

Hybride symbolische und subsymbolische Verarbeitung am Beispiel der Sprachverarbeitung¹

Stefan Wermter
Universität Hamburg
Fachbereich Informatik
Vogt Kölln Str. 30
22527 Hamburg
Email: wermter@informatik.uni-hamburg.de

1 Zur Motivation hybrider Systeme

Seit wenigen Jahren, nach der Einführung neuer mächtiger konnektionistischer Lernverfahren, hat sich das Gebiet hybrider symbolischer und subsymbolischer Ansätze für die Künstliche Intelligenz sehr schnell entwickelt. *Symbolische Ansätze* verwenden traditionell Verfahren zur Manipulation von diskreten symbolischen Objekten, wie etwa in regelbasierten Produktionssystemen oder regelbasierten Parsern. *Subsymbolische Ansätze* verwenden neue konnektionistische Verfahren zur Manipulation von kontinuierlichen konnektionistischen Objekten, wie etwa in überwachten künstlichen neuronalen Netzwerken.

Die Motivation hybrider symbolischer und subsymbolischer Verfahren kommt dabei aus verschiedenen Richtungen. Vom Standpunkt *kognitiver Architekturen* sind hybride symbolische und subsymbolische Verfahren plausibel, da auf einer unteren Ebene das Gehirn des Menschen eine neuronale Struktur besitzt und auf einer höheren Ebene damit symbolische Verarbeitung durchgeführt wird. Vom Standpunkt des Knowledge Engineering für KI-Systeme sind hybride Verfahren wünschenswert, da sich damit unterschiedliche ergänzende Eigenschaften vorteilhaft integrieren lassen. Dabei haben symbolische Repräsentationen Vorteile bezüglich der Interpretierbarkeit, der relativ leichten expliziten Kontrolle und der Wissensabstraktion. Auf der anderen Seite besitzen konnektionistische Repräsentationen Vorteile bei gradueller Plausibilität von Wissen, beim Lernen robuster Verarbeitung und bei der Generalisierung für neue ähnliche oder sogar fehlerhafte Eingaben.

2 Hybrid-Connectionist-Hypothese

Wir geben nun eine Zusammenfassung der zugrundeliegenden Hypothesen symbolischer, konnektionistischer und hybrider Systeme. Zentral für viele Ansätze in der künstlichen

¹Für Kommentare zu diesem Papier und für viele wertvolle Diskussionen möchte ich Volker Weber danken.

Intelligenz ist die Physical-Symbol-Systems-Hypothese² und eine hierarchische Organisation des Wissens auf verschiedenen Ebenen [Newell 1980] [Newell 1982]. Diese Hypothese geht davon aus, daß Architekturen der künstlichen Intelligenz am besten durch modulare symbolische Repräsentationen auf verschiedenen Ebenen unterstützt werden. Newell unterscheidet Knowledge-Level, Symbol-Level und darunter liegende Device-Levels. Jede Ebene wird durch vier Punkte charakterisiert: Dem zu verarbeitenden Medium, den Primitiven für die Verarbeitung, den Regeln für die Kombination der Komponenten und den Verhaltensregeln. Jede Ebene kann eigenständig definiert oder auf der Basis der darunter liegenden Ebene beschrieben werden. Drei Hauptannahmen der Physical-Symbol-Systems-Hypothese sind:

- Wissen wird als diskrete symbolische Wissensstrukturen organisiert.
- Die Interaktion der symbolischen Wissensstrukturen wird durch eine serielle symbolische Kontrolle bestimmt.
- Die Wissensstrukturen und deren Kontrolle ergeben eine symbolische Wissensorganisation.

Ein anderes Paradigma zur Wissensrepräsentation und -verarbeitung stützt sich auf die Connectionist-Systems-Hypothese, die durch folgende Punkte charakterisiert wird.

- Wissen wird als kontinuierliche konnektionistische Wissensstrukturen organisiert.
- Die Interaktion der konnektionistischen Wissensstrukturen wird durch eine parallele konnektionistische Kontrolle bestimmt.
- Wissensstrukturen und Steuerung ergeben eine lokalistische oder distributierte Wissensorganisation.

Die konnektionistische Repräsentation wird durch die einzelnen Elementen, die Verbindungen, die Aktivierungsregeln, die Lernregeln und die Propagierungsregeln beschrieben. Allerdings kann eine konnektionistische Repräsentation als symbolische Regeln und Prototypen interpretiert werden [Rumelhart and McClelland 1986]. In ähnlicher Weise argumentiert Smolensky zur Aufteilung in subsymbolische und symbolische Ebenen [Smolensky 1988]. Auf einer niedrigeren subsymbolischen Ebene werden "weiche" numerische Constraints repräsentiert, die auf der symbolischen Ebene als "harte" Regeln interpretiert werden können. Allerdings verändert eine Interpretation einer konnektionistischen Repräsentation auf einer symbolischen Ebene nicht den prinzipiellen Charakter eines reinen konnektionistischen Ansatzes in Richtung eines symbolischen oder hybriden symbolisch/konnektionistischen Ansatzes.

Gegenwärtig ist es noch eine offene Frage, ob die Connectionist-Systems-Hypothese allein mächtig genug sein kann, um eine allgemeine Grundlage für die Verarbeitung natürlicher Sprache zu sein (z.B. [Smolensky 1988] [Dyer 1991]). Da die Physical-Symbol-Systems-Hypothese und die Connectionist-Systems-Hypothese in der Repräsentation und der Architektur komplementär sind, erscheint eine Kombination

²Bei gebräuchlichen Begriffen in den Bereichen Konnektionismus und Künstliche Intelligenz wird die ursprüngliche englische Bezeichnung der Eindeutigkeit halber beibehalten.

der Physical-Symbol-Systems-Hypothese und der Connectionist-Systems-Hypothese zur *Hybrid-Connectionist-Systems-Hypothese* kognitiv plausibel und vom Standpunkt des Knowledge-Engineering sinnvoll.

- Wissen wird als kontinuierliche konnektionistische und diskrete symbolische Wissensstrukturen organisiert.
- Die Interaktion des konnektionistischen Wissens und des symbolischen Wissens kann durch eine serielle oder parallele Kontrolle bestimmt werden.
- Wissensstrukturen und Steuerung ergeben eine hybride interaktive Wissensorganisation.

Ansätze auf der Basis der Hybrid-Connectionist-Systems-Hypothese können von den verschiedenen Repräsentationen profitieren, zum Beispiel von einer Kombination von symbolischem und konnektionistischem Wissen oder von einer Kombination von lokalisiertem und distributiertem Wissen. Demgegenüber benutzen distributierte konnektionistische Repräsentationen eine Vielzahl von Elementen für ein Konzept (z.B. [McClelland et al. 1986]). Der Hauptpunkt ist, daß eine einzelne konnektionistische Repräsentation nicht isoliert, sondern im Zusammenspiel mit weiteren anderen konnektionistischen oder symbolischen Repräsentationen genutzt wird.

3 Klassifizierungen hybrider symbolischer und subsymbolischer Architekturen

Insgesamt zeigen hybride symbolische und subsymbolische Architekturen, daß die Grenzen zwischen symbolischen und subsymbolischen Architekturen immer weniger stark ausgeprägt werden und sich eher ein Kontinuum von verschiedenen Architekturen ausbildet [Wilson and Hendler 1993] [Medsker 1994] [Wermter 1994 to appear]. Dabei werden die Übergänge zwischen verschiedenen hybriden Architekturen immer fließender. Gerade deshalb nehmen wir eine Grobklassifizierung vor, die dieses Kontinuum verdeutlicht. Wir unterscheiden hybride Architekturen in lose gekoppelte, eng gekoppelte, sequentiell integrierte und parallel integrierte Architekturen (siehe Abb. 1).

- Lose gekoppeltes hybrides System: Bei der Architektur wird zwischen separaten symbolischen und subsymbolischen Komponenten unterschieden, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist sequentiell, die Kommunikation erfolgt extern, z.B. über Files.
- Eng gekoppeltes hybrides System: Bei der Architektur wird zwischen separaten symbolischen und subsymbolischen Komponenten unterschieden, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist sequentiell, die Kommunikation erfolgt intern über Auszeichnung von assoziierten verschiedenen Datenstrukturen in jeder Komponente.
- Sequentiell integriertes hybrides System: Bei der Architektur wird zwischen separaten symbolischen und subsymbolischen Komponenten unterschieden, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist sequentiell, die Kommunikation von symbolischem und subsymbolischem Wissen erfolgt über gleichartige einfache Messages.

- Parallel integriertes hybrides System: Bei der Architektur gibt es keinen prinzipiellen Unterschied zwischen symbolischen und subsymbolischen Komponenten, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist parallel möglich, die Kommunikation von symbolischem und subsymbolischem Wissen erfolgt über gleichartige potentiell komplexe Messages.

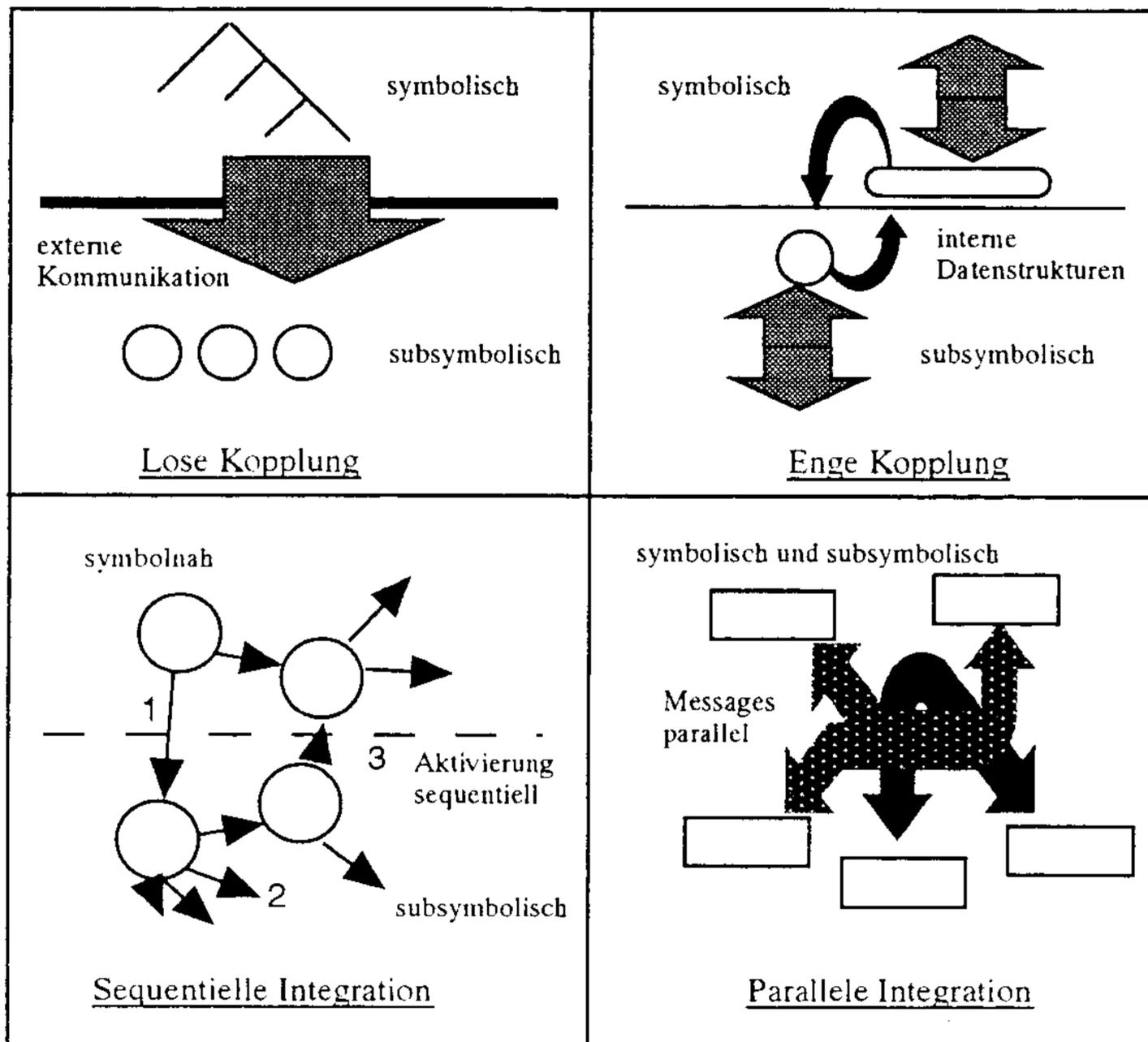


Abbildung 1: Übersicht über verschiedene hybride Architekturen.

Die Unterschiede und Übergänge zwischen den einzelnen Klassen von hybriden Systemen werden wir im folgenden an einzelnen Beispielen verdeutlichen.

4 Lose und enge Kopplung

Frühe Ansätze sind im wesentlichen gekoppelte hybride Architekturen. Zu jedem Zeitpunkt befindet sich die Kontrolle in einer bestimmten symbolischen oder subsymbolischen Komponente und der Kontrollfluß zwischen den Komponenten ist sequentiell. Beispielhaft gehen wir nun auf zwei dieser Ansätze ein, die Repräsentanten gekoppelter hybrider Systeme darstellen.

4.1 Ein lose gekoppeltes hybrides System

Eines der ersten hybriden Modelle repräsentiert syntaktisches, semantisches und kontextuelles Wissen für die Interpretation von Sätzen [Waltz and Pollack 1985] [Pollack 1987]. Ein symbolischer Chartparser wird benutzt, um die syntaktischen Knoten und Verbindungen eines lokalistischen konnektionistischen Netzwerks zu erzeugen. Hier liegt eine lose Kopplung vor, da die separate symbolische Komponente nur zur einmaligen externen Erzeugung der syntaktischen Knoten dient. Diese syntaktischen Knoten interagieren mit den manuell kodierten lexikalisch-semantischen und kontextuellen Knoten des lokalistischen Netzwerkes (siehe Abb. 2).

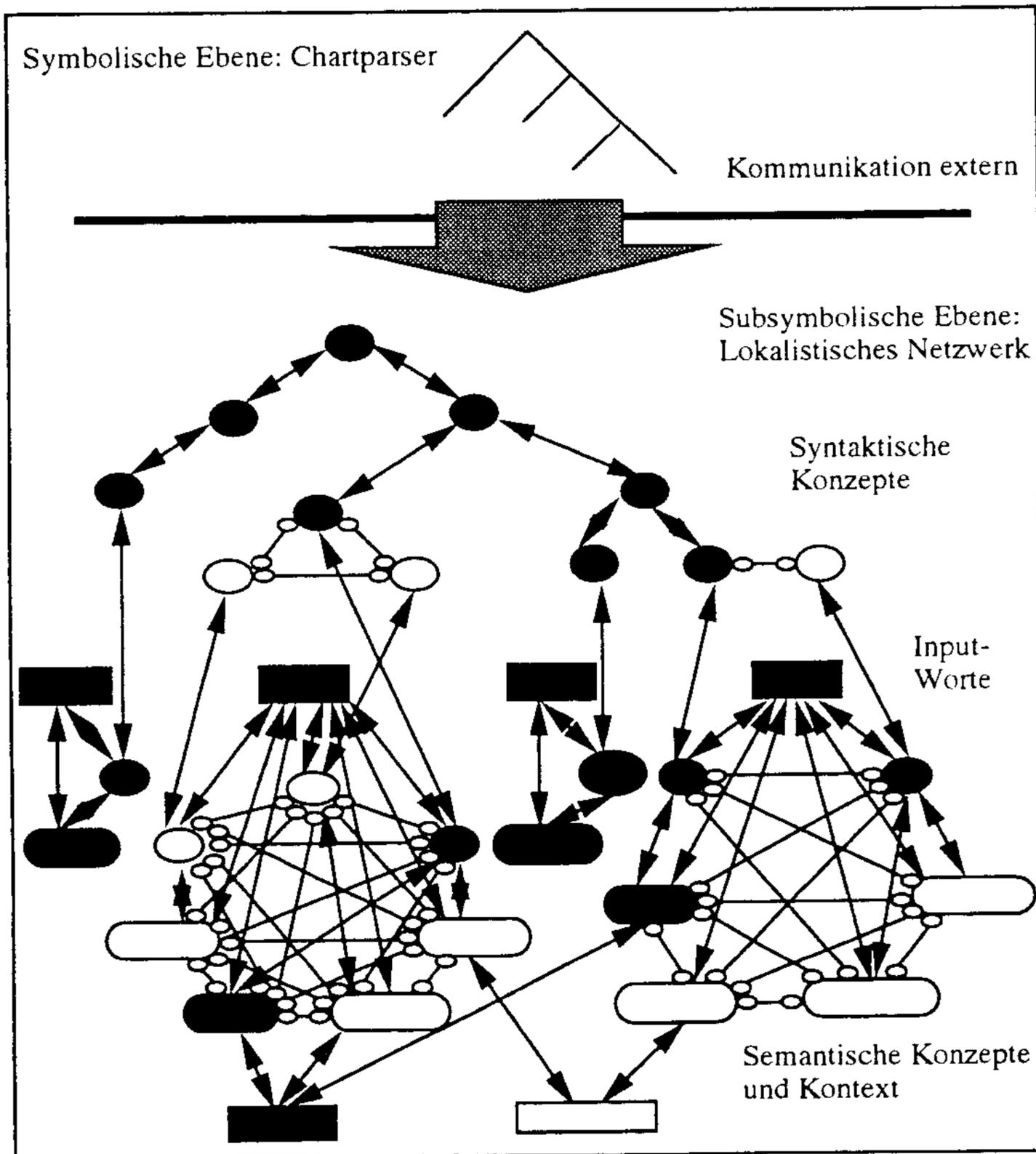


Abbildung 2: Ein lose gekoppeltes hybrides System. Das lokalistische Netzwerk wird zum Teil extern durch einen symbolischen Chartparser generiert. Knoten sind mit inhibitorischen (o-o) oder exzitatorischen (<->) Verbindungen verbunden, um hemmende oder aktivierende Einflüsse zu repräsentieren. Die Kommunikation ist separat und extern.

Dieses lokalistische konnektionistische Netzwerk basiert auf einer interaktiven Architektur, in der miteinander konkurrierende syntaktische, lexikalisch-semantische und kontextuelle Constraints parallel integriert werden können. Diese Integration ermöglicht es, dynamische Disambiguierungsprozesse für schwierige "Garden-Path-Sätze" (z.B., "The horse raced past the barn fell") zu modellieren. Diese "Garden-Path-Sätze" lassen anfangs eine syntaktische Struktur oder semantische Interpretation vermuten, die später korrigiert wird, wenn weiteres semantisches oder strukturelles Wissen verfügbar ist. Für diese Integration verschieden starker Constraints haben sich lokalistische Netzwerke als effektiv erwiesen, da strukturelle Präferenzen und lexikalische Disambiguitäten im lokalistischen Netzwerk graduell repräsentiert werden können.

4.2 Ein eng gekoppeltes hybrides System

Hendler's hybrider symbolisch/konnektionistischer Ansatz verbindet symbolisches Marker-Passing mit konnektionistischer Verarbeitung, um Inferenzen in einer natürlichsprachlichen Umgebung zu repräsentieren [Hendler 1989] [Hendler 1991]. Die Aufgabe des Marker-Passers ist es, Inferenzpfade in einem symbolisch semantischen Netzwerk zu finden. Da jedoch ein semantisches Netzwerk nicht alle potentiell möglichen Verbindungen zu ähnlichen Objekten enthalten kann, werden konnektionistische Netzwerke zur Repräsentation von Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Objekten eingesetzt. Bei diesem Ansatz liegt ein eng gekoppeltes hybrides System vor: es wird zwischen separaten symbolischen und subsymbolischen Komponenten unterschieden, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist sequentiell, die Kommunikation ist intern über assoziierte Datenstrukturen (symbolische Marker, konnektionistische Knoten und Units).

In einem ersten hybriden Modell wird das symbolische Marker-Passing mit lokalistischen konnektionistischen Netzwerken kombiniert (siehe Abb. 3). Objekte im semantischen Netzwerk können charakteristische Mikrofeatures haben (z.B. Messer ist scharf, dünn etc.). Wenn ein symbolischer Marker einen Knoten in einem semantischen Netzwerk erreicht, der mit Mikrofeatures in einem lokalistischen Netzwerk verbunden ist, dann initialisiert die Aktivierung des symbolischen Markers im semantischen Netzwerk die Aktivierung der verbundenen Knoten im lokalistischen Netzwerk. Daraufhin breitet sich die Aktivierung innerhalb des lokalistischen Netzwerks aus und es können Ähnlichkeiten zwischen Objekten entdeckt werden (zum Beispiel können ein Brieföffner und ein Messer ähnlich als Waffe benutzt werden). Wenn ein Knoten im lokalistischen Netzwerk genug Aktivierung erhält, kann er seinerseits eine symbolische Markierung im semantischen Netzwerk aktivieren und das Marker-Passing wird fortgesetzt. Dies erlaubt dem Netzwerk, unvorhergesehene Verbindungen zwischen ähnlichen Objekten herzustellen.

Allerdings löst dieses erste hybride Modell nicht das Problem der Konstruktion entsprechender lokalistischer Netzwerke für ähnliche Objekte. Deshalb konzentriert sich ein zweites hybrides Modell auf die Kombination des symbolischen Marker-Passing mit einem distributierten dreischichtigen konnektionistischen Netzwerk, das Ähnlichkeiten lernen und generalisieren kann. In diesem zweiten Modell kann ein symbolischer Knoten im semantischen Netzwerk einen Marker erhalten und einem Element in der Ausgabeschicht des konnektionistischen Netzwerks die entsprechende Aktivierung zuweisen. Diese Aktivierung wird zunächst rückwärts und dann vorwärts innerhalb des distributierten Netzwerkes propagiert. Diese Verwendung distributierter konnektionistischer Netzwerke liefert eine graduell *gelernte* Repräsentation von Ähnlichkeit, so daß ähnliche Objekte im sym-

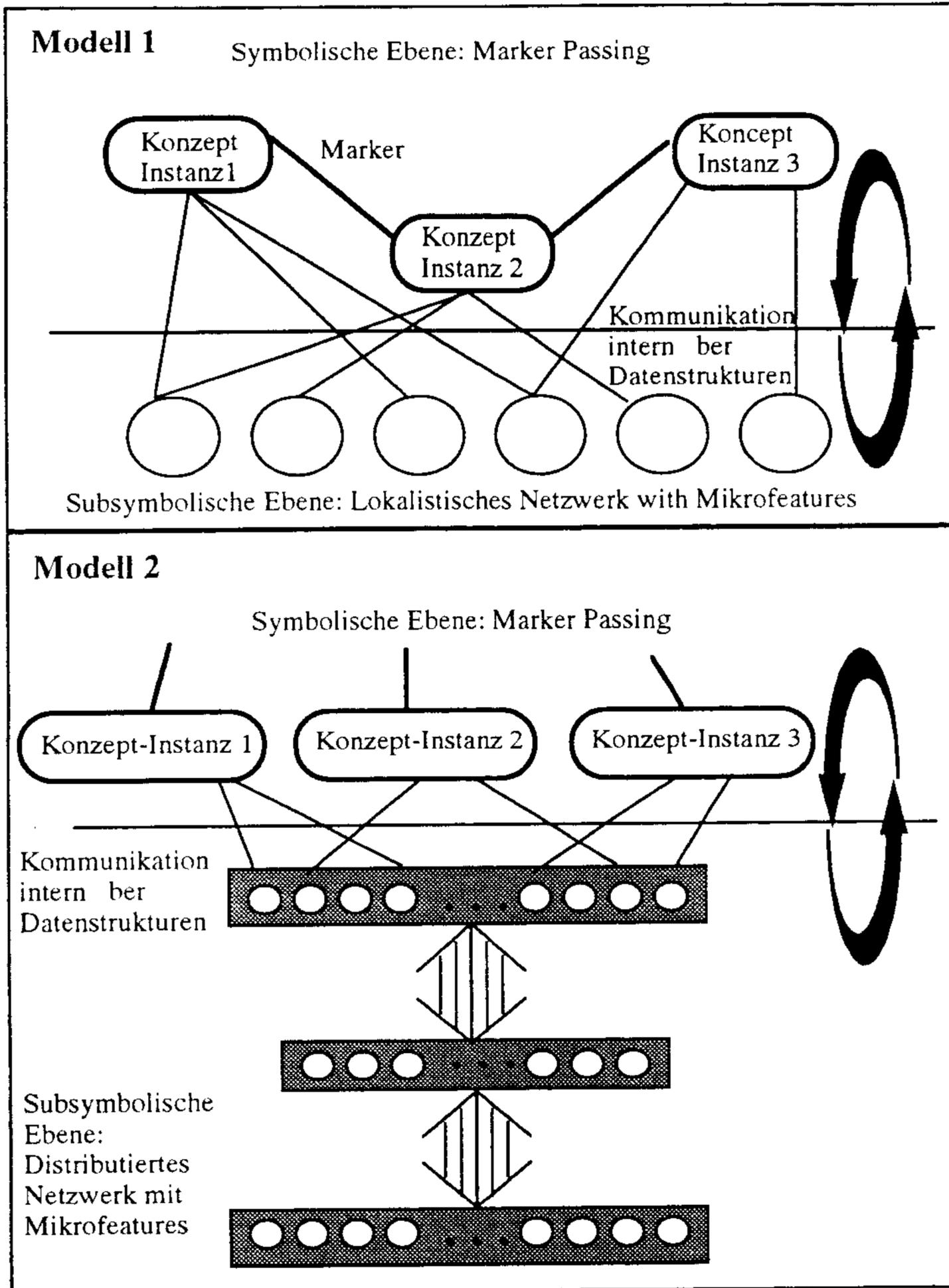


Abbildung 3: Ein eng gekoppeltes hybrides System. Ein symbolischer Marker-Passer findet Inferenzpfade in einem semantischen Netzwerk und konnektionistische Netzwerke repräsentieren die Ähnlichkeit in lokalistischen (oben) oder distributierten Netzwerken (unten). Die Kommunikation ist intern über verschiedene assoziierte Datenstrukturen (symbolische Marker, konnektionistische Knoten und Units.)

bolischen semantischen Netzwerk aktiviert werden können, um dann das Marker-Passing fortsetzen zu können.

4.3 Weitere Kopplungsansätze

Nachfolgend verweisen wir noch auf weitere Beispiele eng gekoppelter hybrider Systeme. Dyer und Kollegen entwickelten verschiedene Modelle für symbolische und konnektionistische natürlichsprachliche Verarbeitung (z.B. [Dyer 1990] [Dyer 1991] [Dolan 1989] [Miikkulainen and Dyer 1989] [Sumida and Dyer 1989]). Der generelle Ansatz versuchte, den Gegensatz zwischen höheren kognitiven Funktionen und neuronalen Mechanismen durch vier Ebenen zu überbrücken: Knowledge-Engineering Ebene, lokalistische konnektionistische Ebene, distributierte konnektionistische Ebene und die künstlich neuronale Ebene. Ein zentrales Problem, das mit dieser Architektur in Angriff genommen wurde, ist die Bildung distributierter Symbole. Eine distributierte konnektionistische Repräsentation eines Symbols wird in einem globalen Lexikon gehalten und aufgrund der Beziehungen zu anderen distributierten Repräsentationen von Symbolen dynamisch verändert ("Symbolic recirculation").

Dyer's Ansatz des symbolischen Neuroengineering betont die Wichtigkeit der konnektionistischen Ebene, akzeptiert aber auch die symbolische Repräsentation auf einer höheren Abstraktionsebene. Dagegen betont das hybride symbolisch/konnektionistische Modell CIRCUS die symbolische Ebene und behandelt die konzeptuelle Analyse von Sätzen [Lehnert 1991]. Dieses Modell kombiniert eine symbolische Syntaxanalyse, eine symbolische semantische Top-down-Analyse und eine lokalistische konnektionistische Bottom-up-Analyse, um Sätze in konzeptuelle Rollenstrukturen zu transformieren.

Im allgemeinen wurden bei den frühen gekoppelten Ansätzen meist nur zwei Komponenten mit verschiedenen Repräsentationen untersucht. Neben den bisher genannten Ansätzen, liegen z.B. auch Verfahren vor zur Kopplung eines symbolischem deterministischen Parsers mit einer distributierten konnektionistischen Kontrolle [Faisal and Kwasny 1990b] [Faisal and Kwasny 1990a] und zur Kopplung von strukturiertem Parsing und konnektionistischen semantischen Plausibilitätsnetzwerken [Wermter and Lehnert 1989] [Wermter 1992].

5 Sequentielle und parallele Integration

Bei sequentiell integrierten hybriden Systemen wird zwischen separaten symbolischen und subsymbolischen Komponenten unterschieden, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist sequentiell, die Kommunikation von symbolischem und subsymbolischem Wissen erfolgt über gleichartige Messages. Wichtig ist bei dem sequentiellen Kontrollfluß, daß zu einer bestimmten Zeit sich ein System in einer bestimmten Komponente befindet.

5.1 Ein sequentiell integriertes hybrides System

In der Sektion über eng gekoppelte hybride Systeme wurde ein System der Kopplung von symbolischem Marker-Passing mit konnektionistischen strukturierten Netzwerken beschrieben. Symbolische Marker sowie konnektionistische Aktivierungswerte wurden zur Kommunikation verwendet. In einem anderen verwandten Ansatz für robustes Reasoning

5.2 Ein parallel integriertes hybrides System

Bei einem parallel integrierten hybriden System gibt es keinen prinzipiellen Unterschied zwischen symbolischen und subsymbolischen Komponenten, der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist parallel möglich, die Kommunikation von symbolischem und subsymbolischem Wissen erfolgt über gleichartige Messages. Die Systeme der bisher beschriebenen Ansätze befanden sich stets in einer symbolischen oder subsymbolischen Komponente. Wir geben nun einen Überblick über die hybride Architektur des Systems SCREEN, das symbolische und subsymbolische Verarbeitung weiter integriert [Wermter and Weber 1994] (siehe Abb. 5).

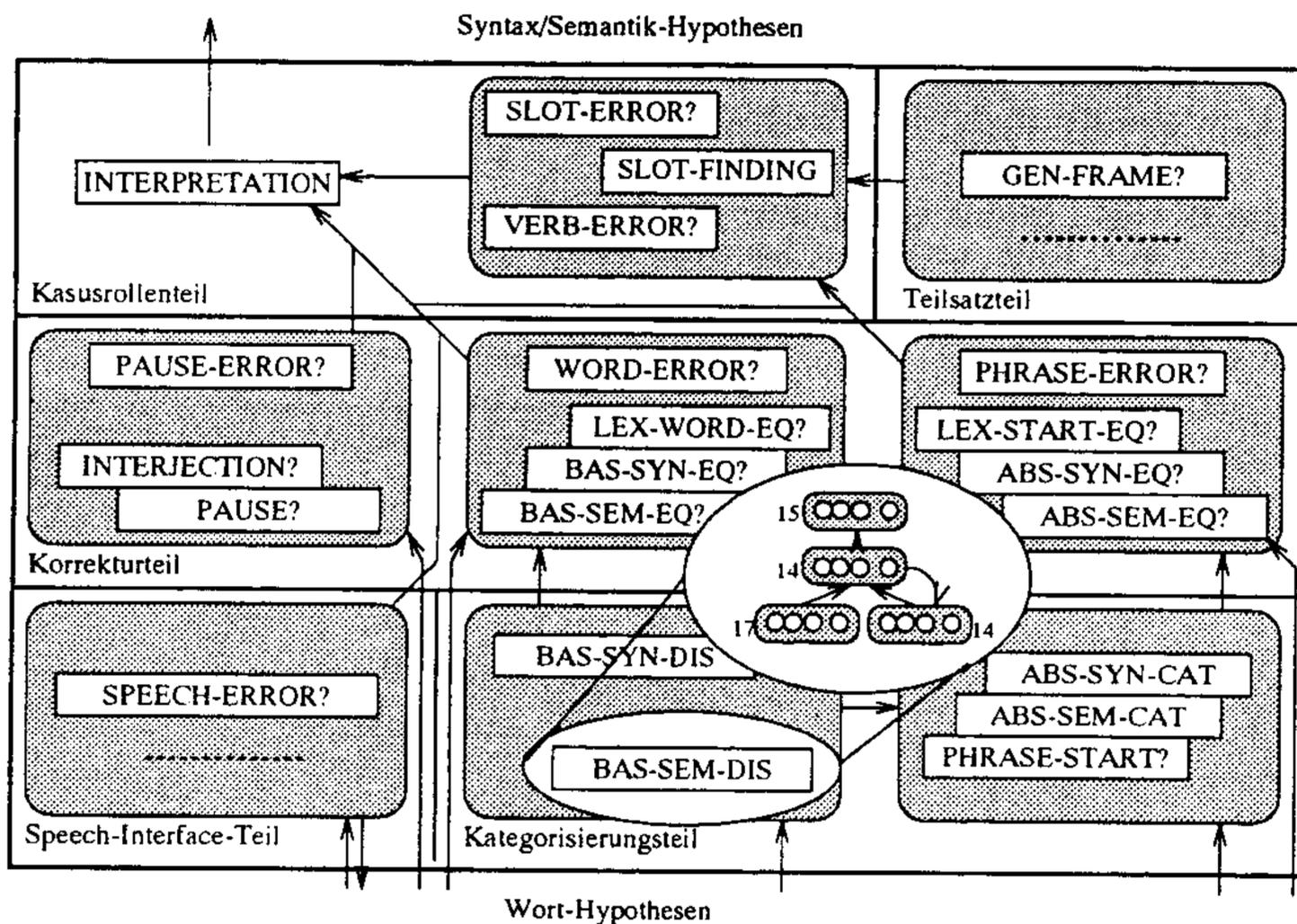


Abbildung 5: Ein parallel integriertes hybrides System: SCREEN besitzt viele symbolische und subsymbolische Komponenten, die nach außen nicht zu unterscheiden sind. Die Kommunikation von symbolischem und subsymbolischem Wissen erfolgt nur über gleichartige komplexe Messages.

Die Domäne von SCREEN ist das flache syntaktische und semantische Speech-Parsing. Basierend auf inkrementell erkannten parallelen Worthypothesen eines Spracherkenners werden flache syntaktische und flache semantische Kategorienrepräsentationen gelernt. Der Einsatz flacher Strukturen spielt gerade wegen der Vielzahl erzeugter Spracherkennungshypothesen und häufig auftretenden Fehler bei spontaner Sprache eine besondere Rolle. Insgesamt enthält diese Architektur zur Zeit mehr als 20 Komponenten. Jede Komponente, z.B. die der Disambiguierung von semantischen Basiskategorien (BAS-SEM-DIS) enthält ein konnektionistisches Netzwerk oder eine symbolische Verarbeitung. Einzelne Komponenten in SCREEN realisieren z.B. das Lernen syntaktischer Basiskategorien, abstrakter syntaktischer Kategorien, sowie abstrakter semantischer Kategorien. Weitere

Komponenten verarbeiten auftretende Pausen, Interjektionen, Reparaturen und Wiederholungen in spontaner Sprache.

In SCREEN können Komponenten symbolisch oder subsymbolisch realisiert sein, außerhalb einer Komponente werden alle Komponenten allerdings gleich dargestellt als eine Transformation auf Listen von symbolischen Labels und analogen Aktivierungswerten. Der Kontrollfluß zwischen einzelnen Komponenten ist parallel möglich, sofern eine Komponente nicht auf Eingaben einer anderen Komponente warten muß. Die Kommunikation erfolgt über Messages, die eine generell gleiche Struktur besitzen basierend auf Listen von symbolischen Labels und deren analogen Aktivierungen. Die Integration wird hier schon durch die Einkapselung von symbolischen und/oder subsymbolischen Verfahren innerhalb von einzelnen Komponenten durchgeführt.

5.3 Weitere Integrationsansätze

Nachfolgend gehen wir noch auf einige weitere Integrationsansätze ein. Ein Ansatz für ein parallel integriertes hybrides System wird in PARSEC [Jain 1992] verfolgt, das in JANUS [Waibel et al. 1992] eingebettet ist. Der Input für PARSEC sind Sätze, der Output deren Kasusrollenrepräsentation. Das System besteht aus 6 konnektionistischen Modulen mit assoziierten symbolischen Transformationsregeln für die Durchführung von Transformationen, die durch die konnektionistischen Netzwerke induziert werden. D.h. es gibt keinen Unterschied zwischen symbolischen und konnektionistischen Komponenten, sondern symbolische und konnektionistische Verarbeitung sind bereits auf Komponentenebene integriert.

Ferner gibt es einen Ansatz für ein integriertes hybrides System von eingebetteten Komponenten. Ähnlich wie in SCREEN sind die einzelnen Komponenten in CONNCERT [Wilson and Hendler 1993] von außen nur über einen Funktionsaufruf an einen sogenannten symbolischen Supervisor einer Komponente ansprechbar. Somit werden die internen subsymbolischen oder symbolischen Operationen nicht sichtbar. Zusätzlich besitzt der Supervisor auch Wissen zur Evaluierung des subsymbolischen generierten Output und kann eine automatische Adaptation oder Neutraining vornehmen, falls der Output als zu schlecht erkannt wird. Dies ist insbesondere für typische chemische Kontrollaufgaben sinnvoll, für die CONNCERT entwickelt wurde. Für die Zeit der Neuadaptation muß dann auf einen suboptimalen linearen traditionellen Controller zurückgegriffen werden.

6 Hybride Systeme in anderen Bereichen

Wir haben bisher die Klassifizierung und Beispiele insbesondere auf die natürlichsprachliche Verarbeitung und deren Repräsentation bezogen. Einige weitergehende aktuelle Referenzen in diesem Gebiet sind [Reilly and Sharkey 1992] [Miikkulainen 1993] [Wermter 1994 to appear]. In diesen Büchern wird insbesondere die hybrid konnektionistische Sprachverarbeitung behandelt. Auf detaillierte Beispiele aus anderen Bereichen konnten wir aus Platzgründen hier nicht eingehen. Das dargestellte Kontinuum und die Klassifizierung läßt sich jedoch auch für andere Bereiche erkennen. Im Bereich Expertensysteme und Neuronale Netzwerke sind als aktuelle Referenzen [Gallant 1993] und [Medsker 1994] zu nennen. Einen Einstieg in den Bereich hybrides Information Retrieval bekommt man in [Gersho and Reiter 1990] und [Rose and Belew 1989]. Ein System im Bereich Erklärung

und Fragebeantwortung wird in [Diederich and Long 1992] beschrieben, verschiedene aktuelle KI-Ansätze mit neuronalen Netzen in [Dorffner 1994 to appear]. Weiterhin werden hybride konnektionistische Ansätze im Bereich des Maschinellen Lernens verwendet, wie etwa bei [Utgoff 1988] [Towell and Shavlik 1991].

7 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Wir haben einen Überblick über die Grundlagen hybrider Systeme gegeben, eine Klassifizierung dieser Systeme vorgestellt, sowie einzelne repräsentative Beispielsysteme in diesem Kontext analysiert. Hybride Systeme haben sich als eine wichtige Klasse von Systemen der Künstlichen Intelligenz etabliert und werden weitere neue Aufgaben unterstützen können, die mit homogenen rein symbolischen oder rein konnektionistischen Repräsentationen nicht ausreichend unterstützt werden. Allerdings ist auch festzuhalten, daß hybride Systeme insbesondere dort erfolgreich eingesetzt werden können, wo die unterliegende Aufgabe nach verschiedenen Repräsentationsmechanismen verlangt. Sprachverarbeitung ist ein besonders gutes Beispiel für die Entwicklung und Verwendung hybrider Ansätze, da hier sowohl symbolische Strukturmanipulationen aber auch konnektionistische graduelle Plausibilität, Lernbarkeit und Fehlertoleranz zusammenkommen müssen.

Verschiedene Klassen von hybriden Architekturen sind erkennbar. Diese Architekturklassen stellen eher ein Kontinuum dar, von vollständig separaten sequentiellen lokalen Komponenten bis zu vollständig integrierten parallelen distributierten Komponenten. Bei einfacheren sequentiellen modularen Aufgaben können durchaus auch einfachere gekoppelte Architekturen verwendet werden. Dagegen liefern parallel integrierte hybride Systeme potentiell mächtigere Möglichkeiten der Interaktion vieler verschiedener Komponenten. Generell bietet das sich entwickelnde Kontinuum hybrider Architekturen das Potential symbolische und subsymbolische Verfahren eher kooperierend als konkurrierend einzusetzen.

Literatur

- [Diederich and Long 1992] Diederich J., Long D. L. (1992) Efficient question answering in a hybrid system. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. Singapore.
- [Dolan 1989] Dolan C. P. (1989) *Tensor Manipulation Networks: Connectionist and Symbolic Approaches to Comprehension, Learning, and Planning*. Research Report 576, Hughes Research Laboratories, Los Angeles.
- [Dorffner 1994 to appear] Dorffner G. (1994 to appear) *Neural Networks and a New AI*. Chapman and Hall, London, UK.
- [Dyer 1990] Dyer M. G. (1990) Distributed symbol formation and processing in connectionist networks. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence* 2, pp. 215-239.
- [Dyer 1991] Dyer M. G. (1991) Symbolic neuroengineering for natural language processing: a multilevel research approach. In: Barnden J. A., Pollack J. B. (Eds.) *Advances*

- in Connectionist and Neural Computation Theory, Vol.1: High Level Connectionist Models*, pp. 32-86. Ablex Publishing Corporation, Norwood, NJ.
- [Faisal and Kwasny 1990a] Faisal K. A., Kwasny S. C. (1990) Deductive and inductive learning in a connectionist deterministic parser. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2*, pp. 471-474. Washington, DC.
- [Faisal and Kwasny 1990b] Faisal K. A., Kwasny S. C. (1990) Design of a hybrid deterministic parser. *Proceedings of the 13th International Conference on Computational Linguistics*, pp. 11-16.
- [Gallant 1993] Gallant S. I. (1993) *Neural Network Learning and Expert Systems*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Gersho and Reiter 1990] Gersho M., Reiter R. (1990) Information retrieval using hybrid multi-layer neural networks. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2*, pp. 111-117. San Diego.
- [Hendler 1991] Hendler J. (1991) Developing hybrid symbolic/connectionist models. In: Barnden J. A., Pollack J. B. (Eds.) *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory, Vol.1: High Level Connectionist Models*, pp. 165-179. Ablex Publishing Corporation, Norwood, NJ.
- [Hendler 1989] Hendler J. A. (1989) Marker passing over microfeatures: towards a hybrid symbolic connectionist model. *Cognitive Science 13*, pp. 79-106.
- [Jain 1992] Jain A. N. (1992) Generalization performance in PARSEC - a structured connectionist parsing architecture. In: Moody J. E., Hanson S. J., Lippmann R. P. (Eds.) *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, pp. 209-216. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- [Lehnert 1991] Lehnert W. G. (1991) Symbolic/subsymbolic sentence analysis: exploiting the best of two worlds. In: Barnden J. A., Pollack J. B. (Eds.) *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory, Vol.1: High Level Connectionist Models*, pp. 135-164. Ablex Publishing Corporation, Norwood, NJ.
- [McClelland et al. 1986] McClelland J. L., Rumelhart D. E., Hinton G. E. (1986) The appeal of parallel distributed processing. In: Rumelhart D. E., McClelland J. L. (Eds.) *Parallel Distributed Processing, Vol. 1*, pp. 3-44. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Medsker 1994] Medsker L. R. (1994) *Hybrid Neural Network and Expert Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [Miikkulainen 1993] Miikkulainen R. (1993) *Subsymbolic Natural Language Processing*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Miikkulainen and Dyer 1989] Miikkulainen R., Dyer M. G. (1989) A modular neural network architecture for sequential paraphrasing of script-based stories. *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, pp. II 49-56. Washington.
- [Newell 1980] Newell A. (1980) Physical symbol systems. *Cognitive Science 4*, pp. 135-183.
- [Newell 1982] Newell A. (1982) The knowledge level. *Artificial Intelligence 18*, pp. 87-127.

- [Pollack 1987] Pollack J. B. (1987) *On Connectionist Models of Natural Language Processing*. PhD thesis, Technical Report MCCS-87-100, New Mexico State University, Las Cruces, NM.
- [Reilly and Sharkey 1992] Reilly R. G., Sharkey N. E. (1992) *Connectionist Approaches to Natural Language Processing*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
- [Rose and Belew 1989] Rose D. E., Belew R. K. (1989) A case for symbolic/subsymbolic hybrids. *Proceedings of the Eleventh Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 844-852. Ann Arbor, MI.
- [Rumelhart and McClelland 1986] Rumelhart D. E., McClelland J. L. (1986) PDP models and general issues in cognitive science. In: Rumelhart D. E., McClelland J. L. (Eds.) *Parallel Distributed Processing, Vol. 1*, pp. 110-146. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Smolensky 1988] Smolensky P. (1988) On the proper treatment of connectionism. *Behavioral and Brain Sciences 11*, pp. 1-74.
- [Sumida and Dyer 1989] Sumida R. A., Dyer M. G. (1989) Storing and generalizing multiple instances while maintaining knowledge-level parallelism. *Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1426-1431. Detroit, MI.
- [Sun 1991] Sun R. (1991) *Integrating Rules and Connectionism for Robust Reasoning*. PhD thesis, Brandeis University, Waltham, MA.
- [Sun 1994] Sun R. (1994) *Integrating Rules and Connectionism for Robust Commonsense Reasoning*. Wiley, New York.
- [Towell and Shavlik 1991] Towell G. G., Shavlik J. W. (1991) *The Extraction of Refined Rules from Knowledge-based Neural Networks*. Working Paper 91-4, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.
- [Utgoff 1988] Utgoff P. E. (1988) *Perceptron Trees: A Case Study in Hybrid Concept Representations*. COINS Tech. Report 88-08, University of Massachusetts, Amherst.
- [Waibel et al. 1992] Waibel A., Jain A. N., McNair A., Tebelskis J., Osterholtz L., Saito H., Schmidbauer O., Sloboda T., Woszczyna M. (1992) JANUS: speech-to-speech translation using connectionist and non-connectionist techniques. In: Moody J. E., Hanson S. J., Lippmann R. P. (Eds.) *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, pp. 183-190. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- [Waltz and Pollack 1985] Waltz D. L., Pollack J. B. (1985) Massively parallel parsing: a strongly interactive model of natural language interpretation. *Cognitive Science 9*, pp. 51-74.
- [Wermter 1992] Wermter S. (1992) A hybrid and connectionist architecture for a Scanning Understanding. *Proceedings of the 10th European Conference on Artificial Intelligence*, pp. 188-192. Vienna, Austria.
- [Wermter 1994 to appear] Wermter S. (1994 to appear) *Hybrid Connectionist Natural Language Processing*. Chapman and Hall.

- [Wermter and Lehnert 1989] Wermter S., Lehnert W. G. (1989) A hybrid symbolic/connectionist model for noun phrase understanding. *Connection Science* 1 (3), pp. 255-272.
- [Wermter and Weber 1994] Wermter S., Weber V. (1994) Learning Fault-tolerant Speech Parsing with SCREEN. *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*. Seattle, USA.
- [Wilson and Hendler 1993] Wilson A., Hendler J. (1993) Linking symbolic and subsymbolic computing. *Connection Science* 5, pp. 395-414.

