

# Fuzzy-Logik und Fuzzy Control - Begriffe und Definitionen

R. Mikut, S. Böhlmann, B. Cuno, J. Jäkel, A. Kroll,  
T. Rauschenbach, B.-M. Pfeiffer, T. Slawinski

Kontakt: Forschungszentrum Karlsruhe  
Institut für Angewandte Informatik  
D-76021 Karlsruhe, Postfach 3640  
Tel.: (07247) 82-5731 Fax: (07247) 82-5785  
Email: mikut@iai.fzk.de

## 1 Vorbemerkungen

Fuzzy-Logik und Fuzzy Control haben in den letzten Jahren in der industriellen Praxis immer größere Bedeutung gewonnen. Die Motivation für den Einsatz von Fuzzy-Logik besteht darin, regelbasiertes Expertenwissen direkt in automatisierungstechnische Lösungen zu integrieren sowie automatisch generiertes Wissen für den Experten transparent aufzubereiten. Dabei existieren viele Arbeiten und Anwendungen zum Einsatz der Fuzzy-Logik in den Bereichen Regelung, Identifikation, Klassifikation und Expertensysteme.

Um in diesem Wissensgebiet die Verwendung der Begriffe zu vereinheitlichen, möchte der GMA-Fachausschuß 5.22 "Fuzzy Control" der VDI/VDE-GMA eine Richtlinie zusammenstellen, die gemeinsam mit den noch entstehenden Arbeiten des GMA-Fachausschusses 5.21 zu den Themen Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen als VDI-Richtlinie "Computational Intelligence" erscheinen soll. Sie enthält Begriffe und Definitionen, stellt englische Fachbegriffe zusammen, gibt in zwei Anhängen die Berechnungsvorschriften für wichtige Fuzzy-Operatoren und Defuzzifizierungsmethoden an und weist auf weiterführende Literatur hin [1-15]. Dabei besteht das Ziel darin, möglichst für jeden Anwender allgemeinverständliche Erklärungen wichtiger Begriffe zu geben, ohne hier die letzte mathematische Korrektheit anzustreben.

Die hier vorliegende Arbeit stellt einen Entwurf für diese Richtlinie dar. Sie berücksichtigt die deutsche Fassung des europäischen Normentwurfs prEN 61131-7 [16], der sich in erster Linie auf die Anwendung von Fuzzy Control in speicherprogrammierbaren Steuerungen bezieht (prEN = project European Norm). Dieser Normentwurf ist die übersetzte, aber ansonsten unveränderte Fassung des internationalen Normentwurfs IEC 65B/368/CDV [17] (CDV - Committee Draft for Voting), der als IEC 61131-7 der Internationalen Elektrotechnischen Kommission IEC erscheinen soll. Dabei handelt es sich um die Norm IEC 66131 ("Programmable Controllers"), wobei im Vergleich zur bekannteren Bezeichnung IEC 1131 nur seit 1997 die Numerierung geändert wurde. Diese Normen sollen bei erfolgreicher Abstimmung ca. im September 2000 in Kraft treten.

In der hier vorgeschlagenen Richtlinie werden ausgewählte Begriffe aus den Gebieten theoretische Grundlagen der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelungen und Fuzzy-Klassifikation zusammengestellt, die in den genannten Normentwürfen nicht diskutiert werden, und einige im Normentwurf enthaltene Begriffe präzisiert.

Dieser Entwurf wurde von einer Arbeitsgruppe des Fachausschusses 5.22 erarbeitet, der folgende Damen und Herren angehörten: Dr. Sybille Böhlmann, TU Dresden; Prof. Dr. Bernd Cuno, FH Fulda; Dr. Jens Jäkel, Forschungszentrum Karlsruhe; Dr. Andreas Kroll, ABB Forschungszentrum Heidelberg; Dr. Ralf Mikut, Forschungszentrum Karlsruhe; Dr. Bernd-Markus Pfeiffer, Siemens AG; Dr. Thomas Rauschenbach, TU Ilmenau und Dipl.-Phys. Timo Slawinski, Universität Dortmund.

Die Autoren danken allen Mitgliedern des Fachausschusses, insbesondere Prof. Dr. Harro Kiendl, Prof. Dr. Georg Bretthauer, Prof. Jürgen Wernstedt, Dr. Niels Kiupel, Dipl.-Ing. Sven Rebeschies und Dipl.-Ing. Klaus Schmid, für viele wertvolle Hinweise. Eine wichtige Hilfe war die frühere Übersichtsarbeit des GMA-FA "Fuzzy Control" [18], die allerdings mit dem Normentwurf [16] nicht mehr kompatibel ist.

Das Ziel dieses Beitrages ist,

- eine Diskussionsgrundlage für diese Richtlinie vorzustellen und
- eine (evtl. modifizierte) Version auf dem GMA-Workshop in Dortmund zu verabschieden und an den VDE weiterleiten zu können.

## 2 Begriffe und Definitionen

### A

**Adaption:** im allgemeinen feststehendes Lernverfahren zum Anpassen von Parametern und/oder Strukturen von Modellen/Steuereinrichtungen an den realen Prozeß unter Verwendung von Daten (Signalen, Situationen) und Gütekriterien. Die Adaption kann online, off-line, kontinuierlich, diskontinuierlich oder situationsabhängig erfolgen.

**Aggregation:** → Prämissenauswertung

**Akkumulation:** Zusammenfassen der Zugehörigkeitsgrade der Konklusionen aller linguistischen Regeln zu einer Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße

**Aktivierung:** Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades der Konklusion einer linguistischen Regel aus dem Zugehörigkeitsgrad der Prämisse und einem eventuell vorhandenen → Wichtungsfaktor, Synonym Komposition

**Alpha-Cut:** → Alpha-Schnitt

**Alpha-Schnitt:** Teil des Definitionsbereiches einer Zugehörigkeitsfunktion, in dem sie Werte größer alpha (z.B. 0.5) annimmt, Synonym Alpha-Cut

### B

**Bedingung:** → Prämisse

### C

**Center-of-Area-Defuzzifizierung (COA):** → Flächenmedianmethode

**Center-of-Gravity-Defuzzifizierung (COG):** → Schwerpunktmethode

**Center-of-Maxima-Defuzzifizierung (COM):** → Vereinfachte Schwerpunktmethode

**Center-of-Singletons-Defuzzifizierung (COS):** → Schwerpunktmethode für Singletons

**Clusteranalyse, Clusterung:** Verfahren, die Daten auf der Basis eines Ähnlichkeits- oder Distanzmaßes gruppieren. In der Fuzzy-Logik Hilfsmittel zum datengestützten Entwurf von Fuzzy-Regeln und zur Festlegung von Fuzzy-Mengen

**COA:** Center-of-Area-Defuzzifizierung, → Flächenmedianmethode

**COG:** Center-of-Gravity-Defuzzifizierung, → Schwerpunktmethod

**COGS:** → COS

**COM:** Center-of-Maxima-Defuzzifizierung, → Vereinfachte Schwerpunktmethod

**COS:** Center-of-Singletons-Defuzzifizierung, → Schwerpunktmethod für Singletons

## D

**Defuzzifizierung:** Umwandlung einer Fuzzy-Menge in eine numerische Ausgangsgröße (z.B. in eine Stellgröße). Wichtige Defuzzifizierungsmethoden sind in Anhang 2 angegeben.

**Disjunktion:** logische ODER-Verknüpfung

Anm.: Die entsprechende Operation für Mengen ist die Bildung der Vereinigungsmenge. Die Verallgemeinerung der Disjunktion in der Fuzzy-Logik ist die s-Norm.

**Drehmomentmethode:** Defuzzifizierungsmethod zur verstärkenden Überlagerung gleichsinniger Konklusionen.

Anm.: Dieser Algorithmus ist vorteilhaft, wenn ausgewählte Regeln andere Regeln nur ergänzen und nicht als unabhängige Regeln zu betrachten sind.

## E

**Einer-Menge:** → Singleton

**Erfüllungsgrad:** → Zugehörigkeitsgrad

**Erweiterte Schwerpunktmethod:** Defuzzifizierungsmethod, bei der vor Anwendung der Schwerpunktmethod die Terme am Rand des Definitionsbereiches so modifiziert werden, daß alle Werte aus dem Definitionsbereich im Ergebnis der Defuzzifizierung auftreten können

**Erweiterungsprinzip:** Prinzip, bei dem eine Fuzzy-Menge der Ausgangsgröße  $y$  aus den Fuzzy-Mengen einer  $n$ -dimensionalen Eingangsgröße  $x$  und einer Funktion  $y = f(x)$  berechnet wird.

Anm.: Dabei wird jeder mögliche Funktionswert der Konklusion  $y$  berechnet und mit einem Zugehörigkeitswert versehen, der sich aus der Erfülltheit der Bedingungen  $x$  ergibt (durch Verknüpfung der Zugehörigkeitswerte der  $n$  Eingangsgrößen mit einer  $t$ -Norm).

## F

**FCL:** → Fuzzy Control Sprache

**Flächenmedianmethod:** Defuzzifizierungsmethod, welche die numerische Ausgangsgröße so aus der Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge ermittelt, daß der Flächeninhalt der Zugehörigkeitsfunktion auf beiden Seiten des numerischen Wertes gleich ist, Synonym COA

**Flächenschwerpunktmethode:** → Flächenmedianmethode

**funktionales Fuzzy-System:** → Fuzzy-System vom Takagi-Sugeno-Typ

**Fuzzifizierung:** Umwandlung einer numerischen Größe in Zugehörigkeitsgrade zu linguistischen Termen einer linguistischen Variablen

**Fuzzy Control:** → Fuzzy-Regelung, Fuzzy-Steuerung

**Fuzzy Control Sprache:** international genormte Sprache (IEC 61131-7) für die Implementierung von Fuzzy-Logik in speicherprogrammierbaren Steuerungen, die auf den Sprachen Funktionsbaustein (FBS) und Strukturierter Text (ST) aufbaut. Dabei existieren eine Basisebene mit vorgeschriebenen Eigenschaften, eine Erweiterungsebene mit optionalen Eigenschaften und eine offene Ebene. Synonym FCL

**Fuzzy-adaptiver PID-Regler:** konventioneller PID-Regler, dessen Reglerparameter durch ein Fuzzy-System der aktuellen Prozeßsituation angepaßt werden

**Fuzzy-C-Means:** Verfahren der → Fuzzy-Clusterung als Verallgemeinerung des → K-Means-Verfahrens mit einem durch Klassenzugehörigkeitswerte modifizierten Clusterkriterium

**Fuzzy-Clusterung:** Verallgemeinerung der → Clusteranalyse, bei der für jedes Objekt, das durch seine Merkmale gekennzeichnet ist, Zugehörigkeitswerte zwischen Null und Eins zu allen Klassen ermittelt werden. Die Zugehörigkeitswerte sind um so größer, je geringer der Abstand zum Referenzpunkt der jeweiligen Klasse ist. Dabei können unterschiedliche Abstandsmaße (z.B. euklidischer Abstand) und Referenzpunkte (z.B. Klassenmittelpunkt) verwendet werden.

Anm.: Im Unterschied zur → Fuzzy-Klassifikation sind dabei die Klassen nicht a-priori vorgegeben und werden erst während der Fuzzy-Clusterung ermittelt (unüberwachtes Lernen).

**Fuzzy-Informationssystem:** → Standard-Fuzzy-Partition

**Fuzzy-Klassifikation:** Verallgemeinerung der Klassifikation, bei der für jedes Objekt, das durch seine Merkmale gekennzeichnet ist, Zugehörigkeitswerte zwischen Null und Eins zu allen vorgegebenen Klassen ermittelt werden. Beim Entwurf des Klassifikators sind dabei im Gegensatz zur → Fuzzy-Clusterung die Klassenzuordnungen für die Lerndaten bereits vorgegeben (überwachtes Lernen).

**Fuzzy-Logik:** Teilgebiet der mehrwertigen Logik, das die Behandlung von logischen Aussagen mit Zugehörigkeitsgraden zwischen Null und Eins ermöglicht

**Fuzzy-Logik-Operator:** Operator, der in der Fuzzy-Logik zur Verknüpfung oder Modifikation von Fuzzy-Mengen verwendet wird (z.B. UND, ODER, NICHT). Wichtige Operatoren sind in Anhang 1 angegeben.

**Fuzzy-Menge:** Menge, die aus geordneten Zahlenpaaren  $(x, \mu(x))$  besteht, wobei  $x$  ein Element des im allgemeinen numerischen Grundbereiches und  $\mu(x)$  eine Zugehörigkeitsfunktion mit Werten aus dem Intervall  $[0,1]$  ist

**Fuzzy-Partition:** Teilung eines (mehrdimensionalen) Raums in unscharfe Teilräume, wodurch jeder Punkt allen Teilräumen zu einem bestimmten Zugehörigkeitsgrad zugeordnet wird

**Fuzzy-Petri-Netze:** Modifikation klassischer Petri-Netze zur Beschreibung ereignisdiskreter Prozesse, bei der Marken durch Zugehörigkeiten zwischen Null und Eins und/oder Transitionen durch Fuzzy-Regeln beschrieben werden

**Fuzzy-PID-Regler:** Fuzzy-Regler, der in Analogie zu PID-Reglern die Eingangsgrößen Regeldifferenz (P), Integral über der Regeldifferenz (I) und Ableitung der Regeldifferenz (D) sowie die Ausgangsgröße Stellgröße aufweist. Eine alternative Realisierung ergibt sich aus den Eingangsgrößen Ableitung der Regeldifferenz (P), Regeldifferenz (I) und 2. Ableitung der Regeldifferenz (D) sowie der Ausgangsgröße Ableitung der Stellgröße. Bei einer zeitdiskreten Realisierung des Reglers wird anstelle des Integrals die Summe und anstelle der Ableitung die Änderung der Regeldifferenz verwendet.

Anm.: Ein Fuzzy-PID-Regler ist im allgemeinen ein nichtlinearer Regler.

**Fuzzy-Regelung:** Anwendung von Methoden der Fuzzy-Logik auf automatisierungstechnische Problemstellungen, die durch einen geschlossenen Wirkungsweg im Regelkreis gekennzeichnet sind

**Fuzzy-Relation:** Abbildung zur Beschreibung von Beziehungen zwischen Fuzzy-Mengen, die über einer oder mehreren Fuzzy-(Grund-)Mengen definiert ist und im Ergebnis den Zugehörigkeitsgrad zu einer Fuzzy-Menge liefert. Anm.: Der Definitionsbereich der Relation ist das kartesische Produkt der Grundmengen. Eine Fuzzy-Relation kann durch eine ein- bzw. mehrdimensionale Zugehörigkeitsfunktion über diesem Definitionsbereich beschrieben werden.

**Fuzzy-Steuerung:** Anwendung von Methoden der Fuzzy-Logik auf automatisierungstechnische Problemstellungen, die durch einen offenen Wirkungsweg gekennzeichnet sind

**Fuzzy-System:** System, das linguistische Regeln verwendet und mit Hilfe der Teilblöcke Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung numerische Eingangsgrößen in numerische Ausgangsgrößen abbildet

**Fuzzy-System vom Mamdani-Typ:** Fuzzy-System, das linguistische Regeln mit einer oder mehreren linguistischen Teilkonklusionen verwendet

**Fuzzy-System vom Sugeno-Typ:** → Fuzzy-System vom Takagi-Sugeno-Typ

**Fuzzy-System vom Takagi-Sugeno-Typ:** Fuzzy-System, das linguistische Regeln mit einem funktionalen Zusammenhang der Eingangsgrößen als Konklusion verwendet

**Fuzzy-System vom Takagi-Sugeno-Kang-Typ:** → Fuzzy-System vom Takagi-Sugeno-Typ

## G

**gewöhnliche Menge:** → scharfe Menge

**Glaubensgrad, -maß:** → Wichtungsfaktor

## H

**Hyperinferenz:** zusätzlicher Schritt bei der Auswertung einer Regelbasis mit positiven und negativen Regeln (Empfehlungen und Verbote bzw. Warnungen). Aus den Fuzzy-Mengen, die aus einer getrennten Inferenz der Regelbasen mit Empfehlungen und Verboten erzeugt werden, entsteht eine Fuzzy-Menge der Ausgangsgrößen, → Inferenz

**Hyperdefuzzifizierung:** Umwandlung der von der Hyperinferenz erzeugten Fuzzy-Menge in eine numerische Größe, → Defuzzifizierung

## I

**Implikation:** logische Operation "daraus folgt". Anm.: Die Implikation kann zur Auswertung von WENN-DANN-Regeln verwendet werden.

**Inferenz:** Auswertung der Regelbasis, wodurch aus fuzzifizierten Eingangsgrößen eine Fuzzy-Menge der Ausgangsgrößen erzeugt wird. Die Teilschritte der Inferenz sind die Prämissenauswertung, die Aktivierung und die Akkumulation.

**Inferenzfilter:** Abbildungsvorschrift zur Filterung einer Zugehörigkeitsfunktion, die einen stufenlosen Übergang zwischen den herkömmlichen Defuzzifizierungsmethoden ermöglicht (Schwerpunktmethode, Maximum-Mittelwert-Defuzzifizierung, Maximum-Defuzzifizierung, Flächenmedian-Methode)

## K

**Kennfeld:** Darstellung der Abhängigkeit einer oder mehrerer numerischer Ausgangsgrößen von einer oder mehreren numerischen Eingangsgrößen.

Anm.: Ein Kennfeld kann zur Analyse, Implementierung und Visualisierung von Fuzzy-Systemen verwendet werden. Beispielsweise sind Fuzzy-Systeme mit Standard-Fuzzy-Partitionen und trapezförmigen Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Variablen der Eingangsgrößen, Sum-Prod-Inferenz und Schwerpunktmethode für Singletons als Defuzzifizierungsmethode durch stetige, stückweise multilineare Kennfelder gekennzeichnet.

**Kern:** Teil des Definitionsbereiches einer Zugehörigkeitsfunktion, in dem sie den Wert Eins annimmt, Synonym Toleranz

**Komplement:** logische NICHT-Operation für Mengen

**Komposition:** → Aktivierung

**Kompositionsregel der Inferenz:** Inferenzverfahren, das auch die Verarbeitung von Fuzzy-Mengen der Eingangsgrößen zuläßt

**Konfidenz einer Regel:** → Wichtungsfaktor

**Konjunktion:** logische UND-Verknüpfung. Anm.: Die entsprechende Operation für Mengen ist die Bildung der Schnittmenge. Die Verallgemeinerung der Konjunktion in der Fuzzy-Logik ist die t-Norm.

**Konklusion:** Schlußfolgerung (DANN-Teil) einer linguistischen Regel. Anm.: Die Konklusion kann aus einer oder mehreren linguistischen Teilkonklusionen bestehen (Fuzzy-Systeme vom Mamdani-Typ) oder ein funktionaler Zusammenhang der Eingangsgrößen sein (Fuzzy-Systeme vom Takagi-Sugeno-Typ).

**konvexe Fuzzy-Menge:** Fuzzy-Menge, bei der alle Alpha-Schnitte der Zugehörigkeitsfunktion zusammenhängen

**K-Means:** Verfahren der Clusteranalyse, das ausgehend von einer (meist zufälligen) Anfangs-Klassenaufteilung (→ Partition) Datensätze iterativ zu anderen Klassen zuordnet, so daß ein Gesamtabstandsmaß (Clusterkriterium) minimiert wird

## L

**Lernen:** jede Veränderung in einem System, die diesem erlaubt, bei der nächsten Wiederholung desselben Vorgangs eine Aufgabe derselben Art effizienter oder effektiver auszuführen.

Anm.: In der Fuzzy-Logik Anpassung von Struktur und Parametern der Fuzzy-Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen auf der Basis von Lerndaten. Während es für eine  $\rightarrow$  Adaption ausreicht, daß sich ein System unmittelbar an veränderte Umgebungsbedingungen anpaßt, setzt Lernen ein Gedächtnis für die Vergangenheit voraus.

**linguistische Regel:** WENN-DANN-Regel mit Prämisse (Bedingung) und Konklusion (Schlußfolgerung), wovon zumindest die Prämisse linguistisch sein muß, siehe auch  $\rightarrow$  Prämisse, Konklusion

**linguistische Teilkonklusion:** Teilaussage in der Konklusion einer linguistischen Regel, in der nur eine linguistische Variable und ein linguistischer Term vorkommt (z.B. Heizung aufdrehen)

**linguistische Teilprämisse:** Teilaussage in der Prämisse einer linguistischen Regel, in der nur eine linguistische Variable und ein linguistischer Term vorkommt (z.B. Temperatur ist warm)

**linguistischer Term:** natürlichsprachliche Bezeichnung, um Eigenschaften einer Größe zu charakterisieren (z.B. hoch, warm, kalt). Die gegenseitige Zuordnung zwischen numerischen Werten und linguistischen Termen erfolgt über Fuzzy-Mengen. Synonym linguistischer Wert

**linguistische Variable:** Größe, deren Werte linguistische Terme sind

**linguistischer Wert:**  $\rightarrow$  linguistischer Term

**LM:** linkes Maximum, Modifikation der  $\rightarrow$  Maximum-Defuzzifizierung, wobei als defuzzifizierter Wert der minimale (bzw. linke) Wert der Ausgangsgröße aus dem Bereich verwendet wird, in dem sie den maximalen Wert der Zugehörigkeitsfunktion annimmt.

## M

**Max-Min-Inferenz:** Inferenz, die den Minimum-Operator in der Aktivierung und den Maximum-Operator in der Akkumulation verwendet.

Anm.: Üblicherweise wird hier auch für die Prämisenauswertung der Minimum-Operator verwendet. Der Minimum- und der Maximum-Operator bilden ein zusammengehöriges Paar aus t-Norm und s-Norm.

**Max-Prod-Inferenz:** Inferenz, die den Produkt-Operator in der Aktivierung und den Maximum-Operator in der Akkumulation verwendet. Anm.: Üblicherweise wird hier auch für die Prämisenauswertung der Produkt-Operator verwendet. Der Produkt- und der Maximum-Operator sind zwar t-Norm und s-Norm, bilden aber kein zusammengehöriges Paar.

**Maximum-Defuzzifizierung:** Defuzzifizierungsmethode, bei der die numerische Ausgangsgröße aus dem maximalen Wert der Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge ermittelt wird, die im Ergebnis der Inferenz entsteht. Wenn mehrere Maxima existieren, wird der Mittelwert der Maxima gebildet. Synonyme Mean-of-Maxima-Defuzzifizierung, MOM.

Anm.: Bei dieser Methode entstehen im allgemeinen treppenförmige Kennfelder, weil die defuzzifizierte Ausgangsgröße nur diskrete Werte annimmt. Deshalb eignet sich diese Methode eher für Klassifikations- als für Regelungsaufgaben. Modifikationen dieses Verfahrens verwenden anstelle des Mittelwertes den minimalen (bzw. linken) oder maximalen (bzw. rechten) Wert der Ausgangsgröße aus dem Bereich, in dem der maximale Wert der Zugehörigkeitsfunktion liegt.

**Mean-of-Maxima-Defuzzifizierung (MOM):** → Maximum-Defuzzifizierung

**Min-Max-Inferenz:** → Max-Min-Inferenz

**modus ponens:** logische Schlußweise, die aus einer Regel WENN A DANN B bei erfüllter Prämisse A auf die Erfüllung der Konklusion B schließt (Vorwärtsverkettung von Regeln)

**modus tollens:** logische Schlußweise, die aus einer Regel WENN A DANN B bei nicht erfüllter Konklusion B auf die Nichterfüllung der Prämisse A schließt (Rückwärtsverkettung von Regeln)

**MOM:** → Mean-of-Maxima-Defuzzifizierung, Maximum-Defuzzifizierung

## N

**Negation:** logische NICHT-Operation. Anm.: Die entsprechende Operation für Mengen ist die Bildung des Komplements.

**Neuro-Fuzzy-Systeme:** Systeme, die sowohl als Fuzzy-System als auch als Neuronales Netz interpretiert werden können und somit die Vorteile beider Methoden vereinigen (Interpretierbarkeit, Einbeziehung von Expertenwissen bzw. gut ausgearbeitete Lernmethoden). Im allgemeinen führt eine spezielle Strukturierung dazu, daß das System ohne Informationsverluste aus einem Fuzzy-System in ein Neuronales Netz und umgekehrt umgewandelt werden kann.

Anm.: Ein System mit separaten Neuro- und Fuzzy-Komponenten sollte in diesem Sinne nicht als Neuro-Fuzzy-System bezeichnet werden.

**normalisierte Fuzzy-Menge:** Fuzzy-Menge, deren Zugehörigkeitsfunktion einen Maximalwert von Eins aufweist

## P

**Partition:** Teilung eines (mehrdimensionalen) Raums in Teilräume, wodurch jeder Punkt genau einem Teilraum zugeordnet wird

**Prämisse:** Bedingung (WENN-Teil) einer linguistischen Regel, der sich aus einer Verknüpfung mehrerer linguistischer Teilprämissen zusammensetzen kann (z.B. Temperatur ist warm und Druck ist hoch)

**Prämissenauswertung:** Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades der Prämisse einer linguistischen Regel durch Verknüpfung der Zugehörigkeitsgrade aller linguistischer Teilprämissen mittels Fuzzy-Operatoren, Synonym Aggregation

## R

**Regelbasis:** Gesamtheit der linguistischen Regeln, die das vorhandene Wissen zum Erreichen bestimmter Ziele beschreiben, Synonym Regelwerk



**Regelplausibilität:** → Wichtungsfaktor

**Regelwerk:** → Regelbasis

**Relationales Fuzzy-System:** Darstellung eines → Fuzzy-Systems vom Mamdani-Typ mit Hilfe einer → Fuzzy-Relation

**RM:** rechtes Maximum, Modifikation der → Maximum-Defuzzifizierung, wobei als defuzzifizierter Wert der maximale (bzw. rechte) Wert der Ausgangsgröße aus dem Bereich verwendet wird, in dem sie den maximalen Wert der Zugehörigkeitsfunktion annimmt.

**Robustheit:** Systemeigenschaft, die die Einhaltung von Mindestanforderungen an das Systemverhalten auch bei bestimmten Abweichungen zwischen System und Modell (z.B. durch Parameterabweichungen, strukturelle Unterschiede, zusätzliche Störungen) garantiert und in Abhängigkeit von bestimmten Eingangsgrößen und mit unterschiedlichen Gültigkeitsbereichen angegeben wird.

Anm.: Bei Fuzzy-Reglern ist insbesondere die Robustheit des geschlossenen Regelkreises aus Fuzzy-Regler und einem Modell des zu regelnden Systems von Interesse, wobei das Modell durch Unsicherheiten in den Modellparametern gekennzeichnet ist.

## S

**s-Norm:** Verallgemeinerung der logischen ODER-Verknüpfung, die Zugehörigkeitsgrade der Eingangsgrößen aus dem Intervall Null bis Eins in einen Zugehörigkeitsgrad zwischen Null und Eins der Ausgangsgröße abbildet, wobei die Abbildung monoton, kommutativ und assoziativ ist, Synonym t-Conorm.

Anm.: Wenn eine s-Norm zusammen mit einer t-Norm die Verallgemeinerung der De-Morgan'schen Gesetze erfüllt, bilden beide ein zusammengehöriges Operatorenpaar. Typische s-Normen sind der Maximum-Operator und die algebraische Summe.

**scharfe Größe:** Größe, die numerische Werte annimmt

**scharfe Menge:** Menge, bei der die Zugehörigkeitsfunktion nur die Werte Null oder Eins annimmt. Anm.: scharfe Menge kann als Spezialfall einer Fuzzy-Menge interpretiert werden

**Schwerpunktmethode:** Defuzzifizierungsmethode, welche die numerische Ausgangsgröße aus dem Flächenschwerpunkt der Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge ermittelt, die im Ergebnis der Inferenz entsteht, Synonyme Center-of-Gravity-Defuzzifizierung, COG

**Schwerpunktmethode für Singletons:** Spezialfall der Schwerpunktmethode, bei der die Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße nur aus Singletons bestehen, Synonyme Center-of-Singletons-Defuzzifizierung, COS. Anm.: Hier ergeben sich Rechenvorteile, weil zur Bildung des Flächenschwerpunktes nur gewichtete Summen auszuwerten sind.

**Singleton:** Fuzzy-Menge, deren Zugehörigkeitsfunktion nur an einer Stelle einen Wert von Eins aufweist und sonst gleich Null ist

**Stabilität:** Systemeigenschaft, die die Einhaltung von Mindestanforderungen (z.B. Beschränktheit) an das Systemverhalten bezüglich der Zustands- bzw. Ausgangsgrößen garantiert und die in Abhängigkeit von bestimmten Eingangsgrößen (z.B. konstant) sowie mit unterschiedlichen Gültigkeitsbereichen (z.B. bei bestimmten Anfangszuständen) angegeben wird.

Anm.: Bei Fuzzy-Reglern ist insbesondere die Stabilität des geschlossenen Regelkreises aus Fuzzy-Regler und Modell des zu regelnden Systems von Interesse.

**Standard-Fuzzy-Partition:** spezielle eindimensionale Fuzzy-Partition, bei der für alle Werte des Definitionsbereiches einer linguistischen Variablen die Summe der Zugehörigkeitsgrade aller linguistischen Terme Eins ist und alle Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Terme normalisiert und konvex sind.

**Sum-Prod-Inferenz:** Inferenz, die den Produkt-Operator in der Aktivierung und den Summen-Operator in der Akkumulation verwendet.

Anm.: Üblicherweise wird hier auch für die Prämissenauswertung der Produkt-Operator verwendet. Der Summen-Operator ist keine s-Norm. Allerdings entsteht bei geeigneter Wahl der Zugehörigkeitsfunktionen und der Defuzzifizierungsmethode ein stückweise multilineares Kennfeld, so daß die Sum-Prod-Inferenz für Fuzzy-Regler zu empfehlen ist.

**Support:** Definitionsbereich einer Zugehörigkeitsfunktion, in der sie Werte größer Null annimmt, Synonym Träger

## T

**t-Conorm:** → s-Norm

**t-Norm:** Verallgemeinerung der logischen UND-Verknüpfung, die Zugehörigkeitsgrade der Eingangsgrößen aus dem Intervall Null bis Eins in einen Zugehörigkeitsgrad zwischen Null und Eins der Ausgangsgröße abbildet, wobei die Abbildung monoton, kommutativ und assoziativ ist.

Anm.: Wenn eine t-Norm zusammen mit einer s-Norm die Verallgemeinerung der De-Morgan'schen Gesetze erfüllt, bilden beide ein zusammengehöriges Operatorenpaar. Typische t-Normen sind der Minimum-Operator und der Produkt-Operator.

**Toleranz:** → Kern

**Träger:** → Support

**TSK-Fuzzy-System:** → Fuzzy-System vom Takagi-Sugeno-Kang-Typ

## U

**unscharfe Logik:** → Fuzzy-Logik

**unscharfe Menge:** → Fuzzy-Menge

**Unterbedingung:** → linguistische Teilprämisse

## V

**Vereinfachte Schwerpunktmethod:** Defuzzifizierungsmethode, welche die numerische Ausgangsgröße aus dem Schwerpunkt der lokalen Maxima der Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge ermittelt, die im Ergebnis der Inferenz entsteht. Synonyme Center-of-Maxima-Defuzzifizierung, COM.

Anm.: Diese Methode wird in Verbindung mit der Max-Prod- oder der Sum-Prod-Inferenz eingesetzt, weil hier bei den meisten Zugehörigkeitsfunktionen lokale Maxima

entstehen. Sie entspricht der Schwerpunktmethod für Singletons, wenn in die Maxima der Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße Singletons gelegt werden.

## W

**Wahrheitswert:** → Zugehörigkeitsgrad

**Wichtungsfaktor:** Wert zwischen Null und Eins, der den Grad der Glaubwürdigkeit und Vertrauenswürdigkeit einer linguistischen Regel angibt. Wichtungsfaktoren werden bei der → Aktivierung der jeweiligen Regel berücksichtigt. Synonyme Vertrauensfaktor, Konfidenz einer Regel, Glaubensgrad

## Z

**Zugehörigkeitsfunktion:** Funktion, die jedem Element  $x$  aus dem im allgemeinen numerischen Grundbereich einen Zugehörigkeitsgrad zu einer Fuzzy-Menge  $\mu(x)$  zuordnet  
Anm.: Ein Zugehörigkeitsgrad von  $\mu(x) = 1$  bedeutet, daß der Wert  $x$  vollständig zur Fuzzy-Menge gehört. Bei  $\mu(x) = 0$  gehört  $x$  überhaupt nicht zur Fuzzy-Menge. Werte zwischen Null und Eins bedeuten, daß der Wert teilweise zur Fuzzy-Menge gehört.

Anm.: Typische Zugehörigkeitsfunktionen sind dreieckförmig bzw. triangulär, trapezförmig, rechteckförmig, gaußförmig und exponentiell.

**Zugehörigkeitsgrad:** Wert der Zugehörigkeitsfunktion. Anm.: Unterschiedliche Interpretation bei logischen Aussagen (Wahrheitswert der Aussage) und bei der Betrachtung von Fuzzy-Mengen (Zugehörigkeit eines Wertes zur Fuzzy-Menge)

**Zweistrangiger Fuzzy Regler:** Fuzzy-Regler zur Verarbeitung von positiven und negativen Regeln, die Empfehlungen bzw. Warnungen/Verbote beschreiben, → Hyperinferenz

### 3 Englische Begriffe mit Verweisen auf das Glossar

#### A

accumulation	-	Akkumulation
activation	-	Aktivierung, Komposition
adaptation	-	Adaption
aggregation	-	Prämissenauswertung, Aggregation
alpha cut	-	Alpha-Schnitt
antecedent	→	condition

#### B

bisector of area defuzzification	→	center of area defuzzification
----------------------------------	---	--------------------------------

#### C

center of area defuzzification	-	Flächenmedianmethode
center of gravity defuzzification	-	Schwerpunktmethod
center of singletons defuzzification	-	Schwerpunktmethod für Singletons

centroid of area defuzzification	→	center of gravity defuzzification
certainty factor	→	weight factor
closed-loop fuzzy control	-	Fuzzy-Regelung
cluster analysis	-	Cluster-Analyse
clustering	-	Clustering
complement	-	Komplement
composition	→	activation
Compositional Rule of Inference	-	Kompositionsregel der Inferenz
conclusion	-	Konklusion, Schlußfolgerung
condition	-	Bedingung, Voraussetzung, Prämisse
conjunction	-	Konjunktion
consequence	→	conclusion
convex fuzzy set	-	konvexe Fuzzy-Menge
core	-	Kern, Toleranz
crisp set	-	scharfe Menge, gewöhnliche Menge

## D

defuzzification	-	Defuzzifizierung
degree of firing	-	Aggregation
degree of membership	-	Zugehörigkeitsgrad, Erfüllungsgrad
disjunction	-	Disjunktion

## E

extension principle	-	Erweiterungsprinzip
---------------------	---	---------------------

## F

feedback fuzzy control	-	Fuzzy-Regelung
feedforward fuzzy control	-	Fuzzy-Steuerung
fuzzification	-	Fuzzifizierung
fuzzy classification	-	Fuzzy-Klassifikation
fuzzy clustering	-	Fuzzy-Clustering
fuzzy control	-	Fuzzy Control, Fuzzy-Regelung, Fuzzy-Steuerung
fuzzy control language	-	Fuzzy Control Sprache
fuzzy logic	-	Fuzzy-Logik
fuzzy logic operator	-	Fuzzy-Logik-Operator
fuzzy partition	-	Fuzzy-Partition
fuzzy PID controller	-	Fuzzy-PID-Regler
fuzzy relation	-	Fuzzy-Relation
fuzzy set	-	Fuzzy-Menge, unscharfe Menge
fuzzy system	-	Fuzzy-System
fuzzy-adaptive PID controller	-	Fuzzy-adaptiver PID-Regler
Fuzzy-Petri-Net	-	Fuzzy-Petri-Netz

## G

grade of membership	→	degree of membership
---------------------	---	----------------------

## I

implication	-	Implikation
inference	-	Inferenz

## L

learning	-	Lernen
linguistic rule	-	linguistische Regel
linguistic term	-	linguistischer Term
linguistic variable	-	linguistische Variable
look-up table	-	Kennfeld

## M

mean of maxima defuzzification	-	Maximum-Defuzzifizierung
membership function	-	Zugehörigkeitsfunktion
membership value	→	degree of membership

## N

negation	-	Negation
Neuro-Fuzzy system	-	Neuro-Fuzzy-System
normal fuzzy set	-	normalisierte Fuzzy-Menge

## O

open-loop fuzzy control	-	Fuzzy-Steuerung
ordinary set	→	crisp set

## P

partition	-	Partition
premise	→	condition

## R

result aggregation	→	accumulation
robustness	-	Robustheit
rule base	-	Regelwerk, Regelbasis

## S

singleton	-	Singleton, Einer-Menge
stability	-	Stabilität
standard fuzzy partition	-	Standard-Fuzzy-Partition
subconclusion	-	(linguistische) Teilkonklusion
subcondition	-	(linguistische) Teilprämisse
support	-	Support, Träger

## W

weight factor	-	Wichtungsfaktor
---------------	---	-----------------

## Anhang 1: Fuzzy-Operatoren

Bezeichnung:

$\mu_1, \mu_2$  - Zugehörigkeitsgrade

UND-Operatoren (Konjunktion)		ODER-Operatoren (Disjunktion)	
Bezeichnung	Formel	Bezeichnung	Formel
Minimum	$\min(\mu_1, \mu_2)$	Maximum	$\max(\mu_1, \mu_2)$
(algebraisches) Produkt	$\mu_1 \cdot \mu_2$	algebraische Summe	$\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2$
		Summe (siehe Anmerkung)	$\mu_1 + \mu_2$
beschränkte Differenz	$\max(0, \mu_1 + \mu_2 - 1)$	beschränkte Summe	$\min(1, \mu_1 + \mu_2)$
Einstein-Produkt	$\frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{2 - (\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2)}$	Einstein-Summe	$\frac{\mu_1 + \mu_2}{1 + \mu_1 \cdot \mu_2}$
Hamacher-Produkt	$\frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2}$	Hamacher-Summe	$\frac{\mu_1 + \mu_2 - 2 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2}{1 - \mu_1 \cdot \mu_2}$

Bezeichnung	Formel
Gamma-Operator (Kompensatorischer Operator)	$(\mu_1 \cdot \mu_2)^{1-\gamma} \cdot ((1-\mu_1) \cdot (1-\mu_2))^\gamma$ <p>Parameter <math>\gamma = 0</math>: UND-Operator (Produkt)                      Parameter <math>\gamma = 1</math>: ODER-Operator (algebraische Summe)  <math>0 &lt; \gamma &lt; 1</math>: Kompromiß zwischen UND bzw. ODER</p>
NICHT-Operator (Komplement)	$1 - \mu_1$

Anm.: Die Summe ist keine  $\rightarrow$  s-Norm, trägt aber zu einfachen  $\rightarrow$  Kennfeldern bei und wird deswegen häufig verwendet.

## Anhang 2: Defuzzifizierungsmethoden

Bezeichnungen:

- $\mu(y)$  - Fuzzy-Menge als Ergebnis der Inferenz  
 $y$  - Ausgangsgröße  
 $y_D$  - Ergebnis der Defuzzifizierung

Bezeichnung	Formel
Schwerpunktmethode	$y_D = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} y \cdot \mu(y) \cdot dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(y) \cdot dy}$
Vereinfachte Schwerpunktmethode und Schwerpunktmethode für Singletons	$y_D = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)}$ <p>mit  <math>y_i</math> - lokale Maxima der <math>i = 1, \dots, n</math> Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße                      bzw.  <math>y_i</math> - Wert des <math>i</math>-ten Singletons</p>
Flächenmedianmethode	$y_D \text{ mit } \int_{-\infty}^{y_D} \mu(y) \cdot dy = \int_{y_D}^{+\infty} \mu(y) \cdot dy$
Maximum-Defuzzifizierung	$y_D \text{ mit } \mu(y_D) = \max_y \mu(y)$ <p>Erfüllen mehrere Werte <math>y_D</math> diese Bedingung, kann der minimale Wert (<math>\rightarrow</math> LM), der mittlere Wert (<math>\rightarrow</math> MOM) oder der maximale Wert (<math>\rightarrow</math> RM) verwendet werden.</p>

# Literatur

## Übersicht, Fuzzy Control:

- [1] KIENDL, H.: Fuzzy Control methodenorientiert. Oldenbourg-Verlag, München; 1997
- [2] BANDEMER, H.; GOTTWALD, S.: Einführung in Fuzzy Methoden. Akademie-Verlag, Berlin; 1993
- [3] DRIANKOV, D.; HELLENDORRN, H.; REINFRANK, M.: An introduction to fuzzy control. Springer-Verlag; 1996
- [4] KAHLERT, H. F.: Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control: eine anwendungsorientierte Einführung mit Begleitsoftware. Vieweg-Verlag, Braunschweig; 1994
- [5] KOCH, M.; KUHN, TH.; WERNSTEDT, J.: Fuzzy Control. Optimale Nachbildung und Entwurf optimaler Entscheidungen. Oldenbourg-Verlag, München; 1996
- [6] KOSKO, B.: Neural networks and fuzzy systems. Prentice Hall; 1992
- [7] STRIETZEL, R.: Fuzzy-Regelung. Oldenbourg-Verlag, München; 1996
- [8] Theorie für Anwender: Fuzzy Control, Artikelserie in der atp (10 Beiträge); 1993
- [9] Berichtsbände des GMA-Workshop Fuzzy Control, Forschungsberichte der Universität Dortmund, 8 Bände, ISSN 0941-4169; 1992-1999

## Klassifikation:

- [10] BOCKLISCH, S. F.: Prozeßanalyse mit unscharfen Verfahren. Verlag Technik, Berlin; 1987
- [11] BEZDEK, J. C.: Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms. Plenum Press, New York; 1981
- [12] BEZDEK, J. C.; PAL, S. K.: Fuzzy models for pattern recognition. IEEE Press, New York; 1992
- [13] DUNN, J. C.: A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well-separated clusters. Journal of Cybernetics, 3, 32-57; 1974
- [14] HÖPPNER, F.; KLAWONN, F.; KRUSE, R.: Fuzzy-Clusteranalyse: Verfahren für die Bilderkennung, Klassifikation und Datenanalyse. Vieweg, Braunschweig; 1997

## Implementierung:

- [15] MEYER-GRAMANN, K. D.; JÜNGST, E.-W.: Fuzzy Control - Schnell und kostengünstig implementiert mit Standardhardware. Automatisierungstechnik, 41, S. 166-172; 1993

## Norm (Entwurf):

- [16] DIN EN 61131-7, Ausgabe: 1999-04: Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 7: Fuzzy-Control-Programmierung (IEC 65B/368/CDV:1998); Deutsche Fassung prEN 61131-7:1998
- [17] IEC 65B/367/CDV: 1998 Programmable Controllers - Part 7: Fuzzy-control-programming.

## Begriffe:

- [18] BERTRAM, T.; SVARIČEK, F.; BINDEL, T.; BÖHM, R.; KIENDL, H.; PFEIFFER, B.-M.; WEBER, M.: Fuzzy Control - Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe. Automatisierungstechnik, 42 (7), S. 322-326; 1994