

Schriften zur Angewandten Informatik

Fachhochschule Trier



**Untersuchung zur Prognose der
Pegelentwicklung bei Hochwasserereignissen
mit Fuzzy-Logic
am Beispiel zweier Moselpegel**

von

M. Stüber, P. Gemmar

**Bericht 9703
August 1997**

**Herausgeber: K.-H. Bläsius, P. Gemmar, K.-H. Klösener, A. Künkler
N. Kuhn, R. Linn, R. Oechsle, N. Rudolph, K.-U. Witt**

Fachhochschule Trier
Fachbereich Angewandte Informatik
Schneidershof
54293 Trier
Tel. 0651-8103-345
Fax 0651/8103-454

Kurzfassung

In diesem Bericht werden Untersuchungen zur Prognose von Flußpegelständen bei Hochwasserereignissen mit dem Ansatz der Fuzzy-Logic beschrieben. Aus einer heuristischen Vorgehensweise bei der Erstellung zweier Fuzzy-Modelle für die Moselpegel bei Trier und Cochem wird ein verallgemeinertes Verfahrenskonzept abgeleitet. Damit können Modelle für beliebige Flüsse und Pegel erstellt werden. Durch direkte Umsetzung von Expertenwissen in der Fuzzy-Regelbasis und Optimierung des Fuzzy-Systems anhand von Daten bekannter Ereignisse können Modelle mit relativ geringem zeitlichem Aufwand erstellt und mit guter Vorhersagegenauigkeit aufgebaut werden.

Abstract

This paper describes the investigation of a fuzzy-logic approach for forecasting of water levels at high water events. Starting with a heuristic approach for developing two fuzzy-models for levels at river Moselle at Trier and Cochem a generalized system concept is derived. The system concept allows model construction for any river and level. Expert knowledge can directly be introduced into the rule base and data from known event is used for optimization of the fuzzy system. By this mean the fuzzy model can be established relative rapidly and with good forecast-precision.

Formelzeichen und Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$m_{absAbwW}$	cm	maximale absolute Abweichung zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Wasserstand eines Hochwasserereignisses
m_{AbwW_s}	cm	maximale Abweichung zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Wasserstand am Scheitelpunkt W_s eines Hochwassers
MAE-W	cm	mittlerer absoluter Fehler zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Wasserstand während des gesamten Hochwasserverlaufs
MAE- W_O	cm	MAE für den gesamten Hochwasserverlauf oberhalb W_A
W	cm	Wasserstand
Q_A	m ³ /s	Ausuferungsschwelle; ab dieser Schwelle tritt das Flußwasser aus dem eigentlichen Gewässerbett
W_A	cm	Ausuferungshöhe; ab dieser Höhe tritt das Flußwasser aus dem eigentlichen Gewässerbett
Q_s	m ³ /s	Scheitelabfluß oder auch Abflußspitze eines Hochwassers
W_s	cm	Wasserstandsspitze eines Hochwassers
$Q_{s,H}$	cm	Scheitelabfluß des Hauptgewässers
$Q_{s,N}$	cm	Scheitelabfluß des Nebengewässers

Dieser Bericht basiert auf den Untersuchungen und Ergebnissen der Diplomarbeit „Datenanalyse zur Prognose und Wissensakquisition mit Hilfe eines Fuzzy-Systems am Beispiel Moselpegel“ von Manfred Stüber, Betreuer Prof. Dr. P. Gemmar, Prof. Dr. J. Sartor, im Fachbereich Angewandte Informatik an der Fachhochschule Trier, Dezember 1996.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1
2 AUSGANGSSITUATION.....	2
3 EINFÜHRUNG ZU FUZZY-LOGIC	5
3.1 KONZEPTE DER FUZZY-LOGIC	5
3.1.1 Der Begriff der unscharfen Menge	5
3.1.2 Linguistische Variable	6
3.1.3 Fuzzifikation	6
3.1.4 Inferenz	7
3.1.5 Defuzzifikation.....	8
3.2 AUFBAU EINES EINFACHEN FUZZY-SYSTEMS.....	9
3.3 APPROXIMATIONSFÄHIGKEIT DER FUZZY-SYSTEME.....	10
3.4 TYPEN VON FUZZY-SYSTEMEN	10
3.4.1 Das Fuzzy-System nach Mamdani.....	11
3.4.2 Das Fuzzy-System nach Sugeno.....	11
4 UNTERSUCHUNGEN ZUR PEGELPROGNOSE MIT EINEM FUZZY-SYSTEM	13
4.1 PROBLEMANALYSE.....	13
4.2 DATENAUSWAHL.....	13
4.3 ARGUMENTE FÜR EIN FUZZY-SYSTEM NACH SUGENO	15
4.4 UNTERSUCHUNGSUMGEBUNG	15
4.5 ENTWICKLUNG DES FUZZY-MODELLS ZUR PROGNOSE DES PEGELS IN COCHEM	16
4.5.1 Hydrologische Zusammenhänge	16
4.5.2 Überlegungen und Untersuchungen.....	16
4.5.3 Ergebnisse des Fuzzy-Modells zur Pegelprognose in Cochem.....	17
4.5.4 Analyse und Interpretation der Regelbasis	22
4.6 ENTWICKLUNG DES FUZZY-MODELLS ZUR PROGNOSE DES PEGELS IN TRIER	24
4.6.1 Hydrologische Zusammenhänge	24
4.6.2 Überlegungen und Untersuchungen.....	24
4.6.3 Ergebnisse der Hochwasserprognose:	24
4.6.4 Analyse und Interpretation der Regelbasis	27
5 VERALLGEMEINERTES VERFAHRENSKONZEPT ZUM ERSTELLEN EINES FUZZY-MODELLS ZUR PEGELPROGNOSE	28
5.1 DIE MODELLIERUNGSSTRATEGIE.....	28
5.2 ZUSAMMENFASSUNG DER UNTERSUCHUNGEN	29
6 VERGLEICH ZUR KONVENTIONELLEN VORGEHENSWEISE UND ZUR PROGNOSE MIT NEURONALEN NETZEN	31
7 ZUSAMMENFASSUNG	32
8 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	33

1 Einleitung

Nachdem Fuzzy-Logic im Bereich der Regelungstechnik seit nunmehr zwei Jahrzehnten ihren praktischen Einsatz findet, wird sie seit einigen Jahren auch zunehmend im Bereich der Datenanalyse eingesetzt. Dabei sollen Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen innerhalb sehr großer Datenbestände gefunden werden, um Aussagen über das unterliegende System zu treffen. Liegt über die Systemzusammenhänge Expertenwissen in qualitativer oder quantitativer Form vor, dann kann dies mit Hilfe der Fuzzy-Logic direkt in eine Regelbasis übernommen werden.

Ein Verfahren, das bei der Datenanalyse eingesetzt wird, ist das Klassifikations- oder Vorhersageverfahren. Dabei soll aus einer Menge von Beispielen (z.B. einer zeitdiskreten Meßdatenreihe) eine allgemeine Funktionsbeschreibung abgeleitet werden, die die Vorhersage zukünftiger Werte ermöglicht. Ein solches Problem stellt beispielsweise die Prognose des zu erwartenden Flußpegels bei Hochwasserereignissen dar. Die erfaßten Werte der Niederschlags- und Pegelstandsmessungen können dabei als Eingangswerte angesehen werden. Die Entwicklung des Pegelstandes an bestimmten Pegelmeßstellen ist die zu prognostizierende Größe.

Damit Bewohner in hochwassergefährdeten Gebieten rechtzeitig Schutzmaßnahme einleiten können, sind sie auf möglichst frühzeitige und genaue Prognosen angewiesen. Dazu wurde im Einzugsbereich der Mosel ein dichtes Netz an Pegel- und Niederschlagsmeßstellen errichtet. Basierend auf diesen Daten schätzen Experten bei Hochwasserereignissen die weiteren Pegelverläufe mittels Tabellen und aufgrund jahrelanger Erfahrungen ab. Dabei kann von den vielen zur Verfügung stehenden Meßwerten nur ein kleiner Teil berücksichtigt werden.

Zur automatisierten und verbesserten Prognose des Wasserpegels an der Mosel bei Cochem wurden im Jahre 1995 erste Untersuchungen im Studiengang Angewandte Informatik an der Fachhochschule Trier durchgeführt. Diese Untersuchungen mit Neuronalen Netzen und die dabei erzielten guten Ergebnisse wurden im Rahmen dieser Schriftenreihe veröffentlicht [Salzig]. Die hier vorliegende Schrift schildert alternative Untersuchungen zur Prognose der Pegel in Cochem und Trier mit dem Ansatz der *Fuzzy-Logic*, der das direkte Einbringen von Expertenwissen in Form von Regeln in ein Berechnungsmodell ermöglicht.

2 Ausgangssituation

Im Hochwasserfall können die Pegel an der Mosel innerhalb einer Stunde um 50 cm ansteigen. Eine solche Entwicklung führt bei Anwohnern, flußnah angesiedelte Firmen und Rettungsdienste zu einer Alarmsituation. Um gezielte Schutzmaßnahmen einleiten zu können, werden möglichst langfristige Prognosen der eintreffenden Pegelstände benötigt. Da je nach Ereignissituation das Verhalten und Zusammenwirken der Einflußgrößen unterschiedlich sein kann, sind diese langfristigen Prognosen aber schwierig und oftmals sehr fehlerbehaftet. Im Ernstfall werden vom zuständigen Hochwassermeldezentrum für die Mosel stündlich Prognosen zur Pegelentwicklung der nächsten sechs Stunden geschätzt und veröffentlicht. Dabei kann eine zu niedrige Schätzung dazu führen, daß etwaige Schutzmaßnahmen zu spät eingeleitet werden, zu hohe Schätzungen, daß unnötigerweise mit immensen Aufwand Schutzvorkehrungen getroffen werden und z.B. Firmen die Produktion einstellen.

Um möglichst genaue Prognosen erstellen zu können, müssen im Hochwassermeldezentrum ständig Experten vor Ort sein, die über jahrelange Erfahrungen verfügen und so die hydrologischen und geologischen Gegebenheiten genauestens kennen. Diese Experten schätzen mittels Tabellen und den zur Verfügung stehenden Daten der flußaufwärts liegenden Pegel und der gefallen und prognostizierten Niederschläge den weiteren Verlauf ab. Da bisher kein umfassendes hydrologisches Modell des Flußeinzugsgebietes existiert, kann von den zur Verfügung stehenden Daten nur ein geringer Teil verwendet werden.

Die Untersuchungen mit Neuronalen Netzen [Salzig] zur Prognose des Moselpegels in Cochem brachten sehr gute Ergebnisse. Das dabei erstellte Modell besitzt aber die Nachteile, die im allgemeinen bei Neuronalen Netzen auftreten:

- Prognosen bei extremen Ereignissen sind unsicher
- es müssen Daten von möglichst vielen Ereignissen zur Verfügung stehen, bei denen sich die hydrologischen Gegebenheiten nicht wesentlich geändert haben
- Die Hinzunahme weiterer Informationen (weitere Pegel- oder Niederschlagsmessungen) erfordern ein neues Modell
- Wissen kann in das Neuronale Netz weder integriert noch extrahiert werden

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung zweier Fuzzy-Modelle zur Vorhersage der Entwicklung der Moselpegel in Cochem und Trier in den nächsten 6 Stunden. Dabei wird das Vorpegelverfahren [Schmidt] angewendet. D.h., als Eingänge dienen lediglich Messungen an den flußaufwärts liegenden Pegeln, bzw. Pegel an flußaufwärts mündenden Zuflüssen.

Ausgehend von den Entwicklungsuntersuchungen wird ein Verfahren zur Modellerstellung beschrieben, das

- es ermöglicht, das vorhandene Wissen der Hydrologen bei der Modellierung zu nutzen; damit können dann auch Modelle erstellt werden, wenn z.B. nicht genügend Daten zum Trainieren eines Neuronalen Netzes zur Verfügung stehen,
- Werte auch außerhalb des Bereichs der Testdaten zu prognostizieren vermag, um auch z.B. bei Extremereignissen zur Unterstützung der Experten eingesetzt werden zu können,
- offen ist für Erweiterungen, um mit weiteren Eingangsgrößen die Prognosen nachträglich zu verbessern und den Prognosezeitraum zu vergrößern.

Die Güte der Vorhersagen wird nach folgenden Kriterien bewertet:

- **MAE- W_0** : Mittlerer absoluter Fehler zwischen prognostizierten und tatsächlichen Werten eines Hochwasserereignisses oberhalb der Ausuferungshöhe (W_A).
- **mabsAbwW**: Maximaler absoluter Fehler zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Wasserstand eines Hochwasserereignisses oberhalb der Ausuferungshöhe (W_A).
- **mAbw W_s** : Maximaler Fehler an der Pegelspitze (W_s) zwischen tatsächlichem und prognostiziertem Wert.

Die Ausuferungshöhe liegt in Trier bei etwa 650 cm, was einem Abfluß von 1200 m³/s entspricht. In Cochem liegt diese Höhe bei etwa 560 cm, die einem Abfluß von 1400 m³/s entspricht. Zur Erstellung der Fuzzy-Modelle werden die ortsabhängigen Wasserstände mit Hilfe von Abflußtabelle in Abflüsse umgewandelt und die Ergebnisse wieder in Wasserstände.

Abb. 2.1 zeigt die Abflußganglinie, bei der der Wellenscheitel des Nebengewässers naheheilt.

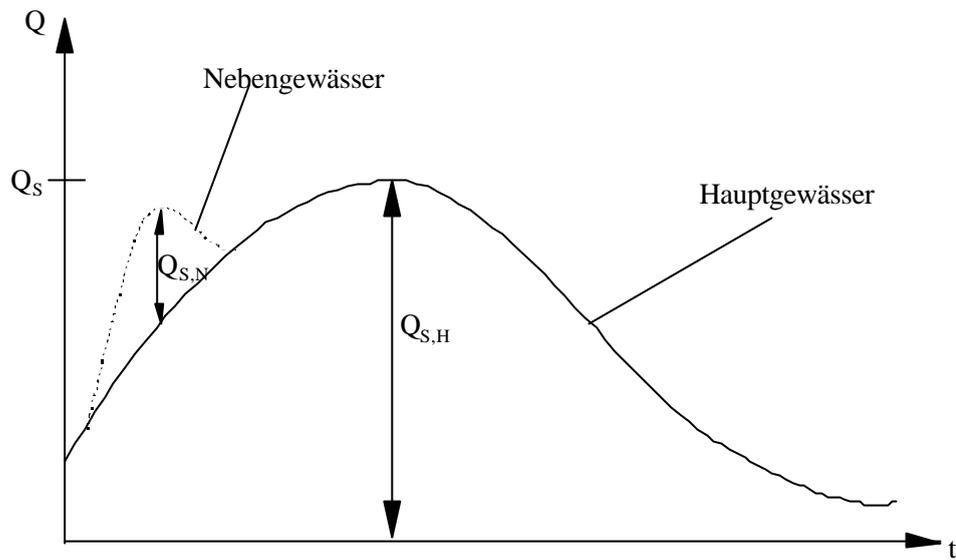


Abb. 2.1: Hochwasserwelle

3 Einführung zu Fuzzy-Logic

In diesem Kapitel wird eine kurze Einführung in die Fuzzy-Logic gegeben und es werden grundlegende Konzepte aufgezeigt. Um tiefergehende Kenntnisse zu erwerben, kann hier nur auf die mittlerweile umfangreiche Literatur verwiesen werden, z.B. [Altrock] [Kahlert] [Kruse].

Im Jahre 1964 brachte Lofti Asker Zadeh den Namen *Fuzzy-Logic* in die mathematische Diskussion ein. Die deutsche Übersetzung von 'fuzzy' ist fusselig, verschwommen, trüb, was nicht bedeutet, daß Fuzzy-Logic eine unscharfe Logik ist, sondern daß sie dazu dient, Unschärfen mathematisch zu beschreiben und handhabbar zu machen.

1975 beschreibt E.H.Mamdani die erste Anwendung im Labormaßstab, bei der ein Fuzzy-Regler zur Steuerung einer Dampfmaschine verwendet wurde. Seit diesem Zeitpunkt hat sich die Fuzzy-Logic in vielen Bereichen, vor allem in der Steuer- und Regelungstechnik etabliert. Viele alltäglich genutzte Geräte wie z.B. Waschmaschinen oder Camcorder benutzen Systemmodule mit der Fuzzy-Logic. Auch im Bereich der Datenanalyse hat die Fuzzy-Logic in den vergangenen Jahren mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. Wo komplexe und schwierig zu beschreibende Zusammenhänge oftmals eine Automatisierung und Optimierung von Prozeßabläufen verhindern, kann die Fuzzy-Logic in Kombination mit konventionellen mathematischen Ansätzen zu neuen Lösungen führen.

3.1 Konzepte der Fuzzy-Logic

3.1.1 Der Begriff der unscharfen Menge

Anders als bei der normalen Mengentheorie, bei welcher ein Element entweder ganz zu einer Menge gehört oder gar nicht, werden bei der Theorie der unscharfen Mengen (engl. Fuzzy-Sets) diese Grenzen nicht so scharf festgelegt. Als Beispiel sei die Menge "angenehme Raumtemperatur" angeführt. Bei einer scharfen Menge müßten obere und untere Grenzwerte der Temperatur, z.B. $[15..25]^{\circ}\text{C}$, angegeben werden. Dies ist in der Praxis nicht ohne weiteres möglich bzw. sinnvoll. So würde beispielsweise eine Temperatur von 14,9 Grad noch nicht zu dieser Menge gehören, während eine Temperatur von 15 Grad bereits dazu gehört. Mit Hilfe der Zugehörigkeitsfunktionen lassen sich allerdings graduelle Zugehörigkeiten von Elementen zu einer Menge bestimmen. Dieser Zugehörigkeitsgrad liegt zwischen 0 und 1.

Der Unterschied zwischen scharfen und unscharfen Mengen wird durch die Einführung einer *Zugehörigkeitsfunktion* definiert:

Es sei X eine scharfe (klassische) Menge. Eine *unscharfe Menge* A über X wird charakterisiert durch eine Zugehörigkeitsfunktion $m_A(x)$, die jedem Element aus X eine reelle Zahl aus dem Intervall $[0,1]$ zuordnet: $A = \{(m_A(x), x) | x \in X, 0 \leq m_A(x) \leq 1\}$. Der Wert von m_A an der Stelle x wird als *Zugehörigkeitsgrad* von x zu der Menge A bezeichnet. Eine scharfe Menge ist insofern ein Spezialfall einer unscharfen Menge, als dann die Zugehörigkeitsfunktionen nur die Werte 0 und 1 annehmen können.

3.1.2 Linguistische Variable

Betrachtet man die Fuzzy-Menge "angenehme Raumtemperatur", so läßt sich feststellen, daß dieser Begriff aus zwei Teilen besteht. *Raumtemperatur* ist dabei eine Kenngröße, *angenehm* ist ein umgangssprachlicher Wert der Kenngröße. Eine Einteilung des gesamten Wertebereichs führt dabei zu mehreren umgangssprachlichen Werten, die auch als linguistische Terme bezeichnet werden. Die Kenngröße selbst wird dann als linguistische Variable bezeichnet. Die Aufteilung der Kenngröße Raumtemperatur kann beispielsweise in die fünf Terme *viel_zu_kalt*, *zu_kalt*, *angenehm*, *zu_warm*, *viel_zu_warm* erfolgen.

3.1.3 Fuzzifikation

Die Eingangswerte der Variablen eines Fuzzy-Systems sind scharfe Werte. Diese müssen auf die linguistischen Terme der entsprechenden Variablen abgebildet werden. Dabei können sich bezüglich einer Kenngröße nebeneinander liegende Fuzzy-Mengen (Terme) mehr oder weniger überlappen. Die Ermittlung des Zugehörigkeitsgrades eines Eingangswertes bezüglich aller linguistischen Terme wird als *Fuzzifikation* bezeichnet.

In Abb. 3.1 ist zu sehen, daß der scharfe Wert 17°C zu mehreren linguistischen Termen gehört. Dabei besitzt er den Zugehörigkeitsgrad 0.65 zu dem Term *zu_kalt* und den Zugehörigkeitsgrad 0.35 zu dem Term *angenehm*. Ein scharfer Wert wird also in einen Vektor von Zugehörigkeitsgraden überführt.

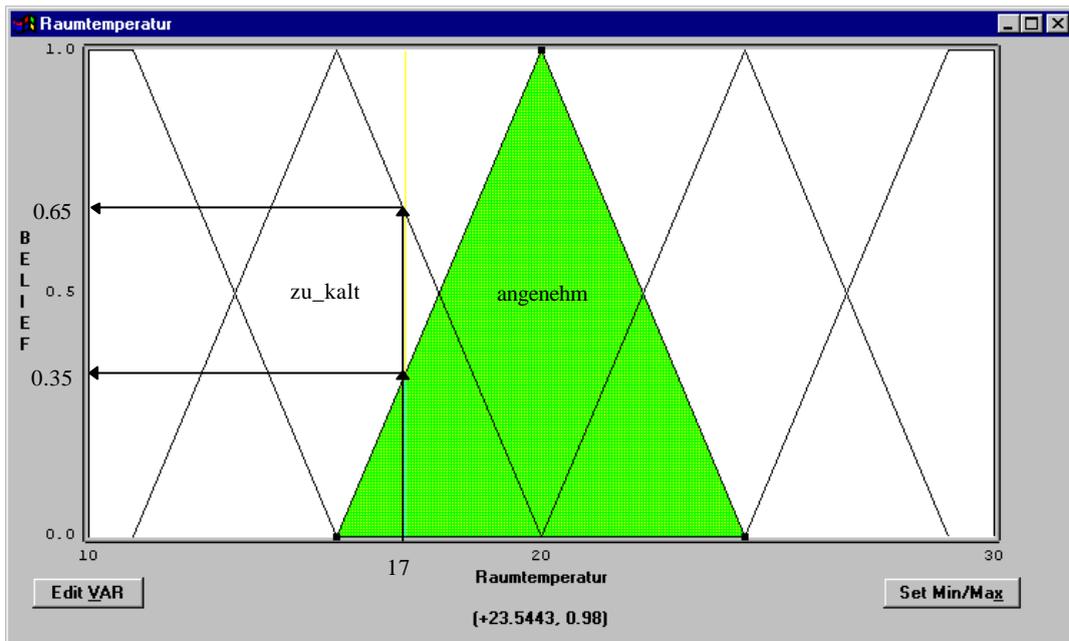


Abb. 3.1: Fuzzifikation eines scharfen Eingangswertes

3.1.4 Inferenz

Bei der Inferenz werden festgelegte Regeln auf die in der Fuzzifikation ermittelten Zugehörigkeitsgrade μ angewandt. Das Ziel einer Inferenz ist das Ermitteln von Schlußfolgerungen unter Berücksichtigung eines aktuellen Zustandes.

Zur Beschreibung des Verhaltens von Fuzzy-Systemen werden ein Reihe von WENN ... DANN ... - Regeln, in Expertensystemen auch Produktionsregeln genannt, festgelegt. Diese beschreiben für bestimmte Eingangswertkombinationen die dazugehörigen Ausgangswertkombinationen. Der WENN-Teil (Prämisse) beschreibt hierbei die Situation, in der eine Regel gelten, also feuern soll, der DANN-Teil (Konklusion) die Reaktion hierauf. Folgende quasi natürlichsprachlichen Produktionsregeln könnten beispielsweise zur Regulierung der Zimmertemperatur aufgestellt werden:

Regel 1: WENN Raumtemperatur = *angenehm* UND Wärmeverlust = *sehr_niedrig*,
DANN Ventilstellung = *geschlossen*.

Regel 2: WENN Raumtemperatur = *angenehm* UND Wärmeverlust = *hoch*,
DANN Ventilstellung = *halb_offen*.

usw.

Die Prämissen können mit Hilfe logischer Beziehungen aus mehreren Teilen bestehen. Das Fuzzy-ODER, -UND und -NICHT sind dann so definiert, daß zwischen ihnen ein ähnlicher Zusammenhang besteht, wie in der klassischen Mengenlehre und Logik.

Dazu wird in der Praxis meist das Fuzzy-UND mit der Minimum-Funktion, das Fuzzy-ODER mit der Maximum-Funktion und das Fuzzy-NICHT mit der Komplementfunktion gleichgesetzt:

$$\text{UND:} \quad \mathbf{m}_{A \wedge B} = \text{Min}\{\mathbf{m}_A, \mathbf{m}_B\}$$

$$\text{ODER:} \quad \mathbf{m}_{A \vee B} = \text{Max}\{\mathbf{m}_A, \mathbf{m}_B\}$$

$$\text{NICHT:} \quad \mathbf{m}_{\neg A} = 1 - \mathbf{m}_A$$

Da die Regeln gleichrangig sind, muß das Inferenzschema noch festlegen, wie stark das Ergebnis durch feuernde Regeln mit gleichen Schlußfolgerungen beeinflußt wird. Hier werden die Regeln meist mit einem ODER verknüpft und dieses mit der Maximum-Funktion gleichgesetzt. In diesem beschriebenen Fall spricht man von der MAX-MIN-Methode; einer der möglichen Inferenzmethoden [Altrock], [Kahlert].

3.1.5 Defuzzifikation

Die Fuzzy-Inferenz liefert als Resultat mindestens eine linguistische Variable, der ein (scharfer) numerischer Wert zuzuordnen ist. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Defuzzifikation*. Bei der Schwerpunktmethode, einer aus der Vielzahl bisher entwickelter Defuzzifikationsmethoden, wird der Schwerpunkt aus allen Ergebnis-Fuzzy-Mengen nach dem Inferenzschema gebildet. Der sich daraus ergebende Abszissenwert ist der Ausgangswert y_{res} . In der grafischen Darstellung entspricht dies einer Überlagerung der sich aus der Inferenzmethode ergebenden Einzelergebnisse, wie dies in Abb. 3.2 dargestellt ist.

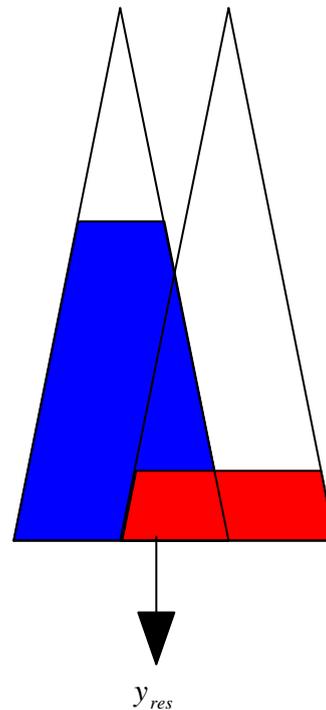


Abb. 3.2: Defuzzifikation nach der Schwerpunktmethode

Jede Defuzzifikationsmethode hat Vor- und Nachteile. Welche Methode für eine gegebene Aufgabenstellung die beste ist, ergibt sich oftmals nur durch probieren. Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden sind z.B. in [Kahlert] und [Kruse] dargestellt.

3.2 Aufbau eines einfachen Fuzzy-Systems

Der Aufbau eines einfachen Fuzzy-Systems für eine Regelungsaufgabe wird in Abb. 3.3 gezeigt. Bei der Fuzzifikation werden die Werte der Meßgrößen eines zu regelnden Prozesses auf die linguistischen Variablen des Fuzzy-Modells abgebildet und der jeweilige Zugehörigkeitsgrad ermittelt. Anschließend bestimmt die Fuzzy-Inferenz die Ausgangsgrößen durch Anwendung der WENN ... DANN ... - Regeln. Diese Ausgangsgrößen werden durch die Defuzzifikation wieder in scharfe Werte umgewandelt.

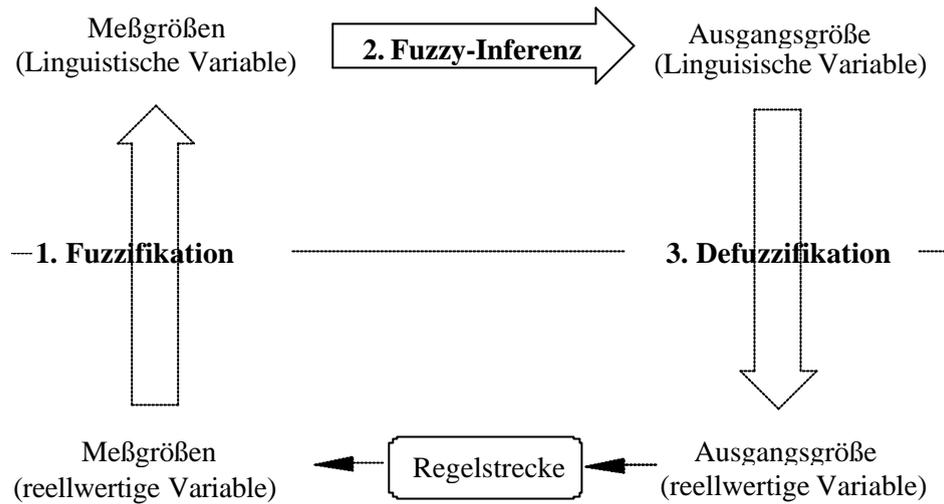


Abb. 3.3: Aufbau eines einfachen Fuzzy-Systems (Fuzzy-Regler) [Altrock]

3.3 Approximationsfähigkeit der Fuzzy-Systeme

Das Fuzzy-System führt für jede Kombination der Eingangsgrößen in Abhängigkeit vom Grad der Zugehörigkeit zu den Fuzzy-Sets eine Interpolation durch. Auf diese Weise wird eine stückweise stetige Approximation der Kennfläche berechnet. Ein Fuzzy-System ist demnach nichts anderes, als ein System zur Berechnung einer Approximation einer grobkörnigen Fläche. Für jede beliebige Kombination der Eingangswerte kann also eine Interpolation der bekannten Funktionswerte berechnet werden [Rojas]. Man kann beweisen, daß jede stetige Ein-Ausgabefunktion sich beliebig genau mit einem Fuzzy-System approximieren läßt, d.h. Fuzzy-Systeme sind universelle Approximatoren.

3.4 Typen von Fuzzy-Systemen

Aufgrund der Vielzahl an Zugehörigkeitsfunktionen, Inferenz- und Defuzzifikationsmethoden wird im allgemeinen nicht von *dem* Fuzzy-System gesprochen, sondern von einer Familie von Fuzzy-Systemen. Die eigentlichen Typen von Fuzzy-Systemen unterscheiden sich durch die Regelbasis und die Interpretation der Regeln. Dabei wird hauptsächlich zwischen dem System nach Mamdani und dem System nach Sugeno unterschieden.

3.4.1 Das Fuzzy-System nach Mamdani

1975 beschrieb E.H. Mamdani eine Anwendung, bei der ein Fuzzy-System zur Steuerung einer Dampfmaschine verwendet wurde. Dies war der erste praktische Einsatz eines Systems, das nach der Fuzzy-Theorie arbeitete. Das System nach Mamdani ist das in der Praxis am häufigsten eingesetzte.

Die Regeln eines Systems nach Mamdani weisen folgende Form auf:

$$R_i: \text{if } e_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } \dots \text{ and } e_n \text{ is } A_n^i, \quad \text{then } y_i = B_i \quad (i=1, \dots, m)$$

e_1, e_2, \dots, e_n beschreiben die Eingangsgrößen,
 $A_1^i, A_2^i, \dots, A_n^i$ die linguistischen Terme der Eingangsgrößen für die i -te Regel und B_i einen linguistischen Term der Ausgangsgröße für die i -te Regel.

Aus den ermittelten Ausgangsgrößen y_i muß anschließend durch Defuzzifikation noch ein scharfer Stellwert berechnet werden.

3.4.2 Das Fuzzy-System nach Sugeno

Der Unterschied des Fuzzy-Systems nach Sugeno [Sugeno], [Takagi], [Tanaka] zu dem oben betrachteten System nach Mamdani liegt in der Gestalt der Regelbasis. Bei Sugeno weisen die m Regeln folgende Form auf:

$$R_i: \text{if } e_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } \dots \text{ and } e_n \text{ is } A_n^i, \quad \text{then } y_i = p_0^i + p_1^i e_1 + \dots + p_n^i e_n$$

Wobei die Prämisse die gleiche Struktur wie der Mamdani-Regler besitzt. In der Konklusion der Regeln kommen allerdings keine linguistischen Terme vor. Der Ausgabewert y_i der i -ten Regel ergibt sich aus der Linearkombination der scharfen Eingangsgrößen, gewichtet mit den Parametern p_j^i . Zum leichteren Verständnis sei als Beispiel eine Regelbasis mit den beiden folgenden Regeln gegeben:

$$\begin{aligned} R_1: & \quad \text{if } e_1 = \textit{kalt} \quad \quad \quad \text{and } e_2 = \textit{hoch} \quad \quad \text{then } y_1 = 5 + 2 * e_1 + 3 * e_2 \\ R_2: & \quad \text{if } e_1 = \textit{angenehm} \text{ and } e_2 = \textit{niedrig} \text{ then } y_2 = 1 + 2 * e_1 \end{aligned}$$

Die Konklusion enthält also keine Unschärfe. Eine Defuzzifikation kann somit entfallen. Die Gewichtung der Parameter kann von Regel zu Regel unterschiedlich sein und obwohl Sugeno dies befürwortet [Sugeno] müssen nicht alle Eingangsvariablen im Schlußfolgerungsteil vorkommen.

Um den Erfüllungsgrad H der einzelnen Regeln zu bestimmen, kann die Konjunktion entweder mit dem MIN-Operator ($H_{AB} = \text{Min}\{\mathbf{m}_A, \mathbf{m}_B\}$) oder dem von Takagi und Sugeno [Takagi] vorgeschlagenen PRODUCT-Operator ($H_{AB} = \mathbf{m}_A * \mathbf{m}_B$) berechnet werden.

Die Ausgangsgröße y_{res} berechnet sich aus den m Regeln dann wie folgt:

$$y_{res} = \frac{\sum_{i=1}^m H_i y_i}{\sum_{i=1}^m H_i} .$$

Beim Sugeno-System gibt es eine größere Anzahl einstellbarer Parameter, so daß eine genauere Annäherung einer als optimal zu bezeichnenden Funktion vorgenommen werden kann. Das System approximiert dabei eine beliebige nichtlineare Funktion stückweise durch Hyperebenen. Die Konklusion einer Regel enthält die Parameter einer solchen Hyperebene.

4 Untersuchungen zur Pegelprognose mit einem Fuzzy-System

4.1 Problemanalyse

Für die Prognose der Pegel in Trier und Cochem sollen zwei unabhängige Fuzzy-Modelle entwickelt werden. Zur Modellierung stehen Daten bereits abgelaufener Hochwasserereignisse zur Verfügung. Diese Daten sind stündlich gemessene Wasserstände an flußaufwärts liegenden Pegelstellen und Pegelstellen der Nebenflüsse.

Zu Beginn der Modellierung ist lediglich bekannt, daß hauptsächlich folgende Abhängigkeiten zwischen den flußaufwärts liegenden Pegeln und dem zu prognostizierendem Pegel bestehen:

- Der Abstand der Pegelstellen (konstant).
- Die Höhe des Abflusses.
- Die Form der Welle.

Dabei sollen die Abhängigkeiten von der Höhe des Abflusses und der Form der Welle ermittelt und im Fuzzy-System modelliert werden. Um die Leistung der erstellten Modelle bei Hochwasserereignissen die höher als die bisher bekannten sind, zu testen, soll das bislang höchste Ereignis in die Testmenge aufgenommen werden.

4.2 Datenauswahl

Zur Prognose des Pegels in Trier stehen stündliche Meßwerte von folgenden Pegeln zur Verfügung:

- Perl an der Mosel,
- Fremersdorf an der Saar,
- Bollendorf an der Sauer,
- Prümzurly an der Prüm,
- Trier an der Mosel.

Zur Prognose des Pegels in Cochem stehen stündliche Meßwerte von folgenden Pegel zur Verfügung:

- Trier an der Mosel,
- Kordel an der Kyll,
- Platten an der Lieser,
- Cochem an der Mosel.

Die geographische Lage der Pegelmeßstationen ist in Abb. 4.1 dargestellt.

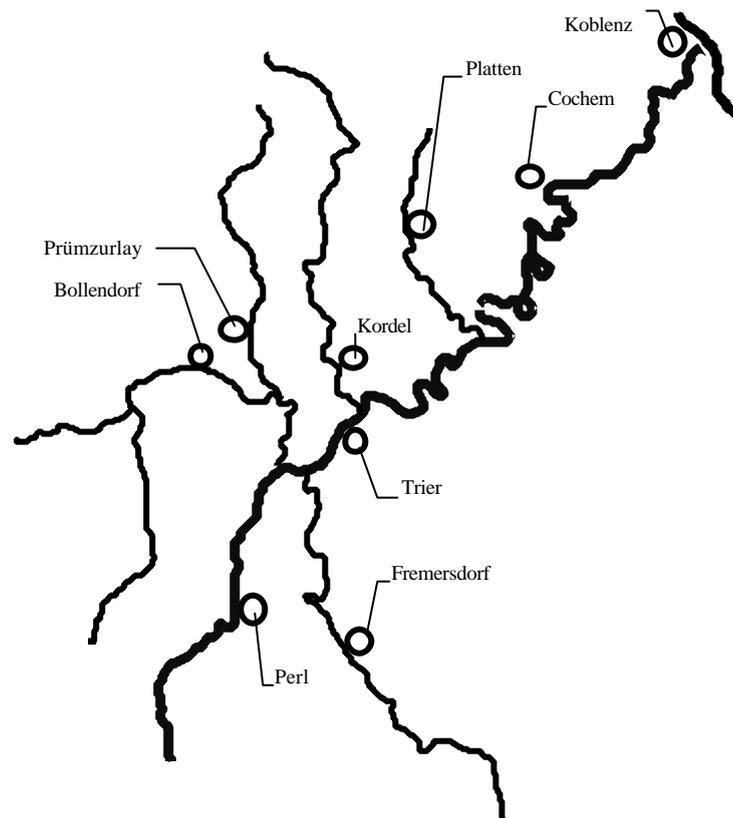


Abb. 4.1: Teil des Moselgebietes mit Pegelmeßstationen

Für die Erstellung und das Testen eines Modells zur Pegelprognose in Cochem stehen die Daten der acht letzten Hochwasserereignisse zur Verfügung. Für den Pegel in Trier werden lediglich drei Hochwasserereignisse verwendet, da davon ausgegangen wird, daß der Ausbau der Saar zur Schifffahrtsstraße bis zum Jahr 1991 die hydrologischen Gegebenheiten so stark verändert hat, daß ältere Daten die Modellierung negativ beeinflussen.

Zur Erstellung der beiden Modelle werden je zwei Ereignisse gewählt:

- Das Hochwasser im Januar 1995, da dieses über den längsten Zeitraum andauerte und das zweithöchste war.
- Das Hochwasser im Januar 1991, da dieses sehr niedrig und von kurzer Dauer war.

Die Daten der restlichen Ereignisse werden zum Testen verwendet. Darunter befinden sich auch das Hochwasser vom Dezember 1993, das höchste bisher bekannte. Damit soll getestet werden, inwieweit sich die Vorhersagemodelle auch für Wasserstände eignen, die bisher noch nicht aufgetreten sind. Die Ein- bzw. Ausgaben des Fuzzy-Systems sind die ortsunabhängigen Abflußwerte. Die gemessenen ortsabhängigen Wasserstände W werden darum mit Hilfe der entsprechenden Abflußtafeln in Q umgerechnet.

4.3 Argumente für ein Fuzzy-System nach Sugeno

Alle Eingangsgrößen beeinflussen zu jedem Zeitpunkt den Ausgabewert. Verändert sich beispielsweise der Wert einer Eingangsvariablen, so muß dies zu einer Veränderung der Ausgabevariablen führen. Bei einem Fuzzy-System nach Sugeno kann der Einfluß einer Eingangsvariable durch Gewichtung in der Konklusion beschrieben werden. Auch wenn die Variable nicht in der Prämisse vorkommt, wirkt sich dann eine Veränderung ihres Wertes auf eine Veränderung des Ausgabewertes aus. Kleinere Zuflüsse wirken sich nicht oder nur sehr gering auf die Laufzeiten der Wellen und deren Form aus. Ihr Abfluß kann trotzdem durch einfache Addition und entsprechende Gewichtung in den Konklusionen berücksichtigt werden. Die Anzahl der benötigten Regeln wird somit geringer.

Zudem hat der Ansatz nach Sugeno den Vorteil, daß der Einfluß der Eingangsgrößen auf die jeweilige Prognosen wesentlich einfacher erkannt werden kann, da eine direkte Gewichtung in den Konklusionen vorliegt. Dies vereinfacht die Interpretation der Regelbasis, was den Experten wiederum eine leichtere Analyse abgelaufener Hochwasser und der erstellten Prognosen ermöglicht.

4.4 Untersuchungsumgebung

Die Untersuchungen wurden mit SieFuzzy [Siemens], einem von der Firma Siemens, München, entwickelten Fuzzy-System durchgeführt.

4.5 Entwicklung des Fuzzy-Modells zur Prognose des Pegels in Cochem

In Kapitel.4.5.1 werden einige Zusammenhänge, die für die Modellierung des Systems wichtig sind, dargestellt. Darauf folgt die Beschreibung der Vorgehensweise zur Erzeugung des Modells zur Prognose des Pegels in Cochem. In Kapitel 4.5.3 werden die Ergebnisse vorgestellt und im folgenden Kapitel 4.5.4 analysiert und interpretiert.

4.5.1 Hydrologische Zusammenhänge

Wie bereits erwähnt wurde, sollen für die Prognose des Pegels Cochem lediglich Meßwerte des flußaufwärts liegenden Pegels in Trier und der Pegel der zwei wichtigsten Zuflüsse im Zwischeneinzugsgebiet genutzt werden. Bekannt ist dabei, daß die Laufzeit der Hochwasserwelle zwischen Trier und Cochem mindestens 11 Stunden beträgt [Stippler]. Dabei kann die Laufzeit mehrere Stunden variieren, was im wesentlichen von der Höhe des Abflusses und von der Form der Welle (z.B.: starker Anstieg, Länge) abhängig ist. Die Pegelstationen der beiden Zuflüsse stehen in Kordel zum Messen des Wasserstandes der Kyll und in Platten zur Messung der Lieser. Diese beiden decken den größten Bereich des Einzugsgebietes zwischen Trier und Cochem ab. Die Ausuferungsschwelle in Cochem liegt bei ca. 1400 m^3 , was einem Wasserstand von 560 cm entspricht.

4.5.2 Überlegungen und Untersuchungen

Der Abfluß in Cochem hatte beim bisher höchsten Hochwasser einen maximalen Wert $Q_s = 4165 \text{ m}^3$ erreicht. Da der Wertebereich der Ausgabe relativ groß ist, wird aus praktischen Überlegungen nicht der Abfluß, sondern die Abflußänderung in den nächsten 6 Stunden mit dem Fuzzy-Modell prognostiziert. Dies ist keine Einschränkung der Aufgabenstellung, da der augenblickliche Abfluß zu dem Ergebnis addiert und somit die Vorhersage des Abflusses berechnet werden kann.

Bekannt ist, daß die Hochwasserwelle von Trier bis nach Cochem eine Laufzeit von mindestens 11 Stunden besitzt, wobei eine zeitliche Verschiebung überwiegend von der Abflußhöhe und der Form der Welle abhängig ist. Weiterhin ist bekannt, daß der Abfluß in Cochem hauptsächlich

vom Abfluß in Trier bestimmt wird. Darum wird zunächst der Einfluß der Abflußhöhe beim Pegel in Trier auf die Laufzeit und somit die Abflußänderung in Cochem untersucht.

Beim Entwickeln der beiden Modelle zur Prognose der Pegel in Trier und Cochem gab es viele Übereinstimmungen. Darum wird die Vorgehensweise hier nicht im einzelnen erläutert sondern in Kapitel 5 ein „Verallgemeinertes Verfahrenskonzept zum Erstellen von Fuzzy-Modellen zur Pegelprognose“ beschrieben.

4.5.3 Ergebnisse des Fuzzy-Modells zur Pegelprognose in Cochem

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchungen aufgeführt. Dabei ist zu erwähnen, daß die Optimierung des Fuzzy-Modells abgebrochen wurde, als festgestellt werden konnte, daß die Vorhersagen vergleichbar oder besser als die der Experten oder des Neuronalen Netzes sind. Ziel der Diplomarbeit war es, den sinnvollen Einsatz der Fuzzy-Logic bei der gegebenen Problemstellung zu untersuchen. Tabelle 4.1 zeigt die relevanten Größen zur Beurteilung der Güte der Prognosen für den gesamten Hochwasserverlauf. Die Ereignisse, die zur Modellierung des Systems dienten (Modellierungsmenge), sind grau unterlegt. Die Vorhersagen für die Hochwasser der Testmenge sind in etwa gleichwertig mit denen der Modellierungsmenge, was vermuten läßt, daß das erstellte Modell auch bei Hochwasserereignissen mit unterschiedlicher Höhe und Dauer sinnvoll eingesetzt werden kann.

	MAE- W_0	mAbw W_s	mabsAbwW
Januar 1995	7	-6	45
Januar 1991	7	-4	39
Dezember 1993	6	-24	34
Januar 1993	6	-14	36
Februar 1990	6	-8	31
März 1988	5	-4	29
Januar 1987	6	-1	40
April 1986	10	5	53

Tabelle 4.1: Untersuchungsergebnisse für den Pegel Cochem

Anschließend sind die Pegelverläufe und die Prognosen grafisch dargestellt. Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit sind in den Diagrammen die Ergebnisse für die Prognosen im sechsständlichem Zeitraster aufgeführt. Die Modellierung und das Testen des Systems erfolgte jedoch im stündlichen Zeitraster für die sechs Stunden später eintreffenden Pegelstände.

Die Abbildungen 4.2 - 4.8 zeigen die Ergebnisse des Fuzzy-Modells für den Pegel Cochem. Abb. 4.2 und Abb. 4.3 zeigen die Ergebnisse für die beiden Hochwasser der Modellierungsmenge. Das in Abb. 4.4 dargestellte Hochwasser ist das höchste bisher aufgetretene.

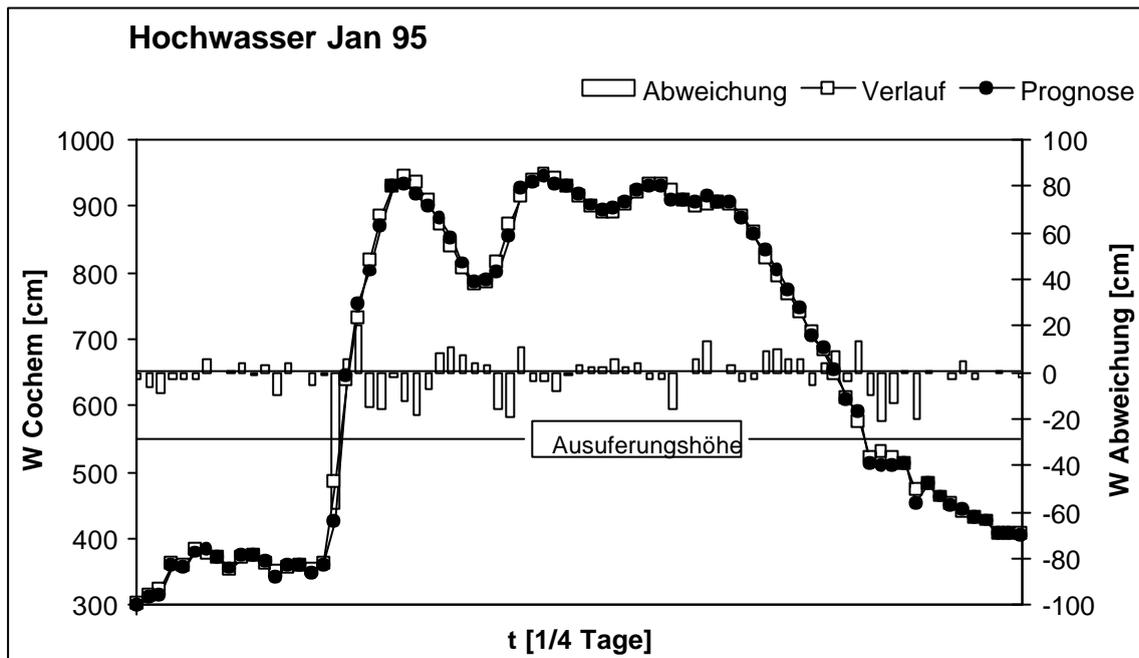


Abb. 4.2: Hochwasserprognose Pegel Cochem, Januar 1995

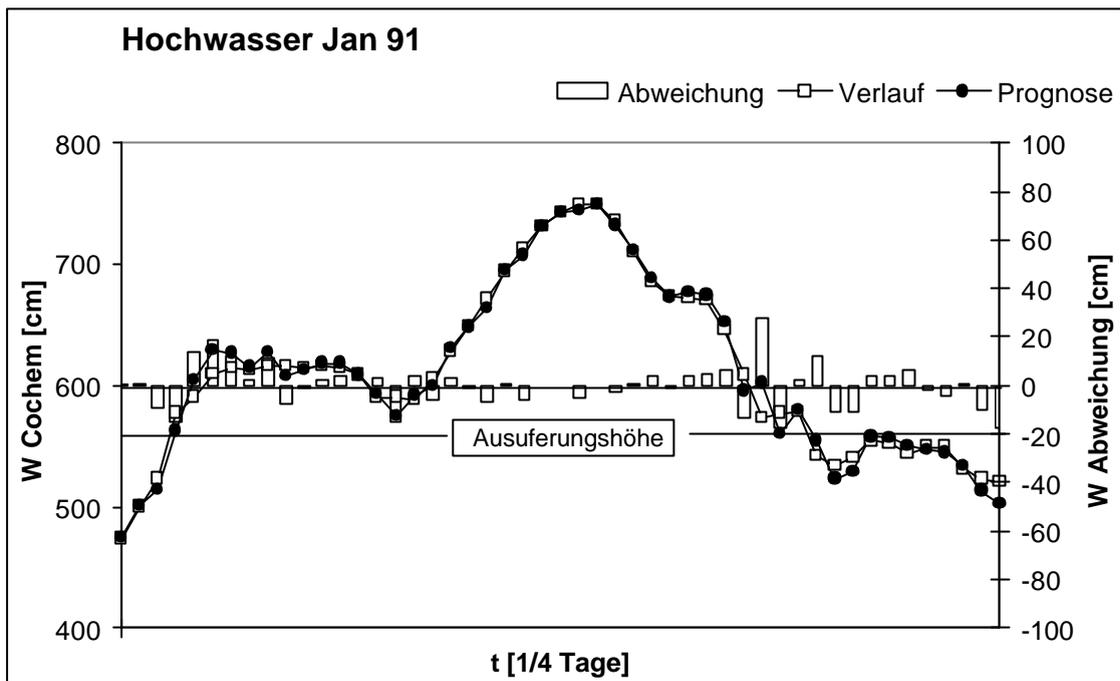


Abb. 4.3: Hochwasserprognose Pegel Cochem, Januar 1991

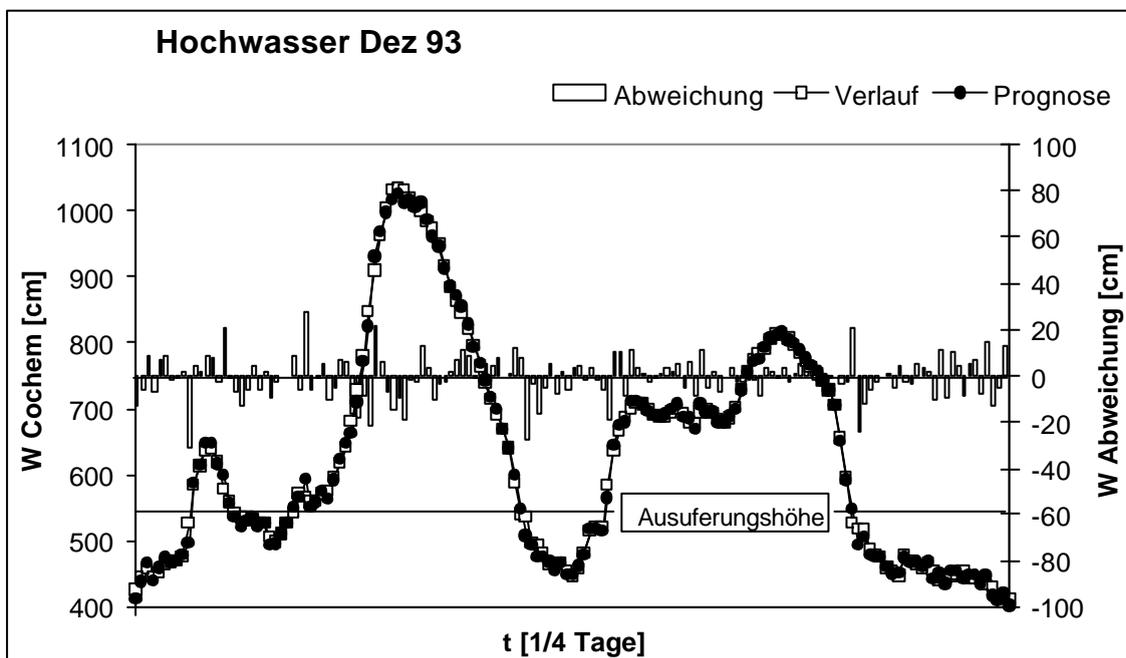


Abb. 4.4: Hochwasserprognose Pegel Cochem, Dezember 1993

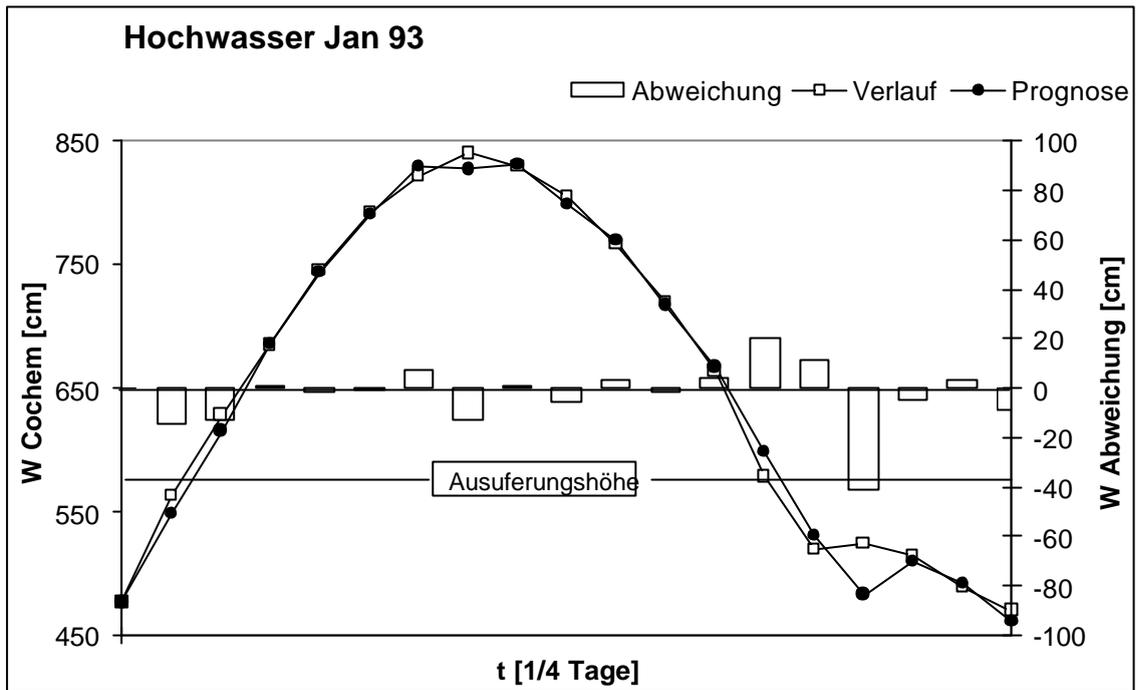


Abb. 4.5: Hochwasserprognose Pegel Cochem, Januar 1993

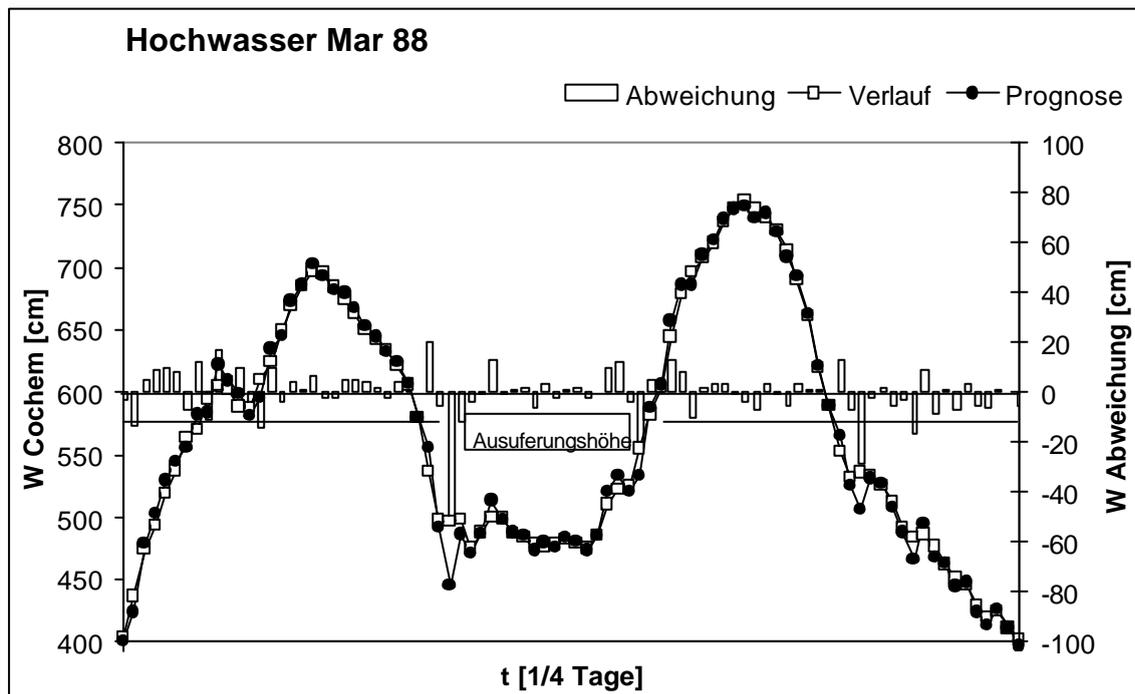


Abb. 4.6: Hochwasserprognose Pegel Cochem, März 1988

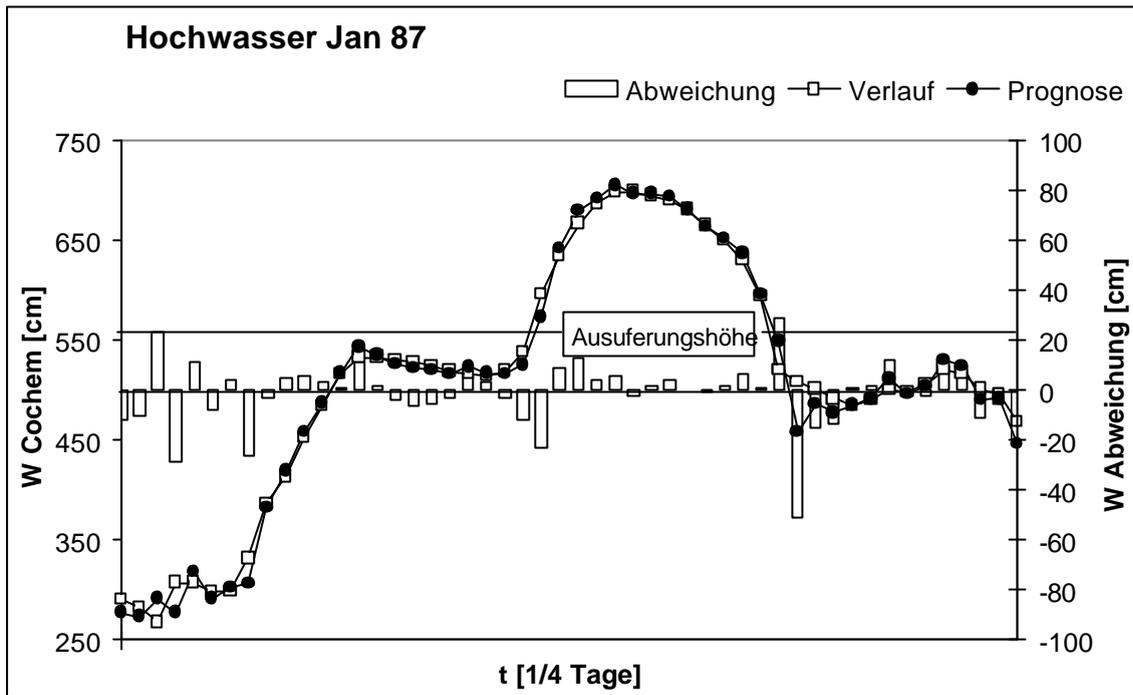


Abb. 4.7: Hochwasserprognose Pegel Cochem, Januar 1987

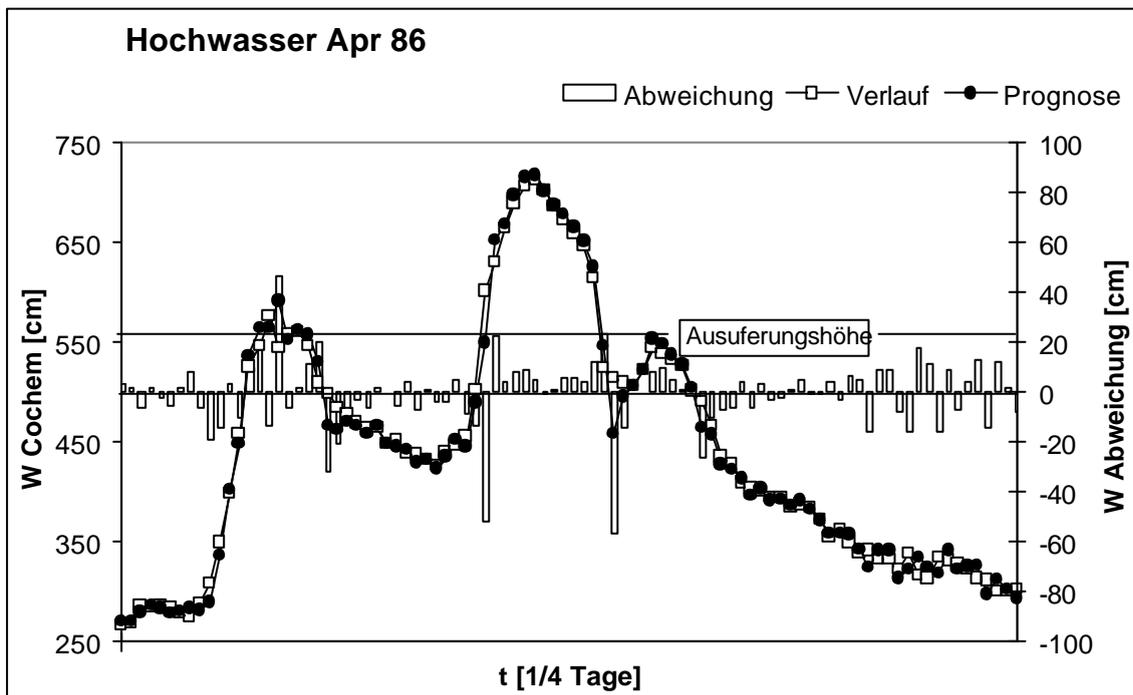


Abb. 4.8: Hochwasserprognose Pegel Cochem, April 1986

4.5.4 Analyse und Interpretation der Regelbasis

Bei der Analyse und der Interpretation der Regelbasis ist zu beachten, daß das Modell nur ein erster Ansatz ist, bei dem die Optimierung der Parameter rein manuell erfolgte. Weitere Untersuchungen führen sicherlich noch zu weiteren Regeln und genaueren Parametern. Die Interpretation der erzeugten Regeln unter Beachtung der hydrologischen Gegebenheiten läßt Rückschlüsse auf den Einfluß und den Zusammenhang der Eingangsgrößen auf den zu bestimmenden Pegel zu.

Analyse

Die Untersuchungen zur Abhängigkeit der Abflußhöhe und der Laufzeit haben ergeben, daß bei steigendem Abfluß in Trier auch die Laufzeit der Welle bis Cochem ansteigt. Ein Einfluß der Abflüsse der Nebenläufe auf die Laufzeit konnte nicht festgestellt werden. Weiterhin ergab sich, daß die Laufzeit mit der Geschwindigkeit des Anstiegs abnimmt. Dieser Einfluß ist jedoch weitaus geringer als der der Abflußhöhe.

Die ermittelte Laufzeit variiert zwischen 11 und 18 Stunden. Für Kyll und Lieser wurde kein Einfluß der Abflußhöhe auf die Laufzeit erkannt. Die Abflußgrößen dieser beiden Nebenläufe haben die Prognosen nur verbessert, als statt sechsständiger Abflußdifferenzen die dreistündige Differenzen in die Berechnung eingingen.

Im Bereich der Ausuferungshöhe sind bei einigen Hochwasserereignissen größere Differenzen zwischen dem prognostizierten und dem tatsächlichen Wasserstand zu erkennen.

Die Prognosen im oberen Bereich des Hochwassers vom Dezember 1993 wurden mittels der Regeln erzeugt, die aus den Regeln des unteren Bereichs abgeleitet wurden (siehe Kapitel 5). Trotzdem sind die Prognosen in diesem Bereich mit Ausnahme des maximalen Fehlers am Scheitelpunkt von gleicher Güte wie im unteren Bereich.

Interpretation

Bei relativ gleichbleibendem Abflußquerschnitt A führt ein Anstieg des Abflusses Q auch zu einem Anstieg der Fließgeschwindigkeit v :

$$v = \frac{Q}{A} \quad \left[\frac{\text{m}^3 / \text{s}}{\text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Da bei einem höheren Abfluß in Trier die Laufzeit der Welle bis Cochem aber ansteigt, kann dies nur auf einen größeren Abflußquerschnitt zurückzuführen sein. Das bedeutet, daß mit zunehmendem Abfluß auch eine zunehmend starke Überschwemmung stattfindet.

Daß kein Zusammenhang zwischen der Abflußhöhe der Zuflüsse und deren Laufzeit erkannt werden kann, liegt sicherlich daran, daß diese Zuflüsse zu gering sind, um diese Abhängigkeit mit dem ad-hoc-Ansatz des Vorhersagemodells zu erkennen. Zum anderen sind diese Zuflüsse als charakteristische Größen für das gesamte Zwischeneinzugsgebiet in die Modellierung eingegangen, weshalb auch die tatsächlich Laufzeit nicht von Interesse ist.

Der Grund der weniger guten Prognosen im Bereich der Ausuferungshöhe ist auf die Steuerung der an der Mosel zahlreich vorhandenen Wehre zurückzuführen. Solange die Schiffbarkeit des Flusses möglich ist, erfolgt die Steuerung der Wehre unabhängig voneinander.

Die Regeln für die oberen Bereiche der Abflüsse sind aus den optimierten Regeln der unteren Bereiche abgeleitet worden. Im Prinzip wurde damit das Verhalten der Experten nachempfunden, die bei bisher unbekanntem Pegelständen auch davon ausgehen, daß der Fluß sich in diesen Bereichen etwa ähnlich verhält, wie in unteren Bereichen. Dies muß nicht notwendigerweise so sein, stellt jedoch derzeit die einzige Möglichkeit dar, möglichst sinnvolle Vorhersagen zu bestimmen.

4.6 Entwicklung des Fuzzy-Modells zur Prognose des Pegels in Trier

4.6.1 Hydrologische Zusammenhänge

Der Abfluß in Trier wird maßgeblich durch die Abflüsse der Saar, der Sauer und der Prüm und dem flußaufwärts gemessenen Abfluß in Perl bestimmt. Dabei kann ein Hochwasserereignis auch eintreten, wenn nur die Mosel oder nur die Saar und die Sauer Hochwasser führen. Der Pegel in Trier wird also nicht wie in Cochem überwiegend durch einen einzigen anderen Pegel maßgeblich bestimmt. Bekannt ist, daß die Laufzeiten der Wellen von Perl bis Trier ungefähr fünf, von Fremersdorf an der Saar ungefähr neun, von Bollendorf an der Sauer ungefähr sechs und von Prümzurlay an der Prüm ebenfalls ungefähr sechs Stunden betragen. Die Prüm mündet nicht direkt in die Mosel, sondern hinter Bollendorf in die Sauer (Abb. 4.1). Die Ausuferungsschwelle bei Trier liegt bei ca. 1230 m^3 , was einem Wasserstand von 650 cm entspricht.

4.6.2 Überlegungen und Untersuchungen

Der Ablauf der Untersuchungen ist dem oben geschilderten, bei der Erstellung des Modells für Cochem ähnlich. Auch hier wird nicht der absolute Abfluß, sondern die Abflußänderung berechnet. Dabei wird wiederum zunächst der Einfluß der Abflußhöhe auf die Laufzeit untersucht. Die Modellerstellung erfolgte nach dem in Kapitel 5.1 beschriebenen verallgemeinerten Verfahren.

4.6.3 Ergebnisse der Hochwasserprognose:

Da nur die Daten von drei Hochwasserereignissen vorliegen, kann eigentlich nur das Hochwasser vom Dezember 1993 (bei dem es sich auch um das höchste bisher bekannte handelt) als Testereignis betrachtet werden. In Tabelle 4.2 ist zu erkennen, daß der maximale Fehler bei der Vorhersage dieses Wasserstandes lediglich 3 cm beträgt, obwohl in der Modellierungsmenge kein Hochwasserereignis mit dieser Höhe vorhanden war. Der mittlere absolute Fehler der Vorhersagen für Pegelstände oberhalb der Ausuferungshöhe beträgt bei den verwendeten Hochwasserereignissen maximal 8 cm. Die stärksten Abweichungen zwischen Prognose und tatsächlich eingetroffenem Pegelstand treten wieder im Bereich der Ausuferungshöhe auf. Die Hochwasser der Modellierungsmenge sind in Tabelle 4.2 wieder grau unterlegt.

	MAE- W_0	mAbw W_S	mabsAbwW
Januar 1995	8	11	52
Januar 1991	6	8	31
Dezember 1993	6	3	61

Tabelle 4.2: Untersuchungsergebnisse für den Pegel Trier

Die nachfolgend in den Abbildungen 4.9 bis 4.11 dargestellten Ergebnisse zeigen die berechneten Prognosen und den tatsächlichen Verlauf wieder im sechsständigen Zeitintervall. Abb. 4.9 und Abb. 4.10 zeigen die Hochwasser, die zum Erstellen des Modells dienten. Beim Hochwasser 1991 ist der erstmalige Anstieg nicht zu erkennen, da hier die notwendigen Daten nicht zur Verfügung standen. Bei den beiden anderen Grafiken läßt sich erkennen, daß die Prognosen im oberen Bereich am genauesten mit dem tatsächlich eingetretenen Wasserstand übereinstimmen.

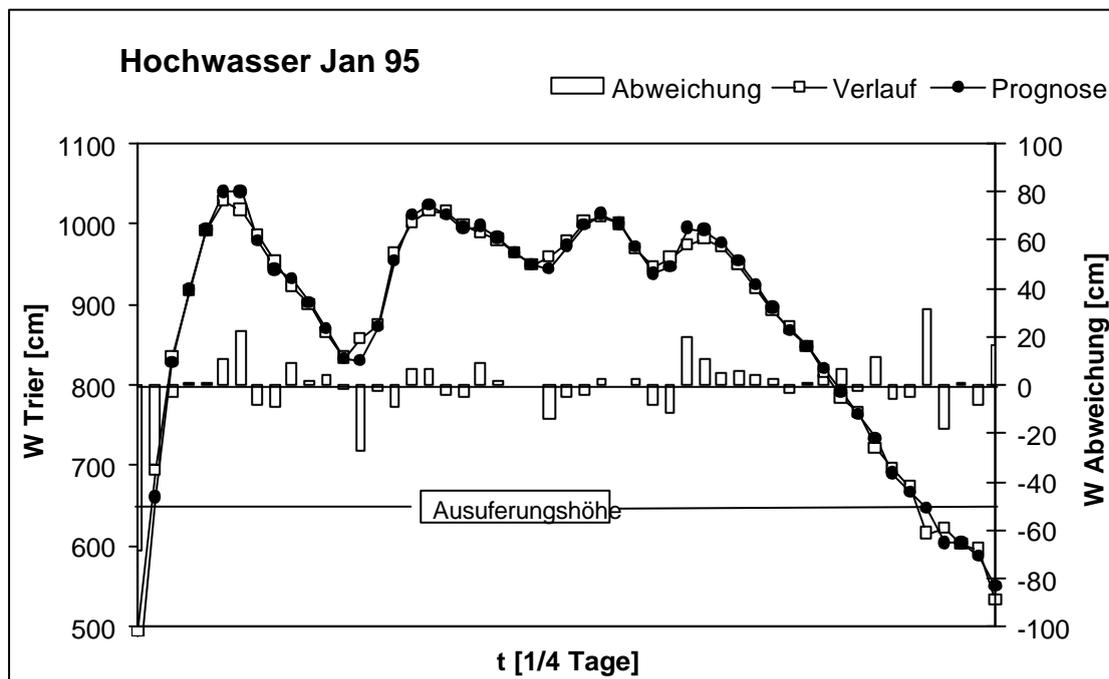


Abb. 4.9: Hochwasserprognose Pegel Trier, Januar 1995

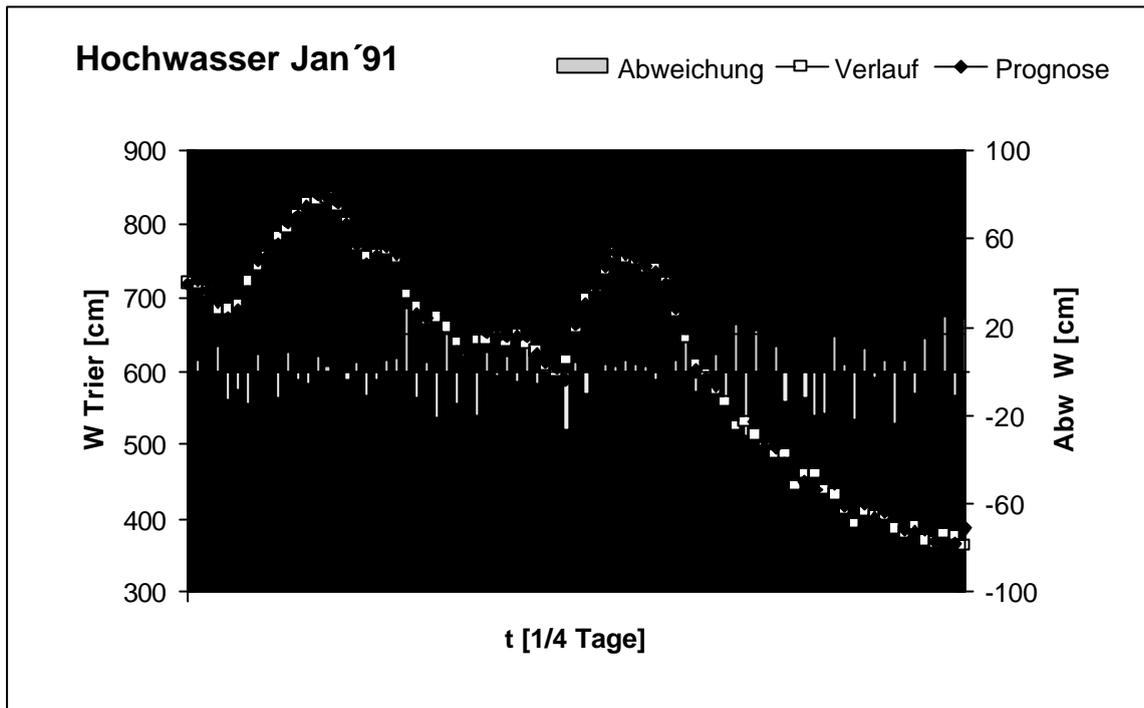


Abb. 4.10: Hochwasserprognose Pegel Trier, Januar 1991

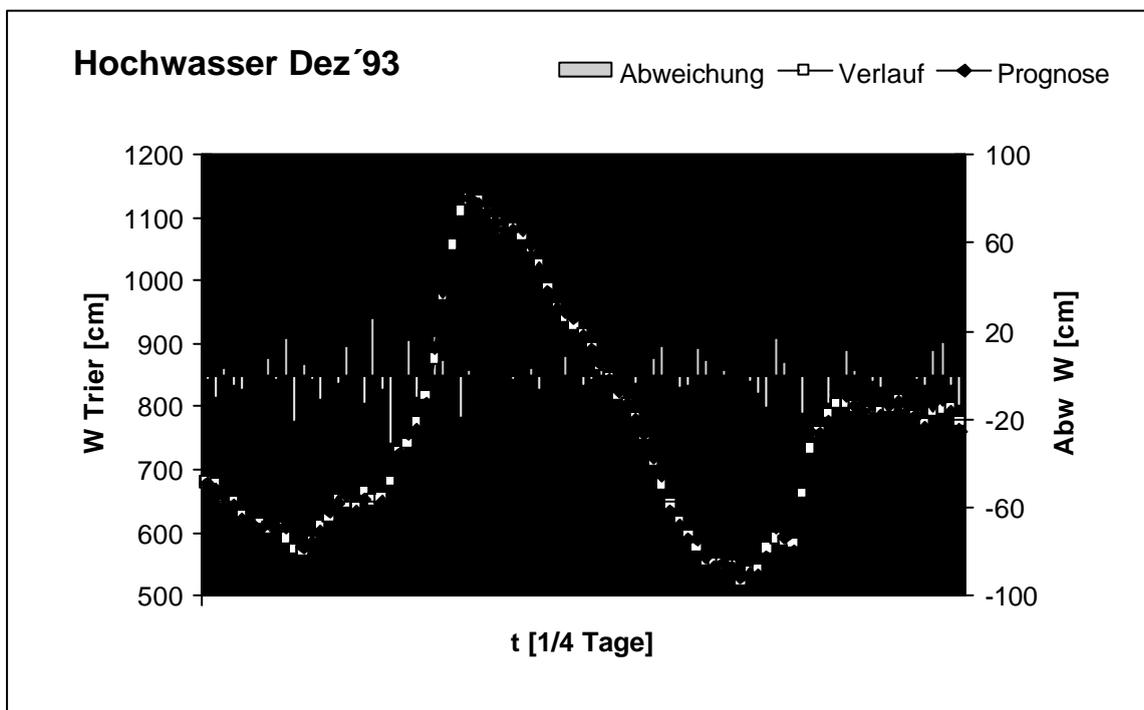


Abb. 4.11: Hochwasserprognose Pegel Trier, Dezember 1993

4.6.4 Analyse und Interpretation der Regelbasis

Auch hier liegt nur ein erster Ansatz eines Modells vor, dessen Optimierung manuell durchgeführt und bei Erreichen etwa gleichwertiger Prognosen wie die der Experten abgebrochen wurde. Weitere Untersuchungen führen sicherlich noch zu neuen Regeln und günstigeren Parametern. Trotzdem werden in den beiden nächsten Kapiteln Rückschlüsse gezogen und eine Interpretation der Regeln versucht.

Analyse

Bei den angestellten Untersuchungen können keine Abhängigkeiten zwischen der Höhe des Abflusses und den Wellenlaufzeiten festgestellt werden. Lediglich ein starkes Ansteigen der Abflüsse der Eingangsvariablen führt auch zu einem schnelleren Ansteigen des Abflusses in Trier. Die ermittelten Laufzeiten stimmen mit denen von den Experten des StAWA (Staatliches Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft) angegebenen überein. Die kurze Laufzeit der Mosel zwischen Perl und Trier (etwa 5 Stunden) erschwerte das Erstellen des Modells für eine sechsstündige Prognose. Hier wären Daten eines Moselpegels mit einer Laufzeit von mindestens sechs Stunden bis zum Pegel Trier für die Vorhersage geeigneter. Bei den Abbildungen 4.9 - 4.11 ist zu erkennen, daß bei Erreichen eines lokalen Minimums bzw. Maximums die Prognose dem tatsächlichen Verlauf etwas nachläuft.

Interpretation

Da keine Abhängigkeiten zwischen der Höhe der Abflüsse und der Laufzeit erkannt werden, läßt dies die Vermutung zu, daß in den Gebieten zwischen den Eingangspegeln und dem Pegel in Trier nur wenig Retentionsraum überschwemmt wird. Das oftmals fast gleichzeitig schnelle Ansteigen des Abflusses in Trier und der Abflüsse der Eingangspegel wird vermutlich durch Änderungen des Niederschlagsgeschehens im Einzugsgebiet hervorgerufen. Dies führt vermutlich auch zu dem zeitweisen leichten Nachlaufen der Prognosen.

5 Verallgemeinertes Verfahrenskonzept zum Erstellen eines Fuzzy-Modells zur Pegelprognose

Bei der Erstellung der beiden Modelle ergaben sich viele Gemeinsamkeiten, aus denen ein verallgemeinertes Verfahrenskonzept entwickelt wurde. Das Vorgehen zum Erstellen und Optimieren der Regelbasis wird in diesem Kapitel kurz geschildert.

5.1 Die Modellierungsstrategie

1) Ermitteln der wichtigsten Einflußgrößen:

Da hier nur Abflüsse in die Modellierung aufgenommen werden, ist der Eingangspegel mit dem größten Abfluß die wichtigste Einflußgröße, der mit dem zweitgrößten Abfluß die zweitwichtigste usw... . Diese Einflußgrößen werden mittels Zugehörigkeitsfunktionen unterteilt.

2) Erzeugen von Modellen:

Für alle in Punkt 1) ermittelten Einflußgrößen wird ein unabhängiges Modell erzeugt. Für jedes Modell wird eine Regelbasis erzeugt, die jeweils nur diese eine Einflußgröße in der Prämisse enthält. Wurde nur eine Einflußgröße als wichtig eingestuft, so enthalten die Konklusionen auch nur die Abflußänderung dieser einen Größe; ansonsten enthalten sie die Abflußänderungen aller Eingangsgrößen. Die Summe der Fehler und die Summe der absoluten Fehler werden für die gesamte Modellierungsmenge berechnet.

3) Optimieren der Parameter:

- a) Die Parameter in den Konklusionen werden optimiert. Dies wurde bei den erzeugten Modell noch manuell durchgeführt. Hier bieten sich jedoch einige automatisierbare Optimierungsverfahren an.
- b) Die angenommenen Laufzeiten, die sich als Varianten der Eingangsgrößen in den Konklusionen der erzeugten Regelbasen widerspiegeln, werden so optimiert, daß die Summe der Fehler zwischen prognostizierten und tatsächlich eingetroffenen Abflußänderungen, die aus den Daten der Modellierungsmenge berechnet wird, minimal wird.

4) Zusammenfassen von Prämissen:

Die Eingangsgrößen, bei denen sich eine Abhängigkeit der Laufzeit vom Abfluß ergeben hat, werden in den Prämissen zusammengefaßt und daraus die maximal mögliche Zahl an Regeln gebildet. Hat sich bei keiner Eingangsgröße eine Abhängigkeit zur Laufzeit herausgestellt, so wird eine Regelbasis lediglich mit der wichtigsten Eingangsgröße in der Prämisse erstellt. In der Konklusion kommen die Abflüsse aller Pegel vor und werden mit dem Faktor 1 gewichtet.

5) Ermitteln der Laufzeit:

Befinden sich in der Konklusion mehr als eine Eingangsvariable, so wird die Laufzeit der Größen verändert und die Parameter der Konklusionen optimiert, bis die gewünschte Güte der Prognosen erreicht ist oder bis sich durch die Optimierung keine wesentlichen Verbesserungen mehr ergeben. Kommt es dabei vor, daß eine Eingangsgröße das Ergebnis verschlechtert, so muß für diese Variable die Zeitspanne zur Berechnung der Abflußänderung modifiziert werden. Ist das Ergebnis dann immer noch nicht besser als ohne diese Variable, dann ist sie aus der Konklusion zu entfernen.

6) Minimieren des maximalen Fehlers:

Bei allen Prognosen, die bei den Modellierungsmengen aufgestellt werden, ist diejenige zu betrachten, die den größten Fehler liefert. Durch Erzeugen einer neuen Regel, die in den Prämissen statt Abflüssen jetzt Abflußänderungen berücksichtigt, wird versucht, den Fehler zu verringern. Dabei wird die Regel nur in die Regelbasis aufgenommen, wenn die Summe der Fehler dadurch nicht größer wird. Dieser Schritt wird wiederholt, bis die gewünschte Güte der Prognosen erreicht ist oder keine wesentlichen Verbesserungen mehr erzielt werden.

7) Erweitern der Regelbasis für extreme (bisher unbekannte) Ereignisse:

Die Regelbasis wird analysiert, um Abhängigkeiten zu erkennen. Mit der Annahme, daß diese Abhängigkeiten sich bei extremen, bisher nicht aufgetretenen Abflüssen ähnlich verhalten, werden neue Regeln erzeugt, die die ermittelten Abhängigkeiten widerspiegeln.

8) Testen des erstellten Modells:

Das Modell wird anhand der Testmenge überprüft und gegebenenfalls weiter optimiert.

5.2 Zusammenfassung der Untersuchungen

Zu Beginn der Modellierung war nur wenig über die Abhängigkeiten zwischen den Eingangsvariablen und den zu prognostizierenden Pegeln bekannt. So konnte auch kein

spezifisches Vorabwissen zum Erstellen der Regelbasis eingebracht werden. Dennoch konnten Regeln aus Beispieldaten erzeugt werden, die Rückschlüsse auf die Abhängigkeiten der Eingangsgrößen und der zu prognostizierenden Pegel zulassen. Dazu wurde eine "grobe" Strategie entwickelt, deren Einzelschritte im Detail meist aus Heuristiken bestehen.

Durch das Erzeugen von Regeln, deren Richtigkeit durch die Ergebnisse der Prognosen bestätigt wurden, können Rückschlüsse auf die Zusammenhänge der gemessenen hydrologischen Größen gewonnen werden, die selbst Experten nicht so genau bekannt waren.

Die Erweiterung der Regelbasis zur Prognose von Hochwasserereignissen, die höher als alle bisher bekannten sind, kann in beiden Fällen als erfolgreich betrachtet werden. Allerdings muß bemerkt werden, daß dies nur der Fall sein kann, wenn das Hochwasser sich im weiteren Verlauf ähnlich wie in den unteren Bereichen verhält. Aber auch Experten müssen dies für eine sinnvolle Prognose voraussetzen.

Eine spätere Ergänzung und Erweiterung des Fuzzy-Modells kann jederzeit vorgenommen werden. Der gewählte Ansatz ermöglicht dies ohne weiteres. Da die wichtigsten Eingangsgrößen, die die Laufzeit und die Form der Welle maßgeblich beeinflussen, bereits berücksichtigt wurden, können kleinere Einflußgrößen direkt in die Konklusion aufgenommen werden.

Die Optimierung der Parameter wurde nur manuell durchgeführt und bei Erreichen von Prognosen, die in etwa gleichwertig mit den bisherigen von dem StAWA bzw. mit Hilfe eines Neuronalen Netzes erstellten sind, abgebrochen. Zudem wurde zur Feststellung der Laufzeit zur Prognose des Pegels in Cochem ein grobes Zeitraster von drei Stunden gewählt. Eine automatisierte Optimierung der Parameter sowie die Verwendung eines feineren Zeitrasters führen sicherlich noch zu besseren Prognoseergebnissen.

6 Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise und zur Prognose mit Neuronalen Netzen

Aufgrund der bisherigen Vorgehensweise, der Untersuchungen von Salzig/Gemmar und der oben beschriebenen Untersuchungen lassen sich die drei Vorgehensweisen zur Prognoseberechnung wie folgt gegenüberstellen:

	konventionelle Vorgehensweise	Neurales Netz	Fuzzy-Modell
Genauigkeit	von Erfahrung der Experten abhängig, aber begrenzt, da nur Teil der zur Verfügung stehenden Daten genutzt werden können	genaue Prognosen erreichbar, allerdings begrenzt, da nur kontinuierliche Zeitreihen verwendet werden können. Leichte zeitliche Verschiebungen durch Zuflüsse wirken sich so geringfügig negativ aus.	Trotz frühzeitigem Abbruch der Optimierung konnten zumindest gleichwertige Ergebnisse wie bei den beiden anderen Ansätzen erreicht werden. Eine weitere Optimierung ist möglich.
Dauer der Berechnung	Einige Minuten	Unter einer Sekunde	Unter einer Sekunde
Transparenz der Berechnungen	Für den Experten mit jahrelanger Erfahrung verständlich. Für Laien nur schwer nachvollziehbar.	Die Berechnungen können aufgrund des Black-Box Verhaltens der Neuronalen Netze nicht nachvollzogen werden.	Die leichte Interpretierbarkeit der Regeln ermöglicht sowohl Experten als auch Laien die jeweilige Berechnung nachzuvollziehen
Anzahl der Einflußgrößen	Sehr begrenzt	Wesentlich mehr als von Menschen berücksichtigt werden können	Wesentlich mehr als von Menschen berücksichtigt werden können
Erweiterbarkeit der Modelle	Erfolgt durch gesammelte Erfahrungen bis zu einer bestimmten Grenze.	Sollen neue Eingangsgrößen beachtet werden, so muß eine neue Netzstruktur gefunden und trainiert werden.	Kann praktisch beliebig erweitert werden. Die bestehenden Regeln müssen dabei jedoch angepaßt werden.
Benötigte Erfahrungen oder Beispieldaten	Jahrelange Erfahrungen nötig	Keine Erfahrungen oder Wissen nötig. Es werden aber Daten von mehreren Hochwasserereignissen benötigt.	Baut auf den Erfahrungen der Experten auf und kann mittels Beispielergebnissen optimiert werden. Fehlendes Expertenwissen kann somit ergänzt werden.
Anpassbarkeit	Nur über Erfahrungsprozesse möglich.	Neues Trainieren des Netzes erforderlich.	Optimieren der Konklusionen in den Regeln nötig.
Dauer der Modellerstellung / benötigte Erfahrungen	Monate und Jahre	Wenige Wochen	Wenige Wochen (evtl. nur wenige Tage)

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einsatz eines Fuzzy-Systems zur Prognose des zu erwartenden Flußpegels im Hochwasserfall untersucht. Dazu wurden zwei Fuzzy-Modelle zur Prognose der beiden Moselpegel in Cochem und Trier erstellt. Diese Modelle basieren auf einem Fuzzy-System nach Sugeno. Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Zusammenhänge der zeitvarianten Meßdaten anhand von Beispieldaten ermittelt und in Form von Regeln dargestellt werden konnten. Dazu wurde nur wenig Vorabwissen benötigt. Die Erzeugung von Regeln für bisher unbekannte Wasserstände ermöglicht die Berechnung von sinnvollen Prognosen auch bei extremen Ereignissen. Durch Interpretation der relativ kleinen Zahl an Regeln in beiden Modellen konnten Rückschlüsse auf das hydrologische System und die genutzten Pegel gewonnen werden.

Die Optimierung der Modelle wurde abgebrochen, als die Pegelprognosen mit denen der Experten und mit denen mit einem Neuronalen Netz erstellten vergleichbar waren. Bei weiterer Optimierung können sicherlich noch genauere Vorhersagen berechnet werden. Die aus Beispieldaten erzeugten Regeln ließen Rückschlüsse auf die Zusammenhänge der verwendeten Einflußgrößen zu, die in dieser Genauigkeit selbst den Experten vorher nicht so genau bekannt waren.

Aus den gewonnenen Erfahrungen beim Erstellen der beiden konkreten Modelle wurde ein verallgemeinertes Verfahrenskonzept erstellt, das die Erstellung solcher Modelle auch für andere Pegel oder vergleichbare Aufgabenstellungen ermöglicht.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [Altrock] V. Altrock, C.
Fuzzy Logic (Bd.1)
 R. Oldenbourg Verlag, 1993
- [Kahlert] Kahlert J.; Frank, H.
Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control
 Vieweg Verlag, 1994
- [Kruse] Kruse, R.; Gebhardt, J.; Klawonn, F.
Fuzzy-Systeme
 B. G. Teubner Verlag, 1993
- [Rojas] Rojas, R.
Theorie der Neuronalen Netze
 Springer Verlag, 1993
- [Salzig] Salzig, M.; Gemmar, P.
**Untersuchung zur Prognose der Pegelentwicklung bei
 Hochwasserereignissen mit künstlichen Neuronalen Netzen am Beispiel
 Moselpegel Cochem**
 Fachhochschule Rheinland-Pfalz, Abteilung Trier, März 1996
- [Schmidt] Schmidt, H.
Der Fluß und sein Einzugsgebiet
 Franz Steiner Verlag Wiesbaden, 1984
- [Siemens] SIEFUZZY User`s Manual
 Version 2.0
 Siemens AG, 1996
- [Stippler] Stippler, E.
Verbesserung der Hochwasservorhersage für die Mosel bei Trier
 StAWA Trier, August 1995
- [Sugeno] Sugeno, M.; Kang, G.T.
Structure Identification of Fuzzy Model
 Fuzzy Sets and Systems 28, 1988, 15-33
- [Takagi] Takagi, T.; Sugeno, M.
Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control
 IEEE Trans. Systems Man Cybernet. 15(1), 1985, 116-132
- [Tanaka] Tanaka, K.; Sugeno, M.
Stability analysis and design of fuzzy control systems
 Fuzzy Sets and Systems 45, 1992, 135-156

