

KONZEPTION EINES KOGNITIVEN SYSTEMS FÜR DEN EXPERIMENTELLEN EINSATZ IN FORSCHUNG UND LEHRE

Ronald Römer, Matthias Wolff

BTU Cottbus-Senftenberg

ronald.roemer@tu-cottbus.de

Kurzfassung: Technische kognitive Systeme stellen ein relativ junges Forschungsgebiet dar, in dem eine Vielzahl von Fragen zu deren *Funktion, Struktur und Leistungsfähigkeit* gegenwärtig noch unbeantwortet sind. Gleichzeitig wächst aber auch der Bedarf an einer weitgehend abgeschlossenen methodischen Darstellung des Wissensgebietes für die Lehre an Universitäten und Fachhochschulen. Die hier vorgestellte Konzeption eines Experimentiersystems verfolgt das Ziel, eine Brücke zwischen diesen beiden Anforderungen zu schlagen. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen die grundlegenden Eigenschaften und Funktionen kognitiver Systeme. Aus diesem Grund stellen wir in dieser Arbeit ein Minimalsystem vor, welches an das von SHANNON vorgebrachte „Mouse-Maze“-Problem anknüpft und über zusätzliche kognitive Fähigkeiten verfügt. Mit der damit verbundenen Reduktion der Systemkomplexität kann nun einerseits der Blick auf die neuartigen Aspekte geschärft werden, andererseits wird ein tiefergehendes Verständnis dieser Systemklasse ermöglicht. Mit diesem Ansatz kann daher der Einsatz des Experimentiersystems in Lehre und Forschung gerechtfertigt werden.

1 Einführung

In den Ingenieurwissenschaften stellt der systemtheoretische Ansatz eine bewährte Methode für die Analyse und den Entwurf von technischen Systemen dar. Ein Vorzug dieser Methode besteht darin, dass sie von der technischen Realisierung abstrahiert und somit für den Einsatz in unterschiedlichen Disziplinen der Ingenieurwissenschaften geeignet ist. Diese Eigenschaft erlaubt auch den Einsatz von informationstheoretischen Methoden, mit denen schließlich eine quantitative Beurteilung der Leistungsfähigkeit von abstrakten Systemen ermöglicht wird. Ausgehend von diesen Betrachtungen erscheint es wünschenswert, für die Modellierung kognitiver Systeme lediglich minimale Erweiterungen an der klassischen Systemtheorie vorzunehmen. Richtungsweisend sind hier Überlegungen aus der theoretischen Psychologie. Der dort entwickelte Rahmen der *Finalen Systeme* erlaubt es, den Geltungsbereich für kognitive Systeme so zu definieren, dass er sich auch für das ingenieurwissenschaftliche Umfeld eignet [1]. Basierend auf dieser Definition können die technischen Anforderungen an *Funktion und Struktur* kognitiver Systeme technisch präzisiert werden.

Die Funktions- und Strukturbetrachtungen in Abschnitt 2 orientieren sich am Perzeptions-Aktionszyklus biologischer Systeme. In diesem kreisförmig organisierten Informationsprozess stellen die Verarbeitungsmodule Perzeption und Aktion zwei grundlegende Komponenten dar. Ein wichtiges Kennzeichen dieser Module besteht darin, dass sie Zeichen verarbeiten und daher alle semiotischen Ebenen umfassen müssen. Beide Teilsysteme sind deshalb als hierarchische Systeme auszuführen. Eine weitere Komponente kognitiver Systeme ist die Verhaltenssteuerung. Zusammen mit den zuvor genannten Komponenten bildet sie den *kognitiven Agenten*. Er trifft zielgerichtete Entscheidungen gemäß einer erlernten Strategie, die über das Aktionsmodul Wirkungen auf die Umgebung ausüben, welche den kognitiven Agenten „näher“ an das angestrebte Ziel führen sollen. Damit sich der Kreis schließen kann, müssen die in der Umgebung erzielten Effekte schließlich zum Perzeptionsmodul zurück-

geführt werden. Die Rückführung löst nun ihrerseits Wirkungen im kognitiven Agenten aus, so dass eine Kontrolle der erzielten Effekte ermöglicht wird. Im Gegensatz zu einfachen – auf Signalen basierenden – kreisförmig organisierten Informationsprozessen (Regelkreis) sind hier jedoch die semantischen und pragmatischen Aspekte der Zeichenverarbeitung zu berücksichtigen.

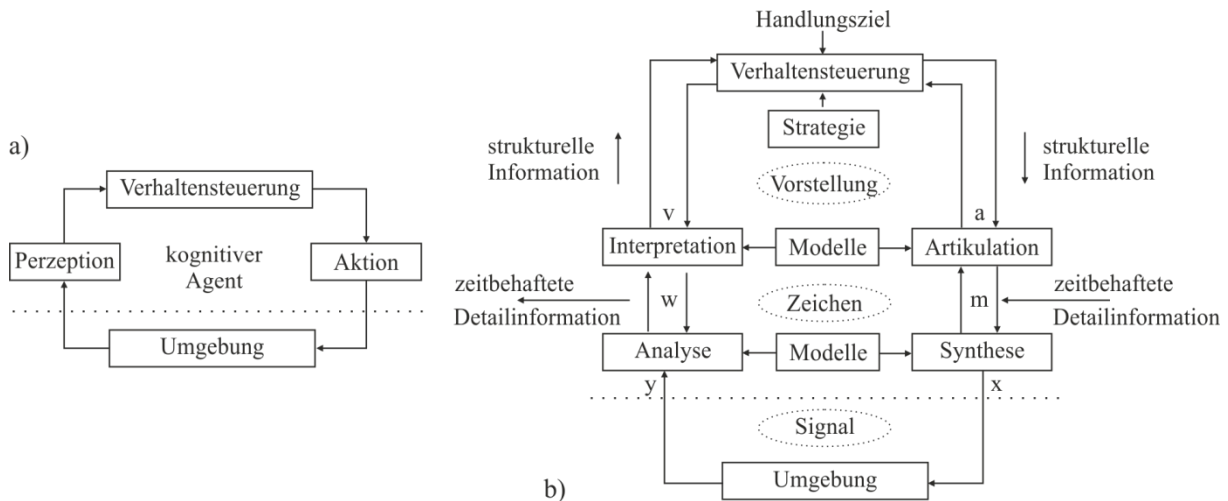


Abbildung 1 – a) Grobstruktur- und b) Feinstruktur kognitiver Systeme.

Der kognitive Agent kann sowohl eine Innen- als auch eine Außenperspektive einnehmen. In diesen beiden Sichtweisen spiegelt sich der Konflikt zwischen (innerer) Wirklichkeit und (äußerer) Realität wieder, welcher die Philosophie bis in die heutige Zeit beschäftigt [2]. Nach Auffassung der theoretischen Psychologie stellt eine Übereinstimmung beider Sichtweisen das adaptive Optimum eines finalen Systems dar und wird dort mit dem Begriff „Veridikalität“ bezeichnet [3]. Es ist leicht einzusehen, dass das Streben nach diesem Optimum eine wesentliche Triebkraft der evolutionären Entwicklung darstellt. Daher wird erwartet, dass sich der dazugehörige adaptive Algorithmus auch auf die Struktur kognitiver Systeme auswirkt.

Für den praktischen Einsatz müssen Ressourcen schonende Systeme entwickelt werden, die mit *Unsicherheit* umgehen können. Dazu gehört zunächst die Verarbeitung von unsicherer Information in den Modulen Perzeption und Aktion. Aus Sicht der klassischen Systemtheorie bieten sich hier stochastische Modelle – z.B. gewichtete Transduktoren – an. Auch die Verhaltenssteuerung muss sich auf unsichere Information stützen. Hier erfolgt die Modellierung unter Verwendung von Markov-Entscheidungsprozessen, wobei ebenfalls stochastische Transduktoren zum Einsatz kommen können. Das für die Verhaltenssteuerung notwendige Strategietraining kann daher sowohl für deterministische als auch für nichtdeterministische Umgebungen realisiert werden.

Ausgehend von Funktion und Struktur kognitiver Systeme wird in Abschnitt 3 ein Minimalbeispiel konzipiert, das auf dem „Mouse-Maze“-Problem aufsetzt. Dessen Lösung wurde seinerzeit noch von einer mechanistischen Sichtweise geprägt. Den Anforderungen, die an ein finales System gestellt werden müssen, konnte jedoch noch nicht entsprochen werden. Gemäß dem Geltungsbereich solcher Systeme sind hier zusätzlich semantische Strukturen zu berücksichtigen. Diese werden aus biologischer Perspektive von der Umwelt geprägt und erlauben eine Einpassung der Shannon-Maus in ihre „ökologische Nische“.

Um die prinzipielle *Leistungsfähigkeit* von kreisförmigen Prozessen bewerten zu können, wird in Abschnitt 4 die Modellstruktur nochmals reduziert, so dass schließlich ein Minimalsystem vorliegt, welches einer elementaren informationstheoretischen Analyse zugänglich ist.

Dabei wird deutlich, dass der Aktions-Perzeptionszyklus als eine informationsverarbeitende Kette aufgefasst werden muss, bei der ein sensorischer Informationskanal und eine Menge von aktuatorischen Informationskanälen hintereinander geschaltet sind [4]. Dies ermöglicht einerseits die raumzeitliche Betrachtung kognitiver Prozesse, andererseits können wichtige Schlüsse bezüglich der dabei stattfindenden Entscheidungs- und Übertragungsprozesse gezogen werden. Darüber hinaus kann ein quantitatives Maß angegeben werden, mit dem die Effizienz des Aktions-Perzeptionszyklus gemessen und verglichen werden kann.

Abschließend werden der aktuelle Stand der Realisierung sowie konzeptionell weiterführende Gedanken angesprochen. Schließlich wird eine Methode für das Strategietraining vorgestellt, welche auf der semantischen Struktur der Aktionsmöglichkeiten aufsetzt und mit der die Einschränkung auf eine festgelegte Menge von Aktionsmöglichkeiten fallen gelassen werden kann.

2 Funktion und Struktur kognitiver Systeme

In diesem Abschnitt werden zunächst die wichtigsten Funktionen kognitiver Systeme herausgestellt. Diese können weitgehend unter einem gemeinsamen Dach – der *Informationsverarbeitung* – zusammengefasst werden. Die Beschreibung typischer kognitiver Funktionen, wie die Fähigkeit zum Unterscheiden und Entscheiden, der Aufmerksamkeitssteuerung sowie dem Lernen und der Adaption wird sich daher am Informationsbegriff orientieren müssen. Außerdem hat die Unterscheidung zwischen Innenperspektive und Außenperspektive zur Folge, dass sowohl auf die von außen beobachtbaren Vorgänge als auch auf die im Subjekt stattfindenden Vorgänge Bezug genommen werden muss. Zusammen mit neurophysiologischen Befunden führen die daraus abgeleiteten Funktionen schließlich zu strukturellen Betrachtungen.

Phänomenologisch motivierte Funktionen. Mit der Einnahme einer Innenperspektive stehen die Vorstellungen des Subjekts im Mittelpunkt der Betrachtungen. Bereits in den 1960-Jahren wurde erkannt, dass zur Beschreibung von Vorstellungen der von SHANNON definierte Informationsbegriff nicht ausreicht [5]. Vielmehr muss zwischen selektiver Information und deskriptiver Information unterschieden werden. Deskriptive Information setzt sich aus struktureller Information, welche durch die Unterscheidung logischer Freiheitsgrade gekennzeichnet ist, und metrischer Information zusammen. Verfügt man über deskriptive Information, dann lassen sich Vorstellungen unterscheiden und können benannt werden. Datentechnisch können Vorstellungen beispielsweise durch Merkmal-Werte-Relationen modelliert werden. Dabei ist zu beachten, dass in diesen Strukturen die Dimension der Zeit nicht enthalten ist. Der Grund dafür ist, dass kognitive Systeme berücksichtigen müssen, dass Bewegungen in der Zeit grundsätzlich irreversibel sind. Um jedoch höhere kognitive Funktionen zu entwickeln – und damit an die Gegenwart gebundenes instinktives Verhalten zu überwinden – ist eine Verknüpfung von Vorstellungen aus Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft erforderlich [2]. Eine mögliche Lösung besteht darin, *die Zeit in einen Raum zu überführen*. Mit dieser Transformation werden reversible Bewegungen in einem „Zeit-Raum“ ermöglicht, so dass bei der Bewältigung von Problemen bspw. Vorhersagen oder mentale Probehandlungen verwendet werden können

Ein weiterer wichtiger Aspekt von kognitiven Handlungen ist die Interaktion mit der Umgebung. Um unterscheidbare Vorstellungen zu kommunizieren, kann man sich – der zentralen Einsicht SHANNONS folgend – auf ein Auswahlproblem zurückziehen und die dafür notwendige selektive Information bestimmen. In diesem Fall werden Vorstellungen als mentale Objekte verstanden, deren Entropie bzw. deren Kodieraufwand berechnet werden kann. Übertragen auf das sprachliche Kommunikationsproblem kann daraus geschlossen werden, dass die Bedeutung sprachlicher Äußerungen durch deren selektive Funktion charakterisiert werden kann [5]. Dieser Aspekt wird im nächsten Abschnitt genauer betrachtet.

Sprachlich motivierte Funktionen. Die Repräsentationen von Vorstellungen sind durch partielle Ordnungen gekennzeichnet, dagegen liegen bei Zeichenfolgen Totalordnungen vor [6]. Auf diese beiden mathematischen Eigenschaften sind zwei charakteristische Grenzübergänge zurückzuführen, die natürlich auch bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen: der Übergang von der Vorstellung zum Zeichen und vom Zeichen zum Signal.

Die Schwierigkeit in Bezug auf den ersten Grenzübergang besteht darin, Vorstellungen so für eine Übertragung umzuformen, dass die vom Sender intendierte Vorstellung beim Empfänger auch wieder zuverlässig ausgelöst wird.

Auch die Signalwerte gehorchen einer Totalordnung, sie sind jedoch im Gegensatz zu den semantischen und syntaktischen Einheiten durch einen kontinuierlichen Wertevorrat gekennzeichnet. Bei diesem Grenzübergang liegt die Schwierigkeit in der Erhaltung der relevanten Signalinformation, welche typisch für das jeweilige Zeichen ist.

Schließlich spielt auch die Auffassung, dass die Zeichenebene bzw. die syntaktische Ebene als Mittler zwischen Signal und Vorstellung auftritt, eine wichtige Rolle. Diese Interpretation lässt nämlich die Schlussfolgerung zu, dass wohl vor allem die Entwicklung der Grammatik für die herausragenden kommunikativen Fähigkeiten des Menschen verantwortlich ist. Diese These belegen Experimente, die zeigen, dass Primaten im Vergleich zum Menschen lediglich mit einfachen grammatikalischen Strukturen umgehen können, wogegen kompliziertere Strukturen nur vom Menschen beherrscht werden. Dabei konnte auch nachgewiesen werden, dass diejenigen Gehirnareale welche mit grammatikalischen Strukturen operieren, zu den jüngeren Bestandteilen des menschlichen Gehirns gehören [7].

Informationstheoretisch motivierte Funktionen. Die beiden oben beschriebenen Grenzübergänge sind aus der Sicht des Perzeptionsmoduls mit einem Informationsverlust verbunden, dagegen benötigt das Aktionsmodul zusätzliche individuelle „Detailinformation“, welche zeitbehaftet ist. Die dabei stattfindenden Prozesse werden mit den Begriffen Abstraktion und Konkretisierung belegt. Bei der Abstraktion wird unter Verwendung von Modellen die strukturelle Information über die Zeichen der entsprechenden Ebene extrahiert, wobei schrittweise Detailinformation entfernt wird. Bei der Detailinformation kann es sich bspw. um eine Information über die Identität der Informationsquelle handeln. Diese Information muss dann bei einer Konkretisierung wieder hinzugefügt werden. Der dabei in efferenter und afferenter Richtung auftretende Informationsfluss kann zur Realisierung von kognitiven Funktionen genutzt werden, darauf geht der folgende Abschnitt ein.

Bidirektionale Informationsverarbeitung. In der Einführung wurde bereits darauf hingewiesen, dass mit der Einnahme von Innen- oder Außenperspektive unterschiedliche Wirkungen beschrieben werden können. Mit der Einnahme der Außenperspektive kann beobachtet werden, dass Signale einen Zustandswechsel in der Umgebung hervorrufen können. Nimmt man dagegen die Innenperspektive ein, dann stellt die Auswahl der Aktionen bzw. der Hypothesen über die zu erzielenden Effekte eine Wirkung dar, welche nicht von außen beobachtbar ist. Hypothesen werden von Modellen generiert, welche den von der Philosophie unterstellten Kategorien im Inneren des Subjekts entsprechen. Zusammen mit den perzeptiv aufgenommenen Signalen – welche grundsätzlich gestört sein können – besteht damit die Möglichkeit, die von innen erzeugten Hypothesen zu bewerten und somit Objekte der Außenwelt „aposteriori“ zu rekonstruieren. In Verbindung mit der Verarbeitung von unsicherer Information scheint hier ganz offensichtlich eine Anwendung des BAYES'schen Prinzips vorzuliegen. Die Berücksichtigung beider Perspektiven lässt sich jedoch nicht nur bei der Perzeption gewinnbringend ausnutzen sondern auch bei der Kontrolle der Aktionen. Wie weiter oben erläutert wurde, wird bei der Generation von Aktionen zusätzlich Detailinformation hinzugefügt. Mit der Rückführung einer bereits erzeugten Aktion kann kontrolliert werden, ob dabei die strukturelle Information der intendierten Aktionen erhalten geblieben ist, oder ob durch die hinzugefügte Detailinformation eine Verwechslung von Zeichen wahrscheinlicher wird.

Mit diesen Ausführungen kann das Konzept der bidirektionalen Informationsverarbeitung nicht nur neurophysiologisch sondern auch funktional begründet werden. Folglich müssen – in Bezug auf die Struktur kognitiver Systeme – die Verarbeitungsmodule Perzeption und Aktion in allen Hierarchieebenen auf gemeinsam genutzte Modelle zugreifen können. Mit der Berücksichtigung der Innen- und Außenperspektive können außerdem Ereignisse detektiert werden, die auf eine geringe „Veridikalität“ hinweisen. Damit ergeben sich weitere nützliche Möglichkeiten der Informationsverarbeitung wie die Steuerung der Aufmerksamkeit und der Adaptionsfähigkeit. Interpretiert man derartige auslösende Ereignisse als „innere Signale“, so stehen diese in engem Zusammenhang zu *Emotionen* in natürlichen Systemen und wären somit integrativer Bestandteil eines kognitiven Agenten.

Verhaltenssteuerung. Um zielgerichtetes Verhalten zu erlernen (Strategie), wird nun erstmals auch der Wert einer Information berücksichtigt. In der theoretischen Psychologie ist erst dann von einem Ziel die Rede, wenn seine Erreichung rückgemeldet wird und mit einem Sollwert verglichen wird [2]. Auf diesem Prinzip basiert auch das sogenannte „Reinforcement Learning“. Im Verlauf der Lernphase wird dort jeder Aktion in jedem Zustand ein Wert zugewiesen, der angibt, in welchem Maße die ausgewählte Aktion eine Annäherung an das Ziel zur Folge hat. Damit lässt sich die gesamte Umgebung als ein Wertegebirge interpretieren, welches für den kognitiven Agenten eine handlungsleitende Funktion hat.

Das sich dabei einstellende Verhalten kann von außen beobachtet werden. Bei Einnahme dieser Perspektive kann die Bedeutung von Handlungen aus den in der Umgebung vorherrschenden Vorbedingungen und den nachfolgenden Konsequenzen gemäß dem ABC-Schema ermittelt werden [8]. Hier lässt sich die Bedeutung also an ihren Wirkungen in der Umgebung erkennen. Dabei kann der Beobachter durchaus eine Semantik erwerben, die sich nicht unbedingt mit der Semantik der Innenperspektive decken muss, aber zu ihr kompatibel sein kann, so dass eine zweckdienliche Kommunikation ermöglicht wird.

Um den Anforderungen eines finalen Systems zu genügen, muss sich der kognitive Agent an eine sich verändernde Umgebung anpassen können. In der Regel geschieht dies durch Anpassungen des Wertegebirges. Wenn jedoch in der Umgebung Hindernisse auftreten, die den Zugang zum Ziel verweigern, dann liegt das daran, dass der perzeptive- und/oder der aktuatorische Bauplan für diesen Fall nur unzureichend ausgestattet wurde. Hier bietet die theoretische Psychologie eine Lösung an, welche mit dem Begriff „Bewältigungsverhalten“ oder Coping bezeichnet wird [2].

Struktur kognitiver Systeme. Um die Struktur kognitiver Systeme präziser spezifizieren zu können, müssen sich die oben angestellten funktionalen Überlegungen in den Perzeptions-Aktionszyklus einbetten lassen. Die Grobstruktur kognitiver Systeme nach Abbildung 1a) erfährt dabei zwei wichtige Verfeinerungen.

Um die Vorstellungen der Innenperspektive zu berücksichtigen, müssen zum einen die Verarbeitungsmodule Perzeption und Aktion um eine semantische Ebene erweitert werden. Die Perzeption teilt sich damit in die Module Analyse und Interpretation auf. Das Verarbeitungsmodul Aktion wird in die Module Artikulation und Synthese aufgeteilt. Zum anderen findet in den neu eingeführten Modulen eine bidirektionale Informationsverarbeitung statt. Damit können die von „innen“ erzeugten Hypothesen durch die von „außen“ eintreffenden Signale bewertet werden und es kann kontrolliert werden, ob die generierten Aktionen mit den intendierten Vorstellungen übereinstimmen. Die aus diesen Überlegungen abgeleitete Feinstruktur zeigt Abbildung 1b).

3 Konzeption eines Minimalsystems

In der vorliegenden Konzeption wird das „Mouse-Maze“-Problem als ein Kommunikationsproblem aufgefasst, bei dem zwei NAUTA'sche I-Systeme miteinander interagieren. Beide Systeme – Maus und Umgebung – sind sowohl Sender als auch Empfänger und können ihren

Zustand bei Empfang eines Zeichens ändern [9]. Die Dynamik beider Systeme wird jedoch unterschiedlich modelliert. Während das dynamische Verhalten der Maus durch eine Verhaltenssteuerung charakterisiert ist, wird das dynamische Verhalten der Umgebung von Bewegungsgleichungen bestimmt. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass im Gegensatz zur Umgebung nur die Maus über Vorstellungen verfügen sollte. Deren Herkunft soll hier zunächst nicht weiter interessieren. Um sich in der Umgebung orientieren und bewegen zu können, wird die Maus also mit einer Raumvorstellung und einer Bewegungsvorstellung ausgestattet.

Im Folgenden wird nun ein Überblick zur Modellierung nach Abbildung 1b) am Beispiel eines vollständigen kybernetischen Zyklus gegeben. Anschließend erfolgt die detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten.

Um die von der Verhaltenssteuerung ausgewählte Vorstellung zu kommunizieren, wird sie zunächst von einer regulären Grammatik in eine semantiknahe Zeichenfolge und – weiter unten in der Hierarchie – in eine signalnahe Folge von Elementarzeichen überführt. Anschließend werden die dazugehörigen Aktionssignale synthetisiert, wobei den elementaren Zeichenmodellen *zeitbehaftete Detailinformation* hinzugefügt wird. Die Synthese erfolgt über hierarchisch angeordnete stochastische Zustandsmodelle, welche als Signalausgabe Vektorfolgen $\vec{x} = (\vec{x}^1, \vec{x}^2, \dots, \vec{x}^K)$ der Länge K liefern [10]. Die Signalübertragung erfolgt in unserem Modell über einen Vektorkanal. Die Modellierung der Umgebung besteht aus drei Komponenten: der Überführung des Vektorsignals in Zeichen, der Ausführung der Bewegungsgleichung und der Überführung des Ausgabezeichens in ein Vektorsignal. Nach der Signalübertragung obliegt es dem kognitiven System, die ausgewählten Hypothesen „aposteriori“ durch das empfangene Signal zu bewerten.

Modellierung der Verhaltenssteuerung. In unserem Minimalbeispiel soll für jede Position im Labyrinth diejenige Aktionsfolge bestimmt werden, mit der der kostengünstigste Weg zum Ziel gewählt wird. Als Ergebnis des dazugehörigen (unüberwachten) Lernvorgangs erhält man die dem Verhalten zugrundeliegende Strategie, diese entspricht einer Abbildung $a = \pi(z)$. Die Modellierung beruht hier auf der Grundlage von Markov-Entscheidungsprozessen (MDP bzw. POMDP), bei der nun zusätzlich der Wert der aufgenommenen Information berücksichtigt wird. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden für determinierte bzw. nichtdeterminierte Umgebungen findet sich in [11]. Die Entscheidung für die Verwendung des MDP im Minimalsystem wird im Abschnitt 4 begründet.

Raumvorstellung. Der 2-dimensionale Raum wird als Gitterwelt aufgefasst, deren Elemente durch die Werte der Spalte C und der Zeile R (logische Freiheitsgrade bzw. Merkmale) einer Matrix adressiert werden. Die Werte des Merkmals Zeile entstammen der ganzzahligen Menge $W_R = \{1..N_R\}$, dagegen werden die Werte des Merkmals Spalte von der Menge $W_C = \{1..N_C\}$ bestimmt. Die Menge der möglichen Zustände erhält man durch Bildung des kartesischen Produkts $Z = W_R \times W_C \rightarrow \{1..N_Z\}$. Die einzelnen Zustände entsprechen demnach Wert-Wert-Relationen, mit ihnen können die Elemente der Gitterwelt benannt werden (Abbildung 2-rechts).

Bewegungsvorstellung. Bewegungen werden im kartesischen Koordinatensystem beschrieben. Dazu werden im 2-dimensionalen Raum die vertikale- und die horizontale Achse als Merkmale bzw. logische Freiheitsgrade aufgefasst. Die Werte der beiden Merkmale beschränken sich auf die Menge $W_C = W_R = \{-1,0,1\}$. Zwischen den Werten dieser beiden Mengen können ebenfalls Relationen gebildet werden. Zunächst sollen nur fünf Wert-Wert-Relationen unterschieden werden: die Himmelsrichtungen N, S, W, O sowie NOP . Diese stellen das Aktionsrepertoire des kognitiven Systems dar (Abbildung 2-links).

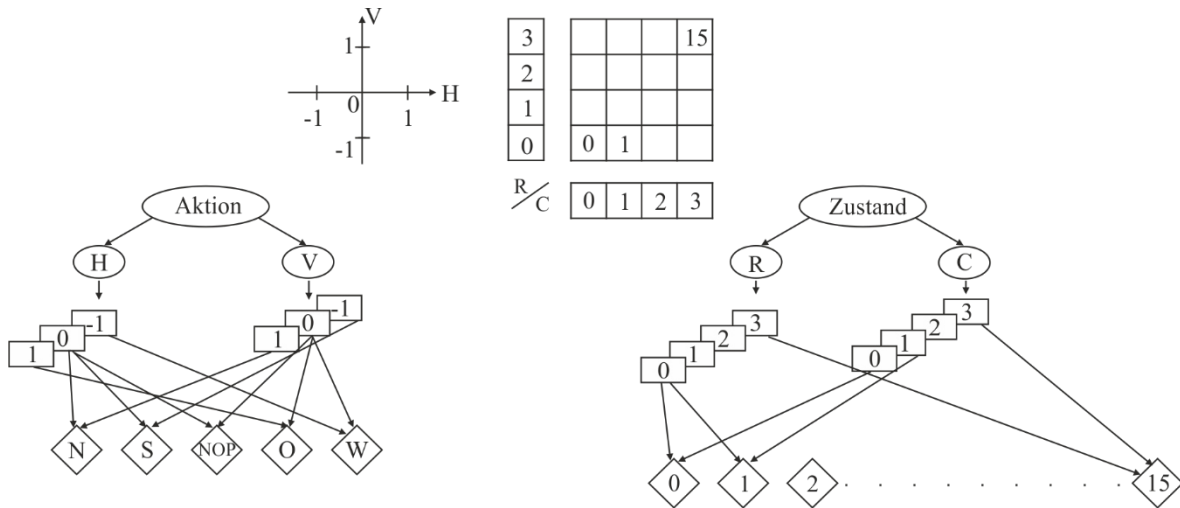


Abbildung 2 – Raum- und Bewegungsvorstellungen modelliert durch Merkmal-Werte-Relationen.

Syntaktische Ebene. Mit der Modellierung der Bewegungsvorstellung können maximal 3^2 Wert-Wert-Relationen kodiert werden, dies entspricht einer Ternärkodierung mit 2 aufeinander folgenden Zeichen aus der Menge $\{-1,0,1\}$. Die dazugehörige Syntax lässt sich durch eine reguläre stochastische Grammatik, d.h. einem diskreten HMM mit zwei Zuständen beschreiben, wobei in jedem der zwei Zustände eines der 3 Ternärzeichen emittiert wird. Diese semantiknahe Zeichenfolge wird anschließend in eine signalnahe Zeichenfolge übersetzt, welche sich aus elementaren Binärzeichen der Menge $\{0,1\}$ zusammensetzt. Um auf dieser Ebene die Elemente des Ternärkodes zu unterscheiden, werden 2 Binärzeichen benötigt, so dass insgesamt 4 aufeinanderfolgende Binärzeichen pro Vorstellung gebraucht werden. Die Übersetzung zwischen den beiden Ebenen erfolgt durch eine sequentielle Komposition von zwei „arc-emission“ HMM, welche natürlich auch von zwei FST repräsentiert werden können.

Die Beschränkung auf die fünf gültigen Zeichenfolgen wird durch die semantische Ebene gesteuert. Hierzu ist eine Verknüpfung der MWR mit der regulären Grammatik nach Abbildung 3 notwendig. Eine „saubere“ systemtheoretische Modellierung dieses Grenzübergangs in beiden Informationsrichtungen beschreiben wir in [12].

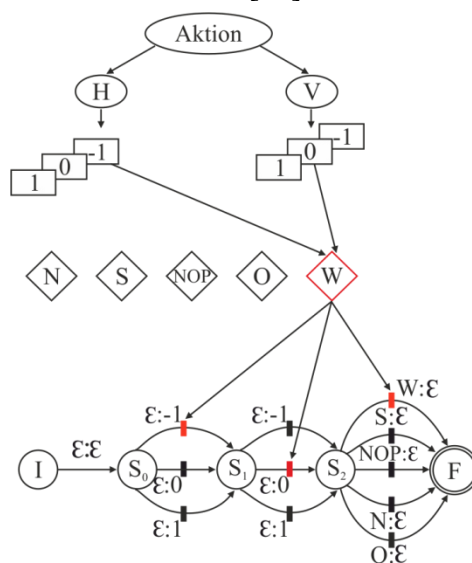


Abbildung 3 – Verknüpfung einer MWR mit einer automatenähnlichen Grammatik. Die Auswahl eines konkreten Ternärkodes bedarf der Aktivierung der entsprechenden Zustandsübergänge durch die zugehörige Wert-Wert-Relation auf der semantischen Ebene.

Zeichenmodelle. Die Modellierung der binären Elementarzeichen orientiert sich an der Struktur von *Deep Neural Networks* (DNN), die sich aus kaskadierten, generativen Modellen zusammensetzen und in der Sprachverarbeitung auf der akustischen Ebene verwendet werden [16]. Im Experimentiersystem basiert die Modellierung der Elementarzeichen auf der im ingenieurwissenschaftlichen Umfeld weit verbreiteten Zustandsraumdarstellung, wobei hier ebenfalls die hierarchische Anordnung der Modelle berücksichtigt wird.

Für die Verarbeitung von unsicherer Information wird ein stochastisches Zustandsraummodell (HMM) verwendet. Dieses Modell wird durch eine Transitions- und eine Ausgabegleichung beschrieben. Dabei entspricht die Systemmatrix \mathbf{A} den Transitionen $G(z'|z)$ und die Ausgabematrix \mathbf{C} der Kopplung $H(\omega|z)$ zwischen den Zuständen z und den Gaußmixturen ω des HMM.

$$\begin{aligned} p[z(k+1)] &= \mathbf{A} \cdot p[z(k)] + \pi\delta(k) \\ p[\omega(k)] &= \mathbf{C} \cdot p[z(k)] \end{aligned} \quad (1)$$

Neben diesen beiden Gleichungen wird üblicherweise die Initialisierung $p[z(k=0)] = \underline{0}$ gewählt, weiterhin wird gelegentlich die Anfangsbedingung $p_0[z(k)] = \underline{0}$ berücksichtigt. Bei der Kaskadierung von HMM's (CHMM) kann dies für die Kopplung der dabei entstehenden Hierarchieebenen genutzt werden. Damit sind alle Ebenen des CHMM an den Takt der untersten Ebene gebunden. Dieses Synchronisationsprinzip wird sowohl bei CHMM als auch bei bidirektionalen CHMM (CBHMM) verwendet [10].

Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Modellierung der hierarchisch organisierten Zeichen aufgrund der unterschiedlichen Funktionen der bidirektionalen Informationsverarbeitung für die Synthese und die Analyse voneinander unterscheidet. Auf der Syntheseseite erfolgt die Signalgenerierung (Top-Down-Synthese) durch einfache CHMM's. Die Bottom-Up-Analyse (Rückführung des generierten Aktionssignals) hat hier lediglich eine Kontrollfunktion, wobei die Verknüpfung der jeweiligen Informationsflüsse nicht nötig ist. Dies gilt jedoch nicht für die Analyse der Eingabezeichen durch CBHMM's, denn um eine „veridikale“ Wahrnehmung zu ermöglichen, müssen Hypothesen und Beobachtungen im BAYES'schen Sinne miteinander verknüpft werden.

Signale und Übertragungskanal. Die Modellierung der Signale verbleibt auf der Ebene von Vektorfolgen und wird von den Gaußmixturen der Zeichenmodelle bestimmt. Die Übertragung der Vektorfolgen erfolgt über einen linearen Vektorkanal, so dass Störungen und Kanaleigenschaften berücksichtigt werden.

Umgebung. Das dynamische Verhalten der Umgebung wird mit zwei Bewegungsgleichungen auf der Zeichenebene charakterisiert.

$$z_{k+1} = g(z_k, m_k) \quad \text{bzw.} \quad w_k = h(z_k, m_k) \quad (2)$$

Um einen Bewegungsschritt zu ermöglichen, überführen wir das empfangene Signal zunächst in einen Binärkode, so dass ein Aktionszeichen m_k ausgewählt werden kann. Anschließend erfolgt der entsprechende Zustandsübergang und die Zeichenausgabe w_k . Mit der Zuordnung des Binärkodes kann nun das entsprechende Ausgabesignal erzeugt und dem Übertragungskanal zugeführt werden.

Technologische Anmerkung. Sowohl bei der Analyse und Interpretation als auch bei der Artikulation und Synthese sind zwei charakteristische Grenzübergänge zu überwinden. Zur Lösung dieser Problemstellung wurden kürzlich Subsymbol-Symbol-Transduktoren (SST) und Petrinetz-Transduktoren (PNT) vorgestellt [13], [14], mit denen die beiden Grenzübergänge durch Komposition beschrieben werden können. Die Komposition von PNT's und FST's übersetzt Bedeutungen (beschriftete Partialordnungen) in Zeichenfolgen (beschriftete Totalordnungen), die Komposition von FST's und SST's übersetzt Zeichenfolgen in Signale.

4 Informationstheoretische Bewertung

Die informationstheoretische Betrachtung von nachrichtentechnischen Modellen geht auf die Vorstellung zurück, dass Quelle und Senke als Zufallsprozesse modelliert werden können. Eine Informationsübertragung liegt dann vor, wenn zwischen den Zufallsvariablen statistische Abhängigkeiten nachgewiesen werden können. Diese werden durch die Verbundverteilung $P(X, Y)$ erfasst. Um nun auch kreisförmig organisierte Prozesse einer statistischen Modellierung zugänglich zu machen, kann dieses Konzept geringfügig erweitert werden, indem die Verbundverteilung $P(Z', Z, C)$ zugrunde gelegt wird. Hier werden der Zustand Z und der Folgezustand Z' der Umgebung sowie der Zustand des kognitiven Agenten C als Zufallsvariablen aufgefasst. Die mathematische Analyse kann dabei sowohl beim Übergang vom Start- zum Zielzustand (Transition) als auch vom Anfangs- zum Schlusszustand (vollständige Wege) ansetzen. Der zuletzt genannte Ansatz greift dabei lediglich auf das Prinzip der dynamischen Programmierung zurück.

Um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen, kann der Agent grundsätzlich zwei Strategien verfolgen: a) Steuerung ohne Kenntnis des Zustands der Umgebung (open-loop) und b) Steuerung mit Kenntnis des Zustands (closed-loop). In beiden Fällen gilt es, die Unsicherheit über das zu steuernde System zu reduzieren.

$$\Delta H_{closed} = H(Z) - H(Z')_{closed} \quad \text{bzw.} \quad \Delta H_{open} = H(Z) - H(Z')_{open} \quad (3)$$

Dabei interessiert vor allem die quantitative Bewertung des Gewinns an Stabilität, den die Strategie b) über die Strategie a) erzielen kann. In [4] wird nachgewiesen, dass dieser Gewinn durch die vom kognitiven Agenten aufgenommene Information begrenzt ist:

$$\Delta H_{closed} - \Delta H_{open} \leq I(Z, C) \quad (4)$$

Setzt man (3) in (4) ein, kann dieser Gewinn, in Analogie zu thermodynamischen Prozessen, quantitativ als Wirkungsgrad erfasst werden.

$$\eta = \frac{H(Z')_{open} - H(Z')_{closed}}{I(Z, C)} \quad (5)$$

Um den Wirkungsgrad zu ermitteln, müssen für beide Strategien zunächst die entsprechenden Faktorisierungen der Verbundverteilung vorgenommen werden, anschließend können die zugehörigen Marginalverteilungen berechnet werden:

$$P(z')_{open} = \sum_c P(c) \cdot \sum_z P(z' | z, c) \cdot P(z) \quad (6)$$

$$P(z')_{closed} = \sum_c P(c) \cdot \sum_z P(z' | z, c) \cdot P(z | c) \quad (7)$$

Die Struktur der zweiten Marginalverteilungen zeigt, dass bei der „closed-loop“-Strategie zwei Typen von Informationskanälen auftreten: der Sensorkanal $P(c | z)$ und eine Menge von Aktuatorkanälen $P(z' | z, c)$. Mit der BAYES'schen Beziehung $P(z | c) = P(c | z)P(z) / P(c)$ kann nun der entscheidende Unterschied zwischen den Strategien a) und b) verdeutlicht werden. Die „open-loop“-Strategie greift lediglich auf die a-priori Verteilung der Zustandsvariablen Z zu, dagegen hat die „closed-loop“-Strategie Zugriff auf deren a-posteriori Verteilung.

Der maximale Wirkungsgrad wird genau dann erzielt, wenn eine vollständige Abhängigkeit zwischen den Zufallsgrößen Z und C vorliegt. In praktischen Fällen wird das zwar selten der Fall sein, aber für den Systementwurf kann man daraus schließen, dass Entscheidungen so spät wie möglich getroffen werden sollten. Jede frühzeitige Entscheidung würde die mutuale Information $I(Z; C)$ verringern und damit einen Abfall des Wirkungsgrades zur Folge haben.

Bei genauerer Betrachtung lassen sich 3 Fälle unterscheiden:

- $I(Z; C)$ verschwindet \rightarrow „open-loop“-Strategie
- $I(Z; C)$ nimmt den Maximalwert an (direkter Zugriff auf den Zustand Z) \rightarrow „closed-loop“-Strategie (MDP)
- $I(Z; C)$ kleiner als der Maximalwert (indirekter Zugriff auf den Zustand Z) \rightarrow „closed-loop“-Strategie (POMDP)

Um auf die obere Grenze der Leistungsfähigkeit kreisförmiger Prozessen schließen zu können, muss demnach auf die MDP-Modellierung referenziert werden. Bei der realistischen POMDP-Modellierung muss zusätzlich ein Sensor kanal berücksichtigt werden, so dass der Wirkungsgrad abfällt. Um diesen Abfall minimal zu halten, muss aus der Beobachtung eine optimale Schätzung des Zustands gewonnen werden. Hier liegt ein typischer Anwendungsfall für die Klasse der Bayes-Filter vor. Die untere Grenze der Leistungsfähigkeit stellt die „open-loop“ dar.

5 Bewältigungsverhalten

In einem technischen System sind adaptive Fähigkeiten bspw. dann erforderlich, wenn „stillschweigend“ angenommene Vereinbarungen zwischen dem kognitiven System und der Umgebung fallengelassen werden. In natürlicher Umgebung können derartige Vereinbarungen erst durch eine vorangegangene Interaktion erworben werden. In unserem Minimalbeispiel besteht eine solche Vereinbarung z.B. darin, dass Umgebung und kognitiver Agent die Reihenfolge der Zeichen auf die gleiche Weise interpretieren. Ein ähnlich gelagertes Problem stellt die Vertauschung von MSB und LSB bei digitalen Systemen dar. Eine Lösung wird sichtbar, wenn das kognitive System mit Raum- und Bewegungsvorstellungen ausgestattet wird. Durch Probehandlungen und Rückmeldung der Effekte kann hier eine Adaption an die Umgebung bzw. eine Synchronisation mit der Umgebung erzielt werden. Diese Synchronisation ist eine notwendige Voraussetzung, um ein inneres dynamisches Modell der Umgebung zu erstellen. In unserem Beispiel können derartige Unterscheidungen ohne zusätzliche Synchronisationszeichen gefunden werden. Dies gelingt, indem bei der Synthese auch der zugeführten zeitbehafteten Detailinformation Strukturen (z.B. eine spezifische Modellierung der Zustandsdauer) aufgeprägt werden [10].

Mit der Einnahme einer biologischen Perspektive wird die natürliche Funktion der Adaptation noch deutlicher. In der Gitterwelt ist Adaptation bspw. dann erforderlich, wenn sich die Anordnung der Hindernisse oder die Zielposition ändert. Hier genügt in der Regel eine Anpassung des inneren dynamischen Modells (Transitionsmodell). Ein solches Modell ist jedoch an die Aktionsmöglichkeiten des kognitiven Agenten gebunden, welche häufig erbkoordiniert fest vorgegeben sind. Dies ist jedoch kritisch, wenn Situationen eintreten, in denen das Erreichen der Zielposition durch die Umgebung verwehrt wird. Hier kann nun das Problem vorliegen, dass sich die verfügbaren Aktionen als untauglich erweisen. Bei natürlichen Systemen kommt hier der sogenannte Coping-Apparat zum Einsatz. Bei der vorliegenden Problemstellung muss dieser an den Bewegungsvorstellungen angreifen und neue Aktionen suchen, welche das Erreichen der Zielposition ermöglichen (z.B. eine Diagonalebewegung nach Abbildung 4).

Die Idee des Bewältigungsverhaltens greift jedoch weiter. In der theoretischen Psychologie werden vom Coping-Apparat folgende Eigenschaften gefordert: Kreativität, Lernfähigkeit und Universalität. Darüber hinaus werden zwei Coping-Strategien unterschieden: während die nach außen gerichtete alloplastische Strategie versucht, die Umgebung zu verändern, zielt die nach innen gerichtete autoplastische Strategie auf eine Veränderung innerer Strukturen. Da der Coping-Apparat universell einsetzbar sein soll, müssen jegliche Änderungen nach dem

gleichen Prinzip vorgenommen werden können. Insbesondere muss dessen Aktivierung durch Ereignisse erfolgen, welche die entsprechende Information über den Auslöser enthält [2].

In unserem Minimalbeispiel können wir autoplastisches Coping auf der semantischen Ebene demonstrieren. Dabei werden neue Wert-Wert-Relationen basierend auf der Bewegungsvorstellung nach Abbildung 2 erworben. Das gleiche Prinzip gilt auch für den Erwerb und für die Anpassung des Weltmodells, welches Raum- und Bewegungsvorstellungen zueinander in Beziehung setzt. Allerdings wird dabei nach Relationen zwischen Relationen von Bewegungsvorstellung und Relationen von Raumvorstellungen gesucht. Die Realisierung einer autoplastischen Coping-Strategie beschreiben wir detailliert am Beispiel der Bewegungsvorstellung in [15].

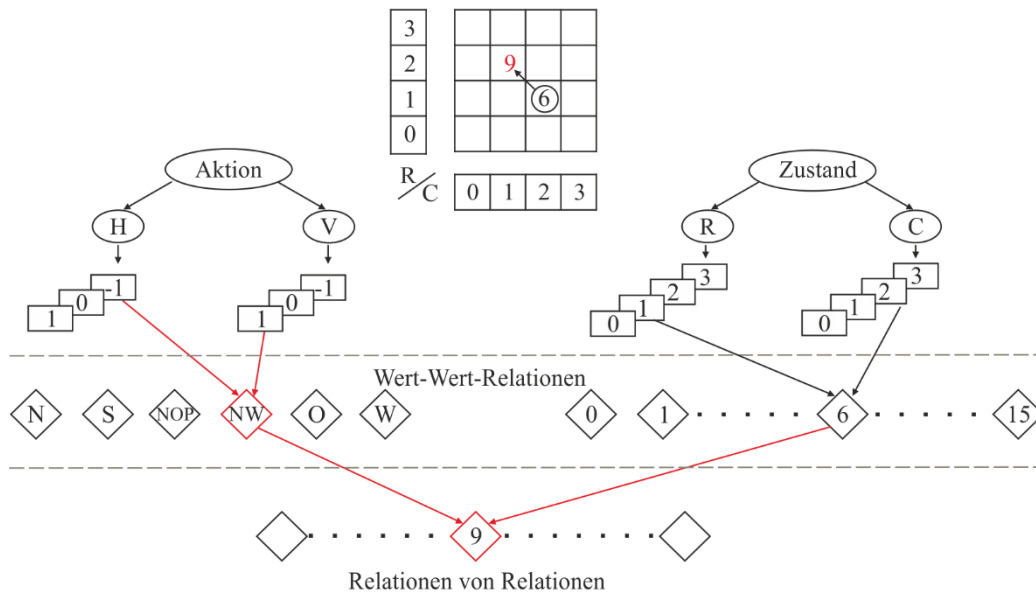


Abbildung 4 – Semantische Strukturen für autoplastisches Coping. Neues Handlungsrepertoire (NW) findet der Agent in bisher ungenutzten Wert-Wert-Relationen. Dagegen wird eine Anpassung an die Umgebung durch die Bildung neuer Relationen zwischen Bewegungs- und Raumvorstellungen ermöglicht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem hier ausgeführten Konzept können wichtige und für den Ingenieur neuartige psychologisch motivierte Algorithmen demonstriert und untersucht werden, so dass Funktion und Struktur sowie die Leistungsfähigkeit kognitiver Systeme verdeutlicht werden können. Zukünftige Entwicklungen betreffen die folgenden zwei Schwerpunkte.

Forschung. Zunächst muss die bidirektionale Verarbeitung auf die syntaktische und die semantische Ebene ausgeweitet werden. Mit der Verfügbarkeit von Hidden-Markov-Automaten (HMA) und Petrinetz-Transduktoren (PNT) sollen die Verarbeitungsmodulare Perzeption und Aktion eine direkte Übersetzung der Signale in Vorstellungen und umgekehrt bewirken. Schließlich muss der Beobachtungskanal und das Bayes-Filter in den kognitiven Agenten integriert werden. Daraus folgt einerseits die Ausweitung der Modellierung auf POMDP, andererseits entfaltet der bidirektionale Ansatz damit dann auch seine Wirkung auf der perceptiven Seite. Auf der semantischen Ebene steht die Entwicklung der nicht *bereichsspezifischen* Arbeitsweise des Coping-Apparats im Vordergrund.

Lehre. Für den Einsatz in der Lehre ist zunächst ein Konzept für die Durchführung von Versuchen mit kognitiven Systemen zu entwickeln. Dabei sollten diejenigen Fähigkeiten kognitiver Systeme, welche sich mit der Feinstruktur aus Abbildung 1 erklären lassen, anschaulich demonstriert und deren Leistungsfähigkeit quantitativ bewertet werden.

Inhaltlich könnte auf die folgenden Fähigkeiten Bezug genommen werden:

- Synchronisation des kognitiven Systems mit der Umgebung,
- Erwerb eines Weltmodells für deterministische Umgebungen,
- Analysen zum Einfluss der bidirektionalen Verarbeitung beim Erwerb eines Weltmodells für nichtdeterministische Umgebungen,
- Erlernen von optimalen Strategien,
- Untersuchung von alloplastischen- und autoplastischen Coping-Strategien.

Die hier angegebene Reihenfolge kognitiver Fähigkeiten ist mit einem wachsenden Schwierigkeitsgrad verbunden, so dass auch ein vorlesungsbegleitender Einsatz angedacht werden kann. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems erfolgt durch die Messung informationstheoretisch motivierter Größen. Die wissenschaftliche Auswertung der Messung kann damit ebenfalls zum Gegenstand der Ausbildung werden.

Literatur

- [1] Römer, R.; Wirsching, G.: *Ein Beitrag zu den natur- und geisteswissenschaftlichen Grundlagen kognitiver Systeme*, 24. Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung, Bielefeld 2013, pp. 93- 102, TUDpress Dresden 2013.
- [2] Bischof, N.: *Psychologie, ein Grundkurs für Anspruchsvolle*, Verlag Kohlhammer, 2. Auflage, 2009.
- [3] Bischof, N.: *Struktur und Bedeutung, Eine Einführung in die Systemtheorie für Psychologen*, Verlag Hans Huber, Bern, 2. Auflage, 1998.
- [4] Touchette, H.; S. Lloyd, S.: *Information-theoretic limits of Control*, Phys. Rev. Lett. 84, 1156, 2000.
- [5] MacKay, D.M.: *Information, Mechanism and Meaning*, M.I.T. Press 1969, Second printing June 1972.
- [6] Wirsching, J.: *Calculating semantic uncertainty*, IEEE 3rd International Conference on Cognitive Infocommunications: (CogInfoCom 2012); Kosice, Slovakia 2012.
- [7] Friederici, A.D.: *Warum der Affe keine Sprache lernt*, Vortrag an der HTWK Leipzig, November 2012.
- [8] Skinner, B.F.: *Verbal Behaviour*, Copley Publishing Group, Acton 1957.
- [9] Nauta, D.: *The Meaning of Information*, Mouton, The Hague, Paris 1970.
- [10] Römer, R.: *Ein Multiskalen-Analyse-Synthese-System unter Verwendung von kaskadierten bidirektionalen Hidden-Markov-Modellen*, 25. Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung Dresden 2014, pp. 24- 31, TUDpress Dresden 2014.
- [11] Meyer, W.: *Modellierung und Implementierung einer kognitiven Verhaltenssteuerung*, Masterarbeit, BTU Cottbus-Senftenberg 2015.
- [12] Huber, M.; Römer, R.: *Modellierung des Semantik-Syntax-Grenzübergangs kognitiver Systeme am Beispiel des „Mouse-Maze“-Problems*, 26. Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung, Eichstätt 2015, (eingereicht).
- [13] Wolff, M.; Tschöpe, C.; Römer, R.; Wirsching, G.: *Subsymbol-Symbol-Transduktoren*, 24. Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung, Bielefeld 2013, pp. 197-204, TUDpress Dresden 2013.
- [14] Lorenz, R.; Huber, M.; Wirsching, G.: *On Weighted Petri Net Transducers*, Application and Theory of Petri Nets and Concurrency, 35th International Conference, Tunis 2014.
- [15] Wolff, M.; Römer, R.: *Modellierung von Bewältigungsverhalten mit Merkmal-Werte-Relationen*, 26. Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung, Eichstätt 2015, (eingereicht).
- [16] Hinton, G.; et al.: *Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition*, IEEE Signal Processing Magazine (2), November 2012.