

Der Regelkreis - ein universeller Begriff: Einführungsvorlesung

Autor(en): **Profos, Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **77 (1959)**

Heft 23

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-84263>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Der Regelkreis — ein universeller Begriff

DK 621—53

Einführungsvorlesung von Prof. Dr. P. Profos, gehalten an der ETH am 9. Mai 1959

1. Das Prinzip des Regelkreises und seine Verwirklichung in einfachen technischen Regelsystemen

Unter den Automatismen hat in unserer Zeit die automatische Regelung eine ganz besondere Bedeutung gewonnen. Sucht man nach grundlegenden Merkmalen zum Kennzeichnen und Abgrenzen des Begriffes «Regelung», so findet man die folgenden notwendigen Bedingungen:

1. Der effektive Wert der zu regelnden Grösse, kurz der Istwert der Regelgrösse, muss gemessen werden.
2. Der durch die Regelungswirkung anzustrebende Sollwert der Regelgrösse muss vorgegeben sein, beispielsweise als zeitliches Programm.
3. Die Wirkung der Regelung geht von einem Vergleich zwischen Istwert und Sollwert der Regelgrösse aus und bezweckt, die Differenz zwischen diesen beiden Werten möglichst zum Verschwinden zu bringen.
4. Der Regler muss den Istwert der Regelgrösse beeinflussen können.

Einzelne dieser Bedingungen gelten allerdings nicht nur für die Regelung, sondern auch für den gesteuerten Automaten. Auf die Regelung allein zutreffend ist indes die in diesen Bedingungen implizite enthaltene Aussage, dass hier die im Spiel befindlichen Wirkungen einen geschlossenen Kreis, den *Regelkreis*, bilden. Die Existenz des Regelkreises ist mithin ein grundlegendes Kennzeichen für den Begriff der Regelung.

Was damit gemeint ist, sei an einem einfachen Beispiel gezeigt, das für viele andere steht. Bild 1a stellt das vereinfachte Anlagenschema einer Raumtemperaturregelung dar. Der Zimmerthermostat misst als Regelgrösse die tatsächliche Raumtemperatur und stellt deren allfällige Abweichungen vom eingestellten Sollwert fest. Auf Grund dieser Abweichungen übt er in Form der Stellgrösse eine Regelwirkung auf den Ofen der Zentralheizung aus, die sich als Temperaturänderung auf den Radiator weiter überträgt. Der Kreis der Wirkungen, also der Regelkreis, wird dadurch geschlossen, dass die veränderte Heizwirkung die Raumtemperatur und damit wieder den Raumthermostaten beeinflusst. Die Vorgabe des Sollwertes erfolgt hier am Einstellknopf des Thermostaten, etwa entsprechend individuellen Behaglichkeitsansprüchen. Störend auf den durch die Regelung eingestellten Zustand in der Anlage kann zum Beispiel das Öffnen des Fensters wirken, was die Regelung zum Eingreifen veranlasst.

Bild 1b ist das zugehörige Blockschema. Es gibt das Generelle aus dem eben besprochenen Anlagenschema wieder: An der geregelten Anlage, dargestellt durch das Rechteck «Regelstrecke», wird die Regelgrösse x_r gemessen und auf den «Regler» übertragen. Dieser übt durch die Stellgrösse x_a wiederum seine Wirkung auf die Regelstrecke aus. Der geschlossene Wirkungskreis tritt bei dieser Darstellung besonders klar in Erscheinung. Von aussen wirken auf diesen Kreis die *Leitgrösse w*, die den Sollwertverlauf auf den

Regler überträgt, sowie die *Störgrösse z*, welche den äusseren Einwirkungen auf die Regelstrecke entspricht.

Die vom Konstruktiven praktisch völlig losgelöste Darstellungsweise der Regelungswirkungen im Blockschema (Bild 1b) ist nun von grosser Allgemeinheit, denn dieses Schema ist nicht nur für eine Temperaturregelung nach Bild 1a gültig, sondern es ist das Prinzipschema für die automatische Regelung schlechthin. Auch beliebig viel komplizierter aufgebauten technischen Regelungen liegt letztenendes immer dieses Blockschema zugrunde. In ihnen ist das Prinzip des geschlossenen Regelkreises eingepreßt. Zwei weitere Beispiele mögen das noch etwas deutlicher zeigen.

Bild 2 zeigt das Blockschema einer vollautomatisch gesteuerten Werkzeugmaschine, bei welcher auf Grund der Angaben einer Zeichnung (links in Bild 2) zunächst das Arbeitsprogramm ausgearbeitet und auf Lochkarten oder Magnettonband übertragen wird. In dieser Form kann das Programm in einem Speicher zu weiterer Verwendung bereitgehalten werden. Der Speicher gibt nun während des Arbeitsvorganges seine Befehle als Leitgrössen auf die ver-

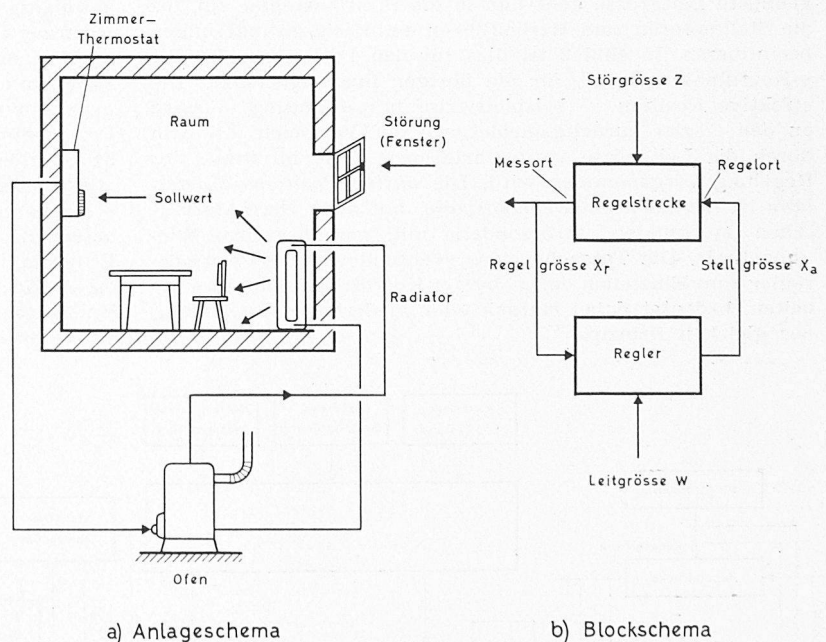


Bild 1. Schema einer Raumtemperaturregelung

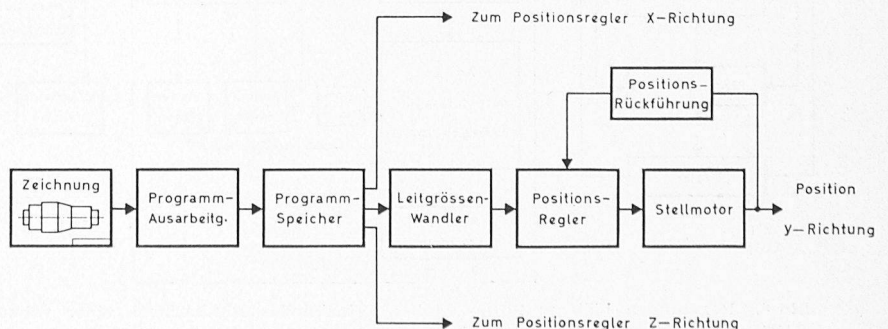


Bild 2. Blockschema einer vollautomatisierten Werkzeugmaschine

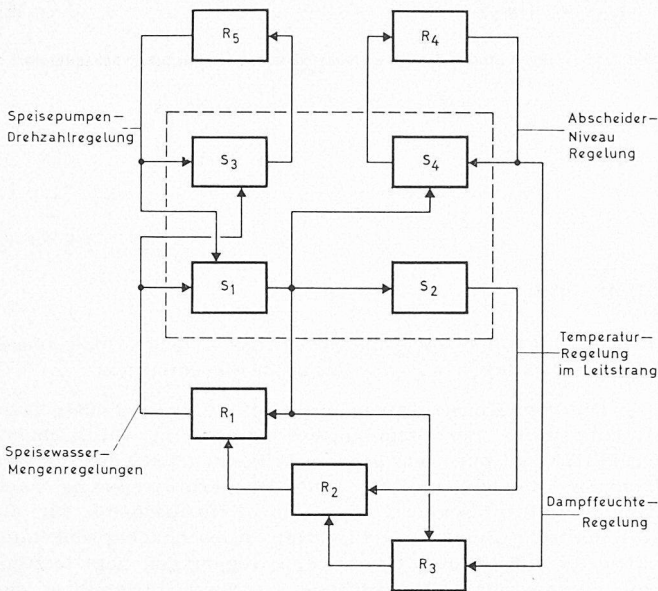


Bild 3. Beispiel einer vermaschten Regelschaltung (Speisewasserregelung eines Zwangsdurchlaufkessels)

S₁, S₂ Regelstrecken; R₁, R₂ Regler

schiedenen Positionsregler, die das Werkstück oder das Werkzeug führen. Dabei muss im allgemeinen eine Verstärkung der vom Speicher abgegebenen Signale und — bei digitalen Speichern — eine Interpolation zwischen je zwei zeitlich folgenden Positionsangaben durchgeführt werden. Die so gebildete Leitgröße geht nun in die Positionsregler ein, die die Stellmotoren zum Herbeiführen der Positionsänderungen beeinflussen. In Bild 2 ist dies für den Positionsregler der *y*-Koordinate gezeigt, für die übrigen nur angedeutet. Die effektive Position — beispielsweise in *y*-Richtung — wird an den Regler zurückgemeldet, wo der Vergleich mit dem durch die Leitgröße vorgeschriebenen Wert im Sinne der Regelung vorgenommen wird. Die *aktive Positions-Einstellung* ist demnach ein *Regelvorgang* mit allen charakteristischen Merkmalen, insbesondere mit geschlossenem Wirkungskreis. Die Tatsache, dass eventuell weitere Positionsregler zum Einstellen der *x*- bzw. *z*-Koordinaten simultan arbeiten, bedeutet dabei einfach eine wiederholte Anwendung des gleichen Prinzips.

Als weiteres, willkürlich gewähltes Beispiel sei etwa die Speiseregulation eines modernen Zwangsdurchlaufkessels erwähnt (Bild 3). Trotz dem aufs äusserste vereinfachten Blockschema liegt hier scheinbar ein kompliziertes Wirkungsgefüge vor, dessen Funktionsweise hier nur andeutungsweise beschrieben werden kann, wenn wir uns nicht in fachtechnische Einzelheiten verlieren wollen.

Die primäre Regelung ist eine Mengenregelung. Ihr Kreis wird durch die Regelstrecke S₁ und Regler R₁ gebildet. Sie wirkt als schnelle Grobregelung. Ihr Sollwert wird nun im Sinne einer langsameren, aber feineren Regelung durch einen Nebenregelkreis beeinflusst, der im wesentlichen durch die Zusammenschaltung der Rechtecke S₁, S₂, R₂, R₁ gebildet wird. Durch ihn werden Temperaturänderungen im Heizflächensystem auskorrigiert. Der Sollwert des Reglers R₂ wird seinerseits wieder — als weitere Verfeinerung — durch einen Nebenregelkreis eingestellt, der durch die Organe S₁, S₄, R₄, R₃, R₂, R₁ gegeben ist und der für konstante Dampfdrücke am Verdampferaustritt des Kessels sorgt. Dabei ist in diesen Kreis noch eine Hilfsregelung, gegeben durch S₄ und R₄, eingeschaltet. — Schliesslich löst das Arbeiten der Grobregelung noch ein Nachstellen der Speisepumpendrehzahl aus, was durch die Organe S₃, R₅ erfolgt.

Die ganze Regelung ist also aus fünf ineinandergeschalteten, einzelnen Regelkreisen aufgebaut, mithin durch sinn-gemässe wiederholte Anwendung des ursprünglichen, einfachen Grundprinzips entstanden.

2. Der Regelkreis als Grundprinzip von Regelsystemen höherer Ordnung

Die Grundkonzeption des Regelkreises erweist sich aber auch noch als tragfähig, wenn zu Regelanordnungen einer höheren Stufe übergegangen wird, wie sie etwa bei der vollautomatischen Fabrikation oder beim vollautomatisierten Kraftwerk vorliegen [6]. Bild 4 zeigt links das Prinzipschema einer derartigen Anlage, bei welcher nicht nur das Programm des Prozesses allfälligen *äusseren Störungen* angepasst wird, die in *funktionellem Zusammenhang* mit dem Prozessablauf stehen, sondern wo auch äussere und innere Störeinflüsse automatisch einbezogen werden, zu deren Berücksichtigung *logische Entscheidungen* notwendig sind. Die erstgenannten Störungen führen in der Regel «Programmdeformationen» herbei, ohne die grundsätzliche Struktur des Programms zu ändern. So wird beispielsweise die Dauer eines Kochprozesses den veränderten Eigenschaften des Kochgutes angepasst, etwa durch Verlängerung der Dauer einzelner oder aller Phasen dieses Prozesses. Die zweitgenannte Art von Störungen ruft dagegen nach Änderungen der Struktur des Programmes, etwa indem eine weitere Maschinengruppe in Betrieb genommen oder eine Änderung des Schaltzustandes bzw. der Prozessführung veranlasst wird. — Dem Aufbau nach sind die den Programmverlauf bestimmenden Wirkungskreise dem primären Prozess-Regelkreis übergeordnet.

Beide Einwirkungen — diejenige im Sinne einer blossen Programmdeformation oder die der strukturellen Programmänderung — werden in den von uns betrachteten Fällen auf ihren Erfolg automatisch kontrolliert und wenn nötig korrigiert, ganz entsprechend unseren eingangs für eine Regelung aufgestellten Bedingungen. Es entstehen daher, wie das Prinzipschema links zeigt, Vermaschungen zwischen der primären Regelung und den übergeordneten Regelkreisen der Programmstruktur-Regelung. Auch diese Regelsysteme höherer Stufe sind deshalb im Sinne unserer Betrachtung lediglich als besondere Verknüpfung einzelner Regelkreise anzusehen. Wir wollen versuchen, uns dies an einem praktischen Beispiel

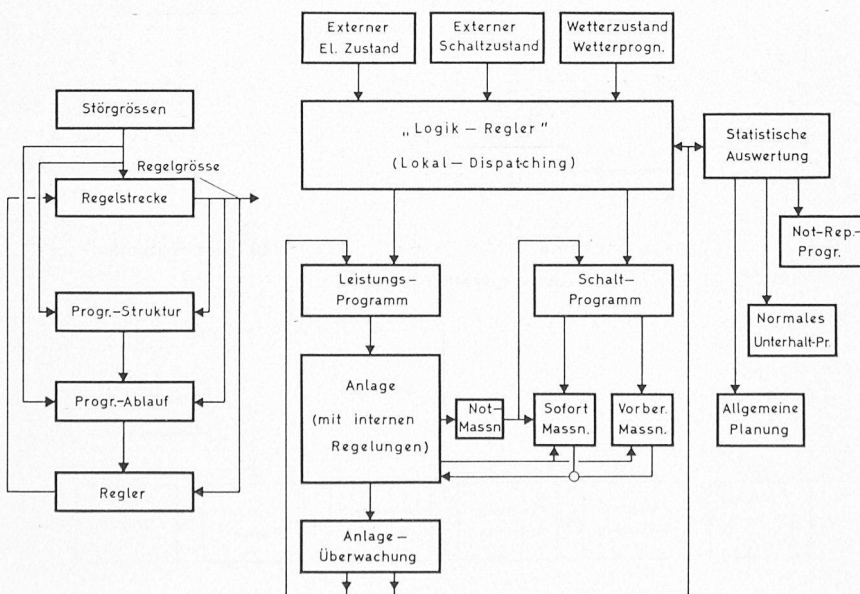


Bild 4. Regelungen höherer Stufe. Links: Prinzipielles Blockschema einer vollautomatisierten Anlage; rechts: Blockschema eines vollautomatisierten Kraftwerkes (stark vereinfacht)

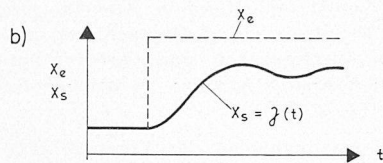
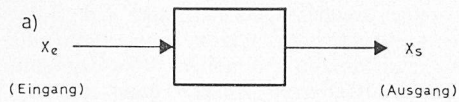
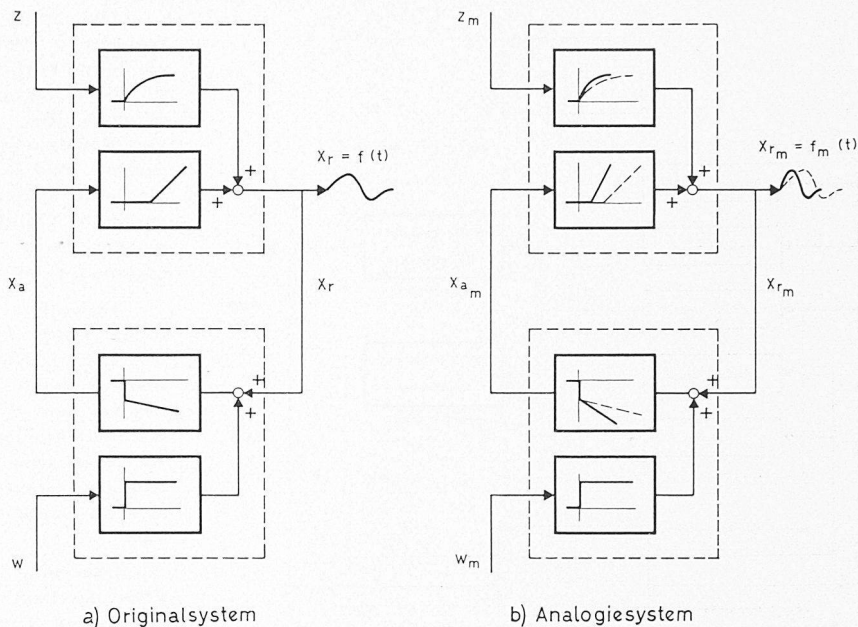


Bild 5. Darstellung des Uebertragungsverhaltens eines Elementes durch die Uebergangsfunktion $\gamma(t)$

- a) zur Definition der Ein- und Ausgangsgrösse
b) Beispiel einer Uebergangsfunktion

Bild 6 (rechts). Durch Einzeichnen der Uebergangsfunktionen vervollständigt Blockschema eines Originalsystems sowie eines entsprechenden Analogiesystems



noch etwas klarer zu machen. In Bild 4 wird rechts ein etwas ausführlicheres, aber immer noch stark vereinfachtes Schema eines derart vollautomatisierten Kraftwerkes gezeigt, das zur Zeit in den Vereinigten Staaten von Amerika im Bau steht [7]. Alle auf rein logischen Ueberlegungen beruhenden technischen Entscheide, die im konventionellen Kraftwerk vom Werkleiter bzw. vom lokalen «dispatching» getroffen werden, sind hier einem «Logik-Regler» überbunden. Die für diese Operationen notwendigen Informationen über den Anlagezustand und die äusseren Bedingungen werden diesem Regler zugeleitet, der sie verarbeitet und das Leistungs- und Schaltprogramm für die vorzunehmenden Eingriffe aufstellt. In der Folge werden die notwendigen Operationen vorbereitet und ausgeführt und deren programm-gemässer Ablauf überwacht. Aber auch die Auswirkungen dieser Eingriffe auf den Kraftwerkbetrieb stehen dauernd unter Kontrolle und veranlassen unter Umständen wiederum eine zeitliche oder strukturelle Programm-Aenderung.

Alle diese Wirkungen sind — sofern nur ihre Folgen wiederum automatisch überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden — Regelwirkungen im Sinne unserer ursprünglichen Definition, indem sie dem fundamentalen Prinzip des Regelkreises entsprechen. Die Tatsache, dass der «Logik-Regler» zum Beispiel mit der Wetterprognose, dem Schaltzustand des angeschlossenen Netzes, der Mitteilung vom Ausfall eines Hilfsmaschinenaggregates und ähnlichen Angaben nicht nur physikalische Messwerte im engeren Sinne verarbeitet, ändert daran nichts — wir haben einfach die dem Regler vermittelte Kunde über den Istzustand der zu überwachenden Anlage als «Information» zu bezeichnen, oder genauer als «logisch verwertbare Information».

3. Der Regelkreis als Grundlage dynamischer Untersuchungen — Analogiesysteme

Aus den bisherigen Ueberlegungen geht hervor, dass durch das Mittel des Blockschemas die grundsätzliche Wirkungsweise einer Regelung in qualitativer Hinsicht erschöpfend zum Ausdruck gebracht werden kann und dass bei einer solchen, von der mehr oder weniger zufälligen Geräteanordnung losgelösten Darstellungsweise das allen Regelungen Gemeinsame augenfällig in Erscheinung tritt. Der darin enthaltene erkenntnismässige Gewinn würde eine solche Abstraktion bereits vollauf rechtfertigen. Nun kann aber der Mitteilungsgehalt des Blockschemas noch wesentlich erweitert werden, wenn es durch die Angabe des Uebertragungsverhaltens der einzelnen Blöcke ergänzt wird (Bild 5). Das Uebertragungsverhalten eines durch einen solchen Block symbolisierten Mechanismus sagt aus, in welcher Art der zeitliche Verlauf der Ausgangsgrösse x_s von demjenigen der Eingangsgrösse x_e abhängig ist. Es kann zum Beispiel da-

durch ausgedrückt werden, dass der zeitliche Verlauf der Ausgangsgrösse x_s nach einer schrittweisen Aenderung der Eingangsgrösse x_e angegeben wird. Ein solcher Verlauf — «Uebergangsfunktion» genannt — ist in Bild 5 unten als Beispiel dargestellt und mit $\gamma(t)$ bezeichnet. — Hinsichtlich des gerätgemässigen Aufbaus des durch unser Rechteck symbolisierten Mechanismus ist diese Aussage wiederum völlig summarisch, so dass also beispielsweise ein und das selbe Uebertragungsverhalten durch ganz verschiedene gerätetechnische Mittel verwirklicht werden kann. So mag etwa die Niveaubewegung in einem Wasserreservoir in gleicher Weise auf eine Aenderung des Wasserzustromes antworten wie die Drehzahl einer Dampfturbine auf eine Belastungsänderung am Generator oder die Klemmenspannung an einem elektrischen Kondensator auf den Entladestrom. Bild 6 zeigt, wiederum als Beispiel, links ein Blockschema, das jetzt durch Angabe des Uebertragungsverhaltens der einzelnen Elemente in Form von Uebergangsfunktionen ergänzt ist; diese sind in die einzelnen Rechtecke eingezeichnet.

Mit Hilfe der Regelungstheorie kann nun auf Grund eines so vervollständigten Schemas das Verhalten der Regelung im Prinzip völlig übersehen werden. Allerdings ist eine geschlossene mathematische Behandlung nur bei linearen bzw. quasi-linearen Systemen generell möglich. Systeme, die nicht-lineare und insbesondere un stetig arbeitende Elemente enthalten, können indes immer durch schrittweise arbeitende Rechenverfahren erfasst werden, wobei digitale Rechenmaschinen vorzügliche Dienste leisten. Die allgemeinen, an kein bestimmtes gerätgemässiges System gebundenen Aussagen des vervollständigten Blockschemas ermöglichen ausserdem noch ein weiteres Rechenverfahren von sehr weittragender Bedeutung: die Analogierechnung.

Sofern es uns nämlich nur gelingt, durch elektrische, mechanische, hydraulische oder andere Mittel ein Ersatzsystem aufzubauen, das ein gleiches Blockschema — die Uebertragungsverhalten eingeschlossen — aufweist wie das zu untersuchende Originalsystem, so sind auch die Bewegungsverhalten der beiden Systeme identisch. Es können also zum Beispiel thermische oder chemische Systeme durch elektrische Analogiegeräte, an denen sich viel leichter experimentieren lässt, dargestellt werden. Ein besonderer Vorteil des Analogierechnens ist dabei, dass die Möglichkeit des Zeitraffens oder Zeitdehnens besteht; denn die physikalische Modellähnlichkeit ist bei gleicher Schaltung auch dann noch gewahrt, wenn nur die Uebergangsfunktionen des Analogons durch Multiplikation mit einem festen Faktor, einem Zeitverhältnis, alle zur Uebereinstimmung mit den korrespondierenden Uebergangsfunktionen des Originalsystems gebracht werden können. Das ist in Bild 6 angedeutet, in dem links das Blockschema eines Originalsystems, rechts das

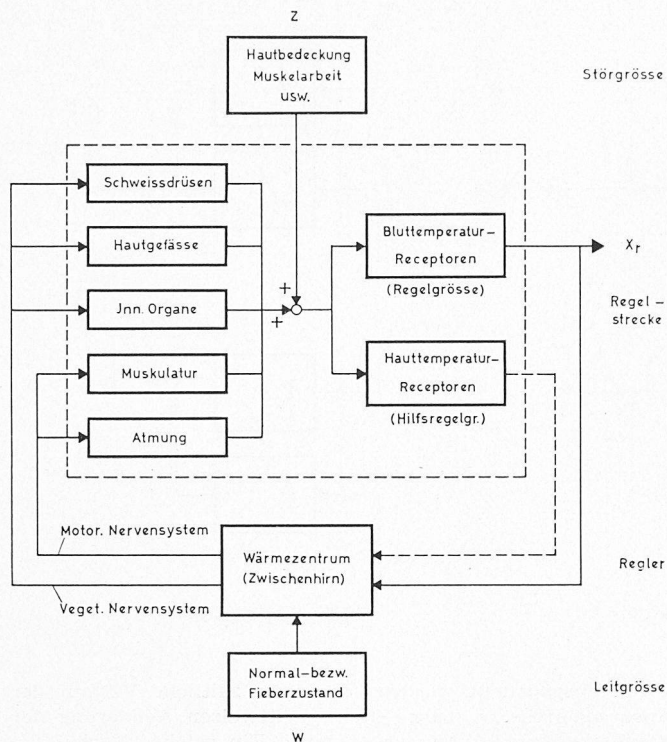


Bild 7. Vereinfachtes Blockschema der Temperaturregelung im tierischen Körper

Schema des entsprechenden Analogiegerätes dargestellt ist. Die im Analogiesystem ausgezogen gezeichneten Uebergangsfunktionen laufen alle in unserem Beispiel zweimal schneller ab als im Originalsystem, sind also durch Verdoppelung des Zeitmassstabes mit dem rechts noch jeweils gestrichelt gezeichneten Originalverlauf zur Deckung zu bringen.

Diese Ueberlegungen machen deutlich, wie nah verwandt Regelsysteme aus den verschiedensten technischen Anwendungsgebieten sein können. In ihrer Dynamik durchaus gleichartige Regelprobleme können etwa bei chemischen Prozessen und in der Klimatechnik oder an Wasserturbinen und Dampfkesseln auftreten.

Das bedeutet eine unschätzbare Vereinfachung der Theorie und erleichtert die Uebersicht über das heute so weit ausgedehnte Gebiet der Regelungstechnik ungemein. Nicht weniger bedeutungsvoll ist aber auch die so gegebene Möglichkeit gegenseitiger Befruchtung verschiedener Anwendungsgebiete. Insbesondere die Regelungstechniker auf dem Gebiete des Maschinenbaues einerseits und der Elektrotechnik andererseits hatten und haben gegenseitig viel zu geben und zu nehmen. Ein solcher Gedanken- und Erfahrungsaustausch hat sich schliesslich auch über die Grenzen der Regelungstheorie im eigentlichen Sinne hinaus als möglich und fruchtbringend erwiesen, besonders mit der Fernmelde-, der Mess- und der Servotechnik.

4. Regelkreise in tierischen Organismen

Man würde aber doch wohl zunächst annehmen, dass die Anwendbarkeit der im Begriff des Regelkreises und seiner Interpretation im Blockschema enthaltenen Ideen auf die Bereiche der Technik beschränkt wäre. Man möchte nicht ohne weiteres glauben, dass diese so typisch technisch anmutenden Gedankengänge sich auch in ganz anderen Wissens- und Arbeitsbezirken als brauchbar erweisen könnten, ja ganz neue Wege zu erschliessen gestatten.

Die ersten Versuche, solche Ueberlegungen auf nicht technische Probleme zu übertragen, liegen schon mehr als 15 Jahre zurück. Sie begründeten ein neues Wissensgebiet, die Kybernetik. Den unmittelbaren Anlass dazu gab der Wunsch, die medizinischen Kenntnisse über die Steuerung von Bewegungen für die Kriegstechnik nutzbar zu machen. Seither sind auf diesem Gebiet vor allem in Amerika und England, später auch in Frankreich und Deutschland, ausgedehnte Untersuchungen durchgeführt und veröffentlicht worden. Auch in der Schweiz sind Ansätze zu solcher Zusammenarbeit vorhanden [1, 2, 3].

Besonders erfolgreich war zunächst der Versuch, regelungstechnisches Denken auf biologische Regelsysteme zu übertragen. Für den Regelungstechniker mag es dabei nicht überraschend sein, dass die selben Grundbegriffe wie bei technischen Systemen praktisch ohne Einschränkung anwendbar bleiben. Erstaunlich ist vielmehr der hohe Grad der Analogie zwischen manchen biologischen und technischen Regelsystemen, die sich nicht nur auf das Grundsätzliche erstreckt, sondern bis weit in funktionsmässige Einzelheiten geht.

Dies mag ein einfaches Beispiel belegen, das aus der Fülle des heute bereits vorhandenen Materials herausgegriffen sei: die Temperaturregelung im tierischen Körper; Bild 7 zeigt das vereinfachte Blockschema. Diese Regelung wirkt nach Hensel [4] im wesentlichen wie folgt: Bei einer äusseren Störung, zum Beispiel einer Aenderung der Hautbedeckung, wird die dadurch hervorgerufene Aenderung der Hauttemperatur durch besondere Rezeptoren erfasst und auf das im Zwischenhirn liegende «Wärmezentrum» übertragen. Dieses löst sowohl über das motorische wie über das vegetative Nervensystem im Körper Wirkungen zur Beeinflussung der Wärmeerzeugung einerseits und der Wärmeabgabe nach aussen andererseits aus. So wird bei Temperatursteigerung die Sekretion der Schweissdrüsen angeregt und eine stärkere Durchblutung der Hautgefässe herbeigeführt, wodurch die Wärmeabfuhr steigt. Bei Abkühlung verringert sich die Wärmeabgabe durch Kontraktion der Hautgefässe und Sträuben der Haare oder Federn, während zugleich eine erhöhte Wärmeerzeugung durch stärkere Durchblutung der inneren Organe sowie durch oszillatorische Muskelkontraktionen — Kältezittern — einsetzt.

Das Blockschema macht zunächst das Vorhandensein eines geschlossenen Regelkreises unmittelbar deutlich. Die formale Uebereinstimmung des Wirkungsgefüges der Körpertemperaturregelung mit technischen Regelschaltungen geht aber viel weiter. Zunächst fällt auf, dass sich die Natur mehrerer, parallel wirkender Stellgrössen bedient, die sogar über zwei unabhängige Nervensysteme gesteuert werden. Besonders interessant ist weiter die Benutzung der Hilfsregelgrösse «Hauttemperatur» neben der eigentlichen Regelgrösse «Bluttemperatur», gemessen im Zwischenhirn. Diese Hilfsregelgrösse, die im Beharrungszustand relativ stark verschiedene Werte annehmen kann, wirkt im Sinne einer Kombination der bekannten regeltechnischen Hilfsmittel des Hilfsregelkreises und der Störwertaufschaltung.

Würden wir schliesslich die im Bilde nicht angegebenen Uebertragungseigenschaften des biologischen Reglers untersuchen, so würde die enge Verwandtschaft mit technischen Reglern noch augenscheinlicher. So zeigen zum Beispiel die Thermorezeptoren ein Uebertragungsverhalten, das der Kombination von Proportional- und Differentialwirkung recht genau entspricht. Das belegt etwa Bild 8, das ein von Hensel [4] aufgenommenes Kathodenstrahlzillogramm der elektrischen Impulse in einer einzelnen Kältenervenfaser der Katze beim Abkühlen der Haut von 30 auf 20° C herunter zeigt. Die Hauttemperatur als Eingangsgrösse des

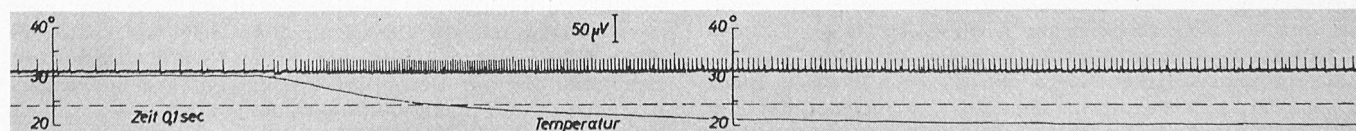


Bild 8. Kathodenstrahlzillogramm der elektrischen Impulse einer einzelnen Kältenervenfaser der Katze bei Abkühlung (nach Hensel) [4]

Rezeptors ist mitregistriert. Zum Verständnis des Bildes ist zu bemerken, dass die Regelsignale der Thermorezeptoren wie die aller Sinnesorgane frequenzmoduliert sind, das heisst, dass die Häufigkeit der an sich unveränderlichen Impulse, die als kleine Vertikalstriche im Diagramm erscheinen, als Mass für das Regelsignal aufzufassen ist. Das Diagramm zeigt nun deutlich, dass die Impulsfrequenz nicht nur von der Grösse des Hauttemperaturausschlages abhängt — sonst müsste sie am Versuchsende am grössten sein —, sondern dass der ausschlagbedingten Frequenzerhöhung noch eine von der zeitlichen Temperaturänderung abhängige Frequenzzunahme überlagert ist, mit anderen Worten: Das Uebertragungsverhalten der Haut-Thermorezeptoren hat, in der Fachsprache des Regelungstechnikers ausgedrückt, Proportional-Differential-Charakter.

An biologischen Regelungen fällt allgemein auf, dass fast immer mehrere Regelkreise zu einem komplizierten System vermascht werden. Man findet zwar auch dazu technische Parallelen, wie unsere früher zitierten Beispiele belegen, doch ist der Grad der Vermaschung bei den biologischen Systemen meist sehr viel höher. Dies ist einer der Gründe dafür, dass die Erforschung biologischer Regelungen oft ausserordentlich schwierig ist.

5. Regelkreise in biologischen Kollektiven

Während, wie gesagt, der Regelungsfachmann die auffallende Analogie zwischen technischen und biologischen Regelungen mit einem gewissen Gleichmut hinnimmt, so erstaunen ihn nun doch die Feststellungen, die gemacht werden, wenn von der regeltechnischen Untersuchung von Einzelwesen auf die biologischer Kollektive übergegangen wird. So zeigen beispielsweise Untersuchungen von Lindauer [4], dass die Aufrechterhaltung der Raumtemperatur im Bienenstock, die durch Zusammenwirken der Aktionen tausender von Individuen geschieht, alle Züge einer echten Regelung trägt. Zunächst sei darauf hingewiesen, wie gut diese Regelung funktioniert. Bild 9 zeigt nach Messungen von Hess und Zimmer [4] als gestrichelte Kurve den Temperaturverlauf im Stockinnern über einen Zeitraum von etwa vier Wochen, und strichpunktiert den Gang der Aussentemperatur. Die Temperaturkonstanz im Bienenstock ist auffallend gut, bedeutend besser als etwa im Wespennest.

Das genauere Studium des Verhaltens des Bienenvolkes bei Temperaturänderungen hat nun ergeben, dass die Bienen verschiedene Mittel anwenden: Gegen fallende Stocktemperatur wird fast schlagartig und gemeinsam durch erhöhte Wärmeproduktion und Herabsetzen der Wärmeverluste reagiert, indem jede einzelne Biene durch Muskelzittern ihre Körpertemperatur zu erhöhen sucht und indem die Bienen enger um das Brutnest zusammenrücken. Gegen steigende Temperatur wird dagegen gruppenweise reagiert, indem eine Gruppe von Bienen in kleinsten Mengen Wasser im Stock verteilt und gleichzeitig durch Fächeln die Verdunstung befördert. Eine andere Gruppe übernimmt den Wassernachschub vom Flugloch zu den Bienen der ersten Gruppe im Stockinnern. Eine dritte Gruppe schliesslich sorgt für den Wassertransport von der Tränke zum Flugbrett. Hierbei sind durch die Art der Wasserübernahme — stürmisches Entreisen oder zurückhaltendes Abnehmen — sowie durch das Mittel des Werbetanzes Wirkungsverbindungen vorhanden, durch welche die Tätigkeit der zweiten und dritten Gruppe auf die der ersten praktisch schwingungsfrei abgestimmt wird. Auch dieser Sachverhalt lässt sich durch Regelkreise deuten und im Blockschema veranschaulichen. In Bild 10 ist dies für den Fall der Temperatursteigerung geschehen. Der primäre Temperaturregelkreis ist rechts oben dargestellt und durch die Blöcke Brutraum/Wärmehaushalt — Brutraumtemperatur — Wasserverteilung/Fächeln — Verdunstungskühlung gegeben. Der sekundäre und tertiäre Regelkreis ist je durch den Wasserbedarf im Stock bzw. am Flugbrett mit dem vorangehenden gekoppelt. Ein Sicherheits-Regelkreis ist noch dadurch gegeben, dass beim Fehlen von Wasser die Bienen ihren Mageninhalt verspucken.

Derartige Regelmechanismen lassen sich auch für die Aufzuchtregelung im Insektenstaat und andere für das biologische Kollektiv typische Phänomene feststellen.

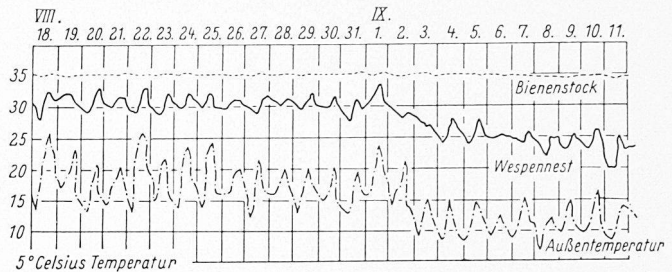


Bild 9. Temperaturverlauf im Innern eines Bienenstockes bzw. eines Wespennestes sowie Verlauf der Aussentemperatur (nach Hess und Zimmer) [4]

6. Volkswirtschaftliche Regelkreise

Einmal hier angelangt, ist der Gedanke naheliegend, den Begriff des Regelkreises auch auf das Wirkungsgefüge der menschlichen Gesellschaft zu übertragen. Untersuchungen dieser Art sind in den letzten Jahren vor allem im Zusammenhang mit volkswirtschaftlichen Kreislaufvorgängen durchgeführt worden [5]. Natürlich können derartige Betrachtungen nur dann sinnvoll sein, wenn die untersuchten Wirtschaftsaggregate so gross sind, dass statistisch gesicherte Wirkungsbeziehungen vorliegen. Es sind also nur makroökonomische Vorgänge, die hier in Frage stehen, wo Individualentscheidungen die statistische Verknüpfung keinesfalls aufheben können.

Wir wollen die Anwendung des Prinzips des Regelkreises auf dynamische Wirtschaftsprobleme zunächst an einem ganz einfachen Beispiel veranschaulichen: Wir betrachten die Entwicklung der Schweinefleischproduktion in einem isolierten Wirtschaftsraume. Die jeweilige Anzahl schlachtreifer Schweine wird hier als Angebot in einem nicht irgendwie manipulierten Marktssystem den Schweinepreis beeinflussen, der Schweinepreis seinerseits wiederum als mehr oder weniger grosser Anreiz zur Nachzucht auf die Schweinezahl zurückwirken. Es ergibt sich der im Blockschema (Bild 11) dargestellte Wirkungskreis, wobei es in unserem Zusammenhang unwesentlich ist, ob Produzent oder Konsument hier als Regler oder Regelstrecke bezeichnet werden. Um nun die Dynamik eines solchen Kreisprozesses quantitativ untersuchen zu können, muss noch das Uebertragungsverhalten der beiden Blöcke bekannt sein. Es sei der Einfachheit halber angenommen, dass sich eine Er-

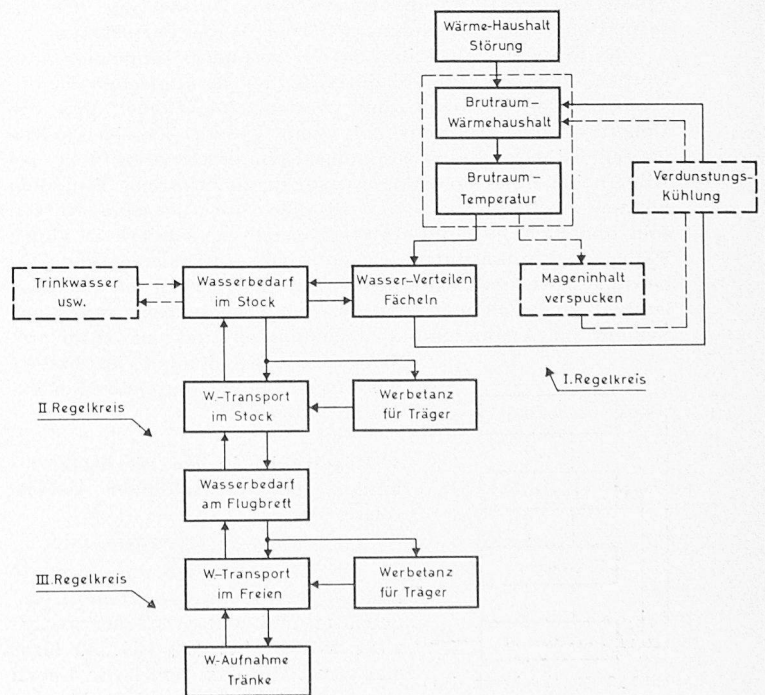


Bild 10. Blockschema der Brutraumtemperatur-Regelung der Bienen. Wirkungsverlauf bei Temperatursteigerung

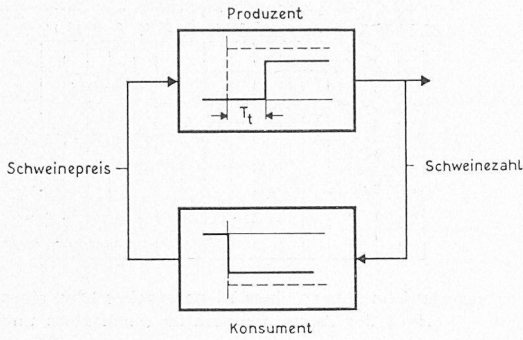
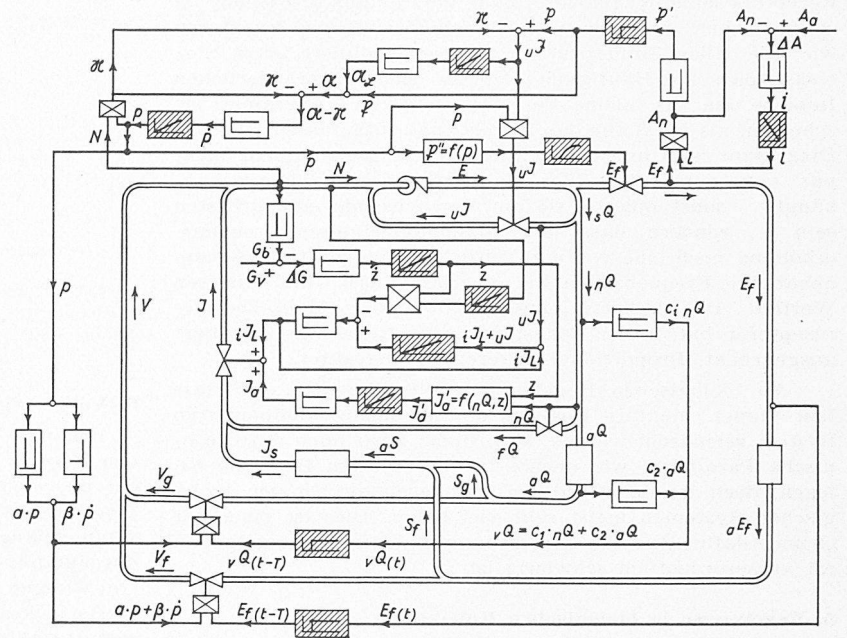


Bild 11. Blockschema des «Schweinezyklus» [5]

Bild 12. Allgemeines Modell eines Gesamtwirtschaftssystems, dargestellt durch das Schema des Geld-, bzw. Güterflusses (Doppellinien) sowie der Kanäle der darauf einwirkenden Informationen (einfache Linien). — Die in die Rechtecke eingetragenen Übergangsfunktionen beschreiben die Bildungsgesetze der einzelnen Wirtschaftsfaktoren in Abhängigkeit der sie beeinflussenden Information. Schraffierte Rechtecke bedeuten mit Zeitverzögerung behaftete Elemente. Nach Föhl [5].



höhung des Schlachtierangebotes ohne Verzögerung preisenkend auswirke, dass dagegen ein erhöhter Preis sich auf die Schweinezahl erst nach Ablauf der festen Aufzuchtzeit T bemerkbar mache. Unter diesen Voraussetzungen ist das System im Prinzip schwingungsfähig, und bei zu empfindlicher Reaktion von Produzent oder Konsument oder beider auf Schwankungen von Nachfrage bzw. Angebot werden sich ständig vergrößernde Ausschläge von Preis und Produktion einstellen. Eine regeldynamische Berechnung oder ein Analogieversuch lässt leicht die Bedingungen für die Stabilitätsgrenze eines solchen Systems finden.

In zum Teil sehr eingehenden Studien sind nun verschiedene volkswirtschaftliche Einzelprobleme, wie etwa das Angebot-Nachfrage-Lager-Problem, aber auch ganze komplexe Wirtschaftstheorien in die Sprache der Regelungstechnik umgedeutet und untersucht worden. Dabei ist in vielen Fällen festgestellt worden, dass Schemata schwingungsfähiger Gebilde erhalten werden, insbesondere auch bei der regeltechnischen Deutung moderner Gesamtwirtschaftstheorien. Bild 12 zeigt als Beispiel, entnommen aus einer Studie von Föhl [5], die Blocksche-Darstellung des Informationsflusses in einem modernen Wirtschaftssystem.

Es braucht wohl kaum darauf besonders hingewiesen zu werden, dass aber der Ermittlung der dynamischen Eigenschaften der Elemente des Wirtschaftsgefüges, also des Übertragungsverhaltens, oft sehr grosse Schwierigkeiten entgegenstehen, die es zumindest sehr erschweren, über das Allgemeine hinausgehende Aussagen zu erhalten. Trotzdem können zweifellos derartige Studien von grossem Nutzen sein und nicht nur qualitative Einsichten, sondern in vielen Fällen auch quantitative Erkenntnisse gewinnen lassen. Als besonders wertvoll bei solchen Untersuchungen ist die Möglichkeit zu bezeichnen, wie bei technischen Regelungen das System im Analogiegerät nachzubilden und zu studieren.

Von dieser Möglichkeit ist bereits des öfters mit Erfolg Gebrauch gemacht worden.

7. Regelkreise in den Wechselbeziehungen der menschlichen Gesellschaft

Auch andere Kreislaufwirkungen in der menschlichen Gesellschaft können im Prinzip als Regelkreise gedeutet und entsprechend analysiert werden [1] [2] [3]. So lässt sich etwa für das politische Leben ein — freilich sehr vereinfachtes — andererseits sehr allgemeines Blockschema (Bild 13) aufstellen, das un-

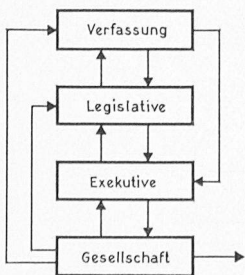


Bild 13. Blocksche-Darstellung des politischen Wirkungsgefüges in der menschlichen Gesellschaft

verkennbar die typischen Merkmale eines Systems mehrerer vermaschter Regelkreise aufweist. Das politische Geschehen spielt darnach zunächst etwa in Wechselwirkung zwischen Exekutive und Gesellschaft. Weitere solche Kreislaufbeziehungen wirken zwischen Exekutive und Legislative und zwischen Legislative und Verfassung. Daneben bestehen aber direkte Wirkungskanäle von der Gesellschaft zur Legislative und sogar zur Verfassung, womit weitere Regelkreise geschaffen werden. Wiederum andere Wirkungsverbindungen erhöhen noch die Zahl der Vermaschungen.

Freilich besteht bei derartigen Systemen noch viel mehr als bei wirtschaftlichen die Schwierigkeit, Massgrößen zu definieren und statistisch gesicherte Gesetzmässigkeiten für das Übertragungsverhalten der Elementen der menschlichen Gesellschaft anzugeben. Man wird daher kaum erwarten dürfen, dass hier andere als qualitative Erkenntnisse zu gewinnen sind; jedenfalls werden auf diese Weise wohl schwerlich aktuelle politische Tagesprobleme zu lösen sein. Aber auch unter diesen Bedingungen wird man nicht ganz ohne Gewinn derartige Betrachtungen durchführen.

8. Schlusswort

Im Laufe unserer Betrachtung hat sich herausgestellt, dass der Begriff des Regelkreises als in sich geschlossenes, aber von aussen beeinflussbares und nach aussen wiederum wirkendes Prinzip eine über das Fachgebiet der Regelungstechnik weit hinausreichende — man darf wohl sagen — universelle Bedeutung hat. Die Übertragung auf andere technische Disziplinen sowie auf nicht technische Gebiete hat sich bereits als gegenseitig in hohem Masse befruchtend ausgewirkt, weit über lediglich heuristischen Gewinn hinaus. Verwandtes, Gemeinsames aus scheinbar ganz verschiedenartigen Gebieten tritt damit hervor; Trennendes und Unterscheidendes wird umgekehrt deutlicher erkennbar. Neue Arbeitshypothesen werden ermöglicht, neue Untersuchungsmethoden und Darstellungsarten ergeben sich aus der Synthese verschiedener Denk- und Forschungsweisen. — Bestimmt ist ein solches Übertragen nicht ohne Gefahr, und vorsichtig selbstkritisches Fortschreiten ist Gebot. Doch ist zweifellos zu erwarten, dass diese zum Teil erst am Anfang stehenden Bemühungen noch manche wertvolle Einsicht bringen werden. Und sicherlich darf man sie auch als Mittel werten, zwischen den immer mehr auseinanderstrebenden und durch Spezialisierung sich abschliessenden Wissensgebieten durch übergeordnete Prinzipien Brücken zu schlagen und Verbindungen anzuknüpfen; ein Bestreben, das uns in der heutigen Zeit wohl ganz besonderes Anliegen sein muss.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Paul Profos, Büelweg 11, Winterthur.

Literaturangaben

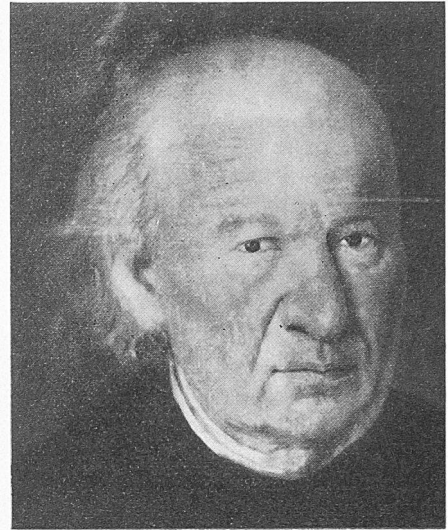
- [1] Wiener, N.: Cybernetics. New York 1948, John Wiley & Sons.
- [2] Rosenblueth, Wiener, Prigelow: Behaviour, Purpose and Teleology. «Phil. of Science», Vol. 10, pp. 18—24 (1943)
- [3] Weber, H.: Cybernetic. SBZ 1954, Nr. 40, S. 583.
- [4] Regelungsvorgänge in der Biologie. München, 1956, R. Oldenbourg.
- [5] Volkswirtschaftliche Regelungsvorgänge. München, 1957, R. Oldenbourg.
- [6] Regelungstechnik — Moderne Theorien und ihre Verwendbarkeit. München, 1957, R. Oldenbourg.
- [7] Summers: Central Station Control — Today and Tomorrow. «Combustion», Juli 1958, S. 34.

Zum 250. Geburtstag von Hans Ulrich Grubenmann (1709 bis 1783)

Von Ing. Dr. J. Killer, Baden

Der geniale Brückenbauer Hans Ulrich Grubenmann wurde am 23. März 1709 in Teufen (Appenzell) geboren, wo er auch am 24. Jan. 1783 begraben wurde. Er hat zusammen mit seinen beiden Brüdern Jakob und Johann über 12 Brücken, 30 Kirchen und eine Menge Staatsbauten, Geschäfts- und Wohnhäuser gebaut. Das Arbeitsgebiet der Grubenmann erstreckte sich über die ganze Ostschweiz von Lindau bis Chur und von St. Gallen bis Wettingen. Überall wo sie bauten, erweckten sie den Neid der einheimischen Handwerker und Unternehmer, so dass bei Auftragserteilungen vielmals die hohe Behörde angerufen werden musste. Weil aber ihre Bauwerke so schön geformt und die Ausführung nur bester Qualität war, wurden die Gebrüder Grubenmann überallhin gerufen. Während der 15 Jahre ältere Bruder Jakob den Grundstock zur Geschäftserweiterung legte, war Johann mehr die rechte Hand von Hans Ulrich, der durch seine Schöpfungen im Brückenbau immer mehr der führende Kopf des Familienunternehmens wurde.

Berühmt geworden ist Hans Ulrich Grubenmann hauptsächlich durch seine kühnen Brückenkonstruktionen. Während die grösste vor seinem Schaffen erstellte Holzbrücke, diejenige beim Landvogteischloss in Baden (1650), schon 38 m Spannweite aufwies, konnte Hans Ulrich Grubenmann leider in den ersten Jahrzehnten seines Wirkens nur Brücken bis etwa 30 m Spannweite bauen, denn die engen Täler seiner Heimat erforderten keine grösseren Spannweiten. Erst mit dem Bau der Brücke in Schaffhausen über den 120 m breiten Rhein im Jahre 1754 eröffnete sich ihm ein lang erstrebtes neues Arbeitsfeld, und sein Ziel, einmal eine Brücke mit einer möglichst grossen Spannweite zu bauen, schien in Erfüllung zu gehen. Er war vom Problem der grossen Spannweite wie besessen. Leider wurde sein erster Entwurf, der einen Träger von einem Ufer zum andern vorsah, vom Stadtrat von Schaffhausen nicht angenommen, nach dessen Meinung könnte eine solche Brücke gar nicht tragen. Der Auftrag lautete denn auch, ein



von der alten Steinbrücke in Flussmitte übriggebliebener Pfeiler müsse mitbenützt werden. Nur widerwillig befolgte Grubenmann diesen Befehl. Den Tragwerken über die beiden Flussöffnungen fügte er noch ein drittes bei, das sich von einem Ufer zum andern spannte. Bei der Brückenabnahme schlug er die Unterlagshölzer auf dem Mittelpfeiler weg, so dass sich die Brücke tatsächlich von einem Ufer zum andern spannte. Damit hatte er den Beweis erbracht, dass er imstande sei, die weitestgespannte Brücke seiner Zeit zu bauen. Gleich genial, hingegen in anderer Form überspannte er die Limmat bei Wettingen mit einem verzahnten Bogen von 60 m Spannweite. Prof. Dr. F. Stüssi, ETH, feierte in seiner Rektoratsrede von 1949 (Heft 74 der Kultur- und Staatswiss. Schriften der ETH) Hans Ulrich Grubenmann als den Vollender der Kunst des Holzbrückenbaues.

Ebenso kühn entwarf Grubenmann seine Kirchenbauten. Auch hier versuchte er grosse Spannweiten zu erreichen, oder, wie es im Barockzeitalter üblich war, die Dachstühle so zu konstruieren, dass die Stuckgewölbe mit hohem Stich in den Dachraum hinaufgezogen werden konnten, ohne dass störende Zugstangen nötig waren. Mit dem Dachstuhl der Kirche Wädenswil, wo er einen freien Raum von 18 auf 38 m ohne jede Unterstützung überbrückte, schuf er durch die Anordnung je eines grossen Hauptträgers in der Längs- und Querrichtung ein Meisterwerk, das heute noch Bewunderung verdient¹⁾. Hier brachte er seine Erfahrungen aus dem Brückenbau zur Anwendung. Der damaligen Vorliebe für grosse, freie und lichte Räume kam er weitgehend entgegen. Besonders kühn ist in Wädenswil auch die Konstruktion der Emporen, die an beiden Schmalseiten angeordnet sind. Ohne jedes sichtbare Sprengwerk und ohne jede Unter-

¹⁾ Siehe «Hoch- und Tiefbau» 1959, Heft 22.

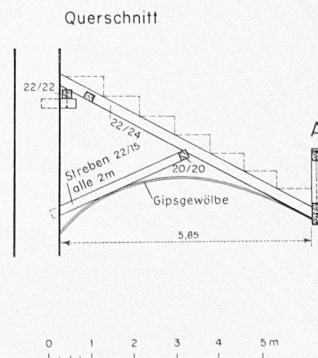
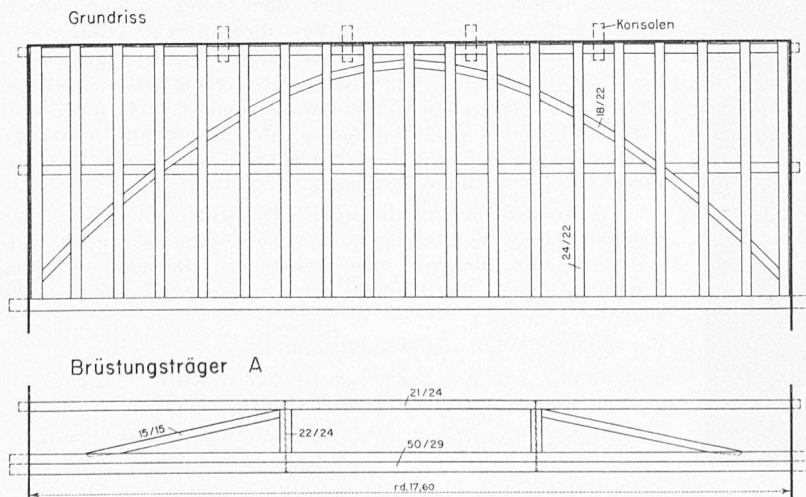


Bild 1. Kirche Wädenswil, Emporenkonstruktion 1:175