

Inferenz mit Fuzzy-Zeit-Termen

Thorsten W. SCHMIDT, Dominik HENRICH

Universität Bayreuth
Fakultät für Mathematik, Physik und Informatik
Lehrstuhl Angewandte Informatik III
D-95440 Bayreuth
E-Mail: {thorsten.w.schmidt, dominik.henrich}@uni-bayreuth.de
Http://ai3.inf.uni-bayreuth.de

1. Einleitung

1.1. Motivation

Seit vielen Jahren beschäftigt sich die Forschung mit Fuzzy-Logik und ihrer Anwendung in Fuzzy-Reglern. Seit einigen Jahren gibt es auch industriell eingesetzte Fuzzy-Regler. Diese werden zum Beispiel in Waschmaschinen oder anderen Geräten des häuslichen Gebrauchs verwendet. Die Vorteile der Fuzzy-Logik sind, dass vorhandenes Wissen über ein Regelungsprozess sehr leicht zur Modellierung eines Reglers verwendet werden kann und im weiteren Verlauf der Entwicklung und Verbesserung des Reglers dieses Wissen immer transparent bleibt und somit nicht verloren geht. Durch die klare Lesbarkeit der Fuzzy-Logik bleibt das Wissen an sich wartbar. Jedoch können diese Fuzzy-Regler nicht als Wartungssystem eingesetzt werden, da sie nicht in der Lage sind zeitliche Abhängigkeiten von Ereignissen untereinander oder überhaupt Zeit zu modellieren, wie dies beispielsweise beim Modell Checking möglich ist, welches Temporal-Logik verwendet [Karjoth87]. Aus diesem Grund ist eine Erweiterung der Fuzzy-Logik um zeitliche Aspekte nötig. In [Schmidt04] wird eine solche Erweiterung an den Prädikaten vorgenommen. Jedoch ist diese Erweiterung noch nicht komplett, denn die Zeit an sich ist scharf formuliert. Deshalb ist es die Aufgabe dieser Arbeit, eine Möglichkeit anzugeben, um nun auch die Zeit unscharf darstellen zu können und als Nebeneffekt noch die Lesbarkeit zu erhöhen. Es existieren einige Ansätze, um Zeit in Fuzzy-Logik einzubringen. In Kapitel 2 werden fünf solcher Ansätze vorgestellt.

1.2. Problemstellung

Ein Problem bei Fuzzy-Reglern ist, dass es keine sachlich motivierten Ansätze gibt, durch welche klar ersichtlich wird, wie zeitliche Aspekte in Fuzzy-Logik gehandhabt werden können. Model Checking mit temporaler Logik ist eine in sich geschlossene Methodik. Die temporalen Prädikate können zur Beschreibung von Szenarien genutzt werden um Prozesszustände mit zeitlichen Abhängigkeiten zu modellieren. Das Problem, welches in [Schmidt04] gelöst ist, beschäftigt sich damit, Prädikate der temporalen Logik in die Fuzzy-Logik zu übersetzen und zwar so, dass zum Einen die so genannte temporale Fuzzy-Logik genauso mächtig ist wie die Temporal-Logik und zum Anderen eine solide mathematische Basis geschaffen wird, so dass die Bedingungen, welche an Fuzzy-Prädikate und Zugehörigkeitsfunktionen gestellt werden auch erfüllt sind. Gesucht ist demnach die Vereinigung der Temporal-Logik und Fuzzy-Logik zur *temporalen Fuzzy-Logik*. Was jetzt noch fehlt ist die Beschreibung der Zeit anstatt in scharfen Zeitintervallen in unscharfen Fuzzy-Zeit-Termen.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels ist eine Abgrenzung zu anderen Arbeiten gegeben, während das zweite Kapitel den Stand der Forschung angibt. Das dritte Kapitel gibt die Semantik und den Syntax der Fuzzy-Zeit-Terme an. Auch wird beschrieben, wie und wo diese eingesetzt werden können. Das vierte Kapitel zeigt die Unterschiede in der Funktionsweise der Fuzzy-Regelung einmal mit normaler Fuzzy-Logik und einmal mit temporaler Fuzzy-Logik. Kapitel 5 fasst die Arbeit zusammen und beschreibt die daraus gewonnenen Schlussfolgerungen.

1.3. Abgrenzung

Ein *Überwachungssystem* ist ein von einem zu überwachenden Prozess unabhängiges System, welches diesen Prozess in seinem Verhalten mittels Sensoren überwacht. Prozesskennzahlen informieren dabei über die internen, nicht zwingenderweise bekannten, Zustände des Prozesses. Bei den Aktuatoren, ist nicht immer bekannt, welchen quantitativen Einfluss diese auf den Prozess haben, somit ist eine Steuerung des Prozesses nicht möglich. Ist jedoch der qualitative Einfluss bekannt, so kann der Prozess geregelt werden. Werden nun in dem Verhalten des Prozesses Abweichungen zu den gewünschten benutzerdefinierten Vorgaben erkannt, kann ein *Regler* in das Verhalten des Prozesses eingreifen und Parameter so verändern, dass das Verhalten des Prozesses sich dem Verhalten nähert, welches von einem Benutzer gewünscht wird [Castillo02]. Ein einfaches Beispiel für ein Überwachungssystem ist die Überwachung der Helligkeit in einem Raum. Sinkt die Helligkeit unter einen angegebenen Schwellwert, so erkennt dies das Überwachungssystem und gibt dem Prozess den Auftrag den Raum stärker zu beleuchten, indem mehr Lampen angeschaltet werden.

Ein *vorausschauendes Überwachungssystem* benutzt nicht nur aktuelle Sensordaten aus dem Prozess, sondern auch mögliche Sensordaten aus der Zukunft [Fantoni00], [Palit00]. Natürlich ist es nicht möglich diese zukünftigen Daten zu messen. Sie müssen mit geeigneten Methoden aus dem bekannten vergangenen Signalverlauf vorhergesagt werden. Werden diese zukünftigen Sensorwerte an ein Überwachungssystem gegeben, so kann dieses eine zukünftige Abweichung vom gewünschten, benutzerdefinierten Verhalten feststellen. Das Eintreten der Abweichung ist dabei nicht garantiert; sie muss nicht eintreten. Im Gegenteil, dadurch, dass dem Überwachungssystem bekannt ist, was bei den aktuellen Parameterwerten in der Zukunft passieren würde, können schon frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um ein anderes Verhalten herbei zu führen. Wenn nun im obigen Beispiel Lampen verwendet werden, welche eine lange Zeit benötigen, um ihre maximale Helligkeit zu erreichen (Neonröhren mit einem sehr hohen Wirkungsgrad: ca. 15 Minuten, Energiesparlampen: ca. 10 Minuten oder ähnliche), so genügt ein nicht vorausschauendes Überwachungssystem nicht mehr. Das vorausschauende Überwachungssystem kann jedoch feststellen, dass es im Raum immer dunkler wird. Bevor es im Raum zu dunkel ist, also die Helligkeit den angegebenen Schwellwert unterschreitet, schaltet das Überwachungssystem weitere Lampen ein.

Ein *Wartungssystem* baut meistens, nicht immer, auf einem Diagnosesystem auf [Althoff92]. Das in dieser Arbeit vorzustellende Wartungssystem baut jedoch auf einem (vorausschauenden) Überwachungssystem auf. Dann, wenn ein Überwachungssystem durch Veränderung der Prozessparameter keine Verbesserung mehr erreichen kann und sich die Prozesskennzahlen nicht innerhalb eines tolerierbaren Bereiches befinden, liegt ein *Fehler* im System vor, welcher nicht ausgeglichen werden kann. Dieser Fehler kann zum Beispiel eine defekte Teilkomponente sein, welche ersetzt werden muss. Das Wartungssystem generiert in diesem Fall einen Wartungsauftrag für einen Benutzer und teilt diesem mit, welche Teilkomponente einen Fehler verursacht haben könnte. Durch den vorausschauenden Aspekt eines Wartungssystems können Ausfälle dieser Art frühzeitig vorhergesagt und hierfür Wartungsaufträge generiert werden. Die Wartungsauf-

träge können zeitlich in der Zukunft datiert sein, da der vorhergesagte Ausfall nicht unmittelbar, sondern in der Zukunft eintritt. Das System wird so lange betrieben, wie es funktionsfähig bleibt, also seine Prozesskennzahlen in einem tolerierbaren Bereich liegen. Die Abstände zwischen verschiedenen Wartungen, bei welchen ein Bediener die Maschine anhält und sie repariert sind maximal. Dadurch, dass die Wartungsaufträge auch in der Zukunft liegen können und es so möglich ist mehrere Wartungsaufträge zu sammeln und zu einem Zeitpunkt alle Wartungsarbeiten parallel auszuführen, wird der Prozess nur einmal angehalten und somit die Standzeiten (*Wartungszeiten*) verringert. So entsteht kein außerplanmäßiger Produktionsausfall, denn die Wartungsarbeiten können eventuell zu Zeiten geringer Auslastung durchgeführt werden. Im obigen Beispiel entspricht dies dem Überwachungssystem, welches versucht den Raum durch Einschalten weiterer Lampen zu erhellen. Da aber defekte Lampen existieren, liegt die Helligkeit auch dann noch unter dem gegebenen Schwellwert, wenn alle Lampen angeschaltet sind. In diesem Fall generiert das Wartungssystem einen Wartungsauftrag, in welchem es dem Benutzer mitteilt, defekte Lampen im Raum auszutauschen. Eine andere Möglichkeit, dass ein Wartungssystem einen Wartungsauftrag generiert, ist wenn festgestellt wird, dass Lampen Anzeichen für einen baldigen Defekt aufweisen, so dass dann nicht mehr genügend Licht produziert werden kann.

Als Endziel, welches über die temporalen Fuzzy-Prädikate und Fuzzy-Zeit-Terme dieses Papers hinaus geht, möchten wir ein Wartungssystem, wie oben beschrieben entwickeln. Das Wartungssystem generiert Wartungsaufgaben für einen zu wartenden Prozess. Die Wartungsaufgaben werden dabei durch zeiterweiterte Fuzzy-Logik Regeln beschrieben. Natürlich kann das Wartungssystem auch als Überwachungssystem oder Regelungssystem verwendet werden. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf dem Wartungssystem, welches Wartungsaufträge generiert. Die automatisch generierten Wartungsaufträge sind zeitlich so geplant, dass eine möglichst ökonomische Abarbeitung ohne größere Standzeiten des Prozesses möglich ist.

2. Stand der Forschung

In der Forschungsabteilung der Firma Flender Service GmbH werden spezielle Sensoren zur Überwachung entwickelt – siehe [Flender01] und [Flender02]. Diese Sensoren dienen der Überwachung von beispielsweise Fräsmaschinen, welche Lager, Zahnräder und andere Komponenten mit hohem Verschleiß beinhalten. Zur Beobachtung der Komponenten mit hohem Verschleiß werden Schwingungssensoren verwendet, denn die Erfahrung zeigt, dass sich das Schwingungsprofil dieser Komponenten charakteristisch mit dem Erreichen des Endes der Lebensdauer verändert. Das heißt die Schwingungen werden aufgenommen, zur Steuereinheit übertragen und dort fouriertransformiert. Aus den Signalverläufen werden unter Verwendung von, mit diesen Maschinen, gesammeltem Wissen Rückschlüsse auf die weitere Lebensdauer der Komponenten gezogen, so dass diese ausgetauscht werden können bevor es zu einem Ausfall kommt. Einsetzbar ist dieses System in allen Maschinen, an welchen über Jahre hinweg der Verschleiß dieser Komponenten gemessen und protokolliert wurde. Die Einschränkung bei diesem Ansatz liegt dabei, Einzelteile einer Maschine zu beobachten, welche sich bewegen beziehungsweise hohen mechanischen Kräften ausgesetzt sind und durch diese Bewegung verschleifen, beziehungsweise durch die Kräfte ermüden. Dies stellt den Überwachungsanteil des Systems dar. Wartungsarbeiten werden vorgenommen, wenn das Überwachungssystem eine Wartungsfirma über das Internet über einen baldigen Ausfall informiert. Dies ist ein Wartungssystem, welches gezielt auf eine Aufgabe zugeschnitten ist. Unser Wartungssystem soll aber allgemeiner und flexibel einsetzbar sein. Außerdem ist unser Ansatz intuitiver und näher an der menschlichen Ausdrucksweise. Durch Verwendung von Fuzzy-Logik ist er mathema-

tisch formalisiert und dadurch nachvollziehbar. Im Folgenden werden fünf Ansätze vorgestellt, welche den Begriff der Zeit in Fuzzy-Logik einbringen.

Unter anderem in [Fick00] werden Takagi Sugeno Regeln [Takagi85] in einem Fuzzy-Regler zeitlich abhängig gemacht, indem die Zeit t als weitere Eingabevariable in den Bedingungsteil der Regeln mit aufgenommen wird. Zum Beispiel „**IF** expression **AND** $t_0 - t$ **IS** now **THEN** action“. Dies hat zur Folge, dass Regeln nur zu gewissen Zeiten feuern oder wie bei [Fick00] neu dargestellt, jede Bedingung einer Regel mit einem Zeitintervall konjunktiv verknüpft werden muss. Die Regelaktivierung wird um so höher sein, je näher der aktuelle Zeitpunkt am gegebenen Zeitpunkt liegt. Solch ein Konstrukt ist dann nützlich, wenn Regeln nur zu einer bestimmten Tageszeit feuern dürfen. Zum Beispiel „ $(t_0 - t)$ modulo Tag **IS** *Mittagszeit*“. In diesem Ansatz ist die Zeit zwar unscharf, aber es gibt keine Möglichkeit, Ereignisse untereinander auf zeitliche Abhängigkeiten zu vergleichen, da nur eine Zeitangabe pro Regel vorgesehen ist. Diese Vergleichbarkeit wird jedoch von uns für ein Wartungssystem gefordert.

In [Bovenkamp97] wird ein neuer Ansatz zum temporalen Schließen mit Fuzzy-Logik vorgestellt. So genannte Fuzzy-Zeit-Objekte werden definiert, um Unschärfe in Fakten und Zeit zu repräsentieren. Fuzzy-Zeit-Objekte sind zweistellige, einwertige Zugehörigkeitsfunktionen der Form $\mu_{f \times z}(x, t) := \min(\mu_f(x), \mu_z(t))$. Für diese Zugehörigkeitsfunktionen muss für den Fakt $\max_x \mu_f(x) = 1$ und die Zeit $\max_t \mu_z(t) = 1$ gelten.

Damit gilt auch die Separierbarkeit $\max_t \mu_z(t) = 1 \Leftrightarrow \mu_f(x) = \mu_{f \times z}(x, t) \Leftrightarrow \forall x \forall t \in \mathcal{I}$ be-

ziehungsweise $\max_x \mu_f(x) = 1 \Leftrightarrow \mu_z(t) = \mu_{f \times z}(x, t) \Leftrightarrow \forall t \forall x \in \mathcal{I}$.

Fuzzy-Zeit-Objekt genau dann wenn die Separierbarkeit gilt in Fakt und Zeit zerlegen, so dass man die ursprünglichen Fuzzy Terme $\mu_f(x)$ beziehungsweise $\mu_z(t)$ wieder erhält, ohne dass die Zeit die Unschärfe des Fakt beeinflusst. Die Beziehung zwischen Fakt und Zeit wird durch das temporales Schließen gebildet. Auch bei zeitlich oder faktisch eingeschränkten Fuzzy-Zeit-Objekten gilt dieser Zusammenhang, wobei Fuzzy-Zeit-Objekte nicht gemischt werden dürfen. Die Fuzzy-Zeit-Objekte sind nicht intuitiv verwendbar und erlauben keine **UND** beziehungsweise **ODER** Verknüpfungen von Fuzzy-Zeit-Objekten, aber es ist möglich ein Fuzzy-Zeit-Objekt in einer Folgerung zu verwenden. Dieser Ansatz reicht noch nicht ganz um unsere geforderte Mächtigkeit, beliebige Verwendung von zeitlichen Abhängigkeiten in Bedingung und Folgerung einer Fuzzy-Regel, zu erfüllen.

In [Schmidt04] wird gezeigt, dass es möglich ist, die Fuzzy-Logik mit temporalen Prädikaten so zu erweitern, dass sich daraus die so genannte *temporale Fuzzy-Logik* ergibt. Diese ermöglicht die Modellierung von zeitlichen Abhängigkeiten von Ereignissen und kann in einem Fuzzy-Regler zur Überwachung, Regelung und Wartung eingesetzt werden. Dieser Einsatz ist beispielhaft in einem Wartungsbeispiel gezeigt, in welchem ein Benutzer über defekte Lampen informiert wird. Außerdem wird im Hauptteil die mathematische Basis zu den temporalen Fuzzy-Prädikaten geschaffen. Die temporalen Fuzzy-Prädikate sind eine eins-zu-eins Abbildung der temporalen Prädikate, welche nach [Karjoth87] vollständig sind, das heißt mit ihnen können Bedingungen über den gesamten Zeitbereich erstellt werden. Somit sind die temporalen Fuzzy-Prädikate ebenfalls vollständig. Des weiteren kann deren Auswertung effizient ausgeführt werden. Es ist möglich im Bedingungsteil einer Regel **AND** beziehungsweise **OR** verknüpfte Prädikate zu verwenden. Wie die Auswirkung von den angegebenen Zeiten auf die Schlussfolgerungen sind, war zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt, denn der Einfluss der Zeitangaben der Regelbedingung auf die Regelfolgerung war noch nicht

untersucht, aber er ist dennoch zu beachten. Diese Lücke wird mit dieser Arbeit geschlossen.

In [Lamine01] wird die Lineare Temporal Logic (LTL) genutzt um zeitliche Abhängigkeiten in Programme einzubringen. Die Syntax der LTL ist ähnlich zu dem der Programmiersprache C. Die LTL ist unscharf in der Auswertung von Bedingungen, denn es wird mit Wahrscheinlichkeiten beziehungsweise Wahrscheinlichkeitsverteilungen für ihr Eintreten gerechnet. Aber es werden keine natürlichsprachlichen Konstrukte verwendet (auch keine Fuzzy-Inferenz). Somit steht die LTL also zwischen der Temporal-Logik und der Fuzzy-Logik. Die Zeit in einer Bedingung ist durch das Prädikat **always** mit dem Zeitintervall $[0, ?]$ gegeben. Das angegebene Zeitintervall steht für „von Jetzt (0) bis in alle Ewigkeit (?)“. Das vorgestellte Anwendungsgebiet, ist ein Roboter, welcher auf einem Straßennetz fährt, wobei die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für den weiteren Straßenverlauf bekannt sind. Die einzelnen Regeln werden dann dazu genutzt, um in einer Regelschleife die Programmteile zu aktivieren, welche bei den aktuell vorliegenden und vermuteten zukünftigen Bedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit das gewünschte Ergebnis liefern. Es sind UND beziehungsweise ODER Verknüpfungen von Zeitintervallen möglich, aber es wird hierzu keine Fuzzy-Logik beziehungsweise eine Inferenz darauf verwendet, da die Zeitintervalle nur darüber entscheiden, ob eine Regel überhaupt in Betracht gezogen wird.

In [Cárdenas02] wird die Fuzzy Temporal Constraint Logic (FTCL), eine Erweiterung von Prolog mit Horn-Klauseln um Fuzzy-Logik und temporale Prädikate, präsentiert. Die temporalen Prädikate **before**, **after** und **at the same time** ermöglichen es, zeitliche Abhängigkeiten von Ereignissen untereinander auszudrücken. Die Zeit ist dabei als unscharf anzusehen. Außerdem sollen alle Ereignisse, welche zu einer gegebenen Zeit eintreten, nur mit Ereignissen im gleichen Zeitintervall verglichen werden, da Relationen zu unterschiedlichen Zeiten nicht möglich sind. Ein Beispiel, welches zeigt, dass der in [Cárdenas02] vorgestellte Ansatz nicht für ein Wartungssystem verwendet werden kann, ist ein Ereignis, welches kausal von einem anderen Ereignis abhängt. Am

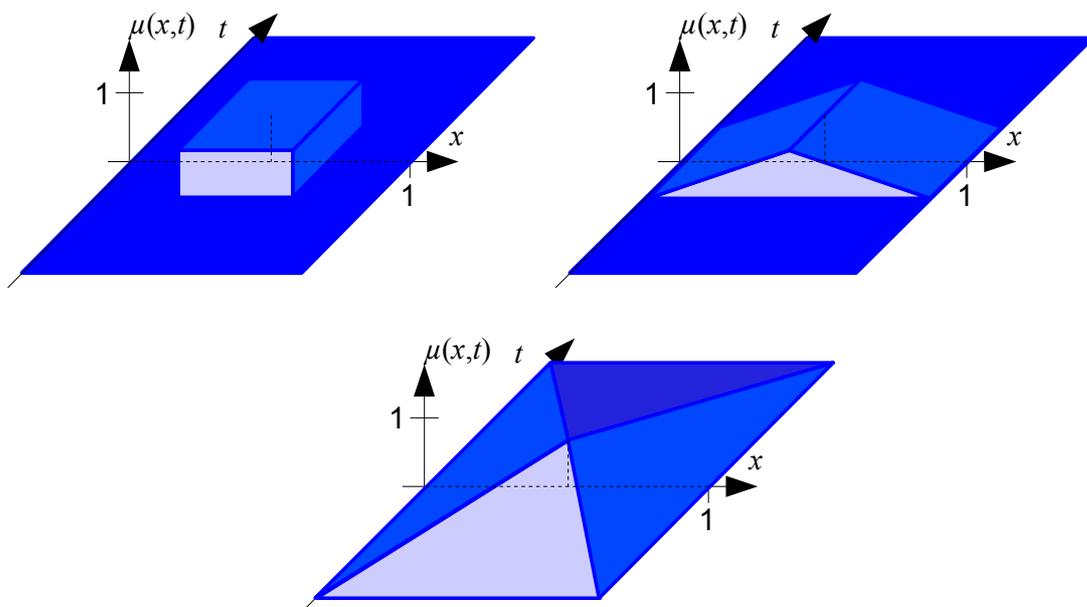


Abbildung 1: Vergleich einer scharfen und einer unscharfen Aktivierung der Funktion $\mu(x, t)$ für einen gegebenen Fakt x zu einem Zeitpunkt t . Bei der unscharfen Aktivierung ist sowohl der Fakt als auch die Zeit unscharf.

folgenden Ereignis wird dies ersichtlich: „Gestern war es heiß und heute leckt das Rohr, dann existiert heute ein Folgeschaden durch die Hitzeeinwirkung“.

Wie an den gezeigten Beispielen zu sehen ist, gehen die verwandten Arbeiten in die von uns angestrebte Richtung, Zeit, beziehungsweise zeitliche Abhängigkeiten von Bedingungen in Fuzzy-Regler einzubinden. Jedoch gibt es noch keine Lösung, welche dies anhand von der schon ausgereiften Temporal-Logik gemacht hat. Auch wurde noch kein Fuzzy-Regler zur Wartung verwendet. Dies ist durch [Giron02] ersichtlich, wo mehr als 200 Fuzzy-Regler in mehr als 20 Kategorien klassifiziert werden. Ein Fuzzy-Regler mit temporaler Fuzzy-Logik oder ein Fuzzy-Regler als Wartungssystem existieren demnach noch nicht. Diese Entwicklung ist unser Ziel, welches wir schrittweise erreichen möchten. Ein Schritt für diese Entwicklung ist die hier vorgestellte Erweiterung der Fuzzy-Logik zur temporalen Fuzzy-Logik unter Verwendung von Fuzzy-Zeit-Termen.

3. Fuzzy-Zeit-Terme

3.1. Semantik

Um Zeit in Fuzzy-Logik verwenden zu können, erweitern wir die Prädikate wie in [Schmidt04] beschrieben und erhalten so temporale Prädikate wie zum Beispiel **WILLBE** oder **WAS**. Hinzu kommt, dass wir nicht nur aufgezeichnete Sensordaten aus der Vergangenheit oder vorhergesagte Sensordaten aus der Zukunft nutzen. Wir geben auch noch die Zeiten in einer fuzzymäßigen Art an. Dies kann ähnlich wie mit Fuzzy-Termen geschehen. Nur steht dann auf der x -Achse nicht ein Fakt sondern eine Zeitangabe. Auf der y -Achse bleibt die Zugehörigkeit – in diesem Fall zu einem Zeitpunkt und nicht zu einem Fakt – stehen. Eine solche Zugehörigkeitsfunktion nennen wir Fuzzy-Zeit-Term. Zuerst betrachten wir die Semantik dieser Makros um anschließend ihre Definition anzugeben. Abbildung 1 zeigt den Vergleich einer klassischen, scharfen Zugehörigkeitsfunktion für einen Fakt x und die Zeit t und einem Fuzzy-Zeit-Term mit unscharfem Fakt x und unscharfer Zeit t . In der klassischen Variante kann die Funktion sowohl für den Fakt als auch für die Zeit nur den Wert 0 oder 1 annehmen während das unscharfe Pendant überall Werte zwischen einschließlich 0 und 1 annehmen kann.

Fuzzy-Zeit-Terme können in einer Fuzzy-Regel an drei Stellen eingesetzt werden. Zuerst neben Prädikaten im Bedingungsteil einer Regel. In der Regel werden die Prädikate je nach ihrem Verwendungszweck auf alle vorhandenen Sensordaten in der Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft angewendet. Mit einem Fuzzy-Zeit-Term kann dieser Zeitraum jedoch eingeschränkt werden. dadurch werden die Prädikate nur auf Sensordaten aus einem ausgewählten Zeitraum angewendet. Zusätzlich wird das Ergebnis des Prädikates $P(x)$ für jeden Sensorwert x zu einer gegebenen Zeit t mit dem Zugehörigkeitsgrad $\mu(t)$ des Fuzzy-Zeit-Term multipliziert. So kann ein Fuzzy-Zeit-Term auch

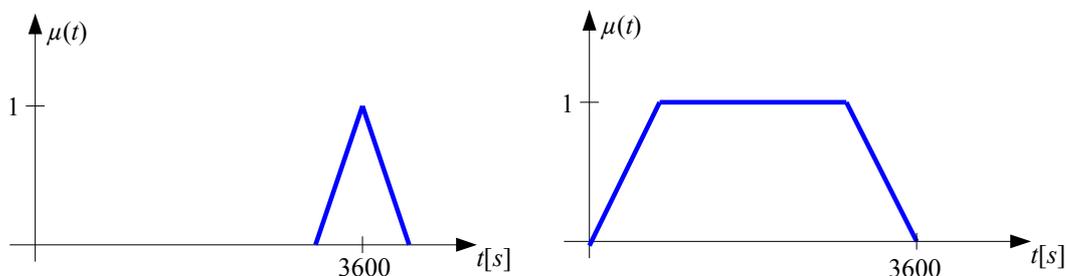


Abbildung 2: Fuzzy-Zeit-Term für das zukünftige Zeitintervall „in einer Stunde“ und „während der nächsten Stunde“. Die Zugehörigkeit nimmt jeweils an den Rändern der Intervalle linear ab.

dazu verwendet werden Sensordaten zu bestimmten Zeiten mehr oder weniger zu gewichten. Wie im Beispiel in Abbildung 2 zu sehen ist, können die Räder der Intervalle weniger gewichtet sein als deren Zentren.

Die zweite Stelle, an welcher Fuzzy-Zeit-Terme verwendet werden können, ist als alleinstehende Folgerung im Folgerungsteil einer Regel. Dort werden die Fuzzy-Zeit-Terme je nach der Regelaktivierung generiert. Daher repräsentieren sie für eine Regel den Intensitätsverlauf über die Zeit. Aus diesem Grund macht es auch nur Sinn die alleinstehenden Fuzzy-Zeit-Terme bei Regeln zu verwenden, welche in ihren Bedingungen zeitliche Prädikate verwenden. Eine Regel, welcher nur die aktuellen Sensordaten zu Grunde liegen, wird immer nur zum aktuellen Zeitpunkt feuern. Betrachten wir als Beispiel die Regel „**IF** x **WILLBE** *condition* **THEN** *time*“. Erhält man für *time* das linke Makro aus Abbildung 2, so besagt dies, dass die Regelbedingung mit den aktuellen Vorhersagen in etwa einer Stunde kurz zu 100% wahr sein wird und in etwas mehr beziehungsweise weniger als einer Stunde weniger als zu 100% wahr sein wird.

Nun kann man analog zu Ausgabevariablen, die auch als Eingabevariablen für andere Regeln verwendet werden können, auch den Intensitätsverlauf einer Regel als Eingabe einer anderen Regel verwenden.

Die dritte und letzte Stelle um Fuzzy-Zeit-Terme einzusetzen ist in dem Folgerungsteil einer Regel in Verbindung mit einem Prädikat. Zum Beispiel die Folgerung „ x_s **WILLBE** *in_one_hour low*“ setzt die Ausgabevariable für den Aktuator x_s auf *low* mit der berechneten Regelaktivierung. Aber der Wert wird nur in dem durch den Fuzzy-Zeit-Term *in_one_hour* gegebenen Zeitintervall gesetzt. Zur Berechnung wird die Regelaktivierung zu einem Zeitpunkt t mit der Zugehörigkeit $\mu(t)$ des Fuzzy-Zeit-Terms multipliziert.

Der Zeitpunkt T_0 liegt in der Zukunft, aber für den Fuzzy-Regler ist T_0 die Gegenwart. Wie in Abbildung 3 gezeigt, kann es deshalb auch Sinn machen, in den Folgerungen Fuzzy-Zeit-Terme in der Vergangenheit anzugeben. Denn wenn der Regler sich mit T_0 in der Zukunft befindet und auf vorhergesagten Daten rechnet, ist der aktuelle Zeitpunkt T des Prozesses für den Regler in der Vergangenheit. Man kann nun Einfluss auf den Prozess im Zeitintervall $[T, T_0]$ nehmen.

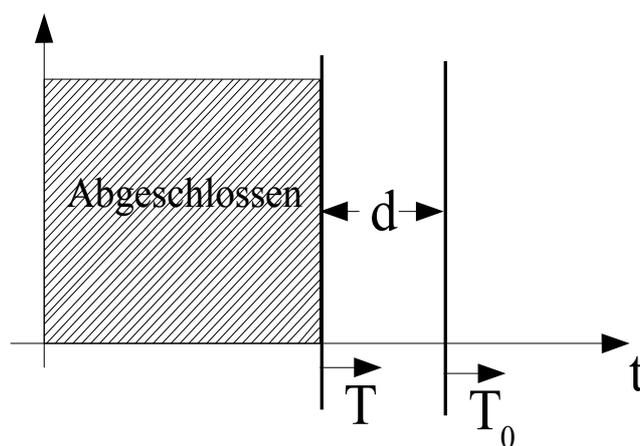


Abbildung 3: Regelung in der Zukunft zum Zeitpunkt T_0 , welcher vom aktuellen Zeitpunkt T um d in der Zukunft liegt. Dadurch kann die Regelung Ausgaben in der Vergangenheit haben, welche aber für den zu regelnden Prozess noch in der Zukunft liegen.

3.2. Syntax

Im Folgenden ist die Definition von zeitlichen Fuzzy-Termen und deren zeitlichen Zugehörigkeitsfunktionen, den sogenannten Fuzzy-Zeit-Termen gegeben. Ein zeitlicher Fuzzy-Term ist ähnlich wie ein Fuzzy-Term für einen Fakt definiert, nur ist der Fakt x durch die Zeit t ersetzt. Er ist der Einfachheit wegen ein Polygonzug mit n Stützstellen, welcher durch die Punkte (t_i, y_i) des Polygonzugs der Länge n dargestellt wird. In den meisten Fällen wird $n = 3$ oder $n = 4$ und $y_0 = y_{n-1} = 0$ gelten und so, mit dem zeitlichen Fuzzy-Term, ein gleichschenkliges Dreieck beziehungsweise ein Trapez dargestellt. Da ein Fuzzy-Term beliebig viele Stützstellen n besitzen kann, können beliebige stetige Funktionen durch lineare Interpolation approximiert werden. Ein zeitlicher Fuzzy-Term ist definiert als

$$ft = \{(t_i, y_i) | t_i < t_j, 0 \leq y_i \leq 1, i < j, 0 \leq i, j < n\}.$$

Der Fuzzy-Zeit-Term interpoliert nun die Stützstellen des zeitlichen Fuzzy-Terms ft linear und liefert so zu jedem Zeitpunkt einen Zugehörigkeitswert zwischen 0 und 1. Dabei ist die Zeit immer relativ zur aktuellen Zeit t_c angegeben. Wenn $t < 0$ ist, dann liegt der Zeitpunkt in der Vergangenheit während $t > 0$ in der Zukunft liegt. Die Gegenwart entspricht $t = 0$. Die Zugehörigkeitsfunktion eines Fuzzy-Zeit-Terms ist wie folgt definiert:

$$\mu_{ft}(t) = \begin{cases} y_i + (y_{i+1} - y_i) \cdot \frac{(t - t_i)}{(t_{i+1} - t_i)} & , t_i \leq t < t_{i+1} \\ y_0 & , t < t_0 \\ y_{n-1} & , t \geq t_{n-1} \end{cases}$$

Außer der bis jetzt vorgestellten Verwendung, können die Fuzzy-Zeit-Terme auch noch zu anderen Zwecken verwendet werden. Zum Beispiel in Verbindung mit dem im weiteren Verlauf erläuterten Prädikat **COUNT**. Mit dem Prädikat **COUNT** kann überprüft werden, wie oft ein Fuzzy-Zeit-Term aktiviert wurde. Als Anzahl der Aktivierungen zählen in diesem Falle die Peaks, welche einen definierten Schwellwert überschreiten. Wird der Schwellwert überschritten, so ist dies der Anfang eines Peaks. Wird der Schwellwert zu einem späteren Zeitpunkt wieder unterschritten, so ist dies das Ende eines Peaks. Die Anzahl der gefundenen Peaks wird dann mit einem Fuzzy-Term verglichen und die Zugehörigkeit zu diesem Fuzzy-Term gibt die Aktivierung der Bedingung an.

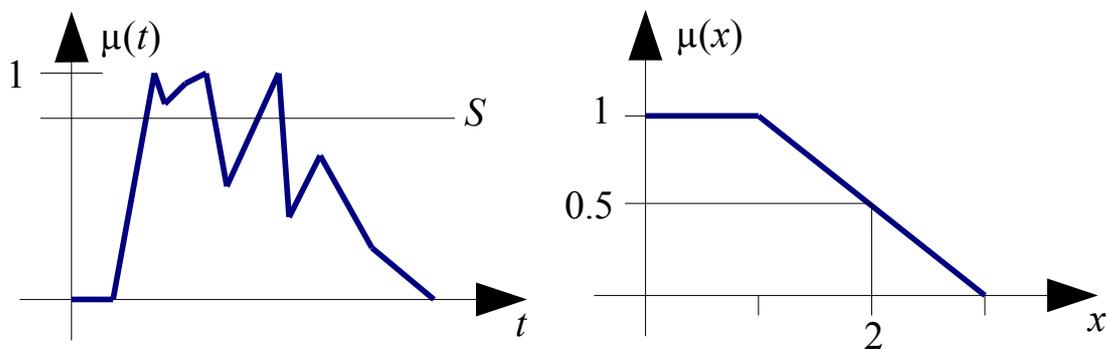


Abbildung 4: Fuzzy-Zeit-Term „time“ mit Schwellwert $S = 80\%$ und zwei Peaks (links) und Fuzzy-Term „none“ mit einer Aktivierung von 50% bei $x = 2$ (rechts).

Als Beispiel hierfür sei die Bedingung „*time COUNT none*“ gegeben. Hier werden die Peaks in *time* gezählt. Je nachdem, wie der Fuzzy-Term *none* definiert ist, wird die Aktivierung der Bedingung berechnet. In Abbildung 4 ist ein solches Beispiel gegeben. Das linke Bild zeigt ein Fuzzy-Zeit-Term, welcher in der Folgerung einer Regel gesetzt wurde. Bei einem Schwellwert von $S = 80\%$ gibt es zwei Peaks. Das Rechte Bild zeigt den Fuzzy-Term *none*. In diesem Fall ergibt sich für $x = 2$ eine Zugehörigkeit von 50%. Damit ist die Bedingung „*time COUNT none*“ zu 50% aktiviert.

4. Fuzzy-Regelung mit Fuzzy-Zeit-Termen

Dadurch, dass es in der temporalen Fuzzy-Logik möglich ist zeitliche Einschränkungen bei den Prädikaten zu verwenden, ändert sich dementsprechend auch die Art, wie die Fuzzy-Regelung durchzuführen ist. In diesem Abschnitt wird nun gezeigt, wie sich dieser Einfluss bemerkbar macht. Vergleiche hierzu Abbildung 5 und 6.

Als Beispiel dienen je zwei Regeln ohne und mit Fuzzy-Zeit-Termen. Die Regeln ohne Fuzzy-Zeit-Term sind dabei wegen der Einfachheit in der Gegenwart formuliert, während die Regeln mit Fuzzy-Zeit-Term auf Sensordaten in der Zukunft arbeiten und die Ausgabe für einen Zeitpunkt in der Zukunft berechnen.

Erster Fall, Regeln ohne Fuzzy-Zeit-Terme

IF a **IS** *dunkel* **THEN** $N_s = \textit{wenig}$

IF d **IS** *hell* **THEN** $N_s = \textit{viel}$

und zweiter Fall, Regeln mit Fuzzy-Zeit-Termen

IF a **WILLBE** *in_einer_stunde dunkel* **THEN** N_s **WILLBE** *in_einer_stunde wenig*

IF d **WILLBE** *nächste_stunde hell* **THEN** N_s **WILLBE** *nächste_stunde viel*

Abbildung 5 zeigt die Fuzzifizierung der zwei Variablen a und d während Abbildung 6 die Fuzzifizierung der Variablen a und d mit Fuzzy-Zeit-Termen zeigt. Im ersten Fall interessieren wir uns wie dunkel a beziehungsweise wie hell d zum aktuellen Zeitpunkt sind. Im letzteren Fall sind wir jedoch nur daran interessiert, wie a und d in einer Stunde beziehungsweise in der nächsten Stunde sein werden. Im Beispiel ist a zu etwa 50% *dunkel* beziehungsweise wird a in einer Stunde zu 25% *dunkel* sein. die Variable d dagegen ist aktuell zu 25% *hell* und wird während der nächsten Stunde zu 50% *hell* sein.

Die Inferenz berechnet aus den Aktivierungen der Bedingungen einer Regel die Regelaktivierung, und daraus die Aktivierungen der Ausgabevariablen. Ob nun Fuzzy-Zeit-Terme verwendet werden oder nicht spielt für das Ergebnis keinerlei Rolle bei der Inferenz. Aus diesem Grund beinhaltet das Beispiel auch keine Und- (\wedge) beziehungsweise Oder-Verknüpfungen (\vee). Da die Regeln jeweils nur eine Bedingung beinhalten, entsprechen die Prozentangaben der oben genannten Aktivierungen auch den Regelaktivierungen. Das heißt im ersten Fall ist *wenig* zu 50% und *viel* zu 25% aktiviert. Im zweiten Fall dagegen ist *wenig* zu 25% und *viel* zu 50% aktiviert. Zu beachten ist jedoch, dass wir uns zu jeder Regel merken, wann diese wie stark aktiviert wurde.

Die Komposition berechnet für jede Ausgabevariable – hier gibt es nur eine mit dem Namen N_s – eine Zugehörigkeitsfunktion je nachdem wie stark die einzelnen Fuzzy-Terme aktiviert sind. Im ersten Fall erhalten wir eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu(N)$, welche nur vom Fakt N abhängt, während wir im zweiten Fall eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu(N, t)$ erhalten, welche neben dem Fakt N auch noch von der Zeit t abhängt.

Für die Defuzzifizierung nutzen wir die weit verbreitete Schwerpunktmethodene aus [Watanabe86]. So berechnet sich im ersten Fall die Ausgabe N_s durch ermitteln des Schwer-

IF a IS *dunkel* THEN $N_s = \text{wenig}$
 IF d IS *hell* THEN $N_s = \text{viel}$

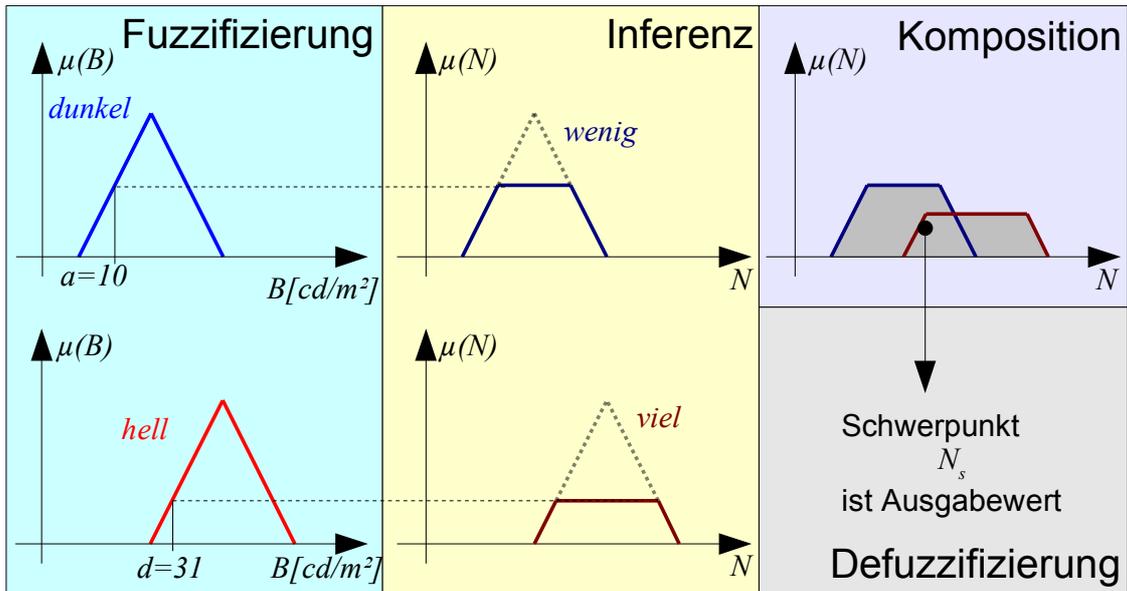


Abbildung 5: Beispiel für zwei Regeln mit zwei Eingabevariablen a und d und einer Ausgabevariable N_s . Die Variablen werden fuzzifiziert und die Regeln über die Inferenz beziehungsweise die Komposition ausgewertet um anschließend durch die Defuzzifizierung den Ausgabewert N_s zu erhalten. Die Eingabevariablen sind auf $a = 10$ und $d = 31$ gesetzt.

IF a WILLBE in_einer_stunde *dunkel* THEN N_s WILLBE in_einer_stunde *wenig*
 IF d WILLBE nächste_stunde *hell* THEN N_s WILLBE nächste_stunde *viel*

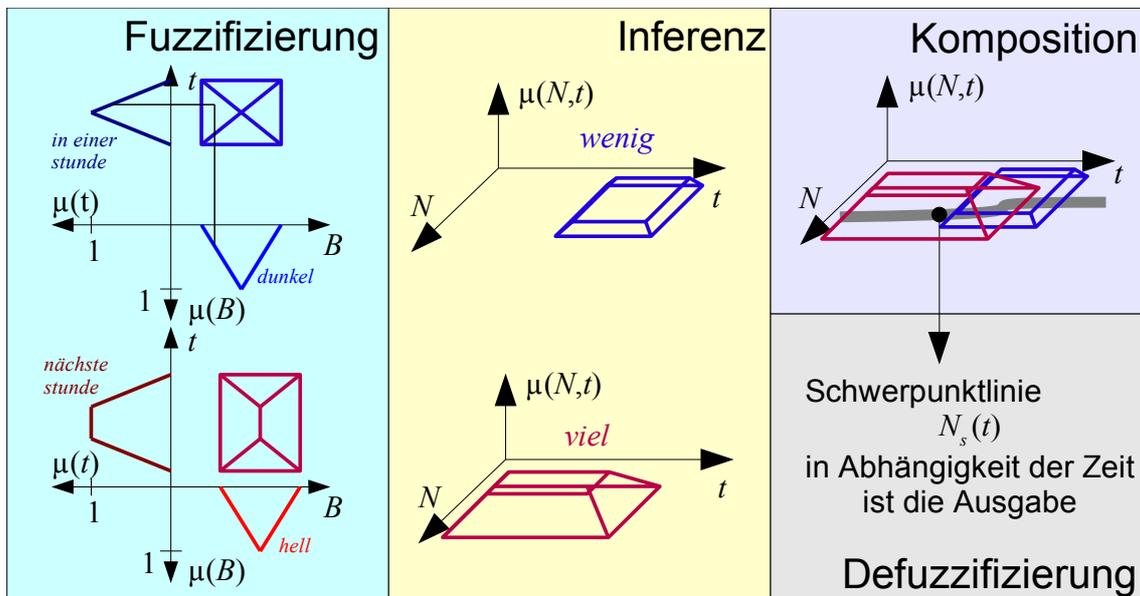


Abbildung 6: Beispiel für zwei temporale Regeln mit zwei Eingabevariablen a und d und einer Ausgabefunktion $N_s(t)$. Die Variablen werden fuzzifiziert und die Regeln über die Inferenz beziehungsweise die Komposition ausgewertet um anschließend durch die Defuzzifizierung die Ausgabefunktion $N_s(t)$ zu erhalten. Die Eingabevariablen sind über dem gesamten Zeitraum auf die konstanten Werte $a(t) = 10$ und $d(t) = 31$ gesetzt.

punktes der Zugehörigkeitsfunktion $\mu(N)$. Im zweiten Fall wird nicht etwa der Schwerpunkt der Funktion $\mu(N, t)$ bestimmt, denn dann würde das Ergebnis ein Skalar und nicht mehr abhängig von der Zeit sein. Vielmehr wird für jeden Zeitpunkt t_i der Schwerpunkt $N_s(t_i)$ aus der Zugehörigkeitsfunktion $\mu(N, t) | t = t_i$ berechnet. So erhält man die Schwerpunktsgerade $N_s(t)$, welche zu jedem Zeitpunkt einen Ausgabewert liefert. So kann zum Beispiel zum aktuellen Zeitpunkt schon das Regelverhalten für die Zukunft festgelegt werden.

5. Schlussfolgerung

Wir haben gezeigt, dass die in [Schmidt04] vorgestellten temporalen Fuzzy-Prädikate in Verbindung mit den hier vorgestellten Fuzzy-Zeit-Termen eine Entwicklung ist, welche die Formulierung der Bedingungen in Fuzzy-Regeln noch natürlichsprachlicher macht. Dadurch wird nicht nur das Übersetzen von Expertenwissen nach temporaler Fuzzy-Logik einfacher, auch wird die temporale Fuzzy-Logik wartbarer da sie weniger kryptisch ist.

Es gibt zwischen dem hier vorgestellten Modell und dem aus [Schmidt04] noch weitere Unterschiede. Um diese anzugeben, betrachten wir die erste Bedingung „ x **WILLBE** [3550, 3650] *low*“ mit einem Intervall für die Zeitangabe im Vergleich zu der zweiten Bedingung „ x **WILLBE** *in_one_hour low*“ mit einem Fuzzy-Zeit-Term.

Erstere Bedingung liest sich deutlich schwerer als die Zweite, denn man muss wissen, ob die Angabe der Zeit in Sekunden oder einer anderen Einheit ist. Durch das Verwenden eines natürlichsprachlichen Makros ist dies jedoch sofort klar. Auch widersprechen die Zeitangaben durch ein scharf begrenztes Intervall dem Wesen der Fuzzy-Logik. Es handelt sich dabei nämlich um eine scharfe Zeitangabe. Dagegen ist die Zeitangabe über ein Fuzzy-Zeit-Term unscharf. Die Intervallgrenzen verwischen dabei genauso wie bei den unscharfen Fuzzy-Termen, welche auch durch Zugehörigkeitsfunktionen beschrieben werden.

Des weiteren können mit den Fuzzy-Zeit-Termen auch die Zeiten protokolliert werden, zu welchen eine Regel mit den aufgezeichneten und vorhergesagten Sensordaten feuert. Diese protokollierten Zeiten können dann verwendet werden um das Aktivierungsprofil von anderen Bedingungen zu beeinflussen.

6. Literatur

- [Althoff92] K.-D. Althoff, *Eine fallbasierte Lernkomponente als integrierter Bestandteil der MOLTKE-Werkbank zur Diagnose technischer Systeme*, Dissertation, Kaiserslautern, September 1992
- [Bothe95] H.-H. Bothe, *Fuzzy-Logik – Einführung in Theorie und Anwendungen*, Springer-Lehrbuch, 2. Auflage, Berlin Heidelberg, 1995
- [Bovenkamp98] E. G. P. Bovenkamp, J. C. A. Lubbe, *Temporal Reasoning with Fuzzy-Time-Objects*, 4th International Workshop on Temporal Representation and Reasoning, Daytona Beach, Florida, May 10-11, 1997
- [Cárdenas02] M. A. Cárdenas Viedma, R. Martín Morales, *Syntax and Semantics for a Fuzzy Temporal Constraint Logic*, Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, Volume 36, 2002
- [Castillo02] O. Castillo, P. Melin, *A New Approach For Plant Monitoring Using Type-2 Fuzzy Logic and Fractal Theory*, Proceedings of the 5th International FLINS Conference, Belgium, Belgium, September 2002
- [Fantoni00] P.F. Fantoni, M. Hoffmann, B. H. Nystad, *Integration of sensor validation in modern control room alarm systems*, Proceedings of the 4th International FLINS Conference, Belgium, August 2000

- [Fick00] A. Fick, H. B. Keller, *Modellierung des Verhaltens Dynamischer Systeme mit erweiterten Fuzzyregeln*, Proceedings 10. Workshop Fuzzy Control des GMA-FA 5.22, Dortmund, Germany, 18. - 20. Oktober 2000
- [Flender02] Flender Service GmbH, *Condition Monitoring for the highest Availability of Power Technology*, http://www.flender-cm.de/images/pdf-files/Leistungskurzbeschreibung_GB.pdf, Juni 2002
- [Giron02] J. M. Giron-Sierra, G. Ortega, *A Survey of Stability of Fuzzy Logic Control with Aerospace Applications*, IFAC Proceedings of the 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002
- [Haslum01] P. Haslum, *Models for Prediction*, IJCAI 2001 workshop on Planning under Uncertainty
- [IEC97] IEC TC65/WG 7/TF8, *Fuzzy Control Programming*, International Technical Electrical Commission (IEC), 1997
- [Karjoth87] G. Karjoth, *Prozeßalgebra und temporale Logik – angewandt zur Spezifikation und Analyse von komplexen Protokollen*, Diss. Mathematik/Informatik, Universität Stuttgart, 1987
- [Lamine01] K. B. Lamine, F. Kabanza, *Reasoning About Robot Actions: A Model Checking Approach*, Revised Papers from the International Seminar on Advances in Plan-Based Control of Robotic Agents, Springer Verlag, 2001
- [Palit00] A. K. Palit, *Artificial Intelligent Approaches to Times Series Forecasting*, Dissertation, Bremen, Januar 2000
- [Schmidt04] T. W. Schmidt, D. Henrich, *Temporal erweiterte Prädikate der Fuzzy-Logik zur Überwachung und Wartung*, Proceedings 14. Workshop Fuzzy Control des GMA-FA 5.22, Dortmund, Germany, 10. - 12. November 2004
- [Škrjanc02] I. Škrjanc, D. Matko, *Fuzzy Predictive Functional Control in the State Space Domain*, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Kluwer Academic Publishers, 2002
- [Takagi85] T. Takagi, M. Suego, *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 15, No. 1, pp. 116-132, 1985.
- [Watanabe86] H. Watanabe, *Schwerpunktmethode*