Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 91 (1999)
Heft: 11-12

Artikel: Fuzzy-Logic in der Regelung von Laufkraftwerken
Autor: Sachs, Roland
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940098

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Fuzzy-Logic in der Regelung von Laufkraftwerken

Roland Sachs

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt eine Lösung für die automatische Regelung von Wasserkraftwerken, die dem zunehmenden Druck nach Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen und der Sensitivität der ökologischen Umgebung standhält. Die Forderung nach Optimierung der Betriebsabläufe nach verschiedensten Kriterien stellt hohe Herausforderungen an die Lieferanten der Automatisierungseinrichtungen und hat die Firma Rittmeyer bewogen, in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich, den Einsatz der Fuzzy-Technologie in der Wasserhaushaltsautomatik zu untersuchen. Das Ziel der Arbeit lag darin, den automatischen Betrieb von Laufwasserkraftwerken unter Berücksichtigung aller Forderungen von Betreiber, Behörden, Öffentlichkeit und Umwelt weiter zu optimieren. Zur Verifizierung der Ideen und zum Vergleich mit bisherigen Lösungen wurde ein Flusskraftwerk numerisch nachgebildet. Die Untersuchungen zeigten, dass vor allem im Aufgabenbereich der Abflussverteilung auf Turbinen und Wehrverschlüsse die Fuzzy-Logic gegenüber den konventionellen Lösungen wesentlich mehr Flexibilität bietet. Das Entwurfsverfahren für Fuzzy-Lösungen mit wissensbasierten und linguistisch formulierten Regeln eignet sich optimal für die Umsetzung von Abflussreglementen, Betriebsvorschriften und Erfahrungswissen.

Die Firma Rittmeyer hat in den Aarekraftwerken Wildegg-Brugg und Rupperswil-Auenstein (Bild 1) erste Anwendungen erfolgreich eingesetzt. Innovative Fuzzy-Lösungen sind auch für die Automatisierung der Maschineneinsätze im Bereich Energiemanagement vorbereitet.

Die Vorteile für den Anlagenbetreiber liegen auf der Hand. Die einfachen, transparenten und vor allem flexiblen Lösungen leisten einen Beitrag zur Maximierung der Energieausbeutung, senken die Kosten, erhöhen die Zuverlässigkeit und verbessern die öffentliche Akzeptanz.

1. Ausgangslage

Die Regelung von Wasserständen und Durchflüssen nimmt beim Betrieb von Wasserkraftwerken eine dominante Stellung ein. Bei automatisierten Anlagen übernimmt die Wasserhaushaltsautomatik diese wichtigen Aufgaben. Im Hinblick auf die maximale Energiegewinnung durch den optimalen Einsatz der Turbinen, aber auch auf ein kontrolliertes Abführen des nicht nutzbaren Wasserstromes durch die Entlastungsorgane, wird die Wichtigkeit dieser regeltechnischen Aufgabe deutlich. Abhängig vom Anlagentyp und Interesse des Betreibers sollen die Turbinen und Wehrverschlüsse als Regel- und Stellorgane ihre primären Aufgaben wie Energieumsetzung, Wasserstrom- oder Stauzielregelung optimal erfüllen. Dabei sind aber auch sekundäre Zielsetzungen zu beachten. Die zum Teil schwerfälligen Stellorgane (Wehrklappen, Tafel- und Segmentschützen usw.) sind oft einem erheblichen Verschleiss unterworfen und erfordern eine schonende Ansteuerung. Zudem sind zum Schutz der Umwelt unnatürliche Pegel- und Durchflussschwankungen sowie störende Geräuschemissionen durch ungünstige Wehrdurchströmungen zu vermeiden. Je nach Situation entstehen durch die Vielzahl der zu berücksichtigenden Kriterien Zielkonflikte, welche nur durch Kompromissentscheide bewältigt werden können. Die Konflikte werden zusätzlich verstärkt, wenn die Staustufen als Wasserstrassen genutzt werden [2]. Der Schleusenbetrieb stört durch das Füllen und Entleeren der Schleusenkammer die Kontinuität des Wasserstromes und als Folge auch den Wasserstand. Die Kraftwerksbetreiber beherrschen die verschiedenen Betriebsfälle durch Organeinsatzvorschriften, Abflussreglemente und Betriebsrichtlinien, ergänzt mit den meist langjährigen Erfahrungen des Betriebspersonals.

Infolge der steigenden Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Kraftwerksanlagen werden immer komplexere Automatisierungssysteme eingesetzt. Der unbesetzte und fernüberwachte Betrieb der Anlagen gehört heute zur Tagesordnung. Das Fehlen der menschlichen Aufsicht vor Ort ruft nach zuverlässigen und sicheren Lösungen. Um im Gebiet der Automation von Wasserkraftwerken die technischen Ressourcen optimal zu nutzen, hat Rittmeyer mit dem Institut für Automatik an der Technischen Hochschule Zürich ein KTI-Projekt (Projekt unterstützt durch die Kommission für Technologie und Innovation) durchgeführt, mit dem Ziel, die Wasserhaushaltsautomatik mit Fuzzy-Technik zu optimieren. Das Projekt wurde mit der Dissertation «Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Laufwasserkraftwerken» [1] abgeschlossen, die mit dem ETG-Innovationspreis 1999 ausgezeichnet wurde.

2. Prozesssimulation

Zur Verifizierung der Ideen und für den Vergleich verschiedener Automatisierungskonzepte wurde ein Laufwasserkraftwerk bestehend aus Stauraum, zwei Turbinen und

Bild 1. Kraftwerk Rupperswil-Auenstein.

vier kombinierten Wehrfeldern (Segmentschützen mit aufgesetzten Klappen) mit dem Software-Tool Matlab-Simulink numerisch simuliert [1 Teil I]. Das hydraulische Verhalten des Stauraumes wird mit einem Kanalmodell mit linearisierten De-Saint-Venant-Gleichungen nachgebildet. Ein gemischt zeitkontinuierliches-diskretes Modell dient zur Simulation der Turbinen und Wehrverschlüsse.

Mit dem Modell (Bild 2) können beliebige Betriebsfälle und Störszenarien gefahrlos und effizient getestet werden. Der modulare Aufbau ermöglicht einen einfachen Austausch der einzelnen Blöcke. So können verschiedene Lösungen für die Wasserhaushaltsautomatik (WHA) eingesetzt und unter gleichen Bedingungen getestet und verglichen werden.

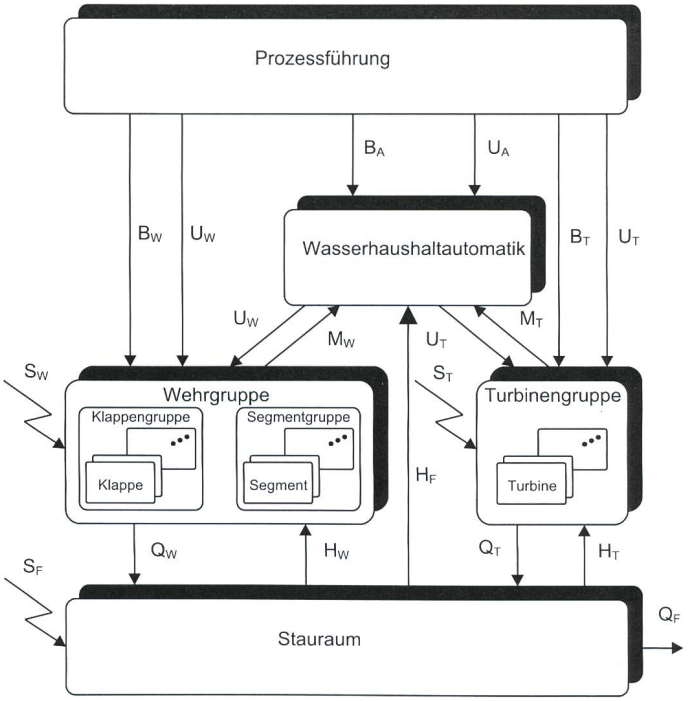

Bild 2. Modell eines Laufkraftwerkes mit Matlab Simulink [6].

3. Wasserhaushaltsautomatik mit Fuzzy-Logic

3.1 Aufgabenstellung

Wie können die Forderungen nach Stauzieleinhaltung und Abflussvergleichmässigung unter Berücksichtigung von energiewirtschaftlichen, technischen, ökologischen und betrieblichen Randbedingungen optimal erfüllt werden?

Aus obiger Fragestellung resultieren folgende zielorientierte Teilaufgaben:

- Die WHA muss die Betriebsziele [2] der Anlagenbetreiber erfüllen wie:
  - maximale Energieausbeute aus der regenerativen Wasserkraft;
  - Einhaltung des Stauzieles;
  - Einhaltung des vorgegebenen Abflussreglementes (Strömungsprofil);
  - Schonung der Stellorgane (Minimierung der Stellbefehle);
  - Erst-/Letztschritt der Wehrorgane mit automatischer Durchflusskompensation;
  - Freibordregelung;
  - automatische Abflussumlagerung innerhalb von Organgruppen (Gleichlauf);
  - automatische Abflussumlagerung über Organgruppen (z. B. Klappen ➡ Turbinen);
  - stetige Übergänge «Turbinen ➡ Klappen ➡ Segmente» in beide Richtungen.
- Für die Auswahl der Stellorgane muss eine kompromissfähige Entscheidungslösung entwickelt werden. Sie muss widersprüchliche Zielkriterien beherrschen und durch Wichtung der Kriterien beeinflussbar sein.
- Die Lösung muss transparent und flexibel sein, so dass die individuellen Bedürfnisse des Betreibers durch Parametrierung optimal erfüllt werden.
- Standardisierbare Funktionen und effiziente Werkzeuge sollen die Herstellungskosten senken.

3.2 Lösungskonzept

In der klassischen Automatisierungstechnik trifft man häufig auf die Kaskadierung von Führungskreis, Dispatcher und Stellkreis. Auch in der Wasserhaushaltsautomatik hat sich dieses Konzept durchgesetzt und sehr gut bewährt (Bild 3).

Um die Zuverlässigkeit der WHA mit dem neuen Konzept nicht zu schmälern, bleibt das Bewährte erhalten. Neuerungen sollen nur dort eingebracht werden, wo nachweisbar Verbesserungspotential vorhanden ist. Hinweise aus der Fachliteratur [3], [5] und eigene Untersuchungen zeigen, dass Fuzzy-Logic für die Lösung der Abflussverteilung, ein mehrkriterielles Entscheidungsproblem, gegenüber der analytisch-numerischen Methode bedeutende Vorteile anbietet. Vorschriften, Reglemente, Erfahrungsschätze wie auch Messgrössen und Zustände können mit komfortablen Hilfsmitteln direkt miteinander verknüpft und effizient in die Lösung eingebracht werden. Die Tools [7] dokumentieren die implementierten Funktionen automatisch in verbaler und graphischer, also in allgemeinverständlicher Form.

Damit sind die Forderungen aus der Aufgabenstellung bezüglich Transparenz und Flexibilität bereits mit dem Standard des Werkzeuges erfüllt.

3.2.1 Der Führungskreis

Eine zentrale Aufgabe der Wasserhaushaltsautomatik für ein Laufkraftwerk besteht darin, unter Einhaltung des vorgegebenen Stauzieles den zufliessenden Wasserstrom durch die zur Verfügung stehenden Turbinen und Wehröffnungen kontinuierlich abzuführen. Zu diesem Zweck wird als Führungsgrösse ein Abflusssollwert ermittelt.

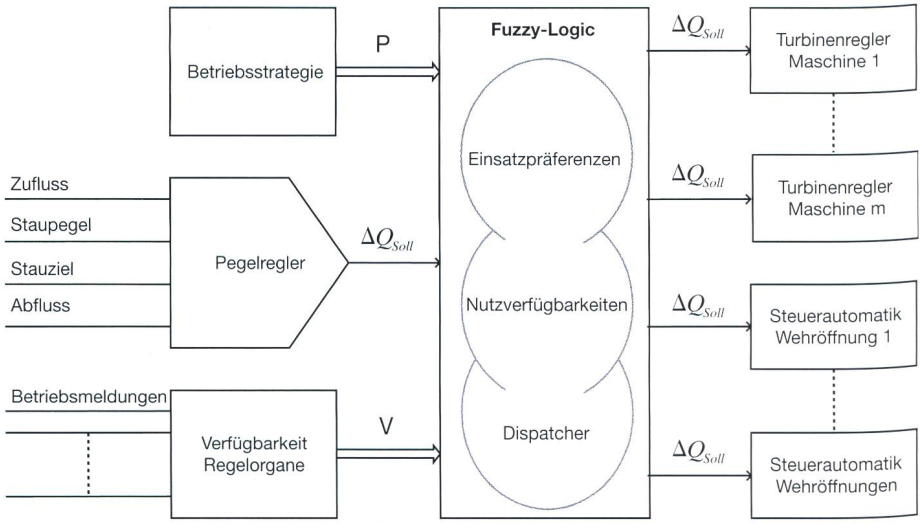

Bild 3. WHA-Konzept mit Fuzzy-Logic.

Gleichung für den Führungskreis (Pegelregler):

$$Q_{Soll}(t) = \Delta H(t) \cdot G_P + Q_{OL}(t + T_L) \cdot Z_Q \qquad (1)$$

Q_{Soll}: Durchflusssollwert (Führungsgrösse)
ΔH: Pegelabweichung zum Stauziel
G_P: Übertragungsfunktion des Pegelreglers
Q_{OL}: Oberliegerabfluss (Zuflussmessung)
Z_Q: Übertragungsfunktion der Störgrössenaufschaltung (Laufzeitenmodell)
T_L: Schwallaufzeit im Stauraum

Da der Wasserstrom in der Natur grundsätzlich zu keiner Zeit unterbrochen werden darf, ist es sinnvoll, anstelle des absoluten Durchflusssollwertes lediglich die erforderliche Änderung zum aktuellen Abfluss zu addieren.

$$\Delta Q_{Soll}(t) = Q_{Soll}(t) - Q_a(t) \qquad (2)$$

Bei n Abflussorganen gilt für den Gesamtabfluss:

$$Q_a(t) = \sum_{i=1}^{n} Q_i(t) \qquad (3)$$

Aus (1) und (3) in (2) folgt:

$$\Delta Q_{Soll}(t) = [\Delta H(t) \cdot G_p + Q_{OL}(t + T_L) \cdot Z_Q] - \sum_{i=1}^{n} Q_i(t) \qquad (4)$$

3.2.2 Dispatcher

a) Strategische Einsatzpräferenzen

Die Betriebsstrategie eines Laufkraftwerkes wird in der Praxis häufig mit einem Abflussreglement definiert. Daraus können für jede Organgruppe Präferenzen in Öffnungs- und Schliessrichtung abgeleitet werden.

Für das Beispiel im Bild 4 gilt:

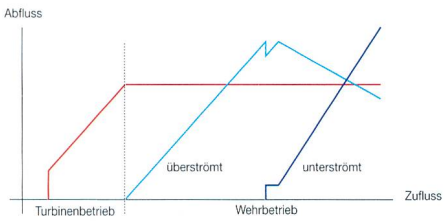

Bild 4. Abflussreglement eines Laufkraftwerkes.

Turbinenpräferenz in Öffnungsrichtung:
$P_T^+ = 3$ (hoch)
Turbinenpräferenz in Schliessrichtung:
$P_T^- = 1$ (tief)
Klappenpräferenz in Öffnungsrichtung:
$P_T^+ = 2$ (mittel)
Klappenpräferenz in Schliessrichtung:
$P_K^- = 2$ (mittel)
Segmentpräferenz in Öffnungsrichtung:
$P_S^+ = 1$ (tief)
Segmentpräferenz in Schliessrichtung:
$P_S^- = 3$ (hoch)
Darstellung der Organpräferenz in Vektorform:
$P_O = [P_O^+ / P_O^-]$ mit $O \varepsilon (T, K, S)$

Mit der auf dem Abflussreglement beruhenden Präferenzierung kann jede Abflussänderung (ΔQ_{Soll}) durch eine einfache Maximalauswahl auf das richtige Organ geführt werden.

Da damit weder Organverfügbarkeiten und Betriebszustände noch eine differenzierte Ansteuerung der Einzelorgane berücksichtigt sind, muss die Präferenzierung weiter verfeinert werden. Dies erfolgt durch eine entsprechende Abschwächung der Präferenzen in Abhängigkeit von zusätzlichen Kriterien. Jede Organpräferenz kann durch sogenannt harte und weiche Zusatzkriterien beeinflusst werden.

b) Harte Zusatzkriterien

Die harten Kriterien resultieren aus bivalenten Zuständen wie Öffnungs- und Schliessbegrenzungen und der Verfügbarkeit der Organe. Die Verfügbarkeit V_O wird wie die Präferenz mit zweidimensionalen Vektoren dargestellt.

Definition des Verfügbarkeitsvektors
$V_O = [v_O^+ / v_O^-]$ mit $O \varepsilon (T, K, S)$

Der Verfügbarkeitsvektor bildet folgende Organzustände ab:
- nicht verfügbares Stellorgan;
- Stellorgan nur in Schliessrichtung verfügbar;
- Stellorgan nur in Öffnungsrichtung verfügbar;
- Stellorgan in beide Richtungen verfügbar.

c) Weiche Zusatzkriterien

Die weichen Kriterien folgen aus zahlreichen Nebenbedingungen wie z. B.:
- Strömungsprofil quer zur Flussachse;
- Geschwemmseltransport (Oberflächenströmung);
- Minimierung der Geräuschemissionen;
- Minimierung der Anzahl Stellbefehle;
- gleichmässige Verteilung der Stellbefehle;
- Erst-/Letztschritt von Wehrorganen
- usw.

Die Schwierigkeit in der Abflussverteilung auf die Stellorgane liegt darin, dass Nebenbedingungen oft zu Zielkonflikten führen. Beispielsweise kann das Kriterium «Geschwemmseltransport» im Widerspruch zum angestrebten Strömungsprofil stehen. Der Lösungsansatz für diese Problematik liegt in der linguistisch formulierten Wichtung der Kriterien. Im Kapitel 3.3 wird auf die Lösung näher eingegangen.

3.2.3 Maschinensteuerung

Jedes Stellorgan (Turbinen, Wehrklappen und Wehrsegmente) besitzt seine eigene Steuerautomatik mit Stellungs- bzw. Abflussregler und gegebenenfalls Sequenzsteuerungen, die die zugewiesenen Durchflussänderungen nachführt. Die Stellkreise werden meist mit quasistetigen Proportionalreglern oder Dreipunktreglern realisiert. Auf die Stellkreis-Thematik wird hier nicht näher eingegangen.

3.3 Einsatz von Fuzzy-Logic in der Organauswahl (Abflussverteiler)

Wie in 3.2.2 aufgezeigt, gilt es, jedes Organ nach den strategischen Organpräferenzen, dem vorgeschriebenen Abflussreglement und in Abhängigkeit der harten und weichen Kriterien einzusetzen. Die harten Kriterien können durch einfache Vektormultiplikation der Präferenz P_O mit der Verfügbarkeit V_O bedingungslos berücksichtigt werden. Hingegen lassen sich die weichen Kriterien nur bedingt einhalten. Allfällige Zielkonflikte müssen durch Kompromisse beherrscht werden. Wie bereits erwähnt, eignet sich für die Bearbeitung der sogenannt weichen Kriterien die Fuzzy-Logic optimal.

In der Folge wird zur Illustration der Lösung die Bearbeitung der zwei Kriterien «Strömungsprofil» und «Anzahl Befehle» vereinfacht dargestellt.

3.3.1 Fuzzyfizierung der Kriterien

Kriterium Strömungsprofil am Wehr

Mit einem Vergleich der aktuellen Wehröffnung mit dem angestrebten Strömungsprofil (Bild 5) kann für jedes Wehrorgan ein relativer Stellungsfehler *dy*, auch Gleichlauffehler genannt, ermittelt werden. Damit wird der Gleichlauffehler zu einem Auswahlkriterium.

Kriterium Anzahl Stellbefehle

Die Häufigkeit der Stellbefehle kann minimiert und die Verteilung optimiert werden, indem Abflusskorrekturen möglichst mit demjenigen Organ ausgeführt werden, welches sich schon in die entsprechende Richtung bewegt. Wenn sich kein Organ bewegt, soll der Stellbefehl an das Organ abgegeben werden, welches am längsten stillsteht. Die Optimierung der Stellbefehle kann also mit der Auswertung der Laufzeit und Standzeit der Organe erreicht werden.

Fuzzyfizierung

In diesem Lösungsschritt müssen nun die weichen Kriterien definiert werden, welche die Organauswahl beeinflussen sollen (vgl. Kapitel 3.2.2). Um den Rahmen dieses Aufsatzes nicht zu sprengen, wird bei der Lö-

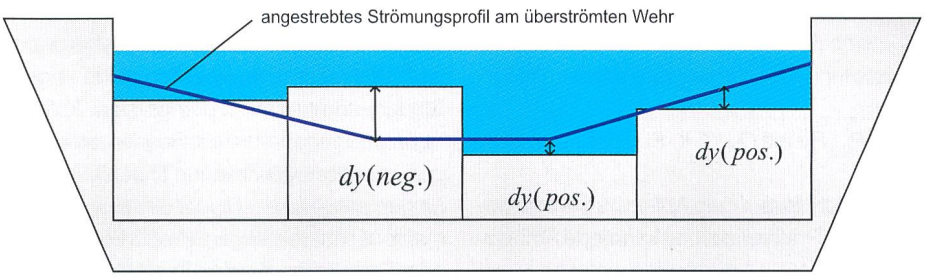

Bild 5. Strömungsprofil.

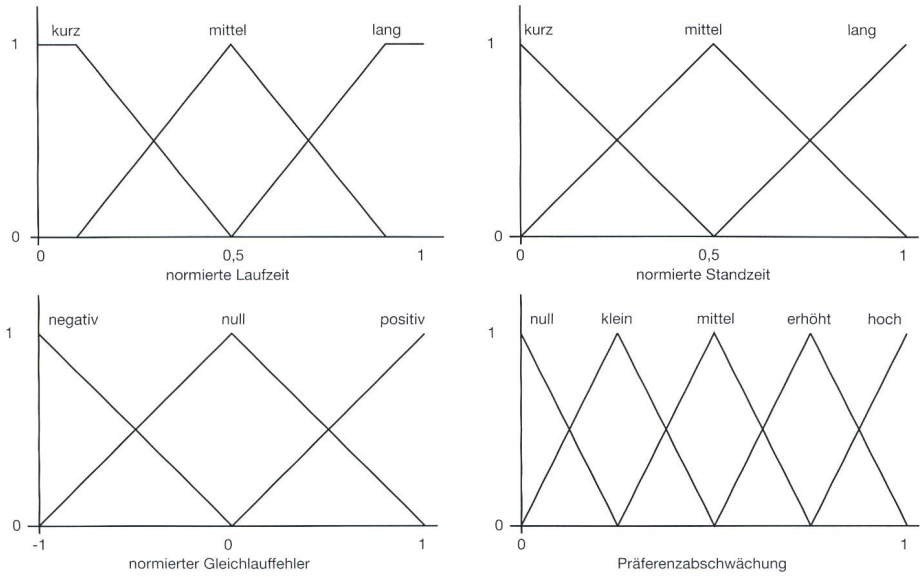

Bild 6. Fuzzifizierung der Kriterien.

sungsbeschreibung nur auf vereinfachte Ansätze für den Gleichlauf und die Optimierung der Stellbefehle eingegangen (Bild 6).

3.3.2 Nutzung der Wissensbasis

Aus dem Erfahrungswissensschatz kann nun linguistisch bestimmt werden, wie die einzelnen Argumente die strategischen Einsatzpräferenzen der Organe beeinflussen sollen. Zu diesem Zweck wird eine Hilfsvariable δ_P (Präferenzabschwächung) eingeführt.

Allgemein gilt: WENN {*Argument 1*} UND/ODER {*Argument 2*} UND/ODER {*Argument i*} DANN $\delta_P = \ldots$

Nach der Max-Min-Inferenz der Regelbasis resultiert in Abhängigkeit des Betriebszustandes für jedes Organ ein δ_P^+ bzw. δ_P^-, also eine Abschwächung der strategischen Präferenz in Öffnungs- bzw. Schliessrichtung. Der Fuzzy-Regelsatz in Tabelle 1 zeigt für das gewählte Beispiel eine mögliche Lösung.

3.4 Nutzverfügbarkeit und Abflussverteilung

Als resultierendes Kriterium für den Organeinsatz werden organspezifische Nutzverfügbarkeiten N_O berechnet. Als Ausgangsgrösse dient die strategische Organpräferenz P_O, welche durch die untergeordneten Zielsetzungen, also mit den sogenannt «weichen Kriterien» beeinflusst werden. Wird nun die Präferenz um die gewichtete Abschwächung $k_O \cdot \delta_O$ reduziert und mit der «harten» Organverfügbarkeit multipliziert, resultiert die Nutzverfügbarkeit.

$$N_O = [P_O - k_O \cdot \delta_O] \cdot V_O \qquad (5)$$

N_O: organbezogene Nutzverfügbarkeit mit $O \varepsilon (T, K, S)$

Mit dem Gewichtungsfaktor k_O kann der Einfluss der weichen Kriterien organbezogen getrimmt werden.

Mit einem einfachen Auswahlverfahren kann das Organ gefunden werden, welches für eine Abflussänderung ΔQ_{Soll} die höchste Nutzverfügbarkeit aufweist. Damit grosse Durchflussabweichungen ausreichend schnell eliminiert werden, besteht die Möglichkeit, in Abhängigkeit der Abweichung mehrere Organe mit den höchsten Nutzverfügbarkeiten auszuwählen.

Für den Abflusssollwert des Einzelorganes gilt:

$$\Delta Q_{Soll}(t) = s_O(N_O) \cdot \Delta Q_{Soll}(t) \text{ mit } s_O = \begin{cases} 1, \text{ wenn } N_O = Max \\ 0, \text{ wenn } N_O < Max \end{cases} \qquad (6)$$

4. Realisierte Projekte

Die Firma Rittmeyer wurde von der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) beauftragt, die Wasserhaushaltsautomatiken für die Aarekraftwerke Wildegg-Brugg (CH) [4] und Rupperswil-Auenstein (CH) zu realisieren. In beiden Projekten wurde die Abflussverteilung mit Fuzzy-Logic gelöst.

Das Abfluss- und Wehrreglement von Rupperswil-Auenstein (Bild 7) stellt sehr hohe Anforderungen an die Automatisierung. Besondere Aufmerksamkeit erforderte der Wehrbetrieb.

Die elektromechanischen Antriebe sind verschleissanfällig und sollten so wenig wie möglich bewegt werden. Beim Übergang vom Turbinen- zum überströmten Wehrbetrieb muss beachtet werden, dass nicht zu geringe Überfallhöhen entstehen, da kleine Wehrüberströmungen störende Geräuschemissionen verursachen.

Damit die Kontinuität im Abfluss aber trotz einem Erstschritt von ca. 20 cm der Oberschützen erhalten bleibt, müssen die Turbinen allfällige Abflussfehler kompensieren. Die Folge ist ein Verlust in der Energieumsetzung, welcher aber minimal zu halten ist.

Auch beim Unterschützenbetrieb sind Erst- und Letztschritte gefordert. Zu kleine Öffnungen belasten die Wehrdichtungen und begünstigen das Verklemmen von Geschiebematerial zwischen Wehrsohle und Schützenunterkante. Schliesslich verlangen die getrennten Antriebe von Ober- und Unterschützen eine Überwachung und Steuerung der Überlappung der beiden Verschlussorgane.

Aus der Aufgabenstellung wird folgendes Betriebsverhalten abgeleitet:

WENN *Gleichlauffehler*	WENN *Standzeit*	DANN δ_P^+	DANN δ_P^-
negativ	lang	null	hoch
negativ	mittel	klein	hoch
negativ	kurz	hoch	hoch
null	lang	klein	erhöht
null	mittel	mittel	mittel
null	kurz	hoch	klein
positiv	lang	hoch	null
positiv	mittel	hoch	klein
positiv	kurz	hoch	hoch

Tabelle 1. Fuzzy-Regelsatz.

- Maximierung der Energiegewinnung bzw. Minimierung der Verluste;
- einstellbare Asymmetrie bei der Turbinenbelastung (Schieflastbetrieb);
- Erst- und Letztschritt für Ober- und Unterschützen. Kleine Öffnungen sind zu vermeiden;
- Durchflusskompensation bei der Ausführung von Erst- und Letztschritten;
- Einhaltung von minimalen und maximalen Überlappungsgrenzen der Ober- und Unterschützen;
- einstellbares Strömungsprofil quer zur Flussachse beim über- und unterströmten Wehrbetrieb;
- Einhaltung des vorgegebenen Dotierreglementes bei Ausfall der Dotierturbine;
- Minimierung der Stellbefehle an die Wehrorgane zur Schonung der alten elektromechanischen Antriebe.

Das für die Aufgabe eingesetzte Hydroleitsystem mit der Fuzzy-Implementation wurde einem umfangreichen Werktest unterzogen.

Der Prozess, d. h. Stauraum, Wehranlage und Turbinen, wurde in Echtzeit simuliert und in den Testaufbau integriert. Der Aufbau erlaubte es, beliebige Betriebsfälle realistisch zu prüfen und die Lösung zu optimieren. Die Wasserhaushaltsautomatik von Rupperswil-Auenstein steht seit Januar 1999 in Betrieb. Das Lösungskonzept mit Fuzzy-Logic bewährt sich zur vollen Zufriedenheit.

5. Praktischer Nutzen und Schlussfolgerung

Die Voraussagen der Studie [1] werden durch die realisierten Projekte bestätigt. Die Fuzzy-Technologie liefert hauptsächlich im Bereich der Abflussverteilung und der Auswahl der Stellorgane nach den verschiedenen zum Teil widersprüchlichen Kriterien im Vergleich zu den logisch-numerischen Lösungen bessere Resultate. Die Fuzzy-Lösung gewährleistet maximale Energieausbeute und optimiertes Regelverhalten mit bestmöglicher Schonung der Wehrantriebe, Stauräume und Uferzonen.

Aus der Sicht des Anlagenbetreibers liegt zusätzlich ein grosser Nutzen darin, dass er seine Betriebserfahrung, beispielsweise bei der Wahl Stellorgane, durch sprachliche Formulierung in die Lösung einbringen kann. Mit der Wichtung der Kriterien und gegebenenfalls durch Einfügen oder Modifizieren von Regeln (Erweiterung der Wissensbasis) kann die Automatik im Betrieb mit geringem Aufwand optimiert und situativ angepasst werden. Da neben dem wirtschaftlichen Erfolg auch die öffentliche Akzeptanz einer Kraftwerksanlage zunehmend an Wichtigkeit gewinnt, sind flexible Lösungen in der WHA gefragt – auch hier liegt eine Stärke der Fuzzy-Technologie.

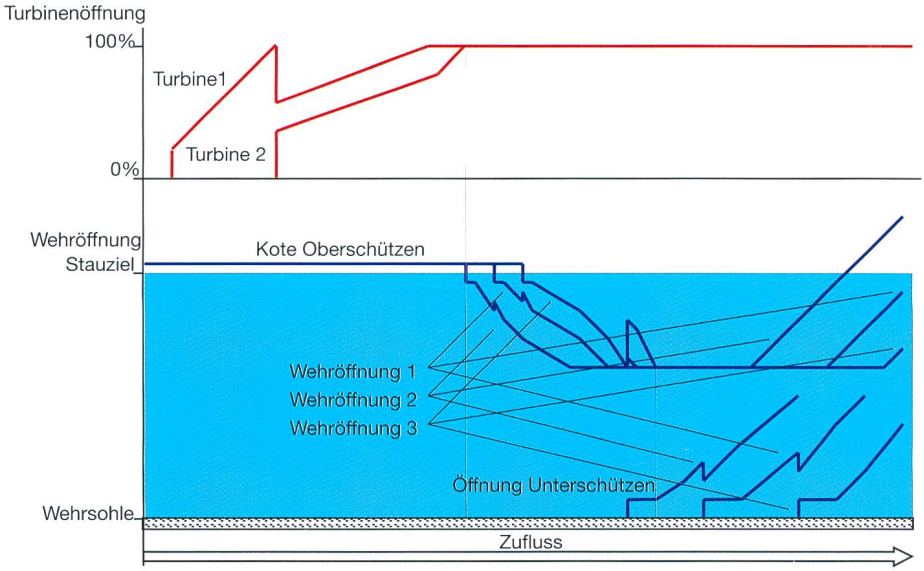

Bild 7. Abflussreglement Rupperswil-Auenstein.

Eine bei der Realisierung von WHAs wichtige Aufgabe ist die Funktionsbeschreibung. Die Dokumentation klassischer Lösungen ist oft mühsam und aufwendig. Die Fuzzy-Technik hingegen dokumentiert sich durch die sprachliche Formulierung der Lösung weitgehend selbst. Ausserdem können mit komfortablen Tools die Abläufe online visualisiert und verfolgt werden (Bild 8).

Der Einsatz von Fuzzy-Systemen ermöglicht in der Prozessautomation interessante wirtschaftliche Lösungen. Im Bereich Energiemanagement ist beispielsweise die Automatisierung der Maschinenauswahl ein erfolgversprechendes Einsatzfeld. Untersuchungen und Erfahrungen zeigen aber auch, dass Fuzzy nicht überall und in jedem Anwendungsbereich vorteilhafte Lösungen bringt. In der Aufgabenvielfalt einer Wasserhaushaltsautomatik wird diese Technik nur durch gezielte Anwendung zu besseren Lösungen führen.

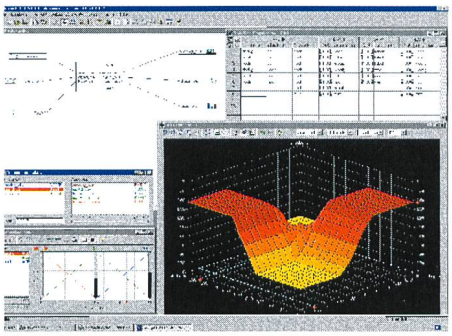

Bild 8. Online-Test und -Parametrierung einer Fuzzy-Funktion.

Aus heutiger Sicht besteht die ideale Lösung für eine Prozessautomation im allgemeinen aus einer Mischung von Fuzzy-Logik, binärer Logik und numerischen Funktionen.

Literaturverzeichnis

[1] *Jacques Chapuis,* Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Laufwasserkraftwerken, Diss. ETH Zürich Nr. 12765, 1998.

[2] DVWK/WBW – Workshop, Gestaute Flusssysteme – Dynamik und automatisierte Betriebsführung, Universität Karlsruhe, 1997.

[3] *Bernd Reusch,* Potential der Fuzzy-Technologie in Nordrhein-Westfalen Fuzzy Demonstrationszentrum Dortmund e.V., 1993.

[4] Rittmeyer AG, Kraftwerk Wildegg-Brugg (CH): Leittechnik im Flusskraftwerk (D 68 18 264), CH-6302 Zug, 1999.

[5] H.-J. Zimmermann/C. v. Altrock, Fuzzy-Logic, R. Oldenburg Verlag München/Wien, 1994.

[6] MathWorks, Simulink (Dynamic System Simulation Software), Mass. 01760-1500, 1995.

[7] MathWorks, Fuzzy-Logic Toolbox (Matlab), Mass. 01760-1500, 1995.

Adresse des Verfassers

Roland Sachs, dipl. El.-Ing. HTL, Projektgruppenleiter c/o Rittmeyer, CH-6302 Zug.