

Modellierung eines automatischen Berechnungssystems mit Druckwellensteuerung¹

Dr. sc. techn. D. Ludewig, KDT, Institut für Wasserwirtschaft Berlin

1. Der prinzipielle Aufbau von automatischen Berechnungsanlagen, System REGNOMAT

Die zu beregnenden Flächen erhalten ein unterirdisch verlegtes Rohrsystem, an das entsprechend der Wurfweite des vorgesehenen Regnertyps Steuerarmaturen vom Typ REGNOMAT angeschlossen werden¹. Jeder REGNOMAT hat als Verschlußorgan einen Schieber, der von einem Steuerkolben betätigt wird. Der Steuerkolben wird einseitig mit dem Leitungsdruck beaufschlagt; die andere Seite ist durch eine vorspannbare Druckfeder belastet. Am Eingang zum Rohrnetz wird ein Steuerventil (Kommandoschieber) angeordnet, das nach einem einstellbaren Programm öffnet, in Offenstellung verbleibt und dann wieder schließt und damit das Rohrnetz rhythmisch unter Druck setzt. Da es das Ziel dieser Anordnung ist, jeweils nur eine begrenzte Zahl von Regnern arbeiten zu lassen, sind die genannten Steuerarmaturen mit einem Schaltwerk versehen, das bei einer bestimmten Zahnradstellung ein Öffnen zuläßt; in allen anderen Stellungen sind die Kolbenstangen der Steuerarmaturen bei einem konstruktiv festgelegten Hub blockiert. Dieser Kolbenhub führt noch nicht zum Öffnen des Schiebers, da zwischen Schieber und Kolben eine so große Wegdifferenz möglich ist (z. B. Langloch). Das Zahnrad der Steuerarmatur wird immer dann weitergerückt, wenn der Kolben vom Leitungsdruck entlastet wird und in seine Nullstellung zurückfährt. Zur Entspannung des Rohrsystems, insbesondere für die Zyklen, in denen kein Regner öffnen kann, ist am Kommandoschieber ein Auslaufventil (Magnetventil) angeordnet, dessen Öffnen und Schließen in das Programm der Steuerzentrale einbezogen wird.

2. Allgemeines zur Modellierung der REGNOMAT-Systeme

Die funktionssichere Gestaltung der REGNOMAT-Systeme ist nicht nur eine Frage der Konstruktion der Steuerarmaturen REGNOMAT, sondern sie ist insbesondere vom Zusammenwirken der Steuerzentrale (Kommandoschieber) mit diesen unter den zeitlich veränderlichen Fließbedingungen im Rohrsystem abhängig. Im einzelnen sind hierbei folgende Tatbestände von Bedeutung:

¹ Dieser Beitrag basiert auf den Ergebnissen der Zusammenarbeit mit dem Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim

- Das Rohrnetz kann verschiedenartig verästelt und vermascht sein. Es besteht aus Leitungen unterschiedlichen Durchmessers, es treten möglicherweise Leitungskreuzen, Rohrverzweigungen und auch Endstränge auf. Die Regnomaten können unmittelbar neben solchen Verzweigungen oder auch längs durchgehender Leitungen angeordnet sein. Bild 1 zeigt typische „Rohrnetz-Knoten“.
- Der Kommandoschieber in der Steuerzentrale hat in Abhängigkeit vom Hub eine bestimmte Durchflußcharakteristik, die durch die sogenannten k_v -Werte beschrieben wird (Bild 2). Die Steuerzeiten sind einstellbar, es sind auch Hubbegrenzungen möglich.

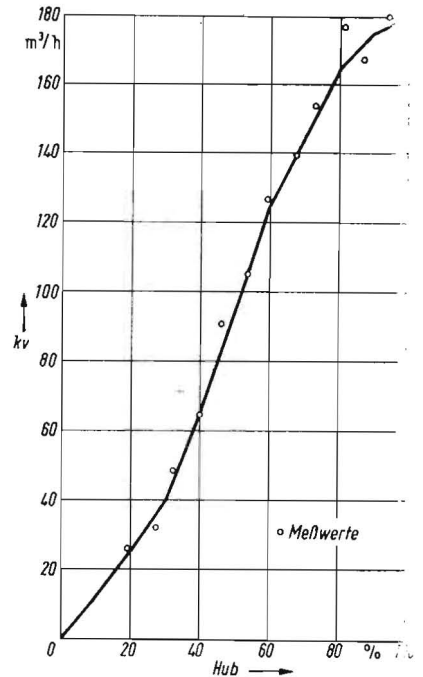


Bild 2. k_v -Werte für das Absperrventil 5-MV 616, NU 15 0

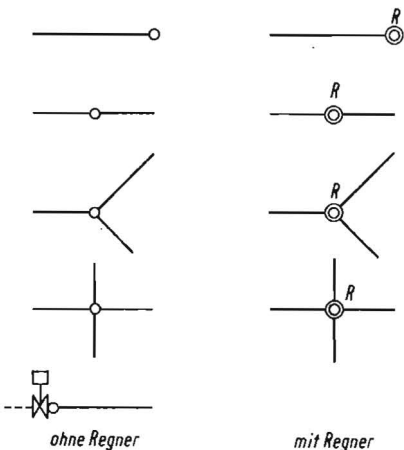
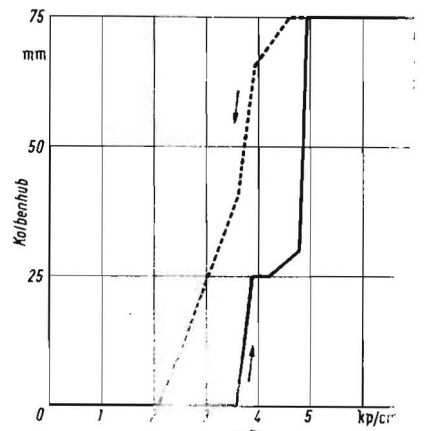


Bild 1. Knotentypen des Rohrnetzes

Bild 3 Druckabhängiges Öffnungsverhalten des REGNOMAT



- Die Steuerarmaturen REGNOMAT zeigen bei der Öffnungs- und Schließbewegung ein druck- und zeitabhängiges Verhalten. Während das Druck-Weg-Diagramm für die Feder des Steuerkolbens linear verläuft, wird das für den Regnomaten durch Reibungskräfte an Kolben, Kolbenstange und Schieber sowie durch die Strömungskräfte am Schieber wesentlich beeinflusst. Die Druck-Weg-Abhängigkeiten sind für das Öffnen und das Schließen deutlich verschieden. Bild 3 zeigt den typischen Verlauf von Meßwerten mit einer Hysteresis.
- Die je Zeiteinheit aus einem Regner austretende Wassermenge hängt vom Leitungsdruck, von der Regnerdüse und vom momentanen Öffnungsgrad des Schiebers im REGNOMAT ab. Für das Zusammenwirken von Regnerdüse und Schieber können empirische Ausflußbeiwerte ermittelt werden (Bild 4).
- Die Langloch-Wegdifferenz zwischen Steuerkolben und Schieber führt dazu, daß der Schieber bei Druckänderung den Kolbenbewegungen nicht unbedingt und nicht sofort folgt.
- Die Wirkung und Bedeutung des Schaltwerks (Zahnrad) in der Steuerarmatur REGNOMAT wurde bereits einleitend erläutert.

Beim Öffnen und Schließen des Kommandoschiebers sowie dem erzwungenen Öffnen und Schließen der Steuerarmaturen REGNOMAT laufen im durchströmten Rohrsystem Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge ab, die mit Druckwellen verbunden sind und zu Störungen im Rhythmus der Regner führen können. Zur Überprüfung dieser instationären Strömungsvorgänge und der Reaktionen der Regnomaten sowie zur Auswahl geeigneter Ventilkennlinien und Stellzeiten für den Kommandoschieber wurde ein mathematisches Modell entwickelt und als Programmsystem in FORTRAN für den sowjetischen Rechner BESM6 formuliert. Die letzte Fassung dieses Modells simuliert die zeitlich veränderliche Strömung im Rohrnetz, das beliebig vermascht und verästelt sein kann, und koppelt die Druckwellenerscheinungen mit dem druck- und zeitabhängigen Verhalten der Regnomaten. Der Ergebnisdruck des Rechners enthält wahlweise

- den Zifferndruck für wichtige Zustandsgrößen im Rohrnetz und an einigen Steuerarmaturen für die einzelnen Zeitschritte der Berechnung
- den punktweisen Kurvendruck für den zeitlichen Verlauf der Druckhöhen in ausgewählten Systempunkten des Rohrnetzes und für den Durchfluß am Kommandoschieber oder
- den Kontrolldruck für die Funktion der Steuerarmaturen, wobei je Zyklus des Kommandoschiebers nur eine Zeile gedruckt wird. Sie enthält dann die Zahnradstellungen der REGNOMAT-Schaltwerke sowie die Nummern der arbeitenden bzw. im Schaltrhythmus gestörten Regner.

3. Zur Hydromechanik der Druckwellenvorgänge im Rohrsystem

Für die mathematische Behandlung wird das Rohrsystem in Leitungsabschnitte (Rohrstränge) zerlegt, deren Länge gleich einer Grundlänge DL oder einem ganzzahligen Vielfachen davon ist. Die Rohrstränge sind durch sogenannte Knoten begrenzt, wobei für die Leitungsverbindungen in den Knoten die im Bild 1 dargestellten Varianten auftreten können. Für eine bestimmte Zeit t existiert für jeden Knoten eine Druckhöhe H. Der Fließzustand in den Strängen wird durch die Durchflußwerte Q beschrieben, wobei unter instationären Bedingungen diese Werte für den Anfang und das Ende eines Stranges verschieden sein können. Der Durchflußunterschied wird durch die Kompressibilität des Wassers und die Elastizität des Rohrmaterials ermöglicht. Die Druckwellenfortpflanzung in einer Leitung wird durch ein System von zwei partiellen Differentialgleichungen vom hyperbolischen Typ beschrieben [2]. Diese Gleichungen enthalten die Druckhöhe H (oder den Druck) und den Durch-

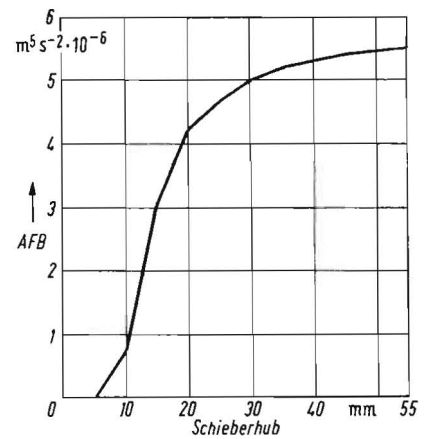


Bild 4. Ausflußbeiwerte $AFB = Q^2/AH$ [$m^3 s^{-2}$] für REGNOMAT mit Regner W 68, Düse 28

fluß Q als Funktionen der zwei unabhängigen Variablen Ort x und Zeit t:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot F \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda}{2DF} \cdot Q \cdot |Q| = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gF} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

g Erdbeschleunigung, D Leitungsdurchmesser, F Querschnittsfläche, a Druckwellengeschwindigkeit, λ Reibungsbeiwert nach Darcy-Weisbach

Als Lösungsverfahren für dieses Differentialgleichungssystem ist die Charakteristiken-Methode vorteilhaft. Es entsteht dabei ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen, von dem man zu Differenzgleichungen übergehen kann. Die Berechnung läuft in Zeitschritten $\Delta T = \Delta L/a$ ab, wobei der neue Zustand am Ende des Zeitschrittes errechnet wird auf der Grundlage der Druckhöhen HM und der Durchflüsse QM für einen früheren Zustand. (QM1 und HM1 für den Rückgriff um einen Zeitschritt bei $L = DL$, QM2 und HM2 für den Rückgriff um zwei Zeitschritte bei $L = 2 \cdot DL$ usw.). Für den Rohrstrang Nr. 1 von der Länge DL zwischen den Knoten K1 und K2 gilt (Schreibweise des Indizes entsprechend FORTRAN):

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} 1 \\ \circ K1 \rightarrow + Q \quad K2 \circ \end{matrix} \quad \begin{matrix} Q \text{ in } K1 \equiv Q(1,1) \\ Q \text{ in } K2 \equiv Q(2,1) \end{matrix} \\ & Q(2,1) - QM1(1,1) + C(1) \cdot [H(K2) - HM1(K1)] \\ & \quad + RB(1) \cdot QM1(1,1) \cdot ABS[QM1(1,1)] = 0 \quad (1) \\ & Q(1,1) - QM1(2,1) - C(1) \cdot [H(K1) - HM1(K2)] \\ & \quad + RB(1) \cdot QM1(2,1) \cdot ABS[QM1(2,1)] = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

Dabei ist

$$C = g \cdot F/a \text{ und } RB = 2 \cdot \Delta T / (2 \cdot D \cdot F)$$

Die Gleichungen (1) und (2) können für jeden Rohrstrang angegeben werden. Die Kopplung mit den Kontinuitätsbedingungen ergibt für jeden Knoten ein kleines Gleichungssystem, das leicht nach der Knotendruckhöhe H aufgelöst werden kann. Mit hier nicht näher erläuterten Hilfswerten SJ gilt für jeden Knoten

$$H(K) = \left(\sum_{j=1}^{is} S_j - QA \right) / \sum_{j=1}^{is} C_j \quad (3)$$

is ist dabei die Gesamtzahl der Stränge, die im Knoten K zusammengefaßt sind, und QA ist der zur Zeit t dem Rohrnetz dort entnommene Durchfluß. Die Durchflußwerte Q können anschließend durch Einsetzen von H(K) in Gleichung (1) bzw. (2) gewonnen werden.

Die Programmierung dieser Rechenvorschriften war insbesondere eine Frage der Datenorganisation. In den Eingabedaten werden für jeden Rohrstrang neben der Länge als

Vielfaches von DL, dem Rohrdurchmesser und dem Reibungswert λ die Knotennummern für den Anfang und das Ende der Leitung genannt. Aus diesen Nummern wird in einem Abschnitt des Hauptprogrammes eine Verbindungsmatrix erzeugt. Sie enthält für jeden Knoten in einer Zeile die Nummern der anliegenden Stränge und die Nummern der Nachbarknoten. Der von K1 nach K2 positiv definierte Durchfluß bestimmt das Vorzeichen der Strangnummern. Bei der Berechnung der neuen Druckhöhe im Knoten K liefert die K-te Zeile der Verbindungsmatrix die notwendigen Informationen für den Zugriff zu den Durchflußwerten und Druckhöhen. Der Rückgriff auf den früheren Zustand wird durch die relative Länge des Stranges gesteuert.

Die Berechnung der H-Werte ist auf diese einfache Weise eigentlich nur für die Knoten möglich, in denen QA gleich Null ist, die also weder einen Regnerstandort noch den Knoten am Kommandoschieber darstellen. Für diese anderen Knotentypen muß der druckabhängige QA-Wert in besonderen Unterprogrammen berechnet werden. Hierzu werden in Abhängigkeit von der Nummer des Knotentyps die Unterprogramme für den Regnomat (REGMAT) bzw. für den Kommandoschieber (KOMMDO) aufgerufen.

Diese Konzeption sicherte die Allgemeingültigkeit der Algorithmen für die Charakteristiken-Methode, reduzierte die Eingabedaten für das Rohrnetz und seine Verknüpfung auf ein Minimum und schränkte damit auch die Fehlermöglichkeiten bei der Datenerfassung für das Netz weitgehend ein.

4. Das Unterprogramm REGMAT

Das Unterprogramm für die Regnomaten hat die Aufgabe, die Bewegung des Steuerkolbens bei veränderlichem Leitungsdruck zu simulieren und aus der Schieberstellung den druckabhängigen Ausfluß durch die Regnerdüse zu berechnen. Bei der Modellierung des Verhaltens der Automatikregner wurde offenbar, daß es neben den zwei Grundformen der Bewegung, die stark vereinfachend durch die Formulierungen „REGNOMAT öffnet bei Druckerhöhung“ und „REGNOMAT schließt bei Drucksenkung“ beschrieben werden können, eine Vielzahl anderer Verhaltensweisen gibt, die insbesondere durch die gegenseitige Lage von Steuerkolben und Schieber (Wegdifferenz im Langloch) verursacht werden.

Um die Hysterese im Druck-Weg-Diagramm des Regnomaten zu berücksichtigen, werden anfangs mit den empirischen Abhängigkeiten des Bildes 3 zwei Druckhöhen berechnet, die der alten Kolbenstellung als Grenzwerte für das Verharren des Kolbens zugeordnet sind. Aus dem Vergleich der aktuellen Druckhöhe mit diesen Grenzwerten entwickeln sich die verschiedenen Zweige des Algorithmus für die Bestimmung der neuen Kolben- und Schieberstellungen.

Für die neue Schieberstellung des Regnomaten wird dann der Ausflußbeiwert aus dem Polygonzug des Bildes 4 durch Interpolation errechnet. Mit ihm und dem Hilfswert $\sum S_j \sum C$ nach Abschnitt 3 wird eine quadratische Gleichung gelöst, die schließlich den Ausfluß und die neue Druckhöhe am Regnerknoten liefert.

5. Das Unterprogramm KOMMDO

Für die Steuerzentrale am Eingang zum Berechnungsnetz muß für jeden Zeitschritt zunächst die relative Zeit im laufenden Zyklus bestimmt werden. Damit ergibt sich aus dem Zeitprogramm der Steuerzentrale der aktuelle Öffnungsgrad des Kommandoschiebers bzw. der Zustand des Auslaufventils und aus der Abhängigkeit entsprechend Bild 2 der aktuelle k_v -Wert des Kommandoschiebers.

Für den Fließzustand in der Steuerzentrale muß bei geöffnetem Kommandoschieber außerdem die Druckhöhe in der Zulaufleitung verarbeitet werden. Sie wird beim gegenwärtigen Entwicklungsstand aus eingelesenen Daten für einen Polygonzug mit dem zeitlichen Verlauf dieser Druckhöhen

interpoliert. Mit diesen Hilfswerten können schließlich Durchfluß und Druckhöhe aus einer quadratischen Gleichung errechnet werden.

6. Zur Arbeit mit dem Modell

Zur Vorbereitung der Berechnung müssen zunächst die Daten des Berechnungssystems, bestehend aus den Rohrnetzdaten, den Kennwerten der Regnomaten und den Kennwerten der Steuerzentrale (Kommandoschieber) erfaßt werden.

Für das Rohrnetz wird hierzu die charakteristische Grundlänge bestimmt, sie liegt in Abhängigkeit vom Regnertyp im allgemeinen zwischen 35 und 50 m.

Die Längen aller Rohrstränge werden auf das Einfache oder Doppelte dieser Grundlänge zurückgeführt; längere Leitungen werden durch Zwischenschalten von Knoten in Teilstrecken zerlegt. Sodann sind verschiedene Numerierungen vorzunehmen. Die Knoten werden ab 1 fortlaufend nummeriert. Die Strangnummern sind beliebig, die Stränge erhalten rechnerintern eine gesonderte Numerierung ab 1 fortlaufend. An erster Stelle der Strangdaten-Lochkarten muß die für den Strang, der am Kommandoschieber beginnt, stehen. Die Lage jedes Strangs im Netz wird durch zwei Knotennummern für den Anfang und das Ende eindeutig fixiert. Die Regnomaten erhalten ebenfalls eine Numerierung ab 1 fortlaufend. Für jeden Regnomaten ist auch die Anfangstellung des Zahnrades anzugeben.

Die speziellen REGNOMAT-Kennwerte und die Daten für die Steuerzentrale sind nach den Vorschriften des Datenfolgeplanes zusammenzustellen und abzulochen. Für das Betätigungsprogramm des Kommandoschiebers ist dabei zu beachten, daß der beträchtliche Anteil seiner Offenzeit im Modell stark verkürzt werden kann. Hierzu rechnet man zweimal je einen Zyklus durch, wobei die Zahnräder so einzustellen sind, daß einmal einer der entferntesten Regnomaten und das andere Mal ein nahegelegener Regnomat öffnen muß. Es ist dabei die Variante mit dem punkweisen Kurvendruck für einige Knoten-Druckhöhen und dem Durchfluß am Kommandoschieber zu wählen. Der Kurvenverlauf zeigt dann deutlich, nach welcher Zeit sich der stationäre Fließzustand im Netz bei diesem speziellen Regnerbetrieb eingestellt haben wird. Die Offenzeit des Kommandoschiebers kann entsprechend verkürzt werden, u. U. ist es sogar möglich, für die Berechnung den Hub des Kommandoschiebers auf Werte unter 100 Prozent zu begrenzen. Der Kurvenverlauf für die Druckhöhen wird sofort erkennen lassen, ob der Kommandoschieber hinsichtlich k_v -Wert-Charakteristik und Öffnungs- bzw. Schließgeschwindigkeit richtig ausgelegt worden ist. Der Einfluß spezieller Druckwellenüberlagerungen und Druckschwingungen auf alle Regnomaten kann mit der anderen Variante des Ergebnisdrukkes über eine größere Zahl von Zyklen überwacht werden. Zeigen sich im Rhythmus der Regner Störungen, so ist es sinnvoll, wieder auf den punkweisen Kurvendruck zurückzugreifen und die Ursachen der Störungen durch Darstellung der zeitlichen Druckverläufe in den fraglichen Zyklen zu ergründen.

Da das Modell den Einfluß von Undichtigkeiten des Rohrnetzes nicht berücksichtigt, verlaufen die errechneten Druckschwankungen im allgemeinen weniger stark gedämpft als in der Praxis. Es ist deshalb zu erwarten, daß ein REGNOMAT-System, das im Modell ordnungsgemäß arbeitet, bei sorgfältiger Entlüftung des Rohrnetzes auch für den praktischen Betrieb hydraulisch richtig ausgelegt ist.

Literatur:

- 1 Wirsching, G./H.-F. Müller/K. Fischer: Ergebnisse der Entwicklung eines automatischen ortsfesten Verfahrens für die Klarwasserberechnung. *agrar-technik* 23 (1973) H. 4. S. 161-163
- 2 Ludewig, D.: „Beitrag zur mathematischen Modellierung der Druckstoßerscheinungen in Rohrleitungen und Rohrsystemen“. *Wasserwirtschaft — Wassertechnik* 20 (1970) H. 11, S. 376-381

A 9487