gewünscht, der Zweipunkt-Schaltbetrieb zu wählen (siehe Abschnitt 3.3.2 dieser Anleitung). Dazu die Führungsgröße z. B. mit $w_i = 10$ (Einheiten in mm) oder ähnlich für den Abstand der Kugel zum Magneten (was auch von den Magnetparametern abhängt) einzutragen. Ansonsten wäre regelungstechnisch nichts weiter zu ändern, denn beim bestehenden Arbeitsprodukt (bei Konstante $pa = 0,09$) sollte der *obere Eckwert* die passende Steigung soweit vorgeben. Die Führungsgröße w_i und die Stellgröße y_i wären also annähernd so zu wählen, dass sich die Kugel bei laufendem Regler einigermaßen gut einhängen lässt. Der Einsatz von Gleichspannung für das Stellglied vereinfacht überdies die Realisierung mit dem Zweipunkt-Schaltbetrieb. Freilich weiß der kompetente Entwickler, dass die Beanspruchung der Magnetspule so auszulegen ist, dass sich diese ohne und mit Stahlkugel nicht überhitzt. Allerdings sind schon wegen der steilen Nullabsenkung, entsprechende Vorkehrungen zur Sicherung des elektronischen Schalters vor Rückwirkungen der Selbstinduktionsspannung der Magnetspule vorzunehmen und Geräusche wird sie auch verursachen.

Noch Verschiedenes

Die in der Programmbeschreibung angeführten üblichen technischen Absicherungen betreffen Anlagenvorschriften zur Betriebssicherheit, besondere Warnungen beim Überschreiten des Sollwerts und anderweitige vom Entwickler gewünschte Maßnahmen. Bei Bedarf

ist dafür den Anforderungen entsprechend, der Programmcode des Musterprogramms zu ergänzen.

Nach dem Hauptteil des Musterprogramms im Abschnitt 3.2 der *originären Beschreibung*, muss beim Start des Reglers das dortige init-Unterprogramm durchlaufen werden, weil einige Grundeinstellungen vorgenommen werden. Es lässt sich da im Einzelnen erkennen, welche Variablen das betrifft. Die Glättungsdaten am Ende des Unterprogramms sind nur nötig, wenn das Glättungsunterprogramm verwendet wird. Was beispielsweise für eine Magnetregelstrecke wegen der zusätzlichen Verzögerung ohnehin nicht zu empfehlen ist und was bei aktivierter Konstante $nullab = 1$, im Musterprogramm allemal verhindert wird.

4.2.1 Die Gewichtung der Stellgröße

Zur Energiebereitstellung für das Stellglied beim Temperaturbeispiel im Abschnitt 2.1, ist eine Ausführungsform zu wählen, die die elektrische Leistung vielstufig aufzuteilen vermag. Der Regler gibt einen ganzzahligen gestuften Wert an das auf die Regelstrecke einwirkende Stellglied aus. (Bei der grafisch-symbolischen Darstellung von Reglern wird das Stellglied oft nicht als eigenständige Einheit dargestellt.) Die maximale Leistung entspricht dem höchsten Stufenwert. Das ist der maximale Zählerbetrag des Stellwerts für die Variable yi , festgelegt mit der Konstante y_{max} . Die Unterteilung im Stellglied geschieht beim Anwendungsmuster der *originären Beschreibung* unter Abschnitt 2.2, durch Phasenanschnitt der Netzspannung, bei Aufteilung über mehrere Netzperioden.

Der Gewichtungsfaktor (einfach die Verstärkungsanpassung) lässt sich vorab so berechnen oder gleich ausprobierend anpassen, dass eben die Konstante y_{max} als maximaler Zählerbetrag der Variable yi , dem größten eingesetzten Stellwert entspricht. Beispielsweise wäre es bei noch zu ergänzenden Bedingungsabfragen und weiteren Kodierungsmaßnahmen auch denkbar, verschiedene Stellwerte und ihre Gewichtungsfaktoren, abhängig von auswählbaren Führungsgrößenbereichen, variabel zu gestalten. In der *originären Beschreibung* ist im Abschnitt „1.6.1.5 Die Gewichtung des Stellwerts“, die Möglichkeit eines Reserveeintrags angegeben.

Bei den als elektrische Heizung ausgeführten Stellgliedern und Verwendung der Netzspannung liegt es nahe, die Energiestufung über die Abtastzeit hinweg zu steuern, wie z. B. mit dem Phasenanschnitt, bezogen auf eine bestimmte Anzahl zusammenhängender Netzperioden innerhalb des Grundtakts, da der Grundtakt nicht unterschritten wird.

5 Weitere Hinweise

Wer mit etwas Erfahrung zur Programmierung vorbelastet ist und sich gerne mit Elektronik beschäftigt, dürfte beim Regleraufbau mit dem in Abschnitt 3.2 der *originären Beschreibung* mitgelieferten Musterprogramm keine allzu großen Probleme haben. Denn bei Verständnis der Betriebsweise dieses speziellen Reglers, ergibt sich die Lösung vieler

Fragestellungen fast von selbst. Kenntnisse der Schulmathematik reichen aus, aber etwas Geduld sollte man schon aufbringen, um mit dem Regler vertraut zu werden. Es ist nicht falsch, wenigstens punktuell in die *originäre Beschreibung* bei auftretenden Unklarheiten zu schauen. Denn insbesondere, wenn der in dieser Anleitung vermittelte Überblick zur Funktionsweise des Reglers besteht, sind dort angeführte Details besser zu durchschauen.

Für den separaten Aufbau gibt es preislich günstige und kompakte Mikrocontroller-Boards mit verschiedensten leistungsabhängigen Rechnerbausteinen und Schnittstellen nach außen, inklusive Entwicklungsumgebung (IDE), mit Platinenplatz für eigene Erweiterungen. Alternativ stehen preiswerte kleine Platinenrechner (z. B. mit Linux oder Skriptsprachen) im Handel zur Verfügung. Ein Vorschlag für den Phasenanschnitt ist in der *originären Beschreibung* im Abschnitt 3.3 unter „Zum praktischen Aufbau“ auf Seite 107 zu finden. Bei den zur Hardware mitgelieferten IDE-Versionen könnten geringfügige und dennoch gewissenhaft auszuführende Sprachanpassungen der Reglersoftware nötig sein. Zum Austesten in einer PC-Umgebung gibt es freie C-Compiler zur Programmübersetzung. Wegen Verwendung eines älteren Compilers könnten Deklarierungsfehler angezeigt werden und Warnungen sowieso. (Bei Fehlermeldungen wäre ein Ansatz, das main-Programm noch zu deklarieren und beim main-Programm eventuell vor „main (void)“ und „init (void)“, nochmals void zu setzen).

Die universell verwendbare und betriebsfertige Regler-Software in der Programmiersprache C ist keine freie Software und befindet sich im Kapitel 3 der *originären Beschreibung* unter Abschnitt 3.2. Sie ist daraus für Testzwecke in eine Datei vom Typ .TXT oder gleich in eine Quelldatei vom Typ .C kopierbar. Allerdings gehen dabei die Einrückstufen verloren. Es ist für die Überschaubarkeit zweckmäßig, sie von Hand wieder herzustellen, falls kein Programmeditor mit selbsttätiger Einrückung zur Verfügung steht. Bitte Handeinträge vorsichtig durchführen, damit der Programmcode nicht verändert wird. Am besten den Programmcode seitenweise ohne Seitenüberschriften und Seitenzahlen übernehmen, unter Kontrolle zusammenhängender Bedingungsabschnitte (IF-Konstrukte). Zum Schluss ist zu empfehlen, nochmals den Programmcode mit der Buchvorlage zu vergleichen. Es ist noch zu beachten, dass sich beim Kopieren wegen der Formatkonvertierung, kleine Textveränderungen ergeben könnten, wie z. B. sichtbare Leerstelleneinschübe. Wären dadurch Syntax-Änderungen betroffen, ergäben sich entsprechende Fehler beim Kompilieren, die noch zu korrigieren wären.

Die Programmzeilen sind am Ende weitestgehend kurz erklärt. In der *originären Beschreibung* ist im Abschnitt 3.1 das Programm erläutert, damit der Leser die Software eigenständig durcharbeiten kann. Es sind dort verschiedentliche Angaben zum Programmablauf angeführt, sodass sich eventuelle Unklarheiten zur Handhabung leichter ausräumen lassen. Verschiedentliche nicht näher beschriebene Konstanten zu den Berechnungen, dürften aufgrund ihrer Verwendung, vom Leser soweit einzuordnen sein.

~ Ende ~