

Regelung

In der Automatisierungspraxis sind über die eigentlichen Regelungsfunktionen hinaus die Kenntnis besondere Funktionalitäten erforderlich. Diese werden hier erklärt.

Inhalt:	Seite:
1 Definition	1
2 Unterscheidungsmerkmale	
2.1 Reglertypen	1
2.2 Stetiger Regler / Abtastregler	2
2.3 Stellgliedansteuerung (Proportional - / Schrittregler)	2
2.4 Realtime / Prädiktive Regelung	2
2.5 Hardware - Ausführung	3
3 Struktur	
3.1 Leitebenen	4
3.2 Kaskaden	4
3.3 Störgrößenaufschaltung	4
4 Methoden	
4.1 Betriebsarten HAND / AUTO	5
4.2 Abgleichmaßnahmen	6
4.3 Parameter - Umschaltung	7
4.4 Regler - Struktur - Umschaltung	7
4.5 Stellbereichs - Splitting	7
4.6 Autotuning	8
5 Signaldefinition und -Bereich	8
6 Fortgeschrittene Regelungsverfahren	
6.1 Übersicht	9
6.2 Beispiel: prädiktive Regelung	10
6.3 Beispiel: adaptive Regelung	11
6.4 Beispiel: Iterativ lernende Regelung (ILR)	12
Literaturangaben zu 6:	12

1 Definition

"Das **Regeln**, die **Regelung**, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfaßt, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der *geschlossene Wirkungsablauf*, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises *fortlaufend sich selbst beeinflusst*." (DIN IEC 60050)

Die Formelbuchstaben sind seit 2006-12 endlich international verbindlich festgelegt:

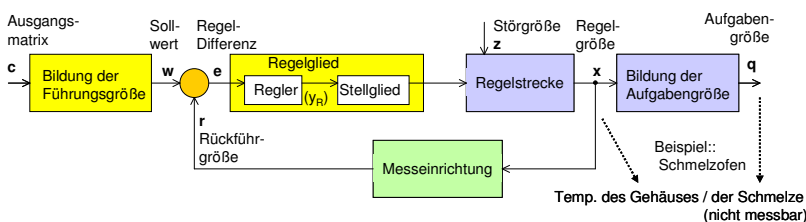


Bild 1.1: Formelbuchstaben Regelung u. Steuerung
Gemäß internationaler Norm IEC 60027-6

In Automatisierungssystemen geht es meist um viele Regelgrößen, die durch ein Netzwerk von Reglern geregelt werden (siehe "Struktur"). Die Gesamtheit der Regler in einem Automatisierungssystem wird "**Regelung**" genannt.

2. Unterscheidungsmerkmale

In Automatisierungssystemen sind folgende Unterscheidungen von Regelungen interessant:

2.1 Regelcharakteristik

Nach dem Verhalten von Reglern werden verschiedene Regel - Charakteristiken unterschieden wie "P", "PI", "PID" u.a. Die Kenntnis des Verhaltens und der Algorithmen wird aus den "Regelungstechnik" - Vorlesungen vorausgesetzt.

In Automatisierungssystemen werden meist Universal - Regler eingesetzt (PID), deren Verhalten durch Einstellen ihrer Parameter festgelegt wird. Bild 2.1 zeigt dies an einem Beispiel (PIDCONA aus ABB Advant AC400 series):

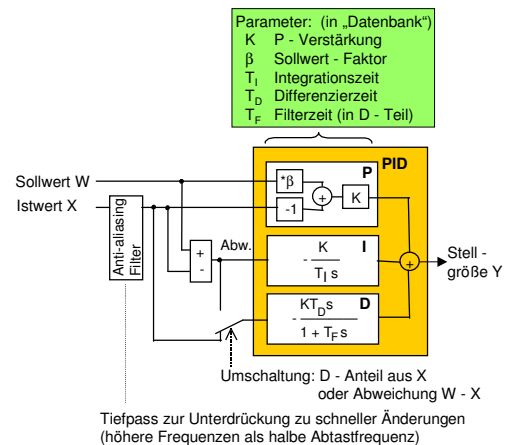


Bild 2.1: Regler - Parameter bei "Universalregler"

Werden dabei Parameter auf 0 gesetzt, so wird z.B. aus einem PID - Regler bei $T_D = 0$ ein PI - Regler. Bei einigen Produkten wird der dann nicht benötigte Teil des Programms nicht durchlaufen um Zykluszeit zu sparen.

2.2 Stetiger Regler / Abtastregler

Im strengen Sinne wird die oben zitierte Definition nur von solchen Reglern erfüllt, die ihre Regelgröße wirklich "stetig", d.h. fortwährend, unterbrechungsfrei erhalten. Das trifft eigentlich nur für verdrahtete Systeme (und FPGAs) zu.

Bei den heute üblichen Speicher - programmierten, sequenziell arbeitenden Automatisierungseinrichtungen wird der Regelalgorithmus immer nur nach einem Zyklus des Prozessors wieder berechnet. Eingangs- und Ausgangsgrößen benötigen Zeit zur Wandlung von analoger in digitale Darstellung und umgekehrt, und bei Bus - Übertragung kommen ggf. weitere Zeiten dazu. (Bild 2.2)

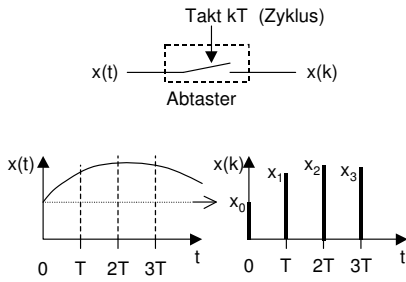


Bild 2.2: Abtastung einer kont. Zeit - Funktion $x(t)$

Solche "Abtastregler" werden zwar durch spezielle Algorithmen realisiert, können jedoch wie "normale" Regler benutzt werden, wenn die Abtastzeit klein genug ist gegenüber der möglichen Istwert - Änderung. Nach dem Shannon'schen Abtasttheorem ist Abtastung zulässig für Änderungen $< 0,5 f_T$ (mit $f_T = 1/T$). Daumenregel: Abtastfrequenz $> 10 \cdot$ System-Grenzfrequenz.

Für die Verfahrenstechnik trifft dies allgemein zu. Grobe Beispiele für Änderungszeiten:

- Drehzahl, Strom: ca. 1 .. 10 ms,
- Durchfluss, Druck: ca. 1 s,
- Niveau: ca. 5 s,
- Temperatur: über 20 s.

2.3 Stellglied - Ansteuerung (Bild 2.3.1)

Erhält ein Stellglied seine Stellgröße vom Regler als Analogwert (intern meist digitalisiert), so spricht man von einem "**Proportional - Ausgang**". Das Stellglied muss dann selbst "positionieren", d.h. seine Position auf die Stellgröße einstellen, z.B. mit Hilfe eines elektro - hydraulischen Wandlers, ggf. mit Stellungs-Rückführung als Stellungsregler.

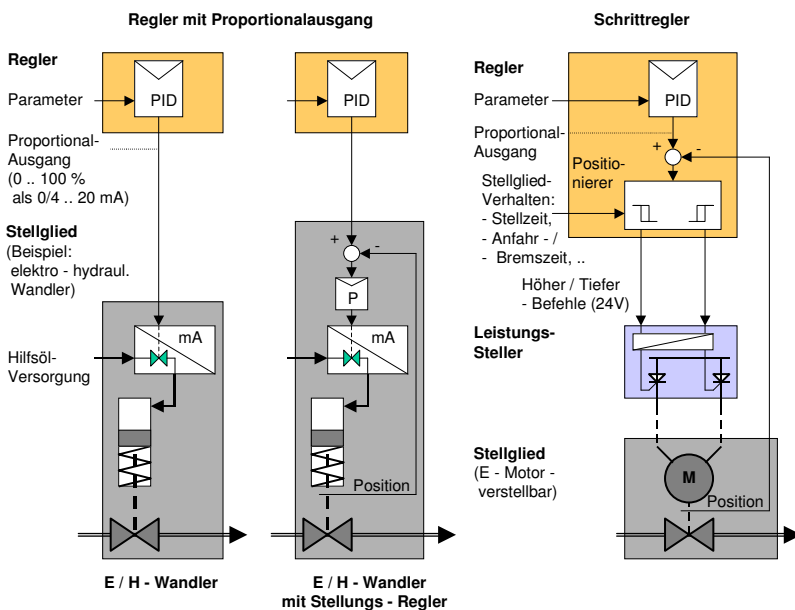


Bild 2.3.1: Stellglied - Ansteuerungen

Wird ein Stellglied durch einen Elektromotor ver-stellt, so benötigt dieser Höher - / Tiefer - Befehle, die anhand der Stellglied - Daten genau "dosiert" werden müssen ("Inkremente"). Ein Regler, der solche Befehle ausgibt, wird "**Schrittregler**" genannt, die Ausgabe "**Inkremental - Ausgabe**". Meist gibt es drei Zustände: Höher - Befehl / Tiefer - Befehl / kein Befehl, daher auch die Bezeichnung "**Drei - Punkt - Schrittregler**".

Ein Schrittregler kann aus einem Regler mit Proportional - Ausgang durch Nachschalten eines "Positionierers" (mit Stellungs - Rückführung) gebildet werden.

Hier geht die Zykluszeit der Automatisierungseinrichtung besonders stark in die Regelgüte mit ein, denn ein Befehl kann nur das Ein - oder Mehrfache der Prozessor - Zykluszeit lang sein. Zu hohe Zykluszeit bewirkt durch zu lange Befehle Überschwingungen.

Die Art der Stellglied - Ansteuerung beeinflusst auch das Verhalten bei einer Störung des Reglers, z.B. bei Ausfall der Elektronik - Spannung.

Das proportional angesteuerte Stellglied geht - ohne besondere Maßnahmen - in Ruhestellung (0 / 4 mA, d.h. meist geschlossen), der Prozess wird beeinflusst (gestört oder abgefahren).

Das durch E - Motor verstellte Stellglied verharrt in seiner Stellung, so dass der Prozess zunächst mit den letzten Werten weiter in Betrieb bleibt.

2.4 Konventionelle / Modell - basierte Regelung

Ein konventioneller Regler erhält fortlaufend aktuell seine Regelgröße, und bildet nur aus dieser und ggf. einer Störgröße jeweils neu seine Stellgröße mit der Hilfe fester Parameter. "Erfahrungen" aus der Vergangenheit werden nicht automatisch verwendet.

Neuere Regelverfahren, die erst durch Einsatz von genügend Rechnerleistung möglich wurden, benutzen mathematische Streckenmodelle, in denen das Prozessverhalten vorgegeben ist (prädiktive Regelung) oder die anhand des Streckenverhaltens aktualisiert werden (adaptive Regelung), oder die Werteverläufe (Trajektorien) enthalten und optimieren (iterative Verfahren). Aus den Modellen wird dann das optimale Reglerverhalten bzw. der Stellgrößenverlauf abgeleitet (siehe Kap. 6)

2.5 HW - Ausführung

Regler werden in der Praxis der Automatisierung ausgeführt als

- „**Kompakt - Regler**“ (alles in einem Gehäuse),
- „**Systemregler**“ (modulare Geräte), oder
- „**Dezentrale Regler**“ (in Stellglieder integriert).

„**Kompakt - Regler**“ bedeutet, dass Messwert- erfassung, Regelung (Verarbeitung), Signalausgabe sowie Anzeige und Bedienung in einem Gehäuse untergebracht sind.

Früher wurden Kompaktregler auf der Basis von Messgeräten oder mechanischen Schreibern gebaut. Heutige Kompaktregler arbeiten digital und haben LCD- Anzeigen (Bilder 2.5.1 und 2.5.2). Ihre Features sind:

- umfassende, typengeprüfte Funktionsbaustein- bibliotheken,
 - einfache Konfiguration (statt Programmierung),
 - Selbstoptimierung, adaptive Regelalgorithmen,
 - PC-basierte Sim.-Programme anschließbar,
 - einfache vor-Ort- Bedienung und –Anzeige,
 - universelle Ein/Ausgänge, modular erweiterbar,
 - ser. Schnittstellen (RS485, Profibus, Interbus, CAN
- Bei kompakten Anwendungen halten Kompaktregler ca. 70% Marktanteil, Kosten: ab 300 €

Mit „**Systemregler**“ sind Realisierungen von Regelungsaufgaben in SPS / PLS gemeint. Sie bestehen aus Verarbeitung als Unterprogramme in den SPS/PLS - CPUs und Kanälen deren Ein- / Ausgabegeräte (Bild 2.5.3). Bedienung und Beobachtung erfolgen über die MMK – Komponenten von SPS / PLS. Features:

- Umfangreiche Funktionsbausteinbibliothek (bei manchen Systemen allerdings für Mehrkosten),
- Komfortable Konfiguration durch das SPS/PLS – Engineeringtool,
- leichte Verknüpfung zu anderen Funktionalitäten (übergeordnete Steuerungen und Regelungen, Kommunikation).

„**Dezentrale Regler**“ (auch „**Prozess – nahe Regler**“ genannt) sind in den Prozess ausgelagerte Einzelgrößen- regler. Sie sind in den CPUs „intelligenter“ RIOs (Remote I/O) realisiert oder in intelligenten Feldbusgeräten wie Stellantrieben, die z.B. Regelung, Leistungsteil, Antrieb und Ventil in einem Gehäuse enthalten (Bild 2.5.4).

Vorteile dieser dezentralen Struktur:

- Hohe Verfügbarkeit bei Prozessredundanz,
- selektive Inbetriebnahme und Wartung,
- Entlastung der übergeordneten SPS / PLS (Zyklus, Speicher),
- Entlastung der Feldbusse (weniger zeitkritische Telegramme),



Bild 2.5.1: Digitaler Kompaktregler (Metrawatt), Außen - Ansicht

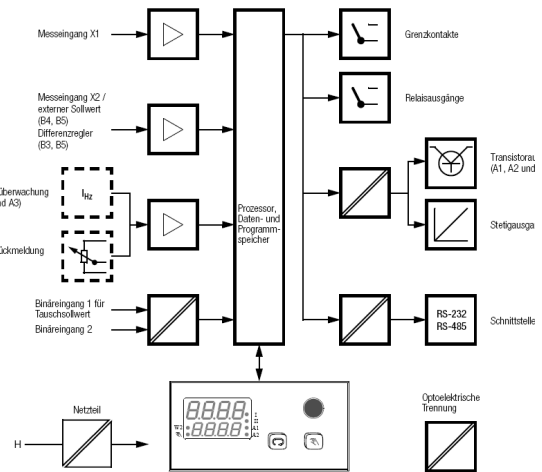


Bild 2.5.2: Digitaler Kompaktregler (Metrawatt), Blockschaltbild

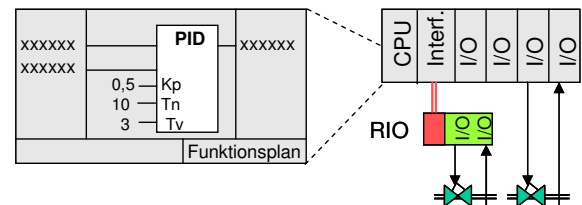


Bild 2.5.3: Systemregler in SPS / PLS

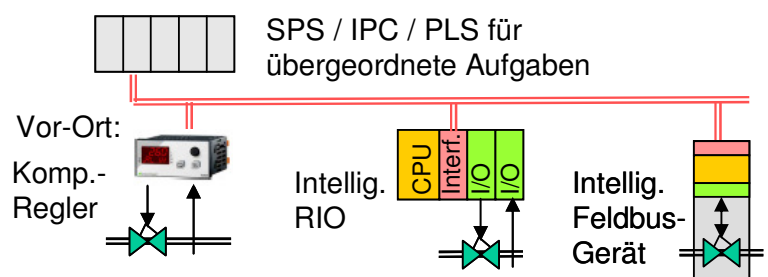


Bild 2.5.4: Dezentrale Regler

- weniger Verkabelungsaufwand (nur Leitungen für Energie - Zufuhr und Feldbus - Anschluss nötig),
- Platz - Einsparung in zentralen Elektronikräumen,
- mehr Informationen über Feldgeräte verfügbar (z.B. Stellglieder), da diese in integrierten Geräten billiger auf den Feldbus gebracht werden können.

3. Struktur

3.1 Leitebenen

In umfangreichen Anlagen müssen meist viele Einzelgrößen so geregelt werden, dass die Gesamtanlage ihre jeweilige Aufgabe erfüllt. Dazu ist auch in der Regelung eine Unterteilung der Gesamtaufgabe in möglichst kleine, überschaubare Teilaufgaben in einer hierarchischen Struktur sinnvoll. Dadurch ergeben sich folgende Vorteile:

- kleine, übersichtliche Teilprogramme auch in den höheren Ebenen,
- Im Bedarfsfall (z.B. bei Störung) Bediener - Eingriff auf allen Ebenen möglich, ggf. mit Vorrang.

Bei Automatisierungseinseln:

- keine gegenseitige Störungen - Beeinflussung,
- wenig Signalaustausch mit anderen Inseln.

Bei Anlagen - Redundanz und entsprechend getrennter Hardware:

- höhere Verfügbarkeit.

Bild 3.1.1 zeigt mit der stark vereinfachten Dampferzeuger - Regelung ein Beispiel aus der Kraftwerksleittechnik. In der obersten Ebene befindet sich die Anlagen - (Block-) Regelung (z.B. Frequenz / Leistungsregelung der Turbogruppe), die der Dampferzeuger - Regelung in der Gruppenebene die Leistung als Sollwert vorgibt. Diese Regelung gibt wiederum den Einzelgrößen - Regelungen für Frischluft, Feuerleistung und Feuerraum - Druck deren Sollwerte vor, und zwar über Anpassungen (Bewertung, Zeitverhalten). In Prozess - und Gruppenleitebene geht es hier also um Sollwertführung, erst in der Einzelleitebene erfolgen Eingriffe in den Prozess.

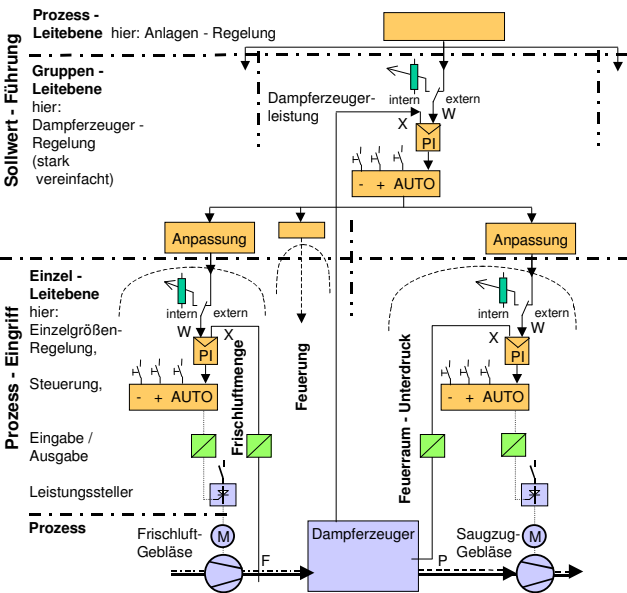


Bild 3.1.1: Leitebenen in der Regelung

Die Bedienung kann verschieden realisiert werden. Im Beispiel kann der Bediener in Gruppen - und Einzelleitebene:

- auf HAND schalten, das heißt einen Sollwert an den untergeordneten Regler bzw. die Stellgröße an das Stellglied von Hand vorgeben,

- in AUTOMATIK einen "internen" Sollwert vorgeben (unabhängig vom Sollwert der höheren Ebene),
- in AUTOMATIK den "externen" Sollwert der höheren Ebene benutzen.

Für einen vollautomatischen Betrieb muss die dritte Betriebsart gewählt werden.

Querverbindungen auf einer Ebene werden kaum benötigt.

3.2 Kaskaden

In vielen Fällen ist eine Hintereinanderschaltung von zwei oder mehreren Reglern zu einer "Kaskade" sinnvoll um die Regelgüte zu verbessern. (Kaskade: Ausgang eines Reglers ist Sollwert für den folgenden). Dies kommt hauptsächlich in der Einzelleitebene vor, manchmal jedoch auch in höheren Ebenen.

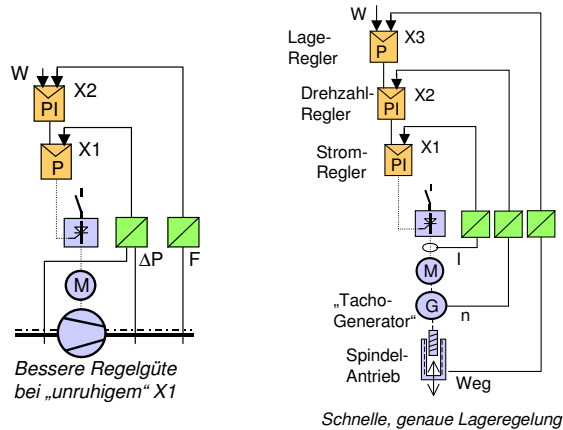


Bild 3.2.1: Regler - Kaskaden, Beispiele

Bild 3.2.1 zeigt links eine Durchfluss - Regelung (F) mit einem PI - Regler, dem ein P - Regler für die Druckdifferenz ΔP unterlagert ist. Bei "unruhigem" ΔP (durch Prozess - Störungen) kann der P - Regler schnell reagieren, und längerfristig kann der PI - Regler genau ausregeln. Dadurch ergibt sich eine bessere Regelgüte.

Rechts ist eine Lageregelung dargestellt. Hier sorgt der übergeordnete P - Regler für eine schnelle Einstellung der gewünschten Lage. Ist sie erreicht, so wird keine Drehzahl mehr benötigt, der Ausgang kann auf 0 gehen (keine bleibende P - Abweichung). Die untergeordneten PI - Regler sorgen für genaues Anfahren der Position, ohne dass ein zu hoher Strom auftritt.

3.3 Störgrößenaufschaltung

Verbesserung der Regelgüte durch Einbeziehung von Störungen vor deren Auswirkung, z.B. Veränderung der Einspritzwassermenge durch die Prozessleistung ohne PI-Verhalten (schneller), so dass sich nicht erst die Austrittstemperatur ändern muss damit der Regler eingreifen kann. Bei Optimierung kann so eine Abweichung vermieden werden.

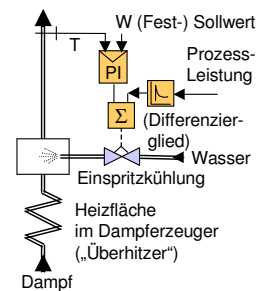


Bild 3.3.1: Störgrößenaufschaltung

4 Methoden

4.1 HAND / AUTOMATIK

Auch für die Regelung gilt in Automatisierungssystemen, dass im Bedarfsfall (z.B. Störung) automatische Abläufe / Eingriffe abschaltbar sein müssen. Ausserdem muss der Bediener von Hand eingreifen können um Stellglieder zuverfahren sowie Sollwerte zu ändern. Die Definitionen laut Norm sind im Teil "Steuerung" angegeben (DIN IEC 60050-351).

Die Ausführung einer HAND / AUTO - Umschaltung ist abhängig von der Art des Reglerausgangs wie im Kapitel "Unterscheidungsmerkmale" gezeigt.

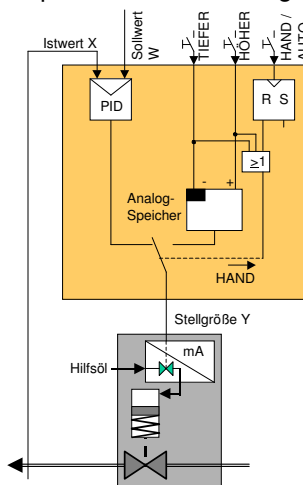


Bild 4.1.1: HAND/AUTO bei Proportionalausgang

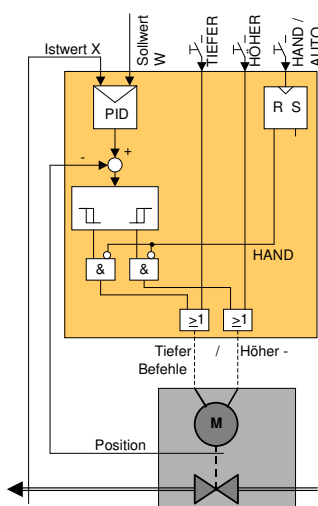


Bild 4.1.2: HAND/AUTO beim Schrittregler

In der Kraftwerksleittechnik kann der Bediener immer eingreifen, der Regler jedoch nur in Betriebsart AUTO.

Bei einem Proportionalausgang muss auch im Hand - Betrieb dauernd eine Stellgröße ausgegeben und ggf. von Hand verändert werden. Dazu ist ein Analogwert - Speicher nötig (tatsächlich heute: digitales Register), der von Hand verstellt wird und auf den in Betriebsart HAND umgeschaltet wird wie in Bild 4.1.1 gezeigt.

Bei einem Schrittregler (Bild 4.1.2) werden ja schon Höher / Tiefer - Befehle erzeugt, die im HAND - Betrieb einfach vom Bediener gegeben werden können.

In beiden Fällen kann die HAND / AUTO - Umschaltung jedoch verschieden ausgeführt sein:

In Industrieanlagen allgemein ist eine echte Umschaltung üblich: entweder der Bediener (HAND) oder der Regler (AUTO) verstellt das Stellglied.

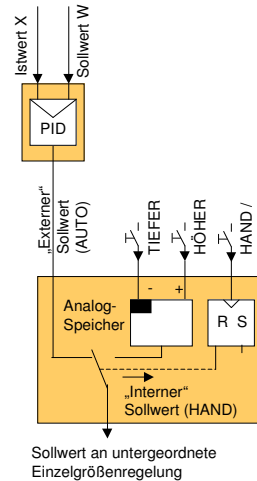


Bild 4.1.3: HAND / AUTO bei Sollwertführung

Als Sollwert kann ein Wert von einer übergeordneten Regelung verwendet werden ("extern") oder der Bediener soll einen Sollwert durch Tasten vorgeben können ("intern"), die einen Analogwertspeicher verstellen. Zwischen diesen beiden Werten kann mit "HAND / AUTO" umgeschaltet werden, siehe Bild 4.1.3.

Hier ist nur eine echte Umschaltung sinnvoll.

Aus den letzten Bildern wird ersichtlich, dass eine Regelung in der Praxis der Automatisierungssysteme aus drei Teilen besteht wie in Bild 4.1.4 dargestellt:

- Sollwert - Führung mit intern / extern (HAND / AUTO) - Umschaltung, ggf. einschließlich analoger Rechenfunktionen zur Wertanpassung,
- Regler als P / PI / PID - Regler mit Vorgabe / Bildung der Regelparameter,
- Vorranglogik ("Steuerungsteil") mit HAND / AUTO - Umschaltung zum Einfügen von Verstellbefehlen von Hand oder durch eine Gruppensteuerung, ggf. mit Einbindung zusätzlicher Freigaben und Schutzbefehle.

Je nach Produkt sind diese Teilfunktionen in einem oder mehreren Standard - Funktionsbausteinen fertig vorhanden.

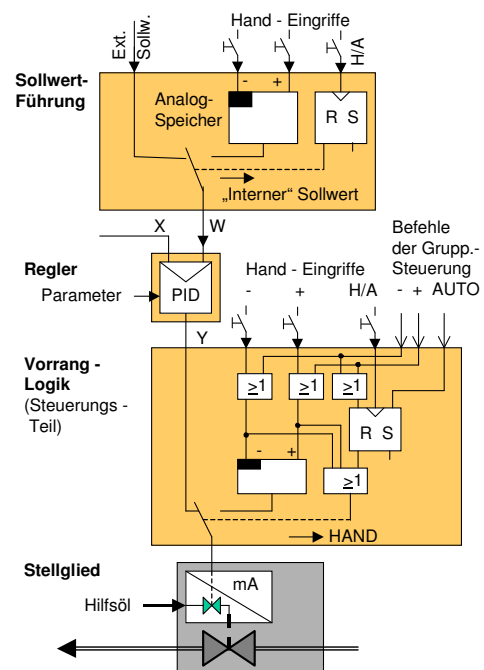


Bild 4.1.4: Teile einer Regelung

4.2 Abgleich

Bei HAND / AUTO - Umschaltungen dürfen Sollwert und Stellgröße meist keinen plötzlichen Sprung machen, das würde den Prozess stören. Zur "Stoß-freien" Umschaltung sind verschiedene Abgleichmaßnahmen üblich.

Auch beim Start eines Systems ist manchmal ein Abgleich auf einen Anfangswert notwendig.

Bild 4.2.1 zeigt vereinfacht zwei Maßnahmen in der Sollwertführung.

- Wenn der externe Sollwert führt, kann der interne auf diesen abgeglichen werden, damit bei Umschaltung auf intern kein Sollwertsprung auftritt. Dazu werden aus dem Vergleich zwischen externem und internem Sollwert + / - Befehle an den Analogwert-speicher gegeben. Dies erfolgt wenn kein Abgleich - Befehl ansteht und der Betriebsart - Speicher auf AUTO steht.

- Durch einen Abgleich - Befehl in Betriebsart HAND oder zum Einstellen eines Anfangswertes kann der interne Sollwert auf einen Abgleichwert gebracht werden. Wenn z.B. die Regelung (Vorrang - Logik) in Betriebsart HAND ist kann der interne Sollwert z.B. auf den Istwert abgeglichen werden, damit bei Umschaltung auf AUTO kein Sollwertsprung auftritt.

Manchmal werden mehrere externe Sollwerte mit Umschaltung verwendet. Dann ist jeder mit einem Nachlaufintegrator versehen, und der aktive führt die anderen nach.

Bild 4.2.2 zeigt Abgleichmaßnahmen in der Einzelgrößenregelung:

- In Betriebsart HAND der Regelung kann (ohne Abgl. 2) durch manuelle Stellgliedverstellung eine Differenz zwischen Sollwert und Istwert auftreten, wodurch ein Regler mit I - Anteil bis zur Stellgrenze "weglaufen" würde, da er ja nicht eingreifen kann. Nach Umschaltung auf AUTO würde die Stellgröße dann an diese Stellgrenze springen. Ein Abgleich des Reglerausgangs (I - Anteil) auf die von Hand eingestellte Stellgröße bzw. - wenn vorhanden - die echte Position verhindert dies.

- In Betriebsart AUTO muss der Analogwert-speicher für die Handverstellung auf den aktuellen Reglerausgang abgeglichen werden (Abgl. 4), damit bei Hand - Eingriffen bzw. Umschaltung auf HAND keine Stellgrößen - Sprünge auftreten. Dieser Abgleich ist bei Schrittreglern nicht nötig.

Auch diese Funktionen sind in den Standard - Funktionsbausteinen heutiger PLS - Systeme normalerweise vorhanden. Abgleich 3 und ggf. 4 werden praktisch immer verwendet, die übrigen können meist nach Bedarf gewählt werden.

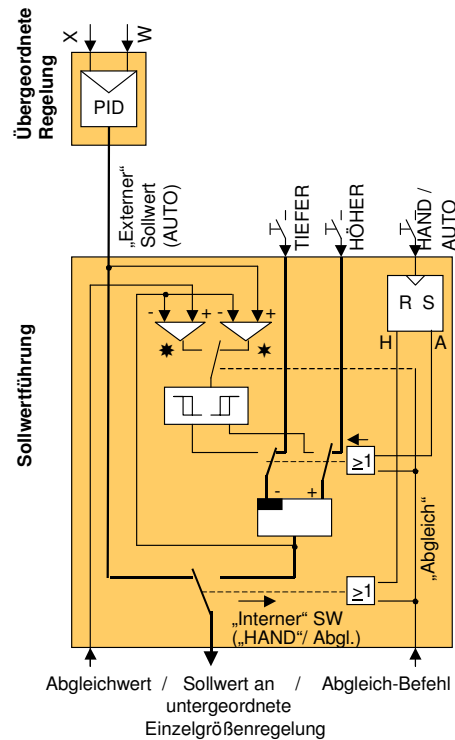


Bild 4.2.1: Abgleich in der Sollwertführung

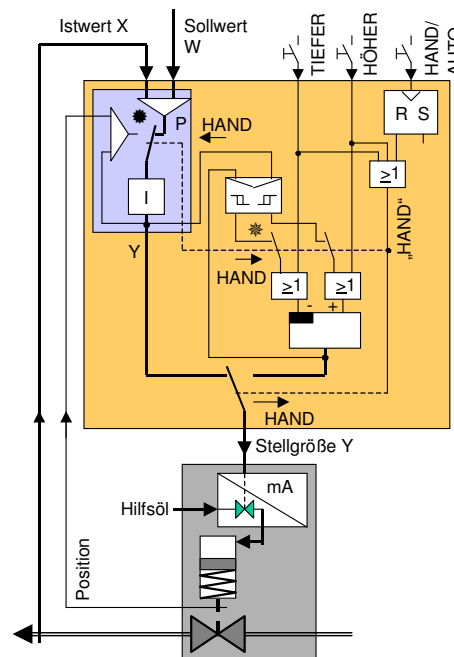


Bild 4.2.2: Abgleich in der Einzelgrößenregelung

4.3 Parameter - Variation

Manchmal muss sich eine Regelung in verschiedenen Betriebszuständen der Anlage verschieden verhalten, d.h. mit verschiedenen Parametern arbeiten. Ein Mittel zur Realisierung dieser Forderung ist die Variation der Regelparameter in Abhängig von einer Messgröße oder einem errechneten Wert. Dazu muss die Regelungseinrichtung

- durch intern errechnete Werte einstellbare Parameter besitzen, und
- Funktionen zur Umformung von Analogwerten (normalerweise als Prozentwert vorhanden) in einen Faktor bzw. eine Zeit enthalten.

Moderne PLS - System enthalten dazu geeignete Funktionen.

Bild 4.3 zeigt als Beispiel die Variation der P - Verstärkung eines PI - Reglers an die "Leistung P" der Anlage. Hier soll sich bei Leistung 0 .. 100 % der Faktor zwischen 0,5 und 0,75 ändern. Dazu wird zunächst ein entsprechender Wertebereich als Prozentwert errechnet (50 .. 75 %), und dann durch eine Umformfunktion zu einem Faktor umgewandelt. Der Wert K dieser Funktion legt den Faktor bei einem Eingangssignal von 100 % fest.

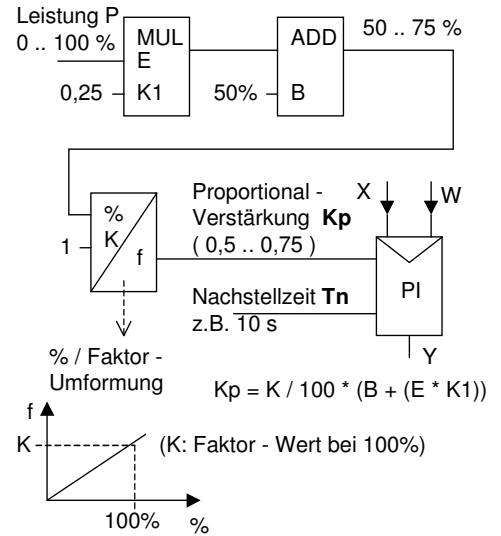


Bild 4.3: Parametervariation

4.4 Regler - Strukturumschaltung

Manchmal reicht die Parametervariation zur Anpassung an den Betriebszustand nicht aus, und es muss der Regelalgorithmus gewechselt werden.

Bild 4.4 zeigt dies mit einem (vereinfachten) Ausschnitt aus der Drehzahlregelung einer Dampfturbine. Während des Anfahrens wird ein PI - Regler benötigt, der die Stellgröße für das Dampf - Einlaßventil liefert, da dann die Leistungsregelung keinen Wert liefert. Im Lastbetrieb dagegen wird nur eine Korrektur zur Stellgröße der Leistungsregelung benötigt, die nur ab einer bestimmten Soll - Ist - Differenz ("Totband") eingreifen soll.

Der P - Anteil wird durch einen Addierer realisiert, für die PI - Charakteristik folgt ein Integrator im "PI - Kanal". Im Lastbetrieb wird auf den "P - Kanal" umgeschaltet.

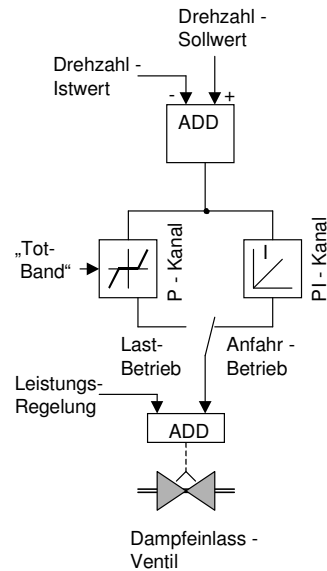


Bild 4.4: Regler - Strukturumschaltung

4.5 Stellbereichs - Splitting

Stellglieder arbeiten meist nicht im gesamten Stellbereich gleich gut bzw. wirtschaftlich. So haben z.B. Regelventile im unteren Bereich recht hohe Strömungsverluste. Für Anfahrvorgänge oder wenn längerer Betrieb in diesem Bereich benötigt wird ist es besser, den gesamten Regelbereich auf zwei (oder mehr) Ventile aufzuteilen.

Bild 4.5 zeigt dies mit Ventil V1 für 30% und V2 für 70% der Gesamtlast. Die Stellgröße Y des Reglers wird über Rechenschaltungen so aufgeteilt, dass im Bereich bis 30% nur V1 benutzt wird und erst bei höherer Last V2 eingesetzt wird. So läßt sich z.B. eine teil - Last von 20% wirtschaftlich fahren, da dann V1 zu ca. 67% geöffnet ist.

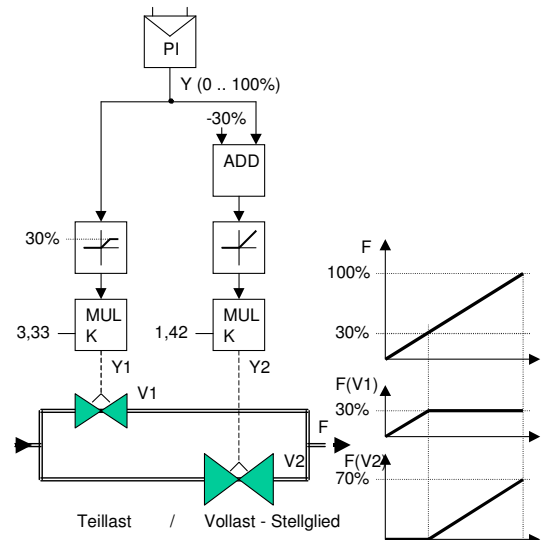


Bild 4.5: Stellbereichs - Splitting

4.6 Auto - Tuning

Für das Bestimmen der optimalen Regler - Parameter gibt es verschiedene Rechner - Verfahren und Hilfsprogramme wie aus "Regelungstechnik" wohl bekannt sein dürfte.

Manche moderne PLS - Systeme enthalten Regler - Funktionsbausteine mit einem eingebauten Programm zur Parameter - Bestimmung, einem so genannten "Auto - Tuning".

Bild 4.6 zeigt die prinzipielle Arbeitsweise (wie z.B. beim ABB - System "Advant" verwendet).

Der Inbetriebnehmer kann den Vorgang zu geeigneter Zeit anstoßen, denn eine dauernde Aktivität würde den Prozess stören. Nun gibt das Programm selbstständig Sollwertänderungen vor, erfasst das Verhalten der Strecke und speichert dieses als Modell ab. Hieraus errechnet das Programm nun die Regel - Parameter und stellt sie im Regler ein.

Oft ist danach eine weitere Optimierung durch den Inbetriebnehmer erforderlich, um z.B. das Verhalten eines Einzelreglers an das gesamte Netzwerk anzupassen, aber für eine erste Einstellung ist das Auto - Tuning sehr hilfreich.

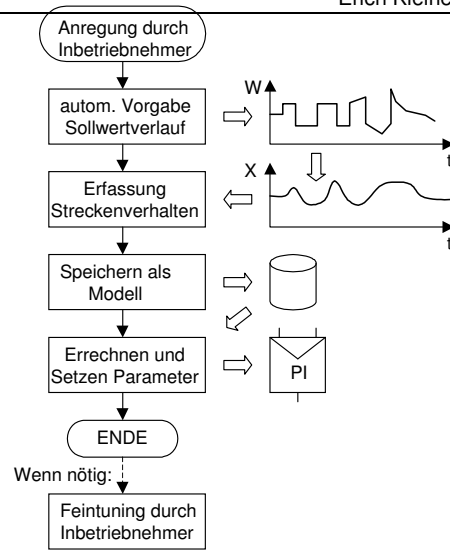


Bild 4.6: Auto - Tuning, Ablauf

5 Signaldefinition und - Bereich

Die physikalischen Größen in einem Prozess haben unterschiedliche Maßeinheiten, z.B. m^3/s für die in Bild 5.1 dargestellten Durchflussmessungen, oder z.B. mbar für eine Unterdruckmessung.

Messumformer sind für einen bestimmten Messbereich gebaut und liefern für die aktuellen Werte standardisierte mA - Signale, z.B. 4 .. 20 mA für z.B. 0 .. $10 m^3/s$ oder für z.B. - 50 .. 0 mbar.

Die Eingabegeräte eines PLS wandeln die Eingangssignale in eine digitale Darstellung der Werte mit einer Produkt - spezifischen Auflösung um, für den Anwender meist als 0 .. 100 % zu interpretieren, bezogen auf die 4 .. 20 mA und damit für den jeweiligen Standard - Messbereich.

Der tatsächlich im Betrieb vorkommende Wertebereich, der "Betriebs - Messbereich", kann kleiner sein, z.B. 0 .. $5 m^3/s$, also intern nur 0 .. 50 %.

Damit bei der internen Verarbeitung verschiedener Größen nicht für jeden Messwert eine dem Betriebs - Messbereich angepasste Gewichtung notwendig ist, wird hinter oder durch die Signaleingabe oft eine "Normierung" durchgeführt, in Bild 5.1 durch Multiplikation mit 2, so dass nun 0 .. $5 m^3/s$ dem internen Abbild 0 .. 100 % entsprechen.

Der innerhalb eines PLS tatsächlich darstellbare Wertebereich kann größer als 100 % sein, z.B. - 800 bis + 800 %. Dadurch könnten zwei Signale mit 0 .. 100 % addiert werden, Ergebnis: 0 .. 200 %. Auch hier empfiehlt sich aber eine "Normierung" wie in Bild 5.2 bei der Addition zweier unabhängiger Größen durch den Summier - Multiplizierer SMU gezeigt, dessen Ausgang wieder 0 .. 100 % liefert.

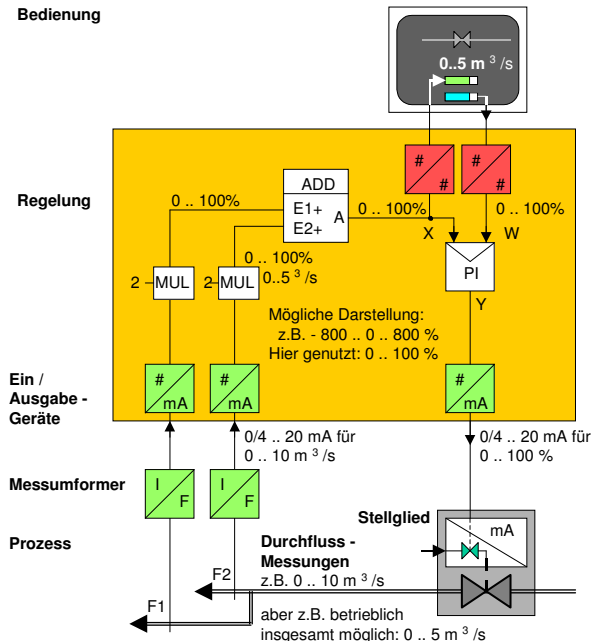


Bild 5.1: Signaldefinition, esbereiche

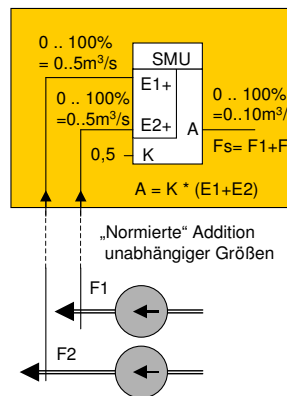


Bild 5.2: Normierung

Eine Bedienungseinrichtung - heute meist über Bus angeschlossen - arbeitet ebenfalls mit normiertem Signal, also z.B. 0 .. 100 %, nur in den Prozessbildern werden Anzeigen wie die beiden Balken in Bild 5.1 mit physikalischer Einheit und Betriebsbereich versehen.

Manchmal wird im Eingabegerät auf den Betriebs - Messbereich umgerechnet ("Scaling") und dann intern mit physikalischen Werten gerechnet (statt %).

6 Fortgeschrittene Regelverfahren

6.1 Übersicht

Konventionelle Regelungen bilden aus der aktuellen Regelgröße ihre Stellgröße jeweils neu. Die Eigenart der geregelten Strecke ist nur durch Wahl der Regelcharakteristik, der Reglerstruktur und der Regel-Parameter beim Entwurf berücksichtigt.

Für überwiegend statische Zustände ist das ausreichend, für stark dynamische Prozesse, z.B. häufige Lastwechsel unterschiedlicher Größe oder bei Batch - Prozessen wie Strangguss (insbesondere bei stark nicht linearem Streckenverhalten) ergibt sich damit keine optimale Regelgüte. Hier sind die Kenntnis des dynamischen Prozess - Verhaltens aus der Vergangenheit und daraus abgeleitete Aktionen sinnvoll, wie sie in intelligenten / adaptiven Regelverfahren verwendet werden.

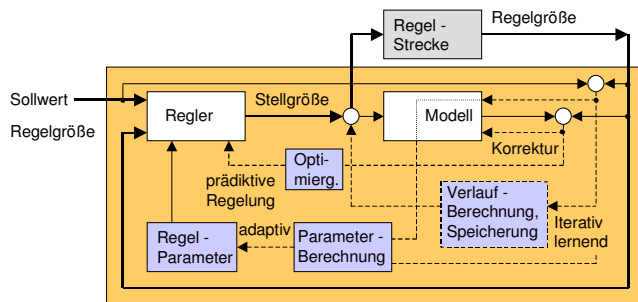


Bild 6.1: fortgeschrittene Regelverfahren, Übersicht

Bild 6.1: zeigt die prinzipiellen Möglichkeiten, wobei - außer beim Einsatz eines Modells - in keiner Anwendung alle gleichzeitig sinnvoll sind:

- **Strecken - Modell:** Mathematisches Modell der Regelstrecke,
 - offline errechnet / entworfen oder
 - online erstellt oder zumindest lfd. korrigiert, meist erforderlich,
- **Vorausberechnung** der nächsten (zukünftigen) Streckenreaktionen aus dem Modell und hieraus Korrektur des Reglers bei der *prädiktiven Regelung*, wobei das Modell das Soll - Verhalten vorgibt,
- **Berechnung** und Speicherung des optimalen **Stellgrößenverlaufs** („Trajektorie“) aus der Differenz zwischen Sollwert(verlauf) und Istwert(verlauf) bei der *iterativ lernenden Regelung* für Batch - Prozesse,
- laufende **Parameter - Berechnung** und - Einstellung bei *adaptiver Regelung*
 - direkt oder "semi - automatisch", oder
 - automatisch aus einem aktualisierten Modell.

Untenstehende Tabelle zeigt die Eigenschaften der wichtigsten "fortgeschrittenen" Regelungsverfahren, wobei + "benutzt" und - "nicht benutzt" meint, + / - steht für "sowohl als auch", da auf diesem Gebiet zurzeit viele verschiedene Verfahren entwickelt werden. Daher ist die Tabelle auch nicht als vollständig zu betrachten sondern nur als Überblick. Der Ausdruck "Modell - basiert" ist, wie die Tabelle zeigt, alleine wenig aussagefähig, sondern eher ein Oberbegriff.

Zur Anwendung der Optimierungs - Werkzeuge stehen teilweise Standard - Schnittstellen zur Verfügung, die eine additive und teils nachträgliche Implementierung ermöglichen.

Tabelle 6: Einsatz der fortgeschrittenen Verfahren

„fortgeschrittene“ Regelungs - Verfahren:	Eigenschaften:			automatische Korrektur von:			Berechnung u. Berücksichtigung zukünftiger Reaktionen
	aktuelle Regelgrößen- Rückführung	mit Strecken- Modell	Parametern	Stellgröße (über den Regler)	Stellgrößen- Verlauf	Strecken- Modell	
„Modell - basiert“	+ / -	+	+ / -	+ /	+ / -	+ / -	+ / -
„adaptiv“	+	+ / -	+	-	-	+ / -	-
„iterativ“ lernend	(nur zwischen Zyklen)	+	-	-	+	+	-
„prädiktiv“	+	+	-	+	-	-	+
zum Vergleich: konventionell	+	-	-	-	-	-	-

6.2 Beispiel: prädiktive Regelung

Allgemein bedeutet "prädiktive Regelung" (von lat. *praedictio* = Prophezeiung), dass nicht nur das aktuelle Stellsignal berechnet wird sondern - aus der Kenntnis eines Strecken-Modells - für die nächsten Abtastschritte auch die den Prozess repräsentierenden Prozessgrößen für ein Zukunftsszenario. Hieraus wird der Regler beeinflusst, es führt hier das Modell. Diese Methode ist besonders für "Multi-variable" Prozesse geeignet, das sind solche, bei denen eine Verstellung durch den Regler gleichzeitig mehrere Prozessgrößen beeinflusst.

Bild 6.2.1 zeigt ein Beispiel einer "Model Predictive Control" (en: MPC) mit "Zwangs - Bedingungs" – Handhabung. Charakteristisch ist, dass hier die Regelungs - Strategie vorgegeben wird für jede Berechnung der nächsten Regelungsaktivität. Dadurch ist MPC sehr flexibel bei Änderung der Bedingungen, z.B. der Anforderungen oder Sensor / Aktor - Fehlern. Ausserdem kann MPC den Prozess innerhalb sowohl zwangsläufiger Anforderungen (z.B. Sicherheitsgrenzen) als auch von extern vorgegebenen Variablen halten.

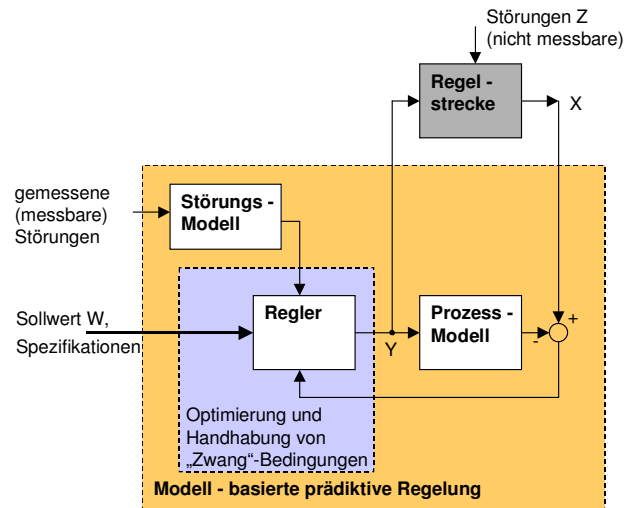


Bild 6.2.1: Modell - basierte prädiktive Regelung, Struktur (Beispiel)

Die Wirkungsweise einer Modellgestützten Prädiktiven Regelung (de: MPR) an einem Beispiel aus einer Spritzgießanlage, die eine sehr nichtlineare Strecke darstellt, zeigt Bild 6.2.2.

Links sind für die Vergangenheit Stellgröße und Regelgröße dargestellt. Zum Zeitpunkt k („jetzt“) erfolgt ein Sollwertsprung. Nun wird für verschiedene Stellgrößen – Verläufe (u) während einer begrenzten Zeit, dem „Stellhorizont“ (hier drei Abtastzyklen) über das Streckenmodell für eine ebenso begrenzte Zeit, den „Prädiktionshorizont“, der Verlauf der Regelgröße berechnet. Dabei wird die Regelabweichung mit einer „Gütefunktion“ minimiert:

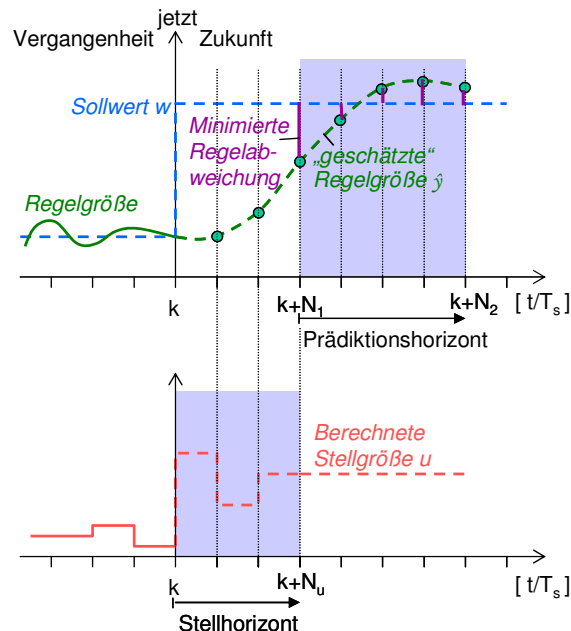
$$J = \lambda \cdot \sum_{N1}^{N2} (w - y)^2 + \mu \cdot \sum_1^{Nu} \Delta u^2$$

Diese Funktion wird auch „Kostenfunktion“ genannt. λ und μ sind Bewertungsfaktoren.

Für Mehrgrößenregelungen wird diese Funktion in einer Matrize dargestellt.

Mit der ersten gefundenen Stellgröße wird zum Zeitpunkt k+1 die Strecke beaufschlagt, und die Rechnung für einen nun einen Abtastzyklus weiter geschobenen Stell- und Prädiktionshorizont wiederholt (Prinzip des „zurückweichenden Horizonts“, en: Receding Horizon Principle).

Bei dieser Regelung stellt die zur Optimierung der Regelabweichung benötigte Rechenkapazität bzw. – Zeit ein Problem dar. Deswegen werden Stell- und Prädiktionshorizonte begrenzt und auch ein Minimalwert der Gütefunktion zugelassen.



- N1 Beginn des Prädiktionshorizonts
- N2 Ende des Prädiktionshorizonts
(es wird die Streckenreaktion z.B. für 5 Messungen (Abtastungen) der Regelgröße vorausberechnet)
- Nu Ende des Stellhorizonts
(es werden z.B. 4 Stellbefehle durchgerechnet)

Bild 6.2.2: Modellgestützte prädiktive Regelung Wirkungsweise (Beispiel)

Solche Regelungen wurden zunächst im Raffinerie – Prozess eingesetzt [1], werden inzwischen aber auch in anderen Prozessen mit Erfolg angewandt, z.B. Abstandsregelung bei Fahrzeugen, Brennstoffregelung, Spritzgusstechnik.

Bild 6.2.3 zeigt den Werkzeug – Innendruck in einer Spritzgießanlage (linke Skala) in Abhängigkeit von den Stellbefehlen (rechte Skala) über die Zeit. Mit den Stellbefehlen wird eine Pumpe eingeschaltet, die den Druck erhöht.
Diese Strecke ist stark nichtlinear, hier bringt die prädiktive Regelung wesentlich bessere Ergebnisse als konventionelle Regelungen.
Das Modell der Strecke ist mit einem neuronalen Netz aufgebaut. [3]

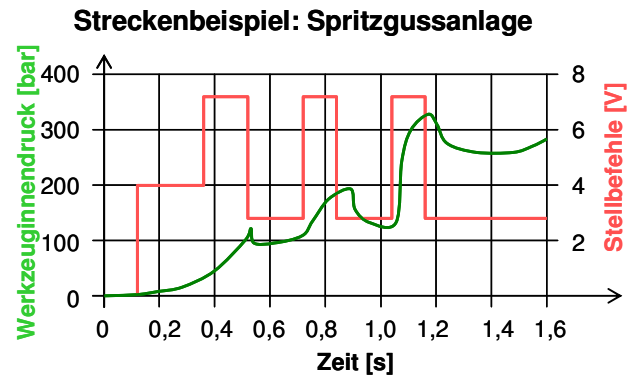


Bild 6.2.3: Streckenverhalten einer Spritzgussanlage

6.3 Beispiel: Adaptive Regelung

Bild 6.3.1 zeigt eine adaptive Regelung ohne Streckenmodell. Hier wird nur das Verhalten der Strecke beobachtet, nach festgelegten Kriterien bewertet und daraus der Regler durch Korrektur der Parameter modifiziert. Für Strecken mit weniger Dynamik eine einfache laufende Optimierung, die bei ungünstigen Vorgaben jedoch auch leicht den Prozess stören kann.

Bild 6.3.2 zeigt eine adaptive Regelung mit einem sich selbst optimierenden Modell, das über die aktuelle Soll - Ist - Differenz laufend die Reglerparameter anpaßt.

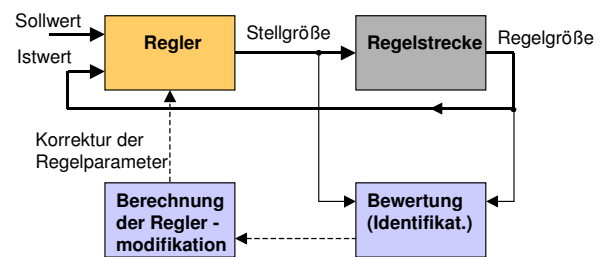


Bild 6.3.1: Adaptive Regelung ohne Modell

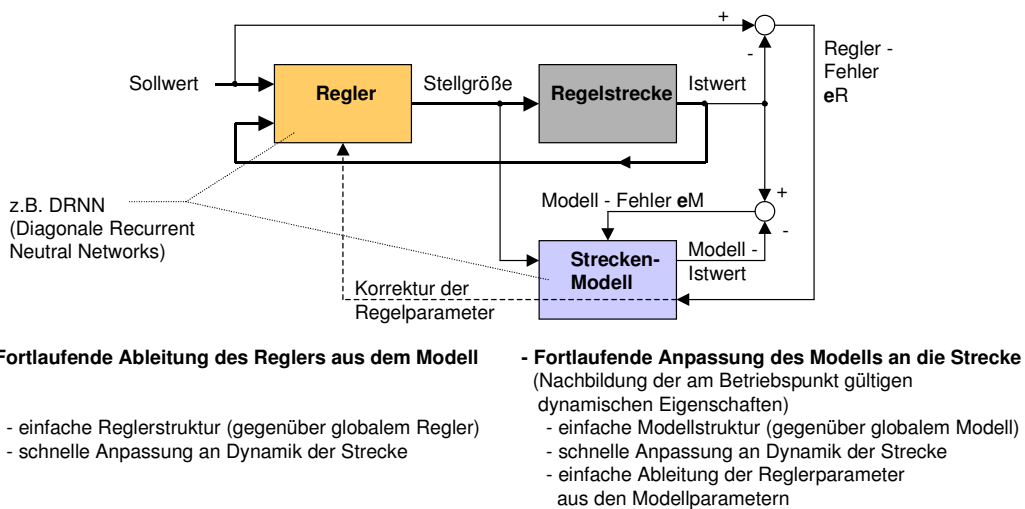


Bild 6.3.2: Adaptive Regelung mit sich selbst anpassendem Streckenmodell

Dieser Regler wurde mit neuronalen Netzen aufgebaut und konnte durch seine Fähigkeiten mit einem auf den direkt geregelten Teilprozess beschränkten Modell ausgestattet werden, was einfacher als ein globales Prozessmodell zu handhaben ist. [2]

6.4 Iterativ lernende Regelungen (ILR)

Viele industrielle Prozesse wiederholen sich zyklisch (Batch-Prozesse), d.h. sie laufen immer wieder in der gleichen Form ab. (Bild 6.4, oben links). In diesen Fällen sind Abweichungen der Regelgröße vom Sollwert als Verlauf bekannt. Herkömmliche Online - Regelungen machen davon aber keinen Gebrauch, sondern ermitteln ihre Stellgröße immer wieder neu aus den aktuellen Werten. Die iterativ lernende Regelung baut auf der Kenntnis der vergangenen Zyklen auf und verbessert von Zyklus zu Zyklus die Stell - Strategie, um den gewünschten Verlauf zu erzielen.

Bild 6.4 zeigt rechts oben als (sehr einfaches) Beispiel das Anheizen eines Ofens, und zwar den gewünschten Verlauf $Y_d(t)$ ("Sollwert") und drei jeweils bessere Annäherungen $Y_i(t)$ ("Istwerte"), jeweils über einen Prozess - Zyklus k (1 x Anheizen).

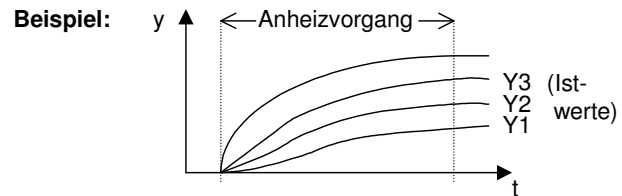
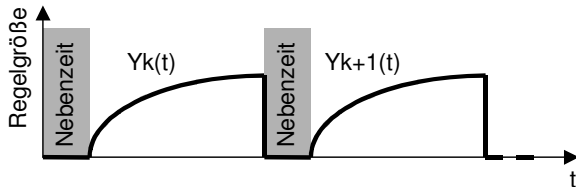
Darunter ist der prinzipielle Aufbau einer ILR dargestellt.

Während eines Prozess - Zyklus wird die Strecke durch die Eingangsfunktion U_k (Stellgröße Y) aus einem Speicher gesteuert. In dieser Phase wirkt die ILR als Steuerung: sie gibt den Verlauf (Traktorie) der Stellgröße vor. Der Verlauf der Regelgröße Y_k (X) wird mit dem Verlauf des Sollwertes Y_d (W) verglichen, eventuelle externe Störungen (Z) der Strecke gehen hier ebenfalls mit ein. Die Differenz wird bewertet und mit dem Ergebnis wird ein neuer Verlauf U_{k+1} für den nächsten Durchgang erstellt.

Rechts oben im Bild sind die Iterations - Schritte dargestellt, mit denen sich die Anordnung dem idealen Verlauf nähert.

Anwendung: z.B. Glasherstellung

Aufgabe: zyklische Prozesse



Lösung: ILR

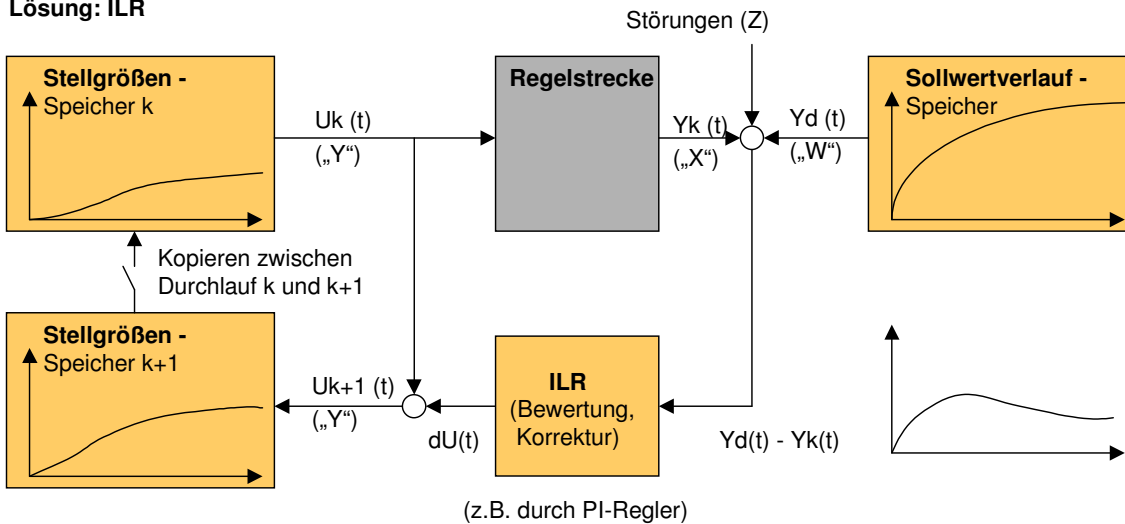


Bild 6.4: Prinzip der Iterativ Lernenden Regelung

Literaturangaben:

- [1] S.J. Qin and T.A. Badgwell. An overview of industrial model predictive control technology. Preprints of the proceedings of the Chemical Process Control-V, Tahoe City 7-12 January, 1996.
- [2] Zukunft - weisende Regelkonzepte, Dr.-Ing. M. Ayeb, Prof. Dr.-Ing. H. Theuerkauf, Universität Gesamthochschule Kassel IEE-Antriebstechnik
- [3] Modellgestützte Prädiktive Regelung auf der Basis neuronaler Netze, Juan Gruber, Andreas Karlberger, Walter Michaeli, Institut für Kunststoffverarbeitung Aachen, atp 6/2005