

Entwurf von Fuzzy-Systemen mit der Fuzzy-Shell FLOP

Übersicht	7.3
Linguistische Variablen und Terme	7.6
Einfügen neuer Variablen	7.6
Modifikation von Variablen	7.8
Definition und Bearbeitung einer Regelbasis	7.12
Darstellungsformen des Regelbasis-Editors	7.12
Der Regelbasis-Editor im Tabellenmodus	7.14
Der Regelbasis-Editor im Matrixmodus	7.18
Der Regelbasis-Editor im Textmode	7.19
Operatoren, Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung	7.23
Operatoren für UND- und ODER-Verknüpfung	7.23
Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung	7.24

Systemanalyse im Debug-Modus	7.28
Aktivierung des interaktiven Debug-Modus	7.28
Variablenfenster im Debug-Modus	7.29
Der Regelbasis-Editor im Debug-Modus	7.31
Kennlinien- und Kennfelddarstellung	7.33
Der Trace-Mode	7.37
 Analyse des Systems durch Simulation	 7.39
Nutzung des internen Simulators	7.39
Simulation mit BORIS	7.41
 Kommunikation mit anderen Anwendungen über DDE	 7.43
FLOP als DDE-Server	7.43
FLOP als DDE-Client	7.44
 Sonstige Optionen	 7.47
Generierung von C-Quellcode	7.47
Dokumentgenerierung	7.47
Anpassung des Programms an Benutzerwünsche	7.50

Übersicht



Die Fuzzy-Shell FLOP (**F**uzzy **L**ogic **O**perating **P**rogram) ermöglicht den Entwurf und die Analyse regelbasierter Systeme basierend auf Fuzzy-Logik. Im einzelnen bietet das Programm folgende Möglichkeiten:


- Definition von linguistischen Variablen und zugehörigen Termen
- Erstellen von Regelwerken
- Durchführung von Inferenzvorgängen
- Ermittlung von Übertragungskennlinien und -kennfeldern
- Simulation anhand von Datensätzen
- Erstellung von Fuzzy-Controller-Dateien für das blockorientierte Simulationssystem BORIS
- DDE-Schnittstelle zu anderen Anwendungen

Für die unterschiedlichen Rechenoperationen, die i. a. grafisch dargestellt werden, stehen verschiedene Operatoren, Inferenzmechanismen und Defuzzifizierungsmethoden zur Auswahl. Für den Typ der Zugehörigkeitsfunktionen sind Dreieck, Trapez und Singleton möglich.

Eine komplette Einführung in die Grundlagen der Fuzzy-Logik und mögliche Anwendungsbereiche kann an dieser Stelle naturgemäß nicht erfolgen. Daher sei hier lediglich auf entsprechende Literatur (z. B. [2, 4, 9]) verwiesen. Eine hervorragende Kurzeinführung stellt [8] dar.

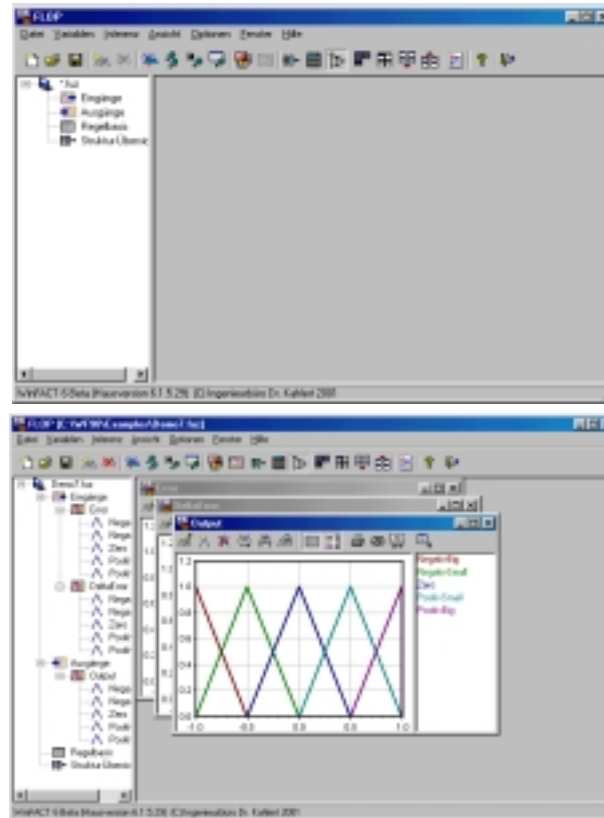
Die Fuzzy-Shell FLOP ist als MDI-Anwendung (*Multiple Document Interface*) konzipiert. Nach dem Start des Programms meldet es sich zunächst mit einem leeren Projekt (siehe nachfolgende Bildschirmgrafik). Das Programmhauptfenster ist in drei unterschiedliche Bereiche aufgeteilt:

- Eine Werkzeugleiste (*Toolbar*) unmittelbar unterhalb des Fenstermenüs. Diese ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die wichtigsten Funktionen.
- Den *Projektbaum* im linken Bereich. Dieser enthält alle Komponenten der augenblicklichen Systemstruktur, d. h. insbesondere alle linguistischen Variablen mit ihren Fuzzy Sets und die Regelbasis. Die Breite des Projektbaumes lässt sich mit der Maus beliebig modifizieren. Bei


Bedarf kann er ferner über die Schaltfläche  komplett ausgeblendet werden.

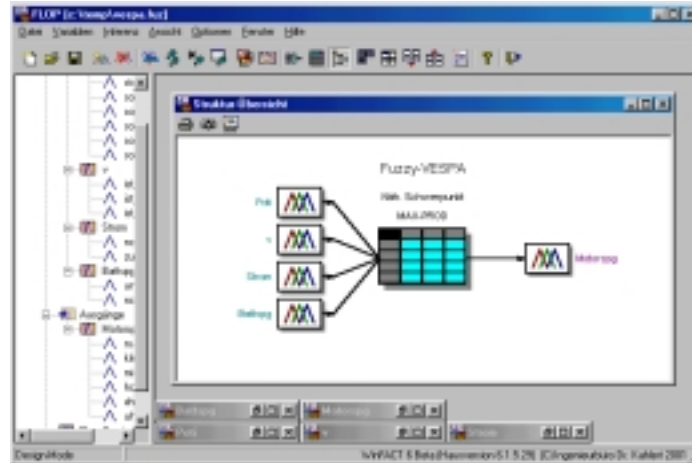
Der Projektbaum besitzt ein leistungsfähiges *Kontextmenü* (Pop-up-menü), das nach Anklicken eines Eintrags des Projektbaums mit der rechten Maustaste verfügbar ist.

- Den *Client-Bereich* rechts des Projektbaumes. Dieser ist nach dem Programmstart zunächst noch leer; er enthält später alle MDI-Kindfenster, also beispielsweise die Variablenfenster, die Regelbasis usw. Diese Kindfenster können beliebig innerhalb dieses Client-Bereichs verschoben werden, jedoch nicht aus ihm heraus.




Programmfenster nach dem Start (oben) sowie nach dem Laden eines Projektes mit drei Variablenfenstern (unten)

Die aktuelle Systemstruktur kann jederzeit über die Menüoption ANSICHT | STRUKTUR-ÜBERSICHT, die Schaltfläche  oder durch das Anklicken des entsprechenden Symbols im Projektbaum in einem separaten Fenster angezeigt werden. Der Fensterinhalt kann dann über die Schaltflächen der Fenster-Toolbar ausgedruckt, in die Zwischenablage kopiert oder als WMF-Datei exportiert werden.




Das Struktur-Übersichtsfenster

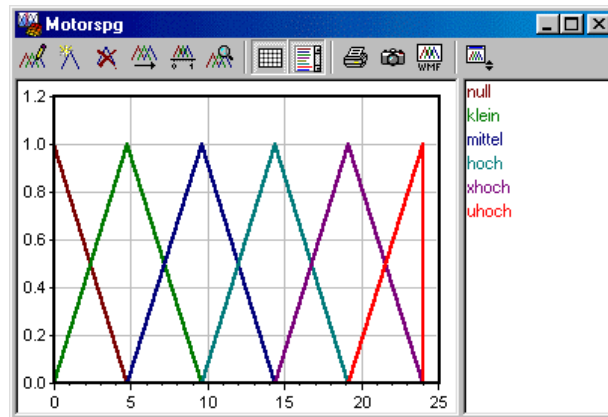
Der Status (Größe, Position etc.) aller Fenster (Haupt- und Kindfenster) wird beim Speichern eines Projektes mit den eigentlichen Projektdaten zusammen in einer Datei mit der Extension FUZ abgelegt. Nach dem erneuten Laden des Projektes steht das Projekt daher in exakt dem gleichen Zustand wieder zur Verfügung, in dem es zuletzt gespeichert wurde.

Ein Projekt kann grundsätzlich in zwei verschiedenen Betriebsarten (Modi) betrieben werden: dem Entwurfsmodus (*Design-Mode*) und dem Analysemodus (*Debug-Mode*). Im Analysemodus sind in der Regel nicht alle Funktionen des Entwurfsmodus verfügbar. Die Umschaltung zwischen beiden Modi wird über die Menüoption INFERENZ | INTERAKTIVER DEBUG-MODUS bzw. die Schaltfläche  vorgenommen. Der aktuelle Modus wird in der Statuszeile des Programms im linken Bereich angezeigt.

Linguistische Variablen und Terme


Einfügen neuer Variablen

Zur Übersichtlichkeit des Programms trägt bei, dass der Benutzer jederzeit einen Überblick über die aktuell definierten linguistischen Variablen, die zugehörigen linguistischen Terme und - sofern vorhanden - die Regelbasis erhält. Jede linguistische Variable wird in einem eigenen Fenster dargestellt, das beliebig verschoben, verkleinert und vergrößert werden kann. Über die entsprechenden Schaltflächen der Fenster-Toolbar kann der Inhalt jederzeit ausgedruckt, in die Zwischenablage kopiert oder im WMF-Format exportiert werden. Die Breite der Termliste am rechten Fensterrand kann mit der Maus beliebig modifiziert werden. Über die Schaltfläche  kann die Termliste bei Bedarf auch ausgeblendet werden.



Variablenfenster für eine Variable mit sechs linguistischen Termen im Entwurfsmodus

Um eine neue linguistische Variable einzufügen, gibt es verschiedene Möglichkeiten:

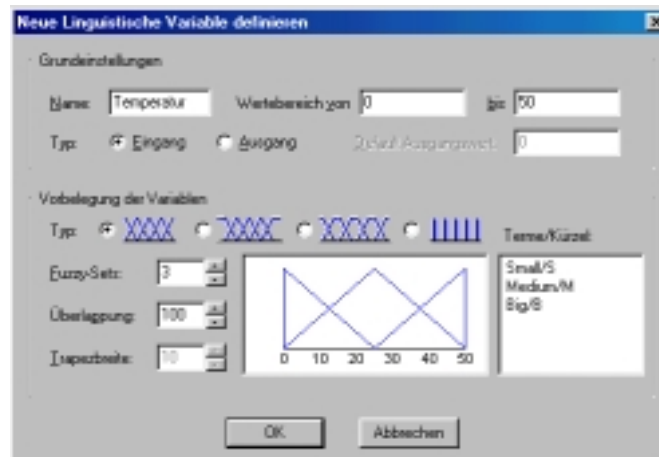
- Die Menüoption VARIABLEN | NEUE LINGUISTISCHE VARIABLE...
- Die Schaltfläche  der Hauptfenster-Toolbar

- Anklicken des Eintrags *Eingänge* bzw. *Ausgänge* im Projektbaum und Wahl der entsprechenden Menüoption im daraufhin erscheinenden Kontextmenü.

Eine linguistische Variable wie z. B. *Temperatur* ist festgelegt durch

- den *Typ* (Eingangs- oder Ausgangsgröße entsprechend Prämisse bzw. Konklusion der Regeln),
- ihren *Namen* (maximal 15 Zeichen),
- ihren *numerischen Wertebereich*,
- sowie bei Ausgangsvariablen einen *Standard-Ausgangswert* für den Fall, dass keine Regel aktiv ist.


Nach Einfügen einer neuen Variablen gelangt man zunächst in einen Dialog zur Spezifikation und Vorbelegung der Variablen. Nachfolgende Bildschirmgrafik zeigt den Eingabedialog bereits nach erfolgter Eingabe der Parameter für die Variable *Temperatur*. Es wurde ein Wertebereich von 0 bis 50 gewählt und dieser zunächst mit drei Fuzzy Sets in Dreiecksform mit vollständiger Überlappung der Sets vorbelegt. Die vom Programm automatisch vergebenen Bezeichnungen für die Fuzzy Sets (linguistische Terme) sowie die zugehörigen Kürzel erscheinen am rechten Rand des Dialogs in einer entsprechenden Listbox. Sie können innerhalb dieser Box durch Anklicken unmittelbar modifiziert werden. Das Kürzel wird nur aus Kompatibilitätsgründen zu älteren Versionen weiterhin unterstützt; innerhalb der aktuellen Version von FLOP ist es ohne Bedeutung.

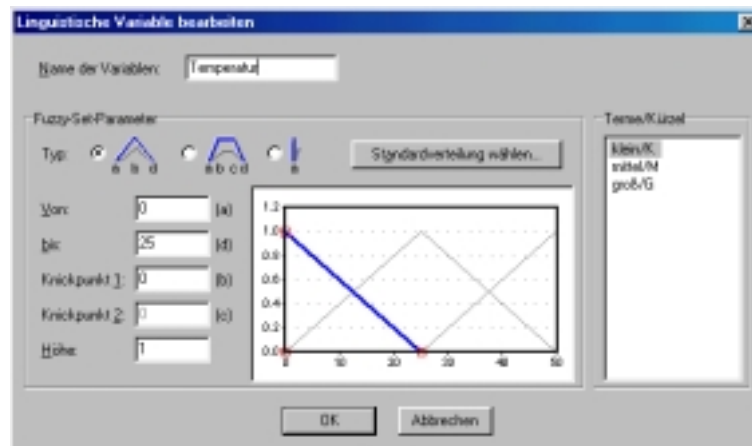


Dialog zur Definition neuer linguistischer Variablen

Modifikation von Variablen

Zur Bearbeitung der Fuzzy Sets einer bereits vorhandenen Variablen oder zu ihrer Umbenennung gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Aktivierung des Variablenfensters und Betätigung der Schaltfläche  bzw. Wahl der Hauptmenü-Option VARIABLEN | LINGUISTISCHE VARIABLE BEARBEITEN...
- Doppelklick mit der linken Maustaste innerhalb des Variablenfensters
- Anklicken der Variablen im Projektbaum (rechte Maustaste) und Wahl der Option VARIABLE BEARBEITEN... im Kontextmenü.



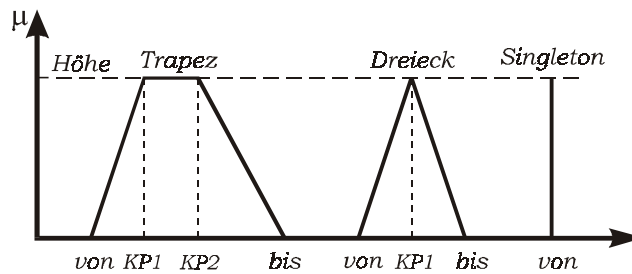
Dialog zur Modifikation der Fuzzy Sets einer Variablen

Die zu bearbeitende Zugehörigkeitsfunktion wird durch Anklicken des entsprechenden Eintrags in der Liste am rechten Dialogrand ausgewählt. Sämtliche linguistischen Terme zur aktuellen Variablen werden grafisch im entsprechenden Fenster angezeigt. Der angewählte Term wird zusätzlich farblich und durch Markierung der charakteristischen Punkte hervorgehoben. Alle durchgeführten Änderungen werden unmittelbar protokolliert. Durch doppeltes Anklicken eines Terms innerhalb der Liste kann dieser umbenannt werden.


Wurde als Typ der Zugehörigkeitsfunktion *Singleton* gewählt, so ist lediglich die Eingabe des (scharfen) Wertes im Feld Von notwendig. Das Eingabefeld *Knickpunkt 2* ist nur anwählbar, wenn für den Fuzzy Set-Typ die Einstellung *Trapez* gewählt wurde. Durch Eingabe einer Höhe kleiner als 1 lassen sich

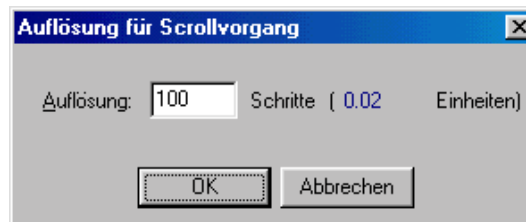
subnormale Fuzzy Sets erzeugen, mit denen allerdings im Normalfall nicht gearbeitet werden sollte¹.

Das nachfolgende Bild zeigt im Überblick die charakteristischen Punkte für alle Typen von Zugehörigkeitsfunktionen.



Kennwerte der einzelnen Typen von Zugehörigkeitsfunktionen


Alternativ zur Direkteingabe der numerischen Werte können die Fuzzy Sets auch grafisch mit der Maus editiert werden. Durch einen Mausklick mit der linken Taste auf eine Fuzzy-Menge im Anzeigefenster wird diese zunächst aktiviert. Danach können die einzelnen charakteristischen Punkte, die durch rote Quadrate markiert sind, mit der Maus bei gedrückter linker Taste verschoben werden. Für die mausgesteuerte Modifikation einer Fuzzy-Menge wird standardmäßig eine Auflösung von 100 Punkten (bezogen auf den Wertebereich der Variablen) benutzt. Dieser Wert kann jedoch über die Schaltfläche  des Variablenfenster-Menüs geändert werden.

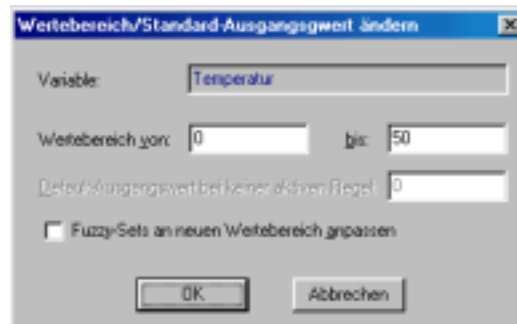


Dialog zur Einstellung der Variablenauflösung

Besondere Aufmerksamkeit verdient die Schaltfläche *Standardverteilung wählen....* Sie ermöglicht jederzeit eine schnelle Grundeinstellung aller Zugehörigkeitsfunktionen der angewählten linguistischen Variablen entsprechend den Möglichkeiten bei der Neudefinition der Variablen.

¹ Speziell bei der C-Code-Generierung sind subnormale Sets nicht zulässig!

Auch die meisten anderen Optionen zur Modifikation von Variablen sind wahlweise über die Toolbar des Variablenfensters, das Hauptmenü oder das Kontextmenü des Projektbaumes erreichbar. So kann der Wertebereich oder Standard-Ausgangswert (nur Ausgangsvariablen) einer Variablen über die Schaltfläche  modifiziert werden.

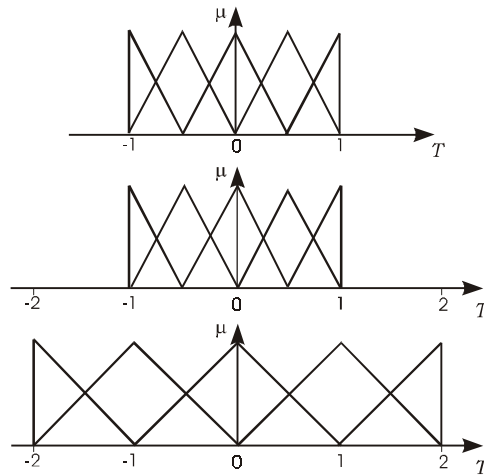


Dialog zur Modifikation des Wertebereichs oder Standard-Ausgangswerts einer Variablen.




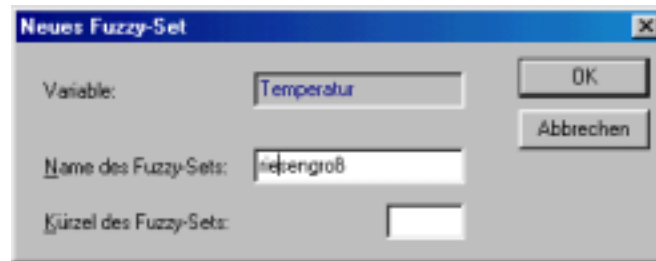
Tipp: Soll das Fuzzy-System später unter BORIS benutzt werden, empfiehlt es sich, alle Ein- und Ausgangsgrößen innerhalb von FLOP auf den Wertebereich $[-1, 1]$ bzw. $[0, 1]$ zu normieren und die Anpassung an die tatsächlichen Wertebereiche später in BORIS durch Vor- bzw. Nachschaltung von P-Gliedern zu realisieren! Diese Vorgehensweise ist erheblich zeitsparender.

Soll der Wertebereich einer linguistischen Variablen geändert werden, die bereits Fuzzy Sets enthält, so möchte man in vielen Fällen die Fuzzy Sets selbst ebenfalls umnormieren, sodass sie den neuen Wertebereich voll ausschöpfen. Dies lässt sich über die Option *Fuzzy Sets an neuen Wertebereich anpassen* erreichen. Wird der Schalter nicht gesetzt, so bleiben die linguistischen Terme an ihren definierten Stellen stehen. Diese Option ist sehr nützlich, wenn man später merkt, dass der Wertebereich einer linguistischen Variablen kleiner gewählt werden darf bzw. größer zu wählen ist. Durch Markierung des Auswahlfeldes *Fuzzy Sets anpassen* werden dann die Sets dieser Variablen entsprechend des neuen Definitionsbereichs gestaucht bzw. gestreckt. Das nachfolgende Bild verdeutlicht diese Option an einem Beispiel.




Änderung des Wertebereichs einer Variablen T (oberes Bild) von $[-1, 1]$ auf $[-2, 2]$.
 Ohne Anpassung der Fuzzy Sets ergibt sich eine Konstellation gemäß des mittleren
 Bildes, mit Anpassung erhält man die untere Verteilung der Fuzzy Sets.

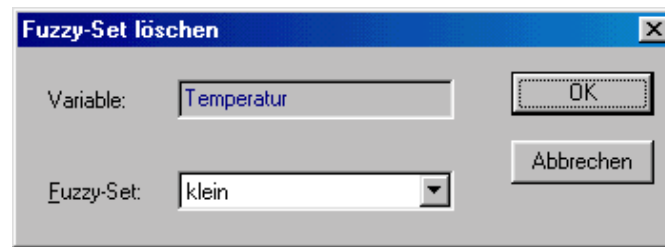
Zur Definition neuer Terme für eine Variable dient die Schaltfläche .




Dialog zur Definition neuer linguistischer Terme

Das Kürzel ist wie bereits erwähnt nur aus Kompatibilitätsgründen zu älteren Versionen noch vorhanden; das Feld kann ohne weitere Auswirkungen daher leer gelassen werden. Die Zugehörigkeitsfunktion selbst wird bei ihrer Definition zunächst so initialisiert, dass sie symmetrisch und dreiecksförmig ist, wobei die Einflussbreite mit dem Wertebereich der zugeordneten linguistischen Variablen identisch ist. Sie muss daher nachfolgend noch bearbeitet werden.

Zum Löschen von linguistischen Termen dient die Schaltfläche . Der zu löschende Term kann anschließend in einem Dialog ausgewählt werden.




Dialog zum Löschen eines linguistischen Terme

Beim nachträglichen Bearbeiten einer Variablen kann die Reihenfolge ihrer Terme unter Umständen "durcheinander geraten". Eine Neusortierung der Terme ist in diesem Fall über die Schaltfläche  möglich.


Definition und Bearbeitung einer Regelbasis



Darstellungsformen des Regelbasis-Editors

Zur Erstellung und Modifikation der Regelbasis dient ein komfortabler Regelbasis-Editor, das sogenannte *Regelbasis-Fenster*. Dieses Fenster kann - sofern es aktuell nicht sichtbar ist - auf verschiedene Weisen angezeigt werden:

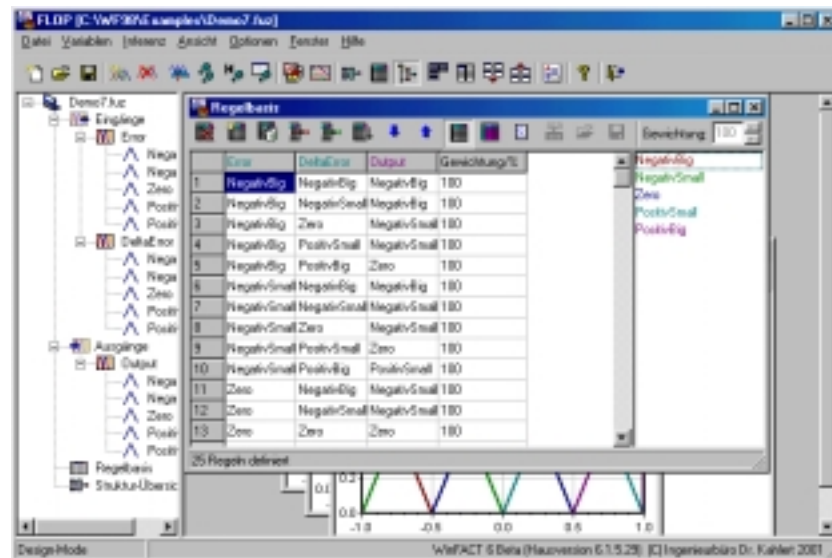
- Über die Hauptmenüoption ANSICHT | REGELBASIS
- Über die Schaltfläche  der Hauptfenster-Toolbar
- Durch Anklicken des Regelbasis-Symbols im Projektbaum

Die Regelbasis kann innerhalb des Fensters auf drei verschiedene Weisen präsentiert werden:


- In Tabellenform, wobei jede Spalte der Tabelle eine linguistische Variable und jede Zeile eine Regel enthält. Dies ist die Standard-Darstellungsform der Regelbasis. Sie kann bei Bedarf über die Schaltfläche  der Toolbar des Regelbasis-Fensters aktiviert werden.

- In Matrixform, wobei in horizontaler Richtung die linguistischen Terme der ersten Eingangsvariablen und in vertikaler Richtung die Terme der zweiten Eingangsvariablen aufgetragen sind. Die inneren Zellen enthalten dann die linguistischen Terme der Ausgangsgröße. Diese Darstellungsform ist nur bei Fuzzy-Systemen mit zwei Eingangsgrößen und einer Ausgangsgröße verfügbar und kann über die Schaltfläche  aktiviert werden.
- In Textform, sodass ein Bearbeiten mit einem herkömmlichen Texteditor möglich ist. Diese Darstellungsform ist über die Schaltfläche  erreichbar.

Das Regelbasis-Fenster kann beliebig verkleinert, vergrößert oder zum Symbol minimiert werden. Im Gegensatz zu den Variablenfenstern kann es bei Bedarf auch geschlossen werden; die Regelbasis selbst geht dabei nicht verloren.



Regelbasis-Fenster für ein System mit zwei Eingangsgrößen und einer Ausgangsgröße (hier im Tabellenmodus)

Eine vorhandene Regelbasis kann über die Schaltfläche  der Toolbar des Regelbasis-Fensters nach einer Sicherheitsabfrage jederzeit komplett gelöscht werden.

Der Regelbasis-Editor im Tabellenmodus

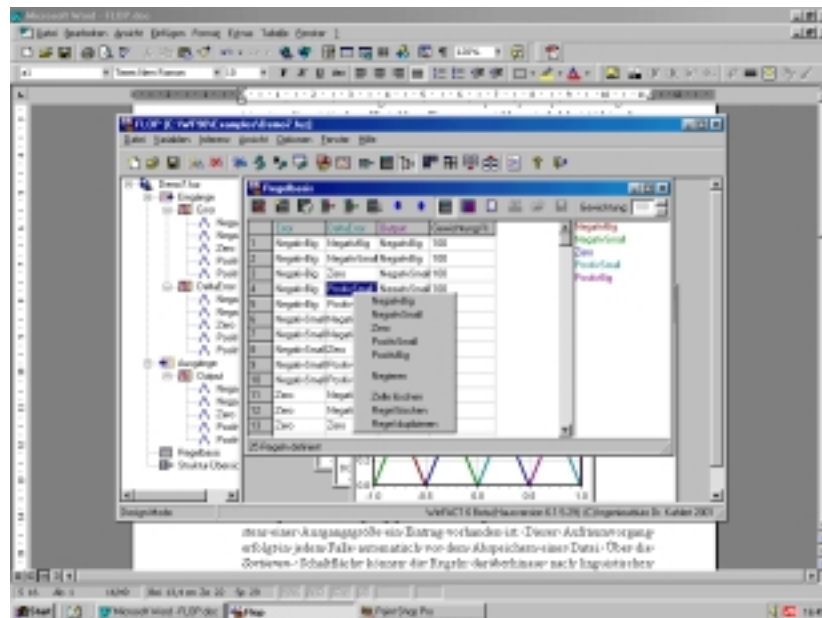
Im Tabellenmodus des Regelbasis-Editors entspricht jede Spalte der Regelmatrix einer linguistischen Variablen; Eingangsvariablen sind dabei türkis, Ausgangsvariablen violett beschriftet. Jede Zeile der Matrix entspricht somit einer Regel. Die letzte Spalte der Matrix enthält zudem die Gewichtung (Vertrauensmaß) der jeweiligen Regel als Prozentwert zwischen 0 ("kein Vertrauen") und 100 ("vollstes Vertrauen"); standardmäßig hat jede neue Regel zunächst eine Gewichtung von 100%.

Einfügen und Löschen linguistischer Terme

Die meisten Optionen des Regelbasis-Editors sind einerseits über seine Toolbar, andererseits aber auch über ein Kontextmenü verfügbar, das beim Anklicken einer Zelle mit der rechten Maustaste erscheint. Soll beispielsweise eine Zelle mit einem linguistischen Term gefüllt werden, so stehen dazu zwei Wege zur Auswahl:

- Anklicken der Zelle mit der *linken* Maustaste. In der Liste am rechten Fensterrand erscheinen daraufhin alle Terme der zugehörigen Variablen. Durch einen Doppelklick auf einen Eintrag wird dieser in die angewählte Zelle übernommen.
- Anklicken der Zelle mit der *rechten* Maustaste. Im daraufhin erscheinenden Kontextmenü wird dann der zu übernehmende Term ausgewählt (siehe nachfolgende Bildschirmgrafik).

Beide Möglichkeiten können auch benutzt werden, um mehrere untereinander liegende Zellen einer Spalte gleichzeitig mit demselben Term zu füllen. Dazu wird bei der Selektion die linke Maustaste festgehalten.



Kontextmenü des Regelbasis-Editors im Tabellenmodus


Das Kontextmenü erlaubt auch das Negieren der Terme von Eingangsgrößen (NICHT-Operator). Innerhalb der Zelle wird eine derart negierte Teilprämisse über eine vorangestellte Tilde (z. B. *~klein*) gekennzeichnet.




Sollen einzelne oder mehrere untereinander liegende Zellen einer Spalte gelöscht werden, so werden diese zunächst wie oben beschrieben selektiert und anschließend im Kontextmenü die Option ZELLE LÖSCHEN gewählt.



Bearbeiten kompletter Regeln

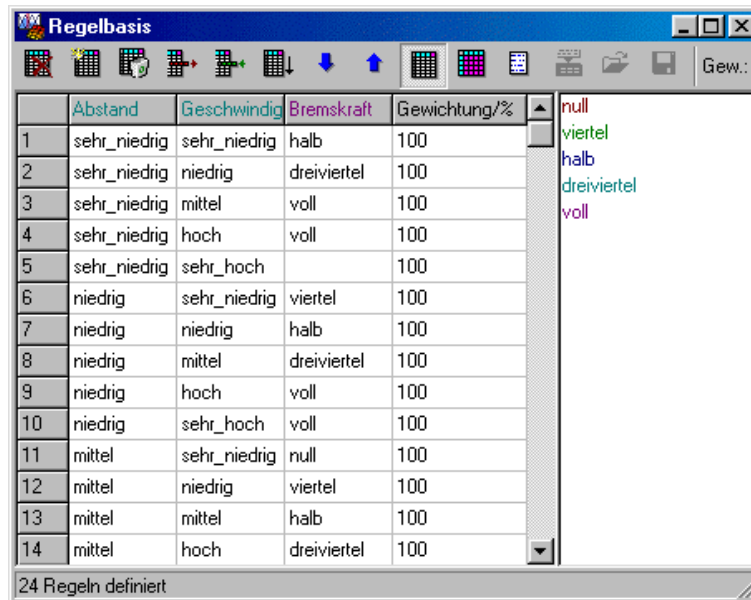
Neben der Modifikation einzelner Zellen der Regelbasis bietet der Editor auch zahlreiche Funktionen zur Bearbeitung kompletter Regeln, also Zeilen der Regeltabelle. Zur Auswahl einer oder mehrerer Regeln genügt es dabei, *irgendeine* Zelle oder auch nebeneinander liegenden Zellen innerhalb der Zeile zu selektieren; es ist nicht erforderlich, alle Zellen gleichzeitig auszuwählen.

Wurden auf diese Weise eine oder mehrere untereinander liegende Regeln selektiert, so sind folgende Operationen möglich:

- *Löschen* aller selektierten Regeln über das Kontextmenü oder die Schaltfläche .

- *Verschieben* aller selektierten Regeln nach oben oder unten über die Schaltfläche  bzw. . Einzelne Regeln können alternativ dazu mit der Maus verschoben werden, indem die Regeln in der linken, grauen Spalte der Tabelle (Regelnummer) angeklickt und dann bei festgehaltener linker Maustaste in ihre neue Position gebracht werden.
- *Duplizieren* einer Regel über das Kontextmenü (nur bei einzelnen Regeln erlaubt). Die duplizierte Regel wird direkt unterhalb der selektierten Regel eingefügt.
- *Einfügen* einer neuen ("leeren") Regel vor der selektierten über die Schaltfläche .

Die Schaltfläche  ermöglicht das Entfernen ungültiger Regeln aus der Regelbasis. Als ungültig gelten solche Regeln, bei denen nicht bei mindestens einer Ausgangsgröße ein Eintrag vorhanden ist (siehe nachfolgende Bildschirmgrafik). Dieser Aufräumvorgang erfolgt in jedem Falle automatisch beim Schließen des Regelbasis-Fensters. Über die Schaltfläche  können die Regeln darüber hinaus nach linguistischen Termen in den jeweiligen Prämissen sortiert werden.




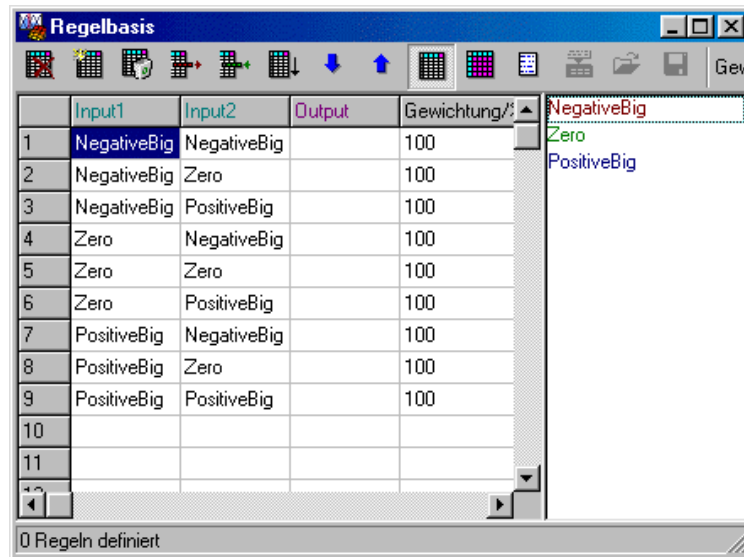
	Abstand	Geschwindigkeit	Bremskraft	Gewichtung/%	
1	sehr_niedrig	sehr_niedrig	halb	100	null
2	sehr_niedrig	niedrig	dreiviertel	100	viertel
3	sehr_niedrig	mittel	voll	100	halb
4	sehr_niedrig	hoch	voll	100	dreiviertel
5	sehr_niedrig	sehr_hoch		100	voll
6	niedrig	sehr_niedrig	viertel	100	
7	niedrig	niedrig	halb	100	
8	niedrig	mittel	dreiviertel	100	
9	niedrig	hoch	voll	100	
10	niedrig	sehr_hoch	voll	100	
11	mittel	sehr_niedrig	null	100	
12	mittel	niedrig	viertel	100	
13	mittel	mittel	halb	100	
14	mittel	hoch	dreiviertel	100	

24 Regeln definiert

Beispiel für eine ungültige Regel: Regel 5 enthält hier keine Schlussfolgerung und ist daher aktuell ungültig

Automatische Prämissen-Generierung

Bei vielen Fuzzy-Systemen ist eine *vollständige* Regelbasis in dem Sinne erwünscht, dass für jede mögliche Kombination von Eingangsgrößentermen (Teilprämissen) eine Regel existiert. Im Tabellenmodus erlaubt der Regelbasis-Editor die automatische Generierung des zugehörigen WENN-Teils der Regelbasis, sodass vom Anwender dann lediglich noch die Schlussfolgerungsterme einzutragen sind. Dazu dient die Schaltfläche . Nachfolgende Bildschirmgrafik zeigt das auf diese Weise generierte "Regelgerüst" für ein Fuzzy-System mit zwei Eingangsgrößen, die jeweils drei linguistische Terme aufweisen. Es werden daher insgesamt neun Regelrumpfe erzeugt.



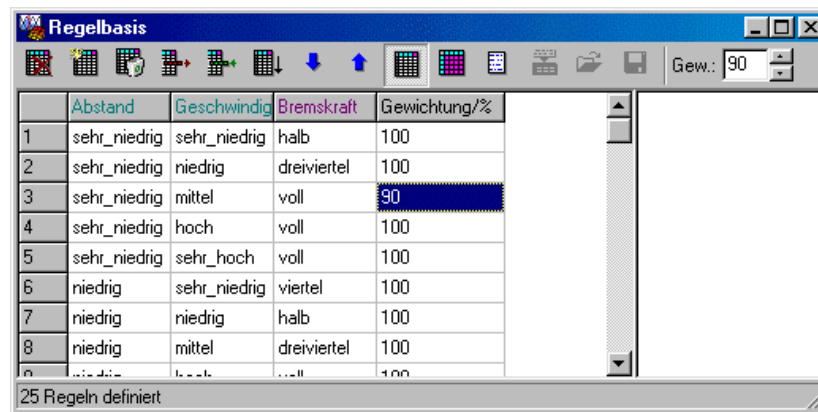
	Input1	Input2	Output	Gewichtung/%
1	NegativeBig	NegativeBig		100
2	NegativeBig	Zero		100
3	NegativeBig	PositiveBig		100
4	Zero	NegativeBig		100
5	Zero	Zero		100
6	Zero	PositiveBig		100
7	PositiveBig	NegativeBig		100
8	PositiveBig	Zero		100
9	PositiveBig	PositiveBig		100
10				
11				

0 Regeln definiert

Beispiel für die automatische Prämissen-Generierung

Änderung der Regelgewichtung

Jede Regel besitzt eine individuelle Regelgewichtung mit dem Standardwert 100% (volle Gewichtung). Soll die Gewichtung einer Regel geändert werden, selektieren Sie zunächst das entsprechende Feld der Regeltabelle. Im Eingabefeld *Gewichtung* der Toolbar lässt sich die gewünschte Gewichtung dann in 1%-Schritten einstellen. Durch Selektion mehrerer Zellen lässt sich die Gewichtung mehrerer Regeln simultan ändern.



	Abstand	Geschwindigkeit	Bremskraft	Gewichtung/%
1	sehr_niedrig	sehr_niedrig	halb	100
2	sehr_niedrig	niedrig	dreiviertel	100
3	sehr_niedrig	mittel	voll	90
4	sehr_niedrig	hoch	voll	100
5	sehr_niedrig	sehr_hoch	voll	100
6	niedrig	sehr_niedrig	viertel	100
7	niedrig	niedrig	halb	100
8	niedrig	mittel	dreiviertel	100
9	niedrig	hoch	voll	100

25 Regeln definiert

Änderung der Gewichtung einer Regel

Der Regelbasis-Editor im Matrixmodus

Für eine besonders übersichtliche Darstellung von Fuzzy-Systemen mit zwei Eingangsgrößen bietet sich der Matrixmodus des Regelbasis-Editors an. Dieser ist unter folgenden Voraussetzungen verfügbar:

- Das Fuzzy-System muss zwei Eingangsgrößen und eine Ausgangsgröße besitzen.
- Alle bereits vorhandenen Regeln müssen bezüglich der Prämisse vollständig sein (d. h. keine Teilprämisse darf leer sein).
- Keine Teilprämisse darf negiert sein.

Im Matrixmodus brauchen die Prämissen nicht eingegeben zu werden, da sie aufgrund der Matrixstruktur automatisch festliegen. Der Anwender muss daher nur die geeigneten Schlussfolgerungsterme in die inneren Matrixzellen eintragen. In dieser Darstellungsform lässt sich daher auch die Vollständigkeit der Regelbasis direkt auf einen Blick überprüfen.


Die Gewichtung von Regeln lässt sich ebenfalls im Matrixmodus nach Anklicken der entsprechenden Zelle(n) modifizieren.

	sehr_niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr_hoch
sehr_niedrig	halb	dreiviertel	voll	voll	voll
niedrig	viertel	halb	dreiviertel	voll	voll
mittel	null	viertel	halb	dreiviertel	voll
hoch	null	null	viertel	halb	dreiviertel
sehr_hoch	null	null	null	viertel	halb

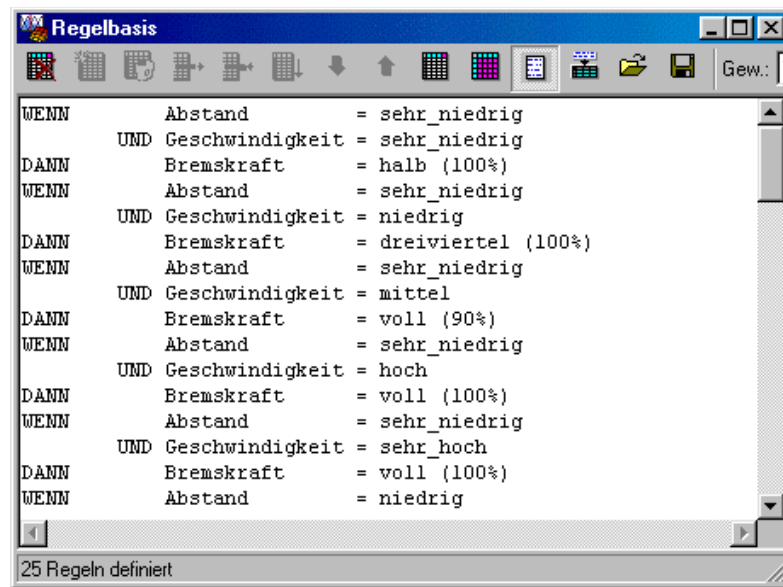
25 Regeln definiert

Regelbasis im Matrixmodus (hier mit Beispieldatei HIGHWAY.FUZ)

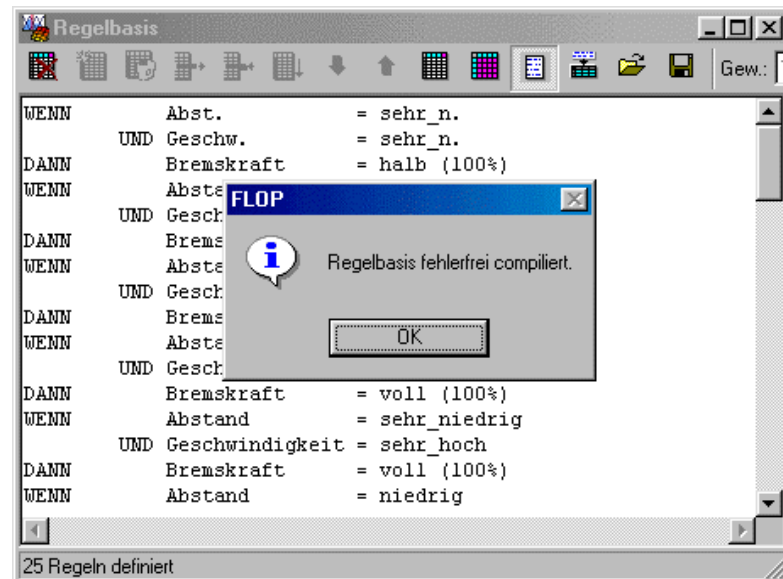
Der Regelbasis-Editor im Textmodus

Der Textmodus des Regelbasis-Editors ist wie der Tabellenmodus bei beliebigen System- und Regelstrukturen verfügbar. In dieser Darstellungsform entspricht der Editor praktisch einem einfachen Texteditor, in dem die Regeln "im Klartext" formuliert werden können. Vor dem Wechsel zurück in einen der anderen Modi (Tabellen- bzw. Matrixmodus) muss die Regelbasis zunächst recompiliert werden (Schaltfläche ); dabei wird sie automatisch auf Syntaxfehler überprüft.

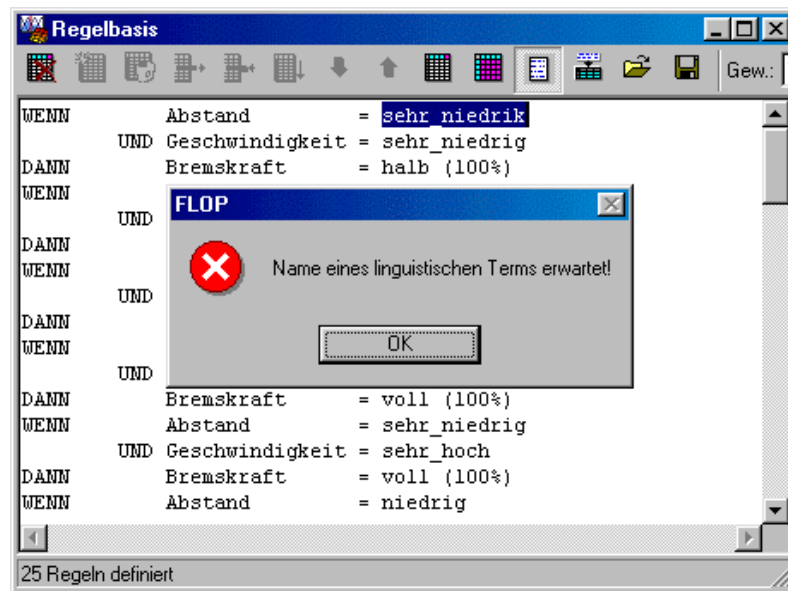
Die Namen von linguistischen Variablen und Termen dürfen innerhalb des Regeltextes beliebig durch einen Punkt abgekürzt werden, solange diese Abkürzung eindeutig ist (die Variable *Geschwindigkeit* im Beispiel HIGHWAY.FUZ also z. B. durch *Geschw.*). Auf nicht-eindeutige Abkürzungen wie auch auf andere Syntaxfehler wird der Anwender ggf. beim Compilieren der Regelbasis hingewiesen. Wird beim Compilieren ein Fehler entdeckt, wird die entsprechende Stelle im Editierfenster automatisch selektiert und eine entsprechende Meldung ausgegeben.



Regelbasis-Editor im Textmodus (Beispieldatei HIGHWAY.FUZ)



Variablen- und Termnamen dürfen abgekürzt werden (siehe oberste Regel). Der Regelbasiscompiler erkennt dies automatisch und übersetzt die Regeln einwandfrei.



Hier hat der Compiler einen Tippfehler in der ersten Regel entdeckt und die entsprechende Stelle markiert.



Die nachfolgenden Syntaxdiagramme erläutern den Aufbau der Regeln im Textmodus. Vergleichsoperatoren wie z. B. = müssen in Leerzeichen eingeschlossen sein. Zum Negieren von Teilprämissen sind wahlweise die Operatoren

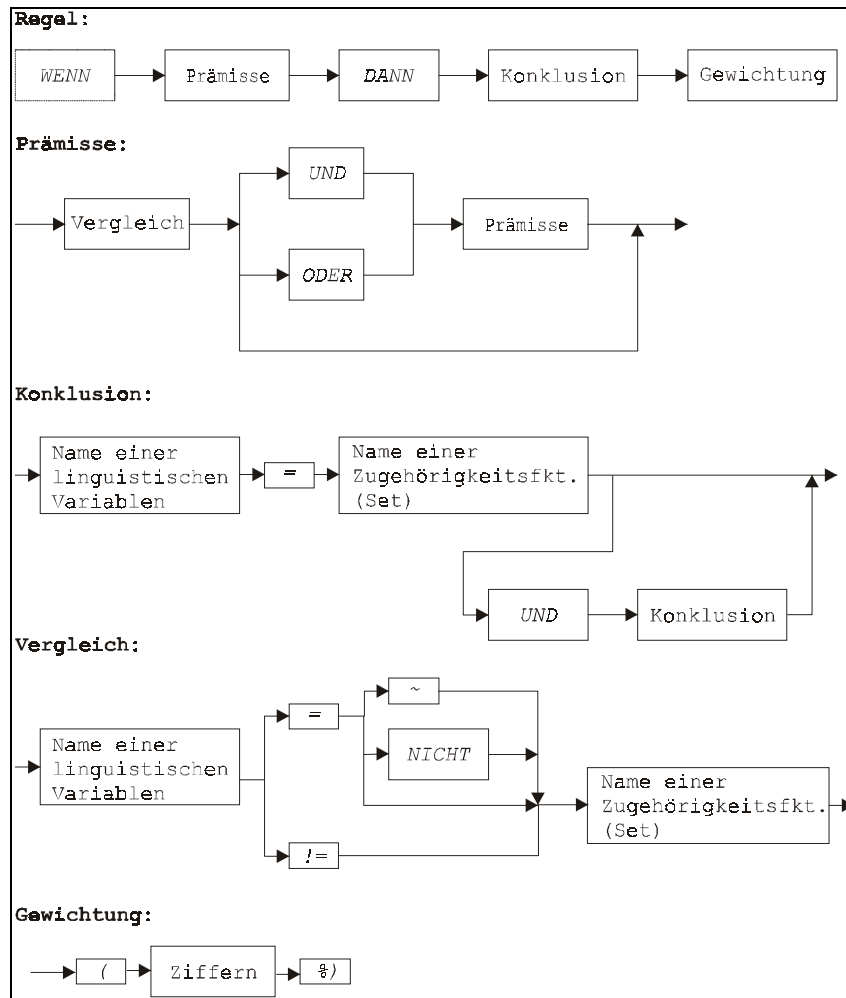
= NICHT

= ~

!=

zulässig.

Über die Schaltflächen  und  lassen sich Regelbasen auch aus Textdateien lesen oder in Textdateien speichern (Dateierweiterung *RB*). Somit können die Regeln beispielsweise auch mit anderen Textverarbeitungsprogrammen erstellt, modifiziert und dann in den Regelbasis-Editor übertragen werden.



Syntaxdiagramm des Texteditors für Regeln

Operatoren, Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung

Operatoren für UND- und ODER-Verknüpfung

Für die UND- und ODER-Verknüpfung der Teilprämissen stellt FLOP verschiedene Operatoren zur Verfügung. Die Auswahl der gewünschten Operatoren kann über die Menüoption INFERENZ | OPERATOREN... erfolgen (siehe nachfolgende Bildschirmgrafik).



Dialog zur Wahl der Verknüpfungsoperatoren

Standardmäßig wird für die UND-Verknüpfung der MIN-Operator, für die ODER-Verknüpfung der MAX-Operator herangezogen. Alternativ dazu stehen jedoch weitere Operatoren zur Auswahl:

Für die UND-Verknüpfung:

- Bounded-Difference-Operator (Abgeschnittene Differenz)

$$(\mu_1 \triangle \mu_2)(x) := \text{MAX}(0, \mu_1(x) + \mu_2(x) - 1),$$

- Algebraic-Product-Operator (Algebraisches Produkt)

$$(\mu_1 \mu_2)(x) := \mu_1(x) \cdot \mu_2(x).$$

Für die ODER-Verknüpfung:

- Bounded-Sum-Operator (Abgeschnittene Summe)

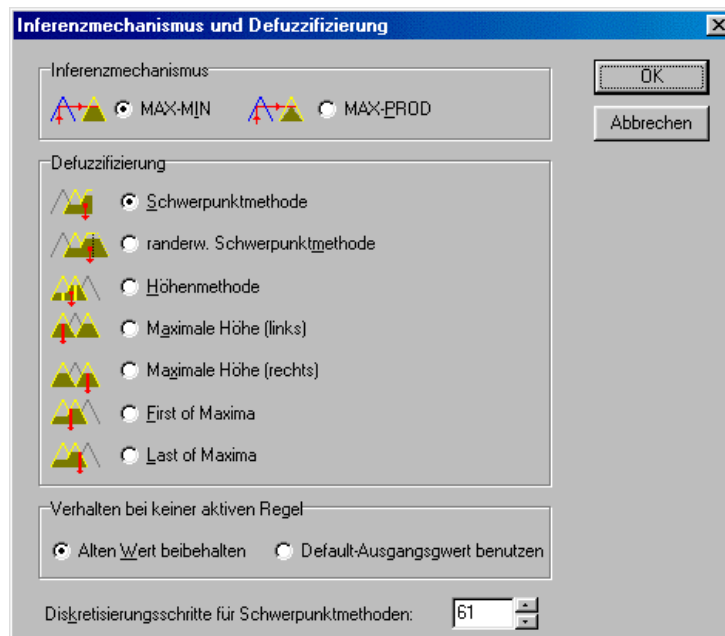
$$(\mu_1 \hat{+} \mu_2)(x) := \min(1, \mu_1(x) + \mu_2(x)),$$

- Algebraic-Sum-Operator (Algebraische Summe)

$$(\mu_1 \oplus \mu_2)(x) := \mu_1(x) + \mu_2(x) - \mu_1(x) \cdot \mu_2(x).$$

Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung

Die Wahl von Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung wird über die Menüoption INFERENZ | INFERENZMECHANISMUS UND DEFUZZIFIZIERUNG... vorgenommen.



Dialog zur Wahl von Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung

Über den zugehörigen Dialog kann zwischen MAX-MIN-Inferenz und MAX-PROD-Inferenz gewählt werden. Weiterhin stehen in Form der Schaltergruppe *Defuzzifizierung* verschiedene Defuzzifizierungsmethoden zur Auswahl, die in [2, 4] im Detail erläutert werden:

- Schwerpunktmethod (Centre of Gravity - Method)

Bei der (originalen) Schwerpunktmethod wird der Abszissenwert des Flächenschwerpunktes S der resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Menge $\mu_{res}(y)$ zur scharfen Ausgangsgröße y_{res} gewählt. Die exakte Formel lautet

$$y_{res} = \frac{\int_0^{\infty} y \mu_{res}(y) dy}{\int_0^{\infty} \mu_{res}(y) dy}.$$

Das Integral wird programmintern durch numerische Integration mit vorgebbbarer Stützstellenzahl ausgewertet.

- Modifizierte (randerweiterte) Schwerpunktmethod

Diese Methode entspricht im Prinzip der originalen Schwerpunktmethod, die beiden Randmengen der Ausgangsgröße werden jedoch symmetrisch erweitert, damit der minimal bzw. maximal mögliche scharfe Ausgangswert gerade mit dem Wertebereich der Ausgangsgröße übereinstimmt. Das Ergebnis unterscheidet sich von der originalen Schwerpunktmethod also nur dann, wenn eine der Randmengen einen Beitrag zur resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Menge liefert.

- Näherungsweise Schwerpunktmethod (Höhenmethod, Schwerpunktmethod für Singletons)

Da die originale Schwerpunktmethod sehr rechenzeitaufwendig ist, empfiehlt sich i. a. die Anwendung einer Näherungsformel für den Schwerpunkt. Diese lautet

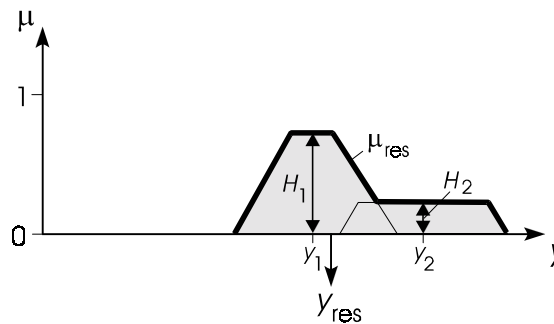
$$y_{res} \approx \frac{\sum_{i=1}^m y_i H_i}{\sum_{i=1}^m H_i}.$$

Darin ist:

- m : die Anzahl der Regeln
- H_i : der Erfüllungsgrad der i -ten Regel
- y_i : der Abszissenwert des Schwerpunktes der i -ten Ausgangsmenge

Für untenstehende Ausgangs-Fuzzy-Menge erhält man also beispielsweise die Beziehung

$$y_{res} \approx \frac{y_1 H_1 + y_2 H_2}{H_1 + H_2}.$$



Näherungsformel für Schwerpunktformel

Sind für die Ausgangsgröße y Singletons definiert, so stimmt die Näherungsformel mit der exakten Gleichung überein.

- Defuzzifizierung nach maximaler Höhe (Maximum-Methode)

Es wird nur die Regel mit dem maximalen Erfüllungsgrad betrachtet. Der Modalwert der zugehörigen Ergebnis-Fuzzy-Menge liefert die scharfe Ausgangsgröße. Besitzen mehrere Regeln gleichzeitig den maximalen Erfüllungsgrad, so kann die am weitesten links oder rechts liegende Ausgangs-Fuzzy-Menge gewählt werden. Man

spricht daher von der Maximum-links- bzw. Maximum-rechts-Methode.

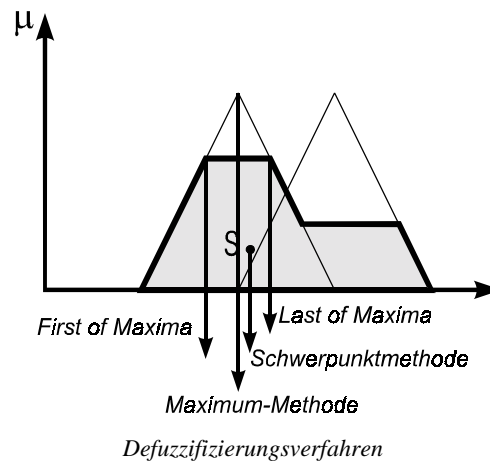
- First of Maxima-Methode

Es wird nur die Regel mit dem maximalen Erfüllungsgrad betrachtet und die zugehörige Ergebnis-Fuzzy-Menge in der Höhe des Erfüllungsgrades abgeschnitten. Der linke Knickpunkt der so entstehenden Fuzzy-Menge liefert die scharfe Ausgangsgröße [4].

- Last of Maxima-Methode

Es wird nur die Regel mit dem maximalen Erfüllungsgrad betrachtet und die zugehörige Ergebnis-Fuzzy-Menge in der Höhe des Erfüllungsgrades abgeschnitten. Der rechte Knickpunkt der so entstehenden Fuzzy-Menge liefert die scharfe Ausgangsgröße [4].

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht die unterschiedlichen Defuzzifizierungsmethoden anhand eines Beispiels.



Außerdem kann über den Dialog das Verhalten des Systems für den Fall festgelegt werden, dass keine der definierten Regeln aktiv ist. Es bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- Der letzte gültige Ausgangswert wird beibehalten.
- Es wird ein fester, ausgangsvariablenabhängiger Vorgabewert ausgegeben. Dieser kann bei der Spezifikation der Variablen vorgegeben werden.


Der Parameter *Diskretisierungsschritte für Schwerpunktmethoden* schließlich legt fest, wieviele Stützstellen bei den Schwerpunktmethoden zur Annäherung des Integrals benutzt werden. Voreingestellt ist ein Wert von 61.

Systemanalyse im Debug-Modus

Nach der Spezifikation aller linguistischen Ein- und Ausgangsvariablen, der Regelbasis, der Verknüpfungsoperatoren sowie des Inferenzmechanismus und des Defuzzifizierungsverfahrens kann das Fuzzy-System auf seine korrekte Funktionsweise hin überprüft werden. Dazu stehen verschiedene Analysewerkzeuge zur Verfügung, die insbesondere im interaktiven Debug-Modus von FLOP zur Geltung kommen.

Alle nachfolgenden Betrachtungen werden auf Basis der Beispieldatei HIGHWAY.FUZ vorgenommen.

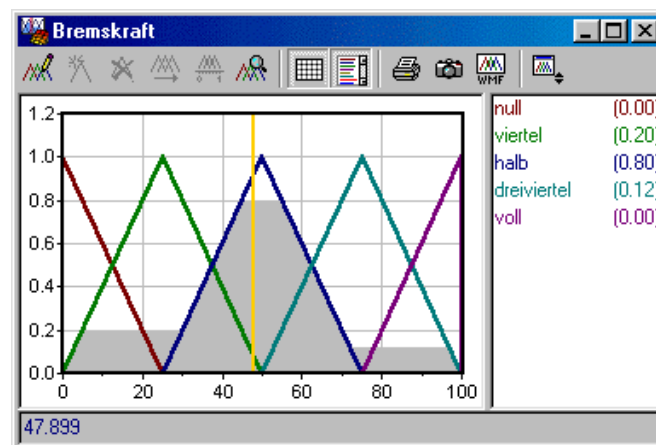
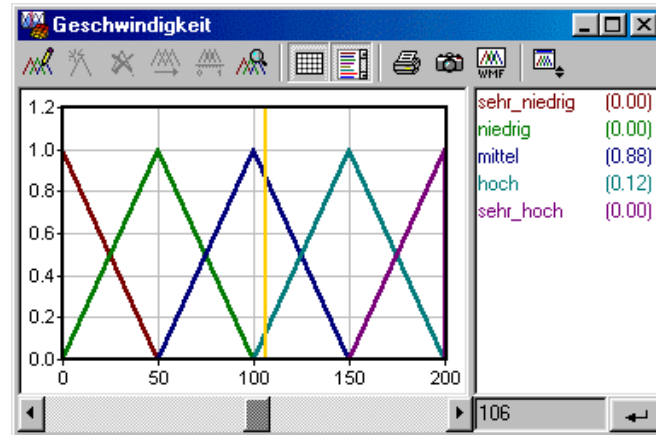
Aktivierung des interaktiven Debug-Modus

Zur Systemanalyse muss das Programm in der Regel zunächst in den interaktiven Debug-Modus versetzt werden. Dazu dient die Menüoption INFERENCE | INTERAKTIVER DEBUG-MODUS bzw. die Schaltfläche . Der interaktive Debug-Modus wird in der Statuszeile des Programms durch einen entsprechenden Eintrag quittiert.

Während sich FLOP im Debug-Modus befindet, sind Änderungen an der Struktur des Fuzzy-Systems (z. B. Einfügen oder Löschen von linguistischen Variablen) nicht möglich. Möglich sind jedoch beispielsweise Modifikationen einzelner Fuzzy Sets oder auch Änderungen der Regelbasis (Einfügen oder Löschen von Regeln oder auch Regeländerungen).


Variablenfenster im Debug-Modus

Die Variablenfenster der Ein- und Ausgangsgrößen erhalten nach der Aktivierung des Debug-Modus eine modifizierte Gestalt (siehe nachfolgenden Bildschirmgrafiken).



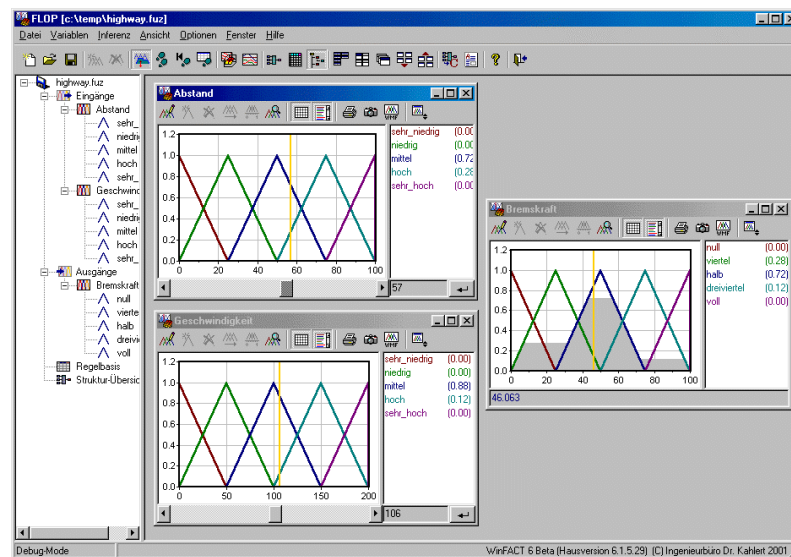
Variablenfenster für Eingangsgrößen (oben) bzw. Ausgangsgrößen (unten) im interaktiven Debug-Modus

Fenster von Eingangsvariablen erhalten am unteren Fensterrand einen Scrollbalken sowie unterhalb der Termliste ein Editierfeld mit Schaltfläche. Über den Scrollbalken oder auch das Editierfeld (mit anschließender Betätigung der



rechts neben dem Editierfeld befindlichen Schaltfläche) kann nun der aktuelle Wert der Eingangsvariablen gesetzt werden. Die Auflösung des Scrollvorgangs beträgt standardmäßig 1% des Wertebereichs der Variablen; dieser Wert kann jedoch über die Schaltfläche  geändert werden. Der aktuelle Eingangswert wird außerdem im Zeichenbereich des Fensters durch einen Balken dargestellt. In der Termliste des Fensters wird weiterhin neben jedem Term der für den aktuellen Eingangswert ermittelte Zugehörigkeitsgrad angezeigt.

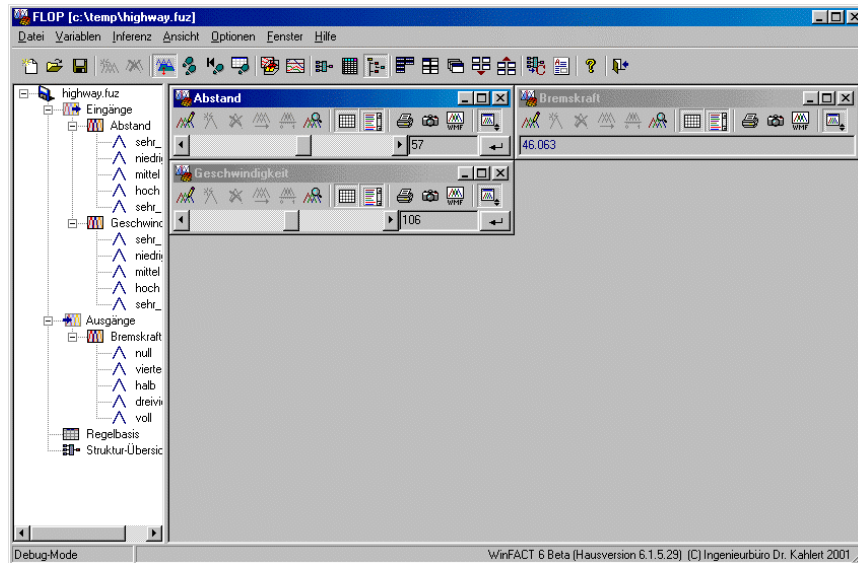
Fenster von Ausgangsgrößen besitzen im Debug-Modus am unteren Rand eine Statuszeile, in der der aktuelle scharfe Ausgangswert der Variablen angezeigt wird. Bei jeder Modifikation einer Eingangsgröße des Fuzzy-Systems werden alle Ausgangsgrößen automatisch neu berechnet und die zugehörigen Variablenfenster aktualisiert. Im Zeichenbereich des Fensters wird der scharfe Ausgangswert zusätzlich durch einen Balken dargestellt; außerdem wird die resultierende Ergebnis-Fuzzy-Menge farblich gekennzeichnet. In der Termliste werden schließlich für alle Terme der Ausgangsvariablen die aktuellen Erfüllungsgrade eingetragen.

Auf diese Weise lässt sich nunmehr das Verhalten des Fuzzy-Systems schrittweise durchspielen, indem einzelne Eingangswerte modifiziert und die Auswirkung dieser Modifikation auf die Ausgangswerte beobachtet wird (Einzelschritt-Analyse).



Einzelschritt-Analyse am Beispiel von HIGHWAY.FUZ

Sind nur die numerischen Werte von Ein- und Ausgangsgrößen von Interesse oder weist das System sehr viele Variablen auf, kann es sinnvoll sein, einige oder alle Variablenfenster soweit zu verkleinern, dass nur die relevanten Informationen dargestellt werden. Dazu lässt sich über die Schaltfläche  der Clientbereich des Variablenfensters ausblenden, sodass nur noch der Scrollbalken (Eingangsgrößen) bzw. die Statuszeile (Ausgangsgrößen) sichtbar sind. Eine gleichzeitige Verkleinerung aller Variablenfenster mit einer automatischen Anordnung der Fenster ist über die Hauptmenü-Option FENSTER | ALLE VARIABLENFENSTER ZUGEKLAPPT ANORDNEN oder die Schaltfläche  des Hauptfensters möglich (Hinweis: Diese Option sollte für eine korrekte Anzeige erst *nach* Wechsel in den Debug-Modus angewählt werden!).

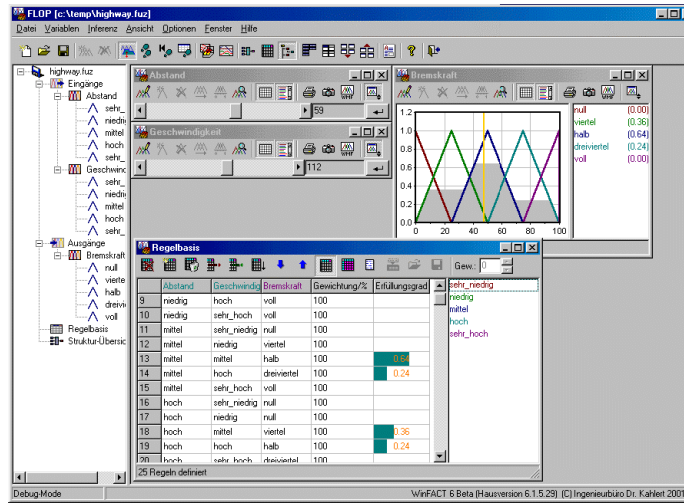


Automatische Anordnung aller zugeklappten Variablenfenster: Eingangsvariablen erscheinen links untereinander, Ausgangsvariablen rechts

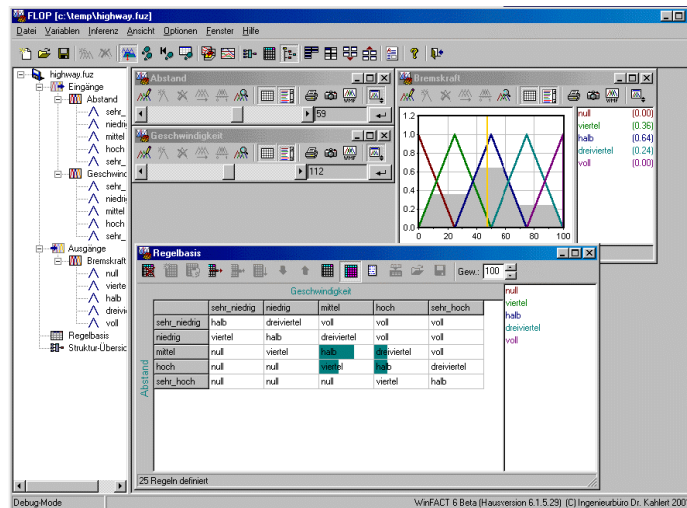
Der Regelbasis-Editor im Debug-Modus

Auch der Regelbasis-Editor erhält im Debug-Modus ein anderes Erscheinungsbild. Er zeigt nämlich für jede einzelne Regel den aktuellen Erfüllungsgrad (*Match of Degree*) an. Dazu wird im Tabellenmodus eine zusätzliche Spalte eingeblendet, während im Matrixmodus die Ausgabe direkt im Innenbereich

der Matrix (Schlussfolgerungsteil) erfolgt. Bei jedem Inferenzschritt (d. h. der Änderung eines Eingangsgrößenwertes) wird die Anzeige automatisch aktualisiert.




Regelbasis-Editor im Tabellen-Modus während einer Debug-Sitzung: Man erkennt, dass bei den aktuellen Eingangsdaten die Regeln 13, 14, 18 und 19 aktiv sind.




Dieselbe Situation beim Regelbasis-Editor im Matrixmodus: Hier wird der Erfüllungsgrad nur grafisch innerhalb der entsprechenden Matrixzelle angezeigt.



Auch im Debug-Modus sind sämtliche Optionen des Regelbasis-Editors verfügbar. Dies bedeutet, dass einerseits bestehende Regeln modifiziert werden können, andererseits auch Regeln gelöscht oder eingefügt werden können.

Kennlinien- und Kennfelddarstellung

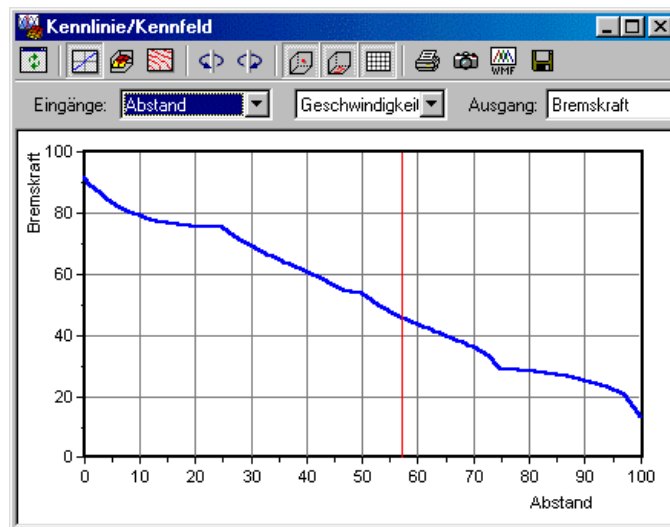
Um das Verhalten des Fuzzy-Systems global, d. h. über den gesamten Arbeitsbereich beurteilen zu können, lässt es sich in Form von Kennlinien oder Kennfeldern bzw. Höhenlinien darstellen. Das entsprechende Analysefenster kann jederzeit über die Menüoption **ANSICHT | KENNFELD/KENNLINIE** oder die Schaltfläche  angefordert werden. Es kann beliebig verkleinert, vergrößert, zum Symbol minimiert oder auch wieder geschlossen werden. Wie alle anderen Fenster wird es im Debug-Modus bei jeder Änderung von Eingangswerten, Operatoren usw. automatisch aktualisiert. Eine ganze Reihe von Einstellungen, die die Kennlinien- bzw. Kennfelddarstellung betreffen (Farben, Auflösung, ...), ist über die Hauptmenü-Option **OPTIONEN | ANPASSEN...** verfügbar. In allen Darstellungsformen ist über die entsprechenden Schaltflächen eine Ausgabe des Fensterinhalts in die Zwischenablage, auf dem Drucker oder als WMF-Datei möglich.

Hinweis: Das Kennfeldfenster ist prinzipiell auch verfügbar, wenn sich das Programm *nicht* im Debug-Modus befindet. In diesem Fall erfolgt eine Aktualisierung des Inhalts aber nur, wenn die Schaltfläche  der Fenster-Toolbar betätigt wird.


Betriebsart *Kennlinie*

In der Betriebsart *Kennlinie* (Schaltfläche ) wird die Abhängigkeit einer System-Ausgangsgröße von einer System-Eingangsgröße als Kennlinie dargestellt. Besitzt das System mehr als eine Eingangsgröße, werden die nicht ausgewählten Eingangsgrößen auf ihrem aktuellen Wert festgehalten. Der aktuelle Arbeitspunkt wird zusätzlich als roter Balken eingezeichnet, sofern diese Option über die Schaltfläche  aktiviert wurde.



Die darzustellende Eingangsgröße wird in der linken der beiden Eingangsgrößen-Komboboxen ausgewählt, die Ausgangsgröße in der rechten Kombobox. Die mittlere Kombobox ist in dieser Darstellungsform ohne Bedeutung.







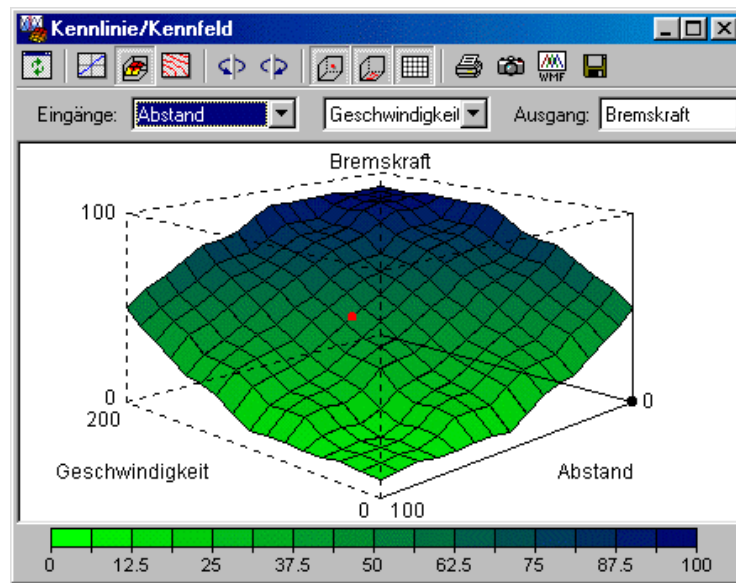
Darstellung des Systemverhaltens als Kennlinie (Eingangsgröße hier Abstand, Ausgangsgröße Bremskraft)

Ein Abspeichern der Kennlinie in Form von x-y-Wertepaaren (XY-Datei) z. B. zur Weiterverwendung im WinFACT-Modul INGO ist über die Schaltfläche  möglich.

Betriebsart **Kennfeld**



In der Betriebsart *Kennfeld* (Schaltfläche ) wird die Abhängigkeit einer System-Ausgangsgröße von zwei System-Eingangsgrößen als 3D-Kennfeld dargestellt. Besitzt das System mehr als zwei Eingangsgrößen, werden die nicht ausgewählten Eingangsgrößen auf ihrem aktuellen Wert festgehalten. Der aktuelle Arbeitspunkt wird zusätzlich als roter Punkt eingezeichnet, sofern diese Option über die Schaltfläche  aktiviert wurde.



Das Kennfeld kann über die Schaltfläche  bzw.  in 45°-Schritten gedreht werden. Wurde im Debug-Modus auch der Trace-Modus aktiviert (siehe später), so wird der Verlauf des Arbeitspunktes als Linienzug in das Kennfeld eingezeichnet, sofern diese Option über die Schaltfläche  aktiviert wurde. Ein Abspeichern des Kennfeldes als Funktionswertmatrix (FWM-Datei) z. B. zur Weiterverwendung im WinFACT-Modul INGO ist über die Schaltfläche  möglich.

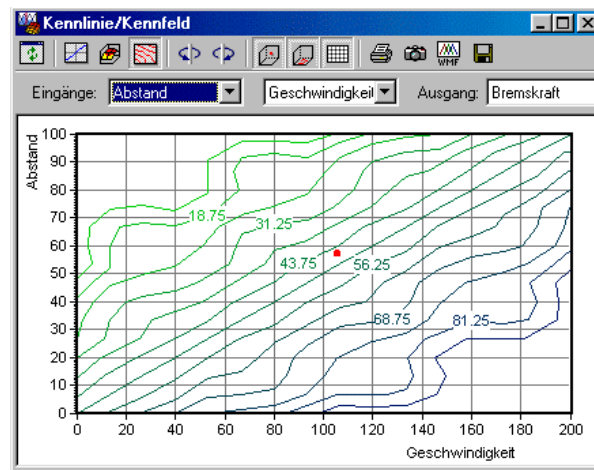


Darstellung des Systemverhaltens als 3D-Kennfeld

Betriebsart Höhenlinien

In der Betriebsart *Höhenlinien* (Schaltfläche ) wird die Abhängigkeit einer System-Ausgangsgröße von zwei System-Eingangsgrößen in Form von Höhenlinien, d. h. Linien konstanten Ausgangsgrößenwertes, dargestellt. Besitzt das System mehr als zwei Eingangsgrößen, werden die nicht ausgewählten Eingangsgrößen auf ihrem aktuellen Wert festgehalten. Der aktuelle Arbeitspunkt wird zusätzlich als roter Punkt eingezeichnet, sofern diese Option über die Schaltfläche  aktiviert wurde.

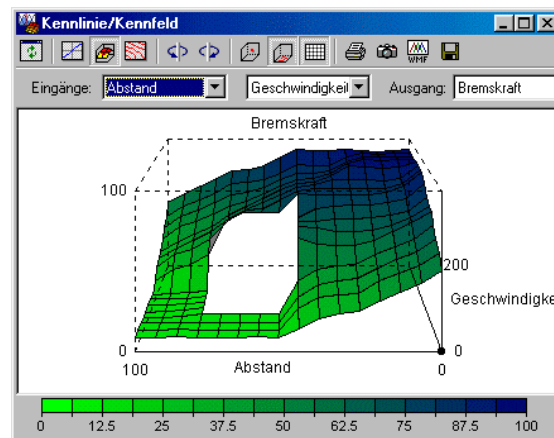
Wurde im Debug-Modus auch der Trace-Modus aktiviert (siehe später), so wird der Verlauf des Arbeitspunktes als Linienzug in die Höhenlinien eingezeichnet, sofern diese Option über die Schaltfläche  aktiviert wurde. Ein Abspeichern der Höhenlinien als Funktionswertmatrix (FWM-Datei) z. B. zur Weiterverwendung im WinFACT-Modul INGO ist über die Schaltfläche  möglich.



Darstellung des Systemverhaltens in Form von Höhenlinien



Uneindeutige Zustände


Es kann vorkommen, dass der berechnete Ausgangswert für die vorgegebenen Eingangswerte *uneindeutig* ist. Diese Uneindeutigkeit kommt immer dann zum Tragen, wenn keine Regel aktiv ist und für diesen Fall im Dialog für Inferenzmechanismus und Defuzzifizierung die Option *Alten Wert beibehalten* gewählt wurde. Derartige Bereiche von Kennlinie oder Kennfeld werden ausgespart. Ein Beispiel dafür liefert die nachfolgende Grafik.

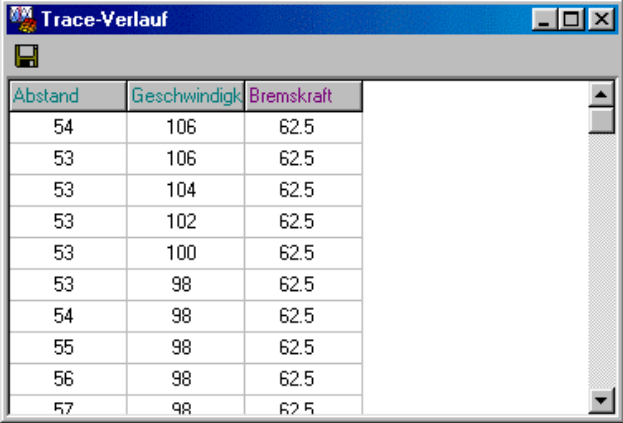


Kennfeld mit uneindeutigen Stellen

Der Trace-Modus

Als Ergänzung zum interaktiven Debug-Modus bietet FLOP einen Trace-Modus an, der über die Schaltfläche  aktiviert werden kann. Ist der Trace-Modus aktiviert, so werden nach dem Umschalten des Programms in den Debug-Modus sämtliche von diesem Moment an durchgeführten Inferenzvorgänge protokolliert, d. h. es werden bei jeder Änderung eines Eingangswertes alle Ein- und Ausgangswerte des Fuzzy-Systems "mitgeschrieben" und im Trace-Puffer gespeichert. Dieser Trace-Puffer kann jederzeit über die Schaltfläche  geleert werden (Trace-Verlauf zurücksetzen); außerdem wird er beim Verlassen des Debug-Modus automatisch geleert.

Die aufgezeichneten Werte können in einem sogenannten *Trace-Fenster* tabellarisch angezeigt und von dort aus auch abgespeichert werden (z. B. zur Weiterverarbeitung mit anderen Programmen). Das Trace-Fenster kann über die Menüoption ANSICHT | TRACE-FENSTER oder die Schaltfläche  angezeigt werden. Wird das Fenster wieder geschlossen, so gehen die darin befindlichen Daten *nicht* verloren, sondern sind nach dem erneuten Öffnen des Fensters wieder vorhanden, solange der Debug-Modus nicht verlassen wurde. Der Trace-Modus kann auch ohne weiteres mehrmals während einer Debug-Sitzung ein- und ausgeschaltet werden; die aufgezeichneten Daten werden in diesem Fall aneinander gehängt.

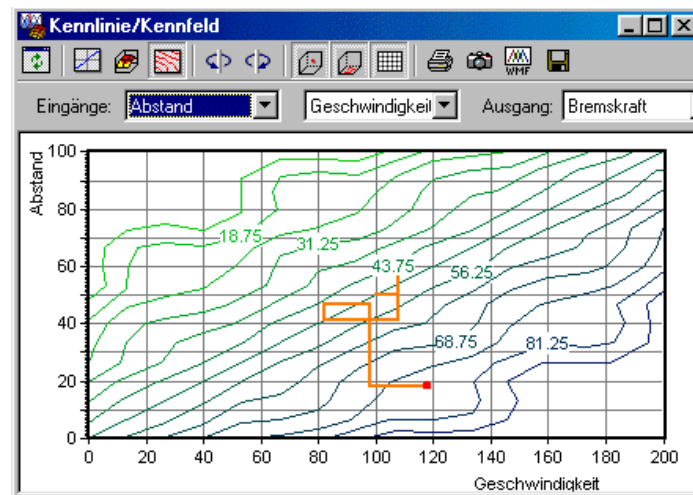
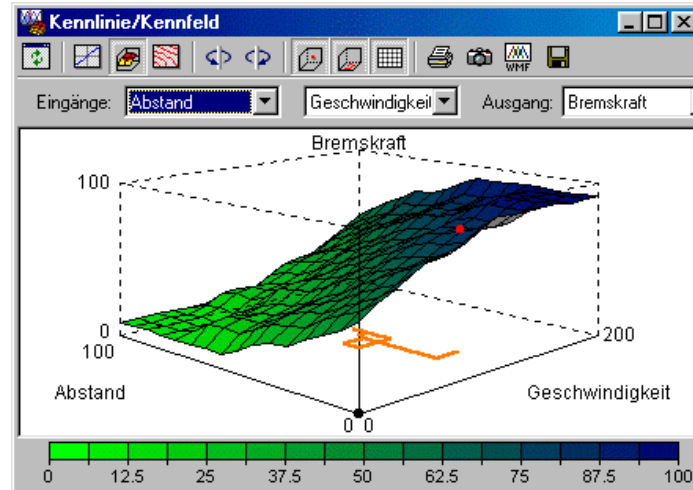


Abstand	Geschwindigkeit	Bremskraft
54	106	62.5
53	106	62.5
53	104	62.5
53	102	62.5
53	100	62.5
53	98	62.5
54	98	62.5
55	98	62.5
56	98	62.5
57	98	62.5

Trace-Fenster mit einigen aufgezeichneten Daten. Über die Schaltfläche mit dem Diskettensymbol können die Daten in einer ASCII-Datei gespeichert werden.

Der Trace-Modus ist insbesondere auch in Zusammenhang mit dem Kennlinien-/Kennfeldfenster von Interesse. Ist er nämlich aktiviert, so lässt sich der

Verlauf der System-Eingangsgrößen während einer Debug-Sitzung oder eines Teils davon als "Spur" (engl. Trace) in das Kennfeld einzeichnen. Man erhält auf diese Weise wichtige Hinweise auf den Arbeitsbereich des Systems (siehe nachfolgende Bildschirmgrafiken). Dies ist insbesondere interessant, wenn das Fuzzy-System online unter dem blockorientierten Simulationssystem BORIS eingesetzt wird (siehe später).




Kennfeldfenster mit aktivierter Trace-Anzeige im Modus 3D-Kennfeld (oben) bzw. Höhenlinien (unten)





Hinweis: Befindet sich das Programm *nicht* im Debug-Modus, so ist auch der Trace-Modus ohne Funktion!


Analyse des Systems durch Simulation

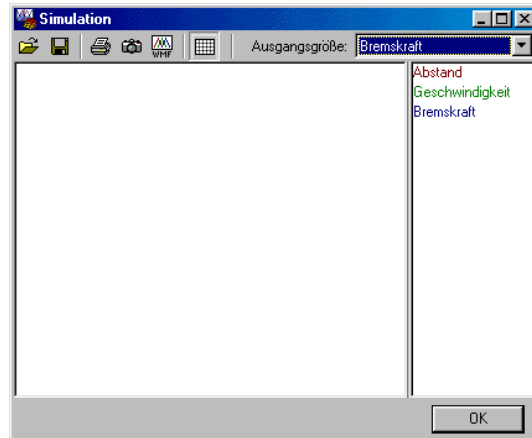
Insbesondere wenn das Fuzzy-System als Teil eines Regelungssystems (Fuzzy Controller) eingesetzt werden soll, ist es unumgänglich, sein Verhalten durch umfangreiche Simulationen (möglichst in Kombination mit der Regelstrecke) zu analysieren. Hierzu bietet die Fuzzy-Shell FLOP unterschiedliche Schnittstellen zum WinFACT-Simulationsmodul BORIS an. Für einfache Simulationen steht zusätzlich ein interner Simulator zur Verfügung, der dateibasiert arbeitet.

Nutzung des internen Simulators

Alternativ zum Einzelschritt- bzw. Kennfeldmodus kann das Übertragungsverhalten eines Fuzzy-Systems für beliebige Verläufe der Eingangsgröße(n) über die Menüfolge **I**NFERENZ | **S**IMULATION... oder die Schaltfläche  ermittelt werden. In diesem Fall werden die Eingangswerte aus einer Datei mit der Extension FSI gelesen und der resultierende Ausgangsgrößenverlauf grafisch angezeigt. Nachfolgende Grafik zeigt den zugehörigen Dialog vor dem Einlesen der Simulationsdaten. Der Dialog ermöglicht:

- ▶ Die Auswahl der darzustellenden Ausgangsgröße (Kombobox innerhalb der Fenster-Toolbar).
- ▶ Das Einlesen der Eingangswerte (Schaltfläche ). Die eingelesenen Werte werden im Anzeigefenster protokolliert. Um alle Eingangsverläufe mit der gleichen Skalierung darstellen zu können, werden diese für die Anzeige jeweils auf ihren Maximalwert normiert, sodass alle angezeigten Werte zwischen -1 und +1 liegen.
- ▶ Das Ausdrucken des Fensterinhalts (Schaltfläche ) , das Kopieren in die Zwischenablage (Schaltfläche ) oder das Exportieren im WMF-Format (Schaltfläche ).

- Das Abspeichern des Ausgangsgrößenverlaufs in einer SIM-Datei (Schaltfläche )

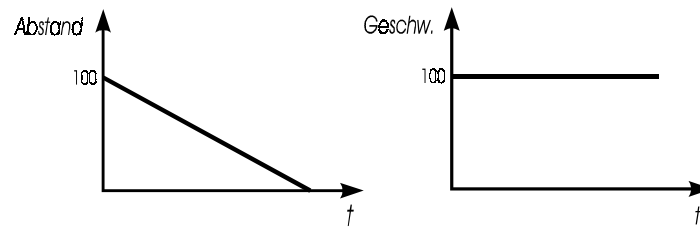


Dialog zur Simulation (vor dem Einlesen der Simulationsdaten)

Die Eingabedatei muss in jeder Zeile die Eingangswerte für einen Zeitpunkt enthalten, wobei die Einzelwerte durch ein oder mehrere Leerzeichen zu trennen sind. Eine Zeitparametrierung findet nicht statt, sodass nur die Eingangswerte selbst anzugeben sind. Bei einem System mit zwei Eingangsgrößen enthält jede Zeile somit zwei Elemente. Nachfolgende Tabelle zeigt den Beispieldatensatz *HIGHWAY.FSI* zum Fuzzy-System *HIGHWAY.FUZ*. In diesem Fall wird das Übertragungsverhalten des Fuzzy-Systems für den Fall simuliert, dass der Abstand linear von 100 auf 0 abfällt, während die Geschwindigkeit einen konstanten Wert von 100 aufweist. Nachfolgendes Bild zeigt die zugehörigen Eingangsgrößenverläufe.

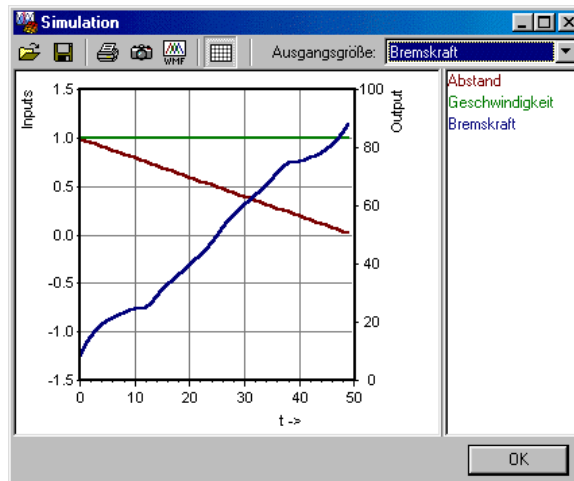
100	100
98	100
96	100
.	.
.	.
6	100
4	100
2	100

Simulationsdatensatz *HIGHWAY.FSI* (Ausschnitt)



Eingangsgrößenverläufe für Beispielsimulation

Die Simulation liefert das nachfolgend dargestellte Ergebnis.



Ergebnis der Simulation für Beispieldatensatz

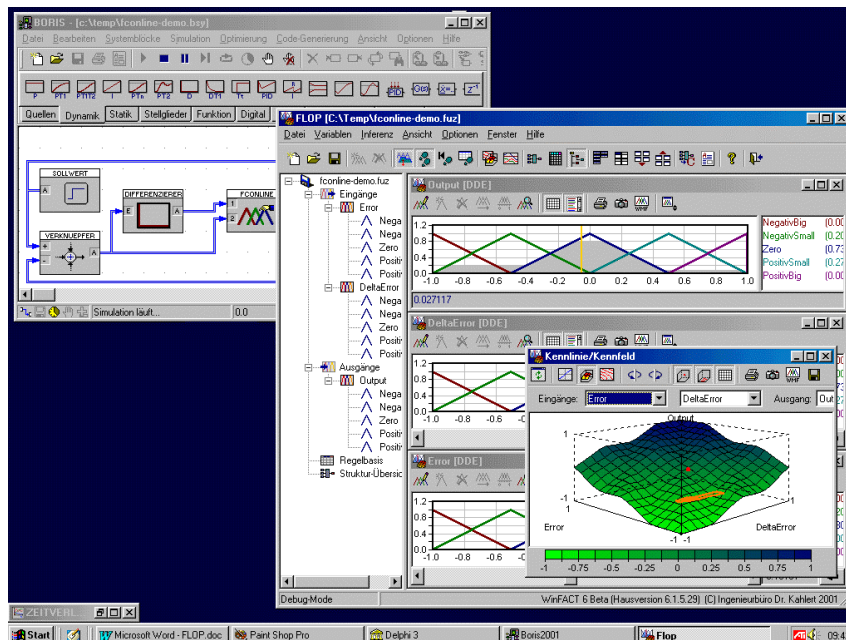
Simulation mit BORIS

Umfangreichere Simulationsuntersuchungen können auf Basis des WinFACT-Simulationsmoduls BORIS durchgeführt werden. Dieses bietet zwei unterschiedliche Blocktypen an, die jeweils auf von der Fuzzy-Shell FLOP generierte FUZ-Dateien zugreifen:

- Den Standard-Fuzzy Controller (Blocktyp *FC*), der offline quasi als reine "Recheneinheit" arbeitet. Dieser Blocktyp liest zu Beginn der Simulation die gewählte FUZ-Datei ein und errechnet dann für jeden Simulationsschritt die Block-Ausgangsgrößen. Eine Modifikation des

Fuzzy Controllers während der Simulation ist bei diesem Blocktyp *nicht* möglich.

- Den Online-Fuzzy Controller (Blocktyp *FCONLINE*). Dieser in WinFACT 6 neu eingeführte Blocktyp startet zu Simulationsbeginn automatisch die Fuzzy-Shell FLOP, lädt die gewählte FUZ-Datei und kommuniziert dann während der Simulation über *Dynamic Data Exchange* (siehe später) mit FLOP. Dadurch können sämtliche Debug- und Trace-Funktionen von FLOP während der Simulation genutzt werden; auch eine Modifikation des Fuzzy Controllers (soweit im Debug-Modus erlaubt) ist möglich. Der Debug-Modus wird beim Starten der DDE-Verbindung automatisch aktiviert. Weitere Hinweise dazu finden Sie in Kapitel 10 *Blockorientierte Simulation mit BORIS*.



Nutzung des Online-Fuzzy Controllers unter BORIS (Beispieldateien *FCONLINE-DEMO.BSY* bzw. *FCONLINE-DEMO.FUZ*): Während der Simulation wird jeder Simulationsschritt in *FLOP* protokolliert und kann z. B. im Kennfeld aufgezeichnet werden (hier mit aktiviertem Trace-Modus)

Kommunikation mit anderen Anwendungen über DDE

Die Fuzzy-Shell FLOP kann mit anderen Windows-Anwendungen über die standardisierte Schnittstelle *Dynamic Data Exchange* (DDE) Daten austauschen. Dabei kann FLOP sowohl als *DDE-Server* als auch als *DDE-Client* arbeiten.

FLOP als DDE-Server

Ein DDE-Server ist ein Programm, das anderen Anwendungen (den sogenannten *DDE-Clients*) auf deren Anfrage hin bestimmte Daten liefert oder Daten entgegen nimmt. Um die zu übertragenden Daten eindeutig zu identifizieren, ist eine DDE-Verbindung durch drei Parameter festgelegt:

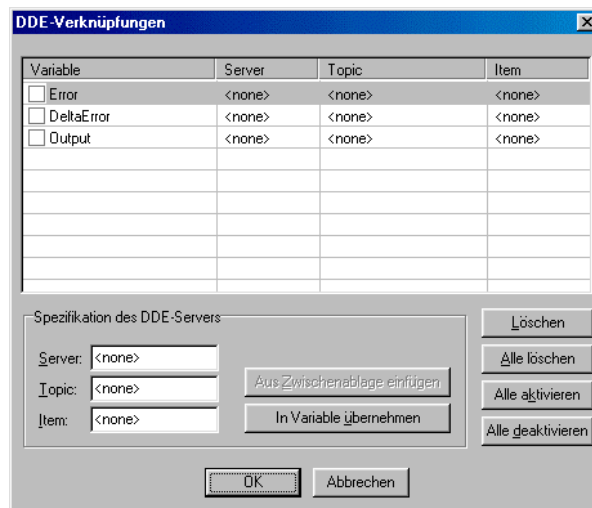
<i>Server</i>	Name des DDE-Servers. Dies ist in der Regel der Name des ausführbaren Programms ohne die Dateierweiterung EXE. Wird FLOP als DDE-Server betrieben, so ist im DDE-Client-Programm als Server daher <i>FLOP</i> anzugeben.
<i>Topic</i>	Thema der DDE-Verbindung. Wird FLOP als DDE-Server genutzt, ist dies der Name der FUZ-Datei ohne die Dateierweiterung FUZ. Außerdem sind für <i>Topic</i> nur Buchstaben, Ziffern und Unterstriche erlaubt. Enthält der Dateiname andere Zeichen (z. B. Leerzeichen oder Bindestriche), so sind diese bei der Spezifikation des Topics im DDE-Client wegzulassen.
<i>Item</i>	Zu übertragender Datenwert. In FLOP ist dies der Name der jeweils anzusprechenden linguistischen Variablen.

Mit Hilfe dieser Spezifikation kann FLOP also als "Fuzzy-Recheneinheit" benutzt werden, die von "außen" über einen DDE-Client Werte für die linguistische Eingangsvariablen erhält, daraus über die Fuzzy-Inferenz die zugehörigen Ausgangswerte ermittelt und diese auf Anfrage wieder an den DDE-Client zurückgibt. Sobald eine Anfrage von einem DDE-Client erfolgt, schaltet FLOP automatisch in den Debug-Modus. In der Titelzeile der Variablenfenster wird zusätzlich die Kennung *[DDE]* angefügt.

Der DDE-Server-Modus von FLOP wird beispielsweise von BORIS innerhalb des FCONLINE-Blocks benutzt (siehe vorangegangener Abschnitt).

FLOP als DDE-Client

Der Betrieb von FLOP als DDE-Client kann z. B. benutzt werden, um Daten mit einer Tabellenkalkulation wie EXCEL auszutauschen. EXCEL arbeitet in diesem Fall als DDE-Server. Daher muss bei dieser Betriebsart die Spezifikation von *Server*, *Topic* und *Item* innerhalb von FLOP erfolgen. Dazu dient die Menüoption **VARIABLEN | DDE-VERKNÜPFUNGEN...** Im zugehörigen Dialog kann festgelegt werden, welche der linguistischen Variablen ihre Daten mit welchen Items des DDE-Servers austauschen sollen.



Dialog zur Festlegung der Verknüpfungen für den DDE-Client-Betrieb.

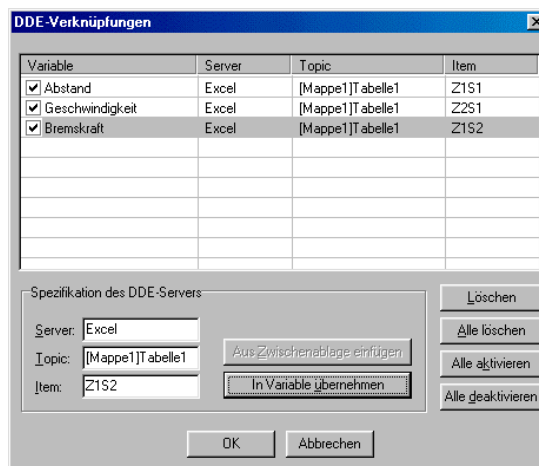
Die Liste im oberen Dialogteil enthält alle linguistische Variablen des Fuzzy-Systems. Nach Anklicken einer Variablen kann in den Editierfeldern *Server*, *Topic* und *Item* die zugehörige Verknüpfung festgelegt werden. Durch Betätigung der Schaltfläche *In Variable übernehmen* werden die Eingaben übernommen und in der Variablenliste eingetragen. Bei vielen DDE-Servern (z. B. EXCEL) kann eine Verknüpfung auch in die Windows-Zwischenablage kopiert werden (siehe unten); von dort kann sie dann über die Schaltfläche *Aus Zwischenablage einfügen* direkt in die Editierfelder übernommen werden.

Nach Definition neuer Verknüpfungen sind diese automatisch aktiviert (erkennbar am Häkchen vor der Variablen); soll das System später offline (d. h. ohne DDE-Verbindung) betrieben werden, so brauchen die Verknüpfungen nicht gelöscht zu werden, sondern es reicht aus, sie zu deaktivieren.

Im Folgenden soll anhand der Beispieldatei HIGHWAY.FUZ beispielhaft eine DDE-Verbindung zu EXCEL aufgebaut werden. Gehen Sie dazu wie folgt vor:

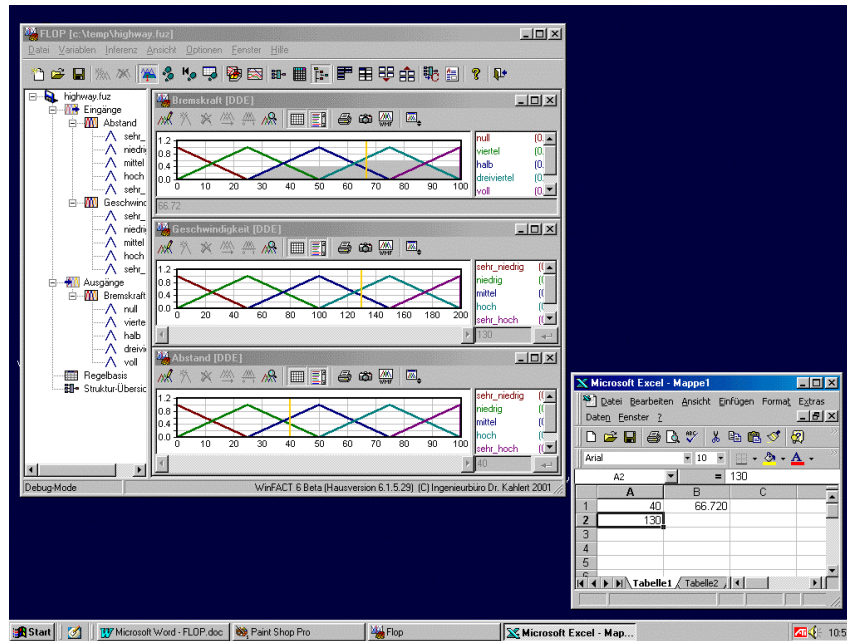
- ▶ Starten Sie FLOP und laden Sie die Beispieldatei HIGHWAY.FUZ. Wechseln Sie in den Dialog zur Spezifikation der DDE-Verknüpfungen.
- ▶ Starten Sie EXCEL.
- ▶ Klicken Sie in EXCEL die Zelle in der oberen linken Ecke des Arbeitsblattes an (A1) und wählen Sie die EXCEL-Menüoption BEARBEITEN | KOPIEREN. Die zugehörige Verknüpfung wird dadurch in die Windows-Zwischenablage kopiert.
- ▶ Klicken Sie nunmehr in FLOP im Dialog die Variable *Abstand* an und anschließend nacheinander die Schaltflächen *Aus Zwischenablage einfügen* und *In Variable übernehmen*. Die Verknüpfung wird in der Variablenliste eingetragen.
- ▶ Verknüpfen Sie auf die gleiche Weise die Variable *Geschwindigkeit* mit der EXCEL-Zelle A2 und die Variable *Bremskraft* mit der Zelle B1.

Der Dialog sollte bei korrekter Vorgehensweise nun die nachfolgenden Einträge aufweisen.



Dialog nach Spezifikation aller Verknüpfungen

Nach dem Verlassen des Dialogs "steht" die Verbindung zu EXCEL bereits und wird durch Wechsel in den Debug-Modus aktiviert. In den Zellen A1 und A2 des EXCEL-Arbeitsblattes lassen sich nun Eingangswerte für die Variablen *Abstand* und *Geschwindigkeit* eintragen; diese werden automatisch nach FLOP übertragen und im entsprechenden Variablenfenster protokolliert. Dazu berechnet FLOP unmittelbar den zugehörigen Ausgangswert für die *Bremskraft* und trägt diesen in die Zelle B1 ein (siehe nachfolgende Bildschirmgrafik). Beim Verlassen des Debug-Modus wird die DDE-Verbindung automatisch geschlossen.




FLOP als DDE-Client für die Tabellenkalkulation EXCEL

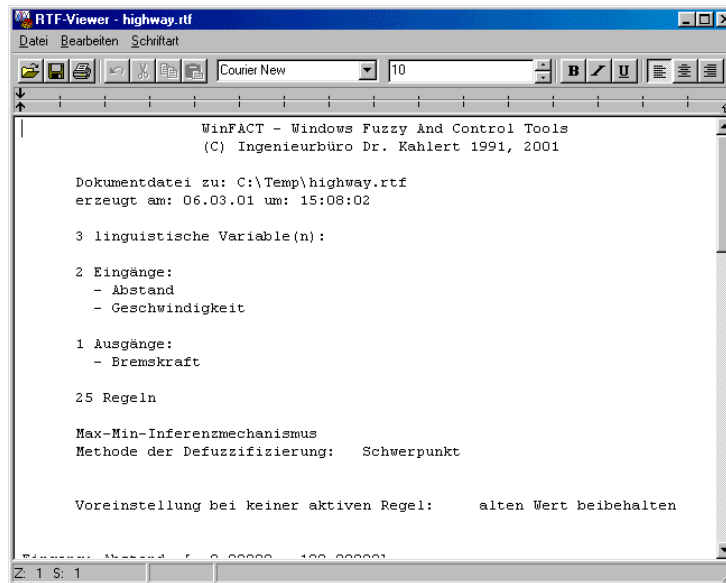
Sonstige Optionen

Generierung von C-Quellcode

Sofern der C-Quellcode-Generator FALCO verfügbar ist, kann das aktuell bearbeitete Fuzzy-System in ANSI-C-Code überführt werden. Hinweise dazu entnehmen Sie bitte Kapitel 8 *Der Fuzzy-C-Code-Generator FALCO*.

Dokumentgenerierung

Für Dokumentationszwecke kann über die Menüfolge DATEI | DOKUMENT-DATEI GENERIEREN... oder die Schaltfläche  eine Dokumentdatei im *Rich Text Format* (RTF-Datei) generiert werden. Dieses Textformat kann mit allen gängigen Textverarbeitungsprogrammen weiterverarbeitet werden. FLOP enthält jedoch bereits einen einfachen RTF-Editor (*RTF-Viewer*), sodass z. B. ein Ausdrucken der Dokumentdatei auch direkt aus FLOP heraus möglich ist. Dieser Editor wird nach dem Generieren der Dokumentdatei automatisch mit der bereits geladenen Dokumentdatei aufgerufen. Unabhängig davon kann er jederzeit über die Menüoption ANSICHT | RTF-VIEWER angezeigt werden.



RTF-Viewer mit Dokumentdatei zu HIGHWAY.FUZ

Das nachfolgende Listing zeigt die zur Datei HIGHWAY.FUZ erzeugte Dokumentdatei.

```

WinFACT - Windows Fuzzy And Control Tools
(C) Ingenieurbüro Dr. Kahlert 1991, 2001

Dokumentdatei zu: c:\temp\highway.rtf
erzeugt am: 05.03.01 um: 16:48:01

3 linguistische Variable(n):

2 Eingänge:
- Abstand
- Geschwindigkeit

1 Ausgänge:
- Bremskraft

25 Regeln

Max-Min-Inferenzmechanismus
Methode der Defuzzifizierung:  Schwerpunkt

Voreinstellung bei keiner aktiven Regel:  alten Wert beibehalten

Eingang: Abstand [ 0.00000...100.00000]
-----
Name          Form          un. Grenze  1.Knick  2.Knick  ob. Grenze

```

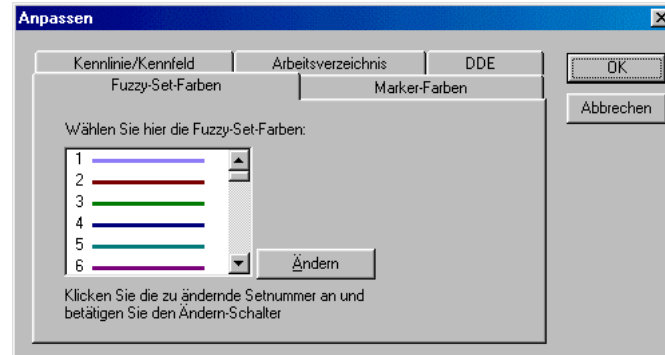

sehr_niedrig	Dreieck	0.00000	0.00000	25.00000	
niedrig	Dreieck	0.00000	25.00000	50.00000	
mittel	Dreieck	25.00000	50.00000	75.00000	
hoch	Dreieck	50.00000	75.00000	100.00000	
sehr_hoch	Dreieck	75.00000	100.00000	100.00000	
Eingang: Geschwindigkeit [0.00000...200.00000]					
Name	Form	un. Grenze	1.Knick	2.Knick	ob. Grenze
sehr_niedrig	Dreieck	0.00000	0.00000		50.00000
niedrig	Dreieck	0.00000	50.00000		100.00000
mittel	Dreieck	50.00000	100.00000		150.00000
hoch	Dreieck	100.00000	150.00000		200.00000
sehr_hoch	Dreieck	150.00000	200.00000		200.00000
Ausgang: Bremskraft [0.00000...100.00000; Default: 1.00000]					
Name	Form	un. Grenze	1.Knick	2.Knick	ob. Grenze
null	Dreieck	0.00000	0.00000		25.00000
viertel	Dreieck	0.00000	25.00000		50.00000
halb	Dreieck	25.00000	50.00000		75.00000
dreiviertel	Dreieck	50.00000	75.00000		100.00000
voll	Dreieck	75.00000	100.00000		100.00000
Regelbasis:					
Nr.	Abstand	Geschwindigkeit	=> Bremskraft	Gewichtung	
1	sehr_niedrig	sehr_niedrig	=> halb	1.00000	
2	sehr_niedrig	niedrig	=> dreiviertel	1.00000	
3	sehr_niedrig	mittel	=> voll	1.00000	
4	sehr_niedrig	hoch	=> voll	1.00000	
5	sehr_niedrig	sehr_hoch	=> voll	1.00000	
6	niedrig	sehr_niedrig	=> viertel	1.00000	
7	niedrig	niedrig	=> halb	1.00000	
8	niedrig	mittel	=> dreiviertel	1.00000	
9	niedrig	hoch	=> voll	1.00000	
10	niedrig	sehr_hoch	=> voll	1.00000	
11	mittel	sehr_niedrig	=> null	1.00000	
12	mittel	niedrig	=> viertel	1.00000	
13	mittel	mittel	=> halb	1.00000	
14	mittel	hoch	=> dreiviertel	1.00000	
15	mittel	sehr_hoch	=> voll	1.00000	
16	hoch	sehr_niedrig	=> null	1.00000	
17	hoch	niedrig	=> null	1.00000	
18	hoch	mittel	=> viertel	1.00000	
19	hoch	hoch	=> halb	1.00000	
20	hoch	sehr_hoch	=> dreiviertel	1.00000	
21	sehr_hoch	sehr_niedrig	=> null	1.00000	
22	sehr_hoch	niedrig	=> null	1.00000	
23	sehr_hoch	mittel	=> null	1.00000	
24	sehr_hoch	hoch	=> viertel	1.00000	
25	sehr_hoch	sehr_hoch	=> halb	1.00000	

Dokumentdatei zur Datei HIGHWAY.FUZ

Anpassung des Programms an Benutzerwünsche

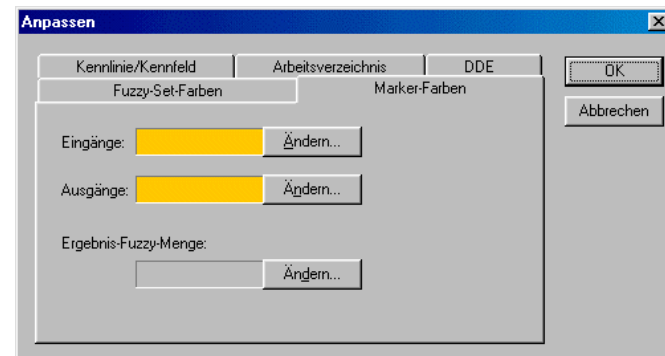
Die Menüoption OPTIONEN | ANPASSEN... führt in einen Dialog, der die Wahl einer Vielzahl von Einstellungen zur Anpassung des Programms an Benutzerwünsche erlaubt. Alle Einstellungen werden beim Verlassen des Programms in der Windows-Registry gespeichert und stehen beim erneuten Aufruf wieder zur Verfügung.

Palette *Fuzzy Set-Farben*



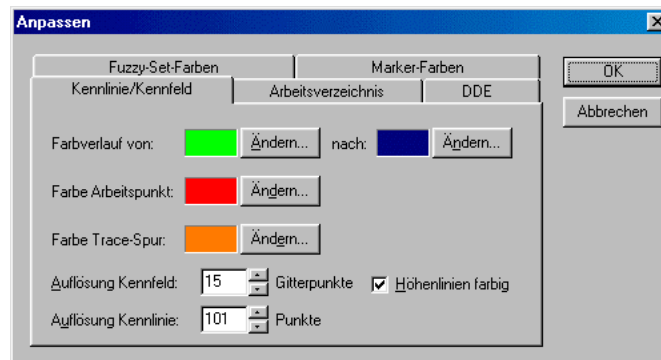
Auf dieser Palette legen Sie fest, mit welchen Farben die Fuzzy Sets innerhalb ihrer Variablenfenster gezeichnet werden.

Palette *Marker-Farben*



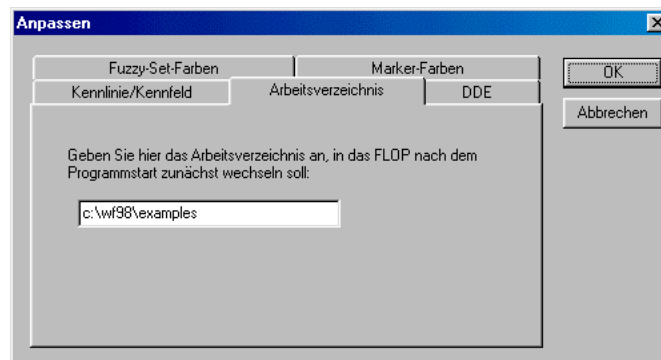
Die Einstellungen auf dieser Palette legen die Farbe der Balken (Marker) fest, mit denen die aktuellen Werte der Variablen im Debug-Modus innerhalb des Variablenfensters dargestellt werden. Der unter *Ergebnis-Fuzzy-Menge* eingestellte Farbwert bestimmt die Farbe der Schraffur der Ergebnis-Fuzzy-Menge des Inferenzvorgangs bei Ausgangsvariablen.

Palette *Kennlinie/Kennfeld*



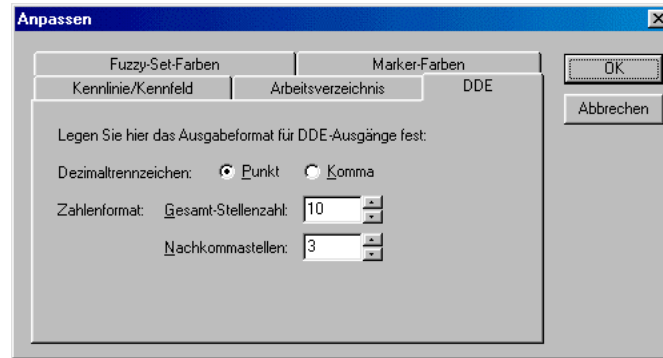
Auf dieser Palette finden Sie Einstellungen, die die Farbgebung des 3D-Kennfeldes bzw. der Höhenlinien betreffen. Außerdem kann die Auflösung von Kennfeld und Kennlinie festgelegt werden. Beachten Sie dabei, dass eine sehr hohe Auflösung der Kennfeldes bei rechenschwachen PCs zu sehr zeitintensiven Berechnungen führen kann!

Palette *Arbeitsverzeichnis*



Auf dieser Palette lässt sich bei Bedarf ein Arbeitsverzeichnis festlegen, in welches FLOP nach dem Aufruf zunächst wechselt und welches somit im *Datei öffnen*-Dialog automatisch voreingestellt erscheint.

Palette **DDE**



Diese Palette enthält einige Einstellungen, die das Format der von FLOP bei DDE-Verbindungen ausgegebenen Zahlenwerte betreffen. Hierdurch ist eine Anpassung an unterschiedliche DDE-Client- bzw. Serverprogramme möglich.