

Jörg Wellner

Luhmanns Systemtheorie aus der Sicht der Verteilten Künstlichen Intelligenz

In diesem Artikel wird die Luhmann'sche Systemtheorie aus Sicht der Verteilten Künstlichen Intelligenz betrachtet. Die Betrachtung ist zwangsläufig beschränkt und hebt hier und da Dinge hervor, auf die man in der Soziologie wohl weniger Wert legen würde. Andere Aspekte der Systemtheorie werden überhaupt nicht diskutiert oder nur beiläufig erwähnt. Dies ist nicht nur der großen Bandbreite von Luhmanns Werk zu verdanken, sondern rührt auch von der Tatsache her, dass die Soziologie in erster Linie eine analytische Denkweise verfolgt und Erklärungen für soziale Phänomene sucht. In der Künstlichen Intelligenz spielt zwar die Analyse auch eine gewisse Rolle, aber im Vordergrund steht die Synthese intelligenter Systeme und im Falle der Verteilten Künstlichen Intelligenz die Synthese vieler autonomer Einzelsysteme zu einem Gesamtsystem mit sozialen Charakterzügen. Wir gehen von einem zentralen Problem innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz aus, welches die Koordination von autonomen Einheiten beinhaltet, und suchen eine Entsprechung in der Systemtheorie. Die daraus sich ergebenden soziologischen Lösungsmöglichkeiten für die Künstliche Intelligenz werden diskutiert. Hauptaugenmerk in der Diskussion wird auf das Problem der doppelten Kontingenz, auf Erwartungen und auf symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien gelegt.

Einführung

Die Verteilte Künstliche Intelligenz (VKI) beschäftigt sich seit über 20 Jahren damit, wie autonome, intelligente Einheiten (Agenten) nutzbringend als Gesamtsystem zur Lösung verschiedenster, meist komplexer Probleme eingesetzt werden können¹. Als ein zentrales Problem für die VKI bei diesen Bemühungen hat sich die Koordination von Agenten, insbesondere die Koordination ihrer Aktionen (Gasser 1992, Jennings 1996), herauskristallisiert.²

1 Für eine erste allgemeine Übersicht zur VKI eignen sich Artikelsammlungen (Avouris/Gasser 1992; Bond/Gasser 1988; Huhns/Singh 1997; Jennings/O'Hare 1996; Müller 1993) oder die Monographie von Ferber (1999).

2 In der VKI geht man meist stillschweigend davon aus, dass Agenten kooperativ sind oder zumindest prinzipiell kooperieren wollen, und die Frage nach der Entstehung von Kooperation wird meist nur in einem spieltheoretischen Zusammenhang untersucht (Axelrod 1984): Das typische Design eines VKI-Systems führt zwangsläufig dazu, dass Agenten kooperie-

Koordinationsprobleme treten immer dann auf, wenn z.B. eine Abhängigkeit von Aktionen mehrerer Agenten besteht, nur exklusive Ressourcen zur Verfügung stehen, die jeweils nur ein Agent nutzen kann, aber von mehreren beansprucht werden, oder wenn individuelle Fähigkeiten eines Agenten für die Lösung einer Aufgabe nicht ausreichen. Je nach Aufgabenstellung ist die Koordination ein permanentes oder nur ein temporäres Problem, muss aber prinzipiell bei allen gegenwärtig interessanten Einsatzgebieten für Agenten, wie der Informationsbeschaffung im Internet, der verteilten Steuerung oder Planung von Prozessen oder bei einem Einsatz mobiler Roboter berücksichtigt werden.

Einer gewissen Tradition in der Künstlichen Intelligenz (KI) folgend, sich immer wieder Ideen für Lösungsansätze aus artfremden Wissenschaftsdisziplinen anzueignen, hat auch die VKI in ihren Ansätzen vor allem auf psychologische Forschungsergebnisse zurückgegriffen. Das ist wenig verwunderlich, da viele Konzepte der KI durch die Psychologie beeinflusst oder gar initiiert wurden. Komplexe Agentenarchitekturen sind das Ergebnis dieser Herangehensweise. Eine typische Konzeption eines intelligenten Agenten greift daher auch auf psychologisch belegte Begriffe wie Ziel, Intention oder Annahme zurück und für interaktive Situationen mehrerer Agenten bezieht man sich auf Begriffe wie gemeinsames (oder Gruppen-) Ziel, Verhandlung (*negotiations*) und Verpflichtungen (*commitments*). Zentraler Aspekt dieser sogenannten BDI (*belief, desire, intention*)-Architekturen (Rao/Georgeff 1991) ist, dass ein Agent immer daran interessiert ist, sowohl seine eigenen Ziele und Absichten, als auch die seiner potenziellen Interaktionspartner zu kennen. Koordination bedeutet daher bei diesen Ansätzen vor allem das gegenseitige Anpassen von individuellen Zielen durch die Agenten (Jennings 1996). Für diese Aufgabe ist es daher notwendig, sich nicht nur bezüglich unterschiedlicher Ziele abzustimmen, sondern z.B. auch Informationen, bezogen auf Fähigkeiten, Teillösungen oder Dringlichkeiten von Wünschen, auszutauschen, um eine effiziente und faire Koordination zu erzielen. In gewisser Weise versucht ein Agent, einen anderen Agenten (als potenziellen Koordinationspartner) bis zu einem gewissen Grad zu modellieren oder zumindest seine Sicht auf die Dinge anzunehmen. Dies ist eine hochkomplexe Aufgabe, und das Koordinationsproblem hat sich daher in viele einzelne Probleme aufgesplittet, ohne dass eine befriedigende Lösung in Sicht wäre.

Ein Nebeneffekt dieser, auf psychologisch orientierten Modellansätzen basierenden Versuche, koordinierte Aktionen von mehreren Agenten zu ermöglichen ist, dass sie bisher ansatzweise nur für kleine Agentengruppen

ren müssen und um dies zu ermöglichen, müssen Agenten ihre Aktionen koordinieren. Koordination ist Voraussetzung für eine Kooperation (Ferber 1999), aber Kooperation emergiert nicht auf der Basis der Ziele von Agenten (Conte/Castelfranchi 1995): Die VKI stellt sich nicht die Frage, wie soziale Ordnung und damit Kooperation zwischen egoistischen Individuen entstehen kann, weil die Ausgangssituation nicht als „Kampf Aller gegen Alle“ um knappe Ressourcen betrachtet wird.

untersucht und mit vielen Einschränkungen zum Teil erreicht wurden. Weiterhin kann als Nachteil dieser Ansätze die Abhängigkeit von der Lösung traditioneller KI-Probleme, wie z.B. die Handhabung unvollständiger oder ungenauer Information, angesehen werden. Dies führt zu der Annahme, dass diese Techniken nicht geeignet sind, wenn man den Einsatz vieler Agenten in hochkomplexen und dynamischen Umgebungen zum Ziel hat. Natürlich ist man sich innerhalb der VKI dieses Problems bewusst. Daher gibt es auch eine ganze Reihe von Bestrebungen, die Komplexität des Koordinationsproblems durch die Einführung von Konventionen oder Normen zu reduzieren, an die sich alle Agenten halten müssen. Diese Überlegungen sind teilweise durch sozialwissenschaftliche Arbeiten inspiriert, vor allem aber durch sozialpsychologische. In den letzten Jahren gab es ein regelrecht explosionsartiges Interesse an Fragen bezüglich der sozialen Dimension von Multiagentensystemen (MAS) (Gasser 1991; Conte/Castelfranchi 1996; Castelfranchi 1998). Doch auch die Sozialität von Agenten betreffende Fragen sind psychologisch orientiert und lassen keine allgemeinen Lösungen für die Koordination von sehr vielen Agenten erhoffen.

VKI-Forscher haben sich bisher sehr wenig Gedanken über die Anwendung soziologischer Theorien gemacht (eine der wenigen Ausnahmen sind z.B. Bond [1990] und Hewitt [1977], die sich hauptsächlich an der Organisationssoziologie orientieren). Vor allem durch den Anstoß aus der Soziologie (Malsch et al. 1996) wurde man auf mögliche interessante Ansätze der Soziologie aufmerksam. Ein Grund für das verspätete Interesse ist zum Einen, dass – wissenschaftlich gesehen – die Soziologie von der KI weiter entfernt ist, als z.B. die Psychologie oder die Neurowissenschaften. Zum Anderen stellen die hochkomplexen und wenig formalisierten Theorien der Soziologie selbst eine große Hürde dar, da für ihre Modellierung und Algorithmisierung (nur so können sie für einen Informatiker von Nutzen sein) ein grundlegendes Verständnis der Theorien voraussetzt, welches durch die Unterschiedlichkeit beider wissenschaftlichen Disziplinen nicht ohne Weiteres gegeben ist. Erst durch die explizite Zusammenführung von Soziologen und Informatikern zur *Sozionik* (Malsch/Müller 1998) beginnt man innerhalb der VKI, soziologische Theorie in größerem Umfang für die VKI nutzbar zu machen.

Der Prozess einer gemeinsamen Bearbeitung einer Disziplinen übergreifenden Formalisierung von Koordinationsansätzen, die durch die Soziologie angeregt werden, hat gerade erst begonnen. Der Rest dieses Artikels beschreibt aus VKI-Sicht, warum gerade die Theorie sozialer Systeme von Niklas Luhmann für die Modellierung von Multiagentensystemen von Interesse ist.

Luhmann'sche Gedanken im Lichte der VKI

In den Vordergrund dieser Betrachtung möchten wir einen zentralen Ausgangspunkt der Luhmann'schen Systemtheorie und seinen Lösungsvorschlag

stellen: Das Problem der doppelten Kontingenz³ (Hoster 1997; Luhmann 1996). Dieses Problem ist dadurch gekennzeichnet, dass sich zwei Akteure nicht gegenseitig „in die Köpfe sehen“ können, also für den jeweils anderen eine Blackbox darstellen und die Grundlage für eine Entscheidung (Selektion) des jeweils anderen nicht kennen. Aber trotz dieser Ungewissheit, trotz der Kontingenz des möglichen Verhaltens ist es offensichtlich möglich, dass sich menschliche Akteure, je nach Situation, mehr oder weniger gut abstimmen können. Dass es so ist, liegt nach Luhmann daran, dass die Entstehung doppelter Kontingenz einen Prozess initiiert, der ihre Auflösung zur Folge hat. Luhmann geht sogar soweit zu behaupten, dass das Problem der doppelten Kontingenz und seine Lösung erst die Entstehung sozialer Systeme ermöglicht.

Die Unsicherheit, die die Kontingenz für einen Akteur darstellt, erzeugt Erwartungsstrukturen, die komplexitätsmindernd wirken und an denen sich ein Akteur orientiert. Diese Strukturen, insbesondere symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien, bilden die Grundlage für die Regelung von Unsicherheiten und damit für ein koordiniertes Verhalten von Akteuren. Vor allem diese drei Aspekte der Systemtheorie von Luhmann, die doppelte Kontingenz, Erwartungsstrukturen und symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien, sollen hier hinsichtlich einer Fruchtbarmachung dieser soziologischen Theorie für die VKI näher beleuchtet werden.

Das Problem der doppelten Kontingenz

Beginnen wir mit der doppelten Kontingenz und stellen uns eine einfache Situation vor, in der zwei Akteure, der eine Akteur links, der andere Akteur rechts, vor einer Tür stehen und jeweils hindurch wollen (also eine exklusive Ressource gleichzeitig beanspruchen). Beide haben erkannt, dass nur einer von ihnen durch die Tür hindurch gehen⁴ und dass ein Zusammenprall negative Folgen haben kann. Jeder Akteur weiß, dass sich der andere entscheiden muss, er kennt aber nicht die Grundlagen für die jeweilige Entscheidung. In der VKI wird eine solche Situation unterschiedlich gehandhabt. Alle Lösungsansätze kennzeichnet aber (und das gilt ganz allgemein nicht nur für diese Türsituation), dass sie das Problem und das Potenzial der doppelten Kontingenz auszublenden versuchen. Sie lassen es erst gar nicht entstehen. Dies ist vor allem dem Umstand zuzuschreiben, dass ein MAS unter dem Gesichtspunkt der Vorhersagbarkeit konzipiert wird. Man will im Voraus Verhaltensweisen einzelner Agenten oder des Gesamtsystems kennen und damit Vorhersagen treffen, wie sich das System unter bestimmten (Vor-)Bedingungen verhält. Mehrdeutige, kontingente Situation versucht man daher auszuschließen, weil sie die Vorhersagbarkeit einschränken.

³ Siehe auch den Beitrag von Kron/Dittrich in diesem Band.

⁴ Die gleichen Überlegungen gelten, wenn man annimmt, dass ein paralleles Nebeneinanderhindurchgehen möglich und die Frage ist, wer links und wer rechts hindurch geht.

Ein typischer VKI-Ansatz für das Türproblem wäre, dass die Agenten die Reihenfolge des Hindurchgehens aushandeln. Je nach Verhandlungsprotokoll könnte dies dann so aussehen, dass ein Agent dem anderen eine Anfrage sendet, ob er denn nicht zuerst gehen könnte. Diese Anfrage kann dann mit einer einfachen Antwort ja/nein erwidert werden, oder mit einer Gegenfrage. Ein typischer BDI-Agent ist mit einem Grundwissen und einer Vielzahl von Inferenzregeln ausgestattet, die es ihm erlauben, solche Anfragen zu stellen und zu beantworten. Eine Anfrage hinsichtlich der Reihenfolge des Hindurchgehens durch eine Tür kann intern in Fragen nach dem eigentlich zu Grunde liegenden Ziels und seiner Dringlichkeit umgewandelt werden. Es kann auch nach zwischenzeitlichen Alternativen gesucht werden, also nach Aktionen, die es auch auszuführen gilt und die schon sinnvoll ausgeführt werden können und nicht das Hindurchgehen als Voraussetzung haben. Um einen ersten Agenten zu bestimmen, können sich die Agenten auch über die Priorität ihrer Aktion austauschen. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, dass sich die Agenten Nachrichteninhalte in Form von $priority(action_k, n)$ zusenden. Selten wird in diesem Fall davon ausgegangen, dass an dieser Stelle Agenten lügen können oder betrügerische Absichten haben. Ein Agent erhält von einem anderen Agenten Informationen, so als würde er seine Wissensbasis selbst durch Inferenz vergrößern. Die Information wird in der Regel unkritisch übernommen und da Agenten bei ihrem Entwurf mit kooperativen Charakterzügen ausgestattet sind, kann es durchaus sein, dass ein Agent ein Warten akzeptiert, wenn der andere Agent eine höhere Priorität für seine Aktion ausweist.

Eine andere typische VKI-Lösung dieses Problems ist die Einsetzung eines weiteren Agenten, der die Entscheidung fällt. Dieser Agent verfügt in der Regel über mehr Wissen als andere Agenten und hat vorrangig die Aufgabe, Aufgaben zu delegieren oder Konflikte zu schlichten. Da dieser Superagent unter Umständen die Aufgaben beider Agenten in einem Zusammenhang sehen und sie hinsichtlich ihrer Priorität vergleichen kann, fällt ihm eine Entscheidung leichter. Fällt er eine solche, müssen sich die beiden Agenten dann auch daran halten.

Eine weitere Lösung dieses Problems, die zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist, dass die Agenten sich gegenseitig dafür Etwas bieten, um zuerst gehen zu können (Cliff/Bruten 1999; Wellman 1993). Eine Form von virtuellem Geld kann hier als Grundlage für etwas Angebotenes gelten, und die Agenten müssen abwägen, wie viel ihnen das Zuerst-Hindurchgehen oder der Verzicht darauf wert ist. Die Verhandlungstätigkeit ist in diesem Fall weniger komplex als im ersten Fall, dafür kann die Berechnung des Wertes, erster zu sein, recht kompliziert sein. Diese Form der Koordinationsfindung erinnert in erweiterter Form an den Börsenhandel oder an Auktionen und birgt sicherlich Chancen für flexible Problemlösungen. Das Komplizierte an diesem Ansatz ist, dass Agenten alle ihre Aktionen und Ziele wertmäßig in dieser virtuellen Geldeinheit erfassen und bezüglich Zwischenzielen interpolieren müssen.

Den ersten und dritten vorgestellten Ansatz kann man – mit gewisser Kühnheit – mit Rational-Choice-Ansätzen für die Erklärung menschlichen Handelns vergleichen. Ein Abstimmen der Handlung wird einerseits immer aus der jeweiligen Sicht eines Agenten versucht, auch wenn andererseits der Designer eines MAS die Kosten-Nutzen-Berechnung eines Agenten so implementiert, dass der Gesamtnutzen des Systems der größte sein soll. Der zweite Ansatz entspricht einer Hierarchieordnung, der sich Agenten unterordnen müssen.

Einen vierten Ansatz müssen wir hier erwähnen, die Lösung des Problems durch die Einführung von Normen oder sozialen Gesetzen. Arbeiten, die Normen in Agentensystemen diskutieren, machen dies oft unter dem Aspekt, Agenten mit einer Sozialität auszustatten. Eine typische Norm oder ein typisches Gesetz könnte dann sein, dass der Agent, der von rechts kommt, Vorrang hat. Dies ist zumindest bei Konflikten um einfache Ressourcen angebracht. Eine andere Norm könnte sein, dass gezählt wird, wie oft jeder Agent einem anderen Agenten Vorrang gegeben hat, und der Agent mit der größeren Zahl darf zuerst gehen (bei gleicher Zahl wird z.B. einer von beiden zufällig bestimmt). Dieser Ansatz würde die Gleichheit der Agenten in den Vordergrund stellen. Der Ansatz in seiner momentanen Umsetzung (siehe z.B. Paolucci/Conte 1999; Shoham/Tennenholtz 1992) lässt eine ganze Reihe von Fragen offen, wie z.B. Fragen nach dem Woher der Norm, nach der Änderungsfähigkeit einer Norm, nach der Sanktionierung von Normverletzungen und – ganz wichtig – nach der sinnvollen Normierbarkeit von Situationen selber. Insbesondere die Sanktionierbarkeit bei Nichtbefolgung einer Norm, die Änderung einer Norm, oder auch die hierarchische Verknüpfung von Normen wird bisher in VKI-Ansätzen nicht diskutiert, weil eine Norm entweder starr in den Agenten vorgegeben ist und ein Abweichen von dieser Norm nicht vorgesehen ist, oder weil mit recht komplexen Repräsentationsmechanismen für Normen gearbeitet werden müsste, die im Zusammenspiel mit einer BDI-Architektur eines Agenten diesen Ansatz weniger als Lösung des Problems, sondern als weiteres Problem erscheinen lassen würden.

Kehren wir zu Luhmann zurück. Würden die beiden Agenten seiner Theorie „gehörchen“, könnten sie weder syntaktisch Fakten austauschen, wie z.B. *priority(action, n)*, die der Empfänger mit der gleichen Semantik interpretiert wie der Sender, noch würden sie einer Norm/Regel immer folgen. In erster Linie hätten sie Erwartungen darüber, wie sich der andere Agent verhalten könnte. Eine einfache Erwartungsstruktur könnte so aussehen, dass ein Agent wartet, wenn er erwartet, dass der Andere zuerst geht und selbst zuerst geht, wenn er erwartet, dass der Andere wartet. Natürlich muss man die Frage nach der Entstehung dieser Erwartungen stellen, als auch, was bei einer falschen Erwartung passiert und was ein Agent tun kann, wenn Erwartungen nicht seinen Zielen oder erwartete Situationen nicht seinen Wünschen entsprechen.

Erwartungen

Erwartungen haben bisher keinen zentralen Stellenwert in der (V)KI-Forschung beansprucht. Natürlich gibt es Ansätze, z.B. in der Spieltheorie oder auch in wahrscheinlichkeitsbasierten (Bayes'schen) Ansätzen (Russel/Norvig 1995), die teilweise explizit mit Erwartungen arbeiten, aber zu restriktiv sind, um für autonome Agenten in dynamischen Umgebungen wirklich nutzbar zu sein. Es wird eher die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten bestimmter Ereignisse berechnet, als dass in einer genuinen Weise Ereignisse selber erwartet werden können. D.h., was prinzipiell erwartet werden kann, ist vorgeschrieben, es wird nur die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen eines erwarteten Ereignisses berechnet. Dies ist natürlich ein Tribut an den typisch wissensbasierten Ansatz der KI und trägt insbesondere der Dynamik einer von autonomen Agenten „belebten“ Umwelt eines einzelnen Agenten wenig Rechnung.

In der Systemtheorie nehmen Erwartungen aber eine zentrale Stellung ein. Erwartungsstrukturen sind die entscheidende Grundlage für soziale Strukturen (Luhmann 1996: 397), das Fundament einer ganzen Gesellschaft. Stellt man dies als Prämisse vor ein VKI-Projekt, ergeben sich ganz andere Ansätze, sowohl für die Agentenarchitektur, als auch für die Gestaltung der Agenten-Interaktionen. Man bekommt eine soziale Dimension in ein MAS, ohne explizit Normen, Rollen, *Commitments* oder *Joint Intentions* einzuführen, einfach dadurch, dass man das Problem der doppelten Kontingenz ernst nimmt und es nicht negiert, weil es durch die Hintertür ja doch wieder eintritt. Der Schlüssel zur Auflösung des Problems der doppelten Kontingenz sind Erwartungsstrukturen, die die möglichen Interaktionspartner bilden. Sie reduzieren dadurch die externe Komplexität, der Möglichkeitsspielraum wird eingeschränkt.

Bezüglich den Erwartungen unterscheidet Luhmann kognitive und normative Erwartungen. Kognitive Erwartungen können im Falle einer Enttäuschung angepasst, also verändert werden, normative Erwartungshaltungen werden dagegen beibehalten, wenn sie nicht eintreffen. Auch dieser Ansatz, Erwartungen mit Kognition und Lernen zu verbinden („Lernbereite Erwartungen werden als *Kognitionen* stilisiert.“ [Luhmann 1996: 437]), als auch lernunwillige Erwartungen als Normen zu betrachten, mag zwar für die Soziologie nicht unbedingt neu sein, ist aber für die VKI ein völlig neuer Aspekt. Natürlich gibt es schon lange Versuche, Normen in MAS zu etablieren, oder auch die Leistung eines MAS durch individuell lernende Agenten zu verbessern.

Aber gerade bei diesen beiden Aspekten steckt die VKI noch in den Kinderschuhen und hängt teilweise noch zu sehr an dem Bild eines deliberativen Agenten aus der traditionellen, wissensbasierten KI. Ein Ansatz, der vornehmlich auf Wissen und auf davon abgeleiteten Schlussfolgerungen beruht, mag in einer Umgebung, die von physikalischen Objekten beherrscht wird,

angebracht sein. Dies beweist z.B. der Erfolg der Mechanik im Bereich der unbelebten Natur, solange man sich nicht in physikalisch extrem kleinen oder großen Bereichen bewegt. Die zukünftige Bewegung eines Körpers ist demnach bestimmbar, wenn man seine gegenwärtige Position und die auf ihn wirkenden Kräfte kennt. Dies ist natürlich eine idealistische Herangehensweise, der die (V)KI aber noch teilweise sehr verpflichtet ist. Im sozialen Bereich können aber Entscheidungen nicht auf Wissen gründen, weil das notwendige Wissen zum Zeitpunkt der Entscheidung schlichtweg nicht vorhanden ist.⁵ Es sind in erster Linie Erwartungen, die die Handlungen von Individuen leiten. Mehr noch: die zukünftigen Ereignisse hängen in großem Maße davon ab, welche kognitiven Prozesse in den beteiligten Individuen ablaufen. Doch diese kognitiven Prozesse sind intransparent für andere Individuen und die darauf basierenden Entscheidungen solange kontingent, bis sie sich in einer Handlung vollzogen haben (auch dann bleibt für andere noch ein großes Maß an Unsicherheit bezüglich der Gedanken, die zu einer Handlung geführt haben). Diese Situation kann für die VKI zweifellos als Dilemma bezeichnet werden und viele Ansätze zu dessen Lösung sind schon deshalb unzulänglich, weil bei der Erstellung von MAS nicht nur eine Interaktion zwischen künstlichen Agenten in Betracht gezogen wird, sondern diese auch den menschlichen, sozialen Raum durchdringen sollen. Das bedeutet eben auch, dass kein Ansatz zum Erfolg führt, der im Prinzip darauf beruht, dass Interaktionspartner syntaktisch strukturierte Information austauschen und diese problemlos mit einer gleichen Semantik belegen können. Erwartungsstrukturen kommt demnach eine große Bedeutung zu. Für Luhmann haben sich diese Strukturen in den symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien manifestiert, die auch für die VKI einen Ausweg aus dem Dilemma weisen können.

Symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien

Erwartungsstrukturen sind allgegenwärtig⁶ und es gibt sie sicherlich mit vielen unterschiedlichen Bezügen. In Bezug auf das Soziale sind es die symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien, d.h. sie fungieren als Erwartungsstrukturen (Krieger 1998) auf der Ebene sozialer Systeme und bilden somit deren Rückgrat. Luhmann diskutiert verschiedene symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien (z.B. *Macht, Geld, Liebe, Wahrheit*) und hat für einzelne Medien detaillierte Untersuchungen (Luhmann 1988), gerade auch hinsichtlich der Herausbildung von gesellschaftlichen Teilsystemen wie etwa das Wissenschaftssystem (Luhmann 1994), herausgearbeitet. Im Folgenden wollen wir uns nur auf die Medien Macht und Geld beschränken.

5 Auf diesen Aspekt weist z.B. Soros (1998) für den Bereich des Finanzmarktes hin: Würde es hinsichtlich des Finanzmarktes gesichertes Wissen geben, würde es keinen gleichzeitigen Kauf und Verkauf von Aktien geben können.

6 Schon reine Reiz-Reaktions-Mechanismen einfacher Organismen können als Erwartungsstrukturen betrachtet werden, die sich aber nur in einem evolutionären Kontext ändern.

Symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien sind Erwartungsstrukturen, die hinsichtlich des Problems der doppelten Kontingenz einerseits Möglichkeiten einschränken, also komplexitätsreduzierend wirken, und andererseits gewisse Möglichkeiten und Anschlussoperationen eröffnen, also einen Fortgang der Kommunikation zwischen zwei Akteuren ermöglichen. Externe Komplexität wird auf erwartbare interne reduziert. Eine an sich nicht überschaubare Situation kann dadurch in eine einfache Ja/Nein-Frage münden. Durch ein Kommunikationsmedium kann eine große Menge an eigentlich verfügbarer Information (also Komplexität) vernachlässigt werden und das Interesse kann sich auf ein Ja oder Nein, oder auf das Akzeptieren oder Nichtakzeptieren von Etwas, konzentrieren. Z.B. kann ein Akteur Etwas zum Kauf anbieten und ein anderer Akteur kann darüber nachdenken, ob er es zu kaufen wünscht. Aber dieser muss sich keine Gedanken darüber machen, warum der Andere es verkaufen möchte, oder was dieser später für das erwartete Geld seinerseits kaufen möchte. Ein Käufer hat keinen Grund, sich über das Geld Gedanken zu machen, wenn er es einmal ausgegeben hat⁷, und ein Verkäufer verwendet keine Gedanken über das Woher des zu bekommenden Geldes. Genau diese Gründe sind es, die die Kommunikationsmedien generalisieren. Deren Funktion ist unabhängig vom Akteur, der sich seiner bedient.

Einige zweifellos interessante Implikationen ergeben sich, wenn man eine Umsetzung symbolisch generalisierter Kommunikationsmedien für MAS betrachtet. Ohne an ein spezielles Kommunikationsmedium zu denken, ist in erster Linie die Möglichkeit zu erwähnen, dass mittels dieses Ansatzes ein Weg beschrieben werden kann, wie ein MAS aus vielen Agenten koordiniert werden kann. Dies ist durch den komplexitätsreduzierenden Effekt möglich, der es erlaubt, nicht-wissensbasierte Koordinationsmechanismen einzusetzen. Interaktionen, die durch ein Kommunikationsmedium gesteuert werden, müssen selbstverständlich nicht notwendigerweise erfolgreich sein, aber es ist zumindest gewährleistet, dass Agenten von Anfang an wissen, auf welche Aspekte sich eine Koordination beschränkt⁸, sich Agenten nicht „kennen“, also insbesondere kein individuelles Modell voneinander haben müssen, Agenten tatsächlich *Blackboxes* füreinander sein und trotzdem erfolgreich miteinander Aktionen koordinieren können und dass Agenten wissen, in welcher Interaktionssituation sie sich befinden und wann diese abgebrochen werden muss.

7 Er mag sich zwar später darüber ärgern, dass er es überhaupt ausgegeben hat, aber grundsätzlich spielt es keine Rolle, was der Verkäufer, also der Geldempfänger, mit dem Geld macht und was er seinerseits dafür kaufen mag. Die Situation kann sich durchaus anders darstellen, wenn Geld nicht in einem Kaufszenario zum Einsatz kommt, sondern z.B. verschenkt wird.

8 Dies kann z.B. dadurch erreicht werden, dass Agenten rollenspezifische Eröffnungsrituale verwenden und damit gleichzeitig der Kontext einer Interaktion festgelegt wird (Bahrndt 1997: 75).

Ein Agent ist nur mit seinen eigenen Zielen und Annahmen beschäftigt, weil er diese bestenfalls auch nur kennen kann. Es gibt keinen Grund und keinen Weg, wie ein Agent explizit Ziele oder Absichten anderer Agenten in seine eigenen Überlegungen einbeziehen kann. Diese werden ja gerade durch die entsprechende Symbolisierung während der Koordinationsversuche offensichtlich. Genau genommen wird z.B. natürlich nicht das eigentliche Ziel eines Agenten offen gelegt, sondern nur kurzfristige Intentionen oder Wünsche.

Genau das ist der Vorteil von symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien, sie kanalisieren komplexe Absichten von Agenten. Ein Agent ist zum Einen gezwungen, diese (temporär) auf einen Punkt zu bringen, um sie kommunizieren zu können, zum Anderen sind ihm Möglichkeiten gegeben, mit Zielen und Wünschen anderer Agenten unabhängig von diesen überhaupt umgehen zu können, einfach dadurch, dass sie im selben Erwartungsraum operieren. Unter Verwendung einer Metapher aus der Mathematik könnte man sagen, symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien dienen der Interpolation komplexer Agentenzustände auf kommunizierbare allgemeinverständliche Symbole.

Verschiedene Kommunikationsmedien basieren auf verschiedenen Techniken zur Unterstützung von Agenteninteraktionen. *Macht* kann einen Agenten zwingen, etwas zu tun, was nicht unbedingt in seinem ureigensten Interesse ist, aber einem anderen Agenten oder einer ganzen Gruppe von Agenten dienlich sein kann. Insbesondere durch die Symbolisierung von *Macht* oder Sanktionspotential durch mehrere Agenten kann ein Agent gezwungen werden, sich populationsweiten Normen zu unterwerfen, diese zu akzeptieren und auch für deren Einhaltung zu sorgen. Die Symbolisierung von *Macht* muss nicht notwendigerweise deren Anwendung nach sich ziehen, aber es muss prinzipiell eine Möglichkeit gegeben sein, dass sich Agenten mittels symbiotischer Symbole (Horster 1997) direkt beeinflussen können.

Das Medium *Geld* bezieht sich auf Ressourcen, genauer auf den Mangel an Ressourcen. Da Geld eine Zweitkodierung von Eigentum an Ressourcen ist, dient es als Austausch- und Koordinationsmedium für alle Arten von Ressourcen. Daher kann ein Agent, der keinen direkten Zugriff auf eine bestimmte Ressource hat, diesen durch den Einsatz von Geld erlangen. Das Verhandeln zweier Agenten bezüglich einer Ressource wird somit zum Aushandeln eines Wertes für diese. Die Mechanismen sind unabhängig von der Ressource und beziehen z.B. die Dringlichkeit eines Ressourcenzugriffs nicht direkt mit ein. Durch die Verwendung unterschiedlicher symbolisch generalisierter Kommunikationsmedien wird Agenten die Möglichkeit gegeben, nicht jedes Koordinationsproblem z.B. nur über eine Wertaushandlung oder über hierarchische Machtstrukturen zu lösen.

Offene Fragen

Die vorangegangenen Überlegungen zeigen, dass die Systemtheorie von Luhmann einen interessanten Ansatz anbietet, eines der zentralen Probleme der VKI von einer durchaus ungewöhnlichen Seite anzugehen und in vielerlei Hinsicht vielversprechende Lösungen zu erkunden. Natürlich bleiben eine ganze Reihe von Fragen offen, wenn man den skizzierten Weg auch tatsächlich für ein MAS umsetzen will. Diese Fragen lassen sich auch nicht einfach durch eine ausführlichere Lektüre von Luhmanns Publikationen beantworten. Die offenen Fragen betreffen vor allem die Verankerung von symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien in den Agenten, wie Erwartungsstrukturen repräsentiert werden sollen und viele weitere eher technische Probleme. Diese lassen sich auch nicht mit Hinweisen auf die autopoietische Natur der Kommunikation oder auf selbstreferentielle Strukturen einfach klären, weil es dafür wenig pragmatische Ansätze in der Informatik gibt.

Es ist auch nicht einfach zu bestimmen, welchen Stellenwert die Autopoiesis hat, wenn man sich Erwartungsstrukturen auf der oben beschriebenen Weise nähert. Nimmt man Erwartungsstrukturen in einem MAS ernst und versucht das Problem der doppelten Kontingenz nicht auf die herkömmliche Art wie bisher in der VKI zu vernachlässigen, entstehen Dynamiken in einfachsten Agentensystemen, die schwer vorhersagbar sind. Dies allein ist schon eine große Herausforderung für die VKI, ganz zu schweigen davon, wie man mit der Autopoiesis, dem speziellen dreiwertigen Charakter von Kommunikation oder dem Sinnbegriff der Systemtheorie umgeht. Natürlich sind dies zentrale Aspekte für Luhmanns Theorie und es ist nicht einfach einzusehen, warum man den einen oder anderen Teil der Theorie separat und aus dem Zusammenhang gerissen betrachten kann oder soll und andere Teile vernachlässigt, aber die hierbei entscheidende Frage ist die nach der Formalisierbarkeit. Die formale Beschreibung einer Theorie oder zumindest eines Ansatzes derselben ist eine notwendige Voraussetzung, um sie in einem VKI-Modell umzusetzen. Dies ist für die Systemtheorie nicht gegeben⁹ und erste Versuche eines formalen Ansatzes müssen zwangsläufig unvollständig (bezogen auf die gesamte Systemtheorie) sein. Sie können, d.h. sie müssen sogar sehr verschieden sein und unterschiedliche Schwerpunkte setzen, wie dies auch in diesem Buch präsentiert wird.

Abschließende Bemerkung

Wir waren von einem einfachen Koordinationsproblem ausgegangen und haben typische VKI-Lösungsansätze betrachtet. Allen Ansätzen ist gemein,

⁹ Das Gleiche gilt auch für die Autopoiesis. Es gibt bisher bestenfalls Modelle autopoietischer Systeme auf der Ebene von Molekülen und einfachsten zellähnlichen Strukturen (McMullin/Varela 1997; Varela 1979), aber nicht von biologischen oder gar psychischen Systemen.

dass sie das Problem der doppelten Kontingenz auszublenden versuchen, obwohl sie sich teilweise sehr unterscheiden und zum Teil auch an soziologische Konstrukte (wie z.B. Normen) anknüpfen. Da einerseits Koordinationsprobleme als ein zentraler Aspekt der VKI-Forschung betrachtet werden und Erwartungsstrukturen bezüglich des Problems der doppelten Kontingenz andererseits ein zentraler Ausgangspunkt in der Systemtheorie von Luhmann sind, war es fast zwangsläufig, genau diese Kombination näher zu betrachten. Koordinationsprobleme in MAS und das Problem der doppelten Kontingenz können nicht unabhängig von einander betrachtet werden. Wird dieser Zusammenhang innerhalb der VKI ernst genommen, kann man sich vielen Fragen auf eine elegante Art nähern, wie z.B. Fragen nach dem Sozialen in einem MAS, nach Normen und Rollen oder nach der Adaption von Agenten.

Auf viele Aspekte der Systemtheorie wurde hier nicht genauer eingegangen, die aber ihrerseits auch von großer Bedeutung für die VKI-Forschung sein können. So kann man viele weitere Impulse für MAS von einer genaueren Analyse der funktionalen Differenzierung gesellschaftlicher Systeme erwarten oder auch von der Fähigkeit sozialer Systeme, Probleme zu transformieren (Willke 1993), wenn sie sich einer einfachen Lösung verschließen.

Literatur

- Avouris, N. M./L. Gasser (Hrsg.) (1992): *Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- Axelrod, R. (1984): *The Evolution of Cooperation*. Basic Books, Inc., New York.
- Bährdt, H. P. (1997): *Schlüsselbegriffe der Soziologie: eine Einführung mit Lehrbeispielen*. C.H.Beck, München.
- Bond, A. H. (1990): A Computational Model for Organizations of Cooperating Intelligent Agents. In: *Conference on Office Information Systems*. Cambridge, Mass. MIT, S. 21-30.
- Bond, A. H./L. Gasser (Hrsg.) (1988): *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. San Mateo, CA. Morgan Kaufmann Publ., Inc.
- Castelfranchi, C. (1998): Modelling social action for AI agents. In: *Artificial Intelligence*, 103: S. 157-182.
- Castelfranchi, C./R. Conte, (1996): Distributed Artificial Intelligence and Social Sciences: Critical Issues. In: O'Hare, G. M. P./N. R.Jennings (Hrsg.): *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. John Wiley, New York, S: 527-542.
- Cliff, D./J. Bruten, (1999): Animat Market-Trading Interactions as Collective Social Adaptive Behavior. In: *Adaptive Behavior*, 7: S. 371-384.
- Conte, R./C. Castelfranchi, (1995): *Cognition and Social Action*. London: UCL Press.
- Ferber, J. (1999): *Multi-Agent Systems*. Harlow, England: Addison-Wesley.
- Gasser, L. (1991): Social Conceptions of Knowledge and Action: DAI Foundations and Open Systems Semantics. In: *Artificial Intelligence*, 47: S. 107-138.
- Gasser, L. (1992): DAI Approaches to Coordination. In: Avouris, N. M./L. Gasser (Hrsg.): *Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- Hewitt, C. (1977): Viewing Control Structures as Patterns of Passing Messages. In: *Artificial Intelligence*, 8: S. 323-364.

- Horster, D. (1997): *Niklas Luhmann*. München: C. H. Beck.
- Huhns, M. N./M. P. Singh (Hrsg.) (1997): *Readings in Agents*. San Francisco, Cal. Morgan Kaufmann Publ., Inc.
- Jennings, N. R. (1996): Coordination Techniques for Distributed Artificial Intelligence. In: O'Hare, G. M. P./N. R. Jennings (Hrsg.): *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. New York: John Wiley, S. 187-229.
- Krieger, D. J. (1998): *Einführung in die allgemeine Systemtheorie*. München: Wilhelm Fink Verlag.
- Luhmann, N. (1988): *Macht*. Enke, Stuttgart.
- Luhmann, N. (1994): *Die Wissenschaft der Gesellschaft*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Luhmann, N. (1996): *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Malsch, T./M. Florian/M. Jonas/I. Schulz-Schaeffer (1996): Sozionik. In: *Künstliche Intelligenz*, 2:S. 6-12.
- Malsch, T./H. J. Müller (Hrsg.) (1998): *Proceedings zum Workshop Sozionik. Wie VKI und Soziologie von einander lernen können*, 22. Jahrestagung KI. Bremen.
- McMullin, M./F. J. Varela (1997): Rediscovering Computational Autopoiesis. In: Husbands, P./I. Harvey (Hrsg.): *Fourth European Conference on Artificial Life*. Cambridge, Mass.: MIT Press/Bradford Books, S. 38-47.
- Müller, J. (1993): *Verteilte Künstliche Intelligenz – Methoden und Anwendungen*. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag.
- O'Hare, G. M. P./N. R. Jennings (Hrsg.) (1996): *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. New York: John Wiley.
- Paolucci, M./R. Conte (1999): Reproduction of Normative Agents: A Simulation Study. In: *Adaptive Behavior*, 7: S. 307-322.
- Rao, A. S./M. P. Georgeff (1991): Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture. In: *Proceedings of the Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*. Cambridge, Mass.: S. 473-484.
- Russell, S. J./P. Norvig (1995): *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Shoham, Y./M. Tennenholtz (1992): On the Synthesis of Useful Social Laws for Artificial Agent Societies. In: *Proceedings Tenth National Conference on Artificial Intelligence AAAI-92*. Menlo Park: AAAI Press/The MIT Press: S. 276-281.
- Soros, G. (1998): *Die Krise des globalen Kapitalismus: Offene Gesellschaft in Gefahr*. Berlin: Alexander Fest.
- Varela, F. J. (1979): *Principles of Biological Autonomy*. New York: North Holland, Elsevier.
- Wellman, M. P. (1993): A Market-Oriented Programming Environment and its Application to Distributed Multicommodity Flow Problems. In: *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1: S. 1-23.
- Willke, H. (1993): *Systemtheorie entwickelter Gesellschaften*: Weinheim: Juventa.