

MODELLIERUNG DES SEMANTIK-SYNTAX GRENZÜBERGANGS KOGNITIVER SYSTEME AM BEISPIEL DES „MOUSE-MAZE“-PROBLEMS

Markus Huber Ronald Römer
Universität Augsburg BTU-Cottbus
markus.huber@informatik.uni-augsburg.de

Zusammenfassung: Die formale Beschreibung kognitiver Systeme erfordert gegenüber einfachen Regelkreisen die zusätzliche Einführung von zwei Verarbeitungsmodulen: Artikulation und Interpretation. Mit diesen Modulen erfasst diese Systemklasse nun auch die semantische Ebene, mit der wir Vorstellungen durch Merkmal-Werte Relationen darstellen können. Um Vorstellungen kommunizieren zu können, ist es notwendig, den Grenzübergang zwischen der semantischen und syntaktischen Ebene zu berücksichtigen. Dieser ist mathematisch durch den Übergang von Halbordnungen zu Totalordnungen gekennzeichnet. Dabei wird struktureller Überbau entfernt und Information über die Reihenfolge der semantischen Zeichen hinzugefügt. Sowohl die Merkmal-Werte Relationen als auch die Zeichenfolgen modellieren wir durch Petrinetz-Transduktoren (PNTen). Anschließend zeigen wir für beide Verarbeitungsrichtungen, dass der betreffende Grenzübergang durch die Komposition beider PNTen vollständig beschrieben wird. Damit können nun alle Elemente des Kognitiven Agenten, die oberhalb der Verarbeitungsmodule Artikulation und Interpretation angesiedelt sind, ebenfalls von PNTen modelliert werden. Naheliegender ist zunächst die Modellierung des Informationsstatus und des inneren Weltmodells. Wir zeigen, dass diese Strukturen ebenfalls durch elementare Kompositionen gewonnen werden können. Abschließend geben wir einen Ausblick auf Problemstellungen, deren Lösungen noch ausstehen.

1 Einleitung

Bei der Beschreibung von technischen kognitiven Systemen können nach [7] zwei Aspekte besonders hervorgehoben werden. Zum einen der funktionale Aspekt, dieser wird durch den sogenannten Perzeptions-Aktionszyklus erfasst [1]. Zum anderen ist aber auch der semiotische Aspekt zu nennen, dieser ist nach N. Bischof typisch für *Finale Systeme*. Diese Systemklasse kann als „biologisch“ geprägte Erweiterung der klassischen Systemtheorie aufgefasst werden. In [6] haben wir gezeigt, dass diese Systemklasse den Geltungsbereich für technische kognitive Systeme festlegt. Eine Besonderheit dieser Systemklasse besteht darin, dass der Informationsfluss zwischen dem kognitiven Agenten und der Umgebung immer an eine Zeichenübertragung gebunden ist. Unter einem Zeichen wird dabei ein Signal verstanden, das eine Bedeutung trägt. Das Zeichen kann somit als Bindeglied zwischen der ideellen Welt – den *Vorstellungen* – des kognitiven Agenten und der physikalischen Welt der Signale aufgefasst werden.

In Folge dieser Betrachtungen hat der Informationsfluss zwei charakteristische Grenzübergänge zu überwinden. Zunächst kann der Übergang vom Signal zum Zeichen betrachtet werden. Dieser wird systemtheoretisch durch Hidden-Markov-Transduktoren modelliert [9]. Dahinter verbirgt sich die Komposition eines elementaren Subsymbol-Symbol-Transduktors (SST) mit einem endlichen Transduktor (FST).

Der zweite Grenzübergang bezieht sich auf den Übergang vom Zeichen zur Bedeutung und umgekehrt. Dabei wird eine Zeichenfolge als beschriftete Totalordnung in eine *Merkmal-Werte*

Relation (MWR) als beschriftete Halbordnung übersetzt.

In dieser Arbeit werden sowohl für die Perzeptions- als auch für die Aktionsrichtung *Petrinetz-Transduktoren* (PNT) vorgestellt, mit denen nun auch der zweite Grenzübergang modelliert werden kann. Die Modellierung erfolgt am Beispiel eines kognitiven Experimentiersystems, welches wir in [7] beschrieben haben. Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht auch hier eine systemtheoretisch geprägte Sichtweise, nach der sich die PNTen dieses Grenzübergangs auf natürliche Weise aus einer Komposition zwischen einem FST für die Syntax und einem PNT für die Semantik ergeben. Eine solche – wieder im systemtheoretischen Sinne – optimale Anbindung von Semantik und Syntax ist insbesondere für Applikationen im Embedded-Bereich von Interesse, da die Erweiterung nach einem Minimalprinzip erfolgt. Abschließend wird eine semantische Modellierung des inneren Weltmodells und des Informationsstatus vorgestellt, mit denen sich schließlich auch die Modelle von stochastischen Entscheidungsprozessen (MDP bzw. POMDP) in die Verhaltenssteuerung einbinden lassen.

2 Das Experimentiersystem

Der Hintergrund des Systems geht auf das „Mouse-Maze“-Problem zurück. Darin wird eine Maus in einem Labyrinth ausgesetzt und muss den Weg zu einem Zielpunkt finden. Die genaue Beschreibung des Aufbaus findet sich in Abschnitt 3 in [7]. Für diesen Text werden hier nur die relevanten Anteile kurz vorgestellt.

Das Labyrinth besteht aus 16 Feldern, die in Zeilen und Spalten jeweils der Länge 4 angeordnet sind. Die Maus verfügt über 5 Bewegungsaktionen. Sie kann sich in die 4 Himmelsrichtungen bewegen oder auf der Stelle bleiben. Diese Bewegungen sind durch ihre Anteile in horizontaler und vertikaler Richtung gegeben.

Die Maus und das Labyrinth kommunizieren miteinander. Die Maus überträgt die Bewegung, die sie ausführen will als Sequenz von Zeichen kodiert an das Labyrinth, das der Maus mit der tatsächlich ausgeführten Bewegung in gleicher Weise antwortet. Dadurch ergibt sich für die Maus die Notwendigkeit, über Perzeptions- und Aktionsapparate zu verfügen.

Da die Maus sich als kognitiver Agent durch das Labyrinth zu einer Zielposition bewegen soll, muss sie weiterhin über eine Bewegungsvorstellung, eine Raumvorstellung, eine Weltvorstellung und eine Strategie verfügen.

Daraus ergibt sich, dass das Verhalten der Maus durch ihre Vorstellungen bestimmt wird und diese Vorstellungen an das Labyrinth zu übertragen sind. Da sich die Vorstellungen auf der Ebene der Semantik befinden, die zu übertragene Sequenz von Zeichen jedoch höchstens auf der Ebene von Syntax anzusiedeln ist, muss für die Übertragung die Grenze zwischen Semantik und Syntax überwunden werden.

3 Grenzübergänge zwischen Semantik und Syntax

In diesem Abschnitt beschreiben wir die angesprochenen Grenzübergänge zwischen den Bereichen Semantik und Syntax. Dabei handelt es sich jeweils um Übersetzungen zwischen Halb- und Totalordnungen und damit zwischen Strukturen und (flachen) Sequenzen. Beide Richtungen der Übersetzung werden in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

Wie bereits angesprochen, verwenden wir zur Darstellung von Semantik MWRen. Die Blätter einer MWR werden wir im Folgenden als ihre *Werte* bezeichnen. In Abbildung 1 sind die fünf MWRen dargestellt, die die möglichen Bewegungen der Maus im Labyrinth darstellen. Die Wertemengen sind durch $W_H = W_V = \{-1, 0, 1\}$ gegeben; die Bewegungsrichtung wird also durch zwei Komponenten beschrieben. Für die angesprochene Übersetzung müssen die jeweiligen Werte der MWRen in eine Reihenfolge gebracht und der strukturelle Überbau entfernt

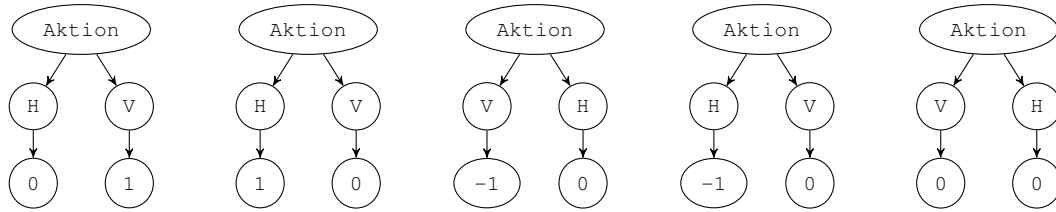


Abbildung 1: MWREN zu den Bewegungen nord-, ost-, süd-, westwärts und keine Bewegung.

werden. Die Reihenfolge ist prinzipiell beliebig, sollte aber zwischen den Kommunikationspartnern festgelegt sein. Für die gegenteilige Übersetzung muss die Information der Reihenfolge entfernt, der strukturelle Überbau hinzugefügt werden.

Wir setzen für die Verarbeitung von Halbordnungen *Petrinetz-Transduktoren* (PNTen) ein. Die genaue Definition sowie die verschiedenen Operationen der PNTen können in [2, 3, 4] nachgelesen werden. Sie lehnen sich größtenteils an Operationen für FSTs [5] an und verallgemeinern diese.

3.1 Von der Bedeutung zum Zeichen

Ausgehend von einer Bedeutung soll durch einen Artikulationsprozess eine Sequenz aus Zeichen ermittelt werden, die dann als Eingabe der Synthese dient. Wie in [7] beschrieben, soll in eine semantiknahe Zeichenkette übersetzt werden, was bedeutet, dass die Werte einer MWR, die ungeordnet sind, in eine Reihenfolge gebracht werden müssen. Die zusätzliche strukturelle Information der MWR soll im Prozess entfernt werden. Wir zeigen hier eine direkte Umsetzung von Abbildung 3 aus [7].

Wir beginnen mit den PNTen N_{MWR} und $N_{Sequenz}$ aus Abbildung 2. Der PNT N_{MWR} verarbeitet als Eingabe die Menge aller MWREN mit dem strukturellen Überbau wie in Abbildung 1 und den Werten aus W_H und W_V . Seine Ausgabe ist leer, wie man an den leeren Ausgaben, die mit ε bezeichnet werden, sehen kann. Transitionen, die weder eine Ein- noch eine Ausgabe besitzen – sogenannte ε -Transitionen – erhalten in Abbildungen keine Annotationen. Beim Transduktor N_{MWR} ist t_F eine solche ε -Transition. Ein Gewicht an einer Kante bedeutet, dass über diese Kante so viele Marken wie angegeben konsumiert oder produziert werden. Beim Transduktor N_{MWR} gibt es eine Kante mit dem Gewicht 2, sodass die nachfolgende Transition nur schalten kann, wenn in ihrer Eingabestelle mindestens 2 Marken liegen; wenn also beide Zweige der MWR abgearbeitet sind. Die Ausgabe aller möglichen Sequenzen von Werten aus W_H und W_V bewerkstelligt der Transduktor $N_{Sequenz}$, dessen Eingabe wiederum leer ist. Bei diesem PNT handelt es sich sogar um einen FST. Wie in [4] ausgeführt, ist jeder FST ein PNT, aber nicht

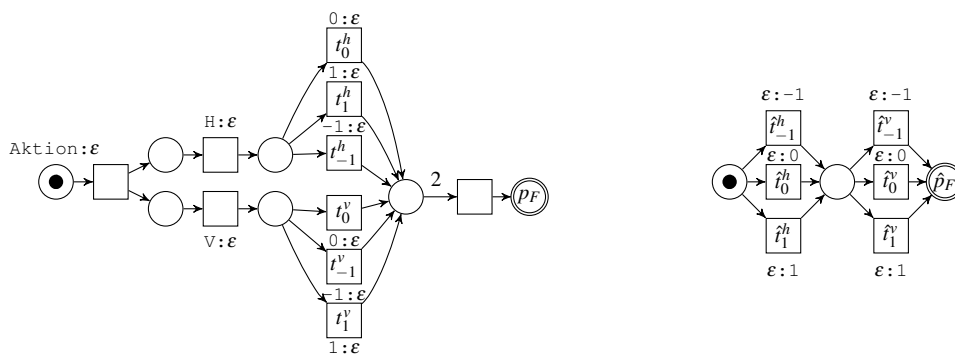


Abbildung 2: Petrinetz-Transduktoren N_{MWR} und $N_{Sequenz}$.

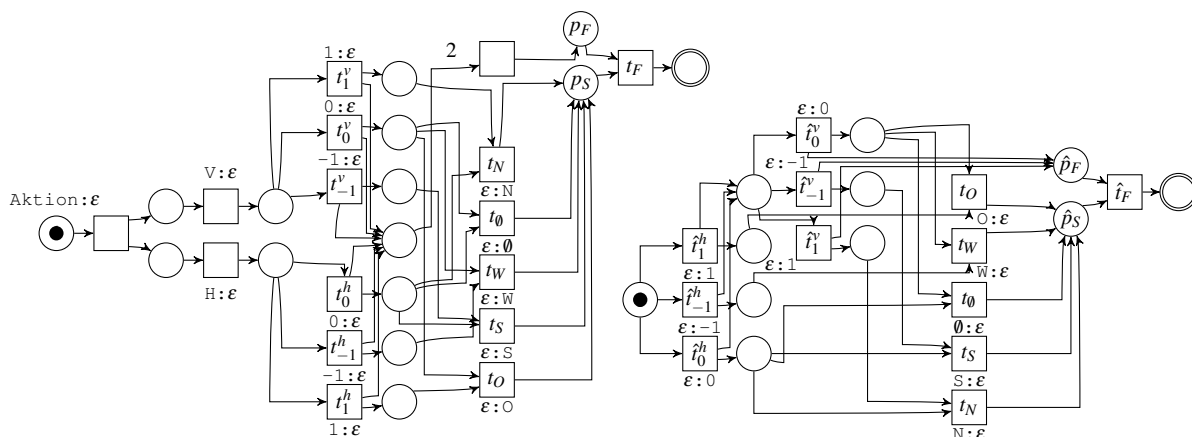


Abbildung 3: Petrinetz-Transduktoren N_{Aktion} und $N_{ternär}$.

umgekehrt. Die beiden Transduktoren können jeweils nicht nur die fünf Kombinationen von Werten aus W_H und W_V , die in Abbildung 1 dargestellt sind, verarbeiten, sondern alle 2^3 Möglichkeiten. Dies ist für eventuelle Erweiterungen durch sogenanntes Coping [7, 8] nötig, bei dem der kognitive Agent sich neue Kombinationen und damit neue Handlungsalternativen erschließt. Die Aufgabe besteht nun darin, dass die Ausgabe von $N_{Sequenz}$ durch die Eingabe von N_{MWR} zu steuern ist.

Wir bilden die fünf Wert-Wert Relationen N, S, O, W und \emptyset , wie sie in [7] eingeführt werden, innerhalb des Transduktors N_{MWR} . Dazu erhält jede Transition aus $\{t_{-1}^h, t_0^h, t_1^h, t_{-1}^v, t_0^v, t_1^v\}$, die einen Wert der MWR einliest, eine zusätzliche Ausgabestelle, um den gewünschten Einfluss auf den anderen Transduktor ausüben zu können. Für jede Wert-Wert Relation fügen wir eine Transition hinzu, die die passenden neuen Stellen miteinander verbindet, um die Relation herzustellen, das passende Symbol ausgibt, um diese Relation zu bezeichnen, und eine zusätzliche Stelle p_S als Ausgabestelle hat. Die alte Endstelle p_F und die neue Stelle p_S werden über eine neue Transition t_F miteinander verbunden, die eine neue Endstelle als Ausgabestelle besitzt. Auf diese Weise bleiben im Transduktor nur die Abläufe möglich, die sowohl eine gültige MWR darstellen, als auch zu einer der fünf Wert-Wert Relationen gehören. Das Ergebnis N_{Aktion} kann man in links Abbildung 3 sehen.

Nun bauen wir die Entsprechung in den Transduktor $N_{Sequenz}$ ein. Hier erhält jede Transition aus $\{\hat{t}_{-1}^h, \hat{t}_0^h, \hat{t}_1^h, \hat{t}_{-1}^v, \hat{t}_0^v, \hat{t}_1^v\}$, die ein Ternärzeichen ausgibt, ebenfalls eine zusätzliche Ausgabestelle, um die gewünschte Beeinflussung vom anderen Transduktor entgegenzunehmen. Für jede Wert-Wert Relation fügen wir auch hier eine Transition hinzu, die die passenden neuen Stellen miteinander verbindet, um die gewünschte Kodierung festzulegen, das passende Symbol liest und eine zusätzliche Stelle \hat{p}_S als Ausgabestelle besitzt. Auch hier werden die alte Endstelle \hat{p}_F und die neue Stelle \hat{p}_S über eine neue Transition \hat{t}_F miteinander verbunden, die eine neue Endstelle als Ausgabestelle hat. Auf diese Weise bleiben im Transduktor nur die Abläufe möglich, die sowohl eine syntaktisch gültige Zeichenkette darstellen, als auch zu einer der fünf Wert-Wert Relationen gehören. Das Ergebnis $N_{ternär}$ kann man rechts in Abbildung 3 sehen.

Um die gewünschte Übersetzung zu erreichen, bildet man die Komposition $N_{Aktion} \circ N_{ternär}$ und erhält den Transduktor aus Abbildung 4, bei dem die Symbole N, S, O, W und \emptyset durch die Komposition verschwunden sind. Die zugehörigen Transitionen aus beiden PNTen wurden während der Operation verschmolzen, wodurch die gewünschte Beeinflussung zustande kommt. Wenn eine MWR komplett abgearbeitet und eine Ausgabe komplett erzeugt ist, sind die Stellen p_F und \hat{p}_F markiert. Aber nur wenn die Werte der MWR mit der Kodierung übereinstimmen, kann die passende der fünf verschmolzenen Transitionen schalten, um die Stellen p_S und \hat{p}_S

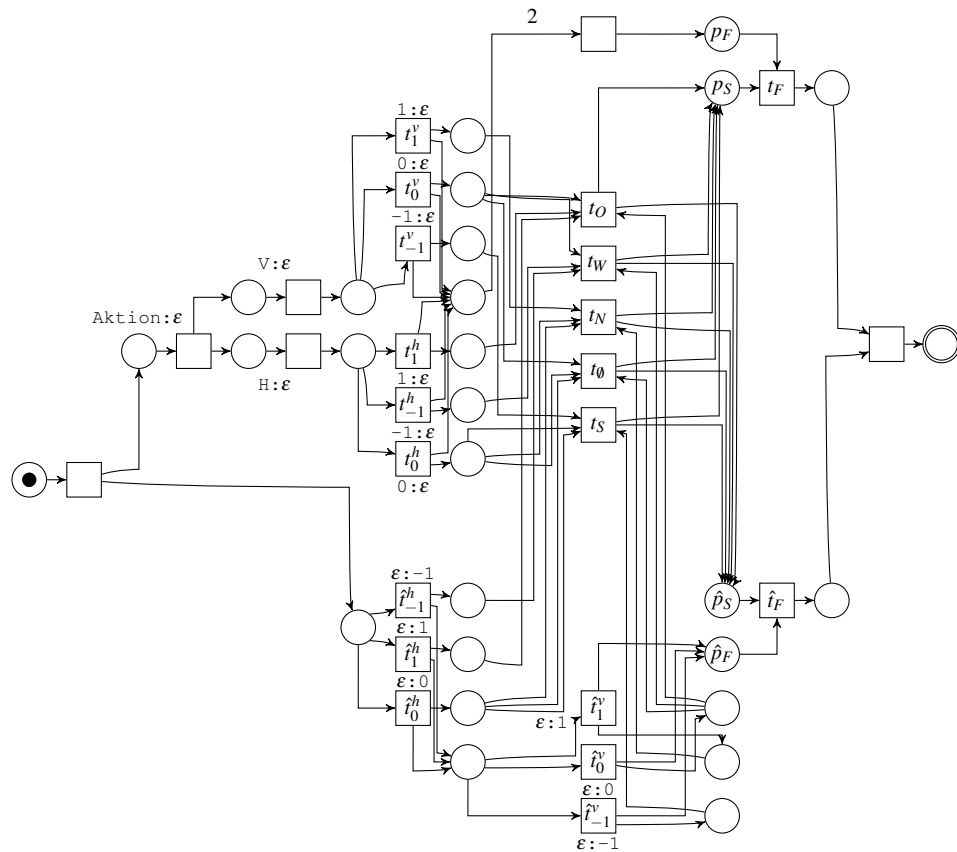


Abbildung 4: Petrietz-Transduktor $N_{\text{Aktion}} \circ N_{\text{ternär}}$.

zu markieren, sodass die Transitionen t_F und \hat{t}_F schalten können, damit der Transduktor seine Endstelle markieren und damit seine Verarbeitung als abgeschlossen gelten kann.

Damit ist das Verfahren, wie die Transduktoren der Artikulationsseite entstehen, und wie sie mit der Synthese zusammenarbeiten, erklärt. Es bleibt, die Gegenrichtung – die Interpretation – vorzustellen.

3.2 Vom Zeichen zur Bedeutung

Ausgehend von einer Sequenz aus Zeichen, die als Ausgabe der Analyse vorliegt, soll nun durch einen Interpretationsprozess die Bedeutung dieser Zeichenkette ermittelt werden. Es ist einsichtig, dass es sich hierbei um die gegenteilige Fragestellung zum vorherigen Abschnitt handelt. Entsprechend einfach lässt sich dieses Problem lösen.

Der gesuchte Transduktor ist das Inverse des in Unterabschnitt 3.1 vorgestellten, bei dem die Ein- und Ausgabezeichen aller Transitionen vertauscht sind. Es gilt die folgende Gleichung $(N_{\text{Aktion}} \circ N_{\text{ternär}})^{-1} = N_{\text{ternär}}^{-1} \circ N_{\text{Aktion}}^{-1}$.

Für die im nächsten Abschnitt vorgestellten Komponenten der Informationsverarbeitung ist dieser Transduktor jedoch nicht von Bedeutung, da wir uns auf den einfachen Fall beschränken, dass die Maus direkten Zugriff auf die Position innerhalb des Labyrinths hat. Dadurch ist sie nicht darauf angewiesen, eine Antwort der Umgebung entgegenzunehmen. Für ein vollständiges System ist dieser Zweig jedoch essentiell.

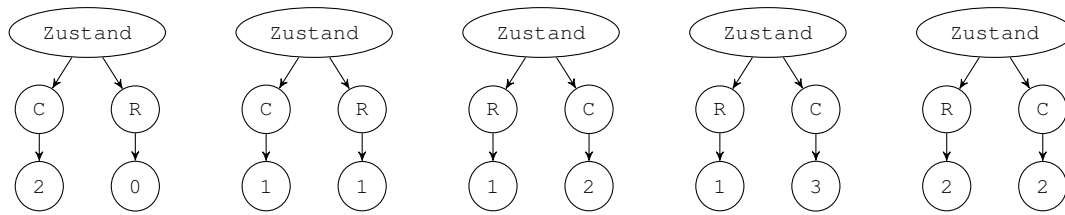


Abbildung 5: MWREN zu den Zuständen 2, 5, 6, 7 und 10.

4 Informationsverarbeitung

Durch die vorgestellten Strukturen und Transduktoren wird der Austausch von Semantik mit der Umwelt ermöglicht. Um entscheiden zu können, welche Semantik zu übertragen ist, benötigt man eine Vorstellung davon, wie es um einen bestellt ist, wo man hin will und welche Auswirkungen die eigenen Handlungen haben. Diese Bestandteile bilden die Grundlage der Verhaltenssteuerung.

Das Ziel ist in unserem Beispiel von außen vorgegeben: Es gibt eine Position im Labyrinth, an der die Maus sich einzufinden hat. Das Ziel findet sich in der erlernten Strategie wieder und wird hier genauso wie die Strategie selbst nicht weiter betrachtet.

Die Vorstellung vom eigenen Zustand, der Status der Maus, wird im folgenden Unterabschnitt als Raumvorstellung der Maus beschrieben.

Die Auswirkungen des eigenen Handelns, der Bewegungsmöglichkeiten der Maus innerhalb des Labyrinths, werden im darauf folgenden Unterabschnitt als Weltvorstellung eingeführt.

4.1 Informationsstatus

Auch die Raumvorstellung wird über MWREN modelliert. In Abbildung 5 sind die fünf Positionen 2, 5, 6, 7 und 10 dargestellt. Der Zustand der Maus ist also die Position der Maus innerhalb des Labyrinths, kodiert als Zeilen- und Spaltennummer und mit einer eindeutigen Nummerierung versehen.

Die jeweils aktuelle Position wird als *Informationsstatus* (InfoS) bezeichnet und gehört zu dem, was die Maus zur Verfügung hat, um zu entscheiden, was sie als nächstes tut. Der InfoS dient also als Ausgangspunkt für die Verhaltenssteuerung.

4.2 Weltmodell

Um bewerten zu können, welche Auswirkungen das eigene Handeln in der Welt hat, benötigt man eine Vorstellung von diesen Auswirkungen. Alle relevanten Vorstellungen vereinen sich in einem Modell der Umgebung und werden miteinander verknüpft und in Beziehung zueinander gesetzt.

Für die Maus bedeutet das, dass sie ein Modell davon braucht, wie ihre Raum- und Bewegungsvorstellungen sich gegenseitig beeinflussen. Ausgehend von einer Position im Labyrinth muss die Maus wissen, welche Bewegung sie zu welcher neuen Position bringt. Diese Abbildung werden wir als PNT modellieren.

Zunächst benötigt man einen weiteren Transduktor $N_{Zustand}$. Dieser entsteht nach dem Prinzip, das in Unterabschnitt 3.1 vorgestellt wurde aus einem Transduktor, der N_{MWR} aus Abbildung 2 ähnelt. Er liest allerdings nicht die Symbole H und V, sondern R und C sowie nicht die Symbole -1, 0 und 1, sondern jeweils die Symbole 0, 1, 2 und 3. Wieder werden Wert-Wert Relationen hinzugefügt, allerdings nicht nur fünf, sondern 16, die diesmal die Symbole 0 bis 15 ausgeben. Diese Ausgaben repräsentieren die eindeutige Nummer jeder Position im Labyrinth. Wir verzichten für diesen Transduktor auf eine Abbildung.

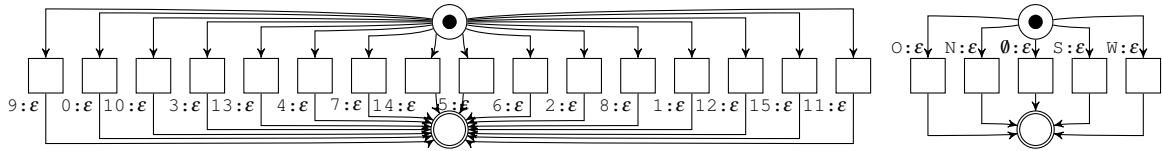


Abbildung 6: Petrinetz-Transduktoren N_Z und N_A .

Jetzt wenden wir das angesprochene Prinzip sozusagen eine Ebene höher an.

Wir beginnen mit der parallelen Komposition $N_{Zustand} \boxtimes N_{Aktion}$. Dieser Transduktor liest ein ungeordnetes Paar aus einem Zustand und einer Aktion und gibt ein ungeordnetes Paar von Symbolen aus $\{N, O, S, W, \emptyset\} \times \{0, \dots, 15\}$ aus.

Nun benötigt man einen weiteren Transduktor $N_{Bewegung}$, in dem man die Relationen von Relationen wie sie in [7] in Abbildung 4 zu sehen sind realisiert. Dieser Transduktor liest ein ungeordnetes Paar von Symbolen aus $\{N, O, S, W, \emptyset\} \times \{0, \dots, 15\}$ und gibt ein einzelnes Symbol aus $\{0, \dots, 15\}$ aus. Er entsteht aus den PNTen N_Z und N_A aus Abbildung 6, indem die beiden zuerst parallel komponiert werden, man also $N_Z \boxtimes N_A$ bildet. Dann erhält jede Transition, die einen Wert liest, eine zusätzliche Ausgabestelle. Für jede Relation von Relationen fügen wir eine Transition ein, die die passenden Stellen miteinander verbindet, um die Eingaben zu verknüpfen, das passende Symbol ausgibt, um das Ergebnis darzustellen, und eine zusätzliche Stelle p_E als Ausgabestelle hat. Die alte Endstelle und die neue Stelle p_E werden über eine neue Transition verbunden, die eine neue Ausgabestelle als neue Endstelle erhält.

In Abbildung 7 ist der Ausschnitt für die Eingangsposition 6 zu sehen. Die Abbildung wäre mit allen Relationen zu unübersichtlich geraten. Das prinzipielle Vorgehen sollte auch an diesem Beispiel klar werden.

Bildet man nun die Komposition $(N_{Zustand} \boxtimes N_{Aktion}) \circ N_{Bewegung} \circ N_{Zustand}^{-1}$, so erhält man einen Transduktor, der einen Zustand und eine Aktion einliest und einen Folgezustand ausgibt.

Hierbei handelt es sich jedoch um eine eindeutige Zuordnung. Zu einem Paar aus Position und Bewegung gibt es nur genau eine Zielposition. Eine Menge von Ausgaben kann aber nach dem gleichen Prinzip modelliert werden. Im Transduktor $N_{Bewegung}$ können zu Paaren von Stellen auch mehrere Transitionen existieren. Wenn man dann noch die PNTen mit Gewichten versieht, gelangt man zu einem statistischen Weltmodell.

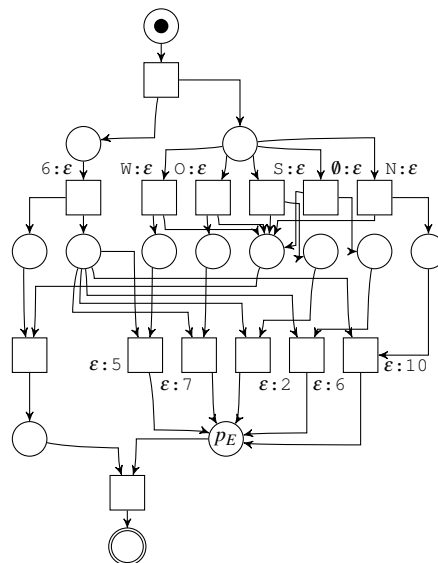


Abbildung 7: Teil des Petrinetz-Transduktors $N_{Bewegung}$. Für die Ausgangsposition 6 sind die Zielpositionen für alle fünf Bewegungen aufgeführt.

5 Ausblick

Die vorgestellten Strukturen und Verfahren ermöglichen die systemtheoretische Modellierung einer semantischen Ebene, um einen kognitiven Agenten zu realisieren. Sie eignen sich ebenfalls für die Modellierung der Verhaltenssteuerung.

Um das angesprochene Coping umsetzen zu können, müsste das Verfahren der Einführung von Wert-Wert Relationen bzw. Relationen von Relationen präzisiert und als Operation auf PNTen definiert werden. Ein alternativer Ansatz wäre die Adaption von Syntheseverfahren für Petrinetze. Dadurch könnten PNTen über die gewünschten Übersetzungen generiert werden.

Ein offener Punkt sind Optimierungsverfahren. Hierzu zählen Verfahren, die redundante Teile eliminieren, überflüssige ε -Transitionen finden oder Ein- und Ausgabesymbole geeignet manipulieren, um Transitionen einzusparen. Dadurch ergäbe sich die Möglichkeit schon jetzt die angesprochen Operation sinnvoll anzugeben. Jede einzelne Übersetzung wird als sequentielle Komposition von Ein- und Ausgabe realisiert und diese Übersetzungen werden dann alternativ komponiert. Der so entstandene große PNT wird abschließend optimiert.

Bei den statistischen Transduktoren gilt es, die Theorie der Bihalbringe weiter auszubauen.

Literatur

- [1] HAYKIN, S. : *Cognitive Dynamic Systems: Perception-action Cycle, Radar and Radio*. New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2012. – ISBN 0521114365, 9780521114363
- [2] LORENZ, R. ; HUBER, M. : Petri Net Transducers in Semantic Dialogue Modelling. In: WOLFF, M. (Hrsg.): *Proceedings of "Elektronische Sprachsignalverarbeitung (ESSV)"* Bd. 64, 2012 (Studientexte zur Sprachkommunikation), S. 286 – 297
- [3] LORENZ, R. ; HUBER, M. : Realizing the Translation of Utterances into Meanings by Petri Net Transducers. In: WAGNER, P. (Hrsg.): *Proceedings of "Elektronische Sprachsignalverarbeitung (ESSV)"* Bd. 65, 2013 (Studientexte zur Sprachkommunikation), S. 103 – 110
- [4] LORENZ, R. ; HUBER, M. ; WIRSCHING, G. : On Weighted Petri Net Transducers. In: CIARDO, G. (Hrsg.) ; KINDLER, E. (Hrsg.): *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency - 35th International Conference, PETRI NETS 2014, Tunis, Tunisia, June 23-27, 2014. Proceedings* Bd. 8489, Springer (Lecture Notes in Computer Science). – ISBN 978-3-319-07733-8, 233-252
- [5] *Kapitel 6*. In: MOHRI, M. : *Weighted Automata Algorithms*. Springer, 2009 (Monographs in Theoretical Computer Science), S. 213-254
- [6] RÖMER, R. ; WIRSCHING, G. : Ein Beitrag zu den natur- und geisteswissenschaftlichen Grundlagen kognitiver Systeme. In: WAGNER, P. (Hrsg.): *Proceedings of "Elektronische Sprachsignalverarbeitung (ESSV)"* Bd. 65, 2013 (Studientexte zur Sprachkommunikation), S. 93 – 102
- [7] RÖMER, R. ; WOLFF, M. : Konzeption eines Kognitiven Systems für den experimentellen Einsatz in Forschung und Lehre, 2015. – In diesem Tagungsband.
- [8] WOLFF, M. ; RÖMER, R. : Modellierung von Bewältigungsverhalten mit Merkmal-Werte-Relationen, 2015. – In diesem Tagungsband.
- [9] WOLFF, M. ; TSCHÖPE, C. ; RÖMER, R. ; WIRSCHING, G. : Subsymbol-Symbol-Transduktoren. In: WAGNER, P. (Hrsg.): *Proceedings of "Elektronische Sprachsignalverarbeitung (ESSV)"* Bd. 65, 2013 (Studientexte zur Sprachkommunikation), S. 197 – 204