

Zur interdisziplinären Erforschung räumlichen Denkens

Christian Freksa¹

Universität Bremen

Der Begriff *Raumkognition* bezeichnet Prozesse, die räumliche Informationen verarbeiten, um räumliche oder nicht-räumliche Aufgaben zu lösen. Dieser Beitrag möchte am Beispiel der Raumkognition zeigen, wie sich unterschiedliche Forschungsansätze aus den verschiedenen Disziplinen der Kognitionswissenschaft wirkungsvoll ergänzen können. Das Forschungsgebiet Kognitionswissenschaft wird kurz charakterisiert. Es wird dargestellt, warum das Teilgebiet Raumkognition besonders gut für einen interdisziplinären Forschungsansatz mit einem vielfältigen Methodenrepertoire geeignet ist. Im Einzelnen werden empirische Untersuchungen an natürlichen kognitiven Systemen mit Untersuchungen formaler Theorien und abstrakter Modelle sowie mit explorativen Simulationsexperimenten in virtuellen Umgebungen in Verbindung gebracht. Möglichkeiten für Forschungsbeiträge der Künstlichen Intelligenz Forschung werden aufgezeigt. Eine Reihe von Fragen zur Untersuchung von Repräsentationsformen und Verarbeitungsprozessen für räumliches Wissen werden angerissen. Der Beitrag ist aus der Perspektive eines mit KI-Methoden arbeitenden Informatikers geschrieben, dessen Forschungsfragen aus der interdisziplinären Kooperation entstehen.

¹ Die Raumkognitionsforschung wurde und wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms *Raumkognition* und des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 8 *Spatial Cognition* großzügig unterstützt. Die Anfertigung dieses Beitrags wurde angeregt durch Diskussionen bei dem *Space Games* Symposium, das von Juerg Wassmann im Mai 2003 in Heidelberg organisiert wurde. Ich bedanke mich für wertvolle Kommentare von Katharine Willis, Katharina Stockhaus und Joachim Funke.

Einleitung

Die Bewältigung räumlicher Aufgaben ist für Mensch und Tier überlebenswichtig. Die räumlichen Zusammenhänge der für mobile Wesen relevanten Orte und Gegenstände sind jedoch so komplex, dass man sich fragen muss, wie ihre Gehirne die Informationen verarbeiten und für ihre Orientierung und Navigation nutzen können. Da es Mensch und Tier oft gelingt, sich im Raum zurechtzufinden, ergeben sich weitere Fragen zu räumlich-kognitiven Fähigkeiten: (1) können Informatiker und Ingenieure von der Natur lernen, damit sich auch künstliche autonome Wesen im Raum zurechtfinden können? (2) können die Lösungen der Informatiker Menschen in geeigneter Weise unterstützen, räumliche Aufgaben zu lösen, wo diese mit ihrer Aufgabe überfordert sind? (3) Können die effizienten und effektiven Lösungsansätze für räumliche Aufgaben auf nicht-räumliche Aufgaben übertragen werden?

Zur Untersuchung dieser Fragen befassen wir uns mit drei Gegenstandsbereichen: (a) mit kognitiven Agenten, (b) mit ihren räumlichen Umgebungen und (c) mit dem Wissen über den Raum, das die Agenten zur Orientierung verwenden können. Dieses Kapitel beschreibt, wie das Fachgebiet *Künstliche Intelligenz* (KI) empirische Untersuchungen aus Feld- und Laborstudien einsetzen kann und wie es zum Entwurf empirischer Untersuchungen mit Versuchspersonen beitragen kann. Ich möchte aufzeigen, dass die KI zwischen empirischer Forschung und theoretischer Modellierung Methoden bereitstellt, die im interdisziplinären Forschungsgefüge einen wertvollen Beitrag leisten, um die Funktionen des räumlichen Denkens aufzuschlüsseln.

Kognitionswissenschaft und KI – ein skizzenhafter Abriss

Bereits seit der Antike setzen sich Philosophen mit der Natur des Denkens auseinander. In der Neuzeit haben Erkenntnisse über Anatomie und Physiologie Grundlagen für die Erforschung von Wahrnehmungsprozessen und die Untersuchung menschlichen Verhaltens geliefert. Im vergangenen Jahrhundert kamen umfassende Erkenntnisse zur Psychophysik von Perzeptionsprozessen und zur Anatomie und Elektrophysiologie von Nervennetzen hinzu. Die Psychologie bewegte sich von der Untersuchung von Reiz-Reaktions-Mustern zur funktionalen Erklärung kognitiver Prozesse. Gleich-

zeitig entwickelten Sprachwissenschaftler ein Interesse an Struktur und Semantik von Sprache, Neurowissenschaftler begannen, neuronale Schaltkreise auf der Ebene von Zellverbänden zu verstehen, und kognitive Anthropologen und Ethnologen untersuchten Charakteristika und Unterschiede bei der Konzeptualisierung der Welt in verschiedenen Kulturen.

„Denkphilosophen“ befassten sich mit fundamentalen Fragen wie dem Leib-Seele-Problem oder der Möglichkeit der Existenz einer „künstlichen Intelligenz“; die empirischen Disziplinen beobachteten und beschrieben Beziehungen zwischen physischen, psychischen oder sozialen Situationen und den menschlichen Umgang damit – jede mit ihrer eigenen wissenschaftlichen Fragestellung; die KI entwickelte Modelle zum Problemlösen und zur Entscheidungsfindung und entwickelte Systeme zum automatischen Schließen.

Trotz des tiefgehenden menschlichen Interesses, die Natur des Denkens zu ergründen, waren Computer als „künstliche Hirne“ und Problemlöseparadigmen aus der KI als „künstliche Seelen“ erforderlich, um die traditionelleren Disziplinen, die unterschiedliche Aspekte der Kognition untersuchten, zu einer „Interdisziplin“ (Tack, 1997) zusammenzuführen. Das neue Forschungsgebiet *Kognitionswissenschaft* entstand Mitte der 1970er Jahre als ein Gemeinschaftsunternehmen seiner beteiligten Disziplinen (Norman, 1981).

Wieso wirkte die formale und technische Disziplin KI als Katalysator für gemeinsame interdisziplinäre Kognitionsforschung? Der Grund ist darin zu finden, dass sich Computer und Kalküle als brauchbare und starke Metaphern für Hirne und kognitive Prozesse erwiesen, auf die sich alle an der Denkforschung beteiligten Disziplinen beziehen und an denen sie sich „reiben“ konnten. Die Tatsache, dass Computer konkrete Apparate sind, die mit primitiven Operationen vertraute Leistungen hervorbringen, und die sich in heute allseits verfügbaren Technologien wieder finden, trug zur Schaffung einer gemeinsamen Sprache bei, mit der wir kognitive Funktionen technisch fundiert charakterisieren können.

Zusätzlich provozieren diese dummen Apparate, die ähnliche Funktionen wie menschliche Köpfe ausüben scheinen, diejenigen Humanisten, die es als gottgegeben ansehen, dass Denken und Intelligenz ausschließlich Menschen vorbehalten sei. Diese Provokation – kombiniert mit wohldefinierten gemeinsamen Konzepten – bildete eine solide Grundlage für aufregende Debatten und wissenschaftliche Untersuchungen über das Wesen der Kognition und den Begriff der Intelligenz.

Da Computer und KI-Programme auf der Basis elementarer Bausteine geschaffen sind, deren fundamentale Funktionen und Interaktionen wir kennen, verstehen wir die Prinzipien, nach denen Computer und ihre Programme funktionieren, sehr genau. Auf einer bestimmten Abstraktionsebene ähneln diese Bausteine und ihre Funktionen denen des Substrates natürlicher kognitiver Prozesse (Neuronen und neuronale Netze), so dass wir sie als Nachbildung natürlicher Vorbilder betrachten können. Diese Abstraktionsebene ist die Ebene der Informationsverarbeitung, die eine gemeinsame Grundlage für die an der Kognitionswissenschaft beteiligten Disziplinen bildet. In ihrer *Physical Symbol System Hypothesis* (PSSH) behaupten Newell und Simon (1976), dass Intelligenz auf Symbolsystemen beruht und Berechnungen über Symbolen wie in einem Computer erfordert.

Die Computer-inspirierte PSSH dieser beiden Psychologen und KI-Pioniere lieferte gerade das richtige Maß an Abstraktion und Provokation, das Vertreter recht unterschiedlicher Disziplinen auf den Plan rufen würde. Die Philosophie des Geistes hatte Denkprozesse bereits seit geraumer Zeit als Manipulation abstrakter Symbole diskutiert; Symbole als physische Entitäten zu betrachten und diese um ein Symbolverarbeitungsmodell – den Computer – zu ergänzen, hat es ermöglicht, philosophische Theorien in gewissem Umfang zu testen (Searle, 1980). Es stand eine Sprache zur Verfügung, die es ermöglichte, Konzepte wie ‚Intelligenz‘ in Frage zu stellen bzw. die Begriffsbildung hinter solchen Konzepten zu überdenken.

In den 1980er Jahren verlagerte sich das Interesse an kognitiver Informationsverarbeitung von der symbolischen Verarbeitungsebene auf eine ‚subsymbolische‘ Ebene (Rumelhart et al. 1986), von Bauklötzchen-Beispielen auf Real-Welt Anwendungen und von Erklärungsmodellen auf Leistungswettbewerbe. Die körperliche Einbettung von Berechnungsprozessen kognitiver Agenten (*embodiment*) und die Interaktion zwischen den Agenten und ihrer Umgebung wurden als dringlicher betrachtet als die Frage nach dem epistemologischen Status von Repräsentationen (Varela et al. 1991; Clark, 1997; Pfeifer and Scheier, 1999; Wilson, 2002). Gleichwohl werden noch heute subsymbolische körperlich eingebettete Berechnungsmodelle auf symbolisch programmierten Computern umgesetzt und die PSSH wurde noch nicht durch alternative Erklärungsmodelle überholt.

Damit ein Forschungsparadigma ergiebig sein kann, benötigt es substantielle Überlappung mit existierenden Theorien (Kuhn, 1962); es muss aber auch Herausforderungen enthalten und Raum zu seiner Verwerfung bieten. Manche Forscher waren beunruhigt durch den starken Anspruch der PSSH und / oder empfanden sie als Abwertung des speziellen Status von Menschen

bezüglich ihrer grundsätzlichen und ausschließlichen Befähigung zur Intelligenz. Folgerichtig wurde Forschung initiiert, die das Ziel hatte, die Gültigkeit der Hypothese zu widerlegen. Diese Forschung verhalf zu differenzierteren Betrachtungen zu Begriffen wie ‚Intelligenz‘ und zu einem besseren wechselseitigen Verständnis zwischen den verschiedenen Disziplinen.

Psychologen, Linguisten und kognitive Anthropologen drücken heute ihre Konzepte und Begriffe durch formale Symbole und ihre Beziehungen zueinander aus; diese können oft direkt in die Begriffswelt der KI übertragen und mithilfe von Computermodellen prozedural überprüft werden. Diese Modelle werden unweigerlich Verhaltensunterschiede im Vergleich zu ihren Vorbildern aufweisen. Unterschiede zwischen den neuen Artefakten und ihren Vorbildern werfen interessante neue Forschungsfragen für die Kognitionsforschung auf, die zu weiteren empirischen Untersuchungen führen können.

Raumkognition

Im Kontext interdisziplinärer Kognitionsforschung ist *Raumkognition* in mindestens zweierlei Hinsicht von Interesse. (1) Aus einer empirischen und einer analytischen Perspektive befasst sich Raumkognition mit der Frage, wie Menschen, Tiere oder Apparate über realen oder abstrakten Raum ‚denken‘; Raum ist hier Gegenstand der Kognition. (2) Aus einer formalen und einer synthetischen Perspektive interessiert sich Raumkognition für die Frage, wie räumliche Strukturen eingesetzt werden können, um kognitive Prozesse umzusetzen; hier bilden räumliche Strukturen ein Mittel für die Implementierung kognitiver Prozesse (Freksa, 2004).

Die erste Perspektive betrachtet kognitive Agenten und untersucht, wie sie mit ihrer räumlichen Umgebung, ihrer Selbstlokalisierung und der Lokalisation anderer Objekte in ihrer räumlichen Umgebung umgehen. Die zweite Perspektive befasst sich mit den Implikationen der Tatsache, dass kognitive Agenten in räumliche Strukturen eingebunden sind und selbst auch räumlich strukturiert sind. Räumliche Strukturen der Umgebung müssen sich auf irgendeine Weise in den Strukturen der Agenten widerspiegeln – sonst könnten sie nichts über ihre räumliche Umgebung wissen. Diese internen Strukturen sind von besonderem Interesse für Neurowissenschaftler, kognitive Psychologen und KI-Forscher. Die internen Strukturen haben einen starken Einfluss auf die kognitiven Prozesse der Agenten, einschließlich

ihrer Perzeption, ihres Schließens, ihrer Interaktion mit Sprache und Gesten, und ihrer Handlungen im Raum.

Für die KI ist die Raumkognition ein besonders interessantes Feld zur Erforschung kognitiver Prozesse, da viele räumliche Konzepte in physischen Strukturen verankert sind, was für abstraktere Konzepte nicht der Fall ist. Als Konsequenz hieraus können wir rigorose wissenschaftliche Methoden zur (physischen oder mathematischen) Validierung unserer Theorien einsetzen, wenn wir sie auf konkrete physische Umgebungen anwenden. Die Herausforderung für die KI liegt dann darin, adäquate Korrespondenzbeziehungen zwischen abstrakten räumlichen Konzepten und konkreten räumlichen Umgebungen zu etablieren und Repräsentationen dieser Konzepte und Berechnungsprozeduren zu entwickeln, die diese Repräsentationen benutzen.

Obwohl Raumkognition sich mit mentalen Prozessen befasst, verbindet sie also die mentale Realität mit der physischen Realität. Diese Verbindung wird über Wahrnehmungs- und Handlungsprozesse hergestellt. Interaktionen zwischen Agenten (z.B. mit Sprache oder Gesten) beinhalten sowohl Wahrnehmungs- als auch Handlungsprozesse.

Wahrnehmungsorgane (oder technische Perzeptoren) übertragen modalitätsspezifische physische Stimuli in modalitätsunspezifische Informationseinheiten. Obwohl die Informationsträger ebenfalls eine physische Modalität haben, werden sie auf einer abstrakteren Informationsverarbeitungsebene behandelt; das spezifische physische Substrat hat keine Bedeutung für die dargestellten Informationen. Für Aktuatoren (z.B. Muskeln, Drüsen oder Motoren) ist es genau umgekehrt: modal unspezifische Informationen werden in modalitätsspezifische Aktionen verwandelt.

Mit anderen Worten: Wahrnehmungsorgane und Aktuatoren dienen als Schnittstellen zwischen physischer und mentaler Welt. Sie machen deutlich, dass der Übergang von physischer zu mentaler Welt nicht durch einen Übergang von materieller zu spiritueller Realität umgesetzt sein muss; das Wesentliche ist, dass auf der physischen Ebene andere Aspekte einer Entität relevant sind als auf der mentalen Ebene; entscheidend sind die unterschiedlichen Abstraktionen, die verwendet werden.

Da Wissensrepräsentation ein zentrales Thema der Kognitionswissenschaft ist und Wissen als Information über die Welt betrachtet wird, sind für kognitive Psychologen und KI-Forscher Abstraktionen, die für Inferenzprozesse geeignet sind, von zentralem Interesse. Die Untersuchung abstrakter Repräsentationen konkreter Entitäten ist dabei besonders reizvoll, weil wir

oft gut wissen, was die Anforderungen an die konkrete physische Welt sind; die Erkundung von Abstraktionsprinzipien in einer Domäne, die wir bereits gut kennen, sollte uns bei der Entwicklung geeigneter Repräsentationen für abstraktere Domänen nützlich werden können.

Empirische Untersuchungen natürlicher kognitiver Systeme

KI-Forscher können natürliche Systeme als Existenzbeweis für funktionierende kognitive Mechanismen heranziehen. Solche Existenzbeweise eignen sich dazu, pessimistische Hypothesen bezüglich kognitiver Möglichkeiten, wie sie etwa aus der Theoretischen Informatik kommen, zu relativieren. Zum Beispiel macht die Komplexitätstheorie eine Aussage über die Berechnung optimaler Lösungen von Wegfindungsproblemen, nämlich dass ‚exponentielle Zeit‘ für die Lösung dieses Problems erforderlich ist. Dies besagt, dass die zur Lösung eines Wegfindungsproblems erforderliche Zeit exponentiell mit der Größe des Problems wächst. Auf der anderen Seite können uns empirische Untersuchungen zeigen, dass Menschen lediglich ‚logarithmische Zeit‘ für die Lösung von Wegfindungsproblemen in Anspruch nehmen.

Diese Diskrepanz wirft die Frage auf, ob natürliche kognitive Systeme in der Lage sind, die theoretischen Grenzen der Komplexitätstheorie zu überschreiten. Auf der Basis der Physical Symbol System Hypothesis suchen wir zunächst jedoch andere Erklärungen für diese Diskrepanz, d.h., wir gehen davon aus, dass Wissensverarbeitung beim menschlichen Problemlösen den gleichen Naturprinzipien unterworfen ist wie in formalen Symbolverarbeitungssystemen, wie sie in der Informatik und der KI untersucht werden.

Es gibt eine Reihe nahe liegender Ursachen für solche Diskrepanzen: die Theorie kann falsch sein; die empirischen Ergebnisse können falsch interpretiert worden sein; die Theorie und die empirische Untersuchung können sich auf unterschiedliche Probleme beziehen – oder zumindest auf unterschiedliche Bedingungen, unter denen die Probleme durchgeführt wurden; etc. Höchstwahrscheinlich sind bestimmte Annahmen über das Problem falsch, zum Beispiel, dass die Lösung optimal sein muss.

Nehmen wir nun einmal an, die empirische Untersuchung ergab, dass die Teilnehmer der Studie tatsächlich optimale Lösungen generiert haben. Rechtfertigt dieser Befund die Annahme einer optimalen Wegfindungsstrategie? Natürlich nicht! Das untersuchte kognitive System kann ‚Glück‘

gehabt haben und mit einer sub-optimalen Strategie (die unter Umständen erheblich effizienter als eine optimale Strategie ist) optimale Lösungen gefunden haben; dies impliziert aber nicht, dass die Strategie optimale Lösungen garantiert.

Es kann gute Gründe geben, warum unser kognitives System auch ohne optimalen Algorithmus sehr gute Lösungen gefunden hat, warum also gewissermaßen das Glück kein Zufall war: die Repräsentation der räumlichen Umgebung und die kognitiven Prozesse, die mit dieser Repräsentation arbeiten, können gute Lösungen begünstigen; alternativ können die speziellen Aufgaben, die von natürlichen kognitiven Systemen gelöst werden müssen, es besonders einfach machen, gute Lösungen zu finden. In anderen Worten: eine generell optimale Prozedur mag für die spezielle Struktur unserer Aufgabe gar nicht erforderlich sein; eine einfachere, effizientere Prozedur kann in speziellen Fällen ausreichen, sehr gute oder sogar optimale Lösungen zu finden. Auf diese Weise können uns empirische Befunde bei der Identifizierung von geeigneten spezialisierten Repräsentationen, Verarbeitungsprozessen und Aufgabenklassen unterstützen, die ‚kognitiv adäquater‘ sind als solche, die sich ausschließlich auf theoretische Überlegungen stützen.

Nachweise mittels *proof of concept* erfordern keine statistischen Auswertungen über eine Grundgesamtheit kognitiver Agenten; Fallstudien können unter Umständen erheblich besser geeignet sein, ein klares Bild von spezifischen Repräsentationen und Prozeduren zu vermitteln, die ein kognitiver Agent einsetzt, da spezielle Ausprägungen – die für das Verständnis kognitiver Mechanismen besonders wichtig sein können – nicht durch ‚Mittelung‘ verschleiert werden.

Unglücklicherweise wird der spezifische Wert von Fallstudien in den empirischen Wissenschaften nicht allgemein geschätzt, da es traditionell ein dominantes Interesse an der Untersuchung ‚normalen‘ Verhaltens gibt und weniger an den spezifischen zugrunde liegenden Mechanismen. Höhere kognitive Funktionen können jedoch interindividuell recht unterschiedlich verursacht sein. In der Kognitionsforschung tätige KI-Forscher sind oft primär daran interessiert, Verarbeitungsprinzipien zu verstehen, die in kognitiven Systemen zum Einsatz kommen können; wie sich der Einsatz dieser Verarbeitungsprinzipien auf Agentenpopulationen verteilt, ist für KI-Forscher von sekundärer Bedeutung. Diese Prinzipien können anhand individueller kognitiver Leistungen oft besser nachvollzogen werden als anhand von Populationsstudien.

Formale Theorien und abstrakte Modelle

Formale Theorien ermöglichen Informatikern die Ableitung von Antworten auf bestimmte Fragen oft auf effektivere und effizientere Weise als andere Methoden; insbesondere dienen formale Methoden zur Ermittlung der *Korrektheit* (produziert das Modell nur richtige Lösungen?) und der *Vollständigkeit* (produziert das Modell alle Lösungen?) von Modellen. Zusätzlich helfen formale Theorien bei der Untersuchung von Betriebsmittelanforderungen für Berechnungsprozesse: wie viel Speicher, Rechenkapazität und Zeit sind für einen bestimmten Berechnungsprozess erforderlich? Wie verändern sich diese Anforderungen mit verschiedenen Parametern? Wie ist das schlechtest-mögliche Verhalten eines gegebenen Prozesses unter widrigen Bedingungen? Wie ist das Durchschnittsverhalten unter typischen Bedingungen? Formale Theorien liefern auch wichtige Erkenntnisse bezüglich wichtiger Sonder- oder Grenzfälle, die genauer zu untersuchen sind und können auf diese Weise zu einer Reduzierung des Aufwandes bei der Durchführung empirischer Untersuchungen beitragen.

Natürlich beziehen sich die formal abgeleiteten Antworten auf die Fragen zu den Berechnungseigenschaften auf die interne Struktur eines gegebenen Modells; sie können keinen Aufschluss über die kognitive Adäquatheit der Modelle geben. Sie können jedoch Hinweise auf entscheidende Fragen geben, die empirisch untersucht werden können. Zum Beispiel, wenn ein Berechnungsmodell vorhersagt, dass ein Berechnungsmodell vier Mal so lang rechnen muss, um ein gegebenes Wegfindungsproblem zu lösen, als für ein Problem mit halb so vielen Entscheidungspunkten, dann können wir dieses Modell empirisch verwerfen oder stützen, indem wir Versuchspersonen mit den entsprechenden Problemen konfrontieren und das relative Zeitverhalten ihrer Problemlöseprozesse vergleichen.

Wir können Modelle durch Widerlegung verwerfen, aber wir können ein Modell nie durch Verhaltensvergleich als strukturell richtiges Modell identifizieren; es kann eine Vielzahl weiterer Modelle geben, die das gleiche Verhaltensmuster hervorbringen. Wir können durch Bestätigung des Verhaltens lediglich die Plausibilität eines Modells stützen. In der Regel bevorzugen wir das einfachste Modell, das mit den empirischen Befunden übereinstimmt, so lange keine guten Gründe für die Verwendung eines komplexeren Modells sprechen. Da somit das Verwerfen einer Hypothese zu stärkerem Wissensgewinn führen kann als eine Bekräftigung, lohnt sich die Untersuchung ,ris-

kanter‘ Hypothesen (Hypothesen, die ein echtes Potenzial tragen, verworfen zu werden) mehr als die Untersuchung relativ sicherer Hypothesen.

Die Strenge, die für formale Theorien und Modelle erforderlich ist, schärft die Aufmerksamkeit für Faktoren, die in informellen Modellen leicht übersehen werden. Sie erlaubt auch die Aufstellung von Hypothesen über kognitive Performanz unter extremen Bedingungen, die empirisch nicht leicht zugänglich sind. In Wechselwirkung mit empirischen Studien können formale Theorien dazu beitragen, Hypothesen über die Dimensionen eines kognitiven Systems und über ihre Beziehungen untereinander aufzustellen. Formale Modelle helfen bei der Entwicklung von Theorien, die nach naturwissenschaftlichen Standards und den Standards der Logik untersucht werden können.

Simulation in virtuellen Umgebungen

Wenn uns ein abstraktes Modell von räumlich-kognitiven Prozessen auf der Basis seiner formalen und kognitiven Eigenschaften zusagt, möchten wir gerne wissen, was es in der Praxis leistet. Überlegungen mit Bleistift und Papier können über bestimmte statische Eigenschaften Aufschluss geben, aber Kognition kann nicht adäquat durch statische Eigenschaften beschrieben werden, da es komplexe dynamische Prozesse betrifft. Die beschränkten menschlichen Vorstellungsmöglichkeiten reichen meist nicht aus, um alle Implikationen eines Modells zu erkennen, das komplexe dynamische Prozesse beschreibt; wir sind offenbar kognitiv befangen und sehen nur eine oder wenige mögliche Interpretationen von Modellen (‘präferierte Modelle‘ – Knauff et al. 2002), und ignorieren weitere Alternativen.

Um Begrenzungen bei der menschlichen Interpretation formaler Modelle von kognitiven Prozessen zu überwinden, implementieren KI-Forscher ihre Modelle gern in Form von ausführbaren Computerprogrammen; auf diese Weise können sie den Gesamteffekt intendierter formaler Eigenschaften beobachten. Für Prozesse der Raumkognition bedeutet das, dass wir unsere Prozesse in räumlichen Umgebungen ablaufen lassen müssen. Da dies schwierig umzusetzen sein kann, simulieren wir auch räumliche Umgebungen, d.h. wir entwerfen formale Strukturen, die sich möglichst wie physischer Raum verhalten sollen, wenn kognitive Prozesse mit ihnen interagieren (‘virtuelle räumliche Umgebungen‘).

Nun können wir Raumkognitionsprozesse in Aktion untersuchen. Wir können das Verhalten simulierter kognitiver Agenten mit dem ihrer Vorbilder vergleichen, und wir werden entdecken, dass unsere künstlichen kognitiven Agenten Verhaltensweisen hervorbringen, die weder vorhergesehen noch intendiert waren. Da wir die Architektur dieser Agenten jedoch im Detail kennen, ist es oft nicht allzu schwer, die Gründe hinter diesem Verhalten herauszufinden und den Entwurf zu modifizieren, um schließlich das erwünschte Verhalten besser anzunähern.

Künstliche kognitive Agenten im physischen Raum

Eine simulierte virtuelle Umgebung ist nicht identisch mit dem realen physischen Raum. Wie im Fall künstlicher kognitiver Agenten, sind zunächst nur die offensichtlichen und gut verstandenen Eigenschaften der realen räumlichen Umgebung erfasst und in der virtuellen Umgebung implementiert. Die wahre Herausforderung für einen raumkognitiven Agenten ist daher die Konfrontation mit ‚echten‘ physischen räumlichen Umgebungen. Daher müssen wir das kognitive Modell unseres Agenten mit der physischen räumlichen Umgebung verbinden.

Ein kognitives Modell mit der physischen Welt verbinden heißt: wir müssen eine Schnittstelle bereitstellen und mit Hilfe von Sensoren Aspekte des physischen Raums in die Repräsentation unseres Modells übertragen. Umgekehrt müssen wir auch Aktuatoren bereitstellen, die Modelle räumlicher Handlungen in physische Handlungen in der räumlichen Umgebung umsetzen.

Als Schnittstellen zwischen der physischen räumlichen Welt und der mentalen Repräsentationswelt, müssen Sensoren und Aktuatoren an beide Welten angepasst sein, um zwischen ihnen effektiv und angemessen zu kommunizieren. KI-Forscher und kognitive Robotiker beginnen typischerweise mit räumlichen Umgebungen, bei denen es leicht ist, die Sensordaten zu interpretieren und die Handlungen zu steuern, zum Beispiel Welten mit ebenen horizontalen Grundflächen, geraden Wänden, usw.

In diesen Welten setzen wir ‚autonome‘ Roboter als räumlich kognitive Agenten ein. Sie sind mit Sensoren unterschiedlicher Art ausgestattet (z.B. Kameras zum Sehen, Ultraschall und Berührungssensoren, um Hindernisse zu fühlen, Laser Range Finder zum Messen von Entfernungen), Aktuatoren

(z.B. Motoren und Räder, um den Roboter zu bewegen, Arme zum Greifen) und einen Computer (das Hirn des Roboters), um die Sensordaten zu interpretieren und auf Basis von Sensorinformationen und Hintergrundwissen räumliche Inferenzen zu ziehen („räumlich denken“) sowie um die Aktuatoren zu steuern.

Wir können nun die Frage stellen, was die Gemeinsamkeiten zwischen diesen künstlichen kognitiven Agenten und menschlichen Wesen sind, die in einem reichhaltigen sozialen und kulturellen Kontext aufgewachsen sind und in Jahrhunderte-langer Tradition Konzepte ihrer Umgebung entwickelt haben. Es gibt natürlich nicht allzu viele Gemeinsamkeiten – und wir sind uns sehr wohl darüber im Klaren, dass wir kulturell deprivierte Artefakte schaffen. Aber wir sind an der Erforschung notwendiger und hinreichender Bedingungen interessiert, um spezifische kognitive räumliche Aufgaben zu lösen. Um komplexe kognitive Interaktionen empirisch zu lösen, haben wir im Wesentlichen die Wahl, die räumliche Umgebung zu kontrollieren („Laborbedingungen“) oder den kognitiven Agenten zu kontrollieren, oder beides – ansonsten werden wir nicht in der Lage sein, unsere Forschungshypothesen mit naturwissenschaftlichen Methoden zu prüfen.

Die verschiedenen Optionen haben alle ihre Vor- und Nachteile. Die räumliche Umgebung zu kontrollieren hat den Vorteil, dass wir auch natürliche kognitive Agenten – insbesondere Menschen – untersuchen können; der Nachteil ist, dass wir nicht sicher sein können, dass sie sich unter kontrollierten Bedingungen genau so wie unter natürlichen Bedingungen verhalten werden. Kognitive Agenten zu kontrollieren hat eine lange Tradition in den Neurowissenschaften: wir können die kognitiven Fähigkeiten von Patienten oder Tieren mit spezifischen bekannten neurologischen Defiziten untersuchen; dies ermöglicht es, kognitive Defizite mit neurologischen Defiziten in Verbindung zu bringen und Schlüsse über die Funktionalität der entsprechenden voll funktionalen neurologischen Strukturen zu ziehen. Natürlich können (und wollen!) wir die Funktionalität unserer kognitiver Agenten in solchen Experimenten nicht auf eine elementare Ebene zurückführen, auf der wir die Rolle spezifischer neuronaler Module für die kognitive Performanz untersuchen könnten. Abgesehen von den ethischen Problemen, die wir uns mit solchen Versuchen einhandeln würden, besteht bei diesem Ansatz auch die Gefahr, wichtige Interaktionen zwischen neuronalen Modulen zu verlieren, die entscheidend für die untersuchten kognitiven Prozesse sein könnten.

Künstliche kognitive Agenten bieten einen Ausweg aus diesem Dilemma: der Agent ist kontrolliert, da wir die Funktionalitäten seiner Komponenten

und seine Architektur kennen. Wir können darauf hinarbeiten, dass wir künstliche Agenten unter relativ normalen Bedingungen einsetzen können – wobei wir uns darüber im Klaren sind, dass die Bedingungen notwendigerweise weniger natürlich sind, wenn wir einen Roboter – oder einen Ethnologen – auf die natürliche Umgebung loslassen.

Da künstliche kognitive Agenten im Vergleich zu neurologischen Patienten mit spezifischen Defiziten hoch spezialisierte *low performers* sind, haben wir den zusätzlichen Vorteil, dass wir Unterschiede bei der Charakteristik von Problemlöseprozessen zwischen künstlichen und natürlichen kognitiven Agenten feststellen werden. Um diese Unterschiede zu verkleinern, werden wir typischerweise zusätzliche Erklärungen und Mechanismen benötigen. Es ist wesentlich einfacher, solche Erklärungen inkrementell durch System-synthese als dekrementell durch Systemanalyse zu ermitteln (Braitenberg 1984).

Zusammenfassend können wir feststellen, dass wir mit diesem Ansatz die Wissenslücke in unserem Verständnis zwischen räumlicher Performanz auf der einen Seite und den zugrunde liegenden funktionalen Mechanismen auf der anderen Seite zu verringern hoffen.

Empirische Untersuchungen in unnatürlichen Welten

Die Ausführungen des vorigen Abschnitts legen nahe, dass empirische Studien mit künstlichen kognitiven Agenten eine wertvolle Ergänzung zu empirischen Studien mit natürlichen kognitiven Agenten darstellen können. Während diese Ausführungen auf Agenten in realen oder simulierten natürlichen räumlichen Umgebungen fokussierten, möchte ich im vorliegenden Abschnitt auf den Nutzen empirischer Studien in unnatürlichen Umgebungen eingehen.

Natürliche kognitive Systeme sind an ihre natürlichen Umgebungen angepasst. Wenn wir Umgebungen und adaptierte Agenten als fest miteinander verbundene Systeme untersuchen, können wir nicht viel über die Adaptionsparameter und die Adaptionsmechanismen in Erfahrung bringen; wir müssen kognitive Agenten von ihren Umgebungen dissoziieren, um zu untersuchen, ob unser kognitives Verarbeitungsmodell unter unterschiedlichen Randbedingungen so verhält, wie unsere Theorie vorhersagt. Ebenso, wie Physiologen Experimente unter Schwerelosigkeit oder unter erhöhten Gravitations-

kräften durchführen, um Effekte der Gravitation auf Funktionen lebender Organismen zu untersuchen, so können wir mit Räumen experimentieren, die unterschiedliche Eigenschaften haben, als unser gewöhnlicher physischer Raum; wir können auf diese Weise die Effekte räumlicher Strukturen auf raumkognitive Verarbeitungsmodelle testen.

Im sechsten Abschnitt dieses Kapitels wurden virtuelle räumliche Umgebungen für kognitive Agenten behandelt, die so entworfen sind, dass sie natürlichen räumlichen Umgebungen in bestimmter Hinsicht so ähnlich wie irgend möglich sind; der Vorteil der virtuellen Welten liegt darin, dass Konfigurationen einfacher und systematischer variiert werden können als in realen Welten (vgl. Wiener & Mallot, 2003). Hier möchte ich nun über das Design von Umgebungen sprechen, in denen nicht Konfigurationen sondern intrinsische Eigenschaften des physischen Raums in Frage gestellt werden, indem sie intentional verändert werden.

Beispielsweise setzen wir als selbstverständlich voraus, dass bestimmte geometrische Gesetze im Raum erfüllt sind und wir nutzen diese Eigenschaften aus, um zu navigieren und unseren Weg zu finden; insbesondere verlassen wir uns auf metrische Eigenschaften des Raumes, die in der Dreiecksungleichung verankert sind: der Abstand zwischen zwei Punkten A und C ist höchstens so groß wie die Summe des Abstands zwischen A und B und des Abstands zwischen B und C. Was geschieht nun mit unseren räumlichen Inferenzfähigkeiten, wenn wir geometrische Gesetze des Raumes verändern? Sind unsere mentalen Strukturen flexibel genug, sich an hypothetische Eigenschaften des Raumes anzupassen oder sind wir intrinsische Teile unserer physischen Umgebung und ihrer genuinen Eigenschaften, so dass unsere kognitiven Fähigkeiten von diesen abhängig sind?

Empirische Untersuchungen in unrealistischen räumlichen Umgebungen könnten uns Hinweise darauf geben, auf welcher Abstraktionsebene die zu Grunde liegenden räumlichen Repräsentationen und Inferenzmechanismen angelegt sind. Wenn wir uns – oder unsere künstlichen kognitiven Agenten sich – leicht an neue Arten von Räumen anpassen können, dann ist dies ein Hinweis darauf, dass die Agenten ihr Wissen auf einer ziemlich abstrakten Ebene repräsentieren; falls sie jedoch nicht adaptionsfähig sind (d.h. sie machen spezifische Fehler oder ihre Performanz erreicht nicht das gleiche Maß wie im natürlichen Raum), dann ist dies ein Anzeichen dafür, dass räumliches Wissen auf einer ziemlich konkreten Ebene repräsentiert ist und von den spezifischen Strukturen und Eigenschaften des natürlichen physischen Raumes Gebrauch macht.

Kontext

In kognitiven Systemen wird ein großer Teil der Information, die den kognitiven Agenten zur Verfügung steht, über die Umgebung und nicht über explizite mentale Repräsentationen und explizite Kommunikation transportiert (Freksa 1980). Unterschiedliche Arten von Kontext können von kognitiven Agenten für die Kommunikation und für die effiziente Interpretation der Umgebung und anderer kognitiver Agenten eingesetzt werden. Vom Standpunkt des *cognitive engineering* ist dies eine geschickte Methode, um mit der Komplexität der Welt zu Recht zu kommen; die Methode heißt *cognitive offloading* (Larkin & Simon 1987, Wilson 2002).

Im dritten Abschnitt dieses Kapitels habe ich umgebungsinhärente räumliche Strukturen angesprochen, die die möglichen Konfigurationen von Objekten in der Umgebung einschränken und es dadurch stark erleichtern, mit der Umgebung zu Recht zu kommen. Neben den inhärenten räumlichen Strukturen können Perzeption, Schlussfolgerungsprozesse, Handlung und Interaktionsprozesse von zusätzlichen Strukturierungsmechanismen profitieren. Diese Mechanismen ergeben sich aus den Beziehungen zwischen den Entitäten, mit denen die kognitiven Systeme auf unterschiedlichen Ebenen der kognitiven Verarbeitung umgehen. An dieser Stelle möchte ich drei solcher Kontexte beschreiben: den *Situationskontext*, den *Sprachkontext* und den *Aufgabenkontext*.

Situationskontext ist eine Struktur, die auf inhärenten räumlichen Strukturen physischer Umgebungen durch die Art und Weise, in der die Welt arrangiert ist, entsteht. Zum Beispiel können Möbel in einem Gebäude so arrangiert sein, dass die Stühle über alle Räume des Gebäudes verteilt sind, oder alle Stühle können in einem Teil des Gebäudes verteilt sein während andere Teile des Gebäudes von Stühlen freigehalten werden. Solche Arten von Arrangements generieren Situationskontexte, die den Hintergrund für kognitive Ereignisse in der Umgebung bilden. Beispielsweise werden Hinsetz-Akte mit Bezug auf das aktuelle Arrangement der Stühle interpretiert und verstanden und nicht mit Bezug auf alle denkbaren Arrangements, die Stühle in unserer räumlichen Umgebung einnehmen könnten.

In ähnlicher Weise interpretieren wir Wegbeschreibungen mit Bezug auf den aktuellen Layout von Straßen; als Folge hiervon reicht es aus, dass Wegbeschreibungen nur gerade spezifisch genug sind, um Wege in der Umgebung zu *selektieren*, für die sie angefertigt wurden. Eine Weg-

beschreibung muss nicht so detailliert sein, um den Weg oder eine präzise Karte davon in einer leeren Umgebung *rekonstruieren* zu können. In anderen Worten: ein Großteil der Information für die Auswahl eines Weges ist im Situationskontext statt in der Beschreibung des Weges enthalten; durch das Explizitmachen von nur wenig Information zu dem Weg werden wir so in die Lage versetzt, viele Einzelheiten zu dem Weg in Erfahrung zu bringen.

Sprachkontext wendet ähnliche Prinzipien auf einer abstrakteren Ebene an: sprachliche Ausdrücke strukturieren unsere Konzeptualisierung der Welt. Wenn ich sage *X ist groß*, dann klassifiziere ich die Welt in mindestens zwei Kategorien, in Entitäten, die groß sind und Entitäten, die nicht groß sind. Implizit bringe ich auch zum Ausdruck, dass *X* nicht klein ist, da *groß* ein Antonym von *klein* ist. Weiterhin habe ich dadurch, dass ich *X ist groß* gesagt habe, eine ganze Menge von Dingen *nicht* gesagt, die ich möglicherweise über *X* oder über andere Entitäten hätte sagen können; durch die Selektion dessen, was ich sage, entscheide ich implizit über all die Dinge, die ich nicht sage. In anderen Worten: Sprachkontext etabliert eine kognitive Agenda, die die kognitive Verarbeitung umfassend strukturiert und einschränkt.

Schließlich etabliert Aufgabenkontext einen Bezugsrahmen für die Interpretation dessen, was in einer Umgebung vonstatten geht: kognitive Agenten verstehen Handlungen über – intendierte oder zufällige – Kräfte oder Aufgaben, die ausgeführt werden. Wenn ich beispielsweise glaube, dass Tiere die ‚Aufgabe‘ des Überlebens verfolgen, dann kann ich alle möglichen beobachteten Ereignisse mit Bezug auf diese Rahmenvorgabe interpretieren: Bewegung von einer Stelle zur anderen, Einnahme von Objekten, schnelles Rennen zu anderen Tieren, und so fort. Beschreibungen wie ‚Futter suchen‘, ‚essen‘, ‚Tiere jagen‘ fassen bereits elementare Handlungssequenzen derart zusammen, wie es nur über einen höheren konzeptuellen Rahmen dessen, was gerade vor sich geht, möglich ist. In anderen Worten: Aufgabenkontexte schränken die Interpretationen der Welt auf eine handhabbare bedeutungsvolle Untermenge plausibler Interpretationen ein.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die kontextuelle Organisation der Welt in beachtete Aspekte, die mit Bezug auf eine Hintergrundsstruktur interpretiert werden, ein allgegenwärtiger Mechanismus ist, der von kognitiven Prozessen auf vielen unterschiedlichen Ebenen genutzt werden kann (vgl. auch Wender et al. 2003). Vom Modellierungs-Standpunkt aus betrachtet kann ein kognitives System viel leichter modelliert werden als die Umgebungen und Kontexte unter denen es operiert; die Kontexte sind jedoch gleichermaßen wichtig.

Um einen guten Eindruck vom Einfluss und der Bedeutung unterschiedlicher kontextueller Faktoren zu bekommen, ist es nützlich, Erfahrungen in situierten Feldstudien zu sammeln. Gleichzeitig können künstlich generierte Kontexte interessante Testumgebungen für Untersuchungen an natürlichen kognitiven Agenten bereitstellen, da sie dazu beitragen können, zwischen genuinen Faktoren kognitiver Systeme und kontextuellen Faktoren zu unterscheiden.

Aufgabenorientierte Verarbeitung

Unabhängig von den Beschränkungen für die kognitive Verarbeitung durch den Aufgabenkontext kann es große Unterschiede für die Anforderung an die Verarbeitung in Abhängigkeit von der zu erfüllenden Zielaufgabe geben. Dies betrifft einerseits die Art der Aufgabe, die gelöst werden soll (insbesondere: handelt es sich um eine *Erkennungs-* / *Identifikationsaufgabe* oder um eine *Konstruktionsaufgabe*?), andererseits die erforderliche Qualität der Lösung (zum Beispiel: ist es wichtiger, schnell eine Lösung zu bekommen und nimmt man dafür eine ungefähre oder ungenaue Lösung in Kauf, oder ist es wichtiger, eine präzise Lösung zu erhalten und nimmt dafür eine längere Wartezeit in Kauf?)

Ein Beispiel für den Unterschied zwischen Identifikations- und Konstruktionsaufgaben haben wir bereits im Zusammenhang mit der Diskussion zum Situationskontext gegeben, wo eine Wegbeschreibung verwendet werden kann, um eine existierende Straße aufzufinden oder um eine Karte zu zeichnen, die den präzisen Verlauf der Straße wiedergibt.

Abstraktionsebene / Schematisierung

Einen besonders interessanten Problemkreis in der Raumkognition bildet die Frage nach der Abstraktionsebene, auf der Wissen über die räumliche Welt repräsentiert ist oder repräsentiert werden sollte. In der Informatik sind abstrakte Repräsentationen beliebt, da sie grundsätzlich allgemeiner sind als konkrete Repräsentationen. Wissen, das von dem spezifischen Kontext, in dem es erworben wurde, abstrahiert wird, kann auch in anderen Kontexten angewendet werden. Abstrakteres Wissen ist eher weniger komplex und die Berechnung beschränkt sich auf eine spezifische relevante Untermenge von Aspekten. Auf der anderen Seite kann zu allgemein gehaltenes Wissen ein-

geschränkt werden müssen, um den Anforderungen spezifischer Situationen gerecht werden zu können; dies erhöht die Berechnungskosten. Dadurch kann sich ein Zielkonflikt bei der Entscheidung zwischen abstrakten und konkreten Repräsentationen ergeben.

Das Thema abstrakt vs. konkret können wir anhand der Frage illustrieren, welche Art von Repräsentation für Wegfindungsaufgaben nützlicher ist: realistische Darstellungen der tatsächlichen Gegebenheiten oder schematische Repräsentationen. Auf den ersten Blick erscheinen realistische Darstellungen – etwa eine Fotografie – besser geeignet als eine abstrakte Darstellung, da es einfacher sein sollte, realistisch dargestellte Merkmale mit der dargestellten Umgebung zu vergleichen, da keine Abstraktions- bzw. Konkretisierungsleistung vollbracht werden muss. Andererseits ist der Vergleich der Darstellung mit der Realität nur ein Teil der zu bewältigenden Aufgabe; der andere Teil ist der Schlussfolgerungsprozess, der eine geeignete Route auf der Karte ermittelt.

Der Schlussfolgerungsprozess wird vereinfacht, wenn nur diejenige Information dargestellt ist, die für den Entscheidungsprozess relevant ist – wie zum Beispiel in einer schematischen Karte für ein Nahverkehrssystem, die von vielen Details (z.B. Forminformation) abstrahiert. Auch die Vergleichsaufgabe selbst kann von einer abstrakten Repräsentation profitieren, auf der nur markante Identifizierungsmerkmale wiedergegeben sind; dies erleichtert die Auswahl von Vergleichsmerkmalen und reduziert den Berechnungsaufwand. In anderen Worten: unterschiedliche Teile einer Gesamtaufgabe können unter Umständen leichter auf unterschiedlichen Arten von Repräsentationen vollzogen werden; kognitive Leistung ist erforderlich, um den Übergang von einer Art von Repräsentation auf eine andere zu bewältigen.

Die Antwort auf die Frage, welche Repräsentation am besten geeignet ist, hängt somit von der relativen Verteilung von Unteraufgaben ab, für die die Repräsentation benötigt wird: wird eine Karte ausschließlich für die Ermittlung einer geeigneten Route benötigt, so wird eine schematische Karte geeigneter sein; falls jedoch die Route bereits ermittelt wurde und die Karte wird ausschließlich für die Lokalisierung in der Umgebung benötigt, so kann eine realistischere Darstellung geeigneter sein. Es kann sich lohnen, unterschiedliche Repräsentationen für unterschiedliche Teilaufgaben einzusetzen und von einer Repräsentation zu der anderen zu wechseln.

Wenn wir die Frage des Abstraktionsgrads mit der Diskussion über Kontexte in Verbindung bringen, dann sehen wir, dass unterschiedliche Aufgaben von unterschiedlichen Kontexten abhängen: die Kriterien für die beste Route

können so gewählt werden, dass sie nicht von dem spezifischen Situationskontext abhängen, während die zu wählende Route offensichtlich vom Situationskontext abhängt.

Raumbasierte vs. sprachbasierte interne Repräsentationen

Da wir kognitive Fähigkeiten haben, die es uns erlauben, sowohl konkret zu denken als auch abstrakt zu denken und zu sprechen, stellt sich die interessante Frage, auf welcher Ebene Wissen besser oder leichter gepflegt und erhalten werden kann. Unter ‚konkret‘ möchte ich hier verstehen, dass Konzepte in spezifischen Situationen verankert sind, die unmittelbar wahrgenommen oder anschaulich vorgestellt werden können, während ‚abstrakt‘ bedeutet, dass Konzepte zu anderen Konzepten in Bezug gesetzt werden, deren Semantik nicht unmittelbar mit Phänomenen in der Welt in Verbindung stehen. In diesem Sinne können wir auch von ‚raumbasierten‘ bzw. ‚sprachbasierten‘ Repräsentationen sprechen.

Ähnlich wie bei externen Repräsentationen wie den Karten, die wir im vorigen Abschnitt behandelt haben, haben konkretere und abstraktere mentale – oder Computer-interne – Repräsentationen ihre spezifischen Vorzüge bzw. Nachteile: da konkrete Repräsentationen durch Wahrnehmungen und Erfahrungen instantiiert werden können, können sie leichter mit episodischem Gedächtnis in Verbindung gebracht werden, das Wahrnehmungen und Erfahrungen aufzeichnet. Auf diese Weise werden sie mit anderen Aspekten assoziiert, die die Denkprozesse sowohl unterstützen als auch ablenken können, je nachdem, ob diese anderen Aspekte für die aktuelle Aufgabenstellung hilfreich sind, oder nicht. Ein Schlussfolgerungsansatz, der sich konkrete Repräsentationen zu Nutze macht, ist *case-based reasoning*. Abstraktere Repräsentationen sind besser geeignet für Assoziationen auf der semantischen Ebene; sie ermöglichen allgemeinere Inferenzen, die nicht von spezifischen Instanzen und von zusätzlichem Wissen abhängen, das mit ihnen assoziiert sein kann; diese können allerdings nicht so leicht mit Ereignis-bezogenen Repräsentationen integriert werden.

Aus der Gedächtnisforschung wissen wir, dass im Laufe der Zeit konkrete Repräsentationen leichter bestehen bleiben als abstraktere Repräsentationen

und dass abstrakteres Wissen später in Form konkreter Episoden zugänglich bleibt.

These und Konklusion

Die Verfügbarkeit von Computern und von Wissensrepräsentationsformalismen aus der KI-Forschung hat Bildung des der Kognitionswissenschaft als interdisziplinäres Forschungsgebiet Mitte der 1970er Jahre ausgelöst. Disziplinen, die natürliche Systeme in realen Umgebungen untersuchten (kognitive Psychologie, Linguistik, kognitive Anthropologie und die Neurowissenschaften) begannen ein gemeinsames Programm mit Disziplinen, die formale Systeme in abstrakten Welten untersuchten (Philosophie, Logik, Mathematik) und Disziplinen, die Artefakte in virtuellen oder physischen Umgebungen konstruieren (KI, Informatik). Auf diese Weise können methodische Defizite einer Disziplin durch methodische Stärken der Partnerdisziplinen kompensiert werden. Dieses Ziel macht eine Verallgemeinerung von Begriffen wie ‚Agent‘, ‚Umgebung‘, ‚System‘ und ‚Wissenschaft‘ erforderlich, um natürliche und künstliche, physische und virtuelle, konkrete und abstrakte, reine und angewandte Varianten zuzulassen.

Auf diesem erweiterten Forschungsgebiet können wir Relationen und Interaktionen zwischen natürlichen und künstlichen kognitiven Agenten, Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen sensorischen und imaginären Welt, Beziehungen zwischen formalen Modellen und konkreten Umsetzungen, sowie Unterschiede zwischen wertfreien und zielorientierten Interpretationen untersuchen.

Computer haben eine neue Dimension zur Untersuchung kognitiver Systeme hinzugefügt. Sie verstärken nicht nur das analytische Leistungsvermögen für die Evaluierung von Modellen und Theorien, sondern sie ermöglichen auch die Erschaffung neuer kognitiver Spezies, die bei der Untersuchung der kognitiven Fähigkeiten existierender Spezies Unterstützung leisten können. Raumkognition ist eine besonders gut geeignete Domäne für die Interaktion zwischen klassischen analytischen und neueren synthetischen Ansätzen, da die gleiche physisch-räumliche Bezugswelt für die Gegenüberstellung unterschiedlicher Ansätze geeignet ist.

In seinem inspirierenden Buch ‚Vehicles‘ hat Braitenberg (1984) überzeugend gezeigt, dass ‚synthetische Psychologie‘ beträchtliche Vorteile gegenüber analytischer Psychologie aufweist. Der Grund hierfür ist, dass eine unendliche Zahl von Modellen mit einem gegebenen Verhaltensmuster

verträglich sein kann, während ein gegebenes Modell nur ein einziges Verhaltensmuster generiert; auf diese Weise hat der synthetische Ansatz eine größere Erklärungskraft. Computerprogramme stellen Mittel zur Verfügung, um Hypothesen und abstrakte Theorien zu implementieren und rigoros zu testen und weisen auf Aspekte hin, die mit durch Untersuchungen mit Papier und Bleistift oder empirische Untersuchungen nicht zu Tage treten würden. Auf diese Weise können Erkenntnisse von theoretischen und empirischen Untersuchungen in ein lauffähiges Modell eingebracht werden, das die vorhergesagte Charakteristik aufweisen sollte; darüber hinaus kann ein operationales Modell auf der Basis einer Theorie Vorhersagen über Ergebnisse empirischer Untersuchungen machen und so interessante Fragen aufwerfen, die durch Empiriker überprüft werden können. Auf diese Weise kann eine kognitive Theorie iterativ verfeinert und modifiziert werden.

Um ein lauffähiges Computer-Modell einer kognitiven Theorie zu bauen, müssen Annahmen gemacht werden, die außerhalb der Theorie zu liegen scheinen. Es gibt zwei Optionen bezüglich dieser Annahmen: entweder sie liegen wirklich außerhalb der Theorie – dann sollte ihre Festlegung nicht das einschlägige Verhalten des Computer-Modells beeinträchtigen; oder die Annahmen beeinträchtigen das einschlägige Verhalten – dann sollten sie in die Theorie mit einfließen. Auf diese Weise erzwingt der Computer-Ansatz bestimmte Antworten, die zur Auflösung offener Fragen erbracht werden müssen.

Der vielleicht wichtigste Beitrag, den die KI für die interdisziplinäre Forschung leisten kann, ist Unterstützung bei der Vermeidung terminologischer Unklarheiten und Hilfe bei der Überwindung von Kommunikationsschwierigkeiten zwischen Disziplinen. Dies wird möglich durch präzise Formalisierungen, die KI-Modellierungsansätze erzwingen. Zum Beispiel verwenden wir in der Raumkognition Konzepte wie ‚Himmelsrichtung‘ und gehen davon aus, dass jeder weiß, was wir unter ‚Nord‘ verstehen. Für ein Computerprogramm kann ich zu entscheiden haben, ob ‚Nord‘ bedeutet Kompass-Richtung 360° mit Bezug auf einen bestimmten Punkt, oder der 90° -Sektor 360° plus oder minus 45° , oder 360° von jedem Punkt einer imaginären Ost-West-Linie durch den gegebenen Punkt, oder ...). Solche Anforderungen können dazu beitragen, relevante terminologische Unterschiede in der interdisziplinären Forschergemeinschaft aufzudecken, die zuvor gar nicht zu Tage getreten sind.

Literatur

- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: experiments in synthetic psychology*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Clark, A. (1997). *Being there: Putting brain, body, and world together again*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Freksa, C. (1980). Communication about visual patterns by means of fuzzy characterizations. *XXIInd Intern. Congress of Psychology*, Leipzig.
- Freksa, C. (2004). Spatial Cognition – an AI perspective. In R. López de Mantaras & L. Saitta (Hrsg.), *ECAI 2004* (S. 1122-1128). Amsterdam: IOS Press.
- Knauff, M., Schlieder, C. & Freksa, C. (2002). Spatial cognition: From rat-research to multifunctional spatial assistance systems. *KI*, 4/02, 5-9.
- Kuhn, T. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Larkin, J. H. & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11, 65-99.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1976). Computer science as empirical enquiry: symbols and search. *Communications of the ACM*, 19(3), 113-126.
- Norman, D. A. (1981). What is cognitive science? In D. Norman (Hrsg.), *Perspectives on cognitive science*. Norwood, New Jersey: Ablex.
- Pfeifer, R. & Scheier, C. (1999). *Understanding intelligence*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Rumelhart, D. E., McClelland, J. L. & the PDP Research Group (1986). *Parallel Distributed Processing – 2 vol. set*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Searle, J. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3, 417-424.
- Varela, F. J., Thompson, E. & Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
- Wender, K.F., Haun, D., Rasch, B., Blümke, M. (2003). Context effects in memory for routes. In C. Freksa, W. Brauer, C. Habel & K.F. Wender (Hrsg.), *Spatial Cognition III* (S. 209-231). Heidelberg: Springer.
- Wiener, J. M. & Mallot, H. A. (2003). 'Fine-to-coarse' route planning and navigation in regionalized environments. *Spatial Cognition and Computation*, 3(4), 331-358.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625-36.