

Aufgaben, Ziele und Anwendungen

Informationsverarbeitung, Gerätetechnik, Messwertgewinnung,
Messwertverarbeitung, programmiertechnische Lösungen,
Steuerungskonzepte

Automatisierung in der Wasserwirtschaft

Mehr zum Thema auf der DVD-Vollversion.



PROF.-DR.-ING. HABIL. PETER-WOLFGANG GRAEBER, DR. JENS ALEX

Automatisierung in der Wasserwirtschaft ist heute nicht mehr wegzudenken. Dabei soll hier unter Automatisierung die Gesamtheit von Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik verstanden werden. Auch die Informationsverarbeitung, meist in Form von Softwarelösungen, ist mit inbegriffen. Unter Regelungstechnik ist damit die Einheit von Gerätetechnik (Hardware) und programmtechnischen Lösungen (Software) zu verstehen. Dabei spielt die Stellung des Menschen innerhalb des Regelungskreises zunächst keine Rolle. Er kann als Ausführender Teil des Regelkreises sein (off-line-Strukturen) oder den Regelkreis überwachen (on-line-Strukturen). Auf alle Fälle ist die Rolle des Menschen als komplexdenkendes Individuum mit in jede automatisierungstechnische Lösung einzubeziehen. Nur der Mensch ist in der Lage auf unvorhergesehene Situationen zu reagieren, in dem er aus der Situation heraus neue Lösungsvarianten schöpferisch kreieren kann.

Foto: Bürkert Fluid
Control Systems

binert auf. Durch unterschiedliche Betrachtungsweisen und Gewichtungen tritt das eine oder andere Ziel stärker in den Vordergrund.

2.2 Aufgaben der Automatisierung

Aus den dargestellten Zielen der Automatisierung in der Wasserwirtschaft/-technik ergeben sich spezifische Aufgaben, die nicht mehr vom Menschen ausgeführt werden sollen bzw. bei denen er durch entsprechende technische Hilfsmittel unterstützt wird.

Die Aufgaben lassen sich wie folgt charakterisieren:

Prozessüberwachung und -sicherung

In diesem Fall soll der Mensch durch die Automatisierungsanlagen ständig über die aktuellen und wichtigsten, den prozesssensitiven Zustandsgrößen des Prozesses informiert werden. Weiterhin ist es notwendig, dass die Automatisierungsanlagen gefährliche Extremsituationen des Prozesses alarmierend melden und Maßnahmen zur Abwendung eines größeren Schadens einleiten. Bei vollautomatisierten Prozessabläufen müssen solche Extremzustände verhindert werden. Dies wird realisiert durch

- Anzeige, Visualisierung und Protokollierung der prozesssensitiven Zustandsgrößen,
- Signalisierung der Grenzwertüberschreitungen und Störungen sowie
- Notsteuerung nach Grenzwertüberschreitungen und Störungen.

Prozessstabilisierung

Bei der Prozessstabilisierung muss durch die Automatisierungstechniken die Einhaltung der geforderten Prozessgrößen garantiert werden. Solche Prozessgrößen können physikalischer, aber auch chemischer Natur sein. Insbesondere kann dies erreicht werden durch

- Einstellung und Gewährleistung eines bestimmten Prozessregimes und
- Beseitigung der Auswirkungen von Störungen.

Prozessführung

Bei der Prozessführung sind die technologisch vorgegebenen Prozessabläufe und Anlagenzustände im sachgebundenen oder zeitlichen Ablauf einzuhalten. Dies kann erfolgen durch

- Führung eines entsprechend vorgegebenen Programms,
- Führung nach messbaren Zustandsgrößen und
- Nutzung von Wissens- und/oder Datenbanken.

Prozessoptimierung

Die Aufgabe der Prozessoptimierung besteht in der automatischen Ermittlung und Herbeiführung möglichst optimaler Arbeitspunkte und Betriebsregime von Anlagen, insbesondere durch

- Optimierung des stationären bzw. quasistationären Betriebes und
- Optimierung von Übergangsvorgängen bzw. instationären Betrieb.

biniert auf. Durch unterschiedliche Betrachtungsweisen und Gewichtungen tritt das eine oder andere Ziel stärker in den Vordergrund.

2.2 Aufgaben der Automatisierung

Aus den dargestellten Zielen der Automatisierung in der Wasserwirtschaft/-technik ergeben sich spezifische Aufgaben, die nicht mehr vom Menschen ausgeführt werden sollen bzw. bei denen er durch entsprechende technische Hilfsmittel unterstützt wird.

Die Aufgaben lassen sich wie folgt charakterisieren:

Prozessüberwachung und -sicherung

In diesem Fall soll der Mensch durch die Automatisierungsanlagen ständig über die aktuellen und wichtigsten, den prozesssensitiven Zustandsgrößen des Prozesses informiert werden. Weiterhin ist es notwendig, dass die Automatisierungsanlagen gefährliche Extremsituationen des Prozesses alarmierend melden und Maßnahmen zur Abwendung eines größeren Schadens einleiten. Bei vollautomatisierten Prozessabläufen müssen solche Extremzustände verhindert werden. Dies wird realisiert durch

- Anzeige, Visualisierung und Protokollierung der prozesssensitiven Zustandsgrößen,
- Signalisierung der Grenzwertüberschreitungen und Störungen sowie
- Notsteuerung nach Grenzwertüberschreitungen und Störungen.

Prozessstabilisierung

Bei der Prozessstabilisierung muss durch die Automatisierungstechniken die Einhaltung der geforderten Prozessgrößen garantiert werden. Solche Prozessgrößen können physikalischer, aber auch chemischer Natur sein. Insbesondere kann dies erreicht werden durch

- Einstellung und Gewährleistung eines bestimmten Prozessregimes und
- Beseitigung der Auswirkungen von Störungen.

Prozessführung

Bei der Prozessführung sind die technologisch vorgegebenen Prozessabläufe und Anlagenzustände im sachgebundenen oder zeitlichen Ablauf einzuhalten. Dies kann erfolgen durch

- Führung eines entsprechend vorgegebenen Programms,
- Führung nach messbaren Zustandsgrößen und
- Nutzung von Wissens- und/oder Datenbanken.

Prozessoptimierung

Die Aufgabe der Prozessoptimierung besteht in der automatischen Ermittlung und Herbeiführung möglichst optimaler Arbeitspunkte und Betriebsregime von Anlagen, insbesondere durch

- Optimierung des stationären bzw. quasistationären Betriebes und
- Optimierung von Übergangsvorgängen bzw. instationären Betrieb.

2.3 Automatisierungseinrichtungen

Die Automatisierungstechnik ist stets als Hilfsmittel für die menschliche Arbeit zu betrachten. Sie dient dazu, die vom Menschen vorgedachten Strategien bei der Steuerung von Prozessen oder bei der Informationsgewinnung über die Zustandsgrößen in den Prozessen automatisch oder automatisiert zu realisieren. Die Automatisierungseinrichtung steht als Hilfsmittel zwischen dem Menschen und dem zu automatisierenden Prozess. Der Mensch bedient sich dieser Hilfsmittel, um die Ziele der Automatisierung zu erreichen.

Nur der Mensch ist in der Lage, auf unvorhergesehene Situationen zu reagieren, in dem er aus der Situation heraus neue Lösungsvarianten schöpferisch kreieren kann.

Zwischen dem Prozess und der Automatisierungseinrichtung einerseits und zwischen der Automatisierungseinrichtung und dem Menschen andererseits befinden sich Koppel-ebenen. In diesen Koppel-ebenen sind besondere Anpassungen notwendig, damit ein problemloser Informations-austausch realisiert werden kann. Die

erste Koppel-ebene wird durch Einrichtungen zum Messen und Stellen und die zweite durch den Mensch-Maschine- Kontakt charakterisiert.

Die Gesamteffektivität einer Automatisierungsanlage ist neben der Leistungsfähigkeit der Automatisierungseinrichtungen vor allem auch von der automatisierungsorientierten Gestaltung der zu automatisierenden Anlagen abhängig. Das bedeutet, dass bereits bei der Planung von Anlagen oder technologischen Prozessen eine spätere Automatisierung berücksichtigt werden muss. In dieser Phase Versäumtes kann später kaum oder unter meist großem Aufwand wieder repariert werden.

Die Automatisierungseinrichtungen sind nicht unbedingt an die elektronischen/elektrischen Steuerungs- und Regelungs- sowie Messwertgewinnungs- und Messwertverarbeitungssysteme gebunden. Neben den *elektrischen Funktionseinheiten* gibt es noch die *pneumatischen* und die *hydraulischen*. Letzt genannte besitzen neben den elektrischen Automatisierungsmitteln auch ihr Anwendungsfeld, welches sich aus der Tradition und vor allem aus den vorteilhaften Eigenschaften für verschiedene Anwendungen ergibt.

3. Steuerungstheorie

3.1 Steuerung und Regelung

Als Hauptaufgaben der Steuerung sind die

- Prozessüberwachung und -sicherung
- Prozessstabilisierung
- Prozessführung
- Prozessoptimierung

zu sehen. Diese Aufgaben werden durch die Vorgänge Messen, Stellen und Steuern gelöst.

Unter *Messen* soll die Informationsgewinnung, -vorverarbeitung, -übertragung und die Darstellung von Signalen und Informationen verstanden werden.

Das *Stellen* ist in der Automatisierungstechnik die zielgerichtete Beeinflussung von Prozessen durch Eingriffe in den Energie- und Massenstrom oder in den Informationsfluss. Diese Eingriffe werden auf Grund von Informationen manuell oder automatisch ausgeführt. Stelleingriffe sind erforderlich, um den Energie- oder Massenstrom im Sinne der Aufgabenstellung zu beeinflussen. Stelleinrichtungen werden vorwiegend mit einem energiearmen Eingangssignal angesteuert, sind aber meist in der Lage, große Kräfte und Leistungen zu erzeugen und dadurch erhebliche Energie- und Masseströme zu stellen. Wassertechnische Stelleinrichtungen sind z. B. Drosselklappen, Ventile, Schieber, Pumpen, Verdichter und Förderbänder.

Unter *Steuern* wird die zielgerichtete Erfüllung von Aufgaben zur Prozessstabilisierung, -führung und -optimierung verstanden. Steuern ist ein Vorgang, bei dem eine oder mehrere Größen (Eingangsgrößen) andere Größen (Ausgangsgrößen) auf Grund der dem Steuerungssystem zugeordneten Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Im Allgemeinen wird die Steuerung in die *offene Steuerung*, als Steuerung oder als Vorwärtssteuerung bezeichnet, und in die *geschlossene Steuerung*, als Regelung oder als Steuerung mit Rückführung bezeichnet, eingeteilt.

Die wichtigsten regelungstechnischen Größen sind (siehe **Bild 1**):

x	Regel- bzw. Steuergröße
z	Störgröße
y	Stellgröße
w	Führungsgröße
x_w	Regelabweichung
x_d	Regeldifferenz
R_E	Regeleinrichtung
S_E	Steuereinrichtung
S_R	Regelstrecke
S_S	Steuerstrecke
v	Ersatzregelgröße

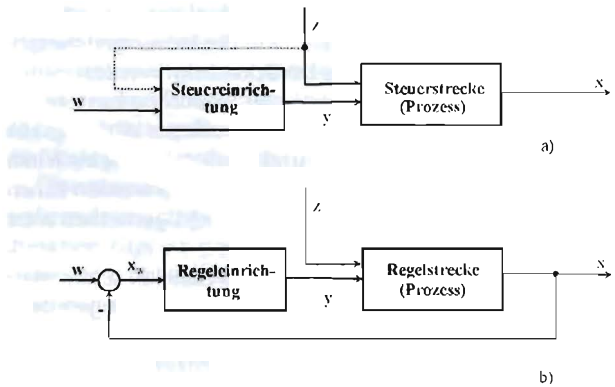


Bild 1. Steuerung (a) und Regelung (b).

3.1.1 Steuerung

Bei der *Steuerung* (siehe **Bild 1**) liegt zwischen der Zielgröße x und der Stell- bzw. Steuergröße y kein geschlossener Wirkungsablauf (offene Wirkungskette)

vor. Das Prinzip funktioniert nur so lange automatisch, wie keine Störungen z vorliegen. Sind die Störungen messbar, so können sie u. U. im Steuerungsalgorithmus berücksichtigt werden.

Die *Vorteile* der Steuerung bestehen darin, dass:

- das Verhalten offener Wirkungsabläufe einfach zu überschauen ist
- sofort und unmittelbar beim Wirken einer messbaren Störung in den Prozess eingegriffen werden kann
- die Zielgröße nicht gemessen werden muss

Die *Nachteile* sind darin zu sehen, dass:

- nur die messbaren Störungen beseitigt werden können
- der Prozess sehr genau bekannt sein muss, um den richtigen Steuerungsalgorithmus anzuwenden
- keine Rückmeldung erfolgt, ob der Steuereingriff die gewünschte Änderung der Zielgröße zur Folge hatte

3.1.2 Regelung

Charakteristisch für die *Regelung* (siehe **Bild 1**) ist, dass ein geschlossener Wirkungsablauf, eine Rückführung der Zielgröße x , vorhanden ist. Die Auswirkungen von Störungen z oder Führungsgrößenänderungen w werden mit der Zielgröße x erfasst und brauchen deshalb nicht extra gemessen zu werden. Es ist auch möglich, ausschließlich oder zusätzlich innere Größen, Zustandsgrößen x_z , des Prozesses zurück zu koppeln. Die Rückkopplung der Zielgröße x muss derart erfolgen, dass die abgeleitete Stellgröße y der Störung entgegen wirkt.

Vorteile von Regelungen bestehen darin, dass:

- eine ständige Rückmeldung über die Wirkung der Steuereingriffe vorhanden ist
- alle Störungen, auch die nichtmessbaren, ausgeregelt werden, da ein ständiger Vergleich zwischen Regel- (Ist-) und Ziel- (Soll-)größe erfolgt

Nachteilig ist dagegen, dass:

- die Ausregelung der Störung erst dann erfolgt, wenn ihre Auswirkung auf die Zielgröße erfolgt ist (bei sehr trägen Systemen kann dies sehr lange dauern, zeitverzögert),
- durch die Rückkopplung ein relativ kompliziertes, schwer überschaubares Systemverhalten auftritt,
- durch die Rückkopplung Instabilitäten des Systems (Schwingungen) entstehen können.

3.1.3 Übertragungsverhalten von Reglern und Strecken

Die Beschreibung der Systeme durch die an ihnen wirkenden Ein- und Ausgangssignale kann in verschiedensten Formen stattfinden. Die gebräuchlichsten sind die mathematische Gleichung, die grafische Darstellung des Zeitverhaltens und die Sprungantwortfunktion als LAPLACE-Transformierte. Das Über-

tragungsverhalten eines Systems kann sowohl aus der experimentellen als auch aus der theoretischen Prozessanalyse gewonnen werden.

Für die mathematische Beschreibung unterscheidet man in Abhängigkeit spezieller Eingangssignale die drei Begriffe *Übergangsfunktion* $h(t)$, *Gewichtsfunktion* $g(t)$ und *Übertragungsfunktion* $G(p)$. Die Übergangsfunktion $h(t)$ ist eine Beschreibung von Übertragungsgliedern bei Anlegen eines Einheitssprungsignals am Eingang, also ein Spezialfall des Übertragungsverhaltens. Wird am Eingang des Übertragungsgliedes ein Dirac-Impuls angelegt, so erhält man die Gewichtsfunktion $g(t)$. Die Übertragungsfunktion $G(p)$ ist die mathematische Beschreibung der Systeme unter Verwendung der Laplace-Transformation für das Eingangssignal (Dirac-Impuls) und für das Ausgangssignal.

Da die verschiedenen Funktionen nur unterschiedliche mathematische Beschreibungen der Systeme darstellen, sind sie mathematisch ineinander überführbar (siehe **Tabelle 1**).

Die Grundformen des Übertragungsverhaltens technischer Systeme sind *proportionales, integrales, differentielles, Verzögerungs- und Laufzeitverhalten*.

Die Kennzeichnung der Systeme bezüglich des Übertragungsverhaltens geschieht durch den großgeschriebenen Anfangsbuchstaben des Verhaltens oder durch das Piktogramm der Systemantwort auf ein Sprungsignal am Eingang, d. h. durch die Übergangsfunktion $h(t)$. Beispiele für die einzelnen Grundformen von Übertragungsverhalten sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

	$h(t)$	$g(t)$	$G(p)$
$h(t)$		$h(t) = \int_0^t g(\tau) \cdot d\tau$	$h(t) = L^{-1} \cdot \left\{ \frac{1}{p} \cdot G(p) \right\}$
$g(t)$	$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}$		$g(t) = L^{-1} \cdot \{G(p)\}$
$G(p)$	$G(p) = pL \{h(t)\}$	$G(p) = L \{g(t)\}$	

Tabelle 1. Zusammenhang zwischen den verschiedenen Übertragungsfunktionen.

Übertragungsverhalten	Bezeichnung	Beispiel
Proportional	P	Hebelanordnungen
Integral	I	Füllung eines Behälters mit konst. Volumenstrom
Differential	D	Druckstoß in Rohrleitungen
Verzögerungsverhalten 1. Ordnung	T_1	Füllung eines Behälters mit variablem Volumenstrom, Strömungsprozesse in Rohrleitungen und im Grundwasser
Verzögerungsverhalten 2. Ordnung	T_2	Füllung von Kaskadenbehälter, Transportprozesse in Rohrleitungen und im Grundwasser
Laufzeitverhalten	T_L	Förderband, Mischrohr

Tabelle 2. Übertragungsverhalten.

In **Bild 2** werden die mathematischen Beschreibungen der Grundübertragungsverhalten für die verschiedenen Beschreibungsarten gezeigt.

Durch Zusammenschalten von Gliedern mit Grundübertragungsverhalten entstehen kombinierte Übertragungsglieder. Dieses Zusammenschalten von linearen Übertragungsgliedern lässt sich auf drei Grundtypen, die Reihen-, die Parallel- und die Kreisschaltung, zurückführen. Dafür ergeben sich die in **Bild 3** dargestellten Übertragungsfunktionen. Damit lässt sich das Zusammenwirken von Regler und Strecke in einem Regelkreis analysieren.

Die mathematische Beschreibung erfolgt in der Praxis ausschließlich durch die Darstellung der Übertragungsfunktion. Es ergeben sich folgende Zusammenhänge:

- Reihenschaltung: $G(p) = G_1(p) \cdot G_2(p)$
- Parallelschaltung: $G(p) = G_1(p) \pm G_2(p)$
- Kreis- bzw. Rückführungsschaltung: $G(p) = G_1(p) / (1 \pm G_1(p) \cdot G_2(p))$

3.1.4 Reglerarten

Die Steuer- bzw. Regeleinrichtung, kurz auch als Regler bezeichnet, umfasst bei der geschlossenen Steuerung alle Glieder, die zur Informationserfassung (Messeinrichtung, Messwertspeicher, Messwertübertragungseinrichtung), Informationsverarbeitung (Regler, Rechner, Mensch) und Informationsnutzung (Stelleinrichtungen) bei der Erfüllung der Steuerungsaufgaben dienen.

Die Regeleinrichtungen werden entsprechend ihres Arbeitsverhaltens in stetige und unstetige Regler eingeteilt.

Bei *unstetigen Reglern* kann die Stellgröße unter Vernachlässigung der Schaltübergänge nur eine begrenzte Zahl verschiedener Werte (z.B. zwei, drei) annehmen. Zweipunktregler geben als Stellgröße nur zwei Schaltzustände „0“ oder „1“ ab. Diese Schaltzustände werden durch so genannte Grenzwertschalter, z.B. Schwimmerkontakte, erzeugt. Um die Schalthäufigkeit der Zweipunktregler gering zu halten, empfiehlt es sich, sie auf langsame (Verzögerungsverhalten mit großer Zeitkonstante) Regelstrecken einwirken zu lassen.

Bei den *stetigen Reglern* kann die Stellgröße y jeden beliebigen Wert innerhalb des Stellbereiches einnehmen, der zur Aufrechterhaltung des gewünschten Wertes der Regelgröße benötigt wird. Als ausgewähltes Übertragungsverhalten, auch als Regelverhalten bezeichnet, treten dabei das P-, I-, PI- und das PID-Verhalten auf.

Im Allgemeinen können für die Reglertypen folgende Merkmale angegeben werden:

- *P-Regler*
bleibende Regelabweichung; immer anwendbar, außer bei Strecken mit Laufzeitverhalten (Laufzeitstrecken)
- *I-Regler*
keine bleibende Regelabweichung; nur an Strecken mit Laufzeitverhalten gut anwendbar; an Strecken ohne Verzögerungsverhalten nicht verwendbar; langsame Ausregelung bei großen Zeitkonstanten der Strecke

Verhalten	Bezeichnung		
	Übergangsfunktion $h(t) = x_a(t) _{x_e=1(t)}$	Gewichtsfunktion $g(t) = x_a(t) _{x_e=\delta(t)}$	Übertragungsfunktion $G(p) = X_a(p) _{L\{\delta(t)\}=1}$
Anreg. $x_e(t)$	Einheitssprung $1(t)$	DIRAC-Impuls $\delta(t)$	DIRAC-Impuls $L\{\delta(t)\} = 1$
P proportional	K	$K \delta(t)$	$\frac{K}{p}$
I integral	$K \cdot t$	K	$\frac{K}{p}$
D differential	$K \cdot \delta(t)$		$K \cdot p$
PT₁ Verzöger. 1. Ordn.	$K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$	$\frac{K}{T} e^{-\frac{t}{T}}$	$\frac{K}{1 + pT}$
PT₂ Verzöger. 2. Ordn.	$K \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$	$K \left(\frac{e^{-\frac{t}{T_1}}}{T_1} + \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{T_2}\right)$	$\frac{K}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$
PT_L Laufzeit	$K \cdot 1(t - T_L)$	$K \cdot \delta(t - T_L)$	$K \cdot e^{-T_L p}$

▲ Bild 2.

Mathematische Beschreibungen der Grundübertragungsverhalten.

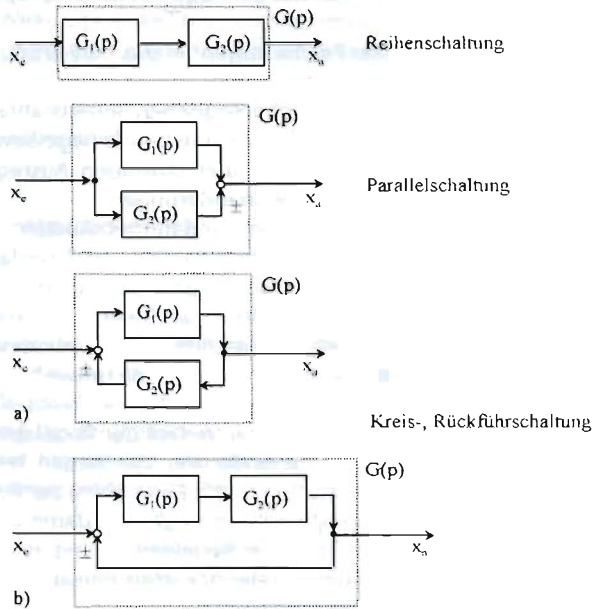


Bild 3. Zusammenschaltung linearer Übertragungsglieder. ►

- **PI-Regler**
keine bleibende Regelabweichung; schnellere Ausregelung als beim I-Regler; für alle Strecken geeignet
- **PID-Regler**
keine bleibende Regelabweichung; hohe Regelgüte erreichbar, wenn der Anteil der Laufzeit am Zeitverhalten der Regelstrecke gering ist; schwierige Einstellung

Die stetigen Regler sollen im Weiteren Gegenstand der Betrachtung sein, da sie auf Grund ihrer ständigen Regelung dem Prozess wesentlich schneller folgen. Damit lässt sich eine wesentlich höhere, gegenüber unstetigen Reglern,

Regelgenauigkeit erreichen. Die verbesserte Regelgenauigkeit bringt im Allgemeinen eine Einsparung an.

Das Übertragungsverhalten $G(p)$ eines Regelkreises ergibt sich aus der Reihenschaltung des Übertragungsverhaltens der Regeleinrichtung $R(p)$ und des der Regelstrecke $S(p)$ bei Auftrennung der Rückkopplung.

$$G(p) = R(p) \cdot S(p)$$

Da das Übertragungsverhalten der Strecke durch die technischen, naturwissenschaftlichen oder technologischen Bedingungen meist vorgegeben ist, kann zur Erreichung eines bestimmten Übertragungsverhaltens des Regelkreises nur das der Regeleinrichtung $R(p)$ frei gewählt werden.

Die Forderungen an das Übertragungsverhalten des Regelkreises beziehen sich auf:

- den technologischen Betriebsablauf
- das statische (bleibende Regelabweichung) und dynamische Verhalten (Stabilität, Überspringen, Ausregeln) bei Führungs- und Störgrößenänderungen
- Investitions- und Betriebskosten
- die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit (Ausfallwahrscheinlichkeit)
- die Realisierungsmöglichkeit durch die verfügbare Technik
- das Verhältnis zum Bedienpersonal (Arbeitsbedingungen, Mensch-Maschine-Kommunikation)
- die Auswirkung auf die Umwelt

Der zeitliche Verlauf der Regelabweichung $x_w(t)$ nach einer Führungs- oder Störgrößenänderung, der wegen stets vorhandener Trägheit nicht der Idealwert $x_w(t) \Rightarrow 0$ sein kann, dient zur Bewertung der Qualität einer Regelung. Die Regelabweichung $x_w(t)$ und damit auch die optimale Wahl des Übertragungsverhaltens der Regeleinrichtung $R(p)$ hängt vom jeweiligen Eingangssignal, der Führungs- oder der Störgröße ab.

Bei der Festlegung der Regeleinrichtung $R(p)$ müssen

- der zeitliche Verlauf der Regelgröße
 - der zeitliche Verlauf der Störgröße
 - die Angriffsstellen der Störgröße
 - der zeitliche Verlauf der Führungsgröße
- untersucht werden.

3.2 Verbesserte Steuerungskonzepte

Ausgehend von den Vor- und Nachteilen der offenen und geschlossenen Steuerung liegt es nahe, Strukturen anzuwenden, die die Vorteile von beiden Systemen vereinen und damit die Nachteile weitgehend eliminieren. Solche Steuerungsstrukturen lassen sich, im Gegensatz zu den Grundregelkreisen, nur noch mit mehrschleifigen Regelkreisen aufbauen.

Die bekanntesten Methoden sind:

- die Störgrößenaufschaltung
- die Nutzung einer Hilfsregelgröße
- die Nutzung einer Hilfsstellgröße

3.2.1 Störgrößenaufschaltung

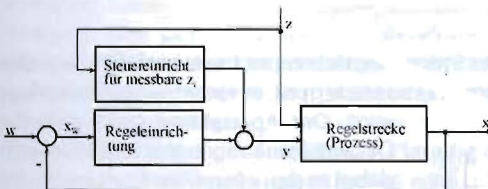
Durch die Methode der *Störgrößenaufschaltung* (siehe **Bild 4**) können die Einflüsse der messbaren Störgrößen, deren Reaktionsort in der Regelstrecke lokalisierbar ist, mittels zusätzlicher Stellsignale vollständig oder teilweise aufgehoben werden. Der Auswirkung der Störgrößen wird durch zusätzliche Reaktionen der Regeleinrichtung bereits vor ihrer Wirkung auf die Steuerstrecke entgegengewirkt. Diese zusätzliche Steuerung wird dem bestehenden Regelkreis überlagert.

Damit bleibt der Regelkreis einschleifig und es wird

- das Führungsverhalten nicht geändert.
- die Stabilität nicht beeinflusst.
- aber nur der aufgeschalteten Störgröße entgegengewirkt.

3.2.2 Nutzung einer Hilfsregelgröße

Eine andere Möglichkeit der Verbesserung des Regelalgorithmus stellt die Einführung einer *Hilfsregelgröße* (siehe **Bild 5**) dar. Das bedeutet, dass aus solch einer Hilfsregelgröße, die im Inneren der Regelstrecke gemessen werden kann, ein zusätzliches Stellsignal zur Verbesserung des Regelkreisverhaltens abgeleitet wird. Diese Hilfsregelgröße reagiert auf Störgrößen, die am Streckeneingang mit einer geringeren Trägheit als die Regelgröße angreifen.



▲ **Bild 4.** Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung.

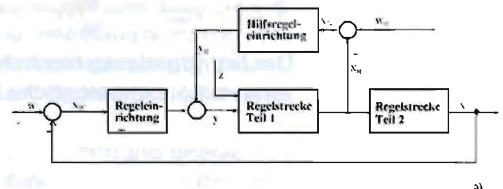
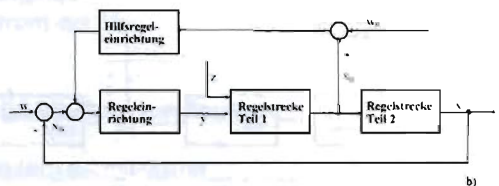


Bild 5. Regelkreis mit Hilfsregelgrößenaufschaltung auf den Streckeneingang (a) und auf die Regelabweichung (b). ▶



Mit der Aufschaltung einer Hilfsregelgröße wird angestrebt, die Störgrößen bereits durch die innere Schleife mit geringerer Trägheit auszuregeln, wodurch das dynamische Verhalten des Kreises durch die innere Rückführung verbessert wird.

Dabei kann die Aufschaltung der Hilfsregelgröße entweder

- auf die Stellgröße (Streckeneingang) oder
- auf die Regelabweichung (Reglereingang) erfolgen.

Mit der Aufschaltung einer Hilfsregelgröße wird eine zusätzliche Schleife im Regelkreis geschaffen, die

- das Führungs- und Störverhalten verändert.
- die Stabilität des Kreises beeinflusst.
- allen Störgrößen, bevorzugt aber denen innerhalb der Schleife angreifenden, entgegenwirkt.

3.2.3 Nutzung einer Hilfsstellgröße

Eine Möglichkeit, die allgemein zur Verbesserung des Verhaltens eines Regelkreises dient und gleichzeitig erfolgversprechend für die Steuerstrategie bei Wassergewinnungsprozessen ist, stellt die Anwendung einer *Hilfsstellgröße* (siehe **Bild 6**) dar. Mit dieser Hilfsstellgröße, die wie die Hauptstellgröße aus der Regelabweichung abgeleitet wird, kann, wenn Stellmöglichkeiten vorhanden sind, im Inneren der Regelstrecke zusätzlich auf die Regelgröße mit geringerer Trägheit als durch die Hauptstellgröße eingewirkt werden.

Die Hilfsstellgröße dient zum schnelleren Abbau einer Regelabweichung, die durch

- Änderung der Führungsgrößen und
- angreifende Störgrößen in Nähe des Streckenausganges entstehen.

3.3 Hierarchische Steuerungskonzepte

Der Grundgedanke hierarchischer Steuerungskonzepte besteht darin, dass das technisch/- technologische System, das zu steuern ist, in einzelne Stufen zerlegt wird. Der Abstraktionsgrad und die Detaildarstellung unterscheiden sich dabei in den einzelnen Stufen.

Erste Ebene: In der *Prozessebene* erfolgt die Automatisierung vor Ort. Diese Ebene ist für die Erfassung und Überwachung der Prozessparameter und für die Auslösung der Steuerbefehle direkt an der technologischen Steuerstrecke verantwortlich.

Zweite Ebene: In der *prozessnahen Ebene* werden die Verarbeitung und

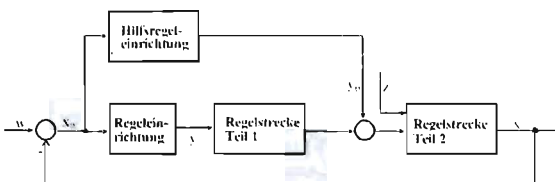


Bild 6. Regelkreis mit Hilfsstellgröße

die Überwachung ausgewählter Prozessparameter sowie eine weitere Datenverdichtung für die weitere Verarbeitung in der übergeordneten Ebene, für die Stabilisierung und für die dezentralisierte Koordinierung des Systems durchgeführt. In dieser Ebene wird die Basisautomatisierung durchgeführt.

Dritte Ebene: Die *zentrale Ebene* übernimmt die Berechnung und Vorgabe der Sollwerte bzw. Führungsgrößen, die zentralisierte Steuerung, Überwachung, Optimierung und Koordinierung des Systems eines technologischen Prozesses sowie die Kontrolle der Hilfsprozesse. In dieser Ebene sind die zentralen Warten angesiedelt.

Ab vierter Ebene: In der *vierten* und in *weiteren Ebenen* werden die Koordinierung und Optimierung der Gesamtsysteme aller technologischen Prozesse vorgenommen. Sie wird deshalb als *Dispatcherebene* oder als *überregionale Ebene* bezeichnet.

4. Wasserwirtschaftliche Beispiele

4.1 Regelungen von Abwasserbehandlungsanlagen

4.1.1 Allgemeines

Für einen erfolgreichen Einsatz von Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik bei der Automatisierung abwassertechnischer Systeme und Anlagen ist ein gutes Zusammenwirken verschiedener Fachdisziplinen unumgänglich. Dies wird u.a. in [1] nachdrücklich formuliert und an Beispielen erläutert. Spricht man von Automatisierung, so rückt häufig die gerätetechnische, die Instrumentierungsseite, dominant in den Vordergrund. Hierbei darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Instrumentierung lediglich eine Umsetzung dessen ist, was zuvor als Steuerungs- und Regelungskonzept erarbeitet wurde.

Die Erfahrung lehrt, dass angesichts der Verschiedenartigkeit und Vielfalt abwassertechnischer Anlagen – keine Kläranlage gleicht einer anderen – ein kritikloser Rückgriff auf Wiederhol-Lösungen problematisch sein kann. Dieser Umstand tritt beim eigentlichen Steuerungs- und Regelungskonzept, das naturgemäß eng mit der verfahrenstechnischen Anlagengestaltung zusammenspielt noch stärker zu Tage als bei der Planung und Projektierung der gerätetechnischen Auslegung.

Die Bedeutung einer sorgfältigen Planung des zur Anwendung gebrachten Steuerungs- und Regelungskonzeptes wird u.a. in den Merkblättern der DWA [2, 3 und 4] hervorgehoben. Im Einklang mit der obigen Bemerkung umfasst der Bearbeiterkreis dieser Merkblätter sowohl Experten der Siedlungswasserwirtschaft als auch Mess- und Regelungstechniker.

Neben den allgemeingültigen Anforderungen an die Funktion von Regelungen wie z.B.

- stabiles Regelverhalten, d.h. beispielsweise Verhindern permanenter Schwingungen und

- der Erreichung von akzeptablen Einregelzeiten und einer ausreichenden Störunterdrückung
- werden an die Funktion von Regelungen auf Kläranlagen insbesondere Forderungen nach Ausschöpfung des Potentials dieser Regelungen bezüglich der
- Minimierung von Betriebskosten
 - und der sicheren Einhaltung von Grenzwerten bzw. der Minimierung der Konzentrationen von Inhaltsstoffen im Ablauf der Anlage
- gestellt. Es hat sich gezeigt, dass sich diese Anforderungen nicht im Selbstlauf erfüllen, sondern eine sorgfältige Planung und Inbetriebnahme erfordern.

Folgende Steuerungen/Regelungen sind für den Kläranlagenbetrieb von größerer Bedeutung:

- Belüftungsregelung (Anpassung der Sauerstoffzufuhr an den Bedarf)
- Regelung von Schlammalter oder Trockensubstanzgehalt
- Regelungen/Steuerungen der N-Elimination (gezielte Verbesserung der Stickstoffelimination durch Regelungstechnische Maßnahmen)
 - Rezirkulationssteuerungen
 - Kaskadenregelung zur Vorgabe der Sauerstoffsollwerte
 - Zeitliche/ räumliche Anpassung der Nitrifikations- und Denitrifikationszonen
- Regelungen/Steuerungen zur PO_4 -Fällung

Zwei ausgewählte Regelungen werden im Folgenden beispielhaft vorgestellt.

4.1.2 Auswirkung der Reglerwahl am Beispiel von Sauerstoff- und Ammoniumregelungen

Sowohl für die Reinigungsleistung als auch für den kosteneffektiven Betrieb einer Kläranlage ist die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen von größter Bedeutung. Da der benötigte Sauerstoffbedarf stark schwankt, ist es unstrittig, dass eine geeignete Steuerung und Regelung der Belüftung die Basis für die Automatisierung jeder Kläranlage darstellt.

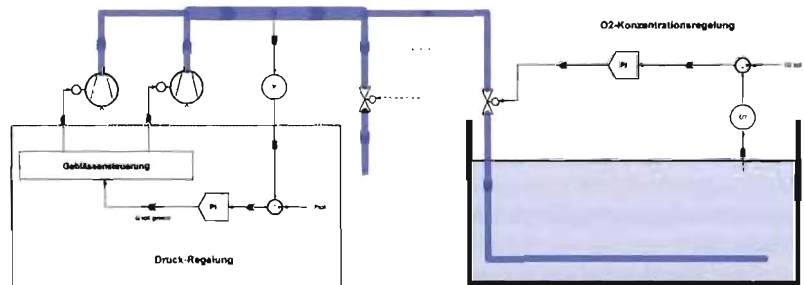


Bild 7.
Kaskaden-
regelung
Sauerstoff.

Für die Realisierung der Belüftung existiert eine Vielzahl von Varianten.

- Direkte O_2 -Regelung: Regelgröße: O_2 im Belebungsbecken, Stellgröße: Gebläsedrehzahl (Drehkoben) bzw. Luftmenge (Turbo) oder Regelung mit Oberflächenbelüftern
- Kaskadenregelung: Regelgröße: O_2 im Belebungsbecken, Stellgröße: Stellung Blendenregulierschieber einer Stichleitung, Druckregelung für Sammelschiene (siehe **Bild 7**)
- NH_4 -Regelung mit der direkten Stellgröße Belüftungsintensität

Für eine Kaskadenregelung ist zum Beispiel auszuwählen, mit welchem Regler die Sauerstoffkonzentration geregelt werden soll. Hier wird das Verhalten eines P-Reglers, eines I-Reglers und eines PI-Reglers untersucht. In **Bild 8** ist die so genannte Führungsübergangsfunktion für diese drei Reglertypen dargestellt. Das dargestellte Verhalten wurde hier in einer Simulationsstudie ermittelt (siehe z.B. [5] zu Details dieser Vorgehensweise).

Für jeden Regler wird in einer Situation konstanter Belastung der Sauerstoff-Sollwert von 2 mg/L auf 3 mg/L erhöht. Der Zeitverlauf der Regelgröße (Sauerstoffkonzentration im Becken) wird im oberen Teil des Bildes dargestellt. Im unteren Teil des Bildes ist der Verlauf der Stellgröße (Luftmenge) dargestellt. Die unterschiedlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Reglertypen sind hier gut zu erkennen. Der Proportional-Regler (P-Regler) realisiert von den drei betrachteten Reglertypen den schnellsten Übergang vom alten auf den neuen Sollwert. Charakteristisch für diesen Reglertyp ist aber, dass der geforderte Sollwert nicht exakt erreicht wird. Es gibt eine systematische, bleibende Regelabweichung von hier ca. 0,2 mg/L, die von der realisierten Kreisverstärkung abhängig ist. Für typische Mess- und Stellverzögerungen auf einer großtechnischen Kläranlage wird die bleibende Regelabweichung nicht akzeptabel sein. Ein zweiter möglicher Nachteil eines reinen P-Reglers liegt in dem Stellaufwand, mit dem das schnelle Verhalten des Regelkreises erkauft wird,

Der integrale Regler (I-Regler) verhält sich von den Eigenschaften her nahezu diametral. Hier ist das Regelverhalten deutlich langsamer (für diese Regelungsaufgabe zu langsam) und tendiert eher zu schwingendem (im Extremfall instabilen) Verhalten, wenn man versucht, die Geschwindigkeit des Regelkreises zu verbessern. Der gewünschte Sollwert wird auf mittlere Sicht exakt realisiert. Darüber hinaus geht dieser Regler am sanftesten mit der Stellgröße (Luftmenge) um. Prinzipiell treten keine Sprünge im Verlauf der Stellgröße auf und

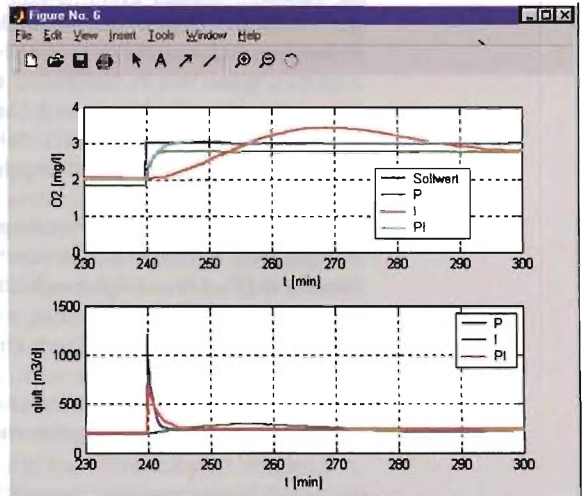
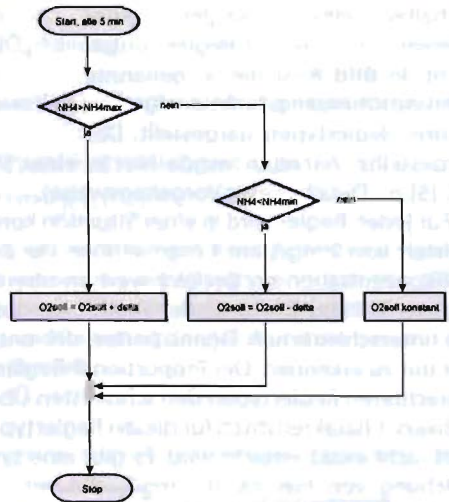
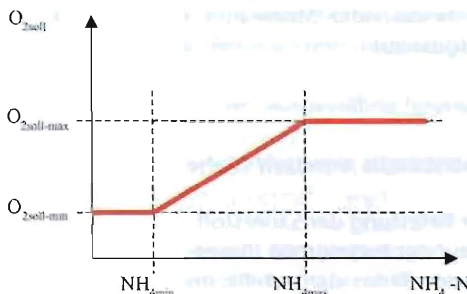


Bild 8. Sauerstoffregelung mit P-, I- und PI Regler (Simulationsstudie, Mess- und Stelldynamik vernachlässigt).

es werden im Regelverlauf auch nur moderate Absolutwerte für die Stellgröße gefordert. Der in gewisser Weise das Beste aus beiden Reglertypen vereinende PI-Regler erscheint vor dem Hintergrund dieser Eigenschaften als die zu bevorzugende Wahl. Wie in Abbildung 8: Sauerstoffregelung mit P-, I- und PI-Regler (Simulationsstudie, Mess- und Stelldynamik vernachlässigt) ersichtlich, ist das Regelverhalten des PI-Reglers nahezu genauso schnell wie ein P-Regler, vermeidet aber eine bleibende Regelabweichung und beansprucht die Stellgröße deutlich weniger.

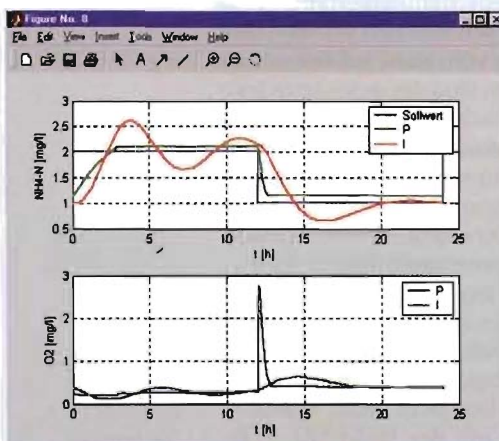
Diese Diskussion ist nicht ohne praktische Bedeutung, da in der Ausschreibungspraxis durch Bauingenieure Funktionsbeschreibungen erarbeitet werden die auf P- oder I-Reglerverhalten hinauslaufen. In **Bild 9** sind zwei Beispiele aus Pflichtenheften dargestellt, wie eine Ammoniumregelung, die als Kaskadenregelung auf den Sollwert einer unterlagerten Sauerstoffregelung wirkt, implementiert werden soll.

Eines dieser Mittel ist die Beschreibung eines hypothetischen Programmablaufes, z.B. mit einem Programmablaufplan (PAP) (**Bild 9**, rechts). Dieser Pro-



▲ **Bild 9.**

Beschreibungen für Ammoniumregler.



◀ **Bild 10.** Ammoniumregelung mit P- und I- Regler (Simulationsstudie).

grammablaufplan beschreibt ein zyklisch ausgeführtes Programm, das bei Über- oder Unterschreitung von bestimmten Schwellwerten bezüglich der Ammoniumkonzentration den Sauerstoff-Sollwert um einen bestimmten Betrag vergrößert oder verkleinert. Dies entspricht grob einem integral wirkenden Regler. Im Gegensatz dazu beschreibt die Kennlinie auf dem linken Teil von **Bild 9** einen P-Regler. Das resultierende Verhalten ist in **Bild 10** dargestellt.

Als Test des Verhaltens der beiden Reglertypen wurde der Ammonium-Sollwert von 1 mg N/L auf 2 mg N/L erhöht und wieder abgesenkt. An der Zeitachse wird deutlich, dass die Anregelzeit im Vergleich zu der Sauerstoffregelung im Bereich von Stunden und nicht von Minuten liegt. Für den I-Regler ist festzustellen, dass insbesondere die Ausregelzeit auf Grund der signifikanten Schwingungsneigung viel zu groß ist, um auf kurzfristige Lastschwankungen zu reagieren. Es muss sogar in Frage gestellt werden, ob sich mit diesem Regler eine Anpassung an die typische Lastschwankung über einen Tag (Tagesspitze und Nachtsenke) sinnvoll ermöglichen lässt. Für einen P-Regler hingegen ist eine ausreichend schnelle Reaktion auf Tagesschwankungen möglich. Am unterschiedlichen Verlauf der Kurve für die Erhöhung des Sollwertes im Vergleich zu einer Absenkung wird der ausgeprägt nichtlineare Charakter dieser Regelung deutlich. Wenn die Reaktionsgeschwindigkeit der Regelung nicht ausreicht, um steile Lastanstiege zu beherrschen, kann eine Berücksichtigung einer Störgrößenaufschaltung (z. B. Zulaufwassermenge) ins Auge gefasst werden.

Trotz der bei den biologischen Prozessen einer Kläranlage gegebenen Einschränkungen ist ein interessantes Verbesserungspotential durch steuerungs- und regelungstechnische Maßnahmen gegeben. Bei hoch belasteten Anlagen kann dieses Potential zur Reduktion von Ablaufspitzen genutzt werden und bei normal und schwach belasteten Anlagen kann eine Verbesserung der mittleren Ablaufwerte und des Energieeinsatzes erreicht werden.

4.2 Prozesse im Boden und Grundwasserbereich

Auch für die gezielte Beeinflussung von natürlichen Prozessen im Boden und Grundwasserbereich lässt sich die Steuerungstheorie anwenden. Im Gegensatz zu der Automatisierung bei technisch/technologischen wasserwirtschaftlichen Prozessen handelt es sich bei den Naturprozessen um Vorgänge, die im Kontinuum ablaufen und verteilte Parameter und Zustandsgrößen besitzen.

4.2.1 Regelung einer Uferfiltratfassung

Bei der Analyse derartiger Regelkreise gilt es als erstes die Regelstrecke zu definieren. Diese ist der Prozess innerhalb des Bodens und Grundwasserbereiches, deren Zustandsvariable beeinflusst, d.h. geregelt werden soll, also die Regelgröße liefert. In **Bild 11** ist der schematische Regelkreis zur Optimierung der Rohwasserqualität für eine Uferfiltratfassung dargestellt. Die Regelgröße ist laut Aufgabenstellung die Rohwasserqualität, die durch die Prozesse im Grundwasserleiter bestimmt wird. Damit ist die Regelstrecke in dem Fall die Grundwasserströmung einschließlich des Stofftransportprozess in dem hydraulisch

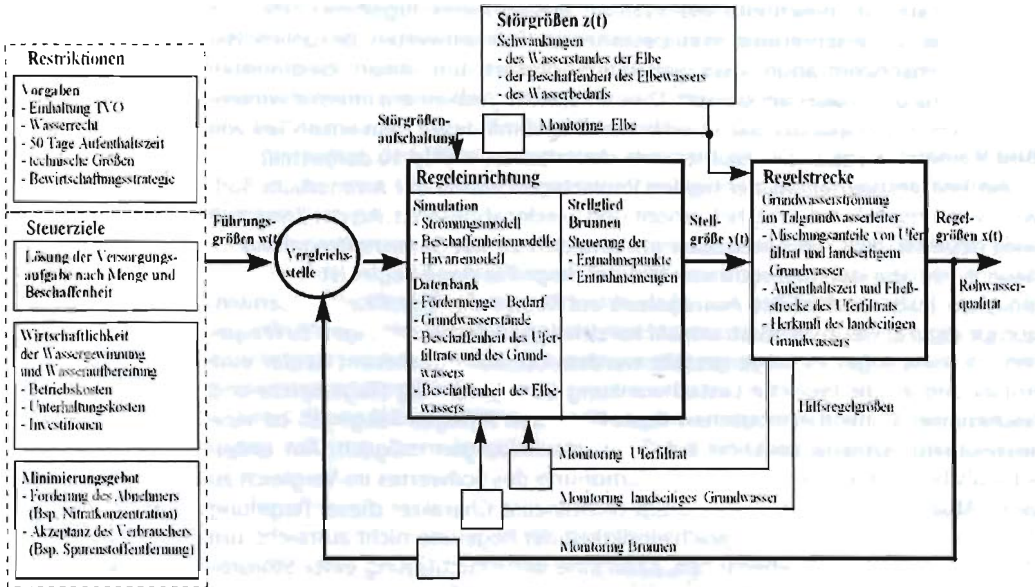


Bild 11. Schematischer Regelkreis zur Optimierung der Rohwasserqualität (nach Grischek 2002).

wirksamen Grundwasserbereich zwischen dem Fluss, den Förderbrunnen und einem landseitigen Zuflussbereich.

Diese Prozesse der Regelstrecke können durch die Stellgrößen, wie z.B. der Förderrate der Brunnen, gesteuert werden. Als Störgrößen, Größen die unabhängig von außen auf die Strecke einwirken, treten in diesem System der sich ändernde Wasserstand des Flusses, Schadstofffrachten des Flusses und des landseitigen Zuflusses, z.B. durch Infiltration aus Depositionen. Weiterhin ist der sich ändernde Wasserbedarf auch als Störgröße zu bezeichnen.

Als Führungsgrößen sind hier Vorgaben zu nennen, die sowohl aus Restriktion (Einhaltung von Vorschriften, Regeln und Gesetzen) als auch als Steuerziele (Menge und Beschaffenheit des Rohwassers, Wirtschaftlichkeit, Minimierungsgebot) zu betrachten sind. Derartig komplexe Führungsgrößen können nicht mehr allein durch einen einfachen Vergleich mit der Regelgröße zur Bildung der Regelabweichung und damit zur Stellgröße herangezogen werden.

In diesem Fall wird die Steuerungsstrategie mittels der Simulation der Regelstrecke auf der Basis eines komplexen geohydraulischen Modells des Grundwasserleiters abgeleitet. Unterstützt wird das geohydraulische Modell durch entsprechende Datenbanken. Weiterhin wird die Simulation durch aktuelle Messwerte verschiedener Zustandsgrößen, wie z.B. die Rohwasserqualität

(Regelgröße), das Uferfiltrat (Hilfsregelgröße), der landseitige Zufluss (Hilfsregelgröße) und der Störgrößen (Flusswasserstand und -qualität, Wasserbedarf).

Damit ist zu erkennen, dass es sich in diesem Beispiel nicht nur um einen einfachen Regelkreis handelt, sondern die Strukturen der verbesserten Regelkreise mit Hilfsregelgrößen und Störgrößenaufschaltung zur Anwendung kommen, wodurch die Eigenschaften und die Qualität des Regelkreises wesentlich verbessert werden können.

4.2.2 Hierarchisches Blockmodell zur Regelung von Bodenprozessen

Mittels der Methode der hierarchischen Blockmodelle können die Nachteile der Regelkreise bei der Steuerung der Prozesse in der Bodenzone vermieden werden.

Die mathematischen Modelle der Stofftransport- und -umsatzprozesse im Boden und in der Grundwasserzone können auf unterschiedlichen Abstraktionsgrad entwickelt werden. Die Modellbildung geht dabei beispielsweise von folgenden Fragestellungen aus: Warum soll das Modell entwickelt werden, Welches Ziel soll mit dem Modell erreicht werden, Was ist der räumliche und zeitliche Maßstab/Auflösung des Modells, Wer sind die Nutzer des Modells.

Für die Modellbildung, der Modellierung, können verschiedene Methoden benutzt werden. Die theoretische Prozessanalyse liefert Differentialgleichungen, im Fall der Prozesse im Boden und Grundwasserbereich sind es partielle. Mittels der experimentellen Prozessanalyse erhält man das Übertragungsverhalten (siehe Abschnitt 3.1.3) beschreiben. Diese Methode wird auch als Black-Box-Methode bezeichnet. Zu dieser Art der Analyse zählen auch die Anwendung des Faltungs-Integrale und die Neuronale Netze. Neben den deterministischen Beschreibungen werden auch Methoden der Wissensverarbeitung in Form von verbalen Regeln und Aussagen (verbale Prozessbeschreibung) eingesetzt.

Neben den prozessbeschreibenden Modellen gehören auch die zustandsbeschreibenden Modelle in Form von numerischen, Intervall- und Wissens-Datenbanken. Moderne Methoden der Modellbildung benutzen hierarchische Regelungsstrukturen mit integrierten Modellen auf der Basis numerischer, wissensbasierter und Fuzzy-Logik-Methoden.

Die Regelung von Prozessen im Boden und Grundwasserbereich auf der Basis derartiger Modelle werden als Entscheidungshilfe Systeme aufgebaut. Dabei übernimmt zwar das Modell die Bildung der Regelabweichung aus dem Vergleich der Regelgröße und der Führungsgröße (Soll-Ist-Wert-Vergleich) und schlägt Varianten für die Bildung der Stellgröße vor. Auf Grund der Komplexität und der Unschärfe des Systems muss aber der Mensch als Entscheidungsträger die Verantwortung für die Ausführung der Stellgröße, d. h. die Beeinflussung der Prozesse, übernehmen. Man spricht in dem Fall auch von einem off-line Regelkreis (off-line closed-loop controlling).

Bild 12 zeigt einen mehrschleifigen Regelkreis mit Blockmodellstruktur. Dabei werden die Simulationen zur Bildung der Regelabweichung durch ein reduziertes Blockmodell durchgeführt. Dieses Blockmodell ist von den komplexen Detailmodellen (numerisch, wissensbasierte und Intervallarithmetik) abgeleitet, wobei die wesentlichen Charakteristika, die Widerspiegelung der Prozesse

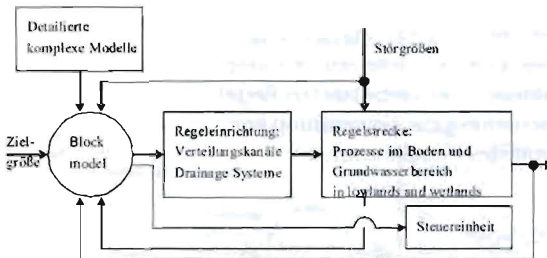


Bild 12. Mehrschleifiger Regelkreis mit Blockmodellstruktur.

im Boden, erhalten bleiben. Diese reduzierten Blockmodelle haben den Vorteil, dass sie wesentlich einfacher zu handhaben sind, weniger Eingangsdaten (Parameter und Zustandsgrößen) benötigen und eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit besitzen, so dass sie auch im Echtzeitbetrieb eingesetzt werden können.

Auch bei diesem Beispiel der gesteuerten Sanierung von Altlastenflächen werden die Methoden der Störgrößen-, der Hilfsregelgrößen- und der Hilfsstellgrößenaufschaltung benutzt.

Dieses hierarchische System unter Verwendung sowohl numerischer als auch wissensbasierter Daten mit Angaben der Unsicherheiten (Intervalldaten) hat folgende Vorteile. Die Anzahl der Messpunkte in Bezug auf den Raum als auch die zeitliche Abfolge zur Überwachung der Prozess kann mittels Simulation optimiert werden. Dadurch können die Kosten reduziert werden, was besonders bei langzeitlichen Sanierungsstrategien von Bedeutung ist. Gleichzeitig haben die Messwerte eine höhere Repräsentanz. Durch die Kombination von numerischen und wissensbasierten Daten erhält man mehr Informationen über den Prozess und die Widerspiegelung des Prozesses wird verbessert. Durch die Angabe von Unsicherheiten (Toleranzbereich der Messwerte) weisen auch die Simulationsergebnisse, d.h. die empfohlenen Stellgrößen, ein Konfidenzintervall aus. Dies kann auch als Basis einer Risikoabschätzung benutzt werden.

5. Zusammenfassung

Nach den eingangs dargestellten Zielen und Aufgaben der Automatisierung werden Grundlagen der Steuerungstheorie dargestellt. Diese Darstellung ist als Ergänzung und theoretischer Hintergrund zu den in der Literatur, insbesondere in den Fachbereichsstandards, wie z. B. den DVGW- und DWA-(DVWK)-Merkblättern (s. [6–12]), gedacht. Einerseits werden die Begriffe Steuerung und Regelung mit den dazugehörigen Zustandsgrößen und den Systemen, wie der Strecke und der Einrichtung aus Sicht des Automatisierungstechnikers, dargestellt.

Neben den einfachen Regelkreisen werden auch kompliziertere Strukturen und mehrschleifige Kreise, die die Nachteile der Regelung vermeiden, mindestens minimieren sollen, diskutiert. Zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens von Strecken und Einrichtungen werden die speziellen Funktion wie Übergangs-, Gewichts- und Übertragungsfunktion definiert und die mathematische Beschreibung dargelegt.

Anhand von praktischen Beispielen aus der Abwasserbehandlung in Klärwerken, der Gewinnung von Rohwasser in Wasserwerken und der Sanierung kontaminierter Böden und Grundwasserzonen werden die theoretischen

Grundlagen untermauert. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch die Anwendung von steuerungstechnischen Betrachtungsweisen, d.h. durch die Anwendung von Regelkreisstrukturen, auf die gezielte Beeinflussung von natürlichen Prozessen im Boden und Grundwasserbereich, eine Effizienzsteigerung bei der Förderung von Rohwasser und bei der Sanierung kontaminierter Böden erfolgte.

Autoren

Prof.-Dr.-Ing. habil.

Peter-Wolfgang Gräber

Technische Universität Dresden,
Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten
Systemanalyse
Pratzschwitzer Straße 15
D-01796 Pirna
Telefon: +49 (0)3501 530029
E-Mail: Peter-Wolfgang.Graeber@
tu-dresden.de
www.tu-dresden.de

Dr. **Jens Alex**

ifak - Institut für Automation und
Kommunikation e.V. Magdeburg
Werner-Heisenberg-Straße 1
D-39106 Magdeburg
Telefon: +49 391 9901469
E-Mail: jens.alex@ifak.eu
www.ifak.eu

Literatur

- [1] **P. Baumann:** Planungsfehler bei MSR-Systemen auf Kläranlagen, In: VDI-Berichte 1516, Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen – Konzepte, Erfahrungen, Trends, VDI Verlag, Düsseldorf 1999, S. 1–12.
- [2] **Merkblatt DWA-M 268:** Steuerung und Regelung der Stickstoffelimination beim Belebungsverfahren, Ausgabe 2006.
- [3] **Merkblatt ATV-DVWK-M 206:** Automatisierung der chemischen Phosphatelimination, Ausgabe 2001.
- [4] **Merkblatt ATV-DVWK-M 265:** Regelung der Sauerstoffzufuhr beim Belebungsverfahren, Ausgabe 3/2000.
- [5] **Alex, J., Jumar, U.:** Benchmark-Modell für anlagenweite Kläranlagenregelungen., at-Automatisierungstechnik, Jahrgang 57 (2009) Heft 12, S. 625–637 (2009)
- [6] **DIN 19 222:** Begriffe (DIN-Normen für Messen, Steuern, Regeln).
- [7] **DIN 19 225:** Benennung und Einteilung von Reglern (DIN-Normen für Messen, Steuern, Regeln).
- [8] **DIN 19 226:** Regelungstechnik und Steuerungstechnik; Teil 1: Begriffe, Allgemeine Grundlagen, Teil 5: Funktionelle Begriffe (DIN-Normen für Messen, Steuern, Regeln).
- [9] **DIN 19 227:** Regeln und Sinnbilder in der Verfahrenstechnik; Teil 1: Zeichen für die funktionelle Darstellung; Teil 2: Zeichen für die gerätetechnische Darstellung; (DIN-Normen für Messen, Steuern, Regeln).
- [10] **DIN 19 235:** Steuerungstechnik, Meldung von Betriebszuständen (DIN-Normen für Messen, Steuern, Regeln).
- [11] **DVG 86:** Überwachungs-, Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen in Wasserversorgungsanlagen. Regelwerk der DVWG W 645, Bonn, 2009. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH.
- [12] **DVK 93b:** Automatisierungstechnik in der Wasserversorgung. DVWK-Schriftenreihe WT 116. DVGW, 1993.
- [13] **Strohmann:** Automatisierungstechnik, Bd. 1 und 2. Oldenbourg Verlag, München, 1990.
- [14] **Töpfer, H. und Besch, P.:** Grundlagen der Automatisierungstechnik. Verlag der Technik, Berlin, 1987.
- [15] **Grischek:** Zur Bewirtschaftung von Uferfiltratfassungen an der Elbe, Diss. 2002, Technische Universität Dresden