

Von Fuzzy-Sets zu Computing-with-Words

Sara D'Onofrio · Edy Portmann

Einleitung

Der durch Aristoteles begründete wissenschaftliche Zweig der philosophischen Logik (vgl. Syllogismus) [6, 13] wurde mehr als 2000 Jahre nicht in Frage gestellt, bis der englische Mathematiker Boole und der deutsche Philosoph und Mathematiker Frege sich vom philosophischen Ansatz distanzierten und daraus eine mathematische und somit moderne Logik entwickelten [26, 27]. Ein besonderes Merkmal der modernen Logik ist dabei die Nutzung künstlicher, formaler Sprachen anstelle von natürlichen Sprachen, da sich viele Konzepte ohne eine Formalisierung nicht in präziser Weise analysieren lassen [41].

Informationen in linguistischer Form (z. B. *es ist kalt*) sind im Vergleich zu solchen in numerischer Form (z. B. *es ist 2 °C*) schwieriger zu messen [41]. Folglich kann die natürliche Sprache unpräzise und ungenaue Inhalte beinhalten, weil sie auf (ungenauen) Wahrnehmungen basieren [40].

Die Konsequenz ist, dass menschliche Systeme (z. B. ökonomisch oder politisch motiviert) Computern kaum zugänglich sind. Computer arbeiten sehr effektiv mit leblosen automatisierten Systemen, da deren Verhalten durch physikalische, mechanische, chemische und elektromagnetische Gesetze bestimmt wird. Menschliche Systeme hingegen werden durch Wahrnehmungen und Emotionen gesteuert, welche meistens unpräzise sind [35]. Informatiker suchen nach neuen Wegen, um unpräzise Informationen zu handhaben und zu messen. Solche Methoden unterstützen Entscheidungsprozesse, welche nicht selbst die Probleme (z. B. ökonomischer oder politischer Natur) lösen, aber eine Hilfestellung zur Problemlösung bieten.

Einen möglichen Ansatz präsentierte Zadeh im Jahr 1965 [34]. Mit der ihm zugrunde liegenden Idee, dass ein Objekt graduell und nicht vollständig zu einer Kategorie gehören kann, führte er den Begriff der Fuzzy-Sets (unscharfe Mengen) ein [1], welcher eine Generalisierung der klassischen Set-Theorie darstellt [4] und ein Teil von Fuzzy-Logik [36] ist. Fuzzy-Logik ist eine scharfe Logik unscharfer Entitäten für die Modellierung von Unsicherheit und Vagheit und findet in verschiedenen Theorien (wie z. B. Granular-Computing, Fuzzy-Cognitive-Maps und Computing-with-Words) Anwendung, welche eine verbesserte Interaktion zwischen Menschen und Computern zum Ziel haben.

Ein zentraler Bestandteil dieser Theorien ist die Granulation, welche Zadeh als eine wichtige Funktion der menschlichen Kognition betrachtet. Diese macht es möglich, die Fülle an Daten zu komprimieren, wodurch sie dem menschlichen Gehirn zugänglich gemacht wird. Da Worte eine Form von Granulation sind, ist das Benutzen von Worten in der Kommunikation zwischen Menschen und Computern von großem Vorteil [37, 40]. Dazu müssen Computer jedoch mit (unscharfen) Worten der natürlichen Sprache umgehen können. Um dies zu ermöglichen, entwickelte Zadeh die auf Fuzzy-Logik basierende Theorie des Computing-with-Words (Rechnen mit Worten) [37, 40, 43]. Computing-with-Words ist eine abstrakte Theorie, erfordert eine neue

DOI 10.1007/s00287-015-0920-y
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Sara D'Onofrio · Edy Portmann
Institut für Wirtschaftsinformatik, Universität Bern,
Engehaldenstrasse 8, 3012 Bern, Schweiz
E-Mail: {sara.donofrio, edy.portmann}@iwi.unibe.ch

Zusammenfassung

Dieser Artikel bietet einen Überblick über die Entwicklung und Zusammenhänge der einzelnen Elemente der Fuzzy-Logik, wovon Fuzzy-Set-Theorie die Grundlage bildet. Die Grundproblematik besteht in der Handhabung von linguistischen Informationen, die häufig durch Ungenauigkeit gekennzeichnet sind. Die verschiedenen technischen Anwendungen von Fuzzy-Logik bieten eine Möglichkeit, intelligentere Computersysteme zu konstruieren, die mit unpräzisen Informationen umgehen können. Solche Systeme sind Indizien für die Entstehung einer neuen Ära des Cognitive-Computing, die in diesem Artikel ebenfalls zur Sprache kommt. Für das bessere Verständnis wird der Artikel mit einem Beispiel aus der Meteorologie (d. h. Schnee in Adelboden) begleitet.

Art des Denkens und bietet zugleich neue Chancen, um intelligentere Computersysteme zu entwickeln. Das zu lösende Problem ist, wie diese Systeme (z. B. durch den Gebrauch von Fuzzy-Logik) gebaut werden können, um danach eine „artifizielle Kognition“ zu entwickeln. Mit anderen Worten: Computersysteme zu entwickeln, die durch Orchestrierung von Simulation naturanaloger Verfahren [12] intelligentes Verhalten von Lösungssystemen erzeugen und somit auf Veränderungen in ihrer Umgebung reagieren können [25].

Computing-with-Words ist eine Möglichkeit, die Theorie der Fuzzy-Sets praktisch anzuwenden und dadurch der ungenauen und unsicheren Wahrnehmung der Realität gerecht zu werden. Sie unterstützt somit die Erstellung von kognitiven (d. h. selbstlernenden und intelligenteren) Computersystemen [12].

Dieser Artikel bietet einen Überblick über die Entwicklung von Fuzzy-Sets bis hin zu Computing-with-Words. Es werden Beispiele präsentiert, welche die Theorie visualisieren, um ein gutes Verständnis der Thematik zu ermöglichen. Im nächsten Abschnitt werden Fuzzy-Sets und Fuzzy-Logik näher erläutert. Abschnitt „Granular-Computing“ beschäftigt sich mit Granular Computing und setzt einen Fokus auf Fuzzy-Clustering, einem Aspekt von Granular-Computing. Fuzzy-Clustering ermöglicht die Bildung von Fuzzy-Cognitive-Maps, welche im

Abschn. „Fuzzy-Cognitive-Maps“ präsentiert werden und diese wiederum erlauben die Einführung von Semantic-und Cognitive-Computing-Systemen. In Abschn. „Computing-with-Words“ wird Computing-with-Words, ein wichtiger Teil von Semantic-und Cognitive-Computing, erklärt. Zum Schluss folgt eine Zusammenfassung des Artikels und ein Ausblick über die Thematik hinaus.

Fuzzy-Set-Theorie und Fuzzy-Logik

Betrachten wir folgende Aussage: *In Adelboden hat es wieder viel Schnee*. Wenn die Werte von Variablen nicht genau definiert werden können (z. B. Schneart), so sind diese unscharf [16]. Fuzzy-Sets können solche Ungenauigkeiten handhaben, da Fuzzy-Logik sich in der Argumentation an die Situation anpasst [4] und somit mit ungenau definierten Grenzen umgehen kann [5]. Fuzzy-Sets führen dazu, dass ein Objekt nicht länger nur zu der einen oder zu der anderen Klasse gehören muss, sondern zu mehreren Klassen zu jeweils einem gewissen Grad gehören kann [34, 41]. Eine Klasse ist eine Menge, die Entitäten enthält, welche aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften in derselben Klasse sind.

Im Beispiel des Schnees sind folgende Fuzzy-Sets denkbar: *Fuzzy-Set A: Neuschnee*, *Fuzzy-Set B: Altschnee*, *Fuzzy-Set C: Firn* und *Fuzzy-Set D: Eis*. Wird nun der Schnee in Adelboden gemessen, so nehmen wir an, dass folgende Dichte berechnet wird¹: 180 kg m^{-3} , was in diesem Fall bedeutet, dass dieser Schnee noch zu 0.7 zu Fuzzy-Set A (*Neuschnee*) und zu 0.3 bereits zu Fuzzy-Set B (*Altschnee*) gehört. Es handelt sich nicht um eine eindeutige Einteilung zu einer Klasse, sondern um eine Angelegenheit von Graden, was auch auf ein Kontinuum von Wahrheitswerten zwischen 0 und 1 zutrifft [36]. Diese Werte werden als linguistische Variablen und nicht als eine bivalente Menge (mit den Werten *wahr* und *falsch*) betrachtet. Dies führt zu einer Fuzzy-Logik, welche eine genauere Annäherung an die Logik der menschlichen Entscheidungsprozesse ist als die traditionelle bivalente Logik [35].

Um den Zugehörigkeitsgrad eines Objektes hinsichtlich einer (linguistischen) Variablen zu einem spezifischen Fuzzy-Set definieren zu können, wird eine Zugehörigkeitsfunktion benötigt [4, 13, 16]. In Anlehnung an Zadeh [34] wird ein Fuzzy-Set A dadurch gekennzeichnet, dass eine Zugehörigkeit

¹ Vgl. <http://www.thunerwetter.ch/schnee.html>.

Abstract

This article provides an overview of the development and relations of the elements of fuzzy logic, whereof fuzzy set theory forms the basis. The main problem is the handling of linguistic information which is often characterized by uncertainty. The various techniques of fuzzy logic offer a possibility to construct more intelligent computer systems that allow to deal with imprecise information. Such systems are signs of the emergence of a new era of cognitive computing that is discussed in this paper. For a better comprehension, the article is accompanied with an example of meteorology (i. e. snow in Adelboden).

eines Elementes in X zu A durch eine reelle Zahl im Wertebereich $[0, 1]$ angegeben werden kann. Formal lässt sich also das Fuzzy-Set A durch eine Zugehörigkeitsfunktion μ_A beschreiben: $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$. Das ermöglicht eine Erweiterung des sogenannten Schwarz-Weiß-Denkens zum Einbezug aller zwischenliegender Grautöne [44]. Mit anderen Worten wird die Abbildung unendlich viele Abstufungen zwischen weiß und schwarz haben.

Die Zugehörigkeitsfunktion kann beispielsweise mit einer Trapezform dargestellt werden. Die horizontale Linie gibt den Zugehörigkeitsgrad von $\mu_A(u) = 1$ an. Die Diagonale zeigt, dass der Zugehörigkeitsgrad abnimmt, je höher der Wert auf der X -Achse wird [43]. Abbildung 1 illustriert das Schneebeispiel in Adelboden.

Die Theorie der Fuzzy-Logik ermöglicht es, die aus den von Natur aus unscharfen und nicht genau einzugrenzenden menschlichen kognitiven Prozes-

sen resultierende Vagheit (z. B. beim Beschreiben) zu erfassen [1]. Es ist demgemäß natürlich, Fuzzy-Logik als Modellierungssprache anzuwenden, wenn die zu modellierenden Objekte ungenau (bzw. unpräzise) definiert sind [42, 43].

Granular-Computing

Ein wichtiger Aspekt der Fuzzy-Logik ist Granular-Computing (Klumpenbildung), da die Informationsgranulation essenziell für die menschliche Problemlösung [38] und für die menschliche Kognition ist [40]. Gemäß Hobbs [9] sind diese Fähigkeiten (d. h. die Konzeptualisierung der Welt in verschiedenen Granularitätsstufen) grundlegend für die menschliche Intelligenz und Flexibilität. Sie ermöglichen den Menschen die Komplexität der Welt durch simple Theorien abzubilden, welche rechnerisch verfolgbar sind. Granular-Computing ist somit eine natürliche Generalisierung vieler Themengebiete (u. a. aus dem Bereich der Fuzzy-Sets) [30].

Die Informationsgranulation ist eine Sammlung von Granulen, wobei ein Granule einen Klumpen darstellt [38, 42]. Anders als bei der Bestimmung von Fuzzy-Sets verwendet Granular-Computing keine Zugehörigkeitsfunktion, um die Granulen zu definieren, sondern bestimmt Klassen nach Ähnlichkeit, Nähe oder Funktionalität eines Objektes [31, 38, 39], wobei noch andere Klassenbildungen denkbar sind. Für Schnee sind beispielsweise folgende Klassen denkbar: *Alter*, *Dichte* und *Feuchtigkeit*. Einer Klasse können mehrere Objekte angehören. Diese Zugehörigkeit basiert auf bestimmten Regeln, welche auf Objekte angewendet werden. In anderen Worten ist ein Granule (wie z. B. auch ein Fuzzy-Set) eine Restriktion eines Werts, welche eine Variable überhaupt annehmen kann [39].

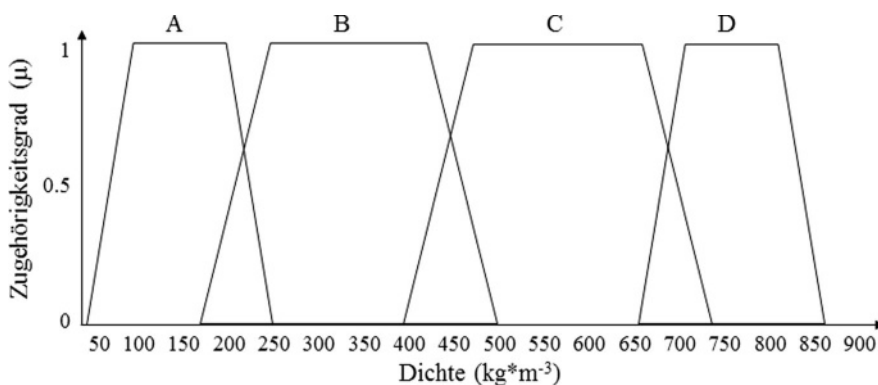


Abb. 1 Zugehörigkeitsfunktion für Schnee

Es wird ersichtlich, dass die Einteilung der Granulen in Klassen viel natürlicher erfolgt als die Verwendung einer Zugehörigkeitsfunktion. Computersysteme sind den gewaltigen Möglichkeiten der Natur bisher unterlegen, deshalb kann das Adaptieren solcher überlegenen Naturfähigkeiten diese Systeme signifikant verbessern. Dieser Bereich ist auch bekannt als Biomimetik. Dies bedeutet, dass, inspiriert von der Natur (bzw. von den biologischen Funktionen), noch intelligentere und realitäts-treuerere Systeme entwickelt werden können [2, 12], sodass die „maschinelle Intelligenz“ von Computern gesteigert werden kann [40]. Biomimetik kann auch als eine Inspirationsquelle von Granular-Computing angesehen werden.

Ein Aspekt von Granular-Computing ist das Fuzzy-Clustering (unscharfe Klassenbildung). Das Ziel von Fuzzy-Clustering ist es, Elemente in Klassen einzuteilen. Normalerweise werden Daten in scharfe Klassen eingeteilt und jedes Element gehört genau zu einer Klasse. Diese Methode ist aber nicht anwendbar, wenn die Grenzen zwischen Klassen unscharf sind. In Fuzzy-Clustering können Elemente zu mehr als einer Klasse gehören. Die Zugehörigkeitsgrade eines Elements geben die Stärke der Zugehörigkeit des Elements zu der jeweiligen Klasse an. Fuzzy-Clustering benutzt diese Zugehörigkeitsgrade, um die Daten den Klassen zuzuordnen [10].

Granular-Computing hilft, Informationen zu strukturieren und ermöglicht, zwischen verschiedenen Granularitätsebenen zu wechseln, abhängig davon, wie viele Informationen benötigt werden. Es ist eine Methode, um Informationen zu analysieren und zu strukturieren. Je höher (tiefer) die Ebene in der Granularitätsstruktur ist, desto unpräziser (detaillierter) ist die angegebene Information [39]. Diese Methode lässt eine (mehr oder weniger wahrheitsgemäße) Darstellung der realen Welt zu, ist konsistent mit der menschlichen Denkweise und deren Problemlösung und vereinfacht dadurch die Problemstellungen [9, 31].

Fuzzy-Cognitive-Maps

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Fuzzy-Logik sind Fuzzy-Cognitive-Maps [14]. Dies sind unscharfe kognitive Repräsentationen in Form von Karten und eine Erweiterung der Cognitive-Maps (kognitive Karten). Tolman [28] verwendete in Experimenten mit Ratten als Erster Cognitive-

Maps. Ihm zufolge besteht das Lernen nicht aus Stimulus-Antwort-Verbindungen, sondern aus Sets, die im Nervensystem während des Lernprozesses gebildet werden und wie Cognitive-Maps funktionieren. Kosko [14] erweiterte diese Methode zu Fuzzy-Cognitive-Maps, indem er Fuzzy-Logic miteinbezog.

Fuzzy-Cognitive-Maps sind unscharf gewichtete Digraphen, bestehend aus Knoten und gerichteten Kanten, welche Rückkopplungen erlauben. Knoten sind Konzepte, meistens mit Werten innerhalb eines Intervalls $[0, 1]$ oder dazwischen $[-1, 1]$. Kanten beschreiben kausale Beziehungen zwischen den Konzepten, meistens mit den Werten von $[0, 1]$. Kanten können auch mit linguistischen Werten bezeichnet werden. Jeder positive (negative) Wert einer Kante von Konzept I zu Konzept J bedeutet, dass I J kausal vergrößert (verkleinert).

Formal lassen sich Fuzzy-Cognitive-Maps mit c Knoten (Konzepten) durch eine Gewichtungsmatrix $W = [w_{ij}]$, $i, j = 1, 2, \dots, c$, $w_{ij} \in [-1, 1]$ darstellen. Das Gewicht w_{ij} gibt die Stärke der Verbindung zwischen dem I -Knoten und dem J -Knoten an [21].

Für Adelboden ist folgende Fuzzy-Cognitive-Map denkbar: Das Skigebiet kann als Ökosystem mit vielen Stakeholdern angesehen werden. Zudem besitzt es viele Variablen, welche das Gebiet positiv oder negativ beeinflussen können (wie z. B. das Wetter, die Temperaturen etc.). Um die Knoten einer Fuzzy-Cognitive-Map erstellen zu können, müssen Informationsgranulen gebildet werden. Wie in der Abb. 2 illustriert, können beispielsweise Granulen durch Fuzzy-Clustering gebildet werden (vgl. Abschn. „Granular-Computing“). Dies verdeutlicht die Wichtigkeit von Informationsgranulation bei der Bildung von konzeptionellen Konstrukten [9, 20]. Werden verschiedene Fuzzy-Cognitive-Maps verbunden, so kann Wissen entstehen und wachsen [14].

Da Fuzzy-Cognitive-Maps unscharfe Kausalitätsgrade zwischen vagen Konzepten erlauben [14], sind sie in der Lage, Wissen für Computersysteme darzustellen, welches der menschlichen Wahrnehmung ähnlich ist. So sind Systeme dynamisch und fähig zu lernen, wodurch sie zum Beispiel für Prozesse der Entscheidungsfindung geeignet sind. Eine Fuzzy-Cognitive-Map kann als lernendes unscharfes neurales (d. h. verknüpftes) System angesehen werden, das sich stetig in der Lösungsfindung verbessert [19].

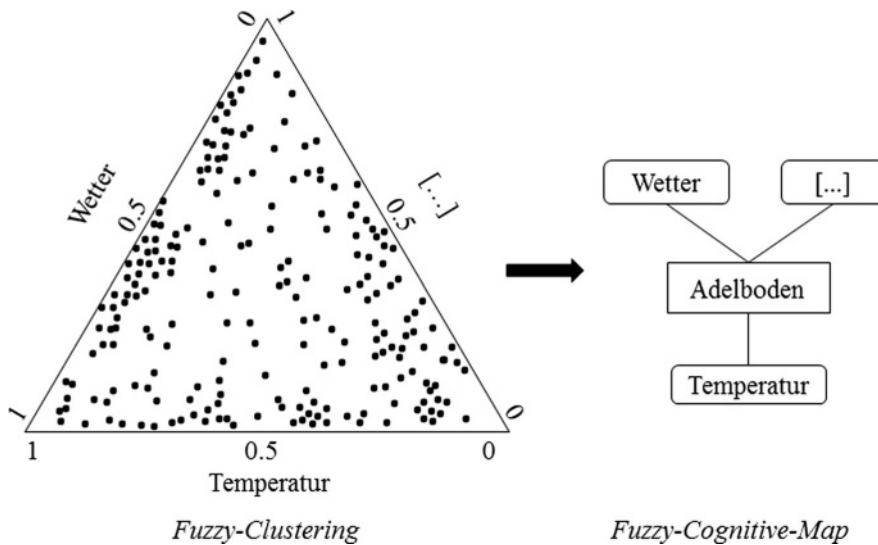


Abb. 2 Von Fuzzy-Clustering zu einer Fuzzy-Cognitive-Map

Zusammenfassend sind Fuzzy-Cognitive-Maps nützliche kognitive Instrumente und könnten besonders in der neuen Ära des Cognitive-Computing [7] von großem Nutzen sein, da sie als geeignet erscheinen, erlerntes Wissen optimal und schnell wiederaufrufbar abzuspeichern. Cognitive-Computing ist eine Erweiterung des Semantic-Computing (z. B. des semantischen Webs [3]), wobei diese zwei Arten biomimetischen Computings sehr schwer voneinander zu trennen sind. Semantic-Computing vereinfacht und automatisiert involvierte kognitive Prozesse durch Definitionen, Modelle, Übersetzungen, Umwandlungen und Abfragen der Bedeutung von Worten, Sätzen und Konzepten. Cognitive-Computing hingegen bezieht sich auf die Fähigkeit von Systemen, bewusst, kritisch, logisch, achtsam und aufgrund von Überlegungen zu handeln [7]. Deshalb ist es wichtig, Wissen extrahieren zu können, wodurch auch Computing-with-Words in der Ära des Cognitive-Computing an Bedeutung gewinnen wird.

Computing-with-Words

Oft hat dasselbe Wort bei verschiedenem Gebrauch nicht die gleiche Bedeutung, wodurch die Essenz des Wortes unsicher ist [17]. Menschen lernen Worte und übernehmen diejenige Bedeutung, die ihnen weitergegeben wird oder ihnen logisch (bzw. korrekt) erscheint. Sie ordnen die erlernten Worte in ein (eigenes) Referenzsystem ein. Ein Wort kann also für verschiedene Menschen unterschiedliche Bedeutungen haben. Wie in der alltäglichen

Kommunikation Missverständnisse auftreten können [23], so entstehen auch in der Interaktion zwischen Mensch und Computer Unklarheiten in der Sprachverwendung, welche somit den Prozess der Informationsverarbeitung stören.

Computing-with-Words wird zur Lösung von linguistisch-basierten Problemstellungen eingesetzt [8]. Es handelt sich um eine Methodik, in welcher Worte anstelle von Zahlen für das Rechnen und Denken verwendet werden [37]. Der Fokus bei Rechnungen liegt üblicherweise auf der Manipulation von Zahlen und Symbolen. Computing-with-Words ist dagegen eine Methodik, bei welcher Worte und Sätze als Kalkulationsgegenstand verwendet werden [40]. Computing-with-Words beschäftigt sich mit unpräzisen, unsicheren und vagen Informationen, welche in Propositionen zu finden sind, die in natürlicher Sprache auftauchen [33].

Es stellt sich die Frage, weshalb Berechnungen mit unpräzisen, unsicheren und/oder vagen Informationen überhaupt nützlich sind. Wird zum Beispiel die Aussage „In Adelboden hat es wieder viel Schnee“ genauer analysiert, so wird klar, dass eine solche Aussage weder die Menge noch die Art des Schnees definiert. Deshalb gibt es drei Gründe, die für Computing-with-Words sprechen: (1) Menschliches Wissen ist mehrheitlich in natürlicher Sprache beschrieben. (2) Worte sind weniger präzise als Zahlen. Wenn die Informationen nicht numerisch vorhanden sind, werden Worte verwendet. (3) Präzision ist kostspielig. Falls eine Toleranz gegenüber

der Ungenauigkeit besteht, kann dies durch die Verwendung von Worten anstelle von Zahlen ausgenutzt werden [18, 37, 40].

Computing-with-Words baut auf der Fähigkeit des menschlichen Hirns (z. B. der Wahrnehmung) auf, zielführende Entscheidungen treffen zu können, ohne dass genaue Messungen oder Berechnungen notwendig sind. Wahrnehmungen werden in natürlicher Sprache formuliert, was dazu führt, dass sie unscharf sind. Deshalb stellt das Rechnen mit Worten (und Wahrnehmungen) eine größere Herausforderung dar als das Rechnen mit Messungen (bzw. mit exakten Zahlen) [40]. Computing-with-Words steigert die computergestützte Rechenfähigkeit, um unpräzise Informationen (bzw. menschliche Wahrnehmungen) handhaben zu können. Dies ist von zentraler Bedeutung, da Informationen in der Realität meistens unpräzise, unsicher, unvollständig und/oder vage sind. Das Ziel von Computing-with-Words ist es, Prozesse zu entwickeln, die mit Unsicherheiten der natürlichen Sprache und Wahrnehmung umgehen können. Probleme können somit auf eine Weise adressiert werden, die dem menschlichen Denken und der menschlichen Lösungsfindung ähnlich ist [18].

Fazit und Ausblick

Fuzzy-Logik ist nicht eine ungenaue Form von Logik, sondern eine präzise Logik, Ungenauigkeiten im menschlichen Denken formal zu fassen. Diese Theorie formalisiert zwei menschliche Fähigkeiten: Einerseits die Fähigkeit, in einer schwer fassbaren Umgebung mit imperfekter, unpräziser Information, wo sich Entscheidungsfragen bei komplexen Aufgaben nicht immer präzise mit ja oder nein beantworten lassen, zu überlegen und Entscheidungen zu treffen. Andererseits wird die Fähigkeit formalisiert, physische und mentale Aufgaben auszuführen ohne sich auf Berechnungen und Messungen zu stützen [36, 42]. Es geht um ein Abwägen unterschiedlicher Einflussfaktoren und darum, die Antwort für eine Problemlösung mit „ja unter Vorbehalt“ oder „sowohl als auch“ zu geben.

Die Fähigkeit, die wahrgenommene Realität in verschiedene Granularitätsebenen einzuteilen und zwischen diesen Ebenen wechseln zu können [9], macht es möglich, komplexe Probleme in berechenbare Problemstellungen umzuwandeln. Diese Fähigkeit ist essenziell für die menschliche Intel-

ligenz und Flexibilität [32]. Im Wesentlichen dient Granular-Computing als Grundlage für Computing-with-Words [30], da Worte als Granulen interpretiert werden [37, 39].

Werden solche Granulen in Fuzzy-Cognitive-Maps gespeichert, so können mehrere Fuzzy-Cognitive-Maps zu einer Fuzzy-Cognitive-Map aggregiert werden, sodass sich die Informationsrepräsentation einfacher gestaltet. Sind alle relevanten Informationen in einer Fuzzy-Cognitive-Map enthalten, dann ist die Analyse der vorhandenen Informationen simpler, und dies führt zur vereinfachten Informationsverarbeitung, wodurch Wissen entstehen (und wachsen) kann.

Ein Großteil des Wissens der Menschheit ist in natürlicher Sprache beschrieben [43]. Computing-with-Words macht es möglich, diese Informationen in computerbasierte Entscheidungsmodelle [43] und in (logisches) Schlussfolgern [15] miteinzubeziehen. Diese Methode baut zum einen auf den Theorien von Fuzzy-Sets und Fuzzy-Logik auf, um Mehrdeutigkeiten oder Ungenauigkeiten in alltäglichen Aktivitäten von Menschen zu adressieren [24], und zum anderen auf der menschlichen Fähigkeit, ohne Messungen oder Berechnungen physischen oder mentalen Handlungen nachzugehen [40].

Computing-with-Words ermöglicht es, mit zwei verschiedenen Aspekten von intelligenten Systemen umzugehen: Zum einen mit der Schnittstelle zwischen Benutzer und Computer und zum anderen mit einem Manipulationsprozess von nicht-numerischen Informationen [24]. Aufgrund der bestehenden Schnittstelle kann die Interaktion zwischen Mensch und Computersystem durch einen kontinuierlichen intelligenten Austausch von positiven Feedbacks optimiert werden. Dadurch verbessert sich nicht nur die menschliche Intelligenz, sondern auch das maschinelle Lernen wird optimiert, da beide von der laufenden Interaktion profitieren können [11]. Auf diese Weise können kognitive Systeme in natürlicher Sprache geschriebene Worte erlernen und allgemeiner die kognitiven Prozesse des Menschen (wie z. B. Lernen, Denken und Wahrnehmen) imitieren [29].

Ein Computer wird heutzutage nicht nur als ein effizientes Hilfsmittel für numerische Rechnungen betrachtet, sondern als ein potenzieller menschlicher Wissensspeicher sowie als Unterstützer beim Denken und Entscheiden angesehen [5]. Damit Computersysteme das Verhalten von mensch-

lichen Systemen verstehen und vorhersagen können, sollte der Anspruch der Präzision aufgegeben werden und eine Toleranz gegenüber Fuzzy-Ansätzen entstehen [35].

Wir sind immer noch am Anfang der Geschichte intelligenter Computersysteme. Wie auch Zadeh [44] sind wir der Meinung, dass Computing-with-Words in den kommenden Jahren an Akzeptanz, Sichtbarkeit und Wichtigkeit zunehmen wird [18, 37], da anzunehmen ist, dass das Rechnen mit Worten eine wichtige Richtung in der Informatik sein wird [40]. Zudem sind wir überzeugt, dass Cognitive-Computing das Rechnen und Denken dieser Systeme optimieren wird.

Danksagung

Wir danken allen Kollegen des Instituts für Wirtschaftsinformatik an der Universität Bern, die uns bei der Erstellung dieses Artikels zur Seite standen. Ein besonderer Dank geht zudem an den Schöpfer der Fuzzy-Set-Theorie, Lotfi A. Zadeh, von welchem wir sehr viel lernen konnten.

Literatur

1. Badredine A (2005) Fuzzy decision making in politics: a linguistic fuzzy set approach (LFSFA). *Pol Anal* 13(1):23–56
2. Bar-Cohen Y (2006) Biomimetics – using nature to inspire human innovation. *Bioinspiration Biomimetics* 1(1):1–12
3. Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O (2001) The Semantic Web. *Sci Am* 29–37
4. Dernoncourt F (2011) Introduction to fuzzy logic. MIT
5. Dubois D, Prade H (1998) An introduction to fuzzy systems. *Clin Chim Acta* 270(1):3–29
6. Froese N. Aristoteles: Logik und Methodik in der Antike. Logische Grundprinzipien, der Syllogismus und antike Wissenschaftsphilosophie. <http://www.antike-griechische.de/Aristoteles.pdf>, letzter Zugriff: 15.09.2015
7. Haun M (2014) Cognitive Computing. Steigerung des systemischen Intelligenzprofils. Springer, Berlin Heidelberg
8. Herrera F, Martinez L (2000) A 2-tuple fuzzy linguistic representation, model for computing with words. *IEEE T Fuzzy Syst* 8(6):746–752
9. Hobbs JR (1985) Granularity. In: *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, Los Angeles, CA, pp 432–435
10. Jafar OAM, Sivakumar R (2013) A Comparative Study of Hard and Fuzzy Data Clustering Algorithms with Cluster Validity Indices. In: *Proceedings of International Conference on „Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications (ERCICA 2013)“*, Elsevier Publications, pp 775–782
11. Kaufmann M, Portmann E, Fathi M (2012) A concept of semantics extraction from web data by induction of fuzzy ontologies. In: *International Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web*
12. Kaufmann M, Portmann E (2015) Biomimetics in design-oriented information systems research. In: *Donnellan B, Gleasure R, Helfert M, Kenneally J, Rothenberger M, Chiarini Tremblay M, Vandermeert D, Winter R (eds) At the Vanguard of Design Science: First Impressions and Early Finding from Ongoing Research Research-in-Progress Papers and Poster Presentations from the 10th International Conference, DESRIST, Dublin, Ireland*, pp 53–60
13. Klir GJ, Yuan B (1995) *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic – Theory and Applications*. Prentice-Hall, New York
14. Kosko B (1986) Fuzzy cognitive maps. *Int J Man Mach Stud* 24(1):65–75
15. Lawry J (2001) A methodology for computing with words. *Int J Approx Reason* 28(2):51–89
16. Loucks DP, van Beek E, Stedinger JR, Dijkman JPM, Viallers MT (2005) *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Application*. UNESCO, Paris, pp 135–144
17. Mendel JM (2007) Computing with words and its relationships with fuzzistics. *Inform Sciences* 177(4):988–1006
18. Mendel JM, Zadeh LA, Trillas E, Yager R, Lawry J, Hags H, Guadarrama S (2010) What computing with words means to me. *IEEE Comput Intell Mag* 20–26
19. Papageorgiou EI, Salmeron JL (2013) A review of fuzzy cognitive maps research during the last decade. *IEEE T Fuzzy Syst* 21(1):66–79
20. Pedrycz W (2010) The design of cognitive maps: a study in synergy of granular computing and evolutionary optimization. *Expert Syst Appl* 37(10):7288–7294
21. Pedrycz W, Jastrzebska A, Homenda W (2015) Design of fuzzy cognitive maps for modeling time series. *IEEE T Fuzzy Syst*
22. Portmann E, Kaufmann MA, Graf C (2012) A distributed, semiotic-inductive, and human-oriented approach to web-scale knowledge retrieval. In: *Proceedings of the 2012 International Workshop on Web-scale Knowledge Representation, Retrieval and Reasoning, ACM, New York*, pp 1–8
23. Rappaport WJ (2003) What did you mean by that? Misunderstanding, negotiation, and syntactic semantics. *Mind Mach* 13:397–427
24. Reformat M, Ly C (2009) Ontological approach to development of computing with words based systems. *Int J Approx Reason* 50(1):72–91
25. Siemens G (2005) Connectivism: a learning theory for the digital age. *Int J Instr Tech Dist Learn* 2(1):3–10
26. Spinax O. Zur Geschichte der Logik. <https://www.math.uni-kiel.de/logik/de/arbeitsgruppe-logik/zur-geschichte-der-logik>, letzter Zugriff: 1.6.2015
27. Strahm T (1999) Logik in Informatik, Mathematik und Philosophie. Vortrag anlässlich der Veranstaltung Theodor-Kocher-Preis der Universität Bern 1998
28. Tolman EC (1948) Cognitive maps in rats and men. *Psychol Rev* 55(4):189–208
29. Wang Y (2006) Keynote speech: cognitive informatics – towards future generation computers that think and feel. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI'06)*, Beijing, China, IEEE CS Press, pp 3–7
30. Yager RR, Filev D (1998) Operations for granular computing: mixing words and numbers. In: *Proceedings of the FUZZ-IEEE World Congress on Computational Intelligence, Anchorage*, pp 123–128
31. Yao YY (2000) Granular computing: basic issues and possible solutions. In: *Proceedings of the 5th Conference on Information Sciences, Atlantic, NJ, USA, vol 1*, pp 186–189
32. Yao YY (2006) Three perspectives of granular computing. In: *Proceedings of the International Forum on Theory of GrC from Rough Set Perspective*. *J Nanchang Inst Technol* 25(2):16–21
33. Ying M (2002) A formal model of computing with words. *IEEE T Fuzzy Syst* 10(5):640–652
34. Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. *Inform Control* 8:338–353
35. Zadeh LA (1975) The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning – I. *Inform Sci* 8:199–249
36. Zadeh LA (1988) Fuzzy logic. *IEEE Computer* 21(4):83–93
37. Zadeh LA (1996) Fuzzy logic = computing with words. *IEEE T Fuzzy Syst* 4(2):103–111
38. Zadeh LA (1997) Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Set Syst* 90:111–127
39. Zadeh LA (1998) Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems. *Soft Comput* 2:23–25
40. Zadeh LA (2001) From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *Ann NY Acad Sci* 929(1):221–252
41. Zadeh LA (2005) Toward a generalized constraint of uncertainty (GTU) – an outline. *Inform Sciences* 172:1–40
42. Zadeh LA (2008) Is there a need for fuzzy logic? *Inform Sciences* 178(13):2751–2779
43. Zadeh LA (2011) *Computing with Words – Principal Concepts and Ideas*. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer, Heidelberg
44. Zadeh LA (2015) Fuzzy logic – a personal perspective. *Fuzzy Set Syst*