

Minimaler Zustandsregler

Ein sukzessiv approximatives Regelungskonzept

Rüdiger Kress

7. Ausgabe

Dieses Werk mit allen seinen Teilen ist urheberrechtlich geschützt. Soweit es als Dateiausgabe vorliegt, kann es zusammenhängend zum Zwecke der eigenen Information gespeichert und gleicherweise als Ringbuch oder mit Spiralbindung in einem gewünschten Format ausgedruckt werden. Die Speicherung und Nutzung der angeführten Software ist zum Ausprobieren in eigener Entwicklungsumgebung gestattet. Als Entwicklungsumgebung in diesem Sinne gilt diejenige Soft- und Hardware-Umgebung, in der Software vom Entwurf bis zur Einsatzfähigkeit erstellt wird.

Hinweis zur Handhabung: Beim Vorliegen einer PDF-Datei sei insbesondere zur Anzeige der Hypertext-Querverweise, als Sichtfenster eine Seitengröße empfohlen.

7. Ausgabe

Herausgegeben vom und alle Rechte beim Autor

© 2019 Rüdiger Kress

Wilhelm-Weitling-Str. 18, D-81377 München

Zur Entstehung

Nach wie vor ist, gemessen an der Verwendungshäufigkeit, das Schema des im Laufe der 1930iger Jahre ersonnenen PID-Reglers vorherrschend. Seine letztlich konstruktive Einfachheit ist bestechend. Aus praktischer Sicht lässt er jedenfalls die Justierung der Regelstrecke vor Ort zu, auch wenn sich diese zuweilen unerquicklich gestalten mag. Spätestens da stellt sich die Frage, ob es aus heutiger Perspektive nicht möglich ist, mit einem digitalen Regler weit über den PID-Regler hinaus, Entwurf und Abgleich zu minimieren.

Es liegt auf der Hand, dass die automatisierte Parameterfindung zu Regelstrecken einen erheblichen Aufwand nach sich zieht und wieder neue Einschränkungen schafft. Gesucht war ein kompaktes Gebilde das durch einen besonderen Aufbau, Vorgänge nach bestimmten linguistisch formulierten Gesetzmäßigkeiten von sich aus reguliert. Immerhin unterstreicht die Herangehensweise zur Lösungsfindung, die Diskrepanz zwischen mathematischer Modellierung und algorithmischer Verfahrensreglementierung. Nach ersten Experimenten entstanden 2007 die erste Zusammenfassung der Ergebnisse und weitere umgestaltete Versionen. Der Ausgabe von 2016 folgt nun eine etwas detailliertere Bearbeitung.

In der vorliegenden 7. Ausgabe ist die Beschreibung in verschiedensten Punkten umgestaltet und vervollständigt, außerdem detaillierter auf Einzelphänomene eingegangen. So wurde auch der Begriff Anregelzeit der Anstiegszeit vorgezogen, da die Regelgröße im Allgemeinen steiler verläuft und ein Vergleich mit herkömmlichen Anstiegszeiten infolge geringerer Krümmung weniger aussagt. Die Beschreibung des Reglers orientiert sich nach wie vor dort an algebraischen Relationen, wo sie als Basis angebracht sind. Jedenfalls treten sie nicht durchgängig und in sich geschlossen zur Modellbildung auf. Weiterhin steht die linguistisch orientierte Darstellung von informationstechnisch realisierten Verfahrensabläufen im Mittelpunkt, schon um der Funktionalität des Regelalgorithmus anschaulich ordnend gerecht zu werden. Die Kodierung der einzelnen Schrittfolgen gewährleistet ihre formale Transparenz. Regelwerkbasierendes Vorgehen wie es das Reglerkonzept vorsieht, ist in der technischen Informatik nicht ungewöhnlich. In der Regelungstechnik allenfalls nur, um Konstrukte etablierter Methoden in eine IT-Umgebung einzubetten.

Die Beschreibung des Regleraufbaus gleich zu Beginn, verschafft einen schnellen Überblick. Im dritten Kapitel soll mit der Umsetzung an Hand eines Musterprogramms gezeigt werden, dass anders als bei gewohnten regelungstechnischen Lösungen, mit einem festgelegten Algorithmus und standardisierter Führungsfunktion, selbsteinstellende Regler mit minimalem Entwurfsaufwand praktikabel zu realisieren sind.

München, im Juli 2019

Rüdiger Kress

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
1 Darstellung der Wirkungsweise	9
1.1 Abschnittübergreifende Konzeptübersicht	9
1.2 Das Regelungsprinzip im Einzelnen	13
1.3 Der Steigungsindikator	18
1.4 Streckenidentifizierung und Streckenverzug	23
1.4.1 Die Kontrolle der Führungsfunktion	23
1.4.2 Verzug und verzugsabhängiger Zuwachs	25
1.5 Der Komparator	28
1.5.1 Der Steigungsindikator und sein Mittelwert	28
1.5.2 Mittelwert und Verzug	30
1.5.3 Die Vergleichsfälle	31
1.6 Die Stellwertnachführung	33
1.6.1 Die Stellwertgewinnung	33
1.6.1.1 Die Anregung	34
1.6.1.2 Der Zuwachs und die Gewichtung	35
1.6.1.3 Stellgröße und Regelstrecke	37
1.6.1.4 Die Stellwertstufung	38
1.6.1.5 Die Gewichtung des Stellwerts	40
1.6.1.6 Die Änderung der Stellwertskalierung	42
1.6.2 Der Einsatzpunkt der Regelung	42
1.7 Das Arbeitsprodukt	44
1.8 Der Taktfaktor	47
1.8.1 Die Begrenzung des Taktfaktors	50
1.8.2 Die Unterbrechung der Rahmenabtastung	53
1.8.3 Die verstärkte Anregung	53
1.8.3.1 Unterschiede bei verstärkter Anregung	55
1.9 Die innere Dynamik des Reglers	56
1.9.1 Wie der Regler die Regelstrecken abbildet	56
1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz	56
1.9.1.2 Die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert	57
1.9.1.3 Kennzeichnendes Reglerverhalten	59

1.9.2	Die Grenzwertigkeit	60
1.10	Die Reglereinstellung	66
1.10.1	Die Einstellung mithilfe der Sprungantwortfunktion	66
1.10.1.1	Die Überschneidung von Regelstreckenbereichen	70
1.10.2	Die Einstellung mit dem Arbeitsprodukt	71
1.10.2.1	Die Änderung des Arbeitsprodukts bei Parameterwechsel	73
1.10.3	Die Startanregung	73
1.10.4	Kontrollmöglichkeiten der Einstellung	74
1.11	Der Steigungsindikator als Festwert	76
1.12	Der Regler in seiner Gesamtheit	77
1.13	Der Einsatz bei Mehrgrößenregelungen	82
2	Die Regleranwendung	89
2.1	Die optionale Messwertglättung	89
2.2	Eine Anwendung	91
3	Das Reglerprogramm und Abschließendes	93
3.1	Die Programmbeschreibung	93
3.2	Die Programmkodierung	98
3.3	Anmerkungen zu Simulation und Ausführung	106
3.4	Zu Literatur und Entwicklung	110
Anhang		113
	Zur Ermittlung der Führungsfunktion	113
Stichwortverzeichnis		118

Einleitung

Im Zuge von Automatisierungsbestrebungen bestand der Wunsch zur Entwicklung einer kompakten, beobachterlosen Reglerselbstanpassung als standardisierte Vorlage, vergleichbar der numerischen Ermittlung von Nullstellen. Im konventionellen regelungstechnischen Rahmen war die Lösungssuche erfolglos, weil die analytische Form die konzeptionelle Vereinfachung von Regelprozessen allgemeiner Art offenbar so nicht erlaubt. So ist eine Musteranwendung entstanden bei der sich nachvollziehen lässt, wie gleich ein ganzer Regelstreckenbereich abzudecken ist, ohne auf die Regelstrecken im Einzelnen eingehen zu müssen. Die Bezeichnung „Minimaler Zustandsregler“ weist auf die Prozesszustandsorientierung hin und der Regler ist nicht mit dem herkömmlichen Zustandsregler zu verwechseln.

Der Regler passt sich der Regelstrecke selbsttätig an, innerhalb der Randbedingungen von zwei vorgegebenen Parametern. Vorlagen zu Übertragungselementen sind nicht erforderlich. Im Unterschied zur strikten Formulierung der Regelgesetzmäßigkeit, ist diese nicht geschlossen, d. h. nicht als abgegrenzte Beziehung, angebbar. Für alle Regelstrecken ist eine festgeschriebene Führungsfunktion herangezogen, die sich mit dem Verlauf der Regelabweichung (Regeldifferenz) sukzessiv approximativ in ihrem Zeit- und Anstiegsverhalten synchronisiert. Erst die vom dynamischen Regelstreckenverzug geprägte Führungsfunktion repräsentiert die Regelstrecke zur weiteren, vereinheitlichten Handhabung mit weniger festzulegenden Variablen. Die Fokussierung auf die Verlaufskontrolle der Führungsfunktion reduziert den Entwicklungsaufwand erheblich. Jedenfalls soweit der Bezug zu einer Sprungantwortfunktion hergestellt werden kann, also Stetigkeit vorliegt.

Dem Regelalgorithmus liegt keine geschlossen algebraische Form zur Darstellung des Regelungssystems im Sinne eines statischen Regelgesetzes zugrunde. Zwar liegen dort mathematische Beziehungen vor, aber die Rückkopplung geschieht erst nach der Ergebnisbildung und damit außerhalb der zusammenhängenden Gleichungslinie. Gewiss sind mit den Regeln der numerischen Mathematik steuernde Abhängigkeiten und Beziehungen adäquat beschreibbar. Dagegen durchgängig und die Gleichungslinie übergreifend, unmittelbar keine rückgekoppelte und bedingungsabhängige Einwirkung. Im Unterschied zum streng formalisierten, quantifizierenden Regelwerk der Mathematik, behandelt das vorliegende linguistisch systematische Regelwerk rechnergestützte Ablaufsequenzen. Die steuerbare Termbehandlung vermittelt der Informationstechnik erlaubt es mit ihrer erweiterten Spezifizierung, so eine chronologische Verbindung jenseits reiner Hardwarelösung mit einzuschließen und eine Voraussetzung für das Entstehen von selbstorganisierenden Vorgängen durch Rückwirkung herbeizuführen. Sicherlich mit der Erschwernis, nicht bereits als unerwünscht strukturell klargelegte Effekte gezielt ausschließen zu müssen.

Das hat dokumentarische Nachteile im Vergleich zur eingeführten Regelsystembeschreibung, im konkreten Fall auf die unmittelbare Formulierung der Regelgesetzmäßigkeit und der prädisponierbaren parametrischen Eingrenzung der Regelgüte. Demgegenüber adaptiert der Regler selbsttätig, woraus sich wiederum eine optimale Streckenanpassung ergibt. Die Verlagerung auf ein mehr linguistisch festgelegtes und formal verdichtetes, nur punktuell algebraisch formuliertes Regelwerk, mag die manipulative Handhabung beeinträchtigen. Immerhin liegt die Software bereits vor und es entfallen weitere Regelstrecken bezogene Parameteranforderungen, die geschlossen algebraisch formulierte, dermaßen mathematisch kompakte Beschreibungen gewöhnlich nach sich ziehen. Der Regler nutzt für alle Regelstrecken nur eine einzige Funktion mit von wenigen Variablen gesteuertem Graphen. Während das geschlossene Prinzip bei Regelstrecken jeweils proprietäre Lösungen verwendet, mit den dort anfallenden vorausgesetzten Gleichungsparametern.

Möglicherweise trägt bei der Beurteilung des Reglers zur Verunsicherung bei, dass die gewohnte Festschreibung von Übertragungseigenschaften bei Regelkreisen entfällt. Indessen bleibt unberücksichtigt, dass es hierbei nicht darum geht, für die Eigenschaften einer Regelstrecke den angepassten Regler zu finden. Stattdessen passt sich der Regler in Echtzeit den Eigenschaften der Regelstrecke derart an, dass die vorausschauende Orientierung an einer durch eine Gleichung dokumentierten Streckentypisierung nicht voraussetzend ist. Dazu ist eine statische Funktion eingesetzt, die wegen der Angleichung ihres relevanten Parameters durch die temporäre Regelstreckenantwort, über ihre zeitvariante Verlaufskontrolle immer zu null führt. Die nicht notierte Übertragungsfunktion steht in ihrer Übertragungselemente verbindenden Eigenschaft, wenn wenigstens nach Gepflogenheit erwähnt, demnach mit ihrer Einsatz begründenden Auswirkung im Hintergrund.

Der Regelalgorithmus zeigt, dass sich mit grundlegenden Elementen der Regelungstechnik und anweisungsbasiert wie es die Informationstechnik erlaubt, die Parameterbestimmung zu Regelstrecken weitgehend umgehen lässt und diese dennoch durch zielgerichtete Ausnutzung ihrer Rückwirkung zu handhaben sind. Das mag bei der Spezifizierung und expliziten Darstellung diffizil erscheinen. Doch in der Anwendung bestätigt sich der unkomplizierte Umgang mit dem diese Merkmale aufweisenden Regler.

Die Darstellung der Wirkungsweise in Kapitel 1 beginnt mit einer ausführlicheren Einführung in die grundlegende Reglerkonzeption. Des Weiteren ist veranschaulicht, wie im Einzelnen ein adaptiver Regler aufgebaut ist, für den die randläufige Charakterisierung einer Regelstrecke mit wenigen Parametern ausreicht. Einbezogen sind detaillierte Aspekte der Handhabung. Der Anwendungsteil beschreibt die optionale Messwertglättung und zeigt ein kleines Regelungsbeispiel. Außerdem ist im letzten Teil noch das standardisierte Musterprogramm beschrieben und zusätzlich eine Modifizierung dokumentiert. Alle Darstellungen zu Funktion und Aufbau des Reglers beziehen sich auf das Musterprogramm.

Zur besonderen Beachtung gibt es noch *kursive* Texthervorhebungen und verstärkend den **Fettdruck**. Herausstellungen sind eingerahmt. Beim Vorliegen einer PDF-Datei dienen die Hypertext-Textflächen der schnellen Zielfindung. Zurückspringen mit den Tasten **[Alt]** + **[←]**, bzw. abermals zurück mit **[Alt]** + **[→]**. (Zum Test Zahl anklicken ...Seite 7...)

1 Darstellung der Wirkungsweise

1.1 Abschnittübergreifende Konzeptübersicht

Diese Konzeptübersicht des digitalen Reglers soll dem Leser gleich zu Beginn ein Bild des Verfahrens vermitteln und verweist kurz auf dessen Hintergründe. Die nicht geschlossen algebraische Arbeitsweise des Minimalen Zustandsreglers unterscheidet sich im Aufbau und der Regelstreckeneinbeziehung grundlegend vom bekannten Zustandsregler und anderen etablierten Regelungsverfahren. Das bringt gewisse Schwierigkeiten der Vermittlung im Vergleich zu gewohnter Darstellung mit sich. Denn es werden prozessuale Abläufe und deren Zusammenhänge im Einzelnen in ihrer Dynamik nachvollzogen. Was den Programmcode, im Gegensatz zu statischen Beziehungen, in den Vordergrund drängt. Woraus sich anpassungsfähige Verfahrenswege eröffnen. Deshalb wurde besonderer Wert auf eine kausal linguistische Beschreibung der reglerinternen Vorgänge gelegt.

Merkmale

Bei der Entwicklung von Reglern wird im Allgemeinen das Übertragungsverhalten für eine Regelstrecke und ihren Regelkreiselementen bestimmt und damit der Regler sowie sein Regelverhalten festgelegt. Das kann sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich geschehen. Im Einsatz beruhen beide etablierten Verfahrensrichtungen auf durch Modellierung vorgegebenen Gleichungen, um schlussendlich die geeigneten Stellgrößen zur streckenspezifischen Zurückführung der Regelabweichung bzw. Regeldifferenz zu gewinnen. Soweit adaptives Reglerverhalten vorliegt, beruht es auf kontrolliert angepasste Parameter.

Zur Abgrenzung des Verfahrens, sei bezüglich des Inhalts der zwangsläufig betroffenen Numerik, diese als Umgang mit Größen in genau formulierten Beziehungen umschrieben, mit festgelegten Behandlungsvorschriften. Dagegen drückt ein Algorithmus die Dynamik eines Zusammenwirkens aus, indem ein Regelwerk Abläufe vorgibt, die überdies numerische Formeln beinhalten können. Die Gestaltungsmöglichkeit eines Algorithmus im Hinblick auf den Umgang mit einem Themenkreis, sind dadurch vielfältiger. Am Beispiel der Regelungstechnik sind gewöhnlich Algorithmen verwendet, um numerisch formulierte Methoden der Reglermodellierung unter *Beibehaltung* ihrer Rechenwege, in ein Abfolgegerüst einzubetten. Dagegen nutzt der vorliegende Regler einen Algorithmus, um *die Methode selbst* als Behandlungsvorschrift in eine Ablaufstruktur einzubinden, während die Numerik lediglich ihren Beitrag dazu leistet, die daraus resultierende Arithmetik umzusetzen. Das ändert zwangsläufig die Betrachtungs- und Behandlungsweise von Regelstrecken.

Der vorliegende adaptive Regelalgorithmus passt sich in Echtzeit den Regelstrecken an, unter Umgehung streckenspezifischer Modellierung, mit nur zwei Einstellparametern für einen ganzen Regelstreckenbereich, neben gemeinhin feststehenden Konstanten, die den technischen Verfahrensablauf betreffen. Die Methode fußt im Zeitbereich einerseits auf dem Verzug der Regelstrecken und andererseits auf der sukzessiv approximativen Gewinnung der Stellgröße. Zentrale Merkmale sind eine standardisierte, d. h. allgemein verwendete und sich an den Streckenverzug anpassende Führungsfunktion, an deren Verlauf bis zu ihrer Nullstelle, sich der Vektor der Regeldifferenz entlangbewegt. Quasi als Ersatzkonstrukt einer mathematischen Funktion mit ihren zwei Koordinaten. Auf deren Ebenen sind das im Einzelnen, in der waagrechten Abszissenachse die Anpassung an die Verzugszeit und in der vertikalen Ordinatenachse die iterative Minderung der Regelabweichung (Regeldifferenz) mithilfe der Stellgröße. Die getrennte Behandlung der Koordinaten ist für den Regler die Voraussetzung für die weitreichend selbstständige Angleichung an Regelstreckenverzug und Stellgröße. Die selbsttätige Anpassung an Regelstrecken ohne besondere Vorgaben impliziert eine prädiktive Eigenschaft. Der Regelalgorithmus zeigt dass es möglich ist, unter Ausschluss herkömmlicher Modellierung, mit nur zwei einen ganzen Regelstreckenbereich beeinflussenden Vorgaben, eine leistungsfähige adaptive Regelung zu erzielen.

Führungsfunktion und Steigungsindikator

Die triviale Grundform der Führungsfunktion lautet $a \cdot t^n$ und sie ist in zwei Abschnitte mit $n = 2$ und zudem $n = 4$ aufgeteilt, wobei letzterer den Übergang zu null, gleitend abflacht. Der Faktor a als steigungsprägender Parameter, ist ein Maß für den Verzug der Regelkreiselemente, mit ihrer gemeinhin dominierenden Regelstrecke. Je größer der Betrag von a , desto steiler der gesamte Funktionsverlauf und desto kürzer der Verzug. Der aufgelöste Parameter ist mit seinem Wurzelwert als Steigungsindikator $\sqrt{a}$ bezeichnet und auch wegen des komparativen Gebrauchs, vereinfachend kompakt ohne Ausrechnung der Wurzel verwendet. Die Führungsfunktion bildet einerseits den Verzug mit dem variabel gestalteten internen Regeltakt auf der Abszissenzeitachse und andererseits den iterativen Abbau der Regeldifferenz auf der Ordinatenachse ab. Aus der gesplitteten Abwicklung der Koordinaten resultiert die ganzheitliche Funktionsabbildung. Durch eine Umformung bezieht sich die Führungsfunktion nicht auf die Zeit t mit dem vorgezeichneten Koordinatenursprung null, sondern auf den bezugsfreien Zeitzuwachs Δt .

Der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ wird mit jedem Regeltakt aus den zwei jeweils aktuellsten Regeldifferenzwerten neu berechnet und daraus sein gleitender Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ über eine gewisse Anzahl vergangener Einzelwerte gewonnen. Beide Parameter, $\sqrt{a}$ und $\sqrt{a_{vm}}$, beschreiben verschiedene Ausprägungen der Führungsfunktion, nämlich den Steigungsgeamtverlauf durch den Parameter a mit unterschiedlicher Präzision. Dabei ist der richtungsweisende Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ infolge seiner Stützpunkte und seines Änderungsverzugs stabilisierend verankert und zudem immer eindeutiger als der aktuelle aber schwankende Einzelwert $\sqrt{a}$.

Rahmenabtastung und Taktfaktor

Die Abtastzeit stellt bei digitalen Regelungen die zeitlich geeignete Messdatenerfassung sicher, als einen Kompromiss zwischen Rechendurchsatz und Zeitverhalten der Regelkreiselemente. Es gibt wie üblich eine jetzt als Grundtakt t_0 bezeichnete Abtastzeit, aber sie bezieht sich vorrangig auf eine Ausgangsregelstrecke als Randregelstrecke, die den Beginn einer ganzen Folge davon betroffener Regelstrecken darstellt. Sie sind mit durchgehend kontinuierlich steigendem Verzugsverhalten, der adaptiv abgedeckte Streckenpool. Jede dieser weiteren Regelstrecken weist eine *interne*, variable verzugsorientierte Regeltaktzeit $\geq t_0$ auf, bezeichnet als Rahmenabtastung td . Sie wechselt abhängig vom augenblicklichen Prozessgeschehen und von der Regelabweichung, durchaus von Regeltakt zu Regeltakt. Die Rahmenabtastung td ist das Produkt aus dem Grundtakt t_0 und dem ganzzahligen sogenannten Taktfaktor $tkf \geq 1$. Dieser hängt von der Randregelstrecke ab, nämlich vom Verhältnis ihres, auch als oberer Eckwert bezeichneten, größten Steigungsindikators $\sqrt{a_{oe}}$ zum Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ des aktuellen Regeltakts i . Dieser aktuelle Steigungsindikator ist zur Ermittlung des Taktfaktors tkf , wegen größerer Genauigkeit nur in Form seines jeweiligen Mittelwerts $\sqrt{a_{vm_i}}$ verwendet. Aus dem Regelprozess heraus ist nach dieser Maßgabe ein geeigneter (aber nicht betraglich quantifizierter), von der Steigung der Regeldifferenz abhängiger und mit der Rahmenabtastung td ausgedrückter Streckenverzug abgebildet, *ohne* dass dessen Ursächlichkeit, nämlich die Wirkgrößen der Regelkreiselemente, bekannt ist. Der vom Streckenverzug abhängige Taktfaktor tkf ist damit aus einer Relation aufgrund einer einmaligen Reglereinstellung entstanden¹, die mit der Rahmenabtastung td einen praktikablen dynamischen Regeltakt für Regelstrecken eines ganzen Regelstreckenbereichs vorgibt.

Zwei Einstellparameter

Der Algorithmus weist nur zwei substantielle, einmal festzulegende Einstellparameter auf, nämlich den größten Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ als steilstmöglichen Anstieg des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ und als kleinstmöglichen Regeltakt den Grundtakt t_0 . Hierbei beträgt der Taktfaktor $tkf = 1$. Beide Einstellparameter gelten für die verzugsärmste Regelstrecke am Rand eines breiten durchgehenden Regelstreckenbereichs, mit steigendem Verzug. Seine Begrenzung nach oben unterliegt der Zweckmäßigkeit, mit dem Taktfaktor z. B. im dreistelligen Bereich, verzugsreichere Regelstrecken zu betreiben. Weitere Programmkonstanten betreffen die Struktur des Regelalgorithmus und haben keinen unmittelbaren Bezug zu den Regelstrecken.

Stellgrößenanpassung mittels komparativer Synchronisation

Der über den Abschnitt seiner eingeschlossenen Einzelwerte $\sqrt{a_i}$ in den Koordinaten von Regeldifferenz und Zeit verankerte, jeweilige gleitende Mittelwert $\sqrt{a_{vm_i}}$, dient nun selbst als Leitgröße des aktuellen Steigungsindikators $\sqrt{a_i}$, bevor dieser wiederum in seinen Mittelwert eingeht. Dazu sind beide Werte derart synchronisiert, indem durch einen

¹Näheres dazu in den Abschnitten „1.7 Das Arbeitsprodukt“ und „1.8 Der Taktfaktor“

Vergleich von $\sqrt{a}$ mit $\sqrt{a_{vm}}$, das Vorzeichen für den Stellwertzuwachs $|yd|$ abhängig davon ermittelt ist, ob der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ seinen Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ über- oder unterschreitet. Wobei sich die Schwankungen des Betrags $\sqrt{a}$ über die Zeit hinweg kompensieren. Der Stellwertzuwachs ist im Kern über das Verhältnis von vorangegangenen Stellwert- und Regeldifferenzzuwachs gegeben², die ja aus der Prozessantwort des Regelstreckenverhaltens aufgrund der Stellgrößeneinwirkung hervorgingen. Die sukzessiv approximative Stellwertanpassung ergibt sich daraus, dass das Vorzeichen des Stellwertzuwachses $|yd|$ erst dann wechselt³, wenn der komparative Gleichstand des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ erreicht ist. Eine geringe Überbewertung des Stellwerts sorgt für die nötige beständige Anregung. Die Nullstelle der Führungsfunktion ist durch den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ umso genauer getroffen, je mehr sich die Regeldifferenz der Nullstelle nähert. Die selbsttätige Stellgrößenanpassung ist für die eigentliche Regelgrößenfortführung verantwortlich. Während der Steigungsindikator als Maß der Regelgrößensteigung die interne Rahmenabtastung td bestimmt, die das Zeitintervall der Regelgrößenerfassung und der Stellgrößenausgabe vorgibt.

Arbeitsprodukt

Das Produkt aus größtem Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ und Grundtakt t_0 ist als Arbeitsprodukt P_A bezeichnet¹. Das Arbeitsprodukt bedingt die kontrollierte Steilheit der Regelgröße. Prinzipiell können die zwei Einstellparameter bei gleicher Auswirkung verändert werden, solange sich das Arbeitsprodukt nicht ändert und regelungstechnisch nichts gegen den Grundtakt als kleinste Abtastzeit spricht. Über den Taktfaktor tkf erfolgt nun eine permanente interne Ausregelung dermaßen, dass auch das Produkt aus dem Steigungsindikator⁴ $\sqrt{a}$ und der Rahmenabtastung td , dem Arbeitsprodukt P_A entspricht. Damit ist, nicht sofort erkennbar, die Verbindung der vorgebenden Randregelstrecke zum Regelstreckenbereich über ihre Relation hergestellt. Die zwei Einstellparameter $\sqrt{a_{oe}}$ und t_0 sind mithilfe der nicht normierten Sprungantwortfunktion festlegbar, durch Abgriff der realen maximalen Steigung und Übernahme der wie gewohnt gewählten Abtastzeit. Es kann auch ein bereits bekanntes Arbeitsprodukt als Vorgabe für die Einstellparameter verwendet werden, wenn entweder ein größter Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ oder ein Grundtakt t_0 benannt ist. Jedenfalls kann das Arbeitsprodukt direkt zur Reglereinstellung dienen.

Eigenschaften

Die Einstellparameter bestimmen beispielsweise, ob der Regler ab Sekundenbruchteilen oder viel größeren Zeitbereichen genutzt werden soll. Daneben gibt es zwar weitere festliegende Größen wie die Konstanten der Software, die jedoch aus dem Gerüst der Vorgehensweise selbst resultieren und weniger aus den Regelstrecken bzw. den Regelkreiselementen. Überdies lassen sich in Sonderfällen Konstanten für dedizierte Feinanpassungen

²siehe im Detail dazu Abschnitt „1.6.1 Die Stellwertgewinnung“ auf Seite 33

³Genauer es dazu im Abschnitt „1.5 Der Komparator“ auf Seite 28

⁴in der Anwendung seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ weil dieser genauer ist

ändern. Es reicht insofern eine Schätzung der beiden Einstellparameter aus, als dann die Anwendung selbst innerhalb des abgedeckten Regelstreckenbereichs zu liegen kommt.

Das wesentliche Merkmal des Reglers ist die Synchronisation, zusammen mit ihrer vorbereitenden Peripherie⁵. Vergleichend lässt sich der Regler wie folgt charakterisieren:

1. Gewöhnlich ist bei einer Regelung durch geeignete Maßnahmen, die Stellgröße mithilfe einer *streckenspezifischen mathematischen Funktion* derart gewonnen, indem diese jeder Regeldifferenz einen Stellwert so zuordnet, dass am Ende einer minimalen Anstiegszeit, die Überschwingweite möglichst gering ausfällt.

2. Dagegen beruht die Regleradaption über einen ganzen Regelstreckenbereich hinweg darauf, dass sich der Stellwert mithilfe der *Synchronisation* des aktuellen Steigungsindikators mit seinem Mittelwert, sukzessiv approximativ anpasst. Während sich der Mittelwert wiederum durch den jeweils neuen aktuellen Steigungsindikator verändert, der aus dem *laufenden Antwortverhalten der Regelstrecke* entstand. Der Mittelwert des Steigungsindikators repräsentiert die Führungsfunktion, als momentane Vorgabe für den weiteren Verlauf der Regeldifferenz gegen null.

Der breit adaptive und robuste stetige Regler, begünstigt das Verhalten der Regelgröße, was ihre Dynamik, ihre Steilheit und Überschwingweite betrifft. Das ist möglich, weil die vom jeweiligen Verzugs geschehen abhängige Rahmenabtastung td eine dynamische Dämpfung evoziert, die die Überschwingweite gering hält, bei infolge beständiger Anregung, hoher Steilheit der Regelgröße. Zusammenfassend lassen sich verzögerungsarme Strecken und Speicherstrecken, sowohl ohne als auch mit Ausgleich, in linearer und nicht-linearer Ausformung sowie zeitinvariante und zeitvariante Prozesse handhaben. Ebenso sind Positionsregelungen möglich, insbesondere wenn beim Erreichen der Führungsgröße, der Regler aus- und eine Laufblockierung eingeschaltet wird. Abgesehen davon eröffnen sich wegen der breiten Regelstreckenabdeckung Einsatzmöglichkeiten für Anwendungen, die kostenbedingt von beispielsweise modellbasierten prädiktiven Regelungen bisher ausgeschlossen sind. Summarisch ist der Entwicklungsaufwand erheblich reduziert. Ein Augenmerk ist zwar auf die Ausstattung des Stellglieds zu legen, schon wegen fehlender Ruhelage. Das gilt besonders bei mechanischen Anteilen der Ausführung. Andererseits muss die Modellbildung nicht im Blickpunkt stehen.

1.2 Das Regelungsprinzip im Einzelnen

Die Beschreibung von Regelungsmodellen gründet so selbstverständlich auf mathematisch formulierten Beziehungen, dass diese Tatsache an sich nicht erwähnenswert ist. Selbst die Inferenz bei Fuzzy-Systemen fußt auf festgelegten Relationen, wenn auch nicht in gleicher

⁵siehe dazu auch Abschnitt „1.9.1.2 Die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert“ auf Seite 57

Schärfe. Nun beschreibt dieser Regler die Beziehung von Regelabweichung (Regeldifferenz) und Stellwert nicht als über die Zeit fest voneinander abhängig und ihre Veranschaulichung geschieht deshalb nicht in einer geschlossenen algebraischen Form. Dadurch entfallen alle konzeptionellen Maßnahmen zur Ermittlung solcher Regelstrecken typischen Eigenschaften und deren Auswahl für eine Regelung. Stattdessen übernimmt der Regler die Kontrolle der Verlaufseinhaltung einer Führungsfunktion für jeden Abtastzyklus, nach Maßgabe des verzögerten Antwortverhaltens der Regelstrecke. Über ihren insgesamt eingehaltenen Verlauf wird die Regelabweichung durch Anpassung der Stellgröße abgebaut. Es gibt lediglich zwei Regelstrecken umgrenzende Parameter. Der Regler ist als primär linguistisch und partiell algebraisch formuliertes Regelwerk behandelt, mit Konstanten die die Struktur des Algorithmus betreffen und prinzipiell keinen unmittelbaren Bezug zur Regelstrecke selbst haben. Im Gegensatz zur geschlossenen algebraischen Form, wird dem Regelwerk wohl eine mehr ablauforientierte Gestaltung der Beschreibung der Wirkungsweise am besten gerecht. Schon weil sie zugleich den Einblick in die Handhabung des Verfahrens vermittelt.

Bekanntlich soll ein Regler für eine Regelstrecke von einem Ist-Wert als Ausgangswert, die Regelgröße mit minimaler Anregelzeit⁶, zum Sollwert als Führungsgröße führen. Dies geschieht naheliegendermaßen mithilfe einer Funktion, mittelbar über die einen Nullbezug bietende Regelabweichung. Um diese Funktion bilden zu können, sind die Übertragungseigenschaften der Regelstrecke zu berücksichtigen. Das heißt, die Stellgröße muss für jeden Zeitabschnitt so bemessen sein, dass ihre Wirkung mit jedem digitalen Regeltakt, die Regelgröße in angemessener Nachführungszeit eine entsprechende Distanz zur Führungsgröße bewegt. Außerdem ist sicherzustellen, dass die Funktion den Regelprozess, hinsichtlich Stabilität und Nullstellenerreichbarkeit, mit einer minimalen bleibenden Regelabweichung gewährleistet. Das Wissen um solche Eigenschaften ist seit der systematischen Behandlung von Regelungen immer weiter ausgebaut worden. Jede Regelstrecke weist ihre Besonderheiten auf, weshalb so ein Regler primär auf eine bestimmte Regelstrecke abgestimmt ist.

Dennoch existiert abseits der bisher eingeschlagenen Wege (und wahrscheinlich auch nur deshalb) ein Regelungsverfahren, das verschiedene Regelstrecken mit wenigen Vorgabeparametern und mit einer einzigen statischen Funktion handhabt und das die Regelabweichung ohne weiteres Zutun selbstständig zurückführt.

Wie lässt sich das Entwicklungsrezept hierzu darstellen?

Der grundlegende Gedanke dabei ist, den Regler analog einem adaptiven Übertragungselement auszuführen: **Ist die Regleranpassung an eine beliebige Regelstrecke, bei stetigem und optimalem⁷ Anstieg der Regelgröße, bestmöglich über die gesamte Anregelzeit erfüllt, dann folgt die Regelabweichung einer Funktion, die ohne groß überzuschwingen, beinahe gleitend zu null übergeht. Ist jetzt im Umkehrschluss so eine Funktion weitgehend durch**

⁶siehe Hinweis zur Anstiegszeit im Vorwort „Zur Entstehung“ im 3. Absatz auf Seite 3

⁷optimal im Sinne gleichwertig oder besser als ein eingestellter PID-Regler

Verzugsanpassung eingehalten, dann ist auch die Regleranpassung an die Regelstrecke gegeben. Hierzu geeignet ist eine feststehende, an der Parabel orientierte Führungsfunktion, als die zu null zurückführende Leitfunktion. Sie erlaubt es, Steigungen einer Funktion *über ihre Gesamtheit* mit einem *einzigem* Parameter als Steigungskennwert, einer mit der Steigung anwachsenden und zu messenden Steigungsmaßzahl ra , zu steuern. Unter Beibehaltung ihrer Charakteristik, d. h. ihrer Steigungsrelationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und einem extrapolativ genutzten Nullanlauf, der sich immer schärfer eingrenzt. Grundlage dafür ist der Regelstreckenverzug und in dieser Hinsicht die Eigenschaft einer Funktion, einen Verzug unmittelbar über ihre Steigung zum Antwortzeitpunkt abzubilden. Damit diese Funktion dem Regelgrößenverlauf entspricht, ist mit einer geeigneten iterativen Stellgrößenbeeinflussung, der Graph der statischen Führungsfunktion mit dem abbauenden Verlauf der Regelabweichung synchronisiert. Zugleich verkleinert sich mit der Regelabweichung auch deren abbauender Zuwachs konstant für alle Regelstrecken einer Reglereinstellung, bei variierenden internen Regeltakten.

Somit liegen drei Eigenschaften vor:

1. Zur *Verzugsanpassung* bewegt sich die, über zwei Messpunkte des Regelabweichungsverlaufs erhaltene, Steigungsmaßzahl ra_{k_i} mit dem Zählindex i unterschiedlicher Steigungskennwerte, abhängig von der Regelstreckensituation verschiedenster Übertragungselemente k , im Intervall $[ra_0, ra_m]$ mit $ra_0 \geq ra_{k_i} \geq ra_m$. Nachdem sich das Intervall generell auf die Steigungskennwerte i innerhalb der Regeltakte bezieht, ist die Steigungsmaßzahl fortan nur noch mit ra_i indiziert. Die variablen Regeltakte, die zusammen mit der Minderung der Regelabweichung die Steigung der Führungsfunktion bedingen, treten allein reglerintern in Erscheinung und sind vom ganzzahligen positiven Taktfaktor tkf durch $tkf_i = \frac{ra_0}{ra_i}$ für $tkf \in \mathbb{N}$, mit $tkf = 1, 2, 3, \dots$ festgelegt. Der Taktfaktor bestimmt als Faktor der konstanten vorgegebenen Zeiteinheit t_0 den internen variablen Regeltakt und damit jeweils die Länge eines von aneinander gereihten Zeitintervallen des Graphen der Führungsfunktion, in denen der Stellwert konstant bleibt. Die größte Steigungsmaßzahl ra_0 dient als Referenzgröße für die numerisch vorliegende Steigungsmaßzahl ra_i der unbekannten Regelstrecke. So ist mit tkf_i der passende Graph der Führungsfunktion zur Steigungsmaßzahl ra_i gegeben. Die Begrenzung ra_m bei größtem Regelstreckenverzug und mit kleinstem Regelgrößenanstieg, ist mehr von formaler Natur.

Wie sich noch zeigen wird, sind die Steigungsmaßzahl ra_0 und die Zeiteinheit t_0 die zwei Regelstrecken relevanten Einstellparameter des Reglers und ihr Produkt ist Arbeitsprodukt genannt. Beide Größen sind einer Referenz-Sprungantwortfunktion entnommen. Mit dem *konstanten* Arbeitsprodukt für verschiedenste Regelstrecken mit ihrem Steigungsmaßzahlbereich $[ra_0, ra_m]$, vermindert sich deren Regelabweichungszuwachs durchgehend einheitlich, nur abhängig von der Regelabweichung selbst. Darauf beruhend, ist der interne variable Regeltakt, abgesehen von der kon-

stanten Zeiteinheit t_0 , wie angeführt vom Taktfaktor tkf und damit dynamisch ausschließlich von der Steigungsmaßzahl ra festgelegt.

2. Die *Synchronisation* bewirkt die Übereinstimmung des Regelabweichungsverlaufs mit dem Graphen der Führungsfunktion. Die dazu erforderliche Stellgrößenbeeinflussung geschieht komparativ mit dem Vorzeichenfaktor ± 1 des separat gewonnenen Stellwertzuwachses⁸. Die Stellwertkorrektur bewirkt die Anpassung der, die Führungsfunktion repräsentierenden Steigungsmaßzahl ra , die allein schon wegen Messabweichungen permanent schwankt. Am Beispiel für positive Regelabweichungen gilt für $\frac{ra_i}{ra_{i-1}} \geq 1$ der Vorzeichenfaktor -1 und für $\frac{ra_i}{ra_{i-1}} < 1$ der Vorzeichenfaktor $+1$. Im ersten Fall wird, hier bezogen auf den Regelgrößenanstieg, der Stellwert gesenkt und im zweiten Fall erhöht. Der Regler regelt daher ausschließlich auf Einhaltung des Vorwerts ra_{i-1} , unterstützt durch eine beständige Anregung. Weil aber Einzelmesswerte sehr schwanken, sind mehrere Vorwerte $ra_{i-1,2,3...n}$, in ihrer Eigenschaft als Referenzgröße, zu ihrem Mittelwert zusammengefasst. Infolge der festgelegten Anzahl der Vorwerte, verändert sich auch ihr Mittelwert als Referenzgröße, mit den fortlaufenden Regeltakten als mitlaufendes Intervall seiner Einzelwerte.
3. Die Vorgänge der Punkte 1 und 2 beeinflussen sich wechselseitig, wobei die Synchronisation voraussetzend ist: Durch die Einwirkung der Stellgröße und mithilfe der beiden Messpunkte, ist die Steigungsmaßzahl ra_i der Führungsfunktion gewonnen. Aus der Steigungsmaßzahl ist wiederum der Taktfaktor tkf und mit ihm der variable Regeltakt für die Verzugsanpassung ermittelt. Er ist zugrunde gelegt für die weitere nachführende algebraische Anpassung der Führungsfunktion über die Steigungsmaßzahl. Wegen der fortwährenden iterativen Synchronisation des Graphen der Führungsfunktion mit dem abbauenden Regelabweichungsverlauf, kann dieser sicher gegen null zurückgeführt werden. Weshalb ausschließlich die Synchronisation der regelnden Stellgrößenanpassung bedarf, denn eine Stellwertnachführung unmittelbar über die Regelabweichung findet *nicht* statt. Bei der Verzugsanpassung ist ra_0 und bei der Synchronisation $ra_{i-1,2,3...n}$ die Referenzgröße. Sie erlaubt die Regleranpassung mit Relationen über die Regelstreckenantwort, ohne mit dediziert beschreibenden Parametern die Regelstrecke festlegen zu müssen.

Die Verzugsanpassung nach Punkt 1 wurde oben vorgezogen, weil sie für die Anpassung der eingangs erwähnten Führungsfunktion verantwortlich ist. Im Laufe der weiteren Beschreibung ist die voraussetzende Synchronisation mittels Komparator zuerst behandelt. Außerdem ist **für die Steigungsmaßzahl anstatt des Platzhalters ra , der Steigungsindikator $\sqrt{a}$** hinsichtlich einer ausgewählten Führungsfunktion **eingeführt** und im Besonderen erläutert. Dasselbe gilt für den aus tkf ermittelten internen variablen Regeltakt, der der Rahmenabtastung td entspricht. Die Handhabung der Punkte 1 und 2 ist

⁸Nähere Ausführung im Abschnitt „1.6.1 Die Stellwertgewinnung“ auf Seite 33

in einen feststehenden Regelalgorithmus gepackt, der die Ermittlung des verzugsabhängigen Regeltakts algebraisch, dagegen die Aufrechterhaltung der Synchronisation mit der Führungsfunktion iterativ als eigentliche Regelung, vornimmt. Die dem abbauenden Regelabweichungsverlauf aufgeprägte Führungsfunktion bewerkstelligt dann die sukzessiv approximative Nullannäherung. Auf diese Weise ist es möglich geworden, ohne detaillierte Beschreibung von Übertragungselementen und damit ohne besondere Spezifizierung einer Regelstrecke, unter Ausnutzung der Regelantwort die Regelabweichung gegen null zurückzuführen. Das Verfahren erlaubt einen Regler mit einer einzigen Leitwerteinstellung für ganze Regelstreckenbereiche.

Mithin ist der Aufbau des Reglers skizziert, der mit den nachfolgenden Abschnitten vertieft werden wird. Viele der beschriebenen Eigenschaften ergeben sich dabei selbstredend aus der Reglerstruktur.

Hauptbestandteil des digitalen Reglers ist demnach wie üblich eine Funktion, aber sie ist eine statische Führungsfunktion mit stabiler Nullstelle. Die Führungsfunktion ist durch die Steigungsmaßzahl als das steigungsrelevante Merkmal, den sogenannten Steigungsindikator, gekennzeichnet. **Das alleinige Regelziel ist die Aufrechterhaltung der Synchronisation** des Verlaufs der Regelabweichung mit der zu null lotsenden Führungsfunktion **durch iterative Stellwertanpassung**. Ein Komparator nutzt die Steigungsmaßzahl, um den ermittelten Steigungsindikator mit seinem Mittelwert zu vergleichen und führt damit die Regelabweichung entlang des Graphen der Führungsfunktion zurück. Der Graph der Führungsfunktion passt sich, durch den abbauenden Regelabweichungszuwachs und den internen variablen Regeltakt, der Verzugssituation der Regelstrecke zu jedem Regeltakt an. Die unmittelbare Angleichung an den Regelstreckenverzug dämpft temporäre Regelschwingungen und verringert vor allem die Überschwingweite⁹. Fundament der Verzugsadaption ist das sogenannte Arbeitsprodukt, mit dessen Hilfe der Taktfaktor tkf im Grunde über die Rückwirkung der Regelstrecke festgelegt ist. Das Arbeitsprodukt besteht aus nur zwei Regelstrecken relevanten Parametern, die für einen ganzen Regelstreckenbereich gelten. Die Übertragungseigenschaften sind in Abtastzeit- und Stellwertadaption zerlegt, womit die aktuelle Streckentypisierung auf zwei Merkmale reduziert ist: Die verzugsabhängige interne *Abtastzeitadaption* auf der Zeitachse sichert die grundlegende Neugestaltung des *Regelabweichungsabbaus* auf der Betragsachse, per sukzessiv approximativer Stellwertnachführung. Der universelle Verzugsansatz findet in einer umfassenden Regelstreckenabdeckung seinen Niederschlag.

Die Reglereinstellung geschieht über die zwei Faktoren des Arbeitsprodukts, nämlich der größten Steigungsmaßzahl ra_0 und der Zeiteinheit als kleinste Abtastung, dem Grundtakt t_0 . Für eine Folge von Regelstrecken ist die Steigungsmaßzahl ra_0 der größte vorkommende Anstieg der Regelgröße bzw. der abbauenden Regelabweichung. In den weiteren Ausführungen ist nun ra_0 als **größter Steigungsindikator** $\sqrt{a_{oe}}$ bzw. als **oberer**

⁹siehe dazu den 2. Absatz unter Abschnitt „1.9.1.2 „Die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert“ auf Seite 57

Eckwert des Steigungsindikators bezeichnet. Für die dazugehörige und damit kleinste Abtastung, in der Regel hardwarebedingt, steht weiterhin der Grundtakt t_0 .

Am ehesten wäre der Regler hinsichtlich seiner Methodik der Funktionssplittung, einem autonom arbeitenden PID-Regler vergleichbar, der den allerdings von der Rahmenabtastung und damit zeit- bzw. mehr phasenbezogen ausgeführten I-Anteil, über den bereits gewonnenen Steigungsindikator erzielt und den P- und D-Anteil (vielmehr eine Mischform aus beiden), bei beständiger Anregung, aus dem Regelabweichungszuwachs der Ordinate nachse und vergangenen Stützwerten. Ergänzend grenzt die die Regelabweichung (Regeldifferenz) zurückführende konstante Führungsfunktion des Reglers, ihre extrapolativ angepeilte Nullstelle, iterativ mit jeder Annäherung, immer schärfer ein.

Der Verzug beschreibt eine gewisse Zeit die vergeht, bis eine Ursache in welcher Form auch immer, ihre Wirkung zeigt. In dieser Zeit nimmt bis zur Messung, ein betroffenes Ereignis bestimmte Wege und Richtungen. Beruht ein Vorgang auf einem Verzug, so ist der Verzug dem betrachteten System inhärent. Der Verzugsbegriff dient den Regler betreffend, sowohl der Einordnung als auch zur Festlegung der Regelstrecke über ihre prägende Verzögerung, ohne diese durch eine fundamentale Kenngröße zu benennen. Die Verzugsdynamik findet ihren Ausdruck im internen variablen Regeltakt des Reglers.

Das Stellglied muss einer in der Praxis bereits gängigen iterativen Dauerbeanspruchung nachkommen können. Allerdings sind nur in Ausnahmefällen sprunghaft große Stellstrecken zu überbrücken. Auf seine technische Realisierung sei nicht weiter eingegangen.

1.3 Der Steigungsindikator

Der Regler arbeitet mit einer einfach strukturierten, wenig Rechenleistung beanspruchenden Führungsfunktion, die zum einen wie üblich den Streckenverzug durch ihre Steigung abbildet und zum anderen den Verlauf der Rückführung der Regelabweichung (Regeldifferenz) auf null mit Regelabweichung $(e_0) = \text{Führungsgröße } (w) - \text{Regelgröße } (x)$ wie bekannt, vorschreibt. Die Führungsfunktion ist in zwei Abschnitte gesplittet mit nur *reellen und positiven Lösungen*, nämlich in eine Quadratfunktion $f_2(t) = a \cdot t^2$, die bei der Regelabweichung e_0s , in die Form $f_1(t) = a \cdot t^4$ und mit dieser schließlich zu null übergeht. Beim Übergang e_0s weisen beide Funktionen bis zur gleichen 2. Ableitung nach t auf. Der Betrag der Konstanten $e_0s > 0$ liegt in der Umgebung von null und der Funktionsabschnitt der 4. Potenz hat die Aufgabe, den Übergang zu null gleitend abzuflachen. Mit dem stets positiv genutzten Parameter a ist die Steilheit der Graphen beider Teilfunktionen durch Strecken und Stauchen über die gesamte Zeit t festgelegt. Die Zeit t tritt umgeformt nur als Zeitdifferenz bzw. Zeitzuwachs, als interner Regeltakt, nämlich der variablen Rahmenabtastung $td = \Delta t$ auf. *Stellgröße und Streckenverzug bedingen die Steigung* zum zurückführenden Abbau der Regelabweichung e_0 . Der Parameter a ist zum Steigungsindikator $\sqrt{a}$ umgeformt mit dem Unterschied, dass dieser stets ein Wurzelwert ist. Das ergibt sich, weil die beiden Teilfunktionen zusammen im Zeitfortschritt Δt abbildbar sein müs-

sen und dadurch der Wurzelwert entsteht, der für seine komparative Weiterbehandlung vereinfachend nicht aufgelöst zu sein braucht. Die Zurückführung der Regelabweichung gründet auf zwei Stützpunkte der Führungsfunktion, mit extrapolierte Nullstelle. Der Extrapolationsfehler und damit die Abweichung der Nullstelle von der Führungsgröße w , wird mit abnehmender Regelabweichung kontinuierlich kleiner, bis er in der Umgebung der Regelabweichung null vernachlässigbar ist.

Der steigungskonforme Übergang der beiden Funktionen $f_1(t)$ und $f_2(t)$ der geteilten Führungsfunktion liegt zum Zeitpunkt $t = t_{\ddot{u}}$, in der unten näher beschriebenen Abbildung 1.1, bei der konstanten und gleichfalls immer positiv genutzten Regelabweichung $e0s$. Bei negativer Regelabweichung ist für Berechnungen nur deren Betrag $|e0|$ genutzt. Wegen des Übergangs $e0s$ sind die immer positiv und einschließlich Regelabweichung null verwendeten Teilfunktionen zueinander verschoben. Es gilt für die Funktion 4. Grades bei

$$t \leq \sqrt{\frac{6 \cdot e0s}{a}} \quad (1.1)$$

die Regelabweichung $e0$ mit

$$|e0| = \frac{\left(\frac{a \cdot t^2}{6}\right)^2}{e0s} \quad (1.2)$$

und andererseits für die Quadratfunktion bei

$$t \geq \sqrt{\frac{6 \cdot e0s}{a}} \quad (1.3)$$

die Regelabweichung

$$|e0| = a \cdot t^2 - \frac{4 \cdot \sqrt{6}}{3} \cdot \sqrt{e0s} \cdot \sqrt{a} \cdot t + 3 \cdot e0s. \quad (1.4)$$

In Abbildung 1.1 sind die zwei Teilfunktionen der Führungsfunktion, seitenverkehrt und in ihrem idealen Verlauf, am Beispiel eines relativ großen $a = 0.5$ und dem verwendeten $e0s = 1$ dargestellt. Funktion **1** entspricht der Quadratfunktion (1.4). Sie ist mit ihrem Minimum vollständig, zusammen mit ihrem nicht wirksamen Teil, wiedergegeben. Funktion **2** entspricht der Funktion 4. Grades (1.2). Sie ist nur bis zur Regelabweichung $e0s$ geführt. Funktion **3** ist die lineare 1. Ableitung der Quadratfunktion und Funktion **4** die 1. Ableitung der Funktion 4. Grades, beide über $e0s$ hinaus veranschaulicht. Der Zeitpunkt $t_{\ddot{u}}$ ist der Übergang t (1.1) bzw. (1.3) der zwei Teilfunktionen. Da nur reelle und positive Lösungen verwendet sind, kommt für jede Gleichung nur eine einzige Lösung zum Ansatz¹⁰.

Um nun, die Führungsfunktion umformend, anstatt der vergangenen Zeit $t - t_0$ ab dem Startpunkt $t_0 = 0$, den fortlaufenden Zeitschritt Δt zu erhalten, ist für jeweils einen

¹⁰die Ermittlung der Führungsfunktion ist im Anhang auf Seite 112 angeführt

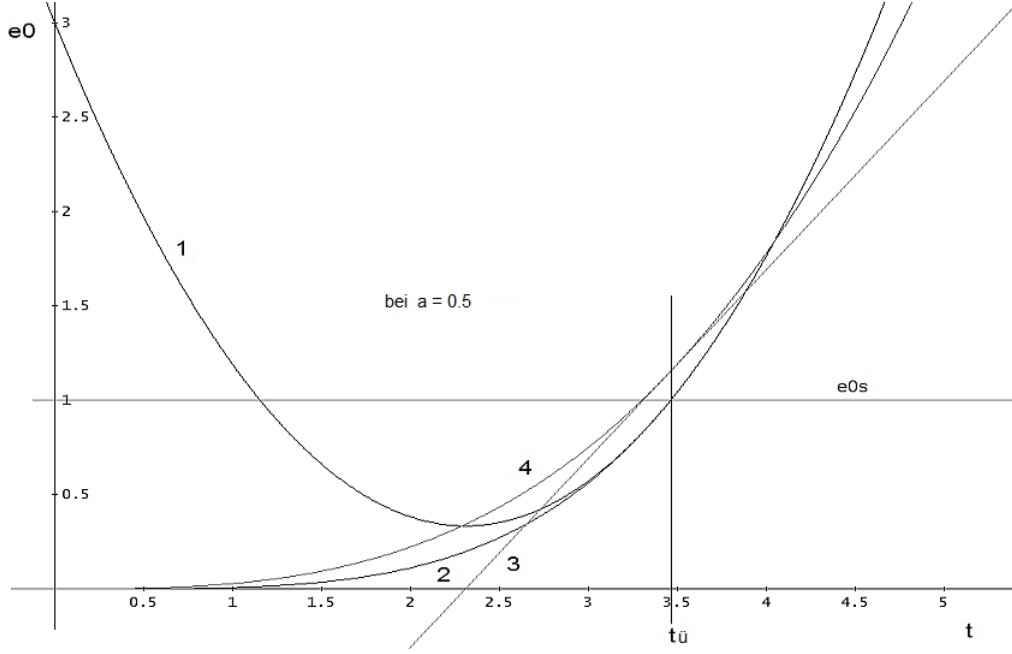


Abbildung 1.1: Die beiden Teilfunktionen der Führungsfunktion

zweiten, den Vorwert $|e_1| > |e_0|$ der Regelabweichung e_0 ausdrückenden adäquaten Term, t durch $t + \Delta t = t + td$ substituiert. Nun kann mit aufgelöstem $t \geq 0$ in (1.2) mit

$$t_1 = \frac{\sqrt{6} \cdot |e_0|^{1/4} \cdot e_0 s^{1/4}}{\sqrt{a}}, \quad (1.5)$$

der Vorwert e_1 von e_0 (1.2), nämlich

$$|e_1| = \frac{\left(\frac{a \cdot (t_1 + td)^2}{6} \right)^2}{e_0 s} \quad (1.6)$$

erweitert werden. Dasselbe mit der Quadratfunktion (1.4) ergibt, gerechnet für $t > 0$,

$$t_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{\sqrt{3 \cdot |e_0| - e_0 s} + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{e_0 s}}{\sqrt{a}} \quad (1.7)$$

und für den Vorwert e_1 von e_0 (1.4) schließlich

$$|e_1| = a \cdot (t_2 + td)^2 - \frac{4 \cdot \sqrt{6}}{3} \cdot \sqrt{e_0 s} \cdot \sqrt{a} \cdot (t_2 + td) + 3 \cdot e_0 s. \quad (1.8)$$

Nach Substitution von t_1 (1.5) in (1.6) und t_2 (1.7) in (1.8) verbleibt jeweils td , das der variablen Rahmenabtastrung entspricht. Damit stehen die zwei Abschnitte der Führungsfunktion fest. Die sich nun auf td beziehende Führungsfunktion ist als Wurzelwert nach

dem Steigungsindikator aufgelöst, für die Funktion 4. Grades bei $|e0| \leq e0s$, mit

$$\sqrt{a} = \frac{\sqrt{6 \cdot \sqrt{e0s}} \cdot \left| \sqrt{\sqrt{|e1|}} - \sqrt{\sqrt{|e0|}} \right|}{td}. \quad (1.9)$$

Ein stets als Betrag behandelter Zuwachs $\Delta e0 = ed = |e0 - e1|$ mit in dieser Betragsdarstellung angenommenem $\text{signum}(e0) = \text{signum}(e1)$, weil in der Anwendung nahe null mittelwertig stimmig, bezeichnet den abbauenden Zuwachs der Regelabweichung $e0$ innerhalb einer Rahmenabtastung $td = \Delta t$. Daraus wird jetzt die Regelabweichung $|e1| > |e0|$ durch den nach $e1$ aufgelösten Term (1.9) substituiert. Das ergibt unter Berücksichtigung des nur als Betrag behandelten Zuwachses $|ed|$ für $|e0| \leq e0s$

$$|ed| = \frac{\left(\sqrt{a} \cdot td + \sqrt{6 \cdot \sqrt{|e0|} \cdot e0s} \right)^4}{36 \cdot e0s} - |e0|. \quad (1.10)$$

Für die Quadratfunktion gilt bei $|e0| \geq e0s$

$$\sqrt{a} = \frac{\frac{1}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot \left| \sqrt{3 \cdot |e1| - e0s} - \sqrt{3 \cdot |e0| - e0s} \right|}{td} \quad (1.11)$$

und für den abbauenden Regelabweichungszuwachs $ed = |e0 - e1|$ innerhalb einer Rahmenabtastung $td = \Delta t$, gilt ebenfalls bei Substitution der Regelabweichung $|e1|$ durch den nach $e1$ aufgelösten Term (1.11), der Betrag des Zuwachses ed bei $|e0| \geq e0s$

$$|ed| = (\sqrt{a} \cdot td)^2 + \sqrt{a} \cdot td \cdot 2 \cdot \sqrt{|e0| - \frac{e0s}{3}}. \quad (1.12)$$

Der Zuwachs $|ed|$ ist Eigenschafts bestimmend von Bedeutung und tritt in der Anwendung nicht parametrisch auf. Denn Synchronisationsabweichungen des Verlaufs der abbauenden Regelabweichung mit dem Graphen der Führungsfunktion mindern die Genauigkeit. Weshalb aus den real anfallenden Stützpunkten unmittelbar die Differenz $|e0 - e1|$ herangezogen ist. Obwohl formal die Gleichwertigkeit $ed = |e0 - e1|$ für den abbauenden Regelabweichungszuwachs besteht.

Mit $e0s = 0$ ist bei (1.11) die Basis-Quadratfunktion mit td , $\sqrt{a} = \frac{|\sqrt{|e1|} - \sqrt{|e0|}|}{td}$ erkennbar. Grundlage hierfür sind die Ausdrücke $|e0| = a \cdot t^2$ mit $t = \frac{\sqrt{|e0|}}{\sqrt{a}}$ und $|e1| = a \cdot (t + td)^2$.

Um den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ der Führungsfunktion allgemein wiederzugeben, ist der Restterm im Dividend in (1.9) und (1.11) nur über seine Variablen $e0$ und $e1$ und der Konstanten $e0s$ formuliert mit

$$\sqrt{a} = \frac{f_{allg}(|e0|, |e1|, e0s)}{td}. \quad (1.13)$$

Der *stets positiv* genutzte Steigungsindikator $\sqrt{a}$ steht mittelbar für diejenige Steigung, die beim Zustand der angeführten Variablen, dem gegen null verlaufenden Graphen der Führungsfunktion entspricht. Dieser ist über die zwei Stützpunkte e_0 und e_1 der Regelabweichung hinaus prädiktiv extrapoliert und die Nullstelle weicht mit abnehmender Regelabweichung und dadurch verringertem Extrapolationsfehler, bei gemitteltem Messfehler immer weniger von der Führungsgröße w ab. *Die Richtungssteuerung berücksichtigt erst der Komparator.* Der Parameter a der Führungsfunktion ist mit seiner beibehaltenen Wurzel $+\sqrt{a}$ angegeben. Denn von Belang ist nicht der alleinstehende Betrag einer Steigung des Funktionsgraphen der Führungsfunktion, sondern das Resultat des Vergleichs mit seinen zusammengefassten Vorwerten, nämlich seinem Mittelwert. Der konstante Grundtakt t_0 stimmt mit der durch die Hardware vorgegebenen Abtastzeit überein. Die variable Rahmenabtastung td ist der interne Regeltakt des Reglers. Sie drückt über die Zeitdauer der Minderung $ed = |e_0 - e_1|$ der Regelabweichung, den Zeitfortschritt in Grundtakt-einheiten aus. Vereinfachend als Grundtakt t_0 bezeichnet. Die Anzahl seiner Zyklen ist bestimmt vom Streckenverzug abhängigen, ganzzahligen Taktfaktor tkf mit

$$td = tkf \cdot t_0 \quad [\text{Zeiteinheiten}]. \quad (1.14)$$

Damit kann mit dem Betrag der Regelabweichung e_0 und dem gewöhnlich größeren Betrag ihres Vorwerts e_1 sowie der Rahmenabtastung td , die Maßzahl für die Steigung des Graphen der Führungsfunktion, der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) bestimmt werden. Der noch fehlende Taktfaktor tkf kann zum Nutzungszeitpunkt als bekannt vorausgesetzt werden. Der Graph der Führungsfunktion stellt das Zeit- und Zielverhalten der Regelstrecke dar. Der Steigungsindikator bleibt solange konstant, wie auch der von ihm repräsentierte Graph der Führungsfunktion unverändert ist, auf den die Stellgröße zurückwirkt.

Die Funktionsgraphen in Abbildung 1.1 sind ideale summarische Verläufe. Wegen des Abgriffs von lediglich zwei Messpunkten, ist nur in deren unmittelbaren Umgebung eine verwertbare Funktionsabbildung durch den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ gegeben. Erst dessen Mittelwert erbringt den geeigneten zielführenden Graphen zur Nullstelle der Führungsfunktion.

Der Ausdruck zur Berechnung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ (1.13) beinhaltet Komponenten der **Kriterien** I und II für **Stabilität**. Ebenfalls gibt es das **Kriterium** III zur **Robustheit** des Reglers:

- I. Die Regelabweichung null ist mit der Führungsfunktion sicher angestrebt
 - a. durch das geeignete Vorzeichen ($\pm$) des Stellwertzuwachses $|yd|$ und
 - b. als Randkriterium, mit dem sich gegen die Regelabweichung null verkleinern, abbauenden Regelabweichungszuwachs ed .
- II. Die zeitliche Phase der regelstreckengerechten Stellgrößenänderung ist als dynamisches Verzugsverhalten durch die variable Rahmenabtastung td gegeben.

III. Der Regler ist insofern robust, als Merkmale zum Abbau der Regelabweichung, Regelstrecken übergreifend bestehen bleiben.

Diese Kriterien, auf die von Fall zu Fall noch einzugehen ist, dokumentieren Eigenschaften des Reglers und legen die **Stabilität** als *selbsterhaltend* fest. Sie besteht **robust**, indem sie unabhängig von Regelstreckeneigenschaften über eine festgelegte Handlungsvorschrift existiert. Die Bedeutung des Regelkreisverhaltens hinsichtlich der Reglerkonzipierung mit den genannten Stabilitätskriterien hat damit einen anderen Stellenwert als den bei der dedizierten Bestimmung der Regelkreisstabilität. Wo eine determiniert geschlossene, d. h. eindeutig festgelegte, Abhängigkeit von Stellgröße und Regelabweichung (Regeldifferenz) im Zeitschritt für jede einzelne Regelstrecke vorliegt.

Voraussetzung ist die Regelbarkeit einer Regelstrecke. So darf das Verhältnis von Ausgleichszeit T_g zur Verzugszeit T_u nicht zu klein sein, wobei $\frac{T_g}{T_u} < 3$ bekanntlich als schlecht gilt. Starke **Messwertestreuungen** der digitalisierten Regelgröße täuschen ein zu kleines Verhältnis $\frac{T_g}{T_u}$ vor. Da der Zeitfortschritt der Rahmenabtastung td die Grundlage der Messung bildet, würden fortdauernd weitab außer der Reihe liegende Messwerte falsche Steigungen vorschützen, die für die betreffende Regelstrecke gar nicht anfallen könnten. Der Komparator verlöre seine regulative Funktion wegen falscher Vorzeichen der Stellwertzuwächse. Weshalb die Regelgröße anstatt bei der Führungsgröße w zu verharren, diese wegen der beständigen Anregung langsam überschreiten würde. Was Instabilität bedeutete¹¹. Kurze größere Messwertestörungen wären dagegen folgenlos. Wären Messwerteabweichungen dauerhaft gerade noch im hinnehmbaren Bereich, würden sie allenfalls die Ausregelzeit verlängern.

1.4 Streckenidentifizierung und Streckenverzug

1.4.1 Die Kontrolle der Führungsfunktion

Eingeführte Methoden der Regelungstechnik diktieren von vornherein über Regelgesetze die Relation von Regelabweichung bzw. Regeldifferenz zum Stellwert. Sei es unmittelbar oder mittelbar über allerlei Modellausformungen und korrektive Beobachter, nachfolgend oder prädiktiv. So eine geschlossene Beziehung besteht hier wegen der Trennung von angepasstem Steigungsindikator als Parameter der Führungsfunktion und der sukzessiv iterativen Stellwertnachführung nicht. Die Führungsfunktion weist die eindeutige Nullstelle auf, die sich mit abnehmender Regelabweichung, wegen des sich verringernden Extrapolationsfehlers, immer genauer mit der Führungsgröße w deckt. Die Verbindung von Regelabweichung und Stellwert besteht über ein linguistisch festgelegtes und formal logisch minimiertes Regelwerk im Kontext von einzelnen, algebraisch formulierten Beziehungen. Das hat neben einer gewissen Problematik der Veranschaulichung den Vorteil,

¹¹Die im Abschnitt 2.1 auf Seite 89 angeführte optionale Signalglättung mittels linearer Regression, ist nicht Bestandteil des Regelverfahrens an sich.

auf wiederholte parametrische Justierungen und schließlich auf die Parameter selbst, zur Anpassung an die Regelstrecke, weitgehend verzichten zu können.

Anstatt einer Regelstreckenidentifizierung ist die Einhaltung der Führungsfunktion mittels Steigungsindikator herangezogen. Weshalb der Regler auf keine bestimmte Regelstreckenangepassung angewiesen ist, etwa anhand ausgewählter Typisierung von Regelstrecken mit standardisierten Übertragungsgliedern. Die Krümmung des Graphen der Führungsfunktion zieht eine ständige Abänderung des Verlaufs der Regelgröße nach sich. Das beinhaltet die angepasste Anstiegssteuerung etwa im Gegensatz zum belassenen Verlauf einer Sprungantwortfunktion. Die Steuerung des Anstiegs der Führungsfunktion geschieht abgestimmt stellwertig über ihre verzugsabhängige Verlaufskontrolle. Diese wiederum ist detektierbar über die Steigung des Zuwachses innerhalb einer Rahmenabtastung td und der dafür nötigen Variablen $|e_0|$ und $|e_1|$ nach (1.13), womit alle veränderbaren Größen zur Ermittlung des Steigungsindikators gegeben sind.

Zur Einstellung einer Regelstrecke reicht bereits ein Steigungsabschnitt (Tangens) der (nicht normierten) Sprungantwortfunktion aus. Abgenommen z. B. vor dem Wendepunkt bzw. ohne Wendepunkt bei deren größter Steigung und nun umgerechnet als oberer Eckwert des Steigungsindikators¹² zusammen mit der Festlegung des Grundtakts t_0 . Das schließt die Verwendung unterschiedlicher Führungsgrößen w mit ein, soweit sie bevorzugt im Bereich einer Stellwertanforderung von etwa 15 % bis 80 % liegen.

Die geschlossen algebraische Formulierung des Regelgesetzes steht im Gegensatz zur Verlaufskontrolle der Führungsfunktion. Diese ist gemischt als linguistisch artikuliertes Regelwerk mit algebraischen Rechenvorschriften festgelegt. Einmal abgesehen von Analogreglern, wo das Übertragungsverhalten von deren Bauelementen im Vordergrund steht, kann in der Digitaltechnik ein algebraischer Ausdruck ebenfalls als ein Regelwerk von Handlungsvorschriften aufgefasst werden. Allerdings mit dem Unterschied besserer Manipulierbarkeit auf seinen Gleichungsseiten, als das mit einem Abschnitt linguistisch formulierter Regeln möglich wäre. Die durch Symbole ausgedrückten, methodischen Handlungsvorschriften von Gleichungen sind zugleich Gerüst eines abstrakten, ordnenden Gefüges. Und dennoch hat eine Gleichung zur Modellierung eines Vorgangs aus Sicht der Zweckdienlichkeit den Nachteil, dass jeder für das Verhalten relevante Parameter detailliert vorgegeben sein muss. Ihre vollständige Beschreibung (im Sinne des Modells, nicht des simulierten Vorgangs) ist andererseits Grundlage einer durchgehenden Beweisführung. Mit der Erschwernis, dass die Darstellung jeder nur möglichen Variante und Auswirkung, ebenfalls auf die Modellbeschreibung ausgerichtet ist. Es geht hier bezüglich der Zielsetzung nichts von selbst. Je mehr Handhabungsmodelle entstehen, desto umfangreicher die Theorie.

Das gemischte Regelwerk zur Verlaufskontrolle der Führungsfunktion beinhaltet dagegen einen Regelalgorithmus als Handhabungsmodell mit einer festgelegten Struktur. Der Wirkungsnachweis geschieht deshalb über die Zielrichtung des gemischten Regelwerks, also wie der Algorithmus seine Aufgabe erfüllt. Bei einer Regelstrecke können ausgehend

¹²siehe Abschnitt „1.10 Die Reglereinstellung“ auf Seite 66

von der (maßstabsgetreu ausmessbaren, nicht normierten) Sprungantwortfunktion und deren Verzugszeit T_u (und falls nötig die Ausgleichszeit T_g), die beiden Parameter für die Verlaufskontrolle bestimmt werden. Andererseits gibt es noch die unmittelbare Auswahl über das reglereigene Arbeitsprodukt. Die internen Konstanten des Regelalgorithmus sind davon weitgehend unabhängig. Mehr ist nicht nötig, weil der Algorithmus als Handlungsanweisung selbsttätig die Verlaufskontrolle aufrechterhält. Eine gute Messwertauflösung ist dabei freilich vorteilhaft.

Die quadratische Funktion ist als Führungsfunktion besonders geeignet, da ihre Differenzierung linear verläuft und ihre 2. Ableitung konstant ist. Wodurch die Steigungsdifferenzen der Führungsfunktion ebenfalls eine steigungsunabhängige Kontinuität aufweisen. Die Steigung der Krümmungsänderung ist grundlegend gleichbleibend und somit ist eine Voraussetzung für die Folgefähigkeit der Regelgröße gegeben. Der Nachteil hierbei ist lediglich, dass der lineare Differenzierungsverlauf der 1. Ableitung übergangslos bei null endet, was einen unsauberen Anlauf der Führungsgröße w durch die Regelgröße nach sich zöge. Das wird durch den Wechsel der quadratischen Funktion in eine Funktion 4. Grades vermieden, deren Ableitungsdifferenzen (2. Ableitung) quadratisch zu null übergehen. Die Führungsfunktion besteht somit aus zwei Teilfunktionen, nämlich der quadratischen Funktion, die in Nullnähe bei $t_{\ddot{u}}$ in Abbildung 1.1 (Seite 20), in eine Funktion 4. Grades übergeht. Am Übergangspunkt $e0s$ der zwei Teilfunktionen weisen beide die gleiche Steigung auf, sodass die lineare Ableitung übergangslos in eine Funktion 3. Grades wechselt, die dann wiederum langsam gegen null verläuft. Aufgrund des allmählichen Übergangs zu null, ist in diesem Bereich wegen der Steigungsminderung die Anregung erhöht, um die geringen Pendelbewegungen der Regelgröße in ihrem Trend gegen null zu forcieren. Genauso geschieht wegen der Steigungsminderung, der Übergang zur Funktion 4. Grades bei der Regelabweichung $e0s$ nicht zu weit von der Regelabweichung null entfernt, um nicht zu frühzeitig den Regelgrößenverlauf zu verflachen.

1.4.2 Verzug und verzugsabhängiger Zuwachs

Der hier behandelte Streckenverzug ist definiert als eine verzögernde Reaktion ohne konkrete Zeiteinheit, aufgrund einer mehr oder weniger umfassenden Einwirkung. Abhängig von den baulichen Eigenschaften des betroffenen Einwirkguts und der Größe und Länge des Einwirkens. Es ist gleichgültig welche Vorgänge ihn verursachen. Im Grunde bedingt durch ein Hindernis, wie z. B. einen Speicher, das die Stellgrößeneinwirkung zeitlich verschiebt und ausdehnt. Deshalb ist es gleichgültig, welche Übertragungselemente den Verzug auslösen und wie viel die Stellgröße selbst zu einer beschleunigten Erhöhung oder Senkung des Regelgrößenanstiegs beiträgt.

Im Allgemeinen ist die Verzugszeit T_u die Zeit, in der eine Stellgrößeneinwirkung zu einer Änderung der Regelgröße führt. Bei der Sprungantwort ist sie für die Anlaufbedingungen eines gegebenen Regelkreises ausmessbar. Deshalb mag sie feste Eigenschaften für einen Regelkreis assoziieren. Der nun thematisierte Verzugsbegriff beschreibt dagegen die

Reaktion auf die Einwirkung der Stellgröße innerhalb einer Rahmenabtastung td als Regeltakt. **Den Regler betreffend, ist der Verzug in einem vorliegenden Regelkreis diejenige Verzögerung, die bei einer Rahmenabtastung td gegeben ist, mit einem kontinuierlichen Zuwachs $\Delta e_0 = |e_0 - e_1|$ der Regeldifferenz.** Dieser Zuwachs ist zwar durch die Stellgröße begrenzt¹³, doch bis dahin über den Stellwert variierbar. Die Eigenschaft „*kontinuierlich*“ weist auf ebensolchen Zu- und Abfluss von Stellenergie hin, ohne dass z. B. ein Energieüberschuss zwischenzeitlich den Zuwachs forciert. Die Verzugsbehandlung erlaubt es, der Rahmenabtastung td mehr Spielraum zu geben. Die Länge der Rahmenabtastung resultiert aus dem Gleichgewicht von Energiezugabe und ihrer Umsetzung. *Das Verzugsverhalten und der Stellenergiezuwachs sind an den Regeltakt gebunden*, d. h. sie passen zu jeder vorgegebenen Rahmenabtastung td . Wäre es anders, so würde ein Zuviel der Stellenergie die Regeltakt-Asynchronität bedingen und damit Schwankungen, die sich als Schwingungen manifestierten.

Mittelwertstützstellen und Auswirkungen

Der Regler stellt nun mithilfe der Synchronisation des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$, die Stellgröße auf den Streckenverzug über die Rahmenabtastung td ein und damit im Vergleich zu den vorangegangenen Stellgrößen, iterativ ihren Zuwachs. Doch die mit Verminderung der Regeldifferenz verringerte Steigung der Führungsfunktion wirkt auf den Steigungsindikator und damit die Führungsfunktion zurück, sodass sich mit Verkleinerung der Regeldifferenz, die Rahmenabtastung erhöht. Der Umfang dieser Rückwirkung ist abhängig von den Stützstellen n des Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ und damit vom temporär erfassten Regelgrößenabschnitt über alle Stützstellenintervalle. Denn der Mittelwert reicht nur über seine Stützstellenanzahl und bei Erhöhung der Stützstellen verhält sich der Mittelwert weniger flexibel, also träger. Deshalb sollte bei verzugsärmeren Regelstrecken der Mittelwert weniger Stützstellen aufweisen. Die für den Regler gewählte Stützstellenanzahl n ist für einen breiten Regelstreckenbereich geeignet. Die Anpassung der Stellgröße an den Verzug ist ausschlaggebend für die Einhaltung der Anregelzeit mithilfe der Führungsfunktion.

Dem Regler sind die Verzugsauswirkungen über viele Regeltakte hinweg nicht bekannt und es stellt sich die Frage, ob für jeden Punkt der Regelabweichung, der Krümmung der Führungsfunktion dann noch gefolgt werden kann. Insbesondere, ob bei einer bestimmten Regelabweichung, der vergangene Verlauf nicht zu steil war, um für den zukünftigen Verlauf die Führungsfunktion noch soweit anzupassen, dass die Überschwingweite nicht zu hoch ausfällt. Doch die Adaption des Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ und somit der Führungsfunktion ist schnell genug, um das Arbeitsprodukt P_A für einen ganzen Regelstreckenbereich zu nutzen. Schon weil mit P_A der abbauende Zuwachs ed der Regeldifferenz eindeutig festgelegt ist¹⁴.

¹³Näheres dazu im Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

¹⁴siehe dazu den 2. Absatz im Abschnitt „1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz“ auf Seite 56ff.

In der Anwendung fungiert der *Streckenverzug* als Zeitraum, den die Veränderung der *Regelgröße* als Zuwachs im Nachlauf benötigt, abhängig von *Stellgröße*, *Störgröße*, der *Regelstrecke* und weiteren *Regelkreiselementen* als Einwirkgrößen. Eingeschlossen sind Totzeiten, soweit sie nicht tragende Elemente aus nicht stetigen Vorgängen darstellen, wie z. B. Stückelung und Portionierung. Die punktuell nicht so leicht auszumachende Verzugsdynamik, ist begrifflich schlicht als Verzug behandelt. Das ist möglich, da für die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert und die Ermittlung des Taktfaktors¹⁵ nur die zeitliche Verzugsrückwirkung von Bedeutung ist.

Der Verzug ist symptomatisch für das Übertragungsverhalten. Alleinige Pegelveränderungen ohne spürbaren Verzug ließen sich ohne Weiteres anpassen. Der Regler bedürfte keiner, in welcher Form auch immer eingebunden Verzugsbestimmung, wie sie bei dynamischen Systembeschreibungen letztlich vorliegt. Wie der Name Streckenverzug schon impliziert, bedingt er durch Reaktionsverzögerung der Auswirkung, einen auf der Zeitebene von der Senkrechten abweichenden Anstieg der Regelgröße und aufgrund dessen, die Steigung der sich abbauenden Regelabweichung. Gäbe es einen Regelstreckenverzug null, so wäre die Regelabweichung null verzugslos zu erreichen. Das würde einen unpraktikablen zeitlosen Sprung bedeuten, d. h. eine Veränderung ohne Bewegung. Aus Sicht des Reglers bildet die Regelstrecke im Regelprozess, zusammen mit den sie beeinflussenden Wirkgrößen, *eine Einheit*. **Hinsichtlich des Zuwachses der Regelgröße innerhalb einer Rahmenabtastung ist es gleichgültig, wie sich die beiden Wirkgrößen und der Einfluss der Regelstrecke selbst und der restlichen Regelkreiselemente, verteilen.** Deshalb sind mit der Rückwirkung der Stellgröße stets die Störgröße und die Eigenschaften der Regelstrecke mit einbezogen. Ebenso inkludiert die Beschreibung von Stellgrößenauswirkungen diesen Umstand.

Da sich der Streckenverzug über die Steigung der Regelgröße ausdrückt, ist mit der Festlegung eines stetigen Bereichs des Steigungsindikators $\sqrt{a}$, vom oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ bis zum unteren Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$, ebenfalls ein **stetiger Verzugsbereich** festgelegt.

Schließlich ergibt die Summe aller Steigungsabschnitte der Rahmenabtastungen, den Regelgrößenverlauf zur Führungsgröße w und begründet die Anregelzeit. Der Streckenverzug lässt sich durch den abbauenden Regelabweichungszuwachs $ed = |e_0 - e_1|$ (1.10 bzw. 1.12) und die Rahmenabtastung td (1.14) veranschaulichen. Die Zuwachsgrößenordnung von ed ist klein genug, dass es beim Zeitschritt einer Rahmenabtastung gleichgültig ist, ob eine lineare oder nichtlineare Regelstrecke vorliegt. Demgemäß ist das Ausmaß des Verzugs und des Zuwachses linearisierend durch die Steigung

$$\tan \varphi = \frac{|e_0 - e_1|}{td} = \frac{|ed|}{td} \quad (1.15)$$

beschreibbar. Der Tangens (1.15) tritt allerdings nur als Bewertungshilfe in Erscheinung.

Die Stellgröße kann die Steigung zwar quantitativ bis zu einer noch anzuführenden Grenzwertigkeit¹³ verändern, aber das Verhalten an sich bleibt bestehen. Wie sich noch

¹⁵Näheres dazu im Abschnitt „1.5 Der Komparator“ und „1.8 Der Taktfaktor“

zeigt¹⁶, ist der abbauende Zuwachs $ed = |e_0 - e_1|$ dynamisch nur von der Regelabweichung e_0 abhängig, sodass sich $\tan \varphi$ dem Regelstreckenverzug über die variable Rahmenabtastung td anpasst. Wohingegen durch die Synchronisation mittels Komparator, das Vorzeichen zum iterativ gesteuerten Stellwertzuwachs ermittelt ist, der wiederum den in den Regelgrößenzuwachs eingehenden Regelabweichungszuwachs ed erst verursacht.

1.5 Der Komparator

Der Komparator wirkt als Regler im Regler und generiert die Vorzeichengebung des Stellgrößenzuwachses zur Anpassung der Stellgröße, um den Verlauf der Regelabweichung $|e_0|$ mit der Führungsfunktion zu synchronisieren. Die dazu verwendete Steigungsmaßzahl ist der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) als diejenige Variable der Führungsfunktion, nach der diese aufgelöst ist. Der Steigungsindikator ist im abgestimmten Idealfall konstant und bewirkt die Anregelzeit der Regelgröße über den gesteuerten Verlauf der Regelabweichung. Tatsächlich ändert er sich ständig, abhängig von Messwertestreuerungen und der Regelstreckensituation. Sein Betrag resultiert ursächlich aus der Stellgrößenwirkung, weshalb er über diese zu steuern ist. Das Konzept sieht vor, dass sich der Stellwert selbsttätig anpasst. Nur, woran soll er sich orientieren ohne die Regelstrecke zu kennen?

Der Regler fußt auf keinem geschlossen algebraisch formulierten Regelgesetz, denn **der Weg zum Abbau der Regelabweichung ist bereits durch die Führungsfunktion festgelegt. Offen ist lediglich ihre Krümmung** als stetige Änderung der Steilheit ihres Graphen. **Diese Krümmung ist vom Regelstreckenverzug abhängig** und vom Verzug der restlichen Regelkreiselemente. Sie resultiert aus dem Antwortverhalten der Regelstrecke auf die Stellgrößeneinwirkung, im Hinblick auf die Folgefähigkeit beim ausgerichteten Steigungswechsel der Krümmung. Das lässt sich schematisierend verdeutlichen, indem man den linearisierten Abschnitt der verzögerten Nachführung in Form der Rahmenabtastung td , mit dem sich zur Regelabweichung null verkleinernden Zuwachs ed , dem Graphen der Führungsfunktion als Vektoren in Reihe einpasst. Je größer td , desto länger der Graph und umso kleiner der Steigungsindikator $\sqrt{a}$, bei anhaltend abbauendem Zuwachs ed .

1.5.1 Der Steigungsindikator und sein Mittelwert

Nun hat die Führungsfunktion zu jedem Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ eine Nullstelle. Damit aber der Graph der Führungsfunktion dem durch den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ repräsentierten Verlauf der abbauenden Regelabweichung e_0 folgt ist es unabdingbar, dass auch die erfassten Messpunkte bei einem bestimmten Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ fortlaufend fixiert werden. Wenigstens von zwei aktuelleren Messpunkten hintereinander, damit der Steigungsindikator nicht abdriftet. Deshalb dient der Vorwert $\sqrt{a_{i-1}}$ eines Steigungsindikators als Referenz, um den nachfolgenden Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ auf Einhaltung seines Vorwerts

¹⁶siehe Abschnitt „1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz“ auf Seite 56

auszuregeln. Es liegt nahe, dafür als Referenzgröße gleich den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ als führenden Vergleichssteigungsindikator zu verwenden. Schließlich stützt sich bei einem kontinuierlichen Funktionsabbild, der Mittelwert seiner Stützpunkte auf die verdichteten und damit brauchbar verankerten Vorgänger (wobei zur weiteren Glättung, der aktuelle Wert $\sqrt{a_i}$ sogar noch mit eingeschlossen ist). Aus dem Vergleich der Größe $\sqrt{a_i}$ mit der Referenzgröße $\sqrt{a_{vm}}$, lässt sich nun das Vorzeichen für einen noch zu bestimmenden, aufzusummierenden Stellwertzuwachs $|yd|$ gewinnen. Über die festgelegte Referenzgröße ist es mithilfe der Regelstreckenantwort möglich, mit einer Relation den aktuellen Verlauf kennzeichnenden Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ einzuordnen und damit die Regelstrecke, auf dem Umweg über ihr Verhalten, einzustufen. Der Komparator bewerkstelligt die Anpassung des Stellwerts, um den Regelabweichungsverlauf mit dem Graphen der Führungsfunktion prägend, zu synchronisieren. *Das ist die Voraussetzung dafür, um mittelbar über den Regelabweichungsverlauf, die Führungsfunktion als charakterisierendes Abbild des Regelstreckenverhaltens heranziehen zu können.* Dann ist der Graph der Führungsfunktion selbst zum Regelabweichungsverlauf geworden und das Regelziel ist insofern erfüllt, als die steuernde Führungsfunktion zur Regelabweichung null leitet. Die Regelabweichung ist also nur mittelbar über die Stellwertanpassung durch Synchronisation des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ zurückgeführt.

Der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ resultiert aus den Stützpunkten der Regelabweichungen e_0 und e_1 und beschreibt zwar zum Zeitpunkt seiner Gewinnung den Graphen einer Führungsfunktion, stimmt aber ohne weitere Stützung und nebenbei wegen der Messfehler, mit der Verzugssituation der Regelstrecke nicht sofort zusammen. Erst die fortwährende komparative Korrektur bewirkt die dauerhafte Annäherung an das Regelstreckencharakteristikum des träger reagierenden, führenden Vergleichssteigungsindikators $\sqrt{a_{vm}}$. Er definiert einen breiteren Stützpunktebereich der Führungsfunktion, der sich mit dem kleineren, über den vom Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ manifestierten Stützpunkteabschnitt abgleicht. Wobei der Mittelwert als breiterer der Führungsfunktion zuordenbarer Stützpunktebereich, geringere Extrapolationsfehler aufweist und deshalb genauer ist, was die graphische Ausrichtung auf das Ansteuerungsziel, nämlich die Deckungsgleichheit der Führungsfunktionsnullstelle mit der Führungsgröße w angeht. Der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ schwankt wegen Messungenauigkeiten und Störeinflüssen stärker und mit ihm die auf die Führungsgröße w zielende Nullstelle der Führungsfunktion. Denn die Führungsgröße w würde nur dann immer genau getroffen werden, wenn der Regelgrößenverlauf vollständig mit allen Stützpunkten ab dem Start fehlerlos abbildbar wäre. Selbst ein vergrößernder Stützpunkteauszug wie vorliegend, vermindert indessen verstärkt über seinen Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ mit jeder weiteren Annäherung zur Regelabweichung null, die Lageabweichungen der Führungsfunktionsnullstelle zur Führungsgröße w .

Der führende Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ hält als Referenzgröße die grundsätzliche Richtung als Änderungsmittelwert ein, denn die Verlaufsnachführung ist kraft periodischen Vergleichs mit dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$, durch den Komparator gewährleistet. Als Synchronisation besteht sie zwar mit den komparativen Maßnahmen dauerhaft, doch ent-

wickeln sich infolge der zeitengen Anschubwirkung der Anregung durch die Stellwertauflösung und der dadurch bedingten Verzugsabweichung, leichte periodische Schwankungen der Regelgröße. Eine schwache Anregung würde mit vergrößerter Rahmenabtastung die periodische Schwankung und mit ihr den Regelgrößenanstieg mindern. Bei schnelleren Strecken ist dieser Effekt nicht so gut sichtbar. Die erhöhte Anregung und die damit stärkeren Stellgrößenschwankungen lassen erst in der unmittelbaren Nähe der Führungsgröße nach. Jetzt muss von Fall zu Fall nur noch ein Grundumsatz von Aktivität aufrechterhalten werden. Dadurch wirkt gleichzeitig die bleibende Regelabweichung selbsttragend minimierend. Zusammengefasst lenkt der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ in Rückwirkung über den Stellwert wiederum seinen *eigenen* Ursprungswert, den Steigungsindikator $\sqrt{a}$. Dieser ist wegen seiner Parameter aufweisenden Herleitung (1.13), anstatt seines Mittelwerts, als Merkmal der Führungsfunktion angegeben.

1.5.2 Mittelwert und Verzug

Der führende Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ und der angegliche Steigungsindikator $\sqrt{a}$ repräsentieren zwei sich gegenseitig stützende und lenkende Führungsfunktionen, **die in ihrer Übereinstimmung auf gleichem Verzugsverhalten gründen und den Streckenverzug dokumentieren**, ohne dass dieser als isolierter Kennwert festgeschrieben ist. Wobei der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ dem stark schwankenden Steigungsindikator $\sqrt{a}$ dort vorgezogen ist, wo ein genauerer Rechenbetrag benötigt wird. Unter beständiger Anregung gibt es eine dem Verzug gemäße Krümmung des Graphen der Führungsfunktion. So bewirkt ein kleinerer Streckenverzug unter Anregung einen steileren Anstieg, dessen Krümmungsverlauf bei größerem Verzug und mit Einhaltung des Nullstellenziels, die Regelgröße dann nicht mehr folgen könnte. Daraufhin würde der Komparator das Vorzeichen ($\pm$) des Stellwertzuwachses yd zurücknehmend setzen, weil der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ seinen Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ überschreitet. Der Steigungsindikator würde durch sein Eingehen in den Mittelwert diesen kurzzeitig trotzdem erhöhen, aber immer schwächer werdend wegen der kontinuierlichen Stellwertabnahme. Deshalb der gleitende Auf- und Abbau des Stellwerts mit der Auswirkung einer Schwankungsdämpfung der Regelgröße. Hingegen gibt es eine Grenze, wo für eine größere Steigung der abbauenden Regelabweichung e_0 (Regeldifferenz) einer Regelstrecke, der Stellwertbedarf zu hoch wird¹⁷. Der die sukzessiv approximative Einhaltung der Führungsfunktion gewährleistende, komparativ veranlasste Stellwertzuwachs yd (in (1.21) als Betrag) schafft dadurch wie sich noch zeigt, zugleich die Voraussetzung für seine eigene Zeitsteuerung mit der Rahmenabtastung td (1.14) über den Taktfaktor tkf und in der Folge den abbauenden Regelabweichungszuwachs ed (1.10 bzw. 1.12).

Der Mittelwert beeinflusst die Steifigkeit der Führungsfunktion und enthält n vergangene Steigungsindikatoren, wobei sich $n = 8...12$ als gut geeignet und flexibel genug erweist. Auch um Variablen einzusparen ist der gleitende Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ aus dem anfallenden

¹⁷Näheres dazu noch im Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

Einzelwert $\sqrt{a}$ mit

$$\sqrt{a_{vm_i}} = \sqrt{a_{vm_{i-1}}} - \frac{\sqrt{a_{vm_{i-1}}} - \sqrt{a_i}}{n} \quad (1.16)$$

bei jedem Schritt i der Rahmenabtastung td verwendet. Außerdem glättet und dämpft der gleitende Mittelwert stärker als das algebraische Mittel, bei gleicher Anzahl von herangezogenen Stützstellen und kommt deswegen mit weniger Schritten aus.

Der Komparatorteil beinhaltet neben dem Bedingungs Umfeld $e0 < 0$ bzw. $e0 \geq 0$, die Folgerungsbeziehung zwischen Steigungsindikator $\sqrt{a}$ und dem führenden Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$. Der aktuelle Steigungsindikator $\sqrt{a}$ ist mit seinem Mittelwert als Referenzgröße, dem führenden Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$, verglichen und liefert als Vergleichsergebnis das Vorzeichen -1 oder $+1$, als Faktor des Stellwertzuwachsbeitrags $|yd|$. Der führende Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ repräsentiert die steuernde Führungsfunktion und unterliegt dank permanenter Veränderung des Mittelwerts, einer durch das Regelwerk gelenkten Anpassungsdynamik.

1.5.3 Die Vergleichsfälle

Die möglichen Vergleichsfälle sind in Abbildung 1.2, in einer Tabelle der Prüfaussagen

Fälle/Bewegung	Vorzeichen		Fall-Element	Hilfs-Term
	Situation	-Faktor		
A. $e0 < 0$			$\neg a$	$-$
1. $ e0 $ kleiner	$e1 < e0$		b	$-$
$\sqrt{a} < \sqrt{a_{vm}}$	negativ	-1	c	$\neg a \wedge b \wedge c$
$\sqrt{a} \geq \sqrt{a_{vm}}$	positiv	$+1$	$\neg c$	$\neg a \wedge b \wedge \neg c$
2. $ e0 $ größer/gleich	$e1 \geq e0$		$\neg b$	$-$
$\sqrt{a} < \sqrt{a_{vm}}$	negativ	-1	c	$\neg a \wedge \neg b \wedge c$
$\sqrt{a} \geq \sqrt{a_{vm}}$	negativ	-1	$\neg c$	$\neg a \wedge \neg b \wedge \neg c$
B. $e0 \geq 0$			a	$-$
1. $ e0 $ kleiner	$e1 > e0$		b	$-$
$\sqrt{a} < \sqrt{a_{vm}}$	positiv	$+1$	c	$a \wedge b \wedge c$
$\sqrt{a} \geq \sqrt{a_{vm}}$	negativ	-1	$\neg c$	$a \wedge b \wedge \neg c$
2. $ e0 $ größer/gleich	$e1 \leq e0$		$\neg b$	$-$
$\sqrt{a} < \sqrt{a_{vm}}$	positiv	$+1$	c	$a \wedge \neg b \wedge c$
$\sqrt{a} \geq \sqrt{a_{vm}}$	positiv	$+1$	$\neg c$	$a \wedge \neg b \wedge \neg c$

Abbildung 1.2: Die möglichen Komparatorfälle

mit dem Bedingungs Umfeld A ($e0 < 0$) und B ($e0 \geq 0$) sowie noch vorbereitend mit den Regelabweichungen $e0$ und $e1$, Betrags vergleichend zusammengestellt. Die jeweils beiden letzten, dem Fallelement c zugeordneten Aussagefälle, vergleichen den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$.

Den Fällen stehen die Vorzeichen des Komparatorausgangs für entgegen wirkende Maßnahmen zur Erfüllung des Regelziels gegenüber. Jedem Aussagefall ist ein Fallelement zugeordnet, das am Ende einer vollständigen Aussage, beim Fallelement c mit den anderen Fallelementen als Hilfstern logisch verknüpft ist. Die verknüpften Hilfstern sind zuletzt minimiert und geordnet.

Die Aussage des Fallelements b ist absolutwertig auf die Annäherung zum Sollwert bezogen. Dazu ist in der Spalte „Situation“ die Vorzeichen behaftete und weniger transparente, zugehörige Beziehung für den präzisierten Komparatorvergleich angeführt. Ist z. B. unter Punkt A.2 die negative Regelabweichung $e0$ kleiner und damit ihr Betrag größer geworden, dann bewegt sich die Regelgröße im Augenblick zum Sollwert hin und mindert mit dem Vorzeichenfaktor -1 des Stellwertzuwachses $|yd|$ den Stellwert y_i .

Schließlich ergeben sich die Fallelemente für den Komparator aus den in Abbildung 1.2 als einzelne Prüfaussagen zusammengestellten Hilfsternen. Sie sind nach dem Vorzeichen in Gestalt des Vorzeichenfaktors (± 1) geordnet:

Alle Fälle, die negatives Vorzeichen (-1) bedingen lauten
 $(\neg a \wedge b \wedge c) \vee (\neg a \wedge \neg b \wedge c) \vee (\neg a \wedge \neg b \wedge \neg c) \vee (a \wedge b \wedge \neg c) = (a \wedge b \wedge \neg c) \vee (\neg a \wedge c) \vee (\neg a \wedge \neg b)$
 und getrennt nach $\neg a$ und a gegliedert: $\boxed{\neg a \wedge (\neg b \vee c)} \vee \boxed{a \wedge (b \wedge \neg c)}$

Alle Fälle, die positives Vorzeichen ($+1$) bedingen lauten
 $(\neg a \wedge b \wedge \neg c) \vee (a \wedge b \wedge c) \vee (a \wedge \neg b \wedge c) \vee (a \wedge \neg b \wedge \neg c) = (a \wedge c) \vee (a \wedge \neg b) \vee (\neg a \wedge b \wedge \neg c)$
 und getrennt nach $\neg a$ und a gegliedert: $\boxed{\neg a \wedge (b \wedge \neg c)} \vee \boxed{a \wedge (\neg b \vee c)}$

Die Verarbeitung im Komparator ist nun festgelegt, indem die Fallelemente a bis c in ihre inhaltliche Bedeutung umgesetzt sind:

Das Vorzeichen in Form des Faktors $\boxed{-1}$ für

$$[(e0 < 0) \wedge ((e1 \geq e0) \vee (\sqrt{a} < \sqrt{a_{vm}}))] \vee [(e0 \geq 0) \wedge ((e1 > e0) \wedge (\sqrt{a} \geq \sqrt{a_{vm}}))] \quad (1.17)$$

oder den Vorzeichenfaktor $\boxed{+1}$ für die Negation zur Gewinnung der Restfälle mit

$$[(e0 < 0) \wedge ((e1 < e0) \wedge (\sqrt{a} \geq \sqrt{a_{vm}}))] \vee [(e0 \geq 0) \wedge ((e1 \leq e0) \vee (\sqrt{a} < \sqrt{a_{vm}}))] \quad (1.18)$$

bzw. einfach für alle Fälle im Bedingungs Umfeld, für die (1.17) nicht zutrifft.

Das Bedingungs Umfeld (Fallelement a) legt die Richtung der Regelabweichung fest. Die restlichen Terme sind Größen vergleichende Aussagen. Die Negation erlaubt die Gewinnung der Restfälle. Die Verknüpfungen (1.17) bzw. (1.18) stellen sicher, dass der zum bestehenden Stellwert addierte (geeignet dimensionierte) Zuwachs stets dasjenige Vorzeichen erhält, das den Stellwert in Richtung Abbau der Regelabweichung verändert, selbst

bei temporären Synchronisationsfehlern. Das betrifft temporäres Abdriften der Zielrichtung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ beim Auftreten von Störgrößen, mit der Folge gegenläufiger Regelgrößen wie das z. B. auch beim Reglerstart möglich ist, was gleichfalls die Überschwingweite mit einschließt. Letztlich *ist die Regelabweichung zu jedem internen Regeltakt und deren Verlauf heraus, in Richtung null gesteuert zurückgeführt*. Damit ist das Kriterium für die **Stabilität** nach Punkt I.a auf Seite 22 erfüllt.

Die Synchronisation und Anpassung an die Verzugsdynamik von Regelstrecken mit dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ und seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ ist selbst etwas verzögert, weshalb erst die Überschwingweite in Erscheinung tritt. Wenn auch im geringeren Ausmaß.

1.6 Die Stellwertnachführung

1.6.1 Die Stellwertgewinnung

Der Stellwert ergibt sich durch Aufsummierung seiner Zuwächse Δy_i , deren Vorzeichen nach (1.17) bzw. (1.18) komparativ festgelegt wurden. Der als skalierte und gestufte Betrag ausgegebene Stellwert y_i ist noch für den unmittelbar auf die Regelstrecke einwirkenden Aktor aufzubereiten.

Für den absoluten Stellwertzuwachs $\Delta y_i = |y_d|$ des Stellwerts y_i stellt sich die gleiche Frage wie beim Komparator: Woher soll ohne Kenntnis der Regelstrecke so ein Zuwachs herkommen?

Hierbei schafft ebenfalls die Führungsfunktion die Voraussetzungen. Durch sie ist auf der Anstiegsachse, der abbauende Regelabweichungszuwachs $\Delta e_0 = ed = |e_0 - e_1|$ über das Arbeitsprodukt¹⁸ und auf der Zeitachse die Rahmenabtastung td (1.14) direkt über den Taktfaktor¹⁹ festgelegt. Wegen Synchronisationsabweichungen bzw. Rundungen, fiel die Entscheidung auf die gemessene unmittelbare Differenz und nicht auf den berechneten Regelabweichungszuwachs ed nach (1.10) bzw. (1.12), obwohl die Distanzen formal gleich sind. Die Regelabweichungszuwächse unterscheiden sich real mit jedem Schritt i gering voneinander. Bei einer Rahmenabtastung td_{i-1} weicht der Stellwertzuwachs $|y_{dv}| \hat{=} |y_{di-1}|$ von seinem Nachfolger $|y_{di}|$ meistens nur geringfügig ab. Deshalb bietet sich der Bezug auf den vergangenen, als Betrag gewonnenen Stellwertzuwachs $|y_{dv}|$ an. Dieser steht dann zu einer Rahmenabtastung in Relation zum aktuellen Betrag des anfallenden Regelabweichungszuwachses $|e_0 - e_1|$, mit $e_0 \hat{=} e_{0i}$ und dem Vorwert $e_1 \hat{=} e_{0i-1}$, woraus bei nutzbarem $|e_0 - e_1| > 0$ das Streckenverstärkungspotential ks entsteht mit

$$ks = \frac{|y_{dv}|}{|e_0 - e_1|} \quad \text{für seinen dämpfenden Mittelwert } ksm \text{ aus} \quad (1.19)$$

$n = 8 \dots 12$ Werten und der Rahmenabtastung zum Schritt i mit ks als Neuwert bei

$$ksm_i = ksm_{i-1} - \frac{ksm_{i-1} - ks_i}{n} \quad \text{nun als gleitender Mittelwert} \quad (1.20)$$

¹⁸wird noch behandelt im Abschnitt „1.7 Das Arbeitsprodukt“ auf Seite 44

¹⁹wird noch behandelt im Abschnitt „1.8 Der Taktfaktor“ auf Seite 47

und schließlich resultiert daraus der neue, als Betrag ermittelte Stellwertzuwachs yd . Dazu kommt noch $anf_{eff\ i}$ zur weiter unten erläuterten Anregung, mit zusammen

$$|yd_i| = ksm_i \cdot |e0 - e1| \cdot anf_{eff\ i}. \quad (1.21)$$

Der gleiche Divisor n wurde auch für den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ in (1.16) verwendet. Je größer dieser Divisor beim Mittelwert ksm ausfällt, desto träger reagiert der Regler, besonders auf verzögerungsarme Regelstrecken. Im angegebenen Umfang von $n = 8 \dots 12$ liegt die Änderung der Anregelzeit für Regelstrecken mit sehr geringem Verzug, im Bereich von etwa 10%.

Die Multiplikation in (1.21) mit dem Betrag des anfallenden Regelabweichungszuwachses $\Delta e0 = |e0 - e1|$ wirkt insofern dämpfend, als sich der zum Vorwert $|yd_{i-1}|$ gehörende aktuelle Betrag $|e0 - e1|$ der anfallenden Differenz $\Delta e0$ aus dem Mittelwert, jetzt beim Nenner von yd_v wegekürzt und nur als Mittelwertsprodukt verbleibt. Bei mit (1.19) und (1.20) aufgelöstem ksm_i für einen Schritt i mit ksm_{i-1} , ist der dem Ausdruck (1.21) entsprechende

$$\text{Term:} \quad |yd_i| = \left(\frac{n-1}{n} \cdot ksm_{i-1} \cdot |e0 - e1| + \frac{|yd_{i-1}|}{n} \right) \cdot anf_{eff\ i}$$

Demnach ziehen Regelabweichungsausschläge, wie durch Störgrößen oder Führungsgrößenänderungen, Stellwertsprünge nach sich.

Der Mittelwert ksm verbleibt im Vergleich zur Differenz $\Delta e0$ verhältnismäßig groß. Diese steht bei ks nach (1.19) stabilisierend *im Nenner*. Ist z. B. $\Delta e0$ zu klein geworden, so wird $|yd|$ in (1.21) zu groß werden, was den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ im Vergleich zu seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) erhöht und den Komparator das Vorzeichen des Stellwertzuwachses $|yd|$ entgegenwirkend ändern lässt. Wäre der Bruch ks reziprok zu (1.19), so würde das den beschriebenen Effekt umkehrend verstärken und zur Instabilität führen, anstatt entgegenzusteuern.

1.6.1.1 Die Anregung

Die zusätzliche Beaufschlagung des Stellwertzuwachses yd (1.21) stellt mit einem Anregungsfaktor den kontinuierlichen Abbau der Regeldifferenz sicher. Der Anregungsfaktor $anf > 1$ (typisch 1,03) bzw. sein angepasster Wert anf_{eff} , erhöht den Stellwertzuwachs. Aufgrund möglicher Messwertestreuung kann sich der reguläre Regelabweichungszuwachs durch deren Auswirkung in Nullnähe, der Regelabweichung anstiegsmindernd überlagern. Deshalb ist ab der Regelabweichung $ue0_{anf} > e0s > 2 \cdot e0ns$ die Anregung quadratisch erhöht, bis sie bei der Konstante $e0ns$ ihren Höchstwert anf_{e0ns} erreicht. Für jede Rahmenabtastung td_i ist der effektive Anregungsfaktor anf_{eff}

mit $(|e0| < ue0_{anf}) \wedge (|e0| > e0ns)$ demnach

$$anf_{eff} = ff_{anf} \cdot (ue0_{anf} - |e0|)^2 + anf \quad (1.22)$$

gesetzt, ansonsten gilt

$$anf_{eff} = anf. \quad (1.23)$$

Der Funktionsfaktor ff_{anf} ergibt sich aus anf_{eff} bei $e0ns$, also nach (1.22) bei $anf_{eff} = anf_{e0ns}$ mit $anf_{e0ns} > anf$, nach ff_{anf} aufgelöst, mit den gegebenen Konstanten

$$ff_{anf} = \frac{anf_{e0ns} - anf}{(ue0_{anf} - e0ns)^2}. \quad (1.24)$$

Die Anregung veranlasst die Stellgröße, genügend stark auf die Regelstrecke einzuwirken, sodass sich mit der Regelantwort, die Regelgröße sicher in Richtung Führungsgröße bewegt. Im Gegensatz zur herkömmlichen Reglerkonzeption, wo im Verlauf der Anstiegszeit eine Funktion regeldifferenzabhängig den Stellwert vorgibt, erweitert hier die Anregung den bereits komparativ gewonnenen Stellwert.

Die benutzten **Anregungsformen** sind zur Unterscheidung zusammengefasst als

1. die *beständige Anregung* als Sammelbegriff, bestehend aus
 - a. der *erhöhten Anregung* nach (1.22) und
 - b. der *einfachen Anregung* nach (1.23),
2. die später behandelte *verstärkte Anregung* nach (1.47) sowie
3. die *Startanregung* nach Abschnitt 1.10.3 auf Seite 73

Hiermit soll ein Anregungsansatz erreicht werden, der die zur Synchronisation nötige Signaldetektion festigt, indem sich Zu- und Abnahme des Stellwerts, vor allem bei kleineren Regelabweichungsänderungen, deutlicher herausbilden. Die durch den Komparator bedingte, unregelmäßige Zu- und Abnahme des Stellwerts erhöht dessen absoluten Zuwachs beim Anregungsfaktor $anf > 1$. Markantere Zuwachsänderungen verkleinern wiederum die Unregelmäßigkeiten des Vorzeichens des Stellwertzuwachses. Ein indessen höherer absoluter Stellwertzuwachs steigert vorzeichenbedingt die Auswirkung multiplikativ, zumal sich der Stellwertzuwachs nach (1.19) auf seinen Vorgänger bezieht.

Die beständige Anregung mit dem Anregungsfaktor anf und die noch zu behandelnde verstärkte Anregung, beziehen sich auf den Vorzeichen gesteuerten Stellwertzuwachs, während die *Startanregung* über die *Voreinstellung des Stellwerts* herbeigeführt ist.

1.6.1.2 Der Zuwachs und die Gewichtung

Letztendlich erfolgt die iterative Zuwachssummierung zum Stellwert y_i mit dem durch das Regelwerk festgelegten Ziel, den Verlauf der Regelabweichung per Steigungsindikator (1.13) mit dem Graphen der steuernden Führungsfunktion (1.16) zu synchronisieren. Das geschieht im Besonderen durch das komparative Vorzeichen als Faktor (± 1) nach (1.17 bzw. 1.18) und dem Betrag $|yd|$ des Stellwertzuwachses aus (1.21) und jedem Schritt i der variablen Rahmenabtastung td (1.14) mit

$$y_i = y_{i-1} + (\pm 1)_i \cdot |yd_i| \quad (1.25)$$

und gestattet mit der Herkunftsangabe seiner Parameter, gleichzeitig einen Überblick zur Regelgesetzmäßigkeit als Ablauffolge. Der Ausdruck (1.25) erzeugt zum Stellwertzuwachs $|yd_i|$ den abbauenden Regelabweichungszuwachs $ed = |e_0 - e_1|$, der auch durch das noch zu behandelnde und Regelstrecken festlegende Arbeitsprodukt²⁰ bestimmt ist.

Der vom Komparatorausgang gesteuerte Wechsel des Vorzeichens in (1.25) zeigt an, ob der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ seinen Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ noch nicht erreicht oder bereits überschritten hat. Das bedingt die sukzessiv approximative Stellwertanpassung, die sich am unstetigen Stellgrößenverlauf erkennen lässt und im Vergleich zu einer geschlossenen Funktionsdarstellung, die Ordinatenebene von der Abszissenzeitebene mittels Komparator abtrennt.

Der maximale Stellwert ist als Skalierung y_{max} ohne Maßeinheit vorgegeben. Erst ein abschließender Gewichtungsabgleich an der Schnittstelle zum Reglerblock bildet das Äquivalent zum Maximalwert der genutzten physikalischen Größe des Stellglieds. Das können z. B. der Phasenwinkel für den Phasenanschnitt bei festgelegter Vollphasen-Leistung, die unmittelbare Leistung in Watt, die Ansteuerung von Schrittschaltmotoren für Positionierungssysteme oder eine andere Gestaltung der Energieübermittlung sein. Der Gewichtungsfaktor zu einer Stellgrößeneinheit ist zu bestimmen mit

$$\text{Gewichtsfaktor} = \frac{\text{Maximalwert z. B. des Leistungsbedarfs}}{y_{max}} \quad (1.26)$$

und daraus folgt die geeignete Umrechnung für das Stellglied des Reglers mit

$$\text{wirksame Stelkleistung} = \text{Gewichtsfaktor} \bullet y_i. \quad (1.27)$$

Bei der Verwendung z. B. zur Positionierung ist zu berücksichtigen, dass nur bei der Regelabweichung $e_0 = 0$ kein Stellwertzuwachs, andernfalls im Minimalfall $yd = yd_{min}$ gilt. Weshalb bei Schwankungen der Regelabweichung mit $e_0 \neq 0$ keine Ruhelage besteht. Ist die Regelung aus konzeptionellen Gründen temporär nicht abschaltbar, so sollte gegebenenfalls der Regelabweichungsbereich im Ruhezustand auf Umgebungswerte von null erweitert werden. Der minimale Stellwertzuwachs yd_{min} sollte nicht einfach auf null gesetzt werden, da der auch für die beständige Anregung erforderliche Stellwertzuwachs yd , ansonsten die Stellgröße nicht mehr verändert.

Nach (1.19) nimmt bei Verkleinerung des Betrags $|e_0 - e_1|$ im Vergleich zum vorherigen Stellwertzuwachs yd_v , das Streckenverstärkungspotential ks und damit sein Mittelwert ksm (1.20) kompensierend zu und umgekehrt bei Vergrößerung ab. Der Anregungsfaktor $anf > 1$ erzielt mit (1.21) bis (1.24) die beständige Anregung der Vorgänge. Der Stellwertzuwachs $|yd|$ (1.21) ist, wie schon hingewiesen, nach unten begrenzt. Beim Mittelwert (1.20) ist die vorgegebene Anzahl n geeignet für verzögerungsarme Strecken und für Speicherstrecken mit und ohne Ausgleich. Sind nur verzögerungsarme Strecken

²⁰Abschnitte „1.7 Das Arbeitsprodukt“ auf Seite 44 und „1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz“ auf Seite 56

bzw. Regelstrecken mit minimalem Verzug im Einsatz, so reagiert die Regelgröße bei Verkleinerung des Divisors n schneller auf Anpassungsbestrebungen. Davon abgesehen wären verzögerungsarme Strecken mit minimalem Verzug, gewöhnlich ohne großen Regelaufwand zu handhaben.

1.6.1.3 Stellgröße und Regelstrecke

Es sind sowohl lineare als auch weitgehend nichtlineare Regelstrecken zu bedienen. Dafür sorgt die iterative Aufsummierung des Stellwerts (1.25) ohne festgeschriebene Beziehung zur Regelabweichung. Dazu bleibt das Vorzeichen des Stellwertzuwachses solange erhalten, bis die komparative Forderung erfüllt ist. Natürlich gilt das ebenfalls zur Kompensation von Störgrößen. Hierbei ist ganz allgemein und besonders für nichtlineare Regelstrecken zu beachten, dass bei einer etwa wegen Sättigung verharrenden bzw. blockierten, nicht den Sollwert erreichenden Regelgröße, **der Stellwert bis zum Maximum erhöht** werden wird. **Der Regler versucht, die Führungsgröße mit seinen Ressourcen zu erreichen. Weshalb entsprechende Vorkehrungen zu treffen sind, wenn der angestrebte Sollwert aus regelungsfremden Gründen nicht erreicht werden kann** und der Hochlauf zum Stellwertmaximum unerwünscht ist.

Gewöhnlich ist beim Regler der Stellwert eng mit der iterativen Rückführung der Regelabweichung gekoppelt. Im genannten Fall ist diese Kopplung gestört, weil das synchrone Zusammenspiel in asynchrones Verhalten von Stellwert und Stellanforderung übergeht. Als **Windup**-Effekt bekannt ist die fortlaufende Parameteränderung (z. B. des I-Anteils bei PID-Reglern) ohne sichtbare Bewegung der Regelgröße. Für diesen Regler allerdings mit dem Unterschied, dass abhängig von der Anforderung, entweder das Minimum y_{min} (z. B. bei Kühlung mit formal negativem Vorzeichen) oder das Maximum y_{max} des Stellwerts schnell erreicht ist und dieser dort abschließend verharret. Er wäre kurzzeitig wieder entgegengesetzt zu bewegen, schon weil der maximale Stellwert skalierend fixiert ist. Das gilt auch für die Fälle, wo das Minimum bzw. das Maximum des Stellwerts nicht ausreicht, um an die Führungsgröße heranzukommen.

Dennoch könnte die Veränderung des Stellwerts bei einer Blockierung der Regelstrecke, ohne Kraftmessung gebremst werden, indem die Stellwertänderung unterbrochen wird,

1. wenn der periodische Vorzeichenwechsel des Stellwertzuwachses yd unterbleibt **und**
2. sich die Regelgröße nicht oder sehr langsam verändert.

Ist der höchstzulässige Stellwert bekannt, so lässt sich der maximale Stellwert y_{max} entsprechend gewichten²¹ (1.26). Im Musterprogramm auf Seite 98 ist so eine Stellwertblockierung nicht berücksichtigt, weil dort nur das grundsätzliche Regelungsprinzip umgesetzt ist. Durch die Regelbasiertheit des Reglers lassen sich Sonderanwendungen leichter ergänzen. Auch erlaubt der sukzessiv approximative Stellwertaufbau (1.25) anhand des

²¹siehe Abschnitt „1.6.1.5 Die Gewichtung des Stellwerts“ auf Seite 40

Vorzeichenfaktors (± 1) des Komparators (1.17) bzw. (1.18) und die selbsttätige Anpassung an die Zeitebene über den Verzug mithilfe der variablen Rahmenabtastung td (1.14), neben zeitinvarianten auch zeitvariante Regelstrecken handzuhaben.

Vornehmlich für nichtlineare Speicherstrecken mit kurzem Grundtakt t_0 , der womöglich mit dem Rechendurchsatz kollidiert ist vorgesehen, die Komparatorausgabe (1.17) bzw. (1.18) nach Vorzeichen zu selektieren und den Stellwert nur bei positiven Zuwächsen auszugeben. Dagegen bei negativem Vorzeichen mit einer **Nullabsenkung**²² den Stellwert auf null abzusenken, während der Stellwert zur Fortsetzung bei positiven Zuwächsen, im Hintergrund gehalten bleibt. So gelingt es, z. B. bei Magnetregelungen, Speicherwirkung zu nutzen und dadurch überschüssige Energie abzubauen. Für Speicherstrecken ist der Zweipunkt-Schaltbetrieb²² wählbar. Die Stufung des Stellwerts ist hierbei nicht genutzt, weil bei negativer oder positiver Stellwertzugabeforderung, entweder kein oder der maximale Stellwert zum Einsatz kommt. Die Ein- und Ausschaltzeiten der Stellgröße richten sich dann nach den Rahmenabtastungen und den Vorzeichen des Komparatorausgangs²³.

Den Stellwert betreffend, ist dessen Ansteuerdynamik beim Zweipunkt-Schaltbetrieb wesentlich enger, als bei der differenzierteren gestuften Ansteuerung. Die großen Wirkunterschiede von Ein- und Ausschaltdauer erfordern eine genauere, regelstreckenbezogene Festlegung der Stellgröße. Daraus ergibt sich bezüglich des noch zu behandelnden Arbeitsprodukts eine begrenztere Einsatzbreite des Reglers, bei annehmbarer Regelgrößen-schwankung. Für Regelstrecken mit Zweipunkt-Schaltbetrieb ist so eine Eingrenzung nicht ungewöhnlich.

1.6.1.4 Die Stellwertstufung

Eine Sequenz von vorzeichengleichen, iterativen Stellgrößenanpassungen hält solange an, bis der Verlauf der Regelabweichung mit dem Graphen der Führungsfunktion wieder übereinstimmt. Kurze Unterbrechungen einer Sequenz sind durch Messwertestreuungen bedingt, was sich im Ablauf als unregelmäßig unterbrochene Vorzeichenfolgen auswirkt. Die Stufung des zur Verfügung stehenden Stellwerts ergibt sich mittelbar aus der Festlegung des maximalen Stellwerts, was der Stellwertskalierung y_{max} entspricht. Sie liegt erfahrungsgemäß bei

$$y_{max} \approx 1000 \text{ Einheiten}, \quad (1.28)$$

für Speicherstrecken mit sehr großem Verzug auch darüber, in einem passenden Bereich. Die Stellwertskalierung y_{max} ist eine feste Bezugsgröße, an der sich Startanregung (1.10.3 auf Seite 73) und Gewichtsfaktor (1.26) ausrichten. Die Stellgrößenauflösung (1.28) reicht aus, um kleine Regelgrößenbewegungen in Nähe der Führungsgröße w , in mehr oder weniger Rahmenabtastungen td zu bewerkstelligen. Eine zu geringe Stellwertskalierung y_{max} und dadurch zu große Stellwertstufung, fördert die bleibende Regelabweichung und ver-

²²Aktivierung siehe Seite 97 beim Schritt 5

²³Näheres in Abschnitt „3.1 Die Programmbeschreibung“ auf Seite 93

längert die Ausregelzeit. Dagegen provoziert die zu hohe Stellwertskalierung trägeres Verhalten mit einem zu flachen Stellgrößenanstieg²⁴.

Der **Grund für die Festlegung** in (1.28) liegt primär in der **geeigneten Stellwertauflösung**, die durchgehend fein genug sein sollte. Bei zu kleiner Stellwertskalierung y_{max} ist wegen (1.26) die Stellwertstufung zu grob mit zu wenig differenzierten Stellwertänderungen, sodass auch kleinere Bedarfe nicht mehr erbracht werden können. Mit der Folge, dass der Stellwert eng um die Führungsgröße, entweder viel zu klein oder bei der Folgestufung viel zu groß ausfällt. Der Übergang zwischen zwei folgenden Regelabweichungen wird zu steil. Dadurch pendelt der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ und sein Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ stärker, was sich im Divisor von (1.40) niederschlägt und eine heftigere Schwankung des Taktfaktors tkf verursacht. Das wirkt wiederum auf die Rahmenabtastung td als Regeltakt zurück und damit wiederholt auf den Stellwert. Mit dem Ergebnis viel zu langer oder nie endend wollender Ausregelzeit in Form von ausgeprägten Regelgrößenschwankungen. Wobei die ersten Stellgrößenschwankungen noch der Überschwingweite zuzurechnen wären. Deshalb ist die Größenordnung der Einstellung in (1.28) so gewählt, dass dergleichen verursachte Unregelmäßigkeiten im Regelgrößenverlauf unterbleiben und zudem die Schrittweite für einen abbauenden Regeldifferenzzuwachs $\Delta e_0 = |ed|$ noch groß genug ist.

Der **Einfluss des Verzugs der Regelstrecken** ist insofern gegeben, als verzögerungsärmere Regelstrecken schneller reagieren und dadurch die Stellenergie schneller abbauen. Denn für eine *langsamere Regelstreckenantwort reicht ein kleinerer Stellwertzuwachs aus als für einen schnelleren Antwortbedarf*, der bei gleicher Taktzeit einen größeren Regelgrößenzuwachs nach sich zieht. Dieser Effekt kurzzeitig zu hoher Stellgrößen im Anlauf, begünstigt während der Anregelzeit ausgeprägte zackenartig periodische Schwankungen der Stellgröße, was aber in der Regel keine weiteren Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Die Abhängigkeit ist aber nicht so ausladend streckenbezogen, dass sich die Stellwertauflösung permanent anpassen müsste.

Ebenso Einfluss hat der Mittelwert ksm in (1.20) als Bestandteil der Ermittlung des Stellwertzuwachses yd (1.21). Der Mittelwert ksm (1.20) steht wiederum mit dem Mittelwert des Steigungsindikators $\sqrt{a_{vm}}$ nach (1.16) insofern in Verbindung, als beide den gemeinsamen Divisor n wegen gleichläufiger Verzögerung aufweisen. Der Mittelwert ksm beeinflusst die Regelantwort und $\sqrt{a_{vm}}$ die Steifigkeit der Führungsfunktion. Der Divisor n verstärkt oder mindert diese Eigenschaften. Die Zuwachsänderung der Stellgröße kann nicht schneller geschehen, als es der Verzug aufgrund der Mittelwertbildung in (1.16) und (1.20) erlaubt. Zusammenfassend gilt:

1. Bei getrennter Behandlung des ansonsten gemeinsam genutzten Divisors n der Mittelwerte ksm und $\sqrt{a_{vm}}$, sei der Divisor zum Mittelwert ksm in (1.20) auf Seite 33 als n_{ksm} und zum Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ nach (1.16) auf Seite 31 als n_{avm} bezeichnet. Dann wird

²⁴siehe ggf. auch Abschnitt „1.6.1.6 Die Änderung der Stellwertskalierung“ auf Seite 42

- a. bei $n_{ksm} > n_{avm}$ die Anregelzeit größer infolge trägerer Stellwertänderung und
 - b. bei $n_{ksm} < n_{avm}$ die Anregelzeit kleiner, mit vergrößerter Überswingweite.
2. Die Stellwertauflösung muss fein genug und somit der Betrag der Stellwertskalierung y_{max} groß genug sein, um die Regelabweichung gering und damit die Schwankungen in der Ausregelzeit kurz zu halten.

Nur um den Effekt der Stellwertstufung darzustellen, ließe sich mit der verwendeten Einstellung $n_{ksm} = n_{avm}$, allein bei *verzögerungsarmen* Regelstrecken die Stufung beim Divisor $n = 8$, bis wenigstens $y_{max} \approx 800$ anpassen, mit geringen Auswirkungen. Hingegen beim Divisor $n = 4$ könnte wenigstens $y_{max} \approx 700$ geeignet erscheinen. Die merkliche Erhöhung der Stellwertstufung über $y_{max} \approx 1000$ hinaus, hätte sowohl für verzögerungsarme als auch für Speicherstrecken erhöhte Anregelzeiten zur Folge. Für beide Streckentypen zusammen, ist freilich der für beide Verzugsarten geeignete Eintrag für Speicherstrecken verwendet.

Erweiternd ist eingerichtet, den Stellwert y_i (1.25) in einen, auf der Zahlengeraden gleitenden, zur Unterscheidung im Programm **formal negativen Stellwert** übergehen zu lassen, wenn z. B. exotherme Prozesse oder Bremsvorgänge zu handhaben sind. Das negative Vorzeichen des Stellwerts ist als zweites Stellglied für Kühlen bzw. negativ Beschleunigen zu interpretieren und ab dem Nullübergang ist der Kühlprozess bzw. die Abbremsung einzuleiten. Dafür gibt es die gesonderte **minimale Stellwertskalierung** y_{min} , der ein negativer Wert in geeigneter Größe zuzuweisen ist. Er bedingt aus Sicht positiver Regelrichtung²⁵ $sf = +1$ (Regelgrößen gleichläufig) z. B. energetisch einen Entzug an der Messstelle, obwohl das lediglich mit Energieaufwand zu erreichen ist. Die Alternative könnten zwei Reglereinheiten mit z. B. gleichen Messstellen und entweder gegenteilig oder zügiger aber Energie steigernd, gleichzeitig wirksamen Stellwertausgaben sein. Der Standardeintrag²⁵ beträgt $y_{min} = 0$, ohne Nulldurchlauf in den negativen Stellbereich.

Bei nichtlinearen Speicherstrecken mit kleinstem Grundtakt t_0 und Nullabsenkung, wird in der Regel nur ein mehr oder weniger großer Ausschnitt der Stellwertskalierung y_{max} wegen der schnellen Stellwertzunahme genutzt werden. Bei einer Skalierungsstufung im unteren einstelligen Bereich ist zu überlegen, gleich den Zweipunkt-Schaltbetrieb²² zu aktivieren. Gegebenenfalls ist deshalb bei der Stellwerteinstellung die Gewichtung entsprechend anzupassen.

1.6.1.5 Die Gewichtung des Stellwerts

Die Gewichtung der Stellgröße betrifft einerseits die grundsätzliche Abstimmung der Stellwertskalierung y_{max} mit dem Gesamtumfang des eingesetzten Stellwerts und andererseits

²⁵siehe Abschnitt „3.2 Die Programmkodierung“ auf Seite 98

nur die Feinabstimmung dieses Stellwertbereichs bezüglich der Auswirkungen auf die Regelstrecke. In diesem Falle geht es um eine Möglichkeit der Handhabung der engeren Stellwertabstimmung.

Es ist bei dem Regler angebracht, elektrische Heizungen mit elektronischen Schaltern anzusteuern. Der Idealfall wäre bei ohmscher Last eine phasensynchrone Soforteinschaltung mit Phasenanschnitt- und Phasenabschnitt-Steuerung, die zudem auf die Leistungsinusfläche einer Halbphase umgerechnet ist. Da ansonsten am Halbphasenanfang und am Halbphasenende die Abweichung der Leistung zur numerischen Vorgabe einer Stellwertstufung, am größten ist. Jedoch gleicht die iterative Annäherung des Reglers den Leistungsfehler aus, wie auch das Anwendungsmuster 2.1 auf Seite 92 zeigte. Dadurch kann der Aufwand für die phasensynchrone Leistungsflächenberechnung und vor allem den netzphasensynchronen Abgriff an der Wirkstelle, entfallen.

Trotz Abstimmung der einzusetzenden Stelleinrichtung ist es vielleicht zweckmäßig, den Stellwert noch nach (1.26) fein abgleichen zu können. Bei genügend Reserven ließe sich die Eingrenzung des Stellwerts vornehmen. Überschaubar wäre, die Stellwertausgabe phasenbezogen mit dem Grundtakt t_0 zu kombinieren. Das beträfe die restlose Übereinstimmung der Grundtaktzeit durch eine Anzahl n_p mehrerer Perioden T_p der Netzfrequenz mit $t_0 = n_p \cdot T_p$, also $t_0 \bmod T_p = 0$. Dazu wäre die Grundtaktzeit t_0 durch den größten Betrag des Stellwerts, nämlich durch die Konstante y_{max} (1.28) zu teilen, um den vorläufigen Zeitschritt t_{zv} mit

$$t_{zv} = \frac{t_0}{y_{max}} \quad [\text{Zeiteinheiten}]$$

als 1 Stellwerteinheit t_{zv} der Netzperiodenteilung zu erhalten. Sodass umgekehrt, jeder Grundtakt t_0 aus y_{max} Zeitschritten t_{zv} besteht. Steht nun ein großzügig geplanter Stellwert mit einer Reserve y_{res} zur Verfügung, so lässt sich das zum effektiven maximalen Stellwert $y_{max\,eff}$ mit

$$y_{max\,eff} = y_{max} + y_{res} \quad (1.29)$$

summieren. Womit der definitive Zeitschritt t_z für den aufgeteilten Grundtakt nun

$$t_z = \frac{t_0}{y_{max\,eff}} \quad [\text{Zeiteinheiten}] \quad (1.30)$$

lautet und y_{max} Zeitschritte t_z nur noch einen größten Teil des Grundtakts t_0 ausmachen. Aber es gilt nach wie vor die Skalierung des maximalen Stellwerts y_{max} nach (1.28) und damit ist die Grundtaktzeit t_0 bei 100 % Stellwert infolge der stillen Reserve y_{res} nicht voll ausgeschöpft. Am Musterprogramm (ab Seite 98) müsste keine Änderung vorgenommen werden, weil sich die Skalierung der Stellgröße immer auf y_{max} (1.28) bezieht.

Es wird in nicht wenigen Fällen angebracht sein, elektronische Schalter nur im Nulldurchgang zu schalten, weil induktive bzw. kapazitive Lasten anfallen. Bei solchem Sachverhalt ist der Grundtakt auf mehrere Frequenzperioden auszudehnen, wenn sich die Steilheit der Schaltflanken durch geeignete Beschaltung nicht genügend abflachen lässt. Bei-

spielsweise würde bei 10 Netzperioden eine effektive maximale Teilung von 20 Halbphasen-Nulldurchgängen anfallen, anstatt gemäß Skalierung die y_{max} -Teilung. Dazu müsste am Musterprogramm ebenso keine Änderung vorgenommen werden, weil am elektronischen Schalter selbst, der Nulldurchgang mehr oder weniger gut aktiviert werden wird. Die Schwankungen um die Führungsgröße w werden dann zusammen mit der Überschwingweite, bei Speicherstrecken leicht zunehmen. Dagegen sind die Auswirkungen bei verzögerungsarmen Strecken durchaus kritischer, weil diese schneller reagieren und sich größere Veränderungen innerhalb halber Netzperioden ergeben können.

1.6.1.6 Die Änderung der Stellwertskalierung

Der maximale Stellwert ist als Stellwertskalierung y_{max} in (1.28) typisch festgelegt. Sie beeinflusst die Stellwertänderung und ist deshalb Bestandteil der komparativen Synchronisation des Regelabweichungsverlaufs mit dem Graphen der Führungsfunktion. Der Stellwertzuwachs $|yd|$ (1.21) ist über den realen Betrag $|e_0 - e_1|$ des abbauenden Regelabweichungszuwachses ed in (1.19) gewonnen, der wiederum vom Arbeitsprodukt P_A abhängt. Die Stellwertskalierung beeinflusst den Betrag $|yd|$ des Stellwertzuwachses. Eine zu kleine Stellwertskalierung y_{max} und damit zu große Skalierungsstufung, verlängert die komparative Synchronisation des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ (1.13) mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16). Weiterhin forciert sie beim Stellwertverlauf die zackenartigen Schwankungsperioden exorbitant und überdies die bleibende Regelabweichung. Umgekehrt beruhigt und verlangsamt eine zu große Stellwertskalierung y_{max} , mit folglich zu kleiner Stufung, den Regelgrößenanstieg übermäßig.

Bei Vergrößerung der Stellwertskalierung unter Beibehaltung der sonstigen Größen wie Gewichtungsfaktor (1.26) (also mit entsprechender Erhöhung des maximalen Leistungsbedarfs), verlagert sich beispielsweise die Relation des Stellwerts y_i in Höhe der Führungsgröße w , zu seinem mit der Stellwertskalierung deckungsgleichen maximalen Betrag y_{max} nach unten. Die Führungsgröße ist bereits erreicht bei geringerem Prozentanteil zum maximalen Stellwert y_i , weil sich ebenso Zahlenraum und Leistung vergrößern. Hierbei muss sich der Regelgrößenanstieg nicht den geänderten Proportionen gemäß verhalten. Es könnte nämlich sein, dass vor allem wegen der frei wählbaren Startanregung, diese vorher infolge der Skalierungsbegrenzung nicht ausgeschöpft werden konnte und die Skalierungserweiterung jetzt die Begrenzung aufhebt. In so einem Fall wäre die Startanregung zu vermindern.

1.6.2 Der Einsatzpunkt der Regelung

Es besteht die Regelabweichung esp , ab der die Regelung erst bei Unterschreitung mit der geforderten Stellwertanpassung einsetzt. Der Betrag von esp stellt sich selbsttätig ein, abhängig vom Verzug der Regelstrecke²⁶. In der Situation $Regeldifferenz \geq esp$ wird

²⁶siehe in Abschnitt 3.1 unter Bearbeitungsschritte Schritt 4 auf Seite 96

generell 100 % Stellwert ausgegeben. Für die Stellgröße sollten wie üblich, genügend Reserven hinsichtlich der Distanz zum vollen 100 % Stellwert zur Verfügung stehen. Es wird vorausgesetzt, dass die Führungsgröße, Stellgröße und Verhalten der Regelgröße betreffend, auch erreicht werden kann, insbesondere bei nichtlinearen Regelstrecken. Andernfalls verlängert sich bestenfalls die Anregelzeit, Speicherstrecken mit Ausgleich werden infolge Energiemangel den Sollwert nicht erreichen. Wenn die Führungsgröße im Idealfall mit 50-60 % des maximalen Stellwerts zu halten ist, wird sich das beim Regelstrecken übergreifenden Einsatz nicht unbedingt einhalten lassen. Doch ist der Bereich von 15 % bis 80 % noch praktikabel. Mit größeren Überschwingweiten verbunden sein könnte die Situation bei z. B. nur 5 % genutztem Stellwert und geringer Regelabweichung beim Start, ohne erneute Einstellung der Startanregung. Größere sprunghafte Stellwertbewegungen treten, wegen der iterativen Stellwertänderung, nur bei unvermittelt stärkeren Störgrößen oder dergleichen Führungsgrößenänderungen auf.

Im Rahmen größerer Regelabweichungen, etwa ab 100 Einheiten (z. B. Grad Celsius), ist es bei kleinerem Streckenverzug wie ihn verzögerungsarme Strecken aufweisen zweckmäßig, die Regelabweichung esp nicht zu groß zu wählen, weil dadurch die bremssende Steigungskontrolle mit in der Folge längerer Anregelzeit früher einsetzt, obwohl eine kürzere Anregelzeit passen würde. Während bei Trägheit und folglich größerem Streckenverzug die Regelabweichung esp größer zu wählen ist, weil die Anregelzeit länger ausfallen muss. Die Anregelzeit ergibt sich aus dem vorliegenden Regelalgorithmus durch die Führungsfunktion. Bei der Anpassung geht es also darum, die Größenordnung der Regelabweichung esp so klein zu halten, dass die Krümmung des Graphen der Führungsfunktion noch ausreicht um die Regelgröße zum Sollwert zu führen, ohne dass bereits zu frühzeitig die Führungsfunktion den Regelgrößenverlauf bestimmt. Dazu sind die Parameter um esp auf praktikable Werte eingestellt. Selbst mit einem großen Steigungsindikator, der einen kurzen Streckenverzug ausdrückt, ist immer noch eine leichte Krümmung gegeben. Zusammenfassend hat die Kontrolle der Regelgröße mithilfe der Führungsfunktion, im Vergleich zum 100%-Stellwert bei $|e_0| \geq esp$, eine Anstiegsminderung zur Folge. Die Anstiegsminderung kann wegen des flexiblen Einsatzpunkts esp bei verzögerungsarmen Strecken später einsetzen als bei Regelstrecken mit größerem Verzug.

Deshalb ist die Regelabweichung esp dermaßen gesteuert, dass die volle Stellgröße gerade so lange genutzt wird, dass die Verlaufskontrolle der Führungsfunktion die Überschwingweite noch gering halten kann. Das Kriterium für die Beurteilung so eines Vorgangs ist die Wirkung von Regelstreckenverzug und Stellgrößenzuwachs, die sich wiederum durch die Steigung der Regelgröße nach (1.15) manifestiert. Zur Steuerung wird der gemessene Tangens in einen Tangensbereich vom Minimum $tnmin$ bis zum Maximum $tnmax$ eingeordnet und in Relation zu einem esp -Bereich, ebenfalls mit Minimum $espmín$ und Maximum $espmáx$, gesetzt. Die Beziehung hierfür lautet

$$\frac{espmáx - espmín}{tnmax - tnmin} = \frac{espmáx - esp}{\tan \varphi - tnmin}, \quad (1.31)$$

die nach esp aufgelöst ist. Zur Beruhigung der Werteschwankungen ist esp z. B. auf acht

Regelgrößeneinheiten gerundet und zudem nach unten und oben auf $esmin$ und $esmax$ begrenzt. Die Linearität der Beziehung begünstigt die größeren Tangenswerte.

Wichtig ist eine bereits voreingestellte Startanregung²⁷ beim Anlauf des Reglers. Der Stellwert ist damit groß genug, um eine minimale Anregelzeit von Beginn an erbringen zu können. Ein anfänglich zu geringer Stellwert würde die Anregelzeit verlängern. Da die Zurücknahme des bestehenden Parameters esp , über die Steigung detektiert, nur bei kürzerem Streckenverzug geschieht, darf beim Start die Verzugszeit T_u groß sein. Bei genügender Startanregung sorgt die Verankerung des Steigungsindikators durch die Grenzwertigkeit²⁸, zusammen mit der komparativen Stellwertsteuerung und dem Regelungseinsatzpunkt esp , für das zügige Anstiegsverhalten der Regelgröße.

1.7 Das Arbeitsprodukt

Das Arbeitsprodukt P_A schafft die algebraische Voraussetzung für die zeitliche Anpassung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ an die Regelstrecke. Zu einem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ existiert ein oberer Eckwert²⁹ als Bereichskonstante mit formal *größtem Steigungsindikator* $\sqrt{a_{oe}} > 0$, obwohl dieser technisch überlaufen werden könnte. Desgleichen ist der *Grundtakt* $t0$ als unterer Eckwert der Rahmenabtastung td ebenfalls eine Bereichskonstante. Die beiden Konstanten benennen den *Regelstreckenbereich* mit dem kleinsten Verzug. *Er definiert mit der Randregelstrecke den verzugärmsten Rand einer Menge von Regelstrecken über ihr Steigungsverhalten der Regelgröße.* Der Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ mit $\sqrt{a_{oe}} \geq \sqrt{a_i} \geq \sqrt{a_{ue}}$, bezeichnet die Steigungsmaßzahl von sowohl einer einzigen unter mehreren ausgewählten Regelstrecken, als auch diejenige der Änderungsfolge i von Rahmenabtastungen td , aufgrund von situativen Verzugsänderungen sowie unterschiedlichster Stellgrößenauswirkungen. Die Begrenzung $\sqrt{a_{ue}}$ als unterer Eckwert des Steigungsindikators bei größtem Streckenverzug, ist eigentlich technisch nicht gegeben³⁰, bringt aber dennoch Benennungsvorteile.

Nach (1.13) gilt für eine Rahmenabtastung td der Folge i , mit der jeweiligen Regelabweichung $e0 \hat{=} e0_i$ und ihrem Vorwert $e1 \hat{=} e0_{i-1}$, genauso die leicht umgestellte Beziehung

$$\sqrt{a_i} \cdot td_i = f_{allg}(|e0|, |e1|, e0s) \quad (1.32)$$

und laut Festlegung als Eckwerte, sollte letztlich auch für den Bereichsrand die Beziehung

$$\sqrt{a_{oe}} \cdot t0 = f_{allg}(|e0|, |e1|, e0s) \quad (1.33)$$

gelten. Daraus ergibt sich, das für das Verfahren bedeutende Verhältnis zur Verzugsanpassung, nämlich die Forderung der Gleichsetzung der Betriebsbeziehung (1.32) mit der

²⁷siehe dazu auch Abschnitt „1.10.3 Die Startanregung“ auf Seite 73

²⁸siehe dazu Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

²⁹siehe fett hervorgehoben Seite 17 unten

³⁰ist im nächsten Abschnitt 1.8, dem Absatz ab (1.43) auf Seite 51 kurz erläutert

Randbeziehung (1.33) durch

$$\boxed{\sqrt{a_i} \cdot td_i \stackrel{!}{=} \sqrt{a_{oe}} \cdot t0}. \quad (1.34)$$

Die rechte Seite der Gleichsetzungsforderung besteht aus Konstanten, während auf der linken Seite die nachgeführten Größen stehen. Aus der als realisiert betrachteten **Forderung** in (1.34) ist im Weiteren die Maßnahme ihrer **Umsetzung** hergeleitet, nämlich die Gewinnung des Taktfaktors³¹ und damit die Bereitstellung der variablen Rahmenabtastung td_{i+1} für den jeweiligen Folgeregeltakt.

Das Produkt aus den Konstanten $\sqrt{a_{oe}}$ und $t0$ ist das Arbeitsprodukt P_A mit

$$P_A = \sqrt{a_{oe}} \cdot t0 \quad [\text{Zeiteinheiten}]. \quad (1.35)$$

P_A ist immer positiv. Aus (1.32) und (1.33) folgt mit der Gleichsetzung in (1.34), wegen der dort real um P_A schwankenden Anpassung, im Idealfall

$$P_A = f_{allg}(|e0|, |e1|, e0s). \quad (1.36)$$

Durch die im Regelprozess erfüllte Gleichsetzung von (1.34) wird wegen (1.36) das *Arbeitsprodukt* P_A , neben Steigungsindikator $\sqrt{a}$ und Rahmenabtastung td in (1.32), *Bestandteil der Führungsfunktion*.

Das statische Arbeitsprodukt P_A (1.35) kennzeichnet einen Gültigkeitsbereich für Regelstrecken. Seine Faktoren $\sqrt{a_{oe}}$ und $t0$ sind die zwei Einstellparameter des Reglers. Ein gleichbleibendes Arbeitsprodukt bewirkt innerhalb einer Rahmenabtastung td einen *steigungsunabhängigen* und faktisch von der Regelabweichung $|e0|$ bestimmten vereinheitlichten, abbauenden Regelabweichungszuwachs $|ed|$ (1.10 bzw. 1.12), weil alle restlichen Parameter zur Berechnung von $|ed|$ als Konstanten fungieren. Die Faktoren des Arbeitsprodukts definieren bei gleichem Produkt, divergente Regelstrecken mit *unterschiedlichem* Verzug.

Die beiden Faktoren können für ein bestimmtes Arbeitsprodukt unter Beibehaltung seines Betrags, ohne größere Auswirkung verändert werden, soweit nicht grundlegende Gesetzmäßigkeiten dagegen sprechen. Das betrifft besonders den Grundtakt $t0$, der der Abtastzeit beim oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators entspricht und im Zweifelsfall eher kleiner zu wählen ist, als die bekannten Einstellregeln vorschreiben. Die Abtastzeit unterliegt was ihre Vergrößerung betrifft, den Einstellregeln für digitale Regelkreise und was ihre Verkleinerung angeht, zusätzlich dem Rechendurchsatz der Hardware. Die Regelstreckeneinstellung ist für ein breites Streckenverzugspektrum gültig und deshalb mag bei oberflächlicher Betrachtung, der Grundtakt für längere Verzugszeiten als zu klein erscheinen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die variable Rahmenabtastung td (1.14) als interner Regeltakt, dann ein Vielfaches des Grundtakts $t0$ ausmacht. Wenn beide Parameter festliegen, sind sie bei gleichem Arbeitsprodukt veränderbar. Ferner ist es möglich,

³¹siehe dazu den anschließenden Abschnitt „1.8 Der Taktfaktor“ auf Seite 47

mehrerer Arbeitsprodukte für eine Regelstrecke zu verwenden. Das ist insofern plausibel, als ein Arbeitsprodukt einen ganzen Bereich von Regelstrecken abdeckt und sich Bereiche überschneiden können. So kann für eine Regelstrecke bei konstantem Grundtakt t_0 der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators größer sein, als er eigentlich für diese Regelstrecke ausfallen müsste. Durchgehende Regelstreckenbereiche sind hinsichtlich ihres Verzugs *allein mit den zwei Einstellparametern abdeckbar*, indem der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators mit dem Grundtakt t_0 , dem *Bereichsrand* mit der Regelstrecke des *kleinsten Verzugs* zugeordnet ist.

Bei der Substitution von $\sqrt{a} \cdot td$ durch das Arbeitsprodukt P_A nach (1.34) zeigt sich beim abbauenden Regelabweichungszuwachs, mit formal $\Delta e_0 = |ed|$ in (1.10) bzw. (1.12), dass dieser neben der Konstanten e_0s , außer dem im Regelprozess konstanten P_A , nur noch vom Betrag $|e_0|$ der Regelabweichung abhängt. Was der Beleg dafür ist, dass der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) und die Rahmenabtastung td (1.14), bei *gleichem* Arbeitsprodukt P_A (1.35) wegen (1.34) und *infolgedessen verzugsunabhängigem* Regelabweichungszuwachs ed , verändert werden können. Dank der erfüllten Forderung der Gleichsetzung der Betriebsgrößen $\sqrt{a}$ und td mit den Randkonstanten in (1.34), bleibt für jeden Betrag einer Regelabweichung $|e_0|$ der sich bis zur Regelabweichung null *verkleinernde*, abbauende Regelabweichungszuwachs ed bei *gleichem* Arbeitsprodukt P_A auch für jede Regelstrecke gleich. Er ist wegen des (allerdings gerundeten) Taktfaktors tkf für jede Rahmenabtastung td eingehalten und auch mittels komparativ gewonnenem Vorzeichen des bereitgestellten Stellwertzuwachses $|yd|$ (1.21), unter Nutzung der Beziehung in (1.19). Folgenlose Ungenauigkeiten ergeben die den Grundtakt t_0 betreffenden Abtastvorgänge, wegen des Zwangs zur quasianalogen Signalannäherung digitaler Systeme. Weshalb zusammengekommen das Randkriterium für die **Stabilität** nach Punkt I.b auf Seite 22 ebenfalls erfüllt ist.

Weitere Eigenschaften

Die Verarbeitung der angefallenen Daten eilt ablauftechnisch bedingt, deren Erfassung um einen Regeltakt, der Rahmenabtastung td nach. Der abbauende Regelabweichungszuwachs des laufenden Regeltakts wurde bereits im vorherigen Regeltakt td angestoßen. Doch ist die wirkungstechnische Abgrenzung innerhalb einer Rahmenabtastung allenfalls bei stark verzögerungsarmen Strecken möglich, denn die Wirkgrenzen sind fließend. Außerdem bringt die Rundung des noch zu behandelnden Taktfaktors³² kleine Synchronisationsabweichungen bei der komparativen Anstiegssteuerung, vermöge des Stellwertzuwachses $|yd|$ (1.21), mit sich. Die Auswirkungen sind allerdings unerheblich.

Mit der erfüllten Forderung der Gleichsetzung der beiden Seiten in (1.34) determiniert das Arbeitsprodukt der linken Seite, das Verhältnis der zwei variablen Parameter zueinander. Ihr konstantes Produkt adaptiert das Verzugsverhalten von konzeptionell festgelegten Regelstrecken. Daraus ergibt sich bei der Randregelstrecke eine Relation von Steigung und Zeit von oberem Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators zum Grundtakt t_0 , die an alle Regelstrecken des Regelstreckenbereichs weitergegeben wird. Doch das beeinflusst im

³²siehe dazu nachfolgenden Abschnitt „1.8 Der Taktfaktor“

Vergleich zu abweichenden Einstellungen anderer Randregelstrecken allenfalls die Anregelzeit. Denn es besteht die funktionelle Trennung der Rahmenabtastung td in der Zeit auf der Abszissenebene von der adaptiven Angleichung der Stellgröße über die Regeldifferenz der Ordinatenebene. Die Differenzen zweier Regelabweichungen entsprechen der Variable ed , die für alle Regelstrecken gleich verlaufen und vom Arbeitsprodukt abhängen. **Die Adaption aller Regelstrecken ist somit auf die sukzessiv approximative Angleichung der Stellgröße reduziert.** Ihre Rechenvorschrift ist in (1.25) angeführt. Die Anpassung der Rahmenabtastung td (1.14) mithilfe des Taktfaktors tkf , erfolgt also nach der durch (1.34) vorgegebenen Relation. Die Adaption der Stellgröße basiert dagegen auf der komparativen Synchronisation des Verlaufs der Regelabweichung mit dem Graphen der Führungsfunktion. Sie ermöglicht die iterative Anpassung der Stellgröße, zusammen mit der verzugsorientierten Relation aus Steigung und Zeit, nämlich mit dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ und der Rahmenabtastung td .

1.8 Der Taktfaktor

Der Taktfaktor tkf ist Bestandteil der Rahmenabtastung td (1.14), die zur Gewinnung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ (1.13) bekannt sein muss. Ausgehend von der erfüllten Forderung in Gleichung (1.34) und zugleich daraus rückschließend durch geeignete Maßnahmen die Erfüllung zu gewährleisten, zeigt deren Umstellung für Rahmenabtastung und Grundtakt bei $td \geq t_0$ und folglich $\sqrt{a_{oe}} \geq \sqrt{a}$ mit

$$\frac{td_i}{t_0} = \frac{\sqrt{a_{oe}}}{\sqrt{a_i}}, \quad (1.37)$$

dass sich die Größen der Zeitachse wie die der Wurzeln der Anstiegsachse verhalten. Dadurch kann bei einem mit Hintergrund bekannten $\sqrt{a_{oe}}$, die Relation zu einem nur numerisch vorliegenden $\sqrt{a_i}$ bemessen werden. Der Steigungsindikator ändert sich bei einem Zeitschritt i von der Rahmenabtastung td_{i-1} zu td_i , ganz abgesehen von Messungenauigkeiten, allenfalls nur sehr gering, aber im Durchschnitt ganz sicher. Deshalb ist anstatt des Steigungsindikators $\sqrt{a}$, der mittelwertige Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ nach (1.16) und zugleich ebenso wegen seiner Dämpfung verwendet. Im Gegensatz zum Komparator ist jetzt der größte Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ die Referenzgröße. Eingesetzt ist der vorherige Mittelwert $\sqrt{a_{vm_{i-1}}}$ aus der vergangenen Rahmenabtastung td_{i-1} mit

$$\frac{td_i}{t_0} = \frac{\sqrt{a_{oe}}}{\sqrt{a_{vm_{i-1}}}}, \quad (1.38)$$

da die Auswertedaten erst nach einer abgeschlossenen Rahmenabtastung td_i zur Verfügung stehen. Beim Reglerstart reicht es aus, mit der Gleichsetzung von $\sqrt{a_{vm}} = \sqrt{a_{oe}}$ zu beginnen. Im weiteren Regelprozess passt sich der Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ über den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ der Regelstrecke laufend an.

Aus (1.14) geht die Rahmenabtastung td hervor mit dem variablen, ganzzahligen Taktfaktor tkf und dem konstanten Grundtakt $t0$. Nach (1.38) und mit Substitution von td (1.14) durch seine Faktoren entsteht die Erweiterung

$$\frac{tkf_i \cdot \boxed{t0}}{\boxed{t0}} = \frac{\sqrt{a_{oe}}}{\sqrt{a_{vm_{i-1}}}}, \quad (1.39)$$

womit $t0$ entfällt. Diverse Maßnahmen verhindern, dass der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ null annimmt. Doch kann je nach Regelstrecke, bei der Startinitialisierung ein angepasster Steigungsindikator vorteilhaft sein, denn umso früher ist der Komparator mit Echtwerten aktiv. Nun nach $tkf \geq 1$ abgerundet und als positive Ganzzahl aufgelöst, gibt das auf die Abfolge bezogen mit $(\sqrt{a_{vm_{i-1}}} > 0) \wedge (\sqrt{a_{oe}} \geq \sqrt{a_{vm_{i-1}}})$

$$tkf_{i_{gerundet}} = \text{Ganzzahl} \left(\frac{\sqrt{a_{oe}}}{\sqrt{a_{vm_{i-1}}}} \right). \quad (1.40)$$

Der Taktfaktor tkf_i (1.40) ist aus dem als erfüllt angenommenen Term (1.34) für *jede* Rahmenabtastung td_i entstanden. Auf die Verzugsrückmeldung ist deshalb schnellstmöglich reagiert, was die *Phasenverschiebung reduziert*. Mit der Gleichsetzung von $\sqrt{a_i} \cdot td_i$ mit P_A (1.35) ist der Regelabweichungszuwachs ed (1.10) bzw. (1.12) für ein Arbeitsprodukt vereinheitlicht und damit durch eine einzige Variable, nämlich der Regelabweichung $|e0|$ bestimmt. Was im Regelprozess die alleinige Abhängigkeit des Taktfaktors tkf vom Steigungsindikator herbeiführt. Doch ist zu berücksichtigen, dass die Änderung des größten Steigungsindikators $\sqrt{a_{oe}}$ im Dividenten von (1.40) den Taktfaktor verändert. Was bei gleichem Arbeitsprodukt P_A (siehe dort Seite 45 unten) infolge der dann gleichzeitigen Änderung des Grundtakts $t0$, ohne Auswirkungen bleibt. Der Regeltakt kann somit über den Taktfaktor bestimmt werden, weil sich der verwendete Verzug über die Steilheit der Regelgröße festlegen lässt und sich nach der Stellgröße ausrichtet³³. Diese ist mittels der komparativen Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert angepasst³⁴.

Ganzzahlrundung und komparative Synchronisationsungenauigkeiten erfüllen die Forderung (1.34) sowie (1.36) zum Arbeitsprodukt real immer nur angenähert. Es gilt daher, ausgehend vom Fall einer Division ohne Rest, nach (1.40)

$$\text{maximaler prozentualer Rundungsfehler} < \left(1 - \frac{tkf - 1}{tkf} \right) \cdot 100 \quad (1.41)$$

was einem zu geringen Taktfaktor tkf mit dem **Rundungsfehler** $< \frac{100}{tkf} \%$ entspricht. Mit der Höhe des Betrags des Taktfaktors sinkt der prozentuale Rundungsfehler.

Für den Beginn einer neuen Rahmenabtastung wird eine Anzahl von Grundtakten solange abgewartet, bis sie mit dem Betrag tkf aus (1.40) übereinstimmt. Erst dann erfolgt

³³siehe dazu den Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

³⁴siehe dazu Abschnitt „1.5 Der Komparator“ auf Seite 28

der Eintritt in das Reglerprogramm, um unter anderem mit der Ermittlung des Steigungsindikators $\sqrt{a_i}$ zu beginnen. **Innerhalb eines Grundtakts t_0 muss der periphere Durchlauf und der des gesamten Reglerprogramms, mit Messwerterfassung und Berechnung erfolgt sein**, da der Grundtakt als kleinste Rahmenabtastung die Berechnungszeit dafür bereitstellt.

Mit der Ermittlung des Taktfaktors tkf ist nun die Forderung zur Gleichung (1.34) mit dem gewonnenen Steigungsindikator td erfüllbar und es sind alle Voraussetzungen für den Betrieb des Reglers angelegt. Weitere Ausführungen vertiefen das Zusammenwirken der einzelnen Funktionsteile.

Zusammenfassend leitet jeweils das Ende einer variablen Rahmenabtastung td_{i-1} (1.14) einen neuen Regeltakt i ein: Zur Synchronisation vergleicht der Komparator mit (1.17) oder (1.18) den aktuellen und nicht gefestigten Steigungsindikator $\sqrt{a_i}$ (1.13) mit seinem stabilen und ebenfalls aktuellen Mittelwert $\sqrt{a_{vm_i}}$ (1.16). Das Ergebnis ist der Vorzeichenfaktor $(\pm 1)_i$ zum bereitgestellten Stellwertzuwachs $|y d_i|$. Mithilfe des dadurch angepassten Stellwerts y_i wird die Regelgröße synchron zur Führungsfunktion nachgeführt. Die Führungsfunktion ist durch den aktuellen Mittelwert $\sqrt{a_{vm_i}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a_i}$ abgebildet.

Der Taktfaktor tkf und das durch ihn repräsentierte Verzugsverhalten schwankt infolge partieller Auswirkungen der Stellenergie im geregelten Objekt. *Die komparative Synchronisation ist die Basis einer geeigneten zeitlichen Phase der Stellgrößenänderung mit dämpfender Eigenschaft.* Zur Dämpfung tragen die Mittelwertbildung nach (1.16) und vor allem die Regeltaktanpassung bei. Die Gleichsetzung in (1.34) und anschließend die Gleichung (1.37) können hinsichtlich der Regelgrößenführung nur dann erfüllt sein, wenn der Verlauf der Regelabweichung mit dem Graphen der steuernden Führungsfunktion übereinstimmt. Das bewirkt der Komparator (1.17 bzw. 1.18) mit dem iterativen Vergleich des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ (1.13) mit seinem Mittelwert, der steuernden Führungsfunktion $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16). Der Prüfvergleich bei jedem Grundtakt t_0 mit dessen aufsummierter Anzahl und dem nach (1.40) ermittelten Taktfaktor tkf , geschieht vor dem Eintritt in einen neuen Rechendurchgang. Die ablauftechnischen Maßnahmen finden jeweils am Beginn einer Rahmenabtastung td statt, nachdem der neue Stand der Regelabweichung e_0 ermittelt wurde. Die Rahmenabtastung td (1.14) dehnt oder staucht in der Summe den zeitlichen Verlauf der Führungsfunktion, während sich der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) verkleinert oder vergrößert. Mit der temporär dem Verzug angepassten Rahmenabtastung td ist schließlich das Kriterium für die **Stabilität** auch nach Punkt II auf Seite 22 erfüllt.

Die beinahe phasentreue Anpassung des Taktfaktors tkf an den Regelstreckenverzug und der nach (1.14) durch ihn bedingten Rahmenabtastung td , bringt das Regelstrecken übergreifende Verhalten des Reglers wie folgt zum Ausdruck:

Gleichlaufend mit der *variablen* und an den Regelstreckenverzug angepassten Rahmenabtastung td vollzieht sich der regelabweichungsbezogene und verzugsunabhängige, abbau-

ende Regelabweichungszuwachs ed (1.10 bzw. 1.12). Einem beliebigen, durch Verzug der Regelstrecke bedingten Regeltakt innerhalb des Regelstreckenbereichs in Form der Rahmenabtastung td , ist unabhängig von seiner Dimension, ein bei gleichem Arbeitsprodukt P_A (1.35 und 1.34) dynamisch nur von der Regelabweichung e_0 abhängiger, abbauender Regelabweichungszuwachs ed zugeordnet. Damit ist das Kriterium für **Robustheit** nach Punkt III auf Seite 23 erfüllt.

Der Grundtakt t_0 orientiert sich an den für digitale Systeme üblichen Richtwerten der Abtastzeit. Selbst wenn es sich empfiehlt, im Zweifelsfall den Grundtakt eher kleiner wegen möglicher genauerer Anpassung zu wählen, bleibt ein gewisser Spielraum bestehen. Dieser Spielraum wirkt sich aus, beim Regelstrecken und damit Verzugs übergreifenden Einsatz, auf die Verzugsanpassung entlang der *Zeitachse* mit der Rahmenabtastung td . Diese beinhaltet nach (1.14) den Grundtakt t_0 als Faktor, wobei sich die zulässige Ungenauigkeit eines Grundtakts, innerhalb einer Rahmenabtastung absolut vervielfachen kann. Während die Rückführung der Regelabweichung auf der *Anstiegsachse* mit dem Stellwertzuwachs $|y_d|$ (1.21) erfolgt, dessen Vorzeichenfaktor (± 1) komparativ (1.17 bzw. 1.18) gewonnen wurde. Wobei der abbauende Regelabweichungszuwachs ed (1.10 bzw. 1.12) und mithin die Regelabweichung e_0 , wegen (1.34) vom Arbeitsprodukt P_A bestimmt ist. Bezüglich der Rundung des Taktfaktors tkf gilt nun mit der Rahmenabtastung td (1.14) für die erfüllte Gleichsetzung nach (1.34)

$$\sqrt{a_i} \cdot \boxed{tkf_{i_{gerundet}} \cdot t_0} \neq \sqrt{a_{oe}} \cdot t_0. \quad (1.42)$$

Weshalb sich Ungenauigkeiten der aufgelösten Rahmenabtastung td der linken Seite von (1.42), unter Einbeziehung des Regelabweichungszuwachses ed , in (1.10 bzw. 1.12) wegen der faktischen Substitution durch P_A , im Gegensatz zu früheren Annahmen, ohne besondere Auswirkungen ergeben. Zumal der prozentuale Fehler des gerundeten (primär auf t_0 bezogenen) Taktfaktors tkf mit steigendem Betrag zurückgeht. Eine Feinabstimmung des Arbeitsprodukts P_A zum Regelstrecken übergreifenden Betrieb wird allenfalls dann zu empfehlen sein, wenn beim Erreichen der Führungsgröße die Startanregung noch wirksam ist. Mit einer korrigierenden Feinabstimmung werden lediglich auftretende Überschwingweiten so nivelliert, dass im Mittel die bleibende Regelabweichung minimal ist. Wenn schon für eine breite Führungsgrößenvorgabe, der partielle Einfluss der Startanregung nicht zu vermeiden ist³⁵.

1.8.1 Die Begrenzung des Taktfaktors

Nähert sich die Regelabweichung e_0 dem Wert null, so verkleinert sich mit der Annäherung die Steigung der Regelgröße und mit ihr vergrößert sich der Taktfaktor tkf . Schließlich ist der Steigungsindikator wegen der Messwertestreuungen nicht mehr ermittelbar. Es geht um Streuungsdifferenzen, die sich nicht durch plus-minus Schwankungen kompensieren, nämlich um die notwendig resultierenden, geringen Bewegungen zu null hin.

³⁵Allgemeines zur Feinabstimmung unter „1.10.3 Die Startanregung“ auf Seite 73

Um den Taktfaktor und damit die Rahmenabtastung td nicht unnötig zu vergrößern, ist dazu **in Erweiterung die Regelabweichungskonstante** $e0_{fix}$ nach (1.46) **eingeführt**. Ab dieser ist der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ belassen und mit ihm der augenblickliche Taktfaktor tkf nebst Rahmenabtastung td (1.14). Die Berechnung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ für den Komparator bleibt dabei erhalten, der nun bis zur Regelabweichung $|e0| \leq e0_{fix}$ andauernd, mit dem konstanten alten Mittelwert des Steigungsindikators vergleicht. Außerdem gibt es neben der Mittelwertarterierung, noch eine obere Begrenzung tkf_{max} (1.44) des Taktfaktors.

Ein Regelstreckenbereich umfasst verzugsabhängig eine Folge nahtlos aneinander liegender Regelstrecken. Für Regelstrecken mit größerem Verzug muss der Steigungsindikator $\sqrt{a_{ue}}$ als unterer Eckwert bei

$$\sqrt{a_{oe}} \geq \sqrt{a_i} \geq \sqrt{a_{ue}}, \quad (1.43)$$

verfahrenstechnisch nicht zwingend begrenzend vorhanden sein. Da zu den trägeren Regelstrecken der untere Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$ des Steigungsindikators kleiner ausfällt, wird auch der Taktfaktor tkf größer und mit ihm nach (1.14) die Rahmenabtastung größer ausfallen. Bei sehr trägen Regelstrecken und unter Beibehaltung des Arbeitsprodukts P_A und des Grundtakts $t0$, kann der Taktfaktor hoch werden. Er sollte *während der Anregelzeit* nicht über einen unteren dreistelligen Wert hinaus gehen. (Womit der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ in (1.40), faktisch über einen unteren Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$ begrenzt wäre.) Wegen des hinsichtlich des Regelstreckenverzugs geringen Grundtakts $t0$ und damit des relativ niedrigen Zeitzuwachses der Rahmenabtastung td bei deren hohem Taktfaktor, sind sonst die td -Schwankungen stärker. Das hätte an sich keine weiteren Auswirkungen, außer dass eventuell die Begrenzung tkf_{max} des Taktfaktors erhöht werden muss. Abgesehen davon erfordern ohne Notwendigkeit einer hohen Regelstreckenabdeckung, für die Randregelstrecke zu klein konzipierte Grundtakte einen höheren Rechendurchsatz. Abhilfe schafft die Erhöhung des Grundtakts $t0$ bei gleichem Arbeitsprodukt P_A , wodurch sich der größte Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ dazu passend verkleinert. Das bedingt ebenfalls die Verkleinerung des Taktfaktors tkf , da sich der Dividend bei (1.40) ändert, was bei gleichem Arbeitsprodukt P_A keine weiteren Maßnahmen erfordert. Die Verzugssituation der trägeren Regelstrecken ändert sich dadurch nicht. Die vergrößernde Anpassung des Grundtakts $t0$ kann überdies dämpfende Vorteile bezüglich der Grenzen der Messauflösung bringen.

Andererseits könnte der Taktfaktor tkf bei kleinem Steigungsindikator unmittelbar in Sollwertnähe und damit die Rahmenabtastung td , ohne Begrenzung sehr groß werden. Die Rahmenabtastung wird bei kürzeren Grundtaktten und kürzerzeitigen Regleraufrufen, im Vergleich zu größeren Grundtaktten geringfügig verschieden sein. Weil der Prozessablauf in kürzeren Abschnitten verfolgt wird. Die Reaktionszeit auf unvorhersehbare Regelgrößenänderungen, die erst bei etwas größerer Abweichung vom Sollwert abgefangen werden,

sind dadurch wenig berührt³⁶. Der Taktfaktor tkf ist durch seinen Maximalwert tkf_{max} mit

$$1 \leq tkf \leq tkf_{max} \quad (1.44)$$

begrenzt. Allerdings ist ab der Begrenzung die Relation in (1.34) nicht mehr erfüllt, was wegen des geringen Betrags des Zuwachses $\Delta e0 = ed = |e0 - e1|$ und nach (1.14), jetzt bei limitiertem tkf bei $td_{max} = tkf_{max} \cdot t0$ mit

$$\sqrt{a_i} \cdot td_{i_{max}} \neq \sqrt{a_{oe}} \cdot t0. \quad (1.45)$$

keine große Rolle spielt.

In Abbildung 2.1 des Anwendungsmusters³⁷ ist zu erkennen, wie der Taktfaktor tkf beim Erreichen der Führungsgröße stark absinkt und erst nach der Ausregelzeit seinen Maximalwert erreicht. **Bei welchem Betrag der Taktfaktor tkf nach der Ausregelzeit verbleibt, hängt von der Regelabweichung $e0_{ffix}$ ab und somit von der Fixierung des Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ als verankerten Steigungsindikator $\sqrt{a}$.** Je kleiner der Betrag der Regelabweichung $e0_{ffix}$, desto größer ist der Taktfaktor tkf nach der Ausregelzeit. Denn mit der stärker abnehmenden Steigung der Führungsfunktion gegen null, rückt ebenso mit dem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$, seine Stützpunktbezogenheit gegen null. Was infolge des mit der flacheren Steigung mitlaufenden Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ im Gegensatz zu einer statischen Funktion, den Taktfaktor tkf mit (1.40) vergrößert. Um die Führungsgröße herum **verbleibt der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$** in Höhe der Regelabweichung $|e0| \leq e0_{ffix}$ mit $(e0_{ffix} \geq 2 \cdot e0ns) \wedge (e0s = 1)$ bei

$$e0_{ffix} \approx 2 \quad [\text{Regelgrößeneinheiten}] \quad (1.46)$$

konstant und die vorher dennoch eingeschränkt bewegliche Verankerung³⁸ und damit die Führungsfunktion invariant. Der Parameter $e0ns$ ist eine Steuerkonstante zur Regelabweichung $e0$. (Im Anwendungsmuster³⁷ wurde noch der kleinere Wert $e0ns \leq \frac{e0_{ffix}}{2}$ mit weitaus größerem Taktfaktor tkf während und nach der Ausregelzeit verwendet.) Die Schwelle der Regelabweichung $e0_{ffix}$ vergrößert den Taktfaktor tkf nicht unnötig. Mit jedem Überlaufen dieser Schwelle wird der Mittelwert wieder regulär nachgeführt. Dennoch bleiben beim Betrag $e0_{ffix} > 2 \cdot e0ns$ bei nicht zu langer Ausregelzeit, auch Stellgrößenschwankungen nach der Ausregelzeit relativ gering. In der Umgebung der Führungsgröße w ist bei größerem Regeltakt, die Anpassung der Führungsfunktion für die fortlaufende adaptive Synchronisation nicht nötig, da die Angleichung an den Streckenverzug unkritisch ist. Die Regelabweichung $e0s = 1$ als Übergangspunkt der beiden Teilfunktionen der Führungsfunktion, ist in den Voraussetzungen bei (1.46) angegeben, weil durch den schärferen Knick die Bewegung der Regelgröße etwas abgebremst wird und bei Abänderung des Übergangs $e0s$, auch die Führungsfunktion verändert ist und sich die Stellwertreaktion auf den Taktfaktor tkf temporär auswirken kann.

³⁶siehe dazu Abschnitt „1.8.2 Die Unterbrechung der Rahmenabtastung“ auf Seite 53

³⁷Muster Seite 92 im Abschnitt „2.2 Eine Anwendung“ auf Seite 91

³⁸siehe Abschnitt „1.9.1.2 Die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert“ auf Seite 57

1.8.2 Die Unterbrechung der Rahmenabtastung

Bei Beendigung der Anregelzeit verlängert sich allmählich während der Ausregelzeit, der Taktfaktor tkf sowie die Rahmenabtastung td (1.14) und mit ihr die Wartezeit auf einen neuen Rechendurchgang. Ursache ist die Beruhigung der Regelgröße und der Übergang zu einer geringeren Steigung mit Minderung des Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ (1.40) des Steigungsindikators $\sqrt{a}$. Das beeinflusst die Reaktionsfähigkeit des Reglers in der Umgebung der Führungsgröße w insofern, als erst am Ende der Rahmenabtastung die Auswertung der Regelgrößenänderung erfolgt. Tritt zuvor eine größere Störgröße auf, sodass sich die Regelabweichung daraufhin kurzzeitig stärker verändert, wird durch eine verfahrenstechnische Maßnahme die gegenwärtige Rahmenabtastung *vorzeitig abgebrochen* und so behandelt, als wäre sie regulär beendet worden, mit dem entsprechenden Taktfaktor. Dadurch ist die kürzerfristige Einleitung einer Störungskompensation gewährleistet.

Die Abbruchbereitschaft der Rahmenabtastung wird *aktiviert* bei der Regelabweichung $|e_0| \leq e_{0ns}$ und bei vollendeter Rahmenabtastung td .

Sie wird *inaktiviert* bei der Regelabweichung $|e_0| \geq 2 \cdot e_{0ns}$ und ebenfalls vollendeter Rahmenabtastung td .

Die Unterbrechung einer Rahmenabtastung td geschieht, wenn die Abbruchbereitschaft

- a. aktiviert ist und
- b. die Regelabweichung e_0 bei *unvollendeter* Rahmenabtastung td , den Wert $|e_0| \geq e_{0s}$ annimmt.

Insofern ist bei Entwürfen die **Regelabweichung e_{0s} zu beachten**.

Die Regelabweichung bei $|e_0| = e_{0s}$ mit $e_{0s} > 2 \cdot e_{0ns}$ ist ohne besondere Einschränkungen, auch der Übergangspunkt der beiden Teilfunktionen der Führungsfunktion (siehe Abbildung 1.1 auf Seite 20).

1.8.3 Die verstärkte Anregung

Es sind verschiedene Formen der Anregung auf Seite 35 angeführt. Die verstärkte Anregung mit ihrer Einwirkung auf den Stellwert, versteift den Verlauf der Führungsfunktion. Bei immer weiterer Erhöhung der Anregung, würde sich auch der Pegel der Stellwertschwankungen vergrößern. Hier erwartete man gewöhnlich eher einen verstärkten Überlauf der Führungsgröße w . Doch die Führungsfunktion erzwingt bei der Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert, durch das Vorzeichen des Stellwertzuwachses, den Anlauf der Führungsgröße und mindert verstärkt die Überschwingweite bei höherem Stellwert. Dieser verlängert seine Auf- und Abbauperioden, denn zu hohe Zugaben müssen wieder länger abgebaut werden. Bei zu wenig Anregung kann der Führungsfunktion weniger gut gefolgt werden und das ermöglicht eine größere Überschwingweite. Für gewöhnlich gibt es bei zu großer Steilheit des Regelgrößenverlaufs ein Überschwingen, wenn der Stellwert vor der Führungsgröße zeitlich nicht mehr abgebaut werden kann. Prinzipiell wäre so eine Steilheitsänderung durch den Wechsel des Arbeitsprodukts P_A zu erreichen.

Die verstärkte Anregung ist mittels einer Veränderungsprüfung des Taktfaktors tkf gesteuert. Sie verkürzt die Anregelzeit und hält die forcierte Steigung der Regelgröße optimal aufrecht. Ihre Wirkung ist mit gleitendem Übergang bei verzögerungsarmen Strecken schwach und bei Speicherstrecken stark. Erhöht sich der Taktfaktor während der Anregelzeit oder bleibt er gleich, wird *unabhängig* von der beständigen Anregung nach (1.22) bzw. (1.23) sowie der Startanregung nach 1.10.3 auf Seite 73, der zunehmende Stellwertzuwachs im Vergleich zu seinem sonstigen Zuwachs, noch weiter erhöht. Währenddessen der Stellwertabbau weiterhin ohne Änderung verläuft.

Ab einer gesetzten Schwelle der sich verkleinernden Regelabweichung, setzt die Zuwachsbeaufschlagung des Stellwerts, zur Begrenzung der Überschwingweite aus. Die Schwelle ist identisch mit der Regelabweichung $ue0_{anf}$ zum effektiven Anregungsfaktor anf_{eff} (1.21 bis 1.23) und es gilt

nur bei Stellwertzugabe für $(|e0| \geq ue0_{anf}) \wedge (tkf_{i-1} \leq tkf_i)$

$$y_i \text{ angewendet} = y_i \cdot yfak, \quad (1.47)$$

ansonsten

$$y_i \text{ angewendet} = y_i. \quad (1.48)$$

Die Zugabe als Faktor $yfak$ ist gering genug, sodass sie innerhalb der komparativen Stellwertänderung selbsttätig reguliert werden kann. Die ausschließliche Anwendung bei Stellwertzugabe vermeidet Überlagerungen mit den abnehmenden Stellwertzuwachsen.

Die verstärkte Anregung war ursprünglich eine Sondermaßnahme, die wegen ihrer minimalen Anregelzeit als Standard gesetzt ist³⁹. Sie betrifft die Reglereinstellung mit dem Arbeitsprodukt⁴⁰. Dadurch ergibt sich ein Fenster mit optimalem Arbeitsprodukt, ab dem sowohl mit dessen *Erhöhung als auch Senkung*, die Regelgröße eine erhöhte Überschwingweite aufweist. Verursacht von der Art und Weise der Steuerung des Taktfaktors tkf bei verstärkter Anregung. Diese wirkt vorrangig abhängig vom Streckenverzug und nur schwach infolge von Schwankungen der Messwerterfassung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$. Der hohen Auswirkung bei Speicherstrecken steht die geringe bis fehlende Beeinflussung bei verzögerungsarmen Strecken gegenüber. In dagegen kleinem Ausmaß gilt, aber verstärkt für verzögerungsarme Strecken, dass mit Zunahme der Regelgrößen-Messfehler auch die verstärkte Anregung nachlässt.

Jede Veränderung des Arbeitsprodukts führt vom optimalen Fenster aus betrachtet, zu einer vergrößerten Überschwingweite. Bei der Erhöhung des Arbeitsprodukts erscheint das plausibel. Bei Verkleinerung des Arbeitsprodukts übersteigt der Stellwertzuwachs vermittle des Taktfaktors tkf , die unveränderte Minderung des Stellwerts. Bei geringerem

³⁹Für die **Inaktivierung der verstärkten Anregung** wäre im Musterprogramm ein Auswahlparameter zu setzen. Siehe dazu auch die Vorgabe bei Konstante $aqfix$, im letzten Abschnitt in Schritt 1 auf Seite 95, Bestandteil der Programmbeschreibung 3.1 auf Seite 93

⁴⁰siehe hierzu Abschnitt „1.10 Die Reglereinstellung“ auf Seite 66

Streckenverzug, wie er sich bei verzögerungsarmen Strecken einstellt, fehlt im äußersten Falle infolge des vermehrten Wechsels des Taktfaktors, die Voraussetzung zur Auslösung der verstärkten Anregung.

Die **optimale Arbeitsweise** im Fokus des Arbeitsprodukts ist erreicht, wenn im Ergebnis der Taktfaktor tkf und damit die Rahmenabtastung td , im Durchschnitt die **Zu- und Abnahme der Stellgröße in der Waage** halten. Zur besseren Kontrolle der Regelgröße in der Umgebung der Führungsgröße w , ist beim Unterschreiten der Regelabweichung $ue0_{anf}$ als Abschaltschwelle der Bedingung zu (1.47), nur mehr die beständige Anregung nach (1.22) und (1.23) wirksam. Die Startanregung sollte da schon abgebaut sein.

Bei der verstärkten Anregung mit der Reglereinstellung über das Arbeitsprodukt P_A , ist ein bewährter Erfahrungswert herangezogen, wie z. B. $P_A = 0,09$ s bei $e0s = 1$, der diesen Fenstereffekt bei geringer Unschärfe ergibt. Der Übergangspunkt $e0s$ der beiden Teilfunktionen der Führungsfunktion, bremst durch den schärferen Knick die Bewegung der Regelgröße etwas ab und hat bei seiner Abänderung, Auswirkungen auf die Führungsfunktion.

Wegen der noch nachfolgend angeführten Unterschiede bei verstärkter Anregung, wäre bei der experimentellen Nachvollziehung des Reglerverhaltens, *bei nicht eindeutigen Ergebnissen die verstärkte Anregung auszuschalten*³⁹. Womit der Regler hauptsächlich über die Sprungantwort und nur noch begrenzt über das Arbeitsprodukt einzustellen wäre⁴⁰, mit jetzt etwas längerer Anregelzeit.

1.8.3.1 Unterschiede bei verstärkter Anregung

Die Unterschiede bei *verstärkter Anregung* im Hinblick auf das Arbeitsprodukt P_A :

- Bei *gleichbleibendem* Arbeitsprodukt P_A und Veränderung seiner beiden Parameter, wie größter Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ und Grundtakt $t0$, gibt es kein prinzipiell verändertes Regelgrößenverhalten im Vergleich zur beständigen Anregung nach (1.22) und (1.23), abgesehen von der grundsätzlich unterschiedlichen Steilheit des Regelgrößenverlaufs. Bei verzögerungsarmen Strecken wirkt die verstärkte Anregung gering.
- Bei *Veränderung* eines optimal eingestellten Arbeitsprodukts P_A vergrößert sich die Überschwingweite, *sowohl mit seiner Verringerung als auch mit seiner Erhöhung*. Denn das optimale Arbeitsprodukt sollte so gewählt sein, dass es sich bei relativ steilem Regelgrößenanstieg, in einem Fenster minimaler Überschwingweite befindet.

Ergänzend sei angemerkt, dass sich *ohne* verstärkte Anregung bei Verkleinerung des Arbeitsprodukts, die Anregelzeit infolge eines kleineren Regeldifferenzzuwachses ed , selbstverständlich vergrößert und nach den Gegebenheiten die Überschwingweite verkleinert⁴¹.

⁴¹siehe Abschnitt „1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz“ auf Seite 56

1.9 Die innere Dynamik des Reglers

Der Reglerentwurf beinhaltet die Anpassung des Reglerverhaltens an die Regelstrecke. Das Besondere dieses Reglers ist, dass hierbei genauere Angaben zu den Übertragungselementen des Regelkreises nicht erforderlich sind. Der Regelalgorithmus erzielt mit wenigen Vorgaben eine optimale Anregelzeit⁴². Unter Berücksichtigung der Regelstreckenantwort wird in Echtzeit sukzessiv approximativ die geeignete Stellgröße ermittelt. Dazu ist der vorzeichenbehaftete Stellwertzuwachs mit dem Antwortverhalten der Regelkreiselemente so in Übereinstimmung gebracht, dass es bei vorgegebener Einstellung zu keinen zyklischen Regelschwingungen kommt⁴³.

1.9.1 Wie der Regler die Regelstrecken abbildet

1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz

Der abbauende Zuwachs der Regelabweichung (Regeldifferenz) für jede Rahmenabtastung td ist als Betrag $\Delta e_0 = ed = |e_0 - e_1|$ für die Funktion 4. Grades in (1.10) und die Quadratfunktion in (1.12) angegeben. Unter der Voraussetzung der erfüllten Forderung in (1.34) mittels komparativer Synchronisation⁴⁴, ist damit die Substitution des Arbeitsprodukts nach (1.35) mit den Einstellparametern $\sqrt{a_{oe}}$ und t_0 , durch ein Arbeitsprodukt mit $\sqrt{a} \cdot td = P_A$ für einen ganzen Regelstreckenbereich möglich. Das ergibt nach (1.10) substituiert für die Funktion 4. Grades

$$|ed| = \frac{\left(P_A + \sqrt{6 \cdot \sqrt{|e_0|} \cdot e_0 s}\right)^4}{36 \cdot e_0 s} - |e_0| \quad (1.49)$$

und nach (1.12) für die Quadratfunktion

$$|ed| = P_A^2 + P_A \cdot 2 \cdot \sqrt{|e_0| - \frac{e_0 s}{3}}. \quad (1.50)$$

Daraus folgt allgemein formuliert

$$|ed| = f_{ed}(P_A, |e_0|, e_0 s). \quad (1.51)$$

Es ist zu erkennen, dass in (1.49) und (1.50) der Zuwachs $\Delta e_0 = |ed|$ der Regelabweichung, von den Konstanten Arbeitsprodukt P_A und $e_0 s$ sowie der Regelabweichung $|e_0|$ als einzige Variable abhängt. Das Arbeitsprodukt bildet mit seinen beiden Parametern

⁴²siehe Hinweis zur Anstiegszeit im Vorwort „Zur Entstehung“ im 3. Absatz auf Seite 3

⁴³siehe dazu Abschnitt „1.4.2 Verzug und verzugsabhängiger Zuwachs“ auf Seite 25 und den Auszug „Die Synchronisation im Ablauf“ auf Seite 58ff.

⁴⁴siehe Abschnitt „1.5.1 Der Steigungsindikator und sein Mittelwert“ auf Seite 28

letztlich die Führungsfunktion mit (1.36) ab. So bleibt für jeden Betrag einer Regelabweichung $|e0|$, der sich bis zur Regelabweichung null verkleinernde Regelabweichungszuwachs ed bei *gleichem* Arbeitsprodukt P_A , für jede Regelstrecke bestehen. Also für jeweils alle Größenvarianten über alle laufenden Differenzen $\Delta e0 = |ed|$ bis null. Und dieser Zuwachs innerhalb einer Rahmenabtastung td entsteht zwangsläufig, aufgrund der konzipierten Führungsfunktion. Die Formung des Verlaufs der Regelabweichung ergibt sich eben aus dem führenden Vergleichssteigungsindikator als partiellen Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$, gemäß der definierten Führungsfunktion nach (1.13).

Der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ drückt die Steigung der abbauenden Regeldifferenz bzw. Regelabweichung aus und hängt vom Verzug⁴⁵ der Regelstrecke ab. Nach (1.40) und wegen (1.37) bzw. (1.38) ist aus dem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators, der den Streckenverzug abbildende Taktfaktor tkf ermittelt. Er gibt beim Programmdurchlauf am Beginn eines jeden Regeltakts, die Anzahl der beim letzten Durchlauf ermittelten Grundtakte $t0$ vor, die abgewartet werden müssen, bis der nächste Regeltakt als Rahmenabtastung td (1.14) beginnen kann. Dank der durch diese Vorgabe des Taktfaktors tkf erfüllten Forderung nach (1.34), nämlich der Gleichsetzung des Arbeitsprodukts aus den laufenden Parametern $\sqrt{a}$ und td mit dem der Randkonstanten $\sqrt{a_{oe}}$ und $t0$, entspricht die Relation von $\sqrt{a_{oe}}$ zu $t0$ auch derjenigen von $\sqrt{a_i}$ zu td_i beim Regeltakt i . Hierzu ist es praktikabler, anstatt $\sqrt{a}$ dessen genaueren Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) zu verwenden.

1.9.1.2 Die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert

Wie verhält es sich nun mit der Zurückführung der Regelabweichung entlang der Führungsfunktion? Der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) ist der Augenblickswert aus den beiden aktuellen Stützpunkten $e1$ und $e0$ der Regeldifferenz. Einmal abgesehen von seinen Schwankungen durch ungenaue Messwerte, ist er genauso wenig feststehend mit der Führungsfunktion verankert wie sein Stützpunkt $e0$ und dessen Vorwert $e1$. Der Betrag des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ steigt und fällt auch mit der Stellgröße⁴⁶. Die Führungsfunktion führt zwar stabil zu null, doch ihr Steigungsindikator $\sqrt{a}$ würde aufgrund der angeregten Stelleinwirkung, mit jedem Regeltakt unkontrolliert größer und damit die Führungsfunktion ständig unkontrolliert steiler zu null führen. Die Regelgröße würde schließlich ziellos die Führungsgröße w überlaufen. Denn die Regelstrecke stimmt mit der Führungsfunktion nicht mehr überein und die Regelgröße kann ihr nicht mehr folgen.

Dagegen ist nun der Stellwert durch die Synchronisation des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ dermaßen gesteuert, dass er die Regelabweichung entlang der Führungsfunktion, bis zur Führungsgröße w stabil zurückführt. Weil sich der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ viel träger ändert als der volatile Steigungsindikator $\sqrt{a}$, ist sein **Mittelwert** $\sqrt{a_{vm}}$ zur vergleichenden Abstimmung **als verankerter Steigungsindikator** verwendet und repräsentiert die steuernde Führungsfunktion als Leitfunktion. Sie zielt mit

⁴⁵siehe dazu Abschnitt „1.4.2 Verzug und verzugsabhängiger Zuwachs“ auf Seite 25

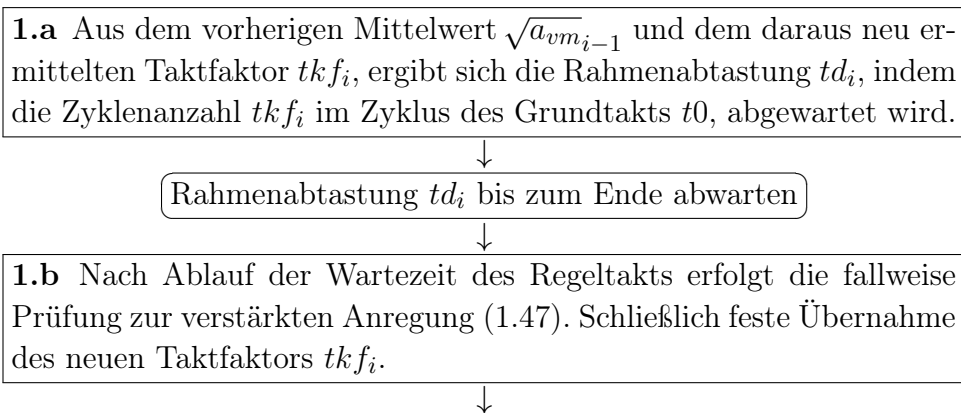
⁴⁶siehe dazu auch den Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

jedem Regeltakt der Rahmenabtastung td auf ihre Nullstelle und der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ ergibt für jede durchlaufene Regelabweichung $e0$, aneinandergereiht schließlich den effektiven Verlauf der Führungsfunktion. Einerseits durch die Trägheit des Mittelwerts verankert und zugleich flexibel infolge gleitender Anpassung. Dadurch ist der aus einer punktuellen Steigung der Regeldifferenz resultierende Steigungsindikator $\sqrt{a}$, in sein gefestigteres Pendant $\sqrt{a_{vm}}$ eingebunden, bei dessen gleichzeitiger Aktualisierung in seiner Eigenschaft als Mittelwert. Da der Mittelwert immer nur den Abschnitt der aktuellen Regeldifferenz repräsentiert, passt er sich der Steilheitsänderung der Führungsfunktion und damit dem sie ausdrückenden Steigungsindikator (1.13) gleitend an, der sich spätestens ab einem vorhandenen Wendepunkt W der Regelgröße, mit der Regelabweichung verkleinert. In Rückwirkung der Synchronisation von $\sqrt{a}$ mit $\sqrt{a_{vm}}$, ergibt sich dazu fließend mit dem stetigen Verlauf der Regeldifferenz, aber dennoch entkoppelt der zielführende Stellwert. Die komparative Synchronisation ist mit ihrer Vorzeichenermittlung des Stellwertzuwachses, eine Voraussetzung zur sicheren Zurückführung der Regelabweichung gegen null⁴⁷.

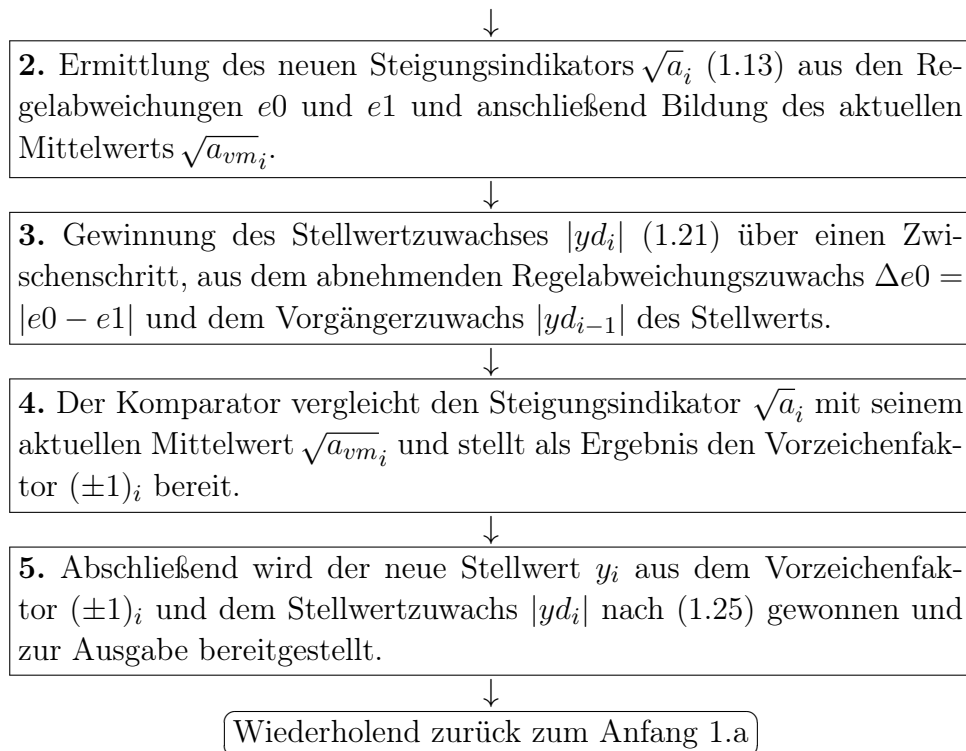
Der angepasste Steigungsindikator $\sqrt{a}$ geht wiederum in seinen Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ ein und führt infolge des Taktfaktors tkf nach (1.40) und wegen (1.37) zu einer neuen Rahmenabtastung td , falls sie außerhalb ihres Rundungsbereichs liegt. Der trägere Mittelwert gibt also über die Stellwertsteuerung, für den Bereich um die Regelabweichung $e0$, den Regelgrößenanstieg vor. Im Ergebnis ist das die den Verlauf der steuernden Führungsfunktion formende, sukzessiv approximative Ermittlung der Stellgröße. Sie ist im Gegensatz zu einer mathematischen Funktion, vom stetigen Verlauf der Regelabweichung $e0$ durch den Vorzeichenfaktor (± 1) des Komparators entkoppelt (1.17) bzw. (1.18), nach der Beziehung (1.25) mit deren Stellwertzuwachs yd nach (1.21). Bei der Betrachtung des Ablaufs ist zu berücksichtigen, dass der Steigungsindikator immer die gesamte Formung der Führungsfunktion beschreibt, aber ausgehend von der augenblicklichen Lage der Regelabweichungen $e0$ und $e1$ (1.13). In deren engerem Umfeld präziser, im weiteren Umfeld mit abnehmender Genauigkeit.

Hierzu der signifikante Programmablauf wie er in Abschnitt 3.2, Seiten 98ff kodiert ist:

Die Synchronisation im Ablauf



⁴⁷genaue Vorzeichensteuerung im Abschnitt „1.5 Der Komparator“ in Abb. 1.2 auf Seite 31



Schritt 1 beginnt mit der Vorbereitung der Taktvorgabe für einen Regeltakt $_i$ und seiner Wartezeit. Schritt 2 aktualisiert den Stand der Führungsfunktion durch den Steigungsindikator. Schritt 3 bereitet den aktuellen Stellwert mit Festlegung seines Zuwachsbetrags vor. Schritt 4 legt das Vorzeichen des Zuwachsbetrags fest. Schließlich wird in Schritt 5 der Stellwert zur Synchronisation von $\sqrt{a}$ mit $\sqrt{a_{vm}}$ bereitgestellt und die Schleife beginnt von Neuem. Die Anpassung des Stellwerts, vorbereitend in Schritt 3 und ausführend in Schritt 5 und damit die Angleichung an den Streckenverzögerung, geschieht relativ schnell. Weshalb eine hohe Dämpfung von Regelschwingungen erreicht wird, was wiederum die geringe Überschwingweite ausmacht. Eine Gesamtansicht des Reglers im Hinblick auf den verdichteten Signalverlauf, ist auf Seite 80 zu finden.

1.9.1.3 Kennzeichnendes Reglerverhalten

Die beständige Anregung hält das Bestreben aufrecht, die Steigung zu erhöhen. Woraus mit ihrer komparativ kontrollierten fallweisen Minderung infolge Zurücknahme des Stellwerts und zusammen mit der Grenzwertigkeit⁴⁸, die beidseitige Balance an der Grenze des Möglichen resultiert. **Diese Dynamik hält die Regelung unter Kontrolle und erweitert die Stabilität.** Die Anregelzeit könnte äußerstenfalls zu kurz mit zu großer Überschwingweite und langer Ausregelzeit bei unpassendem Arbeitsprodukt sein. Dessen Faktoren **als Einstellparameter**, nämlich größter Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ und Grundtakt t_0 der Randregelstrecke, **finden ihren Niederschlag ausschließlich in Anregel-**

⁴⁸siehe dazu auch den Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

zeit und auch Ausregelzeit. Denn die Führungsgröße wird durch den vorgegebenen Verlauf der Führungsfunktion erreicht, soweit die Stellgröße dafür genügt. Eine gute Orientierung für den Regler, schaffen indessen die beiden Parameter $\sqrt{a_{oe}}$ und t_0 der Randregelstrecke als Vorgabemuster *mit Bezug zur Sprungantwort*. **Für die Vorgabe aufgrund einer Regelstreckensprungantwort, ist ein Auswahlparameter im Musterprogramm zu setzen.** Denn der Regler verhält sich hinsichtlich der Anregelzeit, mit dem Standard verstärkter Anregung und Einstellung über das Arbeitsprodukt, abweichend gegenüber beständiger Anregung und Einstellung über die Sprungantwort⁴⁹.

Doch ein zweckmäßigerweise bereits **erprobtes Arbeitsprodukt** P_A kann genauso vorgegeben werden. Hierfür ist die **verstärkte Anregung** (1.47) **als Standard** vorgesehen. Der Unterschied liegt dabei in einem steileren Regelgrößenanstieg. Indem mittels verstärkter Anregung, lediglich ein Verzugsfenster für die Regelstrecken offen steht⁵⁰. Die verstärkte Anregung lässt die Wahl, ob als zweite Vorgabe nach dem Arbeitsprodukt, der größte Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ oder der Grundtakt t_0 festgelegt werden soll.

Im Gegensatz zum größten Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ gibt es keinen eindeutigen kleinsten Steigungsindikator $\sqrt{a_{ue}}$ als unteren Rand des abgedeckten Regelstreckenbereichs. Jedenfalls ist irgendwann derjenige Punkt eines unteren Randes erreicht, wo ein nicht ausgeschöpfter größter Steigungsindikator am oberen Rand mit seinem kleinen Grundtakt t_0 , nur mehr Durchsatzkosten verursacht. Die Hardware muss ja genügend schnell sein, um auch innerhalb eines Grundtakts t_0 den Reglerdurchlauf zu bewerkstelligen. So wäre die Begrenzung des Taktfaktors tkf auf einen immerhin mittleren dreistelligen Betrag, zur Aufrechterhaltung eines breiten Einsatzbereichs, dafür wohl ausreichend.

Außerdem wechselt bei hohem Taktfaktor und entsprechend kleinem Grundtakt die Rahmenabtastung td (1.14) öfter, denn die Zeitauflösung ist feiner. Jede Schwankung des genutzten Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators, zieht wegen (1.40) eine Änderung des Taktfaktors tkf nach sich. Zur Verringerung des Taktfaktors wäre unter Beibehaltung des Arbeitsprodukts, der Grundtakt t_0 zu erhöhen. Im Endeffekt könnte sich eine geringe Änderung der Anregelzeit einstellen. Denn einer Änderung der Länge der Rahmenabtastung td als Regeltakt, folgt auch eine kleine Änderung der Einwirkung der Stellgröße. Falls die Stellgröße nicht ausreicht um die Führungsgröße zu erreichen, wird sich bei flachem Auslauf der Regelgröße, zwangsläufig der Taktfaktor tkf bis zum Maximum tkf_{max} (1.44) erhöhen.

1.9.2 Die Grenzwertigkeit

Es ist noch offen, warum sich ein bestimmter Stellwert zu einer Regelabweichung genauso einstellt, dass er dieser Regelstrecke gerecht wird. Denn im beispielhaften Gegensatz zu einem PID-Regler, gibt es keine feste Beziehung zur Regeldifferenz. Und dennoch bewegt

⁴⁹siehe dazu den Abschnitt „1.8.3 Die verstärkte Anregung“ auf Seite 53

⁵⁰siehe ebenso Abschnitt „1.10.2 Die Einstellung mit dem Arbeitsprodukt“ auf Seite 71

der Stellwert die Regelgröße bis zu einer bestimmten Stelle und nicht darüber hinaus. Der zugrunde liegende Effekt soll hier als Grenzwertigkeit bezeichnet werden.

Der Verlauf der Regelabweichung passt sich durch die Rückwirkung der Regelstrecke, partiell dem Graphen der Führungsfunktion an. Schwankungen des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ (1.13) kompensieren sich in der Zeit. Der Vorzeichen gelenkte Stellwert (1.25) erzwingt die Anpassung an den Graphen der steuernden Führungsfunktion des aus dem Mittelwert von $\sqrt{a}$ hervorgehenden Vergleichssteigungsindikators $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) und verändert diesen zugleich durch die Mittelwertnachführung. Der Graph dehnt oder staucht sich gemäß der Rahmenabtastung td (1.14), verursacht durch den Taktfaktor tkf (1.40). Über die Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert, wirkt die Stellgröße wieder auf den Steigungsindikator zurück. Die Anpassung des Graphen der Führungsfunktion bezieht sich wegen (1.16) auf die kürzlich vergangenen, in den Mittelwert eingeflossenen Steigungsindikatoren. Dies geschieht forciert von der Stellgröße und *nur während der Anregelzeit* streckenverzugsunabhängig grenzwertig. Ein gleichlautendes komparatives Vorzeichen nach (1.17) bzw. (1.18) besteht schwerpunktmäßig solange, bis die Anpassungsforderung erfüllt ist. Voraussetzung ist allerdings, dass das Regelziel technischer Erfüllbarkeit gemäß, erreicht werden kann. Ist das nicht der Fall, so versucht es der Regler trotzdem, indem er den Stellwert entsprechend der Maßnahmenausrichtung bis zum Anschlag treibt.

Regelstrecken als Übertragungssysteme bedingen gewöhnlich Regler, deren Funktionen den vorgegebenen Systemmodellen entsprechen. Für die Führungsfunktion des vorliegenden Reglers trifft so eine Modellvorlage nicht zu. Es gibt keine geschlossen algebraisch formulierte Regelgesetzmäßigkeit. Sondern die Synchronisation bewirkt den Regelabweichungsabbau über die Regelstreckeneigenschaft. Die daraus resultierende Anstiegskontrolle stabilisiert die Führungsfunktion. **Grenzwertigkeit** hinsichtlich der Regelstreckenträgheit heißt, dass der abbauende Zuwachs ed der Regelabweichung e_0 vom augenblicklichen Zustand ausgehend, mit dem verfügbaren Stellwert trotz iterativer Anpassung, zeitlich nicht stärker verkürzt werden kann, bei regelmäßigem Wechsel von Stellwertzugabe und Stellwertabnahme.

Die Grenzwertigkeit ist beim Regelgrößenanstieg mittels Anregung angestrebt⁵¹. Allein wie die Grenzwertigkeit erreicht wird ist zu unterscheiden zwischen Speicherstrecken ohne und mit Ausgleich und zwischen den verzögerungsarmen Regelstrecken:

- a. Bei Speicherstrecken ohne Ausgleich gibt es keine Verluste, die abhängig von der Differenz zugeführter Energie auftreten. So sind z. B. bei einer Füllstandsregelung, Verluste des Mediums und damit des Füllstands in einem Behältnis, nur vom Abfluss bestimmt. Deshalb verändern sich Zu- und Abflussmenge gewöhnlich mit dem Querschnitt. Steigungsänderungen der Regelgröße sind allenfalls auf korrektive Änderungen der Zu- und Abflussmenge zurückzuführen.

⁵¹die Zusammenstellung der Anregungsformen ist auf Seite 35 angeführt

- b. Bei Speicherstrecken mit Ausgleich gibt es Energieabführungen an die Umgebung, wie sie z. B. bei thermischen Prozessen auftreten. Mit den Verlusten zugeführter Energie steigt die Anforderung, diese Verluste durch vermehrte Energiezuführung auszugleichen. Die Steigung bei Grenzwertigkeit ist abhängig von der Regelabweichung, weil sich infolge nicht kompensierter Energieverluste, die Steigung bei der nach null strebenden Führungsfunktion ändert.
- c. Schließlich beinhalten die verzögerungsarmen Regelstrecken kaum bzw. nicht ins Gewicht fallende Speicheranteile. Bei hohem Regelgrößenanstieg ist die Grenzwertigkeit schnell erreicht. Änderungen der Stellgröße machen sich unmittelbar bei der Regelgröße bemerkbar. Deshalb fällt hier die Trägheit des Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ mehr ins Gewicht.

Nun sei einmal die (intern immer positive) Steigung des Regelabweichungsverlaufs, gemessen über den Steigungsindikator $\sqrt{a}$, momentan größer als diejenige des Graphen der steuernden Führungsfunktion (ausgedrückt durch den gemittelten Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ nach (1.16)). Was eine Vorzeichenänderung des Komparators (1.17) bzw. (1.18) für den Stellwertzuwachs auslöst, mithin den wirksamen Stellwert (1.25) schmälert und im umgekehrten Fall erhöht. Jedoch tritt dieser Sachverhalt generell bei der Zurückführung der Regelabweichung auf, auch bei einem als Festwert vorgegebenen Steigungsindikator⁵². Im Fall der Grenzwertigkeit ist die **situationsbedingte kleinstmögliche Rahmenabtastung mit minimaler Anregelzeit** und als maximal konzipierten Stellwert erreicht und die Rahmenabtastung td (1.14) hat in der Regelstreckensituation ihre Grenze mit *effektivem Streckenverzug* erlangt. Er kennzeichnet die Grenze der Auswirkung der Verzugsdynamik einer Regelstrecke im Regelprozess (und steht dem Graphen der Ausgleichszeit T_g näher als dem der Verzugszeit T_u). Die weitere Steigerung des Regelgrößenanstiegs würde eine nicht vorgesehene Stellwerterhöhung voraussetzen und einen geringeren Streckenverzug. Soweit ist bei nicht erreichter Grenzwertigkeit, die Rahmenabtastung td (1.14) immer länger als ihr minimal möglicher Betrag. Zusammenfassend lässt sich das wie folgt darstellen:

1. Die Führungsfunktion, konkret eine Aneinanderreihung aller anfallenden Mittelwerte $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ über alle Regeltakte hinweg, führt immer zu null. Lediglich die Steilheit ihres Nullanlaufs ist variabel.
2. Aus der Synchronisation, d. h. der Abstimmung des Gleichlaufs von Steigungsindikator $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$, geht das Vorzeichen des Stellwertzuwachses $|y_d|$ hervor. Womit der Stellwert über die Regelstrecke den Steigungsindikator und über dessen Mittelwert die Steilheit der Führungsfunktion korrigiert.
3. Droht die Synchronisation nicht zu gelingen und die Führungsfunktion infolge Anregung und gegebenenfalls des vorher nach Bedarf erhöhten Stellwerts zu steil zu werden, so wirkt nach wie vor Punkt 1.

⁵²Näheres noch im Abschnitt „1.11 Der Steigungsindikator als Festwert“ auf Seite 76

4. Die Steilheit der Führungsfunktion ist Ausdruck des Regelstreckenverzugs mit dem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$. Der Regelgrößenanstieg kann wegen Punkt 1 nur diejenige größte Steilheit einnehmen die es gerade noch gestattet, der Führungsfunktion zu folgen. Was die Grenzwertigkeit des Anstiegs bedeutet.

Stellwertabhängig kann der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ jeder Steigung und damit jeder Führungsfunktion entsprechen. Erst im Vergleich (1.17) bzw. (1.18) mit dem jetzt steilsten Graphen der steuernden Führungsfunktion des Mittelwerts (1.16), wird die Grenzwertigkeit als Grenze der Anpassungsfähigkeit der Regelgröße wirksam und die minimale Anregelzeit ist **robust** gegeben.

Abhängigkeiten

Bei der Ausregelzeit ist freilich die Grenzwertigkeit wie beschrieben unerwünscht, obwohl bei kleiner Regeldifferenz, mit sehr kleiner Steigung und ebenso kleinem Stellwertzuwachs, sich ein Gleichgewicht einstellen könnte. Dadurch könnte der Steigungsindikator konstant bei einem horizontalen Graphen der Führungsfunktion verharren und die Führungsgröße w würde sehr spät oder nicht erreicht werden. Vor allem bei *kaum nachwirkender Startanregung*, wenn der Regelstreckenverzug gemeinsam mit der Stellgröße, einen steileren Regelgrößenanstieg erlauben würde. Das vermeidet die beständige Anregung.

Die Anregelzeit könnte verlängernd manipuliert werden, ohne die noch anzuführende Festeinstellung⁵² des Steigungsindikators zu nutzen. Allerdings würde dann die dafür erforderliche generelle Erhöhung der Anzahl n der herangezogenen Messwerte zur Mittelwertbildung in (1.16) und auch der Stellwert (1.20), das Verhalten verändern. Nämlich, dass zwar bei genutzter geringerer Startanregung die Grenzwertigkeit durch einen zunehmenden Steigungsindikator angestrebt und erreicht werden würde, aber mit verstärkt längerer Anregelzeit bei verzögerungsärmeren Strecken. Das bedingt dort die vergleichsweise zum kürzeren Streckenverzug erhöht wirkende Trägheit der Mittelwertänderung bei $\sqrt{a_{vm}}$, wodurch sich die Einflussnahme des aktuellen Steigungsindikators $\sqrt{a}$ verzögert.

Davon unabhängig könnte es angebracht sein, die Startanregung abhängig von der Führungsgröße w anzupassen. Insbesondere, wenn die Führungsgröße schon mit sehr kleinem Stellwert y_i erreicht ist, weil dann eine Startanregung überdimensioniert erscheinen kann. Mit dem Effekt vergrößerter Überschwingweite. Umgekehrt wird bei größeren Regeldifferenzdistanzen wie bei höherem Sollwert (Führungsgröße), wegen einer beständigen Anregung, keine weitere Maßnahme erforderlich sein. Falls der Steigungsindikator mittels Startanregung hervorgehoben beeinflusst werden sollte, wäre die verstärkte Anregung nach (1.47) infolge möglicher erhöhter Überschwingweite, besser nicht zu verwenden.

Während der Anregelzeit erhalten die *einfache Anregung* (1.23) in Form leicht erhöhter Stellwertzuwächse und die *erhöhte Anregung* (1.22) sowie die *verstärkte Anregung* (1.47) nach ausreichender Startanregung, die Grenzwertigkeit zum Abbau der Regelabweichung robust aufrecht. Denn es gibt die Schranke beim effektiven Streckenverzug, ab der der Verlauf des Regelabweichungsabbaus durch die Stellgröße, dem Graphen der Führungsfunktion nicht mehr folgen kann. Die Schranke ist gegeben durch die Immanenz

der abgrenzenden Eigenschaft eines Übertragungssystems, insbesondere seiner mehr oder weniger großen Reaktionsträgheit. Je geringer der Streckenverzug, desto schneller kann der Führungsfunktion gefolgt werden und desto kürzer ist die Anregelzeit. Für einen sehr geringen Streckenverzug ist die Grenzwertigkeit weniger auffällig. Immerhin ist jedem Regelstreckenverzug mithilfe der Rahmenabtastung td ein Steigungsindikator $\sqrt{a}$ zuordenbar, der wegen der Gleichsetzungsforderung des Arbeitsprodukts P_A nach (1.34), sein regelabweichungsbezogenes Maximum mit der Grenzwertigkeit erreicht.

Der gemittelte und führende Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) hält durch seine Trägheit unterstützt, den Abbau der Regelabweichung auch ohne erreichte Grenzwertigkeit aufrecht. Das kann mit temporären Schwankungen verbunden sein, wenn nämlich in der Annäherung zur Führungsgröße w , der abbauende Regelabweichungszuwachs ed wegen seiner fortschreitenden Kleinheit und dem damit schnelleren Vorzeichenwechsel des Stellwertzuwachses yd infolge von Messfehlern, dessen nachhaltige Wirkmöglichkeit eingeschränkt ist. Die verstärkte Anregung (1.47) garantiert infolge ihrer Asymmetrie von Zugabe und Abnahme des Stellwertzuwachses, in weiterer Unterstützung die beständige Zurückführung der Regelabweichung gegen null. Unter Umständen wird bezüglich der Führungsfunktion, bei nichtlinearen im Gegensatz zu linearen Regelstrecken, die partielle Anpassung und damit eine Verzerrung des gesamten Regelgrößenverlaufs stärker in Erscheinung treten. Was aber die Regelfähigkeit nicht beeinträchtigt.

Weitere Einflüsse

Bei einem *fest vorgegebenen Steigungsindikator*⁵³, der unterhalb dem für eine Regelstrecke größten Steigungsindikator liegen muss, ist keine Grenzwertigkeit wirksam, da der Steigungsindikator selbst auf die starre Einhaltung seines Werts geregelt ist. Wäre ein fest vorgegebener Steigungsindikator für eine Regelstrecke zu groß, so würde der Regler den Stellwert erhöhen, um den vorgegebenen Steigungsindikator zu erreichen. Weil das nicht gelingen kann, würde der Stellwert ungesteuert sein Maximum anstreben.⁵⁴

Würde beim eingestellten Regler die beständige Anregung nach (1.22) bzw. (1.23) überhöht (z. B. Konstante $anf = 1.2$ anstatt 1.03), so würden sich die Führungsfunktion versteifen und die Anregelzeit verlängern. Die Überhöhung ließe den Stellwert in ausgeprägt spitzen, zackenartigen Perioden verstärkt schwanken. Dazu würde sich die Überschwingsweite vermindern. Verantwortlich hierfür ist die nicht überschreitbare Grenzwertigkeit und die dadurch periodisch überhöhte Stellgröße, was eine verlängerte comparative Synchronisation des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ (1.13) mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) verursacht. Wegen der überhöhten positiven und negativen Stellwertzuwächse würde sich nach der Ausregelzeit, die Amplitude der Pendelbewegungen der bleibenden Regelabweichung leicht vergrößert erhalten (bei kleinerem Taktfaktor tkf), was bei gegebenem Leistungsbedarf einem größeren Gewichsfaktor nach (1.26) entspräche. Mit der Erhöhung des Anregungsfaktors anf trotz ausreichender Startanregung, verlängern sich also Anregelzeit

⁵³Näheres noch im Abschnitt „1.11 Der Steigungsindikator als Festwert“ auf Seite 76

⁵⁴siehe auch Hervorhebung in Fettdruck im Abschnitt 1.6.1 auf Seite 37

und Ausregelzeit, während sich die Überschwingweite verkleinert.

Kleinere Anregungsänderungen beim Reglerstart könnten für Steuerungszwecke nützlich sein. Eine allenfalls ursächlich für stärkere Regelschwankungen zu große Abtastzeit beim Grundtakt t_0 , besteht wegen ihrer Festlegungsvoraussetzung nicht. Der Nullanlauf ist durch die Führungsfunktion und die komparative Stellwertnachführung garantiert. Die Stabilität ist mit dem Regelungskonzept, insbesondere durch die sukzessiv approximative Stellwertnachführung anhand der Führungsfunktion, festgeschrieben. Die Frage der Stabilität stellt sich nicht wie bei der Beziehungsfestlegung von Stellwert und Regelabweichung, für jede Einzelstrecke neu. Denn für so eine geschlossene Beziehung ist eigentlich das Stabilitätskriterium bereits Teil des Ansatzes bei der Erstellung des Regelgesetzes für eine bestimmte Verfahrensweise. Dagegen zeichnet sich der Regler aus durch seine Eigenart der breiten Nutzung des Streckenverzugs und der iterativ entwickelten Stellgröße zur Anpassung an die bereits stabile Führungsfunktion, mit einem nachgeschobenen Stabilitätsnachweis.

Die *erhöhte Anregung* ist bei der Regelabweichung nahe null aber größer e_{0ns} in (1.22) genutzt, um Verharrenstendenzen wegen Messwertstreuungen bei sehr kleiner Steigung des Regelabweichungsverlaufs entgegenzutreten. Wegen der Synchronisation der steuernden Führungsfunktion und Zurückführung der Regelabweichung auch bei Messungenauigkeiten, schwankt die Regelgröße ständig leicht um die Führungsgröße, auch wenn nicht sofort wahrnehmbar. Die kleine Bewegung ist gegebenenfalls insbesondere in Simulationen sichtbar, wenn reale Störgrößen entfallen. Die einzelnen taktzyklischen Messwerte liegen mit ihren Abweichungen als eine Punktwolke von Treffern um den idealen Verlauf. Nun berechnet sich der Stellwertzuwachs y_d (1.21) über den Mittelwert k_{sm} (1.19) und (1.20) auch aus dem Regelabweichungszuwachs. Dieser verringert sich mit der Näherung zur Nullstelle der steuernden Führungsfunktion und kommt damit innerhalb der Punktwolke von Messabweichungen zu liegen. Die Treffer außerhalb des idealen Verlaufs lassen sich zwar nicht vermeiden, aber es lässt sich mit einer erhöhten Anregung über die Erweiterung anf_{e0ns} (1.24), die Trefferquote in einem definierten Näherungsabschnitt einseitig in Richtung Nullpunkt erhöhen. Erst ab der Regelabweichung $|e_0| \leq e_{0fix}$ (1.46) setzt die einfache Anregung, jetzt mit arretiertem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ wieder ein, was zur weiteren Beruhigung der geringfügigen Regelschwankungen beiträgt. Die verstärkte Anregung (1.47) ist nach den Voraussetzungen, nur bis zur *Regeldifferenz* $\geq ue_{0anf}$ aktiv und fällt mit der Schwelle der einfachen Anregung (1.23) zusammen. Man sollte nicht aus den Augen verlieren, dass allen manipulativen Maßnahmen, die Auswirkung verschiedenen Verzögerungsverhaltens der Regelstrecken zugrunde liegt.

Der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ erfasst direkt Streckenveränderungen und Störgrößen, die erst hinterher in den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ eingehen. Deshalb muss der Verlauf der Regelabweichung und daher der Regelgrößenverlauf, nicht unbedingt genau dem Graphen einer kontinuierlich bestehenden Führungsfunktion über die gesamte Anregelzeit entsprechen. Für die **Regelbarkeit einer Regelstrecke** sei die Sprungantwortfunktion herangezogen und daraus das Verhältnis von Ausgleichszeit T_g und Verzugszeit T_u , das ganz allgemein

Aussagen über die Regelbarkeit zulässt. So gelten bekanntlich Strecken mit dem Verhältnis $\frac{T_g}{T_u} < 3$ als schlecht und $\frac{T_g}{T_u} \geq 10$ als gut regelbar.

1.10 Die Reglereinstellung

Gewöhnlich bedarf es bemessene Vorgaben, um eine technische Zielsetzung zu realisieren. Je weniger eindeutig solche Vorgaben ausfallen, umso mehr Fähigkeit zur Selbstorganisation muss bei einer Gerätschaft implementiert sein. Im Falle des Reglers sind die Vorgaben dürftig, denn es muss keine Abstimmung auf ein ganz bestimmtes Übertragungsverhalten zu Regelstrecken angegeben sein. Falls dennoch erweiterte Instruktionen bei der softwareseitigen Initialisierung oder bei Konstanten vollzogen werden sollen, genügen in der Regel Richtwerte.

Es gibt zwei grundsätzliche Möglichkeiten der Reglereinstellung:

- | | |
|----|---|
| a. | Die Einstellung mithilfe der nicht normierten Sprungantwortfunktion mit dem Ergebnis des Arbeitsprodukts aus den ermittelten Parametern. Hierfür ist die <i>verstärkte Anregung zu inaktivieren</i> , auch für den Betrieb. Die Einstellung betrifft die Randregelstrecke mit dem geringsten Verzug am Beginn des Gültigkeitsbereichs. |
| b. | Die Einstellung gleich über das Arbeitsprodukt , mit der Ausrichtung an der zulässigen Überschwingweite durch Austesten. Hierfür und für den Betrieb <i>gilt die verstärkte Anregung</i> . Die Methode ergibt einen mit dem Streckenverzug zunehmend steileren Anstieg, der sich weniger bei verzögerungsarmen Regelstrecken auswirkt. |

Beide Einstellungen gelten für einen ganzen Regelstreckenbereich. Zur Festlegung ist das Ende des Regelstreckenbereichs mit einem empfohlenen *maximalen*, wenn auch kürzerzeitig möglichen Taktfaktor $tkf \approx 300$ über die gesamte Anregelzeit, auf die Anforderung der Überschwingweite hin abzustimmen. Um die Führungsgröße herum wird der Taktfaktor am Ende immer höher ausfallen als während der Anregelzeit. Was nach (1.40) der Verkleinerung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ und damit seines Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ bei geringer Regelabweichung geschuldet ist. Bei Punkt b ist auch die Überprüfung des Beginns des Regelstreckenbereichs vorzunehmen, der mit $tkf = 1$, besser $tkf > 1$ wegen Schwankungen, definiert ist. Ebenso wäre die Nutzung beider Möglichkeiten mit der Anwendung von Punkt b nach der Voreinstellung mit Punkt a gegeben.

1.10.1 Die Einstellung mithilfe der Sprungantwortfunktion

Die Bestimmung der zwei vorzugebenden Einstellparameter des Reglers lässt sich sowohl für eine einzelne Regelstrecke, als auch gleich für einen Verzugsbereich durchführen. In beiden Fällen ist von der Randregelstrecke mit dem geringsten Verzug auszugehen, die bei Einzeleinstellung gleich für die gewünschte Regelstrecke gilt. Doch selbst bei Verwendung

nur einer einzigen Regelstrecke wird sich, abhängig von Störgrößen, der Streckenverzugs ändern, sodass der der Randregelstrecke anschließende Bereich größeren Verzugs, generell zur Verfügung steht. Das Produkt der gewonnenen zwei Parameter ergibt schließlich das Arbeitsprodukt (1.35). Es gibt mehrere Realisierungen für das Arbeitsprodukt, mit stark abweichenden Grundtakt. Wie nachfolgend erläutert, ist für die Einstellung die verstärkte Anregung zu inaktivieren. Es sind wiederum zwei Fälle unterscheidbar:

1. Die Einstellung für eine Randregelstrecke mithilfe der Sprungantwortfunktion (nicht normiert, da effektive Steigung benötigt), mit *inaktivierter*⁵⁵ verstärkter Anregung (1.47), die bevorzugt bei Speicherstrecken wirksam ist. Für das Arbeitsprodukt P_A (1.35) sind dessen Faktoren **oberer Eckwert** $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und der zugeordnete **Grundtakt** t_0 zu bestimmen. Der Grundtakt t_0 orientiert sich an der Verzugszeit T_u oder nach Bedarf der Ausgleichszeit T_g der Sprungantwortfunktion. Er entspricht etwa der gebräuchlichen Festlegung von Abtastungen digitaler Regelungen, im Zweifelsfall etwas kleiner. Die herangezogene Sprungantwortfunktion ist diejenige zur Randregelstrecke des anschließenden Regelstreckenbereichs, für den das Arbeitsprodukt ebenfalls gilt. Bei variablen Führungsgrößen sollte der eingependelte Stellwert im Bereich von 20-60 % seines maximalen Werts liegen. Liegt er darüber, so stehen weniger Reserven für einen steilen Anstieg zur Verfügung. Liegt er darunter, verlängert sich die Ausregelzeit bevorzugt bei Speicherstrecken mit noch wenig wirksamem Ausgleich. Allenfalls wären etwa 15-80% des maximalen Stellwerts tolerabel⁵⁶.

Zur Festlegung des formell größten Steigungsindikators $\sqrt{a_{oe}}$ dient die mittels Sprungantwort gewonnene Steigung s (Tangens) der Wendetangente (besser eine größere Steigung davor) oder ohne Wendepunkt, ein Abschnitt größter Steigung als Hilfsgröße. Damit wird bestimmt, dass die ausgewählte Steigung s , bezogen auf die Basisfunktion $e_0 = |a \cdot t^2|$ des quadratischen Abschnitts der Führungsfunktion, derjenigen Steigung bei der angegebenen Regelabweichung e_0 entspricht, die der Funktionsgraph beim ermittelten Faktor a , mit t^2 abbildet. Zur Gewinnung der Steigung s wird man, abhängig von der späteren Führungsgröße w , für die Sprungantwort 100 % oder wenigstens 60 % des maximalen Stellwerts einsetzen.

Zur Gewinnung des oberen Eckwerts $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators aus der Steigung s ist wie eben angeführt, der größere quadratische Abschnitt der Führungsfunktion mit $|e_0| > e_0s$ herangezogen (ab e_0s beginnt die Teilfunktion der 4. Potenz). Der Ausdruck

$$\sqrt{a_{oe}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{|s|}{\sqrt{3 \cdot |e_0| - e_0s}} \quad (1.52)$$

ermittelt diesen oberen Eckwert.

⁵⁵verstärkte Anregung inaktivieren mit Konstante $aqfix = 2$ im Abschnitt „3.2 Die Programmkodierung“ auf Seite 98ff

⁵⁶siehe dazu auch „1.6.2 Der Einsatzpunkt der Regelung“ auf Seite 42

Gleichgültig wie die Steigung s entnommen wurde, wird sie als Ableitung von (1.4) nach t betrachtet. Anschließend t durch (1.7) substituiert. Nach dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ aufgelöst ist dieser in $\sqrt{a_{oe}}$ umbenannt.

2. Die Einstellung ohne die Heranziehung einer Sprungantwortfunktion, sondern gleich mit einer testweisen Vorgabe von oberem Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und Grundtakt t_0 . Entweder mit einer einzigen Regelstrecke für den oberen Verzugsrand des kürzesten Streckenverzugs, oder zwei Regelstrecken für den oberen und unteren Verzugsrand als zu testende Einsatzbreite. Die verstärkte Anregung (1.47) ist weiterhin zu *inaktivieren*. Zur Bestimmung des Arbeitsprodukts ist der Bereichsrand des kürzesten Streckenverzugs mit dem oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und seinem Grundtakt t_0 , heranzuziehen. Ein kleinerer unterer Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$ des Steigungsindikators beim größten Streckenverzug, lässt sich als Testgrenze vormerken. Sein Arbeitsprodukt entspricht wegen (1.34) mit der infolge Synchronisation erfüllten Gleichheitsforderung, dem des bereits bestimmten Werts mit dem Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$. Der Grundtakt t_0 ist entsprechend größer. Natürlich wäre so ein Austausch auch mit Zwischenwerten des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ möglich.

Jedenfalls sollte bei großem Streckenverzug, der Grundtakt nicht zu klein und damit der Taktfaktor tkf nicht zu groß ausfallen⁵⁷, weil sonst die Adaption des Reglers beim unteren Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$ mit hoher Rahmenabtastung td merklich träger werden und sich damit die Regelstrecken Anpassung infolge höherer Zeitauflösung verlangsamen kann. Es bedarf nämlich wegen kleinerer Zuwächse mehr Arbeitstakte⁵⁸. In dieser Hinsicht sind dem Regelstreckenbereich Grenzen gesetzt, wenn sie auch großzügig ausgelegt sind.

Dessen ungeachtet sollten zur Überprüfung der Einstellung eines Regelstreckenbereichs, bei den beiden verzugsbedingten Bereichsrändern, verschiedene Führungsgrößen w herangezogen werden. Zum einen eine kleinere Führungsgröße, die unter dem Einfluss der noch nicht vollständig abgebauten Startanregung steht und zusätzlich eine größere Führungsgröße. Man kann bei kleinen Führungsgrößen mit 50 bis 80 Einheiten (z. B. Grad Celsius) davon ausgehen, dass dort eine größere Startanregung noch nicht vollständig abgebaut ist. Denn beim Start des Reglers ist eine Startanregung wirksam, die sich umso stärker in der Nähe der anfänglichen Regelabweichung bemerkbar macht⁵⁹.

Als optimaler Vorgang wäre zusammenfassend das Arbeitsprodukt abzuschätzen oder nach Einstellfall 1, das nun als vorläufig geltende Arbeitsprodukt für den Bereichsrand des geringsten Verzugs, mit dem oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und dem Grundtakt t_0 festzulegen. Anschließend annähernd der Bereichsrand mit dem größten verwendeten Verzug und dem unteren Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$

⁵⁷siehe auch „1.8.2 Die Unterbrechung der Rahmenabtastung“ auf Seite 53

⁵⁸siehe dazu „1.10.2.1 Die Änderung des Arbeitsprodukts bei Parameterwechsel“ auf Seite 73

⁵⁹siehe dazu oben „1.10.3 Die Startanregung“ auf Seite 73

des Steigungsindikators, indem dort vorläufig für eine beliebige Führungsgröße, das Arbeitsprodukt auf die geringste Überschwingweite hin anzupassen ist. Nun folgt gegebenenfalls die Feinabstimmung des Arbeitsprodukts für eine untere und dann für eine obere Führungsgröße, jeweils ohne als auch mit abgebauter Startanregung. Die Feinabstimmung nivelliert Einflüsse einer noch wirksamen Startanregung beim Sollwert, wenn ein größerer Führungsgrößenbereich zur Verfügung stehen soll. Dazu wäre das Arbeitsprodukt für die beiden Bereichsränder so zu ändern, dass die Überschwingweite überall am geringsten ausfällt. Wenngleich es sich bei den Anpassungen der Überschwingweite um kleine bis sehr kleine Größenordnungen des Arbeitsprodukts handelt. Beim Bereichsrand mit dem geringsten Streckenverzug, wird sich dadurch die Überschwingweite kaum oder nicht ändern, da dort die Einstelltoleranzen nicht so ins Gewicht fallen. Somit wären die Bereichsränder abgesteckt.

Der Regler strebt aufgrund der Führungsfunktion zur Regelabweichung null, mithilfe der auf dem Arbeitsprodukt beruhenden Verzugsanpassung an die Regelstrecke, durch Synchronisation des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert. Eine Feinabstimmung berücksichtigt überlagerte Startanregungen. Denn liegt der Wert der Führungsgröße näher am Startpunkt der Regelgröße, so könnte eben die Startanregung auf Höhe der Führungsgröße noch nicht vollständig abgebaut und für eine größere Überschwingweite verantwortlich sein. Insofern kann, falls eine Feinabstimmung angebracht war, eine geänderte Führungsgröße die wiederholte Feinabstimmung zweckmäßig erscheinen lassen. *Gemeinhin ist die Feinabstimmung unnötig bei abgebauter Startanregung oder wenn der Stand der Führungsgröße nur nach abgeschlossener Ausregelzeit von Interesse ist.*

Ändert man unter Beibehaltung des Grundtakts t_0 das Arbeitsprodukt, so ändert sich gleichfalls der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators. In der Folge ist genauso der Taktfaktor tkf (1.40) verschieden und mit ihm die Rahmenabtastung td (1.14). Ebenfalls ändert sich mit dem Arbeitsprodukt der abbauende Regelabweichungszuwachs ed nach (1.49) bzw. (1.50), der wegen der gleichwertigen Differenz $|e_0 - e_1|$ bei (1.19), in geeigneter Relation zum Stellwertzuwachs $|yd|$ (1.21) steht. Nimmt bei Verkleinerung des Arbeitsprodukts P_A die Steigung der Regelgröße mit erhöhter Überschwingweite zu, so ist im Gegensatz zur Einstellung mit dem Arbeitsprodukt⁶⁰, die verstärkte Anregung fälschlicherweise nicht abgeschaltet. Bei zunehmender Steigung nach dem Reglerstart ist noch die Startanregung wirksam.

Beispielfälle

Liegt der Regelstreckenverzug innerhalb konzipierter Grenzdaten, ist die Nachstellung in der Regel unnötig. Der Rundungsfehler spielt zwar bei größerem Taktfaktor praktisch keine Rolle, aber er ist bei sehr kleinem Taktfaktor groß ((1.41) bzw. (1.42)). Der Parameter Grundtakt t_0 des Arbeitsprodukts P_A (1.35) ist in der Regel unkritisch. Was den Rundungsfehler bei auf den Grundtakt fixierter Anregelzeit und kleinem Taktfaktor kompensieren kann.

⁶⁰siehe dazu Abschnitt „1.10.2 Die Einstellung mit dem Arbeitsprodukt“ auf Seite 71

Beispielhaft seien drei ausgewählte Fälle von Reglereinstellungen angeführt:

- A. Eine Regelstrecke, der der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und der Grundtakt t_0 zugrunde liegen und der sich in Fortsetzung länger werdenden Verzugs, weitere Regelstrecken zu einem ausgewählten Regelstreckenbereich nahtlos anschließen. Wobei eine Feinabstimmung für die weiteren Regelstrecken vorgenommen werden kann oder auch nicht, abhängig vom Bedarf, d. h. der Überswingweite über alle betroffenen Regelstrecken. Für diese gelten gleiches Arbeitsprodukt P_A und gleicher Grundtakt und damit formal gleicher oberer Eckwert. Der obere Eckwert des Steigungsindikators wird lediglich für die Regelstrecke mit kürzestem Verzug und praktisch einem Taktfaktor $tkf \geq 1$ im unteren einstelligen Bereich ausgeschöpft.
- B. Unter Beibehaltung der Einstellung 1 des Arbeitsprodukts P_A , ist ohne weitere Justierung der Grundtakt t_0 geändert, passend zur Streckengegebenheit der Regelstrecke mit dem kleinsten Verzug. Dabei ändert sich zwangsläufig der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators mit.
- C. Festgelegt wurde ein neuer Bereich, innerhalb oder außerhalb eines bereits bestehenden, verzugsorientierten Regelstreckenbereichs, aber mit neuem Arbeitsprodukt. Es wurde eine neue Regelstrecke aufgesetzt, der wieder ein oberer Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators mit zugehörigem Grundtakt t_0 zugrunde liegt. Aber dessen Betriebsparameter trotz Streckenüberdeckung verschieden sein können. Der Fall entspricht der Einstellung A, nur dass zur Veranschaulichung, Streckenbereichs vergleichend ein bereits bestehender Fall verworfen und eine Neugestaltung vorgenommen worden ist.

Obwohl aus äußerer Sicht das Gefüge der Wirkmechanismen beim Betrieb des Reglers von marginalem Rang ist, ist es für das Verständnis des internen Ablaufs von Bedeutung. Im Unterschied zur Rückführung der Regelabweichung, die wie auch immer, mittelbar auf statischen Beziehungen zum Stellwert beruht, wirkt der komparative Regelalgorithmus reduzierend bezüglich der Auswahl der Regelstreckenparameter. Denn die Regelabweichung wird entlang dem sich dem Streckenverzug anpassenden Graphen der Führungsfunktion, mit einer iterativen Stellgrößensteuerung sicher bis zur Führungsgröße w abgebaut.

1.10.1.1 Die Überschneidung von Regelstreckenbereichen

Die Lage der Randregelstrecke zu einer ausgewählten Regelstrecke des anschließenden Regelstreckenbereichs hängt vom Arbeitsprodukt ab. Oben in den Punkten 2, B und C sind bereits Fälle angeführt. Aus einem bekannten Arbeitsprodukt P_A nach (1.35) ist durch Division von $\sqrt{a_{oe}}$, der Grundtakt t_0 leicht zu erhalten. Beachtenswert hierbei ist, dass dieses Arbeitsprodukt bei einer Regelstrecke innerhalb der Einsatzbreite aber mit größerem Verzug, durchaus anders aussieht, wenn deren oberer Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators über ihre bekannte Sprungantwort und *ohne* verstärkte Anregung,

neu festgelegt wird. Denn nun ist dieser Eckwert wieder neuer Ausgangspunkt für die aktuelle Einsatzbreite hinsichtlich des Regelstreckenverzugs.

Beispielsweise könnte jetzt mit (1.52), bezogen auf eine Führungsgröße $w = 60$ Einheiten wie z. B. °C, das Arbeitsprodukt $P_A = 0,075$ s gelten, bei einem Grundtakt $t_0 = 5$ s. Aber eben erst mit der Einsatzbreite ab dem neuen oberen Eckwert des Steigungsindikators. Dabei ergeben sich geringfügig längere Anregelzeit und Ausregelzeit, was auf die Grundtakt bedingte, größere Schrittlänge der Rahmenabtastung und den dadurch verschieden schnellen Abbau der Startanregung zurückzuführen ist. Allerdings ermöglicht das Arbeitsprodukt allein keine Abschätzung zum Verzugsverhalten. Denn würde bei gleicher Steigungsabnahme bei der Sprungantwort und gleichem Grundtakt die Führungsgröße $w = 35$ gelten, so würde das feiner abgestimmte Arbeitsprodukt $P_A = 0,1$ s lauten und wäre nicht kleiner, sondern größer als das ursprüngliche Arbeitsprodukt $P_A = 0,09$ s. Die gleiche Steigung nach (1.52) näher an die Führungsgröße w gesetzt, kann die Überschwingweite und die Ausregelzeit beeinflussen.

Bei festliegendem oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators, lässt sich z. B. nach (1.52) das Spektrum der Steigungen s_g in Altgrad, über den Verlauf der Regelabweichung e_0 hinweg, für den quadratischen Abschnitt der Führungsfunktion bei $|e_0| \geq e_0s$ veranschaulichen mit

$$s_g = \arctan \left(\frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{a_{oe}} \cdot \sqrt{3 \cdot |e_0| - e_0s} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [\text{Altgrad}]. \quad (1.53)$$

Erkennbar enger ist bei dieser Funktion die Krümmung des Graphen der Führungsfunktion in Nullnähe der Regelabweichung e_0 mit steigendem oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$. Große Veränderungen der Überschwingweite wird es trotzdem nicht geben, da der Streckenverzug mit steigendem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ geringer und die Regelantwort deshalb schneller ist. Realistisch ist ein Steigungsindikator $\sqrt{a}$ mit $a < 0,5$.

1.10.2 Die Einstellung mit dem Arbeitsprodukt

Das ist die Vornahme der Standardeinstellung, bei der mit verstärkter Anregung⁶¹ ein geschätzter oder bereits bekannter Wert eines Arbeitsprodukts P_A , für einen ganzen Regelstreckenbereich angepasst wird. Bei der Einstellung nimmt insbesondere bei Speicherstrecken und bei abnehmendem Arbeitsprodukt, die Steigung der Regelgröße ab einer bestimmten Stelle anstatt weiterhin abzunehmen, wieder zu. Dann gibt es bei verstärkter Anregung nur ein mehr oder weniger großzügiges Fenster, bei dem die Anregelzeit mit minimaler Überschwingweite und gleichmäßigem Regelgrößenverlauf optimal ist. Das ist zugleich das Kriterium, ein passendes Arbeitsprodukt auszuwählen. So könnte die Einstellung mit der Sprungantwortfunktion helfen (siehe oben Abschnitt 1.10.1), um eine Vorauswahl für das endgültige Arbeitsprodukt zu finden. Das anschließend noch für die

⁶¹siehe dazu Abschnitt „1.8.3 Die verstärkte Anregung“ auf Seite 53

verzögärmste und die verzugreichste Regelstrecke eines Bereichs, d. h. für die beiden Bereichsgrenzen, auf die Anforderung der Überswingweite hin, fein abzustimmen wäre. Dann aber für diesen ganzen Regelstreckenbereich gelten würde. Auch hier sei empfohlen, mit den kleinsten und größten Führungsgrößen w zu testen. Trotzdem ist die Feineinstellung eine Maßnahme, die allerdings mehr der Form des Nachweises, als der unvermeidlichen Notwendigkeit geschuldet ist.

Der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und der Grundtakt t_0 sind die zwei Faktoren des Arbeitsprodukts P_A (1.35). Einmal bestimmt, lassen sie sich bei konstantem Arbeitsprodukt weitreichend verändern, weil dieses dann allein abhängig vom Betrag der Regelabweichung e_0 , den abbauenden Regelabweichungszuwachs ed (1.49) bzw. (1.50) wegen (1.34) prägt. Dieser macht es möglich, dass ein und dasselbe Arbeitsprodukt verzugsorientiert für einen ganzen Regelstreckenbereich zu verwenden ist, sich beziehend auf die zwei Faktoren des Arbeitsprodukts seiner Randregelstrecke. Ein Beispiel hierzu:

Für den Übergang der zwei Teilfunktionen der Führungsfunktion, bei der Regelabweichung $e_0s = 1$ mit der Stellwertskalierung nach (1.28) und vorzugsweise einem Stellwert in Höhe der Führungsgröße w von 20-60 %, stellt beispielhaft das Arbeitsprodukt $P_A = 0,09 \text{ s}$ eine passende Basis für einen Bereich verzögerungsarmer Regelstrecken bis zu Speicherstrecken, mit einer Verzugszeit T_u der Sprungantwortfunktion im bruchteiligen bis zum mehrstelligen Sekundenbereich dar. Bekannt sein muss bei vorgegebenem Arbeitsprodukt, allein noch einer der beiden Einstellparameter, oberer Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators oder Grundtakt t_0 .

Würde in Abänderung für einen eingerichteten Gültigkeitsbereich, ein bestehender oberer Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ spürbar verkleinert werden *ohne* den Grundtakt zu ändern und sich damit auch das Arbeitsprodukt *verkleinern*, so würde ebenfalls der abbauende Regelabweichungszuwachs ed *kleiner* werden und sich Folgendes einstellen:

A. Bei *verstärkter* Anregung als Standardeinstellung.

1. Bei verzögerungsarmen Regelstrecken (kaum oder kleinerer Streckenverzug).
Wie bei Punkt B.1
2. Bei Speicherstrecken (größerer Streckenverzug).
Zu kurze Anregelzeit mit zu steilem Regelgrößenanstieg und zu großer Überswingweite infolge schlechter Anpassung des Arbeitsprodukts⁶². (Der gleiche Effekt würde sich hier bei Vergrößerung des Arbeitsprodukts einstellen.)

B. Nur bei *beständiger*⁶³ Anregung und verzugsunabhängig, d. h. sowohl bei verzögerungsarmen Strecken als auch bei Speicherstrecken.

⁶²siehe dazu „1.8.3.1 Unterschiede bei verstärkter Anregung“ auf Seite 55

⁶³verstärkte Anregung inaktivieren mit Konstante $aqfix = 2$ im Abschnitt „3.2 Die Programmkodierung“ auf Seite 98ff, Übersicht verschiedener Formen der Anregung auf Seite 35

1. Der Regler würde infolge der größeren Anregelzeit, erst später die Regelabweichung null erreichen. (Umgekehrt wäre hier bei vergrößertem Arbeitsprodukt die Anregelzeit kürzer.)

1.10.2.1 Die Änderung des Arbeitsprodukts bei Parameterwechsel

Ein und dieselbe Regelstrecke kann verschiedene Arbeitsprodukte P_A aufweisen, indem diese Regelstrecke verschiedene Randregelstecken besitzt. Dann liegen unterschiedliche Grundtakte t_0 und/oder unterschiedliche größte Steigungsindikatoren $\sqrt{a_{oe}}$ (obere Eckwerte) vor. Bei unverändertem Grundtakt t_0 fällt das Arbeitsprodukt P_A zusammen mit dem oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators umso größer aus, je kleiner der Streckenverzögerung ist.

Gewöhnlich ändert sich mit dem Arbeitsprodukt P_A der abbauende Regelabweichungszuwachs⁶⁴ $\Delta e_0 = ed$. Deshalb verkürzt sich mit der Erhöhung des Arbeitsprodukts die Anregelzeit mit Vergrößerung der Überschwingweite. Umgekehrt stellt sich mit der Senkung des Arbeitsprodukts die gegenteilige Reaktion ein. Das gilt so nicht mit der verstärkten Anregung⁶². Denn der Eingriff verfälscht zu Gunsten eines Maximums die Eindeutigkeit dieser Parameterabhängigkeiten.

1.10.3 Die Startanregung

Die Startanregung gibt beim Reglerstart einen einmaligen Anstoß in Form eines erhöhten Stellwerts. Sie ist z. B. für kritische Startsituationen einstellbar. Mit der Zunahme des Betrags der Führungsgröße w unter Beibehaltung der sonstigen Größen, verringert sich bei der Überschwingweite der Einfluss der Startanregung. Mit deren Erhöhung verkürzt sich die Anregelzeit und soweit die Startanregung noch nicht abgebaut, bei zunehmender Überschwingweite. Das heißt andererseits, dass mit verkleinerter Startanregung der Betrag der Führungsgröße w sinkt, bei dem der Einfluss der Startanregung endet. Die Regelgröße legt einen gewissen Weg zurück, bis der Startanstoß abgebaut ist. Die Startanregung verändert bis zu ihrem Abbau, die Vorzeichensteuerung des Stellwertzuwachses yd am Komparator. Die nachwirkende Beeinflussung der Startanregung ist abgebaut, wenn nach einem klar sichtbaren Zurückgang des Stellwerts, der regelmäßige Wechsel von Zu- und Abnahme des Stellwerts wieder einsetzt⁶⁵. Unabhängig von dessen Amplitudenweite. Wenngleich der durch die Startanregung angehobene Stellwertpegel soweit bestehen bleibt.

Ist bei der Startanregung der Stellwert noch so groß, dass die Regelgröße ohne Einflussnahme des Reglers die Führungsgröße weit überlaufen würde, dann bedeutet ein höherer Anregungsfaktor *anf* (nach Abschnitt 1.6.1.1) umgekehrt, dass mehr Stellwertzuwachs zur Verfügung steht, um den überhöhten Stellwert zu mindern. Umgekehrt heißt das,

⁶⁴siehe Abschnitt „1.9.1.1 Die konstante Minderung der Regeldifferenz“ auf Seite 56

⁶⁵in Abbildung 2.1 des Anwendungsmusters auf Seite 92 hat im Verlauf 2 bereits nach der ersten durchgehenden Halbperiode der Stellwertabsenkung, die Startanregung ihre Beeinflussung verloren

dass ein zu niedriger Anregungsfaktor einen vorhandenen überhöhten Stellwert zu wenig abbaut und sich dadurch die Überschwingweite vergrößert.

Bei einem *fest vorgegebenen Steigungsindikator*⁶⁶ gilt im Prinzip die Aussage zur Handhabung der Anregelzeit mit der Startanregung. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass hierzu die Startanregung in der Regel etwas kleiner ausfällt und an den vorgegebenen Steigungsindikator anzupassen ist. Es sei denn, ein Knick der Regelgröße mit gegebenenfalls steilerem Startanlauf ist erwünscht.

Die Startanregung ist über Konstanten⁶⁷ voreingestellt. Während die beständige Anregung (1.22) und (1.23) in Form beständig erhöhter Stellwertzuwächse sowie die verstärkte Anregung (1.47), von Steuergrößen aus dem Regelprozess abhängen. Für Regelstrecken mit kritischen Anlaufsituationen wird es unumgänglich sein, ein vermehrtes Augenmerk auf die Startanregung zu richten. Die Anregelzeit lässt sich *zum Reglerstart in der Initialisierungsroutine* insbesondere für kleinere Führungsgrößen, unter *Beibehaltung* der Startanregung, durch Voreinstellung des führenden Vergleichssteigungsindikators $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) verändern⁶⁸. Eine z. B. dadurch erreichte Erhöhung des Taktfaktors tkf (1.40) könnte bei einer, beim Reglerstart anfänglich der Regelrichtung einige Zeit entgegenlaufenden Regelgröße insofern angebracht sein, als der dann bereits höhere Taktfaktor eine besonders angepasste Angleichung an problematische Verzugssituationen ermöglicht.

1.10.4 Kontrollmöglichkeiten der Einstellung

Ist ein Arbeitsprodukt P_A ausgewählt und kommt eine neue Regelstrecke mit vorgeblich kleinerem Verzug zur Anwendung, ohne Veränderung seiner Faktoren oberer Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und Grundtakt t_0 , so ist das Vorliegen einer minimalen Anregelzeit auch mithilfe des Betrags des Taktfaktors tkf (1.40), für den Bereichsrand des geringsten Verzugs überprüfbar⁶⁹. Innerhalb der minimalen Anregelzeit der Randregelstrecke sollte der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) den oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators⁷⁰ nicht überschreiten. Der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ gilt formal als größter Steigungsindikator mit dem kleinsten Taktfaktor $tkf = 1$ und steht nach (1.40) über den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ in Beziehung zum Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13), der das aktuelle Anstiegsverhalten widerspiegelt. Daraus geht der Taktfaktor tkf zur Festlegung der Rahmenabstastung td (1.14) hervor. Bei dauerhaft gemessenem $\sqrt{a} > \sqrt{a_{oe}}$ ist die Einstellung nicht optimal, weil der kleinste Taktfaktor einem Grundtakt t_0 entspricht und ein Taktfaktor $tkf < 1$ schon wegen des fest eingestellten Grundtakts nicht möglich ist.

So könnte z. B. innerhalb der Anregelzeit der Taktfaktor als Grundtaktanzahl, etwa zwischen 1 und 5 schwanken. Die Schwankung des Taktfaktors sagt aus, dass es zu seinem

⁶⁶Näheres noch im Abschnitt „1.11 Der Steigungsindikator als Festwert“ auf Seite 76

⁶⁷*yhstr* und *yhstf* ausgewiesen in der Programmbeschreibung, im Abschnitt 3.1 hier auf Seite 94

⁶⁸betrifft beim Abschnitt 3.2 auf Seite 98ff im Musterprogramm, den Parameter *maq* im

Unterprogramm *init*

⁶⁹siehe auch „3.3 Anmerkungen zu Simulation und Ausführung“ auf Seite 106

⁷⁰siehe fett hervorgehoben Seite 17 unten

Durchschnittswert immer noch einen kleineren Taktfaktor gibt. Bleibt er dagegen konstant beim Wert 1 oder 2 ist davon auszugehen, dass für den betreffenden oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$, der Grundtakt für die Regelstrecke zu groß bzw. der obere Eckwert des Steigungsindikators zu klein ist und daher die Anregelzeit etwas kürzer sein könnte⁷¹. Zur Abhilfe kann bei gleichbleibendem Grundtakt t_0 das Arbeitsprodukt P_A etwas vergrößert⁷² werden. Damit einhergehend vergrößert sich der abbauende Regelabweichungszuwachs ed (1.49) bzw. (1.50) und infolgedessen die Steilheit der Regelgröße. Einfluss auf die Anregelzeit hat neben der Startanregung, eine benutzte verstärkte Anregung nach (1.47). Aus der Beobachtung eines sehr kleinen Taktfaktors tkf während der Anregelzeit, resultiert demnach eine Kontrollmöglichkeit des Regelverhaltens.

Beim Wechsel zu trägeren Regelstrecken kann im bestehenden Regelstreckenbereich, mit einer Randregelstrecke neu aufgesetzt werden, indem das Arbeitsprodukt P_A (1.35) gesenkt wird. Umgekehrt kann bei verzugsärmeren Strecken durch Erhöhung des Arbeitsprodukts, die Randregelstrecke entgegengesetzt verschoben werden. Erfordern umgekehrt Regelstrecken lediglich kürzere Taktzeiten, so lässt sich der Grundtakt t_0 bei gleichem Arbeitsprodukt P_A senken, während sich der oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ erhöht, ohne dass sich der Regelgrößenverlauf regelstreckenbezogen grundlegend ändert. Regulär ist dagegen die stärkere Erhöhung des Taktfaktors tkf (1.40) und damit der Rahmenabtastung td im Laufe des Abbaus der Regeldifferenz bis zur Ausregelzeit⁷³. Bei Änderungen des Arbeitsprodukts zur Auswahl neuer Regelstrecken mit unterschiedlichen Verzugszeiten, sollte die verstärkte Anregung (1.47) abgeschaltet sein. Das Arbeitsprodukt kann mit ihr später wieder fein abgestimmt werden.

Auch bei schlecht regelbaren Strecken mit zu kleinem Verhältnis $\frac{T_g}{T_u}$, wirken sich Regelschwankungen während der Ausregelzeit hauptsächlich auf die Stellgröße und weniger auf die Regelgröße selbst aus. Wollte man die Schwankungen bei diesem besonderen Sachverhalt verringern, so wird man die Startanregung und/oder das Arbeitsprodukt bei verlängerter Anregelzeit senken müssen.

Das Auftreten größerer Überschwingweiten im Vergleich zum optimalen Betrieb, ist die Auswirkung nicht abgeschlossener Streckenadaptation infolge zu lang andauernder Anpassung wegen unangemessener Startanregung, z. B. bei sehr nahe am Startpunkt gelegener Führungsgröße w . Der Umfang des ausgewählten Gültigkeitsbereichs einer Menge von Regelstrecken beim Bereichsrand um den unteren Eckwert $\sqrt{a_{ue}}$, richtet sich hinsichtlich des Grundtakts t_0 danach, wie beweglich der Regler aufgrund eines hohen Taktfaktors noch auf Störgrößen bzw. Streckenänderungen reagiert⁷⁴. Überdies sollten sich Messauflösung und Rechenauflösung in passenden Relationen zueinander bewegen.

⁷¹Ein großer Taktfaktor wechselt sich leichter als ein kleiner. Die Relation in (1.40) muss beim Sprung von $tkf = 2$ auf 1, halbiert sein, während z. B. bei der Verkleinerung von 10 auf 9 nur ein Zehntel ausreicht. Je größer der Taktfaktor tkf , umso stärker seine Schwankung.

⁷²siehe dazu „1.10.2.1 Die Änderung des Arbeitsprodukts bei Parameterwechsel“ auf Seite 73

⁷³siehe dazu auch „1.8.2 Die Unterbrechung der Rahmenabtastung“ auf Seite 53

⁷⁴siehe im Abschnitt „1.8.1 Die Begrenzung des Taktfaktors“ auf Seite 50, den Absatz ab (1.43)

1.11 Der Steigungsindikator als Festwert

Bei ausreichender Startanregung stellt sich der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) des Reglers und damit die Anregelzeit grenzwertig ein. Andererseits ist es möglich, die Anregelzeit verlängert mithilfe eines kleineren bleibenden Steigungsindikators $\sqrt{a_{soll}}$ als unbeweglichen Festwert vorzugeben. Das geschieht ohne verstärkte Anregung⁷⁵ und anhand überschreibender Vorgabe des Mittelwerts $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) als Referenzgröße zur Synchronisation, mit der Folge der Verflachung der Quadratfunktion. Der Graph der Führungsfunktion passt sich über den Taktfaktor tkf (1.40) der Vorgabe an. Es braucht indessen eine kurze Anfahrzeit, bis der vorgegebene feste Steigungsindikator $\sqrt{a_{soll}}$ erreicht ist. Dabei darf dieser für die Regelstrecke nicht über ihren größten real auftretenden Steigungsindikator $\sqrt{a} \leq \sqrt{a_{oe}}$ hinaus gehen. Denn ist er zu steil vorgegeben, kann er nicht erreicht werden und der Stellwert steigt weiter anfordernd bis zu seinem Maximum und sinkt beim Überlauf der Führungsgröße w schließlich auf null ab. Der Regler wirkt dann wie im verzögerten Zweipunkt-Schaltbetrieb mit nachlaufendem Stellgrößenanstieg und entsprechender Überschwingweite. Ist $\sqrt{a_{soll}}$ zu flach, so wird ein Anteil der Einstellzeit verschenkt. Die Ausdehnung der Anregelzeit ist begrenzt, jedoch auf das Vielfache der grenzwertigen Anregelzeit verlängerbar (bis ca. 6-fach, z. B. für Positionierungssysteme). Dabei sollte auf die dem fest vorgegebenen Steigungsindikator $\sqrt{a_{soll}}$ zugeordnete, gesonderte Startanregung⁷⁶ geachtet werden.

Wird die Anregelzeit zu lange gedehnt, so beginnt der Regelgrößenverlauf immer mehr um seinen Idealverlauf zu pendeln, indem sich Regelschwankungen stets stärker bemerkbar machen. Ursache ist die durch den Eingriff verschiedene Anpassung von Regelstrecken mit und ohne Ausgleich. Bei Ausgleichsstrecken werden sich dann eher stärkere Schwankungen zeigen, wenn sich Zu- und Abführung der Stellenergie zu nahe kommen, demnach die Energiespeicherung zu gering wird. Außerdem sollte die Begrenzung des oberen Taktfaktors tkf_{max} nicht erreicht werden, da dann der Übergang zur Führungsgröße sehr flach und langsam werden wird.

Der Betrag des fest vorgegebenen Steigungsindikators wird in der Regel nicht sofort getroffen, sondern nähert sich iterativ vom Ausgangszustand, gleitend seinem Sollwert $\sqrt{a_{soll}}$ über die passende Stellwertänderung an. Dadurch werden scharfe und störende Übergänge vermieden. Die Einbindung des Werts des festen Steigungsindikators betrifft alleinig den Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) vor der Mittelwertbildung und unter Berücksichtigung des Vergleichs seiner Größe, zu dem des bleibenden aktuellen Steigungsindikators $\sqrt{a}$ sowie der Regelabweichung $e0f > e0s$. Das heißt, dass die Annäherung an den vorgegebenen festen Steigungsindikator nur aktiv vollzogen wird

bei $(|e0| > e0f) \wedge (\sqrt{a_i} > \sqrt{a_{soll}})$ mit

$$\sqrt{a_{i_{substituiert}}} = \frac{\sqrt{a_{soll}} + \sqrt{a_i}}{2}, \quad (1.54)$$

⁷⁵siehe Abschnitt „1.8.3 Die verstärkte Anregung“ auf Seite 53

⁷⁶siehe auch „1.10.3 Die Startanregung“ auf Seite 73

andernfalls wird der Steigungsindikator regulär angepasst.

Der aktuelle Steigungsindikator $\sqrt{a}$ geht in die Mittelwertbildung (1.54) ein, nähert sich als $\sqrt{a_{\text{substituiert}}}$ dem vorgegebenen festen Steigungsindikator $\sqrt{a_{\text{soll}}}$ an und wirkt über den Stellwert, als angeglicher Steigungsindikator $\sqrt{a}$ wieder zurück. Anschließend folgt die komparative Mittelwertbildung nach (1.16). Der Vorgang wiederholt sich ständig. Schließlich ist der feste Steigungsindikator $\sqrt{a_{\text{soll}}}$ erreicht und der substituierte Steigungsindikator (1.54) pendelt dauerhaft um den Betrag $\sqrt{a_{\text{substituiert}}} \approx \sqrt{a_{\text{soll}}}$. Mit der Umschaltung zur regulären Mittelwertbildung bei nicht erfüllten Einsatzbedingungen in (1.54), verläuft der Abbau der Regelabweichung zu null gleichförmiger.

1.12 Der Regler in seiner Gesamtheit

Der Regler handhabt nur mittelbar die Beziehung von Stellwert und Regelabweichung. Regelgesetzmäßigkeiten können für das Verfahren nicht geschlossen algebraisch dargestellt werden. An ihre Stelle tritt eine Handlungsanweisung in Form eines Regelwerks mit algebraisch formulierten Abschnitten, das unter Aufteilung in Zeit- und Anstiegsebene im Koordinatensystem ausdrückt, wie die Regelabweichung (Regeldifferenz) auf null zurückzuführen ist. Zur Beurteilung einer Regelstrecke mit der Anforderung stetig steigender Regelgröße, steht deren Verzugsverhalten im Vordergrund, orientiert am Steigungsverlauf eines Intervalls der Sprungantwortfunktion oder adäquater Steigungen, wie sie z. B. bei Positionierungssystemen beim Herannahen an den Haltepunkt auftreten. Ein ausgewählter Steigungsabschnitt ist bei der Reglereinstellung lediglich in den Steigungsindikator, dem Merkmal einer festgelegten Führungsfunktion, umzurechnen und eine grundlegende Taktzeit festzulegen. Es lassen sich ganze Bereiche für Regelstrecken vorab festlegen, so dass der adaptive Regler vor Ort keiner besonderen Justierung mehr bedarf.

Steigungsindikator und Führungsfunktion

Der Steigungsindikator⁷⁷ ist ein steigungsabhängiger Parameter. Er veranlasst die Einhaltung des Verlaufs der festgeschriebenen Führungsfunktion, die den Verlauf der Regelabweichung abbildet und diese gegen null zurückführt. Ihre Steigung ist abhängig vom Streckenverzug, dargestellt durch die variable Rahmenabtastung td als interner Regeltakt und den abbauenden Regelabweichungszuwachs ed bzw. seinen äquivalenten Betrag $\Delta e_0 = |e_0 - e_1|$. Die aneinander gereihten Zuwächse weisen bestimmte Regelstrecken übergreifende Eigenschaften auf und ergeben in der Zeitsummierung den Graphen der Führungsfunktion. Die Einhaltung ihrer verzugsbedingten Krümmung gewährleistet den sicheren Nullanlauf. Sie begründet die Unabhängigkeit der Regelung von der Deklaration von Übertragungselementen und deren geschlossenen formulierten Übertragungsfunktionen. Auch wenn wegen Störgrößen bzw. unregelmäßigen Stellgrößenänderungen, der Sollwert bei geringer Überschwingweite nicht sofort exakt getroffen werden sollte.

⁷⁷siehe Abschnitt „1.3 Der Steigungsindikator“ auf Seite 18

Zur beispielhaften Veranschaulichung des Verzugsverhaltens lägen die Vektoren einer Reihe gleicher Rahmenabtastungen td , mit deren zur Führungsgröße w hin kontinuierlich abnehmenden Regelabweichungszuwächsen ed , auf dem Graphen der Führungsfunktion. Zieht man nun den Graphen der Führungsfunktion zeitlich in die Länge, so ergibt sich ein zweiter und weniger gekrümmter Graph, der bei längeren Rahmenabtastungen td und *projizierten* abbauenden Regelabweichungszuwächsen ed , einen größeren Streckenverzug aufzeigt. Überschwingweiten sind reduziert (umso besser, je mehr die Startanregung abgebaut ist), da sich die Rahmenabtastung unmittelbar anpasst und dadurch die nötige Zeit für den abbauenden Regelabweichungszuwachs zur Verfügung steht.

In Abbildung 1.3 ist die Abfolge der einzelnen Reglerfunktionen mit den reglereigenen Parametern dargestellt. Das Produkt aus der Rahmenabtastung td und dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$, ein Steigungsmerkmal der die Regelabweichung abbauenden Führungsfunktion, ist dem statischen Arbeitsprodukt P_A gleichgesetzt. Aus der Führungsfunktion ergibt sich algebraisch der Regelabweichungszuwachs ed (anstatt des formal gültigen ed ist aus

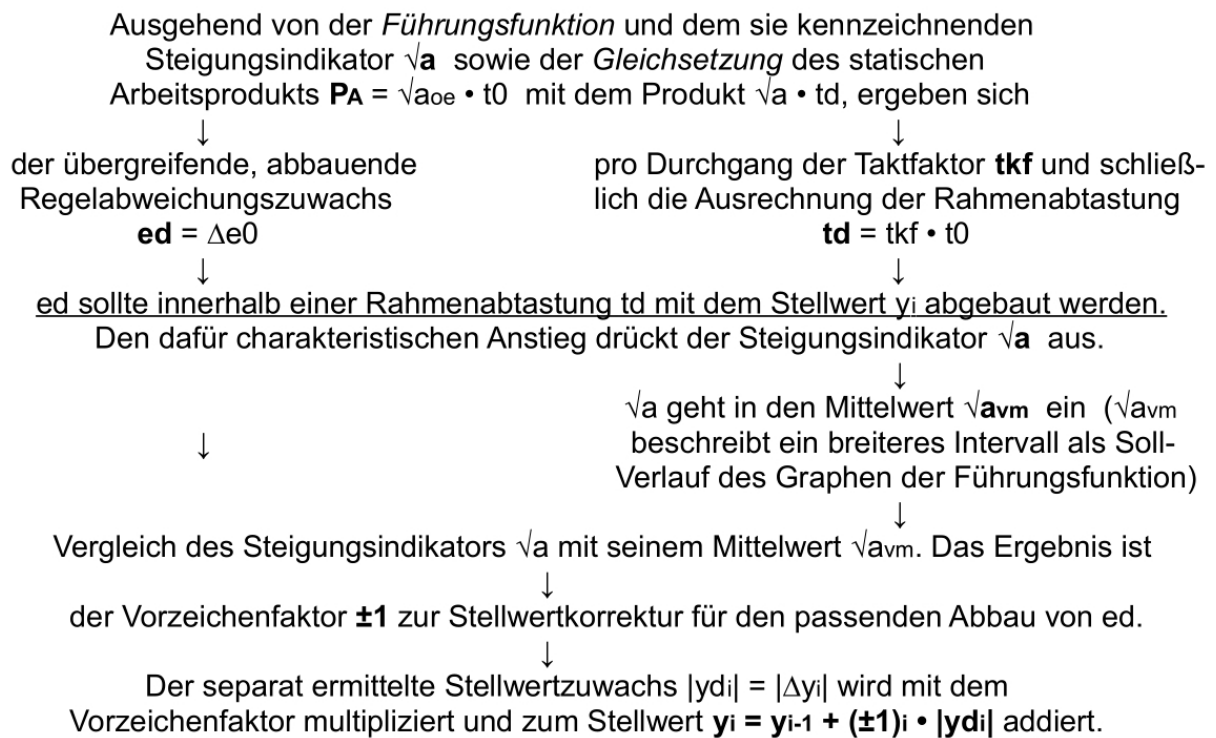


Abbildung 1.3: Ablaufmuster des Reglers unter Zugrundelegung seiner Parameter

Gründen der realen Abbildung *pro Regeltakt* zur Gewinnung des Stellwertzuwachses $|y_d|$, die *gemessene* Regelabweichungsdifferenz $|e_0 - e_1|$ verwendet). Wegen der Gleichwertigkeit der beiden Produkte (1.34) ist das statische Arbeitsprodukt P_A (1.35) in ed (1.10)

bzw. (1.12) enthalten, wodurch alle Variablen des Regelabweichungszuwachses ed , bis auf die Regelabweichung e_0 , zu Konstanten werden.

Taktfaktor und Rahmenabtastung

Ebenso aus der Gleichwertigkeit ergibt sich durch Umstellen der Taktfaktor tkf (1.40), abhängig vom Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) als stabilisierten Steigungsindikator $\sqrt{a}$ und dem größten Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$. Als Faktor zur Rahmenabtastung td beinhaltet tkf die Anzahl der konstanten Grundtakte t_0 (konzeptionelle und Hardware bedingte Abtastung) für den jeweiligen Regeltaktzyklus. Die Abhängigkeit des Regelabweichungszuwachses ed wegen (1.34) von der variablen Rahmenabtastung td und dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ als Steigungsmerkmal, ist ersichtlich aus (1.10 bzw. 1.12). Mit dem auf die Regelstrecke wirkenden Taktfaktor tkf (1.40), ist auch dessen voraussetzende Gleichheitsforderung in (1.34) erfüllt. Die Rahmenabtastung td (1.14) ist mit ihrem zugrunde liegenden Taktfaktor tkf für die dem Steigungsindikator $\sqrt{a}$ entsprechenden Steigung verzugsangepasst, während eben im Zeitzuwachs td der wegen (1.34) vom Arbeitsprodukt P_A (1.35) abhängige Regelabweichungszuwachs ed , über *die gesamte Führungsfunktion* bis zu ihrer Nullstelle, von der Regelabweichung e_0 vorgegeben ist. Wobei der Verlauf der Regeldifferenz dem Graph der Führungsfunktion entspricht. Das ist mithilfe der Synchronisation des Regelabweichungsverlaufs mit dem auf null zielenden Graphen der Führungsfunktion, durch den Komparator gewährleistet. Damit gelingt die fortwährende Verzugsanpassung, ohne den Streckenverzug im Besonderen messen zu müssen.

Synchronisation und Stellwert

Im Einzelnen wird nun durch die Synchronisation, der Graph der Führungsfunktion dem realen Verlauf der Regelabweichung aufgeprägt (nach Seite 58). Dazu ist für den gemessenen Regelabweichungsverlauf in Echtzeit eine Größe bereitzustellen, die seine Synchronisation erlaubt: Aus den effektiven Regelabweichungen e_0 und ihrem Vorwert e_1 ist der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) algebraisch gewonnen. Dieser bildet die Führungsfunktion für nur jeweils einen Taktzyklus der Rahmenabtastung td ab, extrapoliert ihre Nullstelle über die beiden Messwerte, schwankt aber von Taktzyklus zu Taktzyklus wegen der Messungenauigkeiten stark. Immerhin gibt der gewonnene Steigungsindikator $\sqrt{a}$ den augenblicklichen Steigungsverlauf des Regelabweichungsabbaus an und stellt damit einen geeigneten Steuerparameter dar.

Erst der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ über mehrere Steigungsindikatoren $\sqrt{a}$ ergibt zeitübergreifend, eine stabile Zielführung der Führungsfunktion zu ihrer extrapolierten Nullstelle. Der Nullstellenanlauf der durch den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ abgebildeten steuernden Führungsfunktion ist umso exakter, je kürzer der extrapolierte Abstand ausfällt. Deshalb trifft bei abgebauter Regelabweichung, die Führungsfunktion die Nullstelle genau. Der Übergang geschieht nicht sprunghaft sondern kontinuierlich durch den Prozess, weshalb auch die Nullstelle kontinuierlich immer besser getroffen wird.

Der mittelwertige Steigungsindikator fungiert nun als steuernder Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$. Der Komparator führt über die Synchronisation die Regelabweichung

iterativ zurück, indem er den bei jeder Rahmenabtastrung td anfallenden Steigungsindikator $\sqrt{a}$ mit seinem Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ vergleicht. Er generiert damit das Korrekturvorzeichen als Faktor (± 1) zum Betrag des Stellgrößenzuwachses $|y_d|$, der den Stellwert so verändert, dass der Graph der steuernden Führungsfunktion des Mittelwerts, den Verlauf der zurückgeführten Regelabweichung prägt. Dies geschieht unter beständiger Anregung bei jeder, durch die vom Taktfaktor tkf bestimmten, Rahmenabtastrung td mit dem abbauenden Regelabweichungszuwachs ed . Dabei sind anhaltende Ausbrüche vom Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ nicht möglich, weil sie der Komparator sofort kompensiert. Bildlich „drückt“ die Anregung die Führungsfunktion an ihre Grenzen. Der Stellwertzuwachs $|y_d|$ ist separat gewonnen⁷⁸. Die Anpassungsdynamik der Führungsfunktion bleibt insofern erhalten, als der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ kontinuierlich mit den Veränderungen der Regelstrecke fortgeführt ist. Infolge der beständigen Anregung nach (1.22) bis (1.23) und dessen ungeachtet der verstärkten Anregung nach (1.47), ist der Anstieg der Regelgröße dauerhaft gegeben.

Signalverlauf und Eigenschaften

Aus anderer Sicht ist in Abbildung 1.4 der Aufbau des adaptiven Reglers am Beispiel des Signalverlaufs dargestellt, ohne Berücksichtigung der Digital- bzw. Analogumsetzung an den Schnittstellen. Der synchronisierende Komparator (1.17) bzw. (1.18) vergleicht den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) mit seinem Mittelwert, dem führenden Vergleichssteigungsindikator $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) der die *steuernde Führungsfunktion* abbildet und der Vor-

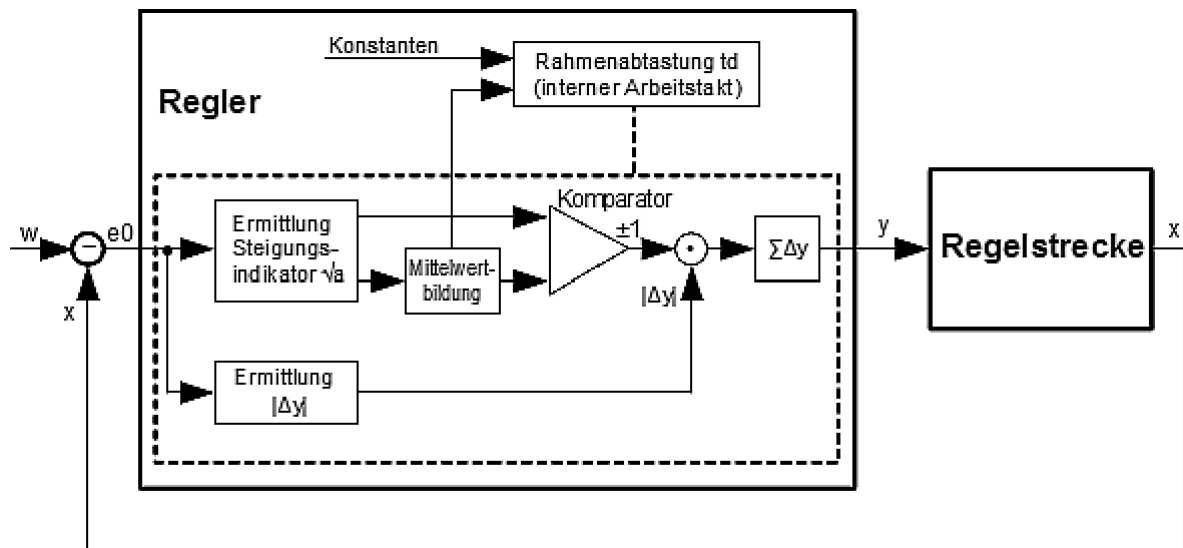


Abbildung 1.4: Der verdichtete Signalverlauf des Reglers

⁷⁸siehe Abschnitt „1.6.1 Die Stellwertgewinnung“ auf Seite 33

werte von $\sqrt{a}$ dämpfend zusammenfasst, als Repräsentation eines kürzlich vergangenen Abschnitts. Als Resultat des Vergleichs liegt am Komparator das Vorzeichen als Faktor (± 1) für den Betrag $|\Delta y| = |y d|$ des Stellwertzuwachses (1.21) an. Alles geschieht im internen Regeltakt der variablen Rahmenabtastung td (1.14), die mithilfe der durch die Hardware vorgegebenen Abtastung, dem Grundtakt t_0 sowie dem Taktfaktor tkf (1.40) gebildet ist. Der Stellwertzuwachs $|y d|$ (1.21) ist aus dem Streckenverstärkungspotential (1.19) mit (1.20) entstanden und schließlich unter Zugrundelegung des komparativen Vorzeichens, zur Rücknahme der Regelabweichung, iterativ zum Stellwert y_i (1.25) aufsummiert. Der Stellwert verändert sich demzufolge sukzessiv approximativ im Regeltakt der Rahmenabtastung. Mithilfe des Komparators ist der Verlauf der Regelabweichung e_0 mit dem Graphen der steuernden Führungsfunktion synchronisiert, der schließlich zu null führt. Die Führungsfunktion passt sich wiederum den Regelstreckeneigenschaften an, indem der Streckenverzug mittels des Taktfaktors in die Rahmenabtastung eingeht.

Die Gewinnung des Taktfaktors tkf (1.40) und damit der variablen Rahmenabtastung td (1.14), entspringt der geforderten Gleichsetzung (1.34) der aus dem Regelungskonzept vorgegebenen Eckwerteinstellungen mit den aktuellen adäquaten Daten der Betriebsbedingungen. Markante aber kontrollierte Stellgrößenausschläge können im Zuge der Zuwachsbildung (1.21) des Stellwerts, bei sprunghaften Stör- oder Führungsgrößenänderungen auftreten.

Anstelle des Strecken bestimmten Reglerentwurfs tritt die Festlegung von zwei Eckwerteinstellungen des Reglers, der bereits als Standard-Software vorliegt⁷⁹. Hierbei wird von einer Regelstrecke mit kleinstem vorkommenden Streckenverzug als Eckwertmerkmal ausgegangen. Das sind z. B. ein abgegriffener Steigungsabschnitt der (nicht normierten) Sprungantwortfunktion der Regelstrecke als oberer Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und die dazu passende Abtastung, der Grundtakt t_0 . Aus beiden Größen ergibt sich das statische Arbeitsprodukt P_A (1.35), dessen Gleichsetzung mit den Betriebsparametern $\sqrt{a_i}$ und td_i die Besonderheit des Zuwachses ed bewirkt.

Einer Randregelstrecke mit dem ausgewählten Arbeitsprodukt, beinhaltend den oberen Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators und den Grundtakt t_0 , folgt immer ein breiterer Regelstreckenbereich mit abnehmendem Streckenverzug. Wofür sich die interne Rahmenabtastung td entsprechend anpasst. Das statische Arbeitsprodukt P_A steht im Gegensatz zum Einzelgebrauch, immer für Strecken übergreifende Anwendungen zur Verfügung. Bei bekanntem Arbeitsprodukt fällt nur mehr ein einziger unbekannter Parameter an, entweder der Grundtakt t_0 für die kleinste interne Abtastung oder der obere Eckwert $\sqrt{a_{oe}}$ des Steigungsindikators⁸⁰ für den Regelgrößenanstieg.

Die selbsterhaltende Stabilität⁸¹ des Reglers ergibt sich durch die komparative Synchronisation des Verlaufs der Regeldifferenz (ausgedrückt durch den Steigungsindikator $\sqrt{a}$ bei

⁷⁹siehe Abschnitte „3.1 Die Programmbeschreibung“ auf Seite 93 sowie „3.2 Die Programmkodierung“ auf Seite 98

⁸⁰siehe Abschnitt „1.10 Die Reglereinstellung“ auf Seite 66

⁸¹siehe insbesondere die *Kriterien für Stabilität* auf Seite 22 unten

einer Regelabweichung e_0) mit dem Graphen der steuernden Führungsfunktion (ausgedrückt durch den Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ des Steigungsindikators) und dem daraus resultierenden, abbauenden Regeldifferenzzuwachs bei formal $\Delta e_0 = |ed|$ der Anstiegsachse, zusammen mit der Rahmenabtastung td der Zeitachse. Hinsichtlich des *Reglerverhaltens* ist die Beziehung des Stellwerts y_i zur Regelabweichung e_0 bloß als *Handlungsanweisung*, nicht aber als zwangsläufige Abhängigkeit festgelegt. Die Stellgröße baut die Regelabweichung innerhalb Regelstrecken angepasster variabler Zeitfolgen ab, unter voraussetzender sukzessiv approximativer Angleichung des Regelabweichungsverlaufs an den zu null leitenden Graphen der Führungsfunktion. Deshalb spielt es keine Rolle, ob verzögerungsarme Strecken oder Speicherstrecken mit und ohne Ausgleich vorliegen und zeitvariante oder zeitinvariante, lineare oder nichtlineare Anforderungen bestehen. Generell ist eine verzögerte, der Regelrichtung anfänglich entgegenlaufende Regelgröße zeitabhängig wie eine Störgröße, mit anhaltender Stellgrößeneinwirkung behandelt. Voraussetzung für die geeignete Regelantwort ist allerdings in allen Fällen ein genügend leistungsfähiges Stellglied, sowohl energetisch als baulich.

1.13 Der Einsatz bei Mehrgrößenregelungen

Bei Verwendung für Mehrgrößenregelungen sind mehrere Regler zu einem Verbund zusammengefasst. Trotzdem agiert jeder Regler als Teilregler mit eigenständiger Ansteuerung seiner Stellgröße, um seine Führungsgröße zu erreichen. Dabei müssen Ein- und Ausgänge der gebündelten Teilregler nicht symmetrisch sein. Denn es könnten sich Ein- oder Ausgänge auf die Prozesssteuerung selbst beziehen und nach außen nicht in Erscheinung treten. Im Folgenden sei angeführt, wie sich so ein Reglerverbund darstellt.

Die Aufgabenstellung bei Mehrgrößenregelung ist, die Regelstreckenänderungen durch wechselnde Streckensituationen aus den Rückwirkungen des Regelprozesses auf einzelne Reglergruppen, hinsichtlich ihrer Teilstrecken und deren Regelgrößenverläufe, überwachend zu steuern. Hierbei muss sichergestellt sein, dass die Stellgrößen ausreichend zur Verfügung stehen und im Teilprozess nach Vorgabe wirken können. Während die organisatorische Aufteilung der Reglereinheiten zueinander weitgehend frei ist. Jede Reglereinheit führt selbsttätig ihre Regelaufgabe aus. Denn gleichgültig wie sich für einen eingebundenen Regler die Streckensituation ändert, er wird seine prozessverträgliche Führungsgröße erreichen und halten, wenn es ihm seine Stellgröße hinsichtlich ihrer Wertigkeit potentiell erlaubt.

Bei zeitlich voneinander abhängigen Führungsgrößen w_n können die Vorgaben ihrer Werte in algebraischen und/oder logischen Beziehungen zueinander eingerichtet sein. Insofern muss ein die Teilregler verbindendes Vorgabengerüst für stabile Betriebsbedingungen sorgen. Selbst die Festlegung von Rahmenbedingungen könnte prozessabhängig über gesonderte Regler geschehen. Sich ändernde Regelstreckensituationen im Verbund sind unerheblich, da zwar jeder Teilregler selbsttätig adaptiert, aber der Bearbeitungsrang des Teilprozesses über das verbindende Reglermanagement festgelegt sein wird. Geforderte

Abhängigkeiten zueinander sind aus der Sicht von nebeneinander wirkenden Teilreglern abzuhandeln, sodass jedes Regelziel potentiell selbsttätig erreicht werden kann. Wie z. B. durch vom Prozess abhängige, wechselnde Führungsgrößen oder die Festlegung deren Unterschiede, über die sich Teilprozesse zeitlich steuern lassen. Die Steuerung kann über den Sollwert erfolgen, weil die Nachführung der Stellgröße immer selbstregulierend geschieht. So könnten Zwischenwerte, die in bestimmten Bereichen liegen sollen oder auch Maxima bzw. Minima, über eigene Reglereinheiten mit getrennten Abtastzeiten ermittelt werden. Die Verschiedenheit gesonderter Grundtakte mag davon abhängen, auf wie viele hardwaremäßig unterschiedliche Regelpakete die Regler verteilt sind. Die eigentliche Obliegenheit ist die Organisation des Reglereinsatzes und die statischen Beziehungen der geregelten Prozesse zueinander, nicht der Regelprozess im Besonderen. Die vielfachen Beziehungen zwischen Stellwerten und Regelgrößen müssen nicht geschlossen algebraisch immer neu in einem Gleichungssystem ermittelt und nachgeführt werden. So hätte z. B. beim Einsatz einer zentralen Steuereinheit, diese die Rahmenbedingungen vorzugeben und bei Bedarf ihre Erfüllbarkeit von vornherein abzuschätzen. Was verallgemeinernd sicherlich über geeignete, primär diskrete aber übergreifende Prozessmodelle geschehen könnte. Parallel arbeitende Reglereinheiten würden über ihre Verknüpfungen kommunizieren.

Gegenseitige Beeinflussung

Die Änderung von Regel- bzw. Stellgröße eines Teilreglers beeinflusst auch, schwächer oder stärker, andere Teilregler eines Mehrgrößensystems. Was mit der Änderung des Übertragungsverhaltens der Teilregler verbunden ist. Nun wird primär nicht versucht, durch Entkopplung die Regelkreise möglichst zu trennen, sondern umgekehrt auf die gegenseitige Einflussnahme einzugehen. Im Folgenden sind Beispiele angeführt, die ungeachtet einer ausgefeilten Technik, allein einen regelungstechnischen Aspekt herausstellen sollen:

1. Gegeben wäre ein massereiches, nicht kompakt gestaltbares Formwerkzeug, das mit reduziertem Verzug möglichst gleichmäßig mit zwei Heizelementgruppen an verschiedenen Stellen, mit ebenfalls verschiedenem Teilmasseanfall beim Formwerkzeug, aufgeheizt werden soll. Beide Heizgruppen sollen von den Teilreglern A und B bedient werden. Die Teilregler A und B arbeiten selbstständig. Damit einhergehend wäre eine größere Verschiebung etwa durch kopplungsabhängige Vergrößerung der Zuführungsenergie beim y_A -Stellglied und dafür die Verkleinerung beim y_B -Stellglied, vorstellbar. Nur steht einer derartigen selbsttätigen Verschiebung der Stellwerte y_A und y_B , die durch die Regelgrößensteilheit bedingte und damit verzugsabhängige Grenzwertigkeit⁸² entgegen. Doch könnte selbst beim Anschlag des y_A -Stellglieds die passende Energie zugeführt werden, da dann der Teilregler B kopplungsbedingt und eigenständig, ein unerwünschtes Temperaturgefälle zwischen den Regelkreisen A und B ausgleichen würde. Die angeführte Grenzwertigkeit besagt, dass die zeitliche Anpassung der Stellgröße infolge eines höheren Energiebedarfs eingegrenzt ist, was das Ausbrechen dämpft.

⁸²siehe dazu den Abschnitt „1.9.2 Die Grenzwertigkeit“ auf Seite 60

2. Nun seien mehrere Teilregler gegeben, die vereinfachend jeweils einem Walzantrieb zugeordnet sind und dafür sorgen sollen, dass kurzzeitige Umdrehungsunterschiede, durch Zugspannung die Dicke eines noch nicht vollständig ausgehärteten Folienmaterials, stufenweise pro Teilregler verringern. Auch wenn die Walzen selbst ein Mehrgrößenregler steuern mag, fungieren die Teilregler als Platzhalter der Teilregelsysteme. Dazu wäre ab der zweiten Walze, vor den Walzeneinheiten eine Messung der Folienstärke durch eine Messeinheit vorgesehen. Die gewichtete Ausgabegröße der Messeinheit wäre derart, dass sie durch Addition zur Führungsgröße des Teilreglers dieser Walzeinheit, mit kurzzeitiger Umdrehungsänderung die Zugspannung solange erhöht, bis die Foliendicke der Anforderung entspricht und die zugeordnete Messeinheit wieder den Sollwert aufweist. Um die Umdrehungsänderung an die nachfolgenden Walzeneinheiten weiterzugeben, wäre die Führungsgröße für den Teilregler der jeweils nachfolgenden Walzeinheit, zwischen additiver Führungsgrößenzuschaltung und vor dem Eingang der Führungsgröße für die Regelgrößenzuschaltung des jeweiligen Teilreglers, abzuzweigen. Womit die Führungsgrößenänderung an den jeweils nächsten Teilregler weitergegeben werden würde, ohne die eigene Regelgröße zu beeinflussen.

Beide Beispiele sollen zeigen, wie die anpassende Reglermodellierung vereinfachend unterbleibt, weil die Teilregler eben selbsttätig adaptieren. Entkopplungsregler im herkömmlichen Sinne sind deshalb zur Kompensation gegenseitiger Beeinflussung nicht erforderlich. Zu große gegenseitige Beeinflussungen der Regler von Seiten der Teilregelstecken innerhalb eines Regelsystems treten da auf, wo Parameteränderungen steilere Bewegungen verursachen, als durch die einzelnen Arbeitsprodukte P_A und deren Grundtakte t_0 vorgegeben sind. Das wären z. B. sich dauerhaft schneller wiederholende Sollwertänderungen innerhalb des Streckenverzugs und den damit nachgeführten Stellwertänderungen. In diesem Falle würden die Teilregler immer wieder von kurzzeitig anpassenden Einstellungen ausgehen. **Der Stellwert hängt**, falls keine außerordentlichen Zuschaltungen erfolgen, **von vorherigen Stellwertzuwächsen und vom Regelabweichungszuwachs ab**, d. h. von der laufenden Regelabweichung e_0 und ihrem Vorwert e_1 ⁸³. Sind solche Aufschalteinflüsse vermieden, dann sind auch die einzelnen Reglereinheiten ohne weitere Vorkehrungen grundsätzlich nebeneinander betreibbar, auch wenn sich Streckeneigenschaften bei bestehendem Arbeitsprodukt, kontinuierlich verändern. Was freilich nichts mit dem eigentlichen Regelungsverfahren, sondern mit seiner Umsetzung zu tun hat. Selbstredend lässt sich sagen, dass eine schon stärkere Kopplung verschiedener Regelstrecken sich keinesfalls dem Umstand nähern darf, bei dem die betroffenen Regelstrecken als eine einzige Prozesseinheit betrachtet werden müssen. Denn dann sind sie bekanntlich auch so zu behandeln.

Beim simulativen Test mit zwei Reglern und etwa mittlerer Kopplung, war die wechselseitige Beeinflussung beherrschbar. Freilich hängt das immer von den engeren Gegebenheiten der Teilregelkreise ab. So reichte es beispielsweise aus, den Reglern einen Distanzrahmen vorzugeben, innerhalb dessen sich ihre Regelgrößen zueinander bewegten.

⁸³siehe Abschnitt „1.6.1 Die Stellwertgewinnung“ auf Seite 33

Der Algorithmus selbst würde zwar grundsätzlich die Verschachtelung erlauben (bei auf die Rechenzeit verkürztem Verzug wären damit Gleichungssysteme iterativ lösbar), doch würden sich dabei die Rahmenabtastungen addieren und das Arbeitsprodukt expandieren.

Wie wirkt sich nun die Kopplung zwischen den Teilreglern aus? Der verzugsabhängige Abbau der Regelabweichung geschieht selbstregulierend. Die einer Regelstrecke zugeführte oder entnommene Energie verteilt sich im Regelgut mit ihrem Einfluss auf Temperatur, Druck, Bewegung, Stoffänderung usf. und wirkt von der zugeteilten Messeinrichtung als Regelgröße zurück. Diese ist das Ergebnis der Stellgrößeneinwirkung an der *gemessenen* Stelle im Prozessablauf und damit von der Platzierung des Messfühlers abhängig. Eine Postierung mehrerer Messfühler im Regelgut wird für jeden Messfühler, hinsichtlich unterschiedlicher Verteilung übertragener Energie, differierende Ergebnisse hervorbringen.

In Abbildung 1.5 ist der Ersatzregelkreis eines Teilreglers des Reglerverbunds mit der Kopplungsauswirkung dargestellt. Sie ist das Ergebnis einer Messwertveränderung am Messfühler, wohingegen der Regler diesen veränderten Messwert ganz regulär und eigenständig, mithilfe der Verlaufskontrolle der Führungsgröße verarbeitet. Die Regelgröße gibt den vom Teilprozess abhängigen Messwert des im Regelgut angebrachten Messfühlers wieder. Ändert sich bei einem dem Regler zugeordneten Teilprozess die Teilregelstrecke, so arbeitet der Regler wie vorher sukzessiv approximativ weiter. Allerdings wird der Messfühler zum vergleichbaren Zeitpunkt andere Werte als Regelgröße liefern, abhängig von der sich gegebenenfalls geänderten Rahmenabtastung und vom Regelgrößenanstieg, den z. B. der Energiebedarf bestimmt. Jedenfalls zieht der Wechsel des Teilprozesses einen abgewandelten Regelgrößenverlauf nach sich. **Die Kopplung kann den Messwert und damit die Regelgröße verändern. Dennoch bleibt im Reglerverbund jeder Teilregler für sich handhabbar.** Steht die Stellenergie nach wie vor zur Verfügung, so beeinflusst die Kopplung bei jedem eingebundenen Regler mehr oder weniger die Regelgröße. Soweit hingegen alle Führungsgrößen w_n erreicht werden würden und die Zeitfolge ihres Erreichens nicht wesentlich wäre, wären bestenfalls keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

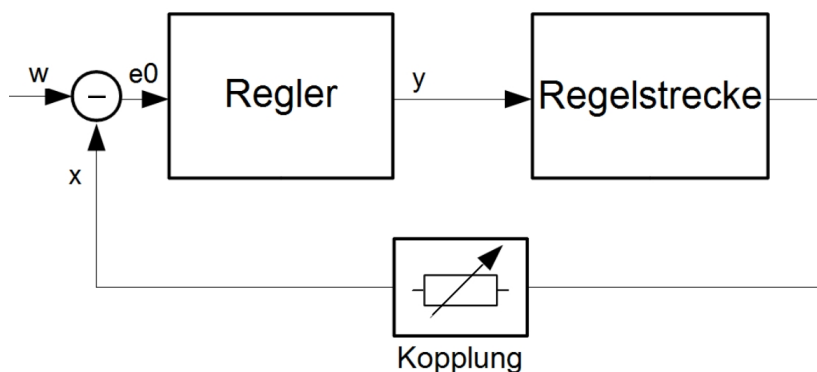


Abbildung 1.5: Ersatzdarstellung des Einflusses der Reglerkopplung

Selbst wenn die nötige Stellenergie wegen des Zusammenwirkens des Reglerverbands nicht zur Verfügung stünde, etwa durch Leistungsbegrenzung der Anlage und weil die Energie von anderen Teilprozessen temporär benötigt wird, wäre durch zusätzliche Messung ein Eingriff zur Verteilung der Stellenergie steuerbar. Die Kopplung verstärkt oder mindert im Reglerverbund, untereinander die Änderungsgeschwindigkeit der Stellgröße und jeder Regler versucht mit der ihm zur Verfügung stehenden Stellgröße, seine Führungsgröße w zu erreichen. Denn es muss sichergestellt sein, dass sie im Reglerverbund zu erreichen ist. Unter ständiger Regleradaption erfüllt jeder eingebundene Regler die Kriterien für Stabilität und Robustheit⁸⁴. Führungsgrößen w_n können durch Bedingungsangaben voneinander abhängig gemacht bzw. prozessabhängig nachgeführt werden. Es gibt kein Gleichungssystem mit Zustandsvariablen, sondern ein Regelwerk im Reglerverbund. Bestünde die Tendenz der dem Zeitverhalten der Teilprozesse selbsttätig angepassten Regler zu von der Anregelzeit abhängigen niederfrequenten Schwingungen, so wäre die Verlängerung von Anregelzeiten möglich⁸⁵.

Weitere Abhängigkeiten

Ein Teilregler könnte bei der Regelstrecke mehrere Ausgänge x_1 bis x_n aufweisen, die dann vor der Subtraktion von der Führungsgröße w , zur Regelgröße x zusammengeführt sein müssten. Die steuernde Zusammenführung könnte in festgelegter Abhängigkeit und ebenso teilgeregelt mit abgesetztem Regler geschehen.

Manchmal könnte anstatt einer fixen Führungsgröße w ein Bereich mit Minimum w_{min} und Maximum w_{max} erforderlich sein. Hierfür müsste im Regler-Softwareabschnitt bei der Berechnung der Regelabweichung abgefragt werden, ob die Regelgröße x schon im gewünschten Bereich liegt. Tut sie das, müsste die Regelabweichung auf null gesetzt werden und so das Erreichen der Führungsgröße w vorgetäuscht sein⁸⁶. Der Regler verhält sich entsprechend. Denn der Stellwert y_i bleibt nur bei der Regelabweichung $e_0 = 0$ konstant. Es hängt vom Einzelfall ab inwieweit es sinnvoll ist, den Stellwert bei Ausgleichsstrecken im Auswahlbereich w_{min} bis w_{max} tatsächlich zu belassen oder doch eine geringe Stellwertänderung herbeizuführen. Dazu sollte die Regelabweichung mit einem Betrag von $(> 0) \wedge (\leq e_{0ns})$ vorgetäuscht sein, weil somit der Stellwert y_i zwar regelabweichungsabhängig nachgeführt, doch wegen zu großer Messfehler der Mittelwert $\sqrt{a_{vm}}$ (1.16) des Steigungsindikators nicht verändert wird. Denn sollte z. B. die Regelgröße zur Bereichsgrenze w_{min} zurückfallen, würde es infolge der Speicherwirkung ohne vorherige geringe Stellwertnachführung etwas dauern, bis der Verzug eingeholt und die Bereichsgrenze w_{min} wieder überschritten werden würde. Während bei eindeutiger Führungsgröße w , die Zu- bzw. Abnahme des Stellwerts bei geringer bleibender Regelabweichung, ununterbrochen im Regeltakt der Rahmenabtastung td geschieht.

Jeder Teilregler im Verbund wirkt auf einen Teilprozess und seine Führungsgröße ist die mit dem Regelwerk einzuhaltende Dimension. Die Stabilität der Teilprozesse zuein-

⁸⁴siehe *Kriterien* für *Stabilität* I und II auf Seite 22 unten und *Robustheit* III auf Seite 23 oben

⁸⁵siehe Abschnitt „1.11 Der Steigungsindikator als Festwert“ auf Seite 76

⁸⁶siehe im Abschnitt „3.2 Die Programmkodierung“ ab Seite 104

ander ist aus regelungstechnischer Sicht davon abhängig, wie schnell die Teilregler auf Zustandsänderungen der Teilprozesse reagieren und sich die Teilprozesse untereinander beeinflussen. Im Besonderen, ob die Teilprozesse Rückkopplungseffekte zueinander auslösen. Je stärker die Beeinflussung, desto dringender wären zusätzliche Maßnahmen für die Teilregler angebracht. Bezogen auf einen Teilregler sind das:

A. Die Parameterfestlegung

1. am Teilregler selbst, Ergebnisse am Teilregler angewandt
 - a. Parameter-Bereitstellung für die Hauptbedingungen
z. B. Anstieg der Regelgröße, Festlegung von Führungsgrößen.
 - b. Parameter-Bereitstellung für die Randbedingungen
z. B. Sonderbegrenzung der Stellgröße zur Kontrolle der Gesamtlast.
2. bei anderen Reglern im Verbund, Ergebnisse am Teilregler angewandt
 - a. Zur Steuerung der gegenseitigen Beeinflussung
Messung externer Parameter wie Führungs-, Regel- und Stellgrößen sowie weiterer Prozessparameter.

B. Die Inferenz, am Teilregler durchgeführt

1. Verknüpfung der Regeln des Teilprozesses im Sinne des Prozesszwecks.
2. Als Ergebnis die zusätzliche Führungsgrößensteuerung und gegebenenfalls nach A.1.b die Stellgrößenkorrektur des Teilreglers.

Bei Änderungen der Stellwertskalierung y_{max} sollte der maximale Leistungsbedarf im Auge behalten werden. Denn es könnte eine Korrektur des Gewichtungsfaktors (1.26) angebracht sein, damit einerseits die Auflösung differenziert genug bleibt und andererseits die Änderungsgeschwindigkeit des Stellwerts nicht zu klein und die Regelung zu träge wird. Können die Teilregler schneller reagieren als sich die Teilprozesse untereinander beeinflussen, wird wohl die Forderung gegenseitiger aktiver Beeinflussung der Teilregler durch zusätzliche Regeln in den Hintergrund treten⁸⁷. Denn der Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13) hätte dadurch mehr Adaptionsspielraum hinsichtlich seines größten Werts $\sqrt{a_{oe}}$.

Der Eingriff in den von einem Reglerverbund beeinflussten Teilprozess setzt eine Messwerteerfassung voraus. Die Nachstellung z. B. der Führungsgröße w wäre zur Prozesssteuerung nutzbar. Am Rande sind steuernde Eingriffe in die Energiebereitstellung der Stellgröße, ebenso in Abhängigkeit der Prozesssituation möglich. Schließlich kann das Zusammenwirken der Teilregler im Verbund, durch die Formulierung von Gesetzmäßigkeiten des Verfahrens und durch Verknüpfung mit WENN-DANN-Regeln geschehen. Jeder Teilregler ist für sich manipulierbar.

⁸⁷Die Problemstellung ist als Anpassung des Reglers an das Übertragungsverhalten der Regelstrecke bekannt, sie zeigt sich gegebenenfalls vielseitig.

Bei den Kontrolleingriffen und der Festlegung von Abhängigkeiten handelt es sich um „äußere“ Maßnahmen, da der Regler seine Führungsgröße stets erreicht, wenn genügend Stellenergie zur Verfügung steht und vor allem, wenn sie wirklich erreichbar ist. Das betrifft Führungsgrößen, die aus naturgesetzmäßigen oder technischen Gründen nicht erreicht werden können. Wie z. B. die Erhöhung der Wassertemperatur auf nahe 100° C oder mehr, unterhalb Normaldruck oder dergleichen durch Prozessfolgen verursacht. Solche Fälle müssen abgesichert werden. Da im Regelalgorithmus keine feste Beziehung von Regelabweichung und Stellwert existiert, versucht der Regler durch permanente Anpassung des Stellwerts bis zum Maximum bzw. Minimum allen Widrigkeiten zum Trotz, das vorgegebene Regelziel zu erreichen. Übergeordnete Maßnahmen zur Absicherung dürften sich bei Reglergruppen durchaus überschaubar gestalten lassen.

2 Die Regleranwendung

2.1 Die optionale Messwertglättung

Die Gewinnung des Steigungsindikators $\sqrt{a}$ aus der kleinen Regelabweichungsdifferenz Δe_0 , bedingt für Speicherstrecken eine gewisse Sauberkeit der Eingangssignale. Geringe Streuungen sind hinnehmbar. Der Komparator löst dadurch etwas früher aus. Im Allgemeinen ist eine Messwertglättung nicht erforderlich. Bei Nutzung der Nullabsenkung sollte wegen der Trägheit der Glättung nicht geglättet werden. Darüber hinaus gibt es die Option des vorgeschalteten Glättungsverfahrens zum Regelgrößensignal. Das einfache und schnelle Verfahren vermeidet Rekursionen und Schleifen. Die Messwertglättung ist ein aktivierbarer Bestandteil des Musterprogramms¹. Mit der linearen Regression wird z. B. standardisiert bei 8 Messwertstützpunkten mit $nt = 8$, eine gute Glättung der Abtastpunkte als Eingangssignale, bei in der Regel akzeptablem Signalverzug erreicht.

Der Vorteil dieses Glättungsverfahrens ist im Gegensatz zum digitalen Filter, die gleichzeitige Nutzung der baulich vorgegebenen Abtastung (Grundtakt t_0) für Messwertglättung und Regelung zusammen. Gerade weil sich die Glättung immer auf den Grundtakt bezieht, bedarf es keiner weiteren Takt- und Frequenzanpassung. Die Glättung ist wegen ihrer Verzögerung für Speicherstrecken geeignet und nicht für verzögerungsarme Strecken. Im Zweifelsfall sollte auf eine Glättung verzichtet werden.

Die Messwertglättung ist aus der gleitenden Mittelwertbildung und der linearen Regression entwickelt. So ist der gleitende Mittelwert m mit dem aktuellen Signalwert z , der angenommenen Glieder n und der Taktindizierung i gegeben mit

$$m_i = m_{i-1} - \frac{m_{i-1} - z_i}{n} \quad (2.1)$$

oder umgestellt mit den Messwertstützpunkten nt

$$m_i = m_{i-1} + \frac{z_i - m_{i-1}}{nt}. \quad (2.2)$$

Formal lässt sich der zweite Summand auch als Seitenverhältnis innerhalb der Abtastung Δt und dem temporären Mittelpunktswinkel ψ beim Mittelpunkt m_{i-1} ausdrücken mit

$$\frac{z_i - m_{i-1}}{nt} = \tan \psi_i \cdot \Delta t. \quad (2.3)$$

¹siehe Abschnitt „3.2 Die Programmkodierung“ auf Seite 98

Der Regressionskoeffizient b_r einer linearen Regression über nt Messwertstützpunkte sei nun

$$b_r = \tan \psi_i \quad (2.4)$$

gesetzt. Die Regressionskoeffizienten sind bei jeder Abtastung aus den nachgeführten und gehaltenen Stützpunktevergangenheitswerten (der Regressionsfensterbreite) gewonnen. Der geglättete Signalwert mr ergibt sich über die konstante Δt -Abtastfolge mit dem Index i , aus

$$mr_i = mr_{i-1} + \tan \psi_i \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

und drückt nun im Unterschied zum algebraisch eindimensionalen Mittel, geometrisch den Trend über nt Abtastungen vektoriell aus.

Mithilfe einer Abweichungsminderung ist es zudem möglich, die Anzahl der Stützpunkte mit leicht erhöhtem Verzug zu verringern. Dazu ist der jeweils aktuelle Signalwert z für die Regression zu z_{neu} angepasst, indem sein Abstand zum vorherigen Wert der Regressionsgeraden y_r aus den vorangegangenen Signalwerten, mit dem Divisor $(nt + nx)$ verkleinert ist mit

$$z_{neu\ i} = zh_{i-1} + \frac{z_i - zh_{i-1}}{nt + nx} \quad (2.6)$$

und mit

$$zh_i = a_{r\ i-1} + b_{r\ i} \cdot (nt - k), \quad \text{mit } 0,4 \leq k \leq 1. \quad (2.7)$$

Dabei ist die Anzahl der nachgeführten Messwerte als Regressionsstützpunkte nt (Regressionsfensterbreite), mit dem Festwert nx zur Wirkungserhöhung addiert. Mit $k = 1$ gilt $(nt - k)$ zum Zeitpunkt der Berechnung von zh_i für die nachfolgende Abtastung. Für die Anwendung erweist sich der Bereich $k \leq 1$ als vorteilhaft. Den Koeffizienten a_r und den Regressionskoeffizienten b_r liefert die lineare Regression mit der Regressionsgeraden $y_r = a_r + b_r \cdot x_r$. Der Indizierungsunterschied zwischen zh_i und zh_{i-1} ergibt sich dadurch, dass zh_i erst im nächsten Schritt zur Berechnung von $z_{neu\ i}$ verwendet ist. Wegen der Gleichheit der Relationen lässt sich für Δt jede Zahl in die lineare Regression bei konstanter Abtastung einsetzen. Bei Verwendung von ganzen Zahlen wird $\Delta t = 1$ und entfällt damit als Faktor.

Die primär stützpunktebezogene Messwerteglättung ist durch zusätzliche Dämpfung (nx im Divisor mit $nx \geq 0$) verstärkt. Als günstig erweist sich die Stützpunktezuweisung $nt = 8$, weil bei kleinerem nt wegen der nachlassenden Steifigkeit, die Bewegung um den Sollwert zu unruhig ist und ein größeres nt wegen erhöhter Steifigkeit, den Regelgrößenanstieg zum Sollwert zu lange hinauszieht. Mit der Verlagerung in Richtung verzögerungsarmes Streckenverhalten, ist auch nx von z. B. $nx = 32$ bei einer Speicherstrecke, bis zu null bei verzögerungsarmen Strecken verringerbar und allenfalls nt in Sonderfällen bis zu $nt = 4$.

Die Messwertglättung wirkt bezüglich einer Grundtaktänderung dem Reglerverhalten entgegen, weshalb der Glättungsbereich beschränkt ist. Je kleiner der Grundtakt bzw. je kürzer die Anregelzeit der Regelgröße, desto geringer der Glättungseffekt. Damit sind Strecken mit höherer Speicherwirkung bevorzugt. Dort sollte nx so groß gewählt werden, bis die Rahmenabtastung um den Sollwert nur leicht geringer ist wie ohne Störsignalüberlagerung und ohne Glättung. Dabei ist auf die Dämpfung der Regelschwankungen während der Ausregelzeit zu achten. Dahin gehend wird die Phasenverschiebung von Glättungseingang und -Ausgang um den Sollwert akzeptierbar. Die Messwertglättung bewirkt eine kontinuierliche Zugabe und Abnahme des Stellwerts, was zu einem homogenen zackenartigen Stellgrößenverlauf führt. So ein Verlauf ist zudem durch weitere verzögernde Speicher der Regelstrecke bedingt. In der Regel kann $nx = 4$ belassen werden, weil sich bei höheren nx -Zuweisungen, im messtechnischen Auflösungsbereich die Gewichtung partiell ändern, d. h. die Regelgröße in Zeitabschnitten gering schwanken kann. Trotz Glättung sollten die Eingangssignale wie üblich, möglichst wenig überlagerte Störsignalanteile enthalten.

2.2 Eine Anwendung

Abbildung 2.1 zeigt das Resultat einer realen Temperaturregelung, die aus einer thermischen Extruder-Modellierung hervorging, mit dem Reglerprogramm nach Abschnitt 3.2, ohne Glättung des Regelgrößensignals. (Die zwischenzeitliche Einführung der selbsttätigen Anpassung des Regelungseinsatzes ab der Regelabweichung *esp*, hat hier keinen Einfluss.) Der Test wurde mit einem Sollwert von $w = 220^\circ\text{C}$ bei einer Umgebungstemperatur von $\theta_u = 20^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Auflösung der Messanzeige liegt bei 0,01 Einheiten (hier $^\circ\text{C}$) und diejenige der Messung selbst bei $> 0,05^\circ\text{C}$ (orientiert an der Breite der schnellen Einzelwertschwankungen). Der hardwarebezogene Grundtakt von 0,2 Sekunden schwankt und weicht wegen schaltungstechnischer Vorgaben, nach oben bis zu 0,23 Sekunden ab. Der größte Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ (*tkgdst* im Programm) als oberer Eckwert, entspricht beim verwendeten Arbeitsprodukt von 0,09 Sekunden annähernd dem jenseits dieser Anwendung liegenden Betrag von etwa 0,391, bei einem Anstiegsmittel $\sqrt{a_{vm}} \approx 0,002$.

Für das Schwanken des Grundtakts ist die Ausführung des die Heizelemente ansteuernden Controllers verantwortlich, dessen jeweilige Signalantwort im Zeitfenster einen Grundtakt beendet. Geplant war ursprünglich ein Grundtakt von 0,2 Sekunden. Die Schwelle $e0ns = 0,2^\circ\text{C}$ wird nichtperiodisch überschritten (sie ist in der aktuellen Version durch $e0fix = 2$ ersetzt, mit dem Ergebnis eines kleineren Taktfaktors *tkf* ab der Ausregelzeit). Die Überswingweite beträgt 3°C und der Wert der Regelabweichung ist mit der Ausregelzeit beginnend, besser als $\pm 1^\circ\text{C}$ bei einer Führungsgröße von $w = 220^\circ\text{C}$.

Die Regelgröße x ist in Abbildung 2.1 mit $\frac{(x-\theta_u)}{w}$ normiert skaliert und in Verlauf 1 veranschaulicht. Verlauf 2 zeigt den Stellwert y_i . Beim Skalenwert 1 ist mit $y_{max} = 1000$ (1.28) sein größter Betrag erreicht, der leistungsbezogen entsprechend gewichtet ist. Die Schrittregelung nutzt die Leistungssteuerung über den Phasenanschnitt der Netzspannung, bei formeller Aufteilung von y_{max} auf 10 Perioden, somit über 0,2 Sekunden. Die

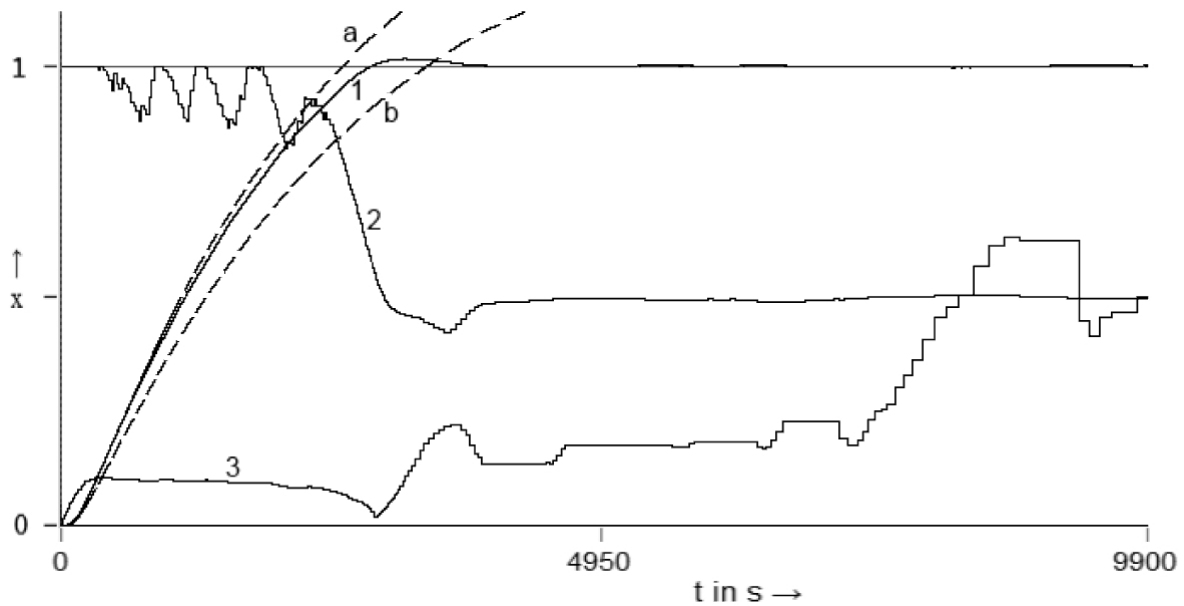


Abbildung 2.1: Beispiel einer Temperaturregelung

Aufsplittung ist gut ausreichend, wenn auch nicht auf die Millisekunde genau. Verlauf **3** zeigt den Taktfaktor tkf . Sein numerischer Wert entspricht genauso beim Skalenwert 1 dem Betrag $tkf = 1000$ (die Begrenzung liegt in der Anwendung bei $tkf_{max} = 1200$).

Der gestrichelte Verlauf **a** zeigt die auf die Skalierung bezogene Sprungantwort bei 100 % und Verlauf **b** bei 80 % des Stellwerts. Es ist der durch die quadratische Führungsfunktion bedingte, im Vergleich zum Verlauf **a** steile Anstieg der Regelgröße in Verlauf **1** zu erkennen. Das ist wegen der über den Taktfaktor (1.40) gesteuerten, verstärkten Anregung (1.47) verursacht. Ihre Auswirkung ist während der Anregelzeit infolge des anfänglich leicht abfallenden Taktfaktors zu erkennen.

Der Stellwert **2** zeigt zackenartige Bewegungen, die vor allem bei trägen Regelstrecken aufgrund des steilen Regelgrößenanstiegs hervortreten und einen geringen Einfluss auf die Regelgröße **1** haben. Sie gehen bei Abschaltung der verstärkten Anregung zurück. Da der Taktfaktor **3** von der Größe des Steigungsindikators abhängt, vergrößert er sich ab der Ausregelzeit mit der Beruhigung der Regelgröße und der damit einhergehenden Verkleinerung des Steigungsindikators. Ohne auffällige Störgrößen bewegt er sich in der Musteranwendung beim genutzten Grundtakt, allenfalls im Bereich $tkf = 500 \dots 650$ (dieser verkleinert sich mit der im Nachhinein eingeführten Regelabweichungsschwelle² $e0_{fix}$ (1.46)).

Das genannte Arbeitsprodukt wurde rundweg in der Zeit abgeschätzt und als gängig für vorherige Simulationen herangezogen. Die beschriebene Regelstrecke hat eine längere Verzugszeit als die verwendeten Simulationen und das testweise eingesetzte gleichlautende Arbeitsprodukt erwies sich auf Anhieb als geeignet. Das war absehbar, weil der Verzugsansatz und damit die Reglereinstellung, in der Erweiterung Regelstreckenbereiche umfasst.

²siehe „1.8.1 Die Begrenzung des Taktfaktors“ auf Seite 50

3 Das Reglerprogramm und Abschließendes

3.1 Die Programmbeschreibung

Die Programmbeschreibung gibt Auskunft zum elementaren Aufbau, auf dem die technische Wirkungsweise und die Voraussetzung der Regelbarkeit beruhen. Daran anschließend ist der lauffähige, kommentierte Quellcode des Musterprogramms als standardisierte Vorlage angegeben, auf den sich diese Erläuterung ergänzend stützt. Das Programm beinhaltet, neben in der Regel unveränderlichen Programmkonstanten, verschiedenste Parameter, die eine zusätzliche Abstimmung in Sonderfällen gestatten. Ein durchgehender Regelstreckenbereich ist wie bei Einzelstrecken, nur mit den zwei Einstellparametern festzulegen.

Die technische Umsetzung erfüllt weitere Aspekte der Signalhandhabung die zweckmäßig sind, damit das Verfahren mit der realen Umgebung korreliert. Das betrifft beispielsweise die üblichen Widrigkeiten von Abweichungen zur idealen Vorgabe. Dies zu berücksichtigen ist Aufgabe der Programmvorlage mit den Programmkonstanten, die das Verfahren mit den fünf aufgeführten Einzelschritten dokumentierend gliedert. Der Schritt 6 gibt letztlich die mathematischen Funktionen wieder. Zu ermittelnde Programmparameter stützen sich auf Ist-Werte. So wird z. B. der die Führungsfunktion betreffende Zuwachs $|ed|$ nicht aus dem wegen Rundungen und Synchronisationsabweichungen unvollständigen Funktionsverlauf (1.10 bzw. 1.12) gewonnen, sondern es sind die tatsächlich gemessenen Differenzen herangezogen. Abgesehen von den selbsterklärenden Zeilen, sind nachfolgend die fünf Gliederungspunkte kurz erläutert.

Möglicherweise anzupassende Konstanten: Der Grundtakt t_0 muss der Hardware bedingten bzw. der vorgegebenen Abtastung entsprechen und ist für die Berechnungen als kleinste Zeiteinheit erforderlich. Mit der Konstante $tkgdst$ multipliziert, die dem größten Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$ entspricht, entsteht die Konstante pa als anzugebendes Arbeitsprodukt P_A . Dieses und der Grundtakt t_0 sind einzutragen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, auf welcher Grundlage das Arbeitsprodukt ausgewählt wurde. Wurde dafür kurzerhand ein Standardwert für verstärkte Anregung eingetragen, wie z. B. $pa = 0.09$, so bleibt die Konstante $aqfix = 0$ bestehen. Andernfalls ist mit $aqfix = 2$ die verstärkte Anregung auszuschalten. Liegen keine besonderen Daten der Regelstrecke vor, so könnte mit den bereits vorgegebenen Restwerten ein Versuch gestartet werden.

Weitere programmspezifische Konstanten: Mit der Konstanten *nullab* ist die Nullabsenkung für Sonderanforderungen und Zweipunkt-Schaltbetrieb vorwählbar. Die Sonderanforderung beinhaltet die Nullabsenkung unter Beibehaltung der Stellwertstufung. Bei Zweipunkt-Schaltbetrieb wäre neben der beibehaltenen Nullabsenkung, die gestufte Stellwertausgabe y_i in Schritt 5 durch die auskommentierte Vollpegelausgabe zu ersetzen. Gewöhnlich ist die Nullabsenkung abgeschaltet. Die Konstante *y_{max}* der Stellwertskalierung (1.28) enthält die positive Zuweisung. Bei Bedarf ist für *y_{min}* = 0 ein negativer Wert vorgesehen. Wobei das Vorzeichen eines negativen Stellwerts nur intern markierend gilt und nicht für den Stellwert selbst. Sollte z. B. der Übergang von heizen zu kühlen dargestellt werden, so nimmt der Stellwert für das Heizelement bis auf null ab und geht in die negative Skalierung über, um bei kleiner null nun ein zweites Stellglied für die Kühleinheit anzusteuern. (Kühlen und heizen zugleich, was zum Teil zur Prozessbeschleunigung bei erhöhtem Energieeinsatz genutzt wird, wäre mit zwei getrennten Reglern zu realisieren.)

Die Konstante *yhstr* gibt einen Faktor für die Startanregung des Reglers vor. Sie kann zuerst einmal belassen und abhängig von der Führungsgröße *w*, bei zu großen Überschwingweiten herabgesetzt werden¹. Für einen fest vorgegebenen Steigungsindikator, mit der aktivierenden Einstellung *aqfix* = 1 (hierbei ist die verstärkte Anregung (1.47) inaktiviert), ist das Pendant zu *yhstr* die Konstante *yhstf*. Der geforderte Festwert² $\sqrt{a_{soll}}$ ist im Programm mit der Variablen *aqsoll* bezeichnet und darf nicht größer sein als der größte real vorkommende Steigungsindikator der angesprochenen Regelstrecken. Die Konstante *yhstf* fällt meist kleiner als *yhstr* aus. Bei aktiviertem Festwert *aqsoll* könnte die Startanregung *yhstf* gemindert werden um insbesondere bei trägen Regelstrecken, zusätzlich die Anlaufsteigung der Regelgröße zu verkleinern. Je genauer *yhstf* der Regelsituation entspricht, desto schneller wird der Wert von *aqsoll* des vorgegebenen Steigungsindikators erreicht werden. Die Startanregung ist im Initialisierungs-Unterprogramm *init* bei der Stellwertvoreinstellung umgesetzt. Des Weiteren trägt die erweiterte Übergangsschwelle *e0f* zu einem gleichmäßigeren Abbau der Regelabweichung um null bei und kann mit *e0f* = 3 belassen werden. Die Compiler-Voraussetzung für das Signum-Makro ist in der Regel erfüllt, andernfalls sind die Größer/Kleiner-Symbole des Makros passend zu setzen.

Im Regler-Unterprogramm sind vorab die lokalen Konstanten deklariert. Zuerst verschiedene Werte zu *esp* nach (1.31) im Schritt 4. Dann den Stellwert³ betreffend *y_{fak}* zur verstärkten Anregung in Schritt 1, dort vorbereitend mit der Variablen *ysw* und ausführend im Schritt 5 sowie drei Konstanten zur beständigen Anregung des Stellwertzuwachses *|y_d|* im Schritt 3. Die sechs folgenden Begrenzungskonstanten beinhalten den oberen Taktfaktor⁴ *tkfmax*. Es folgen der Mittelwertdivisor *nmax* (entspricht *n* in (1.16) und (1.20)), die Schwelle *e0ffix* (entspricht *e0_{ffix}* in (1.46)) und die Nahbereichsschwelle *e0ns*. Die lokale Deklaration endet mit dem Makro zur Berechnung des

¹siehe dazu „1.10.3 Die Startanregung“ auf Seite 73

²siehe Abschnitt „1.11 Der Steigungsindikator als Festwert“ auf Seite 76

³siehe bei Abschnitt „1.6.1 Die Stellwertgewinnung“ auf Seite 33

⁴siehe dazu „1.8.1 Die Begrenzung des Taktfaktors“ auf Seite 50

Funktionsfaktors nach (1.24).

Der Mittelwertdivisor $nmax$ ist universell für alle Regelstrecken verwendet. Bei verzögerungsarmen Strecken ließe sich mit seiner Verkleinerung die Anregelzeit etwas verkürzen, bei Speicherstrecken wäre sie dadurch vergrößert. Bei Vergrößerung des Divisors $nmax$ würde sich die Anregelzeit wegen erhöhter Regelgrößensteifigkeit bei verzögerungsarmen Strecken verlängern und bei Speicherstrecken verkürzen mit Verstärkung der Welligkeit innerhalb einer verlängerten Ausregelzeit. Die verstärkte Anregung wirkt bei verzögerungsarmen Strecken gering.

Die einzelnen Bearbeitungsschritte

Schritt 1: Vorneweg geschieht nach der optionalen Signalglättung und der Berechnung der Regelabweichung zur Zwischenspeicherung, der Eintritt in das eigentliche Reglerunterprogramm erst dann, wenn genügend Grundtakte $t0$ verstrichen sind und ihre Anzahl dem Taktfaktor tkf (1.40) genügt (tkf vorübergehend in Hilfsvariable hw und zur Verteilung des Rundungsfehlers aufgerundet). Sollte die Grundtaktanzahl aus irgendwelchen Gründen nicht erreicht werden, dann wird der Regler nicht mehr durchlaufen und er ist blockiert⁵. War andererseits die Regelabweichung $|e0| \leq e0ns$ und wechselte zur Regelabweichung $|e0| \geq e0s$ innerhalb einer Rahmenabtastung (bei nun gesetztem internen Schalter $ovsw$), wird die vollständige Rahmenabtastung td (1.14) nicht mehr abgewartet, sondern sofort für den Reglerdurchlauf unterbrochen. Der berechnete Taktfaktor tkf bleibt erhalten⁶. Die Regelabweichung $|e0| = e0s$ ist der Übergangspunkt der beiden Teilfunktionen der Führungsfunktion, wie in Abbildung 1.1 auf Seite 20 dargestellt⁷.

Eine vorherige Führungsgröße w_{alt} ist gehalten und somit ihre Veränderung feststellbar. In diesem Fall ist ein größerer Regelabweichungszuwachs durch Verfälschung der Vorgängerregelabweichung $e1$ vorgetäuscht, um vorwegnehmend einen Stellwertsprung auszulösen. Am Ende ist der interne Schalter $ovsw$ nach Unterbrechung der Rahmenabtastung zurückgesetzt. Dabei ist eine Hysterese berücksichtigt, sowohl mit dem Abstand $e0s$ als auch doppeltem Abstand von $e0ns$, da dann nach Voraussetzung $e0s > e0ns$ sicher besteht.

Es folgt der Vergleich des Taktfaktors tkf mit seinem Vorwert (hier noch in Variable tkf) zur verstärkten Anregung, um die Grenzwertigkeit zu erreichen mittels direkter Beaufschlagung des Stellwerts nach (1.47). Der Regelabweichung und dem Vergleichsergebnis entsprechend, wird der Schalter ysw gesetzt und in Schritt 5 ausgewertet⁸. Bei gewähltem Steigungsindikator als Festwert (mit Konstante $aqfix = 1$) ist diese Maßnahme inaktiviert und damit die verstärkte Anregung abgeschaltet. Beim Eintrag $aqfix > 1$ wie z. B. $aqfix = 2$, ist die Verstärkung der Anregung über den Schalter ysw , ebenso ausgeschaltet. Aber sonst verbleibt alles wie mit $aqfix = 0$. **Der Regler verhält sich**

⁵**Wichtig!** Der Überlauf des Zählers $tzae$ ist im Musterprogramm nicht verhindernd abgesichert, weil es beim Entwickler liegt zu bestimmen was dann geschehen soll, wenn die Regler-Routine nicht mehr durchlaufen wird. Ebenso ist kein kontrollierter Reglerabbruch eingebaut.

⁶Genauerer siehe „1.8.2 Die Unterbrechung der Rahmenabtastung“ auf Seite 53

⁷Abbildung aus dem Abschnitt „1.3 Der Steigungsindikator“ Seite 18

⁸siehe dazu Abschnitt „1.10 Die Reglereinstellung“ auf Seite 66

abweichend bei verstärkter Anregung. Ist das unerwünscht, so kann die verstärkte Anregung mit $aqfix = 2$ abgeschaltet werden. Am Ende wird der Vorwert von tkf mit dem aktuellen Wert überschrieben.

Schritt 2: Nach der, ebenso von der Regelabweichung $e0s$ abhängigen, Berechnung der Variable $aq0$ als Steigungsindikator $\sqrt{a}$ (1.13), werden dessen Grenzen überprüft. Allein bei der Messwertglättung geschieht eine Begrenzung nach oben. Die Überschreitung der Begrenzung sollte ansonsten aus dynamischen Gründen möglich sein. Des Weiteren gibt es die Prüfung, ob der Betrag der Regelabweichung $e0ffix > 2 \cdot e0ns$ (entspricht $e0ffix$ in (1.46)) erreicht bzw. unterschritten ist. Zur Mittelwertbildung ist der genutzte Steigungsindikator vorbereitend durch Mittelung, unter Zuhilfenahme seines Vorwerts, beruhigt. Erst dann wird daraus nach (1.16) der gleitende Mittelwert maq (entspricht $\sqrt{a_{vm}}$), über $nmax$ (entspricht n) Werte des Steigungsindikators, fortgeschrieben. Ist bei den Konstanten mit $aqfix = 1$ der Steigungsindikator als vorgegebener Festwert gewählt, so wird dieser für die Mittelwertbildung nach (1.54) berechnet, soweit die Regelabweichung über dem Betrag $e0f$ liegt (mit $e0f > e0s$) oder der vorbereitete Steigungsindikator (Hilfsvariable hw) größer als sein geforderter Festwert $aqsoll$ (entspricht $\sqrt{a_{soll}}$ nach (1.54)) ist. Sobald das Gegenteil wie vorliegend kodiert gilt, ist der vorbereitete Steigungsindikator (noch Hilfsvariable hw) für die reguläre Mittelwertbildung genutzt. Dadurch wird egalisierend der Übergang zu null gleichförmiger.

Schritt 3: Das gleitende Mittel des Streckenverstärkungspotentials ksm (1.20) wird nur neu berechnet, wenn der Betrag des abbauenden Zuwachses $|e0 - e1|$ (jetzt Hilfsvariable hw , ersetzt den abbauenden Regelabweichungszuwachs $|ed|$) ungleich null ist und das Streckenverstärkungspotential ks die obere Begrenzung nicht überschreitet. Die Variable yd beinhaltet eingangs noch den Stellwertzuwachs der vorherigen Rahmenabtastung. Das Vertauschen des Zuwachses in hw mit der Konstanten $ksmax$ verhindert die Division beim Zuwachs null und damit einen Fehlerabbruch. Anschließend ist der Stellwertzuwachs $|yd|$ (1.21) und der Anregungsfaktor mit invertiert dargestellter Bedingungsfolge zu (1.22) und (1.23) ermittelt. Der Stellwertzuwachs ist mit $yd > 0$ nach unten begrenzt.

Der Mittelwert ksm nach (1.20) ist mit dem auch in Schritt 2 vorhandenen Divisor $nmax$ (entspricht n) berechnet. Der unter (1.22) angegebene effektive Wert $anfeff$ ist im ELSE-Zweig für die erhöhte Anregung berechnet.

Schritt 4: Am Beginn ist die Regelabbweichung esp ermittelt⁹. Sie ist für verzögerungsarme Strecken kleiner und abhängig von der Steigung der Regelgröße, die als Tangens detektiert und vor der Übernahme gerundet ist. Das Komparatorsignal (1.17) bzw. (1.18) ist erst genutzt, wenn der Einsatzpunkt des Reglers mit der Betragsvariablen $e0h < esp$ der Regelabweichung $|e0|$ nach (1.31) erreicht ist. Vorher sind die maximalen Stellwerteinheiten der Stellwertskalierung y_{max} (1.28) vorzeichenabhängig wirksam. Ausgelöst von der Bewegung der Regelabweichung sowie dem Vergleich des Steigungsindikators mit seinem Mittelwert, ist der komparative Vorzeichenfaktor (± 1) mit dem willkürlich herausgegriffe-

⁹siehe dazu „1.6.2 Der Einsatzpunkt der Regelung“ auf Seite 42

nen Fall nach (1.17) gewonnen und mittels Variable vyd für den im nachfolgenden Schritt verwendeten Stellwertzuwachs $|yd|$ (1.21) (Variable yd) bereitgestellt.

Schritt 5: Die Summierung yh der Stellwertzuwächse yd (1.25) mithilfe des komparativen Vorzeichens in vyd , berücksichtigt auch das Vorzeichen der Hauptregelrichtung in sf und erfolgt nur bei der Regelabweichung $e0 \neq 0$. Anschließend ist, abhängig vom internen Schalter y_{sw} (siehe Schritt 1) der verstärkten Anregung, der Betrag des Stellwert y_i nur bei positivem Produkt $vyd \cdot sf$ (siehe Schritt 4, die übergeordnete Regelrichtung der Konstanten sf ist mit einbezogen) zur verstärkten Anregung weiter erhöht. Es folgt die Stellwertbegrenzung nach unten und oben.

Bei aktiver **Nullabsenkung** nur für Speicherstrecken und damit gewählter Konstante $nullab = 1$, ist der gestufte Stellwert y_i in den Zurücknahmephasen auf null abgesenkt. Mit dem Zweck, Speicherwirkung zu nutzen¹⁰. Im Hintergrund bleibt der vorläufige Stellwert in seinem Zwischenspeicher yh weitergeführt. Der Betrag des ausgegebenen Stellwerts y_i ist bis zum nächsten Takt beibehalten.

In manchen Fällen ist wohl gleich für Speicherstrecken der **Zweipunkt-Schaltbetrieb** vorzuziehen. Dieser besteht aus der Nullabsenkung ($nullab = 1$) und der Abschaltung der Stellwertstufung. Indem beim ersten Stellwertzweig mit y_i ungleich null, immer der maximale Pegel y_{max} auszugeben ist. Für die Abschaltung der Stellwertstufung ist die in Kommentarzeichen gesetzte Zeile, mit der aktiven Zuweisung des Stellwerts y_i auszutauschen. Hierbei ist bei negativem Produkt $vyd \cdot sf$ der Stellwert y_i auf null abgesenkt und der Zwischenspeicher yh im Hintergrund bleibt bei den wechselnden Stellwertausgaben y_{max} und null ungenutzt.

Schritt 6: Beinhaltet die mathematischen Funktionen mit vorberechneter Konstante der Quadratfunktion.

¹⁰siehe dazu Abschnitt „1.6.1.3 Stellgröße und Regelstrecke“ auf Seite 37ff.

3.2 Die Programmkodierung

Das lauf- und funktionsfähige, breit anwendbare Programm des Reglers, ist zu anfänglichen Versionen etwas verändert. Es beinhaltet ebenfalls die optionale Messwertglättung. *Die üblichen **technischen Absicherungen** sind anwendungsbezogen noch zu ergänzen.* Das betrifft auch die Absicherung der Software¹¹, wie des Zählers *tzae* gegen Überlauf.

```
/* REGMUSTER.C © 2005–2019 R. Kress
   (Ablaufmuster, dokumentiert in C,
    letzte Änderung 2019 mit der Möglichkeit "aqfix > 1"
    und Konstante e0ffix als Separierung von e0ns)

   Übergabeparameter der digitalen Schnittstelle:
   Eingaben:   wi = Führungsgröße
               xi = Regelgröße (Ermittlung separat)
   Ausgabe:    yi = Stellgröße (als ganzzahliger Kennwert) */

/* ——— Standard-Bibliotheken ——— */
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <float.h>
#include <math.h>

/* — Unterprogramme und math. Funktionen — */
void init (void);          /* Initialisierung */
void regler (void);        /* Regler */
void glaettung (void);     /* Glättung */
float faqu4 (float ev, float tv, float eh);
float faqu2 (float ev, float tv, float eh);

/* ——— Konstanten und Variablen ——— */
#define sf          1      /* Regelrichtung: 1 oder -1
                           1 = Stellgrößen- und Regelgrößenrichtung sind gleichläufig.
                           -1 = Stellgrößen- und Regelgrößenrichtung sind entgegengesetzt */
```

¹¹So ist im Unterprogramm *regler* beim Schritt 1 der Überlauf des Zählers *tzae* noch nicht abgesichert, weil offen ist was geschehen soll, wenn der Regler plötzlich nicht mehr aktiv ist. **Hinweis:** Die ODER-Verknüpfungen (||) könnten beim Kopieren eine zu entfernende Leerstelle zwischen den beiden Balken aufweisen.

```

#define t0      0.2      /* Grundtakt in s, zur Berechnung
                          Steig.Ind. u. Rahmenabtastg. */
#define nullab  0        /* 0 = reguläre Stellwertausgabe */
                          /* 1 = Stellwert mit Nullabsenkung,
                          für nichtlineare Speicherstre-
                          cken mit steil ansteigender Ver-
                          stärkung (z. B. Magnetregelstre-
                          cken) und evtl. zu großem t0 */
#define glaett  0        /* 0=ohne, 1=mit bedingt. Glättg.*/
#define pa      0.09     /* Arbeitsprodukt in s */
#define tkgst   pa/t0    /* Steigungsindikator bei t0 */
#define ymax    1000     /* maximales Stellsignal yi */
#define ymin    0        /* minimales Stellsignal yi (für
                          konträre Stellwirkung z. B.
                          ymin= -1000), ymin <= 0 */
#define yhstr   5        /* yh-Startfaktor Reguläranreg. */
#define e0s     1        /* Funktionsübergang (e0s>2*e0ns)*/

#define aqfix    0        /* Soll-Steigungsindikator
                          0= aus, 1= Sollwert aqsoll aktiv
                          >1 = nur ohne verstärkt.Anreg.*/
#define aqsoll   0.002   /* Wert Soll-Steigungsindikator */
#define yhstf    1        /* Faktor Start-Festw.-Anregung */
#define e0f      3        /* erweiterte Übergangsschwelle
                          e0f > e0s */
#define sgn(wert) ((wert>0) - (wert<0)) /* Signum-Makro */
                          /* soweit Compiler interpretiert:
                          falsch = 0 und richtig = 1 */

float  xi , wi , ksm , e0=0,em,yh ,maq , walt , aq0=0,yd;
float  xw=0,eneu=0,en0=0,en1=0,en2=0,en3=0,en4=0,en5=0,
       en6=0,en7=0;      /* Deklaration für die Glättung */
int    yi=0,tzae=0,ovsw=0,tkf=0;

main(void)                /* Hauptprogramm Regelung */
{ /* Variablen Regelgröße xi und Führungsgröße wi stehen
   bereit, Stellgröße yi ist numerisch ansteuerbar von
   ymin bis ymax, Aufruf von init() beim Start, perio-
   discher Aufruf von regler() im Grundtakt t0.
   (Darstellung hier nur symbolisch) */

```

```

init();          /* Variablen-Initialisierung */
while(1)         /* Schleifendarstellung */
{ regler();      /* periodischer Aufruf im Takt t0 */
  break;        /* im Muster bedingungsloser Abbruch */
}
return(0);       /* nur pro forma */
} /* Ende main() */

```

```

void init (void) /* Initialisierung */
{ em = wi - xi;  /* Startwert zur e1-Übergabe */
  e0 = em;       /* e0 vorladen wegen e1 */
  ksm = 20;      /* Startwert Streck.verstärk.pot.*/
  if ( aqfix != 1 || fabs(em) <= e0f )
    yh = yhstr * em * sf; /* Voreinstellung Stellwert */
  else          /* Steigungsindikator Festwert */
    yh = yhstf * em * sf; /* Voreinstellung Stellwert */
  yd = yh / 16;  /* yd vorladen */
  maq = tkgdst;  /* Startwert Steigungsindikator */
  walt = wi;     /* Sollwert-alt angleichen */
  ovs = 0;       /* Schalter zurücksetzen */
  xw=0,eneu=0,en0=0, /* Glättungsdaten zurücksetzen */
  en1=0,en2=0,en3=0,en4=0,en5=0,en6=0,en7=0;
} /* Ende init() */

```

```

void glaettung (void) /* ——— Signalglättung ——— */
{ float hw, sy, sxy;

```

```

#define divisor 12 /* 12=8+nx, nx=4 Glättungsverst.*/
#define sx      28 /* Regress.(nt=8)28=0+1+2+3+4+5+6+7*/
/* Hilfswert sx2=140 Regress.(nt=8) =0^2+1^2+2^2+...+7^2*/
#define sxh     336 /* Div. vorab(nt=8) 8*sx2 - sx*sx */
#define k       0.8 /* z. B. im Bereich 0.4 bis 1 */

```

```

en7=en6;en6=en5;en5=en4;en4=en3;en3=en2;en2=en1;en1=en0;
en0 = (xi - eneu) / divisor + eneu;

```

```

/* Lin. Regression über 8 Stellen, rechner. delta_x= 1*/
sy = en0+en1+en2+en3+en4+en5+en6+en7; /* zu sy, sxy nt=8*/
sxy = 0 +en1 +2*en2 +3*en3 +4*en4 +5*en5 +6*en6 +7*en7;

```

```

hw = (sx*sy - 8*sxy) / sxh;      /* Regress.koeff. 8=nt */
eneu = (8 - k)*hw + (sy - hw*sx) / 8;      /* 8=nt */
/* Summierung der Einzeldistanzen */
xw = xw + hw;      /* Summierung der Steigungsschritte */
} /* Ende glaettung() */

void regler (void)      /* ——— Regler ——— */
{ float hw, e1, e0h, elh, aq1, esp;
  int vyd, ysw;

#define tnmin      .1      /* minimaler Tangens für esp */
#define tnmax      30      /* maximaler Tangens für esp */
#define espmin     100     /* minimales esp */
#define espmax     200     /* maximales esp */
#define yfak       1.015   /* Zugabe tkf-Kontr. (ohne=1.0) */
#define ue0anf     10      /* e0-Übergang zur Anreg.-Ändg. */
#define anf        1.03    /* Anregungsfaktor >1 ... 1.1 */
#define anfe0ns    1.35*anf /*max.Anreg.faktor>anf bei e0ns*/
#define ksmin      1       /*min. ksm-Begrenzg. >= Auflösg.*/
#define ksmax      35      /* maximale ksm-Begrenzung */
#define ydmin      0.05    /* minimales yd > 0 */
#define tkfmax     1200    /* maximaler Taktfaktor */
#define maqmin     0.000001 /* minimales maq > 0 */
#define maqmax     12 * tkgdst /* maximales maq */
#define nmax       8       /* max. Mittelwertdivisor */
#define e0ffix     2       /* Funktionsfixrg. e0ffix >= 2*e0ns */
#define e0ns       0.2     /* Nahbereich in Einh., 2*e0ns < e0s */
#define ffanf      (anfe0ns-anf)/(ue0anf-e0ns)/(ue0anf-e0ns)
                        /* Berechnung Funktionsfaktor */

/* — 1. Taktprüfg., Regelabweichg., Änderungseinstellg. — */
  tzae++;      /* Taktzähler um 1 erhöhen */
/* if ( tzae > tzaemax ) ==> Aktion noch offen! */
  if ( !nullab && glaett ) /* Ausschlusskriterium */
  { glaettung();      /* Glättungsteil */
    em = wi - xw;      /* Regelabweichung ermitteln */
  }
  else em = wi - xi; /* Regelabweichung ermitteln */

  if ( maq < maqmin ) maq = maqmin; /*untere Begrenzg.*/
  hw = floor(tkgdst / maq + 0.5); /*tkf_neu aufgerundet*/

```

```

if ( hw < 1 ) hw = 1;          /* untere Begrenzung */
else if ( hw > tkfmax ) hw = tkfmax; /* ober. Begrenzg. */
if ( tzae < (int) hw && (!ovsw || fabs(em) < e0s) )
    return; /* Upgm-Austritt, noch kein Durchlauf */
tzae = 0;          /* Taktzähler zurücksetzen */
e1 = e0;
e0 = em;          /* aktuelle Regelabweichung */

if ( walt != wi ) /* Sollwertänderung */
{ walt = wi;      /* Sollwert angleichen */
  e1 = sgn(yh) * e0 * 0.4; /* bessere Änderungsanpassg. */
}
e1h = fabs(e1);   /* Absolutwert von e1 zuweisen */
e0h = fabs(e0);   /* Absolutwert von e0 zuweisen */
if ( !ovsw )      /* Schalter interner Taktabbruch */
{ if ( e0h <= e0ns ) ovsw = 1;      /* aktiv setzen */
}
else if ( e0h >= e0s || e0h >= e0ns + e0ns ) ovsw = 0;
if ( !aqfix && e0h >= ue0anf && tkf <= (int) hw )
    ysw=1; /* verstärkte Anregung, tkf steigend od. gleich */
else ysw = 0; /* keine verstärkte Anregung */
tkf = (int) hw; /* altes tkf nachladen, jetzt aktuell */

/* — 2. Ermittl. Steigungsindikator u. dessen Mittel maq — */
aq1 = aq0; /* Vorwert Steigungsindik. merken */
if ( e0h < e0s ) /* Funktionsübergang */
    aq0 = faqu4(e1h, t0 * tkf, e0h); /*Funkt. 4. Grades */
else aq0 = faqu2(e1h, t0 * tkf, e0h); /*quadrat. Funkt.*/
if ( aq0 < maqmin ) aq0 = maqmin; /* min. Begrenzung */
else if ( !nullab && glaett && aq0 > maqmax )
    aq0 = maqmax; /* max. Begrenzung */

if ( e0h > e0ffix ) /* maq für e0h <= e0ffix konstant */
{ hw = (aq0 + aq1) / 2; /* vorbereit. Steigungsindikator */
  if ( aqfix != 1 || (e0h <= e0f && hw <= aqsoll) )
      maq = maq - (maq - hw) / nmax; /* Mittelwert regulär */
  else /* Steigungsindikator Festwert */
      maq = maq - (maq - (aqsoll + hw) / 2) / nmax;
}

/* — 3. Ermittl. Streckenverstg.pot. ks u. Stellw.zuwachs yd */

```

```

hw = fabs(e0 - e1); /* Delta_e_Ist merken, formal |ed| */
if ( hw > 0 && fabs(yd) / ksm <= hw ) /* obere Begrenzg */
{ ksm = ksm - (ksm - yd/hw)/nmax; /* Streck.verstärk.pot. */
  if ( ksm < ksmin ) ksm = ksmin; /* untere Begrenzung */
}
yd = ksm * hw; /* vorläufiger Wert von Delta_y_neu */
if ( e0h >= ue0anf || e0h <= e0ns ) yd = yd * anf;
else /* keine einfache sondern erhöhte Anregung */
{ hw = ue0anf - e0h; /* neue Hilfswertzuweisung */
  yd = yd * (ffanf * hw * hw + anf);
}
if ( yd < ydmin ) yd = ydmin; /* untere Begrenzung */

/* — 4. Komparative Ermittlung des Vorzeichens von yd — */
if ( e1 == e0 ) hw=(tnmax-tnmin)/2; /* Startbedingung */
else hw = fabs(e0 - e1) / (tkf * t0); /* Tangens */
esp = (espmax * (tnmax - hw) + espmin * (hw - tnmin));
esp = esp / (tnmax - tnmin); /* Zwischenergebnis */
esp = floor(esp / 8 + 1) * 8; /* beruhigend runden auf 8 */
if ( esp > espmax ) esp = espmax; /* max. Begrenzung */
else if ( esp < espmin ) esp = espmin; /* min. Begrenzung */
if ( e0h >= esp ) /* Einsatzpunkt noch nicht erreicht */
{ vyd = 1; /* für diesen Zweig immer positiv */
  if ( sgn(wi) >= 0 ) yd = ymax; /* laden pos.max. Stellw. */
  else yd = ymin; /* laden mit negativem min. Stellwert */
}
else /* regulärer Regelbetrieb */
{ if ( e0 < 0 ) /* Bedingungs Umfeld */
  { if ( e1 >= e0 || aq0 < maq ) vyd = -1; /* negativ */
    else vyd = 1; /* positives Vorzeichen */
  }
  else /* e0 >= 0, Bedingungs Umfeld */
  { if ( e1 > e0 && aq0 >= maq ) vyd = -1; /* negativ */
    else vyd = 1; /* positives Vorzeichen */
  }
}

/* — 5. Summierung zu yh und Stellwert yi — */
if ( e0 != 0 ) /* andernfalls verbleibt yh */
{ yh = yh + vyd * yd * sf; /* vorläufiger Stellwert */
  if ( ysw > 0 && vyd * sf > 0 ) /* denn +1 gleich >0 */

```

```

        yh = yfak * yh;          /* Zugabe aus tkf-Kontrolle */
    }                            /* Die Begrenzung ist immer aktiv: */
    if ( yh > ymax )  yh = ymax;  /* Prüfung auf Maximum */
    else if ( yh < ymin )  yh = ymin; /*Prüfg. auf Minimum */

    /* Stellwert zur Ausgabe bereitstellen, ggf. Nullabskg. */
    if ( !nullab || vyd * sf > 0 ) /* nullab=0 OR vyd*sf>0 */
        yi = (int) floor(yh + 0.5); /* Stellwert aufrunden */
    /* yi = ymax; */ /*wahlw. Zweipunktbetrieb mit nullab=1 */
    else yi = 0; /*Nullabsenkung bei nullab=1 AND vyd*sf<0 */

} /* _____ Ende regler() _____ */

/* ===== 6. mathematische Funktionen ===== */
float faqu4 (float ev, float tv, float eh) /* 4. Pot.F. */
{ float wert;
  wert = sqrt(6*sqrt(e0s))*(sqrt(sqrt(ev))-sqrt(sqrt(eh)));
  return fabs(wert)/tv;
}
float faqu2 (float ev, float tv, float eh) /* Quadratfu. */
{ float wert;
  wert = sqrt(fabs(3*ev - e0s)) - sqrt(fabs(3*eh - e0s));
  return (0.57735 * fabs(wert)/tv);
} /* ***** Ende ***** */

```

Für den Fall eines Sollwertbereichs mit den Grenzen Minimum w_{min} und Maximum w_{max} ist eine kleine Abänderung der Unterprogramme `init` und `regler` erforderlich. Die entsprechend geänderten Programmauszüge lauten:

```

/* ... anstatt der Führungsgröße wi stehen wmin und wmax */
/* ..... bereit ... */
float wmin,wmax,wminalt,wmaxalt; /* Sollwert-Minimum und */
int mimas=0; /* Steuerschalter -Maximum */
/* ..... */
/* ..... */

void init (void) /* Initialisierung */
{ /* em = wi - xi; wird ersetzt durch */ /* Startwert */
  if ( xi < wmin || xi > wmax ) /* außerhalb Sollbereich */
  { em = (wmax + wmin) / 2 - xi; /*Regelabw., Mittelstellung*/
    mimas = 0; /* Schalter nicht gesetzt */
  }
}

```

```

    }
    else /*  $xi \geq wmax$   $\&\&$   $xi \leq wmin$  im Sollbereich */
    { em = 0; /* Regelabweichung */
      mimas = 1; /* Schalter gesetzt */
    }
  /* .... */
  /* walt = wi; wird ersetzt durch */ /* Altwerte angleichen */
  wminalt = wmin;
  wmaxalt = wmax;
  /* .... */
}

void regler (void) /* ——— Regler ——— */
{
  /* .... */
  /* .... */
  if ( !nullab && glaett ) /* Ausschlusskriterium */
  { glaettung(); /* Glättungsteil */
    em = wi - xw; /* Regelabweichung */
    /* Bei Bedarf Änderung analog em = wi - xi bei "else". */
  }
  else
  { /* em = wi - xi; wird ersetzt durch */ /* Regelabweichg. */
    if ( xi < wmin || xi > wmax ) /* außerhalb Sollbereich */
    { em = (wmin + wmax) / 2 - xi; /* Regelabweichung */
      mimas = 0; /* Schalter zurücksetzen */
    }
    else /*  $xi \geq wmin$   $\&\&$   $xi \leq wmax$  im Sollbereich */
    { if ( mimas ) /* Schalter bereits gesetzt */
      em = 0; /* Regelabweichung */
      else /* !mimas */
      { if ( sgn(e0) != sgn(em) ) /* sgn(Vorwert) != sgn(Istw.) */
        { mimas = 1; /* zur Prüfg. Mittel-Überschreitg. wahr */
          em = 0; /* Regelabweichung */
        }
        else /* Mittel noch nicht erreicht */
          em = (wmin + wmax) / 2 - xi; /* Regelabweichung */
      }
    }
  }
}
/* .... */

```

```

/* if ( walt != wi ) */           /* Sollwertänderung */
/* { walt = w;          werden ersetzt durch */
  if ( wminalt != wmin || wmaxalt != wmax ) /* Sollwertändg. */
  { wminalt = wmin;          /* Sollwerte angleichen */
    wmaxalt = wmax;
    /* .... */
  }
/* .... */
}

```

Im vorliegenden Auszugsmuster des geänderten Programms überschreitet beim Anstieg, die Regelgröße das Minimum w_{min} bis zur Mitte $(w_{min} + w_{max})/2$ des Sollbereichs $w_{min}...w_{max}$. Dann wird mit dem aktivierten Schalter *mimas* eine Hysterese wirksam. Erst mit $(x_i < w_{min})$ oder $(x_i > w_{max})$ wird der Schalter *mimas* wieder zurückgesetzt und die Sollbereichsmitte erneut zur Führungsgröße. Es hängt vom Anwendungsfall ab, insbesondere bei größerem Streckenverzug, ob unterhalb oder oberhalb der Mitte der w -Grenzen, dennoch geringe Stellgrößenanpassungen angebracht sind (dann anstatt $em = 0$ nun mit $em = y_{dmin}$ oder gleichwertigem Betrag¹²).

3.3 Anmerkungen zu Simulation und Ausführung

Der Zeitverzug im Regelprozess ist die Grundlage des Verfahrens. Deshalb sind Regelvorgänge mit dem Algorithmus auch im Zeitbereich zu simulieren. Vorteilhaft für die Realitätsnähe ist die Nachbildung von Messwertestreuungen mittels Addition von bewerteten, vorzeichenbehafteten Pseudozufallszahlen. Denn ohne Messwertestreuungen kommt der Regler periodisch oder vollständig in Höhe des Sollwerts in Ruhelage. Das ist zwar harmlos aber immerhin anwendungsfern.

Um eine höhere Genauigkeit der Simulation der Regelstrecke zu erreichen ist es ratsam, die Simulation in kleinen Schritten im Turnus des Grundtakts t_0 aufzurufen und nicht erst kurz vor dem Durchlauf des gesamten Regelalgorithmus. Bei nichtlinearen Regelstrecken wird das Ergebnis genauer sein, wenn die Simulationsroutine selbst noch in Zeitschritten unterteilt ist. Von Vorteil wäre es, die Messauflösung und pseudozufällig die Messwertestreuung des realen Messfühlers nachzubilden. Bei einer Änderung des Grundtakts t_0 im Musterprogramm¹³ wie es vorliegt, ändert sich auch der Steigungsindikator $\sqrt{a_{oe}}$, da das Arbeitsprodukt P_A (1.35) als Konstante eingetragen ist. Dagegen würde sich mit dem Arbeitsprodukt auch die Anregelzeit ändern.

Die möglichst genaue Nachbildung der Messgrößen in ihrem zeitlichen Verlauf ist insofern von Bedeutung, da sich der Regler am Streckenverzug ausrichtet. Andernfalls wird der Regler bei in der Simulation fehlendem bzw. nicht adäquat wiedergegebenem Verzug, durchwegs statisch arbeiten. Eben nach den Verzugsgegebenheiten: sind sie nicht da,

¹²siehe dazu auch den Absatz unterhalb „*wirksame Stellleistung*“ (1.27) auf Seite 36

¹³siehe Abschnitt „3.2 Die Programmkodierung“ auf Seite 98ff

bleiben sie unberücksichtigt. Dann könnte bei der Ermittlung des Taktfaktors tkf (1.40), dieser zu klein sein und in der Simulation bei $tkf = 1$ verharren. Es ist also für die Funktion des Reglers wichtig, ob man simulativ die verzugskonforme Wirklichkeit abbildet, oder praktisch zeitlos sofort das in einem Rechengang gewonnene Resultat erhält. So wäre z. B. in der Simulation durch Vertauschen der Rangfolge der Variablenzuweisungen, ein Zeitverzug über einen Regeltakt zu erreichen.

Im Unterprogramm `regler` sind sowohl globale Konstanten als auch globale Variablen verwendet. Für Mehrfachnutzung bei mehreren Reglereinheiten wie bei Mehrgrößenanwendungen, empfiehlt sich deshalb die globale indizierte Datenhaltung und die Datenübergabe mit indizierten Listen. Obwohl wenige Regelstreckendaten für einen Regler ausreichen, verwendet der Algorithmus für jede Reglereinheit eine Reihe weitgehend von der Regelstrecke unabhängige Konstanten. Unberührt von der Datenübergabe, verbleiben die nicht nach außen wirksamen Konstanten und Variablen innerhalb des Reglerunterprogramms. Es kann sich als nützlich erweisen, skalierende Anpassungen an Stellglieder mit lokalen Parametern, in einem separaten Stellgliederunterprogramm vorzunehmen.

Im Unterschied zur geschlossen algebraischen Form einer Regelung, ist die Startanregung zur Beschleunigung abgesetzt behandelt. Beim Start sollten deshalb den entsprechenden Variablen der Simulationssoftware, die echten Anfangswerte zugewiesen werden, wie z. B. die Umgebungstemperatur. Wäre da der Variablen-Anfangswert gleich null, so ergäbe sich beim Beginn eine unrealistische Regelabweichungsdifferenz, deren dadurch bedingter Stellwertzuwachs aufgrund der Vorbelegung bei der Initialisierung (Hintergrundspeichervariable `yh` des Stellwerts im Unterprogramm `init`¹³), zur Startanregung addiert werden würde.

Zum praktischen Aufbau

Es ist naheliegend, bei elektrischen Heizungen die Ansteuerung der Stellgröße mit elektronischen Schaltern, wie Solid-State-Relais (SSR), vorzunehmen. Der Grundtakt t_0 ist das Maß für die hardwareseitige Abtastung, wofür z. B. ein fest eingestellter Timer in einem Controllerbaustein sorgen könnte. Dabei ist es bei SSR-Verwendung zweckmäßig, den Takt für die Stellwertausgabe bei Phasenbezogenheit, mit dem Grundtakt so zu kombinieren wie es bereits bei der Gewichtung angeführt wurde¹⁴. Ein Zeitschritt t_z (1.30) des Timers mit $y_{res} \geq 0$ (1.29) wäre einzustellen, sodass der Timer nach jedem Zeitschritt t_z einen Interrupt auslöst, der in seiner Interruptroutine einen Zähler `cnt` jeweils um 1 erhöht. Erreicht der Zähler `cnt > ymax`, so wird er auf `cnt = 1` als Beginn eines neuen Grundtakts zurückgesetzt. Die genaue Einstellung der Tickdauer des Timers ist auch abhängig von der bereitgestellten Auswahl des verwendeten Controllerbausteins.

Die Vorlage der Kodierung könnte unter Nennung nur der betroffenen Reglerprogramme des Abschnitts 3.2, ohne Deklarationen und ohne Berücksichtigung einer bestimmten Syntax für Timer und In/Out-Ports (Eintrag nur als Platzhalter), etwa so aussehen:

.....

¹⁴siehe Abschnitt „1.6.1.5 Die Gewichtung des Stellwerts“ auf Seite 40

```

void regler (void)  /* Reglerprogramm */
{
    .....
}

void Timer_Interrupt (void)  /* Timer-Interrupt-Routine */
    /* nur vom Timer permanent aufgerufene Routine */
{
    cnt++;          /* Zähler erhöhen */
    if ( cnt > ymax ) /* ymax überschritten für Grundtakt */
    {
        cnt = 1;    /* Zähler zurücksetzen auf 1 */
        grundtakt = 1; /* Grundtaktauslösung fällig */
    } /* es folgt der Stellwertteil für das SSR-Schalten: */
    if ( cnt <= yi ) /* Zähler noch im SSR-Aktivbereich */
    {
        if ( ssrmark == 0 ) /* Prüfung SSR-Schalter ein */
        {
            AusgabeInt_Level_High; /* zum SSR, einschalten */
            ssrmark = 1; /* verhindert wiederholten Durchlauf */
        }
    }
    else
    {
        if ( ssrmark == 1 ) /* Prüfung SSR-Schalter aus */
        {
            AusgabeInt_Level_Low; /* zum SSR, ausschalten */
            ssrmark = 0; /* verhindert wiederholten Durchlauf */
        }
    }
}

main (void) /* Hauptprogramm Regelung */
{
    init(); /* diverse Initialisierungen + 4 Variablen:*/
    cnt = ymax; grundtakt = 0; ssrmark = 0;
    /* alle 3 Variablen bisher nicht vorhanden */
    Interrupt_Timer_Define(x,y); /* Timer-Zeit defin. und Start */
    /* mit dem Zeitschritt = t0 / ymax */
    while(1) /* Endlosschleife */
    {
        /* Grundtaktsteuerung und Regleraufruf */
        if ( grundtakt == 1 ) /* Grundtaktschalter ist gesetzt */
        {
            /* <===== hier ggf. Regelstrecken-Simulation einsetzen */
            EingabeFloat_Lesen_Fuehrungsgroesse; /* Input wi */
            EingabeFloat_Lesen_Regelgroesse; /* Input xi */
            regler(); /* Regleraufruf im Grundtakt */
            grundtakt = 0; /* Grundtaktschalter zurücksetzen */
        }
        break; /* im Muster bedingungsloser Abbruch */
    }
}

```

```

    }
} /* Ende main() */

```

Die globale Deklaration der drei Schalter- und Zähler-Variablen ist nicht dargestellt. Aus dem Reglerprogramm sind die Variable y_i und die Konstanten y_{max} und t_0 entnommen. Die Timer-Interrupt-Routine sollte zwar möglichst kurz gestaltet sein, weil sie die Echtzeit-Programm-Abarbeitung gewöhnlich unterbricht. Doch wenn der Controller schnell genug ist, könnte das Schalten des SSR gelingen. Der Marker *ssrmark* verhindert das mehrfache Überschreiben der Ausgabe-Ports, ohne dass sich zwischenzeitlich ihre Aktivierung änderte.

In einer Endlosschleife des Hauptprogramms wird jeweils über den Grundtaktschalter *grundtakt* ab dem zurückgesetzten Zählerstand $cnt = 1$, das Reglerprogramm aufgerufen. Neben der Grundtaktsteuerung erfolgt den Stellwert betreffend, die Freischaltung des SSR solange, bis für den Zähler $cnt > y_i$ gilt, mit y_i als Stellwert. Die while(1)-Endlosschleife mit dem darin liegenden Reglerprogramm, muss innerhalb eines Grundtakts t_0 sicher durchlaufen sein (Vorsicht, eine Endlosschleife sollte kontrollierbar zu unterbrechen sein!). Mit der Aufgabenteilung benötigt der Regler nur einen einzigen Zähler zur Steuerung des Grundtakts sowie der SSR-Ansteuerung zur Ausgabe des Stellwerts.

Zur Simulation der digitalisierten Messwerte ist auch darauf zu achten, dass negative Eingänge ebenfalls auflösungsgerecht abgebildet sind. Wollte man den nahtlosen Übergang der Regelgröße in den negativen Bereich darstellen, so ließe sich z. B. in C, die Digitalisierung der jeweils positiven (+) und negativen (−) Regelgröße x_i mit einer Auflösung von z. B. $x_{aufloes} = 0.05$ Einheiten und den zusätzlichen Vorzeichen ($\pm$) durch

$$x_i = \pm 1 \cdot floor\left(\frac{\pm 1 \cdot x_j}{x_{aufloes}}\right) \cdot x_{aufloes}$$

abbilden, wenn x_j das simulierte Messsignal *vor* der Digitalisierung darstellt und sein eigenes Vorzeichen behält. Eine negative Regelgröße würde ohne die beiden negativen Vorzeichen, den negativen Bereich verschoben anzeigen. Sodass bei negativer Führungsgröße durchaus vorzeitig ein zu hoher Stellwertbetrag anliegen könnte und zu anderen Ergebnissen führen würde, wenn auch nur geringfügig. Abhängig vom Vorzeichen der Regelgröße x_j könnte der Ausdruck, bei Verwendung des Signum-Makros aus der Deklaration des Muster-Reglerprogramms (Seiten 98ff),

$$x_i = sgn(x_j) \cdot floor\left(\frac{sgn(x_j) \cdot x_j}{x_{aufloes}}\right) \cdot x_{aufloes}$$

lauten oder weiter verkürzt, mit Signum und Betrag von x_j wie

$$x_i = sgn(x_j) \cdot floor\left(\frac{fabs(x_j)}{x_{aufloes}}\right) \cdot x_{aufloes}$$

aussehen. Der Übergang zur negativen Regelgröße lässt sich durch Verwendung des Stellgrößenbereichs mit den Konstanten $y_{max} > 0$ und $y_{min} < 0$ und der vorzeichengerechten Zuordnung der entsprechenden Stellgrößen zu den Aktoren, erreichen (siehe auch untere Hälfte der Seite 40 „Erweiternd ist ...“).

3.4 Zu Literatur und Entwicklung

Speziell zum abgehandelten Regler, insbesondere der getrennten Koordinatenbehandlung von Zeit und Anstieg für Verzug und Synchronisation, wurde keine Literatur gefunden. Die älteren eigenen Broschüren von geringerem Umfang gehen das Thema weniger umfassend an. Hinweise zu Entwürfen außerhalb des persönlichen Umfelds, die das offene, nicht determinierte Zusammenwirken von Stellgrößen- und Verzugsanpassung als unmittelbare Rückwirkung der Regelstrecke beinhalten, wurden gleichfalls nicht gefunden.

Die Motivation für die Entwicklung des Reglers war ursprünglich der Gedanke der Verbesserung eines bereits existierenden Konzepts mit einer dem Streckenverzug angepassten und fest eingestellten Abtastung, doch dadurch geringer Verzugsdynamik. Daneben einer Führungs- bzw. Sekundärfunktion und sukzessiv approximativer Stellwertadaption, jedoch ohne Synchronisation. Es ist beim DPMA unter der Veröffentlichungsnummer DE3743892C1 zu finden. Der Aufbau unterscheidet sich wesentlich von dem des Minimalen Zustandsreglers: Der fest eingestellte Graph einer exponentiellen Führungsfunktion dient der Steuerung der Regelabweichung. Die Stellwerterhöhung geschieht mit ganzzahliger Stufung, die bei gleichbleibender Änderungsrichtung steigt. Beim Wechsel von der Stellwerterhöhung zur Stellwertsenkung bzw. umgekehrt, beginnt die Stufung von vorne. Der Regeltakt ist gleichbleibend, der abbauende Regelabweichungszuwachs in der Ordinatenachse dagegen flexibel.

Die neue Zielsetzung war, eine Lösung für die Verzugsadaption zu finden. Woraus mit einer anderen Gestaltung schließlich nach mehreren Anläufen, der Minimale Zustandsregler hervorging. Der Autor verwendete hierzu u. a. die bereits vorhandene Hardware eines Temperaturmodells nebst Ansteuerungs-Interface, des bereits beim DPMA unter der erwähnten Patentnummer vorliegenden Reglers. Eine dafür mit einer realen Magnetregelstrecke abgestimmte Simulation, wurde zudem für die Versuche herangezogen. Das Gemeinsame der beiden Regler sind vor allem die Beweggründe ihrer Entstehung, Konzeptions- und Abgleichaufwand zu reduzieren.

Verwendete Unterstützungssoftware:

Zur Minimierung logischer Ausdrücke standen die zwei, unten kommentierten Programme zur Verfügung¹⁵. Beide sind unter Windows XP lauffähig, das unter neueren Betriebssystemen mit einer virtuellen Maschine (VM), alternativ ohne Netz gekapselt, leicht betrieben werden kann. Beide Programme verwenden das Quine-McCluskey-Verfahren (QMC). Wozu bei vielen Eingangsgrößen wegen potentieller Erhöhung der Antwortzeit, selbst mit aktuellen Rechnern nur Boole'sche Ausdrücke mit bis zu 14 *verschiedenen* Eingangsgrößen zu empfehlen sind.

¹⁵Beide im Heise (c't) Download, z. B. unter dem Stichwort „Quine“, zu finden.

1. **QMC334 von Martin Wieser in der Version 3.34**

beruhte in den Anfängen auf heuristischen Methoden. Später Verwendung des QMC-Verfahrens. Mit eingehender Programmhandhabung und deren Dokumentierung.

2. **Das eigene LOGIK253 in der Version 2.53**

ist noch ein selbstextrahierendes DOS-Programm, das im Konsolenfenster (CMD-Fenster) von Windows XP läuft. Trotz modularem Aufbau ist es nach zweckmäßiger Einführung sicherlich flüssig und überschaubar zu bedienen. Ein- und Ausgabe erfolgen in editierbaren und für sich ausdrückbaren Dateien im TXT-Format. Die Eingangsgrößen sind bewusst einstellig verwendet (die Namenskonvertierung von Eingangsgrößen längerer Bezeichnung in einstellige Buchstabengruppen, ist mit üblichen Textsystemen möglich), um Tabellen und Terme nach Art Boole'scher Algebra vorzugeben. Die Software ist für diffizile Anwendungen flüssig zu handhaben und gewählte tabellarische Ausgaben werden spaltengerecht und platzsparend angezeigt. Das Programm war ursprünglich für Praktiker gedacht und weist begleitende Texte zum Umgang mit logischen Ausdrücken auf. Eine ausgewiesene - aber für gewöhnlich nicht einschränkende - Begrenzung gibt es bei einer höheren Anzahl von verbleibenden Primimplikanten oder bei vielen Eingangsgrößen und wenig Kürzungsmöglichkeiten, die vornehmlich bei wenigen Verknüpfungsausdrücken auftreten. Man sollte sich nicht wundern, dass die Funktionsfähigkeit mit einem relativ niedrigen Speicherbedarf erhalten bleibt. Denn es kommt eine aufwändige QMC-Speicherbedarfsminimierung ohne Auslagerung zum Einsatz, die für Windows-Anwendungen im Regelfall unnötig ist und dort vermutlich gar nicht erst versucht wurde.

Anhang

Zur Ermittlung der Führungsfunktion

Ein Nachtrag zur Gewinnung der Führungsfunktion mit ihren Teilfunktionen, ohne besondere Aufbereitung. Dabei sind Formeln nach Darstellungsgesichtspunkten in eckigen Klammern zusammengefasst, bedingt durch die Vorgaben des Editors. Gegeben sind zwei Funktionen, die glatt ineinander übergehen sollen.

Gegeben sind die quadratische Funktion und die Funktion 4. Grades als formell zusammengefasste Teilausgangsfunktionen mit

$$\#1: \left[e01 = a \cdot t^2, e02 = a \cdot t^4 \right]$$

Weil vorab unbekannt ist, ob bei gleichem Faktor a, für beide Funktionen eine geeignete Lösung existiert und gegebenenfalls eine Relation zweier Faktoren zueinander besteht, erhält jetzt einfach, in aufbereitungskonformer Anordnung, die Funktion 4. Grades einen Divisor c mit

$$\#2: \left[e02 = \frac{a}{c} \cdot t^4, e01 = a \cdot t^2 \right]$$

A. Bestimmung einer ersten Führungsfunktion

Bei den zwei gesuchten Teilfunktionen müssen die Übergänge gleiche Steigungen haben, also ihre partiellen Ableitungen 1. Ordnung am Funktionsübergang Gleichheit aufweisen. Der Funktionsübergang liegt beim Abstand e0s, bei dem die Funktion 4. Grades endet. Für alle Ergebnisse sind nur die positiven und reellen Ausdrücke verwendet:

$$\#3: \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{a}{c} \cdot t^4 \right) = \frac{4 \cdot a \cdot t^3}{c}, \frac{d}{dt} (a \cdot t^2) = 2 \cdot a \cdot t \right]$$

Beide Ableitungen gleichgesetzt und nach t aufgelöst, ergibt die Zeitstelle t_ü bei gleicher Steigung und gemeinsamem Ursprung der Teilfunktionen mit

$$\#4: t = t_{\text{ü}} = \frac{\sqrt{2 \cdot c}}{2}$$

Bei beiden Teilfunktionen wird nun für deren Abstand $e0s$, t durch $tü$ substituiert, beginnend mit der Funktion 4. Grades, die eben da bei $tü$ und $e0s$, in die Quadratfunktion gleitend übergehen soll:

$$\#5: \left[e02_e0s = \frac{a}{c} \cdot t\ddot{u}^4 = \frac{a}{c} \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{c}}{2} \right)^4 = \frac{a \cdot c}{4}, e01_e0s = a \cdot t\ddot{u}^2 = a \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{c}}{2} \right)^2 = \frac{a \cdot c}{2} \right]$$

Zur Erlangung der Bündigkeit muss die Quadratfunktion um die Differenz $diff = e01_e0s - e02_e0s$ verschoben werden:

$$\#6: diff = e01_e0s - e02_e0s = \frac{a \cdot c}{2} - \frac{a \cdot c}{4} = \frac{a \cdot c}{4}$$

Zum nahtlosen Übergang gelten dann allgemein bei verbleibender Funktion 4. Grades und verschobener Quadratfunktion mit "e01 = $a \cdot t^2 - diff$ ", die Ausdrücke

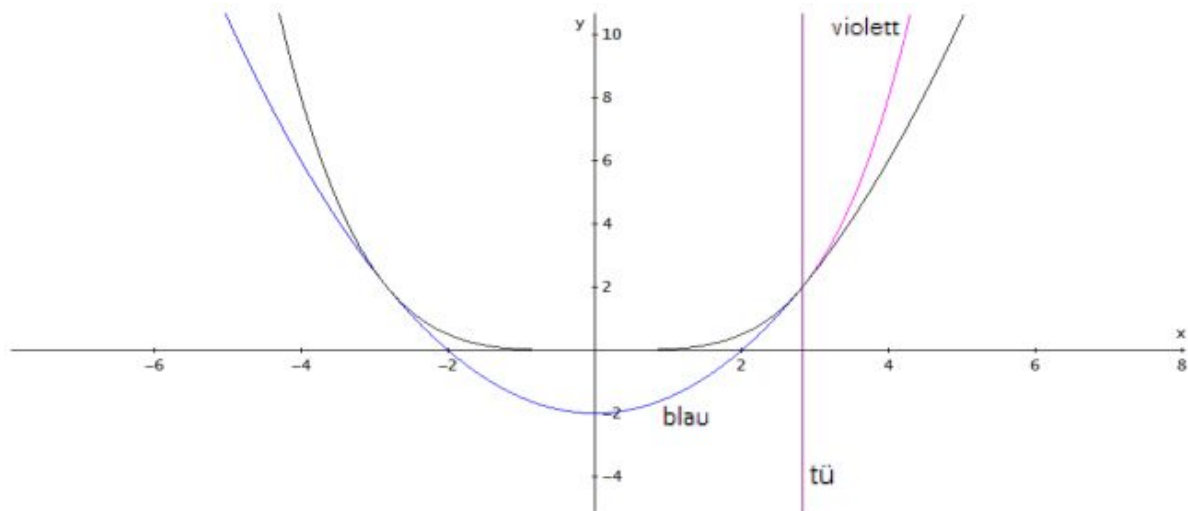
$$\#7: \left[e02 = \frac{a}{c} \cdot t^4, e01 = a \cdot t^2 - \frac{a \cdot c}{4} = a \cdot \left(t^2 - \frac{c}{4} \right) \right]$$

Um die Führungsfunktion mit dem Abstand $e0s$ anzugeben, werden noch die Übergangsstelle $e02_e0s$ ($e02 = e0s$) aus #5 und $tü$ aus #4 substituiert und der Term nach c aufgelöst. Ansatz und Lösung sind

$$\#8: \left[e0s = \frac{a}{c} \cdot t\ddot{u}^4, c = \frac{4 \cdot e0s}{a} \right]$$

Die Übergangsstelle $tü$ in #8 laut #4 und dann das gewonnene c in #7 substituiert, ergibt schließlich für die durchgehende graphische Darstellung mit der Übergangsstelle $e0s$ bei $tü$ (violett = Funktion 4. Grades, blau = Quadratfunktion und schwarz = die beiden Teilfunktionen durchgehend, bei $e0s = 2$ und $a = 0.5$):

$$\#9: IF \left(t \leq \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{e0s}{a}}, \frac{\left(\frac{a \cdot t^2}{2} \right)^2}{e0s}, a \cdot t^2 - e0s \right)$$



B. Die eigentliche Führungsfunktion

Die unter Punkt A gewonnene Führungsfunktion hat den Nachteil, dass der Übergangsknick der Teilfunktionen schärfer wird und dazu der Anstieg der Quadratfunktion zu steil erscheint. Gewünscht wäre aber ein sanfter Übergang, damit die Führungsfunktion bei ihrer Krümmung möglichst genau eingehalten werden kann. Deshalb ist nun eine gefälligere Führungsfunktion gesucht. Es sind nur positive und reelle Lösungen herangezogen. Die Ausgangsfunktionen #1 und #2 bleiben gleich.

Gewünscht ist im Gegensatz zum Punkt A eine weitere Zeitstelle als Funktionsübergang. So gibt es für #2 bei der partiellen Ableitung 1. Ordnung nach #3 für jede Steigung eine Zeitstelle t , also zwei Alternativen. Für die 2. Ordnung gibt es nach #10 nur einen einzigen Parameter t . Es soll nun dieser Parameter t als eine gemeinsame Zeitstelle für beide Ordnungen genutzt werden, um die unbekannte 2. Zeitstelle t für die 1. Ordnung, als Fortsetzungspunkt der Teilquadratfunktion, zu erhalten. Da die 1. Ableitung der Teilquadratfunktion linear ist, wird die Steigung der 1. Ableitung jeder Stelle ihrer Stammfunktion genügen und damit bei Verschiebung auch ihrer Steigung bei der Zeitstelle t der Funktion 4. Grades. Das Gleiche gilt für die Steigung der 2. Ordnung. Bei der Zeitstelle t treffen also die partiellen Ableitungen 1. und 2. Ordnung der beiden Teilfunktionen zusammen. Die zweiten Ableitungen aus #2 lauten

$$\#10: \left[\left(\frac{d}{dt} \right)^2 \left(\frac{a}{c} \cdot t^4 \right) = \frac{12 \cdot a \cdot t^2}{c}, \left(\frac{d}{dt} \right)^2 (a \cdot t^2) = 2 \cdot a \right]$$

Beide Steigungen gleichgesetzt und nach t aufgelöst, ergibt die Zeitstelle $t_{üe02}$ für die Teilfunktion 4. Grades mit

$$\#11: t = t_{üe02} = \frac{\sqrt{6 \cdot c}}{6}$$

Die Teilfunktion 4. Grades behält ihren Nullursprung bei. Sie endet bei der in #11 festgeschriebenen Zeitstelle $t_{üe02}$ beim Abstand $e0s$. Gesucht ist nun für die Teilquadratfunktion die Zeitstelle t_{e01} , bei der die Steigung (1. Ableitung) mit derjenigen der Teilfunktion 4. Grades in Höhe von $e0s$ bei $t_{üe02}$, gleich ist. Bei den 1. Ableitungen bleiben deshalb beide Zeitstellen t erhalten mit

$$\#12: \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{a}{c} \cdot t_{ü}^4 \right) = \frac{4 \cdot a \cdot t_{üe02}^3}{c}, \frac{d}{dt} (a \cdot t^2) = 2 \cdot a \cdot t_{e01} \right]$$

Beide Steigungen gleichgesetzt und nach t_{e01} aufgelöst, ergibt die Zeitstelle t_{e01} bei dem zu verschiebenden Zeit-Anschlusspunkt der Teilquadratfunktion. Wobei jetzt der Ursprung beider Funktionen noch

gleich ist. Die Zeitstelle $t_{ü_e02}$ verbleibt nach wie vor für den Abstand $e0s$. Nach Substitution von $t_{ü_e02}$ durch #11, ist die Lösung

$$\#13: t_{e01} = \frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{18}$$

Nun muss die Teilquadratfunktion zur Teilfunktion 4. Grades hin derart verschoben werden, dass ihre gleichen Steigungen beim Abstand $e0s$ (mithilfe c) der verbleibenden Teilfunktion 4. Grades, zusammenfallen. Ihre Differenz t_diff auf der Zeitachse beträgt

$$\#14: t_diff = t_{ü_e02} - t_{e01} = \frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{6} - \frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{18} = \frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{9}$$

Die Funktionswerte selbst sind ebenfalls einzubeziehen. Deren Differenz f_diff wird mit den Teilfunktionen #2 ermittelt, durch Substitution von t durch die Zeitstellen. Für f_diff gilt damit

$$\#15: f_diff = \frac{a}{c} \cdot t_{ü_e02}^4 - a \cdot t_{e01}^2 = \frac{a}{c} \cdot \left(\frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{6} \right)^4 - a \cdot \left(\frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{18} \right)^2 = \frac{a \cdot c}{108}$$

Die zu verschiebende Teilquadratfunktion wird nun um ihre Verschiebungsparameter t_diff und f_diff erweitert, zur Erlangung der Bündigkeit mit der Funktion 4. Grades:

$$\#16: e01 = a \cdot (t - t_diff)^2 + f_diff$$

Zusammengestellt ergibt das mit dem Funktionsübergang $t = t_{ü_e02}$ beim Abstand $e0s$, für die beiden Teilfunktionen bei durchgehender graphischer Darstellung, die gesplittete Führungsfunktion

$$\#17: IF \left(t \leq \frac{\sqrt{6} \cdot \sqrt{c}}{6}, \frac{a}{c} \cdot t^4, a \cdot \left(t^2 - \frac{2 \cdot \sqrt{6} \cdot \sqrt{c} \cdot t}{9} + \frac{c}{12} \right) \right)$$

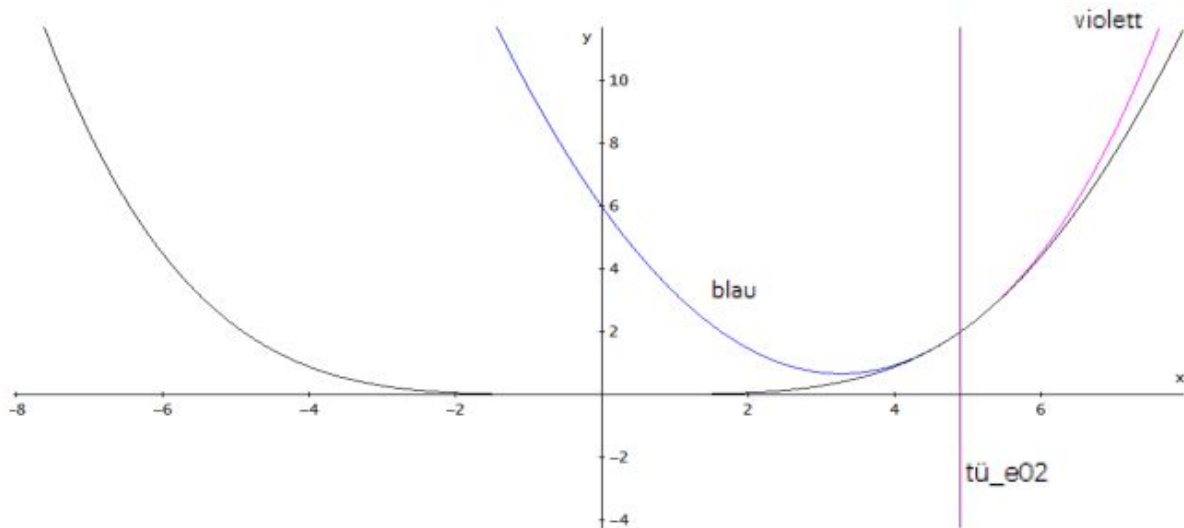
Anstatt der Konstanten c , soll nun noch der Bezug zum Abstand $e0s$, als End- und Übergangswert der Funktion 4. Grades gegeben sein. Für den Abstand $e0s$ und substituiertem $t_{ü_e02}$ gilt für Ansatz und Lösung

$$\#18: \left[e0s = \frac{a}{c} \cdot t_{ü_e02}^4, c = \frac{36 \cdot e0s}{a} \right]$$

Wenn c in #17 substituiert ist, ergibt sich für die durchgehende Funktionsdarstellung beim Abstand $e0s$ und Funktionsübergang $t_{ü_e02}$

$$\#19: IF \left(t \leq \frac{\sqrt{(6 \cdot e0s)}}{\sqrt{a}}, \frac{\left(\frac{a \cdot t^2}{6} \right)^2}{e0s}, a \cdot t^2 - \frac{4 \cdot \sqrt{(6 \cdot e0s)}}{3} \cdot \sqrt{a} \cdot t + 3 \cdot e0s \right)$$

Die graphische Darstellung dazu (violett = Funktion 4. Grades, blau = Quadratfunktion und schwarz = die beiden Teilfunktionen durchgehend, bei $e_0s = 2$ und $a = 0.5$) ist schließlich, mit einem tatsächlich gefälligeren Übergang der Teilfunktionen gegenüber #9:



Stichwortverzeichnis

A

Abgleich, 36
Ableitung, 18, 25, 68
Abszisse, 10, 36
Abtastung, 14, 17, 89, 90, 93, 110
Abtastzeit, 22, 45, 65
Adaption, 13
Anregelzeit, 3, 27, 28, 34, 40, 43, 51, 53, 54, 59, 61, 63–66, 69, 73, 75, 76, 86, 91, 92, 95, 106
 minimale, 44, 54, 62, 63, 73, 74
Anregung
 beständige, 12, 16, 30, 35, 55, 59, 63, 64, 72, 74
 einfache, 35, 63, 65
 erhöhte, 25, 30, 34, 35, 63, 65
 Faktor *anf*, 34–36, 54, 64, 73, 74, 96
 Faktor *yfak*, 54, 94
 Formen zur Unterscheidung, 35
 Start, 35, 42–44, 63, 64, 68, 69, 73, 75, 76
 yhstf, 94
 yhstr, 94
 verstärkte, 35, 54, 55, 60, 63, 65, 67, 71, 73, 74, 80, 92–95, 97
 Unterschiede, 55
Anstiegsachse, 33, 50
Anstiegszeit, 3
Arbeitsprodukt, 33, 38, 42, 44–46, 50, 56, 60, 70, 72–75, 81, 93, 106
Ausgleichszeit T_g , 23, 25, 65
Ausregelzeit, 60, 63, 65, 75, 91

D

Dämpfung, 13, 30, 47, 49, 59, 90, 91

E

Eckwert, 44, 72
 oberer, 11, 24, 27, 44–46, 67–69, 71–74, 81, 91
 unterer, 27, 44, 51, 68, 75
Einsatzbreite, 38
Einstellparameter, 45, 66, 93

F

Fallelement, 32
Feinabstimmung, 50, 69
Folgefähigkeit, 25
Führungsfunktion, 7, 10, 14, 15, 17, 18, 20–25, 28, 33, 38, 43, 45, 47, 49, 57, 65, 67, 77, 79, 82, 92
 Extrapolationsfehler, 19, 22, 23, 29
 geteilte, 18–20
 Graph, 17, 22, 24, 29, 30, 42, 43, 61, 63, 65, 71, 81, 110
 Nullstelle, 7, 17–19, 22, 23, 29, 73
 steuernde, 31, 35, 49, 57, 61, 62, 80–82
Führungsgröße, 18, 19, 22–25, 27, 43, 63, 65, 67, 69, 73, 75, 82, 88, 95
 Änderung, 34, 43, 81
 Bereich, 50, 86
Funktionsdarstellung
 geschlossene, 36

G

Gewichtsfaktor, 36, 42

Gewichtung, 40

Glättung, 89

Messwerte, 8, 89–91, 96

Signal, 23, 89, 91

Grenzwertigkeit, 27, 44, 61, 63, 64, 83

Grundtakt, 12, 24, 38, 40, 44–46, 48–50,
55, 59, 65, 67, 70, 72, 74, 89, 91,
93, 95, 106

H

Hilfsterm, 32

K

Komparator, 17, 22, 28, 31, 32, 38, 49, 51,
62, 80, 81, 89, 96

Konstante, 14, 44, 45, 93, 94, 96, 97

Kontrolle, 59

Koordinaten, 10

Krümmung, 24, 25, 28, 30, 43, 71, 77

M

Mehrgrößenregelung, 82, 107

Messwertestreuung, 23, 28, 34, 38, 50, 65,
106

Mittelwert, 30, 31, 36, 42, 47, 51, 61, 63,
64, 76, 77, 80, 86, 96
gleitender, 30, 31, 89
Trägheit, 62

N

Nullabsenkung, 38, 40, 89, 94, 97

Nullstelle, *siehe* Führungsfunktion

O

Ordinate, 10, 36

P

Phasenverschiebung, 18, 48, 49, 91

Positionierung, 36, 76, 77

Q

Quadratfunktion, 18, 19, 21, 25, 67

R

Rahmenabtastung, 16, 18, 20–24, 26, 27,
30, 31, 33, 35, 38, 44–49, 51, 53,
61, 62, 77, 81, 82, 91, 95

Unterbrechung, 53, 95

Randregelstrecke, 11, 44, 47, 66, 68, 72,
73

Referenzgröße, 15, 16, 29, 31, 47

Regelabweichung, 7, 10, 14, 15, 17–20, 22,
23, 28, 32, 34, 35, 37, 38, 43, 46,
49, 50, 56, 57, 61, 63–65, 67, 77,
81, 86, 88, 94, 110

Ausschläge, 34

bleibende, 64

Schwelle, 34

e0ffix, 51, 52, 92, 96

e0ns, 53, 65, 86, 91, 95

e0s, 18, 19, 21, 25, 34, 95, 96

e0s Taktunterbrechung, 53

esp, 42, 43, 96

Zuwachs, 15, 17, 21, 27, 30, 33, 34, 36,
42, 45, 46, 50, 57, 64, 65, 69, 72,
73, 75, 77, 82, 84, 95, 96

Regelbarkeit, 23, 65, 93

Regeldifferenz, *siehe* Regelabweichung

Regelgesetz, 8, 14, 24, 36, 65, 77

Regelgröße, 18, 23, 25, 28, 32, 37, 43, 50,
54, 55, 63–65, 69, 73, 75, 82, 83,
89, 91, 92, 96

Anstieg, 24, 46, 63, 90

Steifigkeit, 95

Zuwachs, 27, 28, 77

Regelkreis, 8, 23, 45, 84

Regelrichtung, 40, 74, 82, 97

Regelstrecke, 7, 14, 17, 23, 24, 27, 45, 49,
66, 81

Bereich, 68, 70

Menge von, 44, 75

Speicher, 36, 38, 40, 82, 89, 90, 95, 97

Speicherwirkung, 38, 91, 97

verzögerungsarme, 36, 43, 72, 82, 89, 90, 95
 Verzug, 7, 17, 18, 22, 25, 27, 28, 30, 34, 37, 43, 46, 49, 57, 61, 63, 64, 68, 70, 73, 74, 81
 effektiver, 62, 63
 Verzugsbereich, 27
 Regeltakt, 18, 22, 33, 77, 81
 Regler, 14, 18, 28, 49
 Adaption, 86
 Einstellung, 24, 66, 77, 81
 Konzept, 3, 7, 14, 28, 46, 65, 110
 Konzipierung, 23
 Verhalten, 82, 91
 Regressionskoeffizient, 90
 Restterm, 21
 Robustheit, 23, 50, 63
 Kriterium, 22, 86
 nach Punkt III, 23, 50
 Rück-, Zurückführung, 18, 50, 62, 64
 Rundungsfehler, 48

S

Sekundärfunktion, 110
 signum, 21, 94
 Simulation, 65, 106
 Sprungantwort, 24, 60, 65–67, 77, 81, 92
 Stabilität, 23, 33, 46, 49, 65, 81
 Kriterien, 22, 23, 86
 nach Punkt I, 22, 33, 46
 nach Punkt II, 22, 49
 Regelkreis, 23
 Startanregung, *siehe* Anregung
 Steifigkeit, 30, 39
 Steigung, 15, 22, 23, 25, 43, 50, 53, 62, 65, 67
 Steigungsindikator, 10, 16–18, 21–24, 28–30, 35, 42–47, 49, 63–65, 74, 77, 80, 87, 92, 96
 fester, 76, 77
 größter, 11, 12, 44, 47, 55, 59, 60, 64, 67, 73, 87, 91, 93, 106

kleinster, *siehe auch* Eckwert, unterer, 60
 substituierter, 77
 Vergleichs, 29–31, 47, 57, 61, 64, 74, 76, 80
 Steigungsmaßzahl, 15–17, 28, 44
 Stellglied, 18, 36, 82
 Stellgröße, 10, 17, 18, 23, 26–28, 38, 43, 61, 63, 64, 75, 81, 82, 91, 110
 Änderung, 22, 49, 77
 Auswirkung, 27, 49
 Verlauf, 36
 Zuwachs, 43
 Stellwert, 13, 14, 28, 32, 34, 35, 37, 38, 42, 44, 61, 63–65, 73, 76, 77, 83, 86, 88, 91, 92, 95, 110
 maximaler, 36–38, 43, 67, 96
 minimaler, 40
 Nachführung, 13, 17, 33, 58, 65
 Reserve, 41
 Skalierung, 36, 38, 40, 42, 72, 94, 96
 Stufung, 38
 Zuwachs, 16, 22, 28–36, 42, 46, 50, 54, 58, 62–65, 73, 74, 81, 96, 97
 minimaler, 36
 Störgröße, 27, 34, 37, 43, 53, 65, 75, 77, 82
 Streckenverstärkungspotential, 33, 36, 81, 96
 Summierung, 33, 35, 37, 97
 Synchronisation, 16, 17, 28, 29, 33, 35, 42, 47, 81
 Ablauf, 58
 Abweichung, 21, 33, 46

T

Taktfaktor, 15, 22, 47, 49, 51, 61, 74, 75, 81, 92, 95, 106
 Begrenzung, 50, 51, 60, 76
 maximaler, 94

U

Überlauf, 73

Überschwingweite, 13, 33, 43, 54, 63, 64,
69, 73–75, 91, 94

V

Verankerung, 57

Verharren, 37, 63, 65

Verlaufskontrolle, 14, 24, 43, 85

Verzug, *siehe* Regelstreckenverzug

Verzugsanpassung, 15, 50, 69, 79, 110

Verzugszeit T_u , 23, 25, 44, 62, 65

Vorzeichen, 29–33, 35, 37, 38, 61, 81, 96,
97

Faktor, 32, 50, 58, 96

W

Wechselwirkung, 16

Wendepunkt, 24

Wendetangente, 67

Windup, 37

Wurzelwert, 18–20

Z

zackenartig, 42, 64, 91, 92

Zeitachse, 33, 50

Zurückführung, *siehe* Rückführung

Zweipunkt-Schaltbetrieb, 38, 94, 97