

Erschienen in: Kron, Thomas (Hrsg.): *Luhmann modelliert – Sozionische Ansätze zur Simulation von Kommunikationssystemen*. Opladen. Leske + Budrich, 2002.

Sigmar Papendick / Jörg Wellner

Symbolemergenz und Strukturdifferenzierung

In diesem Beitrag stellen wir mehrere von uns entwickelte Modellierungsansätze vor, die eine Nutzung des strukturdifferenzierenden Mechanismus von „symbolisch generalisierter Kommunikationsmedien“ in Multiagentensystemen ermöglichen sollen. Dies setzt jedoch Vorarbeiten voraus, um die Modellierung allgemeinerer Mechanismen von Symbolemergenzprozessen zu ermöglichen. Wir werden zeigen, dass die Systemtheorie Niklas Luhmanns hierzu einerseits gut abstrahierbare Konzepte zur Modellierung kognitiver Autonomie anbietet, andererseits jedoch zentrale, mit subjektivistischen Konnotationen versehene Begriffe einer Präzisierung ihrer Funktionen in Systemzusammenhängen bedürfen. Wir verstehen unsere Simulationsmethodik einerseits als einen Versuch der empirischen Ermittlung verallgemeinerbarer Minimalbedingungen, die die Emergenz eines Kommunikationssystems zur Verhaltenskoordinierung in Populationen autonomer Individuen ermöglichen. Andererseits gilt unsere Aufmerksamkeit der Analyse der kognitiven Bedingungen, die zur Entstehung einer Symbolverwendung führen, die *sich selbst* als emergenten Konditionierungsmechanismus stabilisiert, der zur Etablierung des verhaltenskoordinierenden Symbolgebrauchs verwendet wird.

Motivation: Technische Anwendbarkeit soziologischer Systemtheorie?

Die hier dargestellten Forschungsarbeiten sind Ergebnis eines Teilprojektes im DFG-Schwerpunktprogramm „Sozionik“. Eine gemeinsame Zielsetzung der darin organisierten Einzelprojekte, in denen jeweils Soziologen und Informatiker zusammenarbeiten, besteht darin, die in der Informatik bereits seit längerem verwendeten *Multiagenten*-Technologien zur Lösung komplexer, koordinativer Probleme (z.B. bei der Ressourcen-Allokation in Betriebsabläufen) durch die Einbeziehung soziologischen Wissens zu verbessern. Gleichzeitig sollen bei der hierzu erforderlichen formalen Modellierung soziologischer Konzepte bisher unentdeckte Fehlstellen, Ungenauigkeiten und Widersprüche aufgedeckt und das soziologische Methoden-Instrumentarium erweitert werden, so dass im Endeffekt beide Disziplinen von den Projekten profitieren.

Die sich im Sozionik-Kontext zusätzlich ergebende Zielsetzung des hier vorgestellten Projektes besteht in der Entwicklung von *Techniken*, mit denen

sich flexibel die Größe und Leistungsfähigkeit von Agentenpopulationen an variierende Aufgabenkomplexitäten anpassen lässt. Diese, mit dem Begriff „Skalierbarkeit“ bezeichnete Eigenschaft ist bisher in nur sehr eingeschränktem Maße gegeben: Die meisten aktuellen Multiagenten-Konzepte beruhen auf der Modellierung von Individuen, die sich durch vergleichsweise komplexe Umweltrepräsentationen und Zielverfolgungsstrategien definieren. Zu deren Umweltrepräsentationen gehören nicht nur Handlungsrestriktionen wie etwa die Verfügbarkeit von Ressourcen oder die Manipulierbarkeit von Objekten, sondern ebenso Repräsentationen von Bedürfnissen und Absichten anderer Agenten. Es liegt auf der Hand, dass die Vergrößerung des „sozialen“ Umfeldes eines Agenten durch Hinzufügen weiterer Agenten dessen Repräsentationsaufwand vervielfacht – in der Gesamtpopulation wächst der Repräsentationsaufwand exponentiell. Die Skalierbarkeit von Multiagentenpopulationen stößt somit schnell an technische Grenzen, die sich grundsätzlich auch nicht durch Verbesserungen der Rechenleistung umgehen lassen. Das Ziel unseres Projektes besteht nun darin, den individuellen Kommunikations- und Repräsentationsaufwand der Agenten drastisch zu reduzieren, deren kognitive Leistungsfähigkeit zu verringern und statt dessen die bisher individuell-kognitiv lokalisierte „Intelligenz“ in *sozialen Kommunikationssystemen* zu verankern.

Koordination und Kooperation

Der technische Einsatz von Multiagentensystemen ist vor allem dort sinnvoll, wo sich Problemstellungen häufig ändern und daher anpassungsfähige Problemlösungsverfahren erforderlich sind. Die zu lösenden Probleme müssen sich in Problem-Teilbereiche aufgliedern lassen, deren koordiniertes Bearbeiten schließlich zur Gesamtlösung führt. Die verteilte Bearbeitung von Teilproblemen ist dabei die Aufgabe spezialisierter Individuen („Agenten“), die entweder einzeln oder in kleinen Gruppen über exklusive Kompetenzen (der Informationsverarbeitung, der Manipulation von Objekten) verfügen, deren *selektive* Nutzung schließlich die Lösung des (variablen) Gesamtproblems darstellt. Mit der *Qualität* der so erzielbaren Problemlösungen verringert sich jedoch zumeist deren *Flexibilität*: So müssen individuelle Handlungsstrategien – um ein koordiniertes Gruppenhandeln zu ermöglichen – vollständig a priori definiert und aufeinander abgestimmt sein, sie begrenzen dann allerdings die Anpassungsfähigkeit und damit die universelle Einsetzbarkeit der Agenten-Interaktionssysteme. Zwar sind auch von den Agenten modifizierbare Strategien möglich, diese erfordern jedoch meist aufwändige Kontrollverfahren, in denen Agenten miteinander kommunizieren um zu überprüfen, ob dann noch koordiniertes Kooperationsverhalten möglich ist.

Ziel: Emergenz symbolisch generalisierter Kommunikationsmedien

Der Grundgedanke lässt sich wie folgt skizzieren: Agentenkooperation wird dann effektiver, wenn der zur Koordination erforderliche Kommunikations- und Repräsentationsaufwand minimiert werden kann. Hierzu ist es prinzipiell nicht erforderlich, dass der einzelne Agent über Repräsentationen eigener und fremder Präferenzen verfügt, solange sicher gestellt ist, dass eingegangene Kooperationsbeziehungen *in ihrem Zusammenwirken* zielführend sind. Aus der Perspektive einzelner Agenten geht es also darum, anhand bestimmter Merkmale von Kooperationsanfragen zu erkennen, ob sich die eigene – nachgefragte – Leistung nutzbringend in funktionierende Kooperationszusammenhänge einbetten lässt. Diese Kontrolle soll jedoch nach Möglichkeit ohne den individuellen Aufbau komplexer (sozialer) Umweltrepräsentationen erfolgen. Wir vermuten, dass Agentenkommunikation, die sich funktionaler Äquivalente von *symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien* bedient, hierzu in der Lage ist.

Angesichts der Zielsetzung, generalisierte Medien zur effektiveren Verhaltenskoordinierung einzusetzen, erscheint es zunächst nahe liegend, ein solches „funktionierendes“ Medium unmittelbar zu modellieren: Es wäre vorstellbar, die Agenten von vornherein mit Kommunikations- und Verhaltensregeln auszustatten, mit denen sie ein Verhalten zeigen würden, das wir als externe Beobachter als „Verwendung generalisierter Medien“ beschreiben könnten. Damit wäre jedoch weder in Hinblick auf das technische Kooperationsproblem noch im soziologischen Sinne etwas gewonnen: Wir würden in diesem Fall die Agenten unter vorab definierten Bedingungen lediglich eine bestimmte, von uns erwartete Verhaltensweise imitieren lassen, ohne ihnen die Möglichkeit zu geben, „selbst heraus zu finden“ wann und wie sie generalisierte Medien zur adaptiven Struktur differenzierung optimal einzusetzen haben – in dem explorativen Verhalten der Agentenpopulation besteht aber gerade der zu erwartende Nutzen bei der Lösung variabler oder ungenau definierter Kooperationsprobleme. Letztlich hätten wir so nur das ursprüngliche Koordinationsproblem kooperativen Verhaltens auf bestimmte – vorgegebene – Kommunikationsverfahren verlagert, die jedoch ihrerseits deterministisch und unflexibel angewendet werden würden. Dies ist nicht in unserem Sinne. Weitaus interessanter – nicht zuletzt im soziologischen Sinne – ist es, bestimmte Verhaltensweisen (generalisierte Medien) nicht einfach zu modellieren, sondern entstehen – emergieren – zu lassen und dabei nur dessen evolutive Randbedingungen zu modellieren. Erst wenn der von uns als solcher beobachtbare „Mediengebrauch“ eine von den Agenten selbst entwickelte Anwendung von *elementarerer Kommunikationsoperationen* darstellt, können wir sicher sein, dass die Agenten ihre Verhaltens-Freiheitsgerade zur Optimierung eines Kooperationsproblems nutzen.

Das soziologische Forschungsziel besteht entsprechend darin, *durch experimentelle Modellierung* die *minimalen* Bedingungen der Entstehung und

Stabilisierung von Kommunikationsverfahren zu ermitteln, die in ihrer *Funktion* mit symbolisch generalisierten Medien vergleichbar sind

Theorien evolutiver Strukturdifferenzierungsprozesse

Evolutionstheoretische Ansätze zur Erklärung sozialer Strukturbildungsprozesse (Giesen 1980; Hallpike 1986; Junge 1993; Schmid 1982) haben einen etablierten Platz in der soziologischen Theorieentwicklung (Schmid 1995) auf Grund der Möglichkeit, mit wenigen, einfachen Gesetzmäßigkeiten komplexe Strukturbildungsprozesse erklären zu können und dabei auf mehreren System-Emergenzniveaus anwendbar zu sein (Giesen/Junge 1998). Im Gegensatz zu älteren soziobiologischen Ansätzen, die strukturelle Evolution reduktionistisch auf biologische Prozesse zurückführen (Barash 1977; Harris 1987; Wilson 1975), räumt die neuere Evolutionstheorie die Möglichkeit der Emergenz von Ordnungsebenen ein, bei der sich kulturelle Prozesse von Individuen als Trägern abkoppeln und eigenen dynamischen Gesetzmäßigkeiten folgen (Cavalli-Sforza/Feldman 1981; Boyd/Richerson 1985). Der Umgang mit dem in diesem Zusammenhang verwendeten und für die Simulation sozialer Strukturbildungsprozesse zentralen Informationsbegriff unterscheidet sich dabei zum Teil erheblich: So wird etwa im Rahmen des in der evolutionstheoretischen Verhaltensforschung entstandenen Meme-Konzeptes (Dawkins 1978; Dennett 1991; Durham 1991) angenommen, dass analytisch prinzipiell definierbare Informationseinheiten zwischen Individuen „übertragbar“ sind und in ihrer kulturprägenden Wirkung in einer Population ähnlichen Gesetzmäßigkeiten und Funktionalitäten genügen wie Gene bei der evolutiven Anpassung von biologischen Genotypen. Deutlich von diesem Ansatz geprägt ist auch die später entstandene Metasystem-Theorie (Moritz 1995).

Im Gegensatz zu den bis hierher vorgestellten Ansätzen erklärt die Luhmann'sche Systemtheorie (Luhmann 1984; 1997) evolutive soziale Strukturbildungsprozesse durch die *Emergenz autopoietischer, kommunikationsbasierter Systeme*: Luhmann erweitert damit den Anwendungsbereich der in der biologischen und kognitionswissenschaftlichen Forschung entstandenen Theorie autopoietischer Systeme (Maturana 1985) auf Phänomene der Kommunikation. Allgemein zeichnen sich autopoietische Systeme dadurch aus, dass sie in der Lage sind, sich auf Grund der Wechselwirkungen ihrer Elemente (bei Luhmann: Kommunikation) selbst zu reproduzieren. Im Unterschied zu einfachen, in Selbstorganisationsprozessen entstandenen Strukturen (ohne Evolutionsgeschichte), grenzen sich autopoietische Systeme durch ihr Verhalten *aktiv* von ihrer Umwelt ab: Sie reagieren in einer Weise selektiv auf Ereignisse in der Umwelt, die es ihnen ermöglicht, ihre Elemente und deren Relationen *innerhalb der eigenen Systemgrenzen* zu reproduzieren und *gleichzeitig* durch eigene Strukturveränderungen (als Anpassungsleistung) aktiv dafür zu sorgen, dass ihre Fähigkeit zur Selbstreproduktion auch bei begrenzten Umweltveränderungen erhalten bleibt.

Luhmann begreift auch Gesellschaft als ein – kommunikationsbasiertes – autopoietisches System und versucht zu zeigen, dass sich im Zuge sozialer Evolution spezifische Funktionssysteme ausdifferenzieren. Eine Minimalanforderung an die Leistungen dieser Funktionssysteme besteht darin, die Dynamik von selbstreferentiellen Kommunikationsprozessen – unabhängig vom Auftauchen und Verschwinden der daran beteiligten Individuen – über Generationswechsel hinweg aufrecht zu erhalten. Dazu gehört z.B. die Fähigkeit von Individuen, sich wechselseitig so zu sozialisieren, dass diese selektiv auf Merkmale von in dieser Hinsicht dysfunktionaler Kommunikation reagieren und diese sanktionieren.

Soziale Differenzierung wird unter diesen Prämissen somit nicht mehr als Aggregat individueller Handlungsrationalität erklärt, sondern als Co-Evolutionsprozess von autopoietischen *kommunikationsbasierten* und – im Falle von Individuen – autopoietischen *kognitionsbasierten* Systemen. Auf Grund ihrer jeweiligen Autonomie und der an ihre Systembedingungen angepassten Responsivität können diese sich jedoch nicht determinieren, sondern nur in Verhältnissen „struktureller Kopplung“ (Luhmann 1997) wechselseitig zu jeweils systemfunktionalen Verhalten „anregen“. Luhmann reagiert mit der Integration des Strukturkopplungs-Konzeptes indirekt auf ein Theoriedefizit, auf das Richard Münch bereits 1980 aufmerksam gemacht hat.

Die Übertragbarkeit der Theorie autopoietischer Systeme auf Kommunikationsprozesse ist jedoch in erkenntnis- und wissenschaftstheoretischer Hinsicht nicht unproblematisch. Vor allem ergeben sich Einwände bei der empirischen Nachweisbarkeit dieses Systemtyps, wenn man konsequent konstruktivistische Erkenntnisparadigmen berücksichtigt (Hejl 1991).

Unabhängig von der Autopoiesis-Fragestellung beruhen die meisten soziologischen systemtheoretischen Ansätze auf impliziten Annahmen der Evolution symbolischer Codes. Erklärbar wird die Dynamik und Variabilität der evolutiven Entwicklung von Kommunikationssystemen jedoch erst, wenn man die grundsätzliche Entkopplung von Codes und Kommunikationsprozessen von der „Situation“ bzw. physischen „Umwelt“ voraussetzt, in der sich die kommunizierenden Individuen befinden (Giesen 1991; Giesen/Junge 1995; 1998).

Funktion generalisierter Medien in Struktur differenzierungsprozessen

Wie eingangs erwähnt, liegt der Schwerpunkt des hier dargestellten Forschungsprojekts auf der Analyse von Symbolemergenz im Zusammenhang mit funktionaler Differenzierung. Die soziologische Systemtheorie bietet hierbei – wie wir finden – mit ihrem Medienkonzept einen hervorragenden Ansatzpunkt zur Modellierung von Symbolemergenz- und Struktur differenzierungsprozessen.

Sie hat als Voraussetzung gesellschaftlicher Struktur differenzierung einen Kommunikationstyp klassifiziert, der von Parsons durch „Austauschmedien“

(Gould 1976; Johnson 1973; Parsons 1969), von Luhmann durch den Gebrauch von „symbolisch generalisierten Kommunikationsmedien“ (wir verwenden im Folgenden die Abkürzung „SGKM“) beschrieben wird (Luhmann 1975; 1997). Als gemeinsamer Bestandteil von handlungstheoretischen und systemtheoretischen Ansätzen zur Erklärung sozialer Strukturdifferenzierung zeichnen sich Macht und Geld als Beispiele für diesen Kommunikationstyp – gegenüber sonstiger sprachlicher Kommunikation – durch die zusätzliche Möglichkeit aus, über die Symbolisierung von nur selten ignorierbaren Sanktions- oder Gratifikationsmöglichkeiten bei Kommunikationspartnern Erwartungen zu generieren (Schulz-Schaeffer/Malsch 1998), die sich als „symbiotische Mechanismen“ steuernd auf die Handlungsmotivation auswirken und dadurch Kooperation erleichtern (Luhmann 1975). So ist mit vergleichsweise geringem Kommunikationsaufwand und ohne die Notwendigkeit, durch kommunikativ aufwendige „Überzeugungsarbeit“ eigene Selektionsleistungen für den Kommunikationspartner nachvollziehbar zu präsentieren, eine „Zeitressourcen“-schonende Möglichkeit zu wechselseitiger Verhaltenskoordination gegeben (Künzler 1989).

Die so durch symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien gesteigerten Kooperationschancen können selbstverstärkend kooperatives Verhalten einer großen Anzahl von Individuen motivieren: Dies gelingt durch die Symbolisierung verketteter Instrumentalisierbarkeit von Sanktionspotential: Die Koordination kooperativen Verhaltens erfolgt dabei durch die Ausdifferenzierung spezifischer Codes (Schmid 1994), die stets eine Referenz auf die Sanktions- oder Gratifikationsmöglichkeiten bestehender Kooperationsnetzwerke mit beinhalten. So verweist z.B. jemand, der machtbasierte Codes verwendet, auf die Möglichkeit, dass er, wenn das von ihm erwünschte Kooperationsverhältnis¹ abgelehnt wird, andere – bereits mit ihm kooperierende Individuen – mobilisieren könnte, mit denen er gemeinsam den Kooperationswunsch erzwingen kann. Symbolisch generalisierte Kommunikationsmedien dienen so steuernd der differenzierten Allokation von Ressourcen (Giesen 1987) in Funktionssystemen und ermöglichen gesellschaftliche Integration durch die Demotivation kooperations-schädlichen Verhaltens (Schmid 1998). Sie fungieren als universelle Katalysatoren beim Aufbau von Kooperationsnetzwerken, unabhängig von deren Einbettung in spezifische Funktionssysteme. Ob die so durch generalisierte Medien mitevolvierten und auf sozialen Normen beruhenden (Schmid 1996) systemischen Fähigkeiten zu Selbststeuerung auf operationaler Geschlossenheit von Kommunikationsprozessen beruhen, d.h., ob sie Merkmale autopoietischer Organisation aufweisen, ist umstritten (Münch 1985; Münch/Smelser 1987). Dennoch hat das generalisierte Medium „Macht“ eine zentrale Bedeutung bei der Erklärung

1 Dieses kann durchaus sehr einseitig sein, z.B. wenn Leistungen eingefordert werden, ohne dass für den Betroffenen erkennbar wird, worin für ihn der Nutzen der Leistungseinforderung besteht

von Steuerungsfunktionen funktionaler Teilsysteme, insbesondere im Bereich des politischen und administrativen Systems (Brodocz 1998).

Trotz der zentralen Bedeutung des Medienkonzepts ist die experimentelle Analyse von dessen Einfluss auf die Dynamik in Struktur differenzierungsprozessen in soziologischen Simulationsmodellen bisher nicht erfolgt, obwohl umfangreiche Vorarbeiten zur sozialwissenschaftlichen Nutzbarkeit von Simulationsverfahren existieren (Hegselmann 1996; Schnell 1991; Troitzsch 1997): Auch liegen mit den Arbeiten von Rainer Bachmann (1998), Ingo Schulz-Schaeffer und Thomas Malsch (1998) Vorstudien zur Nutzbarkeit des SGKM-Konzepts zur Kooperationsoptimierung von Modellagenten vor, jedoch sind umgekehrt bisher noch keine Versuche unternommen worden, aus soziologischer Perspektive die Dynamik SGKM-basierter Codedifferenzierung mit VKI-(Verteilte Künstliche Intelligenz)-basierten Modellierungstechniken zu analysieren. Deren prinzipielle Eignung für die Simulation gesellschaftsbildender Prozesse kann durch die Arbeiten von Werner Rammert (1998) und Michael Florian (1998) als begründbar gelten. Die VKI-basierten Entwürfe erweitern die schon bisher bestehende Vielfalt an Kooperation analysierenden Simulationsverfahren: Neben der häufigen Anwendung von Evolutions-Algorithmen zeichnen sich jedoch die meisten der bisher verwendeten Modellierungstechniken durch eine – im Vergleich zu VKI-Ansätzen – stark eingeschränkte kognitive Leistungsfähigkeit modellierter Individuen aus: Zu diesen, bisher im Rahmen sozialwissenschaftlicher Forschung häufig eingesetzten Verfahren gehören beispielsweise Simulationen komplexer anpassungsfähiger Systeme mit Zellular-Automaten (Hegselmann 1996) und Simulationsszenarien der evolutionären Spieltheorie. Es gelingt zwar, in menschlichen Gemeinschaften häufig auftretende Verhaltensprinzipien in Kooperationsituationen auch in spieltheoretischen Evolutionsmodellen nachzuweisen (Axelrod 1995; 1997), eine explizite Analyse des Zusammenhanges von Kommunikation und Symbolemergenz mit funktionale Differenzierung (spieltheoretisch modelliert z.B. bei Young 1998 und Ziegler 1997) kann im Rahmen dieser einfachen Modelle jedoch nicht erfolgen.

Kognitive Prämissen: Emergenz von Symbolen auf der Mikroebene

Das Funktionsprinzip generalisierter Medien beruht generell darauf, dass bestimmte Symbole (der generalisierten Medien) relativ kontext-unabhängig zur *unmittelbaren* Verhaltensmotivation eingesetzt werden können. Die motivierende Wirkung des Mediums Macht wird beispielsweise dadurch erreicht, dass mit dem jeweiligen Symbol überlegene Sanktionen assoziiert werden, mit denen man konfrontiert würde, falls man einer *direkt kommunizierten* oder *situativ-implizierten* Verhaltensaufforderung nicht nachkäme. Diese Antizipation kommt dadurch zustande, dass man entweder bei deviantem Verhalten in Verbindung mit Symbol-Ignoranz selbst sanktioniert wurde; man in vergleichbaren Situationen die Aufeinanderfolge von Symbolpräsen-

tation und Sanktionierung bei Anderen beobachtet hat oder – was in der sozialen Realität eher die Regel sein dürfte – dass man durch vertrauenswürdige Personen mitgeteilt bekam, womit bei Symbolignoranz in Verbindung mit bestimmten Verhaltenserwartungen zu rechnen ist.

Von entscheidender Bedeutung ist jedoch die *Überlegenheit* und die *sichere Erwartbarkeit* der Sanktionen, die symbolisiert und ggf. tatsächlich angewendet werden können: Sie resultiert aus bereits etablierten Kooperationsverhältnissen, die sich im einfachsten Fall dadurch auszeichnen, dass auf entsprechende Anforderung hin die Kooperationspartner ihr Sanktionsvermögen koordiniert mobilisieren, um dies ggf. gegenüber einem Dritten einzusetzen – beispielsweise um dessen Kooperation zu *erzwingen*. Da vor Anwendung der Sanktionen diese zuerst von Drohverhalten begleitet werden, gewinnt im Falle einer tatsächlich erforderlichen Anwendung von überlegenen Sanktionen (Zwang) das zuvor gezeigte Drohverhalten Symbolcharakter: Es wird nun (primär) mit den Sanktionen assoziiert und kann fortan als symbolischer Verweis auf Sanktionsfähigkeit universell eingesetzt werden, solange nicht die tatsächliche Mobilisierbarkeit des Sanktionspotentials angezweifelt wird. Dies ist jedoch unwahrscheinlich: Durch die Erweiterung des bereits bestehenden Kooperationsnetzwerkes durch den neuen, nun per Symbol mobilisierbaren Akteur gewinnt das Netzwerk zusätzliches Sanktionspotential und die Chancen zur weiteren Durchsetzung des *Zwang*-Symbols – nach innen wie nach außen – steigen. Gelingt es nicht mehr, diese Kooperationsnetzwerke mittels eines bestimmten Symbols zur Durchsetzung der Validität eben dieses Symbols zu motivieren, setzt sich ein selbstverstärkender Prozess sich verringernder Erwartungssicherheit (Inflation) in Gang, in dessen Verlauf die Verhaltenskoordination des Kooperationsnetzwerkes kollabieren kann.

Die Unterscheidung zwischen der Symbolisierung von *Zwang* und *Macht* ist vor dem Hintergrund des bisher Gesagten vermutlich erst dann sinnvoll, wenn man den Akteuren höhere Repräsentationsfähigkeiten unterstellt: Die Symbolisierbarkeit von *Macht* impliziert die *Repräsentationsfähigkeit der Ursachen von Zwang*. Erst wenn der „Betroffene“ eine (selbst konstruierte) Vorstellung vom u.U. *Zwang* ausübenden Kooperationsnetzwerk besitzt, kann aus individueller Perspektive von *Machtstrukturen* oder *Machtpositionen* (innerhalb dieses Kooperationsnetzwerkes) gesprochen werden. Das *generalisierte Medium Macht* ist dann diejenige Kommunikation, die auf die Kooperationsforderungen und das Sanktionspotential dieses Kooperationsnetzwerkes verweist.

Unter funktionalen Gesichtspunkten ist die Symbolisierung von *Zwang* und *Macht* vermutlich gleichzusetzen: In beiden Fällen wirkt die Symbolisierung überlegenen Sanktionspotentials Verhalten bzw. Kooperation motivierend. Für einen externen Beobachter ist, zumindest solange der Symbolisierungsmechanismus „funktioniert“, nicht erkennbar, ob der „Betroffene“ die Sanktionsbereitschaft von Kooperationsnetzwerken reflektiert oder einfach „nur“ auf Kooperationsbereitschaft infolge der Beobachtung eines bestimm-

ten Symbols konditioniert ist. Selbst wenn soziale Repräsentationen hier verhaltensmotivierend wirken, ist deren Komplexität prinzipiell bedeutungslos, solange das Ergebnis – Kooperationsbereitschaft – „stimmt“, d.h., wenn Kooperationsbereitschaft selektiv so eingesetzt wird, dass sie sich in ihren Konsequenzen stabilisierend auf das Gesamtnetzwerk auswirkt.

Auch aus evolutionsgeschichtlicher Perspektive ist die funktionale Gleichsetzung von Macht- und Zwangssymbolisierung plausibel: Im Verlauf der Entwicklung von „allgemeiner“ Primaten-Sozialität hin zu differenzierter – und stratifizierter – menschlicher Sozialität müssen Entwicklungspfade verfolgt worden sein, die ihren Anfang auf der Ebene einfacher Konditionierungsmechanismen gehabt haben müssen. Die Entwicklung eines differenzierten Kommunikations- und Repräsentationsvermögens erfolgte evolutionsgeschichtlich *parallel* zur Komplexitätsentwicklung sozialer Strukturen, die jedoch von Beginn an auf ihre Fähigkeit zur Koordination von Kooperation angewiesen waren. Es ist daher sinnvoll, bei der Analyse generalisierter Medien die besondere Aufmerksamkeit den kognitiven Minimalbedingungen zu widmen, die bei der (kommunikativen) Kooperationskoordination in einfachen Sozialstrukturen bereits gegeben waren.

Modellierung systemtheoretischer Grundannahmen

Mit den in hier dargestellten Simulationsmodellen soll ermittelt werden, unter welchen kognitiven *Minimalbedingungen* – vor allem unter Berücksichtigung der kognitiven Autonomie von Individuen – sich ein Symbolgebrauch zur Verhaltenskoordination und -motivation in Multiagenten-Populationen etablieren kann, der die Funktion symbolisch generalisierter Medien erfüllt. Unser Ziel besteht genauer gesagt darin, die Bedingungen zu identifizieren, unter denen sich in der Agentenpopulation eine Symbolverwendung mit folgenden Eigenschaften etabliert:

Emergente Symbole sollten

- die Koordination von Kooperationsverhalten erlauben, ferner die
- Selbststabilisierung dieser Symbolverwendung herbeiführen und zusätzlich auf Grundlage dieser Mechanismen
- ein Symbol etablieren, das den *Aufbau neuer Kooperationsverhältnisse* durch seine Referenz auf bereits bestehende Kooperationsverhältnisse unterstützt.

Den modellierten Randbedingungen kommt dabei der Status unabhängiger Variablen zu, die – eine geeignete Operationalisierung der systemtheoretischen Prämissen vorausgesetzt – die Emergenz von Kommunikationsverfahren erlauben sollten, die in ihrer Funktion mit generalisierten Medien vergleichbar sind. Das Emergenzphänomen der medienäquivalenten Agentenkommunikation besitzt dabei den Status einer abhängigen Variablen, mit der

sich die Validität der modellierten Minimalbedingungen überprüfen lassen soll.

Zu den wesentlichen systemtheoretischen Prämissen, die unseres Erachtens einige der elementaren Voraussetzungen für die Emergenz selbstreferentieller Kommunikationssysteme darstellen, gehören sowohl die

- Asymmetrisierungsnotwendigkeit als auch die
- doppelte Kontingenz

in Kooperationsverhältnissen.

Asymmetrisierung

Als Ausgangspunkt bei der Suche nach modellierbaren Bedingungen funktionaler Differenzierung bietet sich eine evolutionstheoretisch orientierte Vorgehensweise an: Entsprechend den Prämissen der Theorie autopoietischer Systeme (Maturana/Varela 1975; 1980; 1987) setzten wir voraus, dass soziales Verhalten als Strukturkopplungsphänomen dritter Ordnung grundsätzlich als Anpassungsleistung an kooperationserfordernde Umweltbedingungen interpretierbar ist. Für uns relevant sind dabei soziale Phänomene, bei denen der Aufbau von Kooperationsverhältnisse das zentrale Anpassungsmerkmal von Individuen darstellt. Wir setzten dabei im Einklang mit den konstruktivistischen Vorannahmen der soziologischen Systemtheorie voraus, dass die hierzu erforderliche kommunikative Kompetenz im Verlauf individueller Ontogenesen erworben werden muss und nicht, wie etwa bei sozialen Insekten, vererbt wird.

Die Notwendigkeit ökologischer Anpassung durch Verhaltenskoordination wird innerhalb der Systemtheorie durch den Begriff der *Asymmetrisierung* (Luhmann 1984) fassbar: Obwohl autopoietische Systeme (kognitive wie soziale) operativ geschlossen sind, müssen Kriterien für die Selektion von Systemoperationen gegeben sein, die dann innerhalb des Systems selbstreferentiell weiterprozessiert werden und die schließlich zu Verhaltensmodifikationen als Anpassungsmerkmal führen. Die operative Geschlossenheit von Systemoperationen bezieht sich somit ausschließlich auf die Art und Weise, wie diese (z.B. Kommunikationen) aneinander angeschlossen werden, um Systemfunktionen als solche zu stabilisieren. Unabhängig davon müssen jedoch auch Referenzen von Systemoperationen auf Umweltmerkmale möglich sein, die als Kriterien für die Gültigkeit von Systemoperationen dienen und – gewissermaßen als „Stellgröße“ – dem System erlauben, seine Selektivitätskriterien für eigene selbstreferentielle Operationen anzupassen.

Eine Kooperation erfordernde Umwelt erzwingt eine solche Asymmetrisierung von Systemoperationen (in unserem Falle von Kommunikationen): Der Kooperationsgewinn sichert den physischen Bestand der kooperierenden Individuen, ist individuell wahrnehmbar und dient als kommunikationssystemexterne Referenz für die Selektion funktional anschlussfähiger Kommunikation, die ihrerseits weiteres Kooperationsverhalten koordiniert. Der

Kooperationsbegriff kann dabei sehr weit gefasst werden – Kooperation kann, muss jedoch nicht notwendigerweise die Erlangung materieller Ressourcen zur Folge haben. Wichtig bei der Definition von Kooperation ist im Rahmen unserer Modellstudie nur, dass Individuen darauf angewiesen sind, ihr Verhalten so zu koordinieren, dass das Resultat den Fortbestand der individuellen Existenz und die Möglichkeit weiterer Interaktionen sichert. Es spielt dabei auch keinerlei Rolle, wie „Nutzen“ individuell wahrgenommen wird – wichtig ist nur, dass *überhaupt* ein Nutzen- bzw. Erfolgskriterium existiert, das auf koordiniertes Verhalten anwendbar ist und das zur Definition von Situationen und zur daran angepassten Selektion weiteren Verhaltens genutzt werden kann. Auf die Diskussion über die Notwendigkeit individueller Nutzenmaximierungsstrategien, Nutzendefinitionen und Kriterien rationaler Wahl kann daher im Rahmen unseres Vorhabens verzichtet werden: Für uns ist wichtig, dass es außerhalb von kognitiven und sozialen Systemen Umweltmerkmale gibt, die Kooperation erzwingen und damit über *Verhaltensmerkmale* eine Nutzenfunktion außerhalb kognitiver oder sozialer Systeme definieren. Die Art und Weise, ob und wie Individuen diesen Sachverhalt wahrnehmen ist dabei irrelevant – und erspart uns so die Diskussion von Fragen der Modellierung von Normen, Werten und Bedürfnissen.

In unserem Simulationsansatz wurde die kommunikative Asymmetrisierung bezüglich der Zeit- und Sachdimension modelliert, da die Agentenkommunikation zur Lösung kommunikationssystemexterner Kooperationsaufgaben dienen soll.

Modellierung der Asymmetrisierungsnotwendigkeit

Die genannten Asymmetrisierungsvoraussetzungen wurden in Form einer von simulierten Individuen („Agenten“) zu lösenden Kooperationsaufgabe modelliert: Erfolgreiche Kooperation ist im Modell dadurch definiert, dass die Agenten in einer bestimmten Reihenfolge Verhaltensweisen zeigen müssen, die sich komplementär ergänzen. Aus Anschaulichkeitsgründen haben wir die komplementären Teilbeiträge zum Kooperationsergebnis mit „Pflanzen“ und „Ernten“ bezeichnet. Wurde nacheinander gepflanzt und geerntet, wird der Kooperationsnutzen in Form der Verrechnungseinheit „Energie“ den Agenten zu gleichen Teilen gutgeschrieben. Agenten können ihren Energiebestand akkumulieren, aber auch durch unangepasstes Verhalten auf Null absinken lassen, wenn es ihnen nicht gelingt, erfolgreich mit anderen Agenten zu kooperieren. Neben den beiden genannten Teilbeiträgen Ernten und Pflanzen kann im Modell die Kooperationsaufgabe dadurch anspruchsvoller definiert werden, dass beliebig viele weitere Teilverhaltensweisen ausgeführt werden müssen, bis die Gutschrift des Kooperationsgewinns erfolgt.

Die Agenten selbst unterscheiden sich bezüglich ihrer Typendefinition, die die Ausprägung „Pflanzer“ oder „Ernter“ haben kann. Der Typ eines Agenten legt fest, welche Verhaltensweise dieser Agent *effektiv* ausführen kann. Dabei ist zu beachten, dass jedes Verhalten des Agenten „Energie“

kostet. Wenn beispielsweise ein *Pflanzer*-Agent Pflanzverhalten zeigt, so ist dies als „effektives“ Verhalten dadurch definiert, dass es ihn zwar *Energie* kostet, dieser Energieverlust jedoch im Falle von Ernteverhalten durch einen *Ernter*-Agenten mit dem Kooperationsgewinn überkompensiert wird. Es ist jedoch auch möglich, dass ein *Pflanzer*-Agent fälschlicherweise Ernteverhalten zeigt: In diesem Fall erfährt der betreffende Agent ebenfalls ein Energie-defizit. Dieses kann jedoch in keinem Fall durch komplementäres Verhalten anderer Agenten zu einem Kooperationserfolg führen. Eine solche Verhaltensweise, die nur Energie kostet, aber zu keinem Energiegewinn führen kann, gilt als „ineffektiv“. Der Grund für die Modellierung dieser „Komplikation“ besteht darin, den Agenten die Möglichkeit zu nehmen, quasi im „Alleingang“ ein Problem zu lösen, ohne dabei auf die Interaktion mit anderen Agenten angewiesen zu sein. Ohne diese Restriktion bestünde keine Notwendigkeit, ein Symbolsystem zur Verhaltenskoordination oder zur Typidentifizierung zu entwickeln, da die Ausführung von „Pflanzer“ und „Ernter“-Aktionen durch isoliert handelnde Agenten risikoärmer zu erlernen wäre und nach kurzer Zeit das Verhalten aller Agenten dominieren würde.

Zu Beginn einer Interaktion befindet sich die *Umwelt* U der Agenten immer im „unbearbeiteten“ Zustand $U_s = 0$. Eine von einem *Pflanzer* ($type=0$) ausgeführte Pflanzaktion $Plant_i$ überführt die Umwelt in den Zustand $U_s = 1$, eine anschließende Ernteaktion $Harvest_i$ durch einen *Ernter* ($type=1$) hat den endgültigen Umweltzustand $U_e = 2$ zur Folge, in dem der Kooperationsnutzen den Agenten ausgezahlt und die Interaktion beendet wird. Eine Aktion $Plant_i$ hat im Umweltzustand $U = 1$ keine Wirkung, entsprechendes gilt für eine Ernteaktion $Harvest_i$ im Zustand $U = 0$.

Allgemein gilt, dass ein *Pflanzer* durch die Aktion a_i zu einem gegebenen Zeitpunkt t die Umwelt U_t gemäß folgender Definition verändern kann:

$$[(U_t = i) \wedge ((i \bmod 2 = 0) \wedge (type = 0)) \wedge (a_t = i)] \Rightarrow U_{t+1} := i + 1$$

Entsprechend gilt für *Ernter*:

$$[(U_t = i) \wedge ((i \bmod 2 = 1) \wedge (type = 1)) \wedge (a_t = i)] \Rightarrow U_{t+1} := i + 1$$

In jeder anderen Situation verbleibt die Umwelt im Zustand i $U_{t+1} = i$.

Die Komplexität von Kooperationsaufgaben lässt sich einfach durch die Hinzunahme weiterer möglicher Aktionen (z.B. $Plant_I$, $Harvest_I$, $Plant_{II}$ usw.) und die Definition entsprechender finaler Umweltzustände $U_e > 2$ steigern (in diesem Fall verfügen beide Agententypen über jeweils exklusive, einander ergänzende Verhaltensweisen, die, wenn sie in der vorab definierten „richtigen“ Reihenfolge angewendet werden, ebenfalls zu einem Kooperationspayoff führen).

Ein Spiel endet erfolgreich, wenn die Umwelt in den Endzustand U_e überführt wird. In diesem Fall erhalten die beiden zuletzt an dem Spiel beteiligten

Agenten einen vorab definierten „Energie-Payoff“ E^* ; kann im Verlauf des Spiels der Endzustand nicht erreicht werden, erfolgt kein Payoff. Komplementär zum Kooperations-Nutzen sind die Aktionskosten definiert: Wir unterscheiden zwischen den „billigen“ Aktionen *Null*, *Exit*, *Replace* und den vergleichsweise „teuren“ Aktionen *Plant_x* und *Harvest_x*. Wenn ein Agent nur kommuniziert (*Null*-Aktion), das Spiel beendet (*Exit*) oder den Interaktionspartner wechselt (*Replace*) verbraucht er in jedem Fall die Energie $E_i < 0$. Zeigt er neben der stets erfolgenden Kommunikation „teures“ umweltmanipulatives Verhalten, kommen dessen Kosten zusätzlich hinzu ($E_i + E_h + E_p < 0$). Zu den ebenfalls „teuren“ – jedoch nicht umweltmanipulativen – Aktionen gehört das „Sanktionsverhalten“ *Bite*. Dies hat zur Folge, dass dem sanktionierten Interaktionspartner zusätzlich *Energie* abgezogen wird ($E_p < 0$).

Der Sinn dieser unterschiedlichen „Bilanzierung“ von Verhalten besteht darin, den Agenten einen Anreiz zu schaffen, anhand ihres Symbolisierungsverhaltens sowohl den Typ des Interaktionspartners zu identifizieren als auch in Abhängigkeit von dessen Kommunikation das jeweils situationsangepasste eigene Kooperationsverhalten zu selektieren. Eine „blinde“ Verhaltensselektion ohne Berücksichtigung der fremden Kommunikation ist dabei stets Ressourcen-aufwändiger als die Orientierung an fremdem Kommunikationsverhalten. Aus den gleichen Gründen haben wir im Modell auch vermieden, den Agenten eine „unmittelbare“ Wahrnehmungsmöglichkeit ihrer Umwelt – d.h. von deren „Pflanzzustand“ – zu schaffen. Wäre diese gegeben, bestünde keine Notwendigkeit mehr, sich Ressourcen-aufwändig auf ein Symbolsystem zu einigen.

Jeder Agent beginnt die Simulation (dies gilt auch für neu hinzukommende Agenten) mit der Startenergie $E_s > 0$. Alle Agenten sind darauf angewiesen, durch entsprechende Verhaltensselektionen zusammen mit ihren Interaktionspartnern Kooperationsgewinne zu erzielen, d.h. ihre Umwelt in den Zustand U_c zu überführen. Agenten, denen dies in wiederholten Spielen nicht oder zu selten gelingt, werden aus der Simulation entfernt, sobald ihr „Energievorrat“ auf 0 abgesunken ist.

Die Agentenpopulation kann dadurch ihre Bestandsgröße verändern, dass Agenten mit auf Null abgesunkenen Energiewerten aus der Population entfernt werden oder neue Agenten hinzukommen. Letzteres ist dann der Fall, wenn erfolgreich kooperierende Agenten ihr Energieniveau über einen definierten Grenzwert hinaus angehoben haben. Dann wird ein neuer Agent der Population hinzugefügt, wobei dieser ebenso wie alle anderen Agenten zu Beginn der Simulation hinsichtlich seiner Verhaltensdispositionen zufällig initialisiert wird.

Doppelte Kontingenzen

Doppelte Kontingenzen, so wie sie von Luhmann und Parsons (dort als soziale Kontingenzen bezeichnet) als Entstehungsursache sozialer Systeme dargestellt

wird², ist ein eng mit subjektiver Wahrnehmung verbundenes Phänomen und lässt sich – stark vereinfachend – als die Notwendigkeit wechselseitiger Perspektivenübernahme beschreiben: Zwei Interaktionspartner konstruieren sich individuell ein Modell der Wahrnehmungsmöglichkeiten und Selektionskriterien des jeweils Anderen, um dessen mögliches Verhalten zu prognostizieren und damit als Kriterium zur eigenen Verhaltensselektion nutzen zu können. Aus den anfangs genannten Gründen wollen wir jedoch soweit wie möglich auf individuelle Umweltrepräsentationen verzichten. Ist unter diesen Bedingungen die Modellierung doppelter Kontingenz als ein bei Luhmann zentrales Theorieelement überhaupt noch möglich?

Wir meinen ja: Die von Luhmann vorausgesetzte Existenz autopoietischer kognitiver Systeme und deren Umweltrepräsentationen können wir nicht modellieren. Wir meinen allerdings, dass dies für die von uns verfolgten Ziele auch nicht erforderlich ist: Abgebildet werden sollen die sich aus der individuellen kognitiven Autonomie ergebenden Konsequenzen, die sich als Problem der wechselseitigen Selektion anschlussfähigen Verhaltens zeigen und die letztlich die Ursache der Emergenz sozialer Systeme sind: Soziale Systeme definieren sich über *Kommunikationsoperationen*, die die Selektion von – für das soziale System – funktionaler Anschlusskommunikation initiieren.

Es ist genau diese scharfe analytische Abgrenzbarkeit der *Funktionalität* von *Systemoperationen*, die die Luhmann'sche Systemtheorie für Modellierungskonzepte so interessant macht (Luhmann 1997: 81): Dadurch, dass *Kommunikationsselektionen* hier als konstitutive Elemente sozialer Systeme definiert sind, müssen wir bei der Modellierung dafür sorgen, dass die Beobachtung von Kommunikation überhaupt eine hinreichende Bedingung für die Selektion funktionaler Anschlusskommunikation darstellt. Wir sind in erster Linie an den Selbsterhaltungsbedingungen und der Dynamik selbstreferentieller *Kommunikationsselektionen* vor dem Hintergrund doppelter Kontingenz interessiert – und nicht an den subjektiven Repräsentationen, die in diese Selektionen involviert sind. Dadurch, dass eben diese kognitiven Prozesse von Luhmann ganz klar in der *Systemumwelt* von sozialen Systemen verortet werden, sind unsere Modellanalysen überhaupt erst in den Kontext soziologischer Fragestellungen integrierbar – unsere Modelle beanspruchen nicht, konkrete soziale Phänomene menschlicher Interaktion abzubilden (geschweige denn zu erklären): Ihr Ziel besteht dagegen darin, experimentell zu untersuchen, ob unter den von Luhmann benannten Randbedingungen – und hier bildet die doppelte Kontingenz das zentrale Element - *überhaupt* die Emergenz selbstreferentieller Kommunikationssysteme in der *Umwelt* individueller kognitiver Systeme möglich ist. Ob und wie Individuen die soziale Situation wahrnehmen, ist dabei insofern zweitrangig, als wir Individuen *nicht über ihre Repräsentationen*, sondern über ihre – *aus doppelter Kontingenz resultierende* – *Interaktionsproblematik* definieren.

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

Die Verwertbarkeit von Analysen der strukturdifferenzierenden Dynamik generalisierter Medien für die soziologische Theoriebildung setzt daher zu erst die Modellierung der kognitiven Grenzen voraus, die die Problematik der „doppelten Kontingenz“ verursachen: Ausschlaggebend sind dabei die Berücksichtigung der wechselseitigen Unsicherheit von Verhaltenserwartungen, die wechselseitige Nichtdeterminierbarkeit und die Möglichkeit, durch die Beobachtung der Konsequenzen des eigenen Verhaltens jeweils situationspezifische Anpassung zu ermöglichen (dies entspricht dem in der konstruktivistischen Kognitionsforschung etablierten Konzept der „Passung“, [Glaserfeld 1997]). Angelegt ist dieses Konzept, individuelle soziale Kompetenz zu erwerben, als Grundlage instrumentellen Lernens bereits bei Jean Piaget (1974). Dabei sollen während der ersten Modellierungsphase nicht nur die Regeln sozialer Interaktion (im Sinne von Kooperation als Verhaltensnorm) gelernt werden, sondern ebenfalls die zu ihrer Umsetzung erforderliche Beherrschung der kommunikativen Mittel.

Modellierung doppelter Kontingenz

Die Problematik der doppelten Kontingenz haben wir bei der Modellierung der Agenten dadurch abgebildet, dass die Agenten füreinander „intransparent“ sind und in individuellen Lernprozessen ihr Verhalten so aufeinander abstimmen müssen, dass ihnen eine Lösung der oben dargestellten Kooperationsaufgabe gelingt. Dabei steht jeder Agent vor dem Problem, dass die einzige Möglichkeit zur Lösung dieser Aufgabe in der Orientierung an der Kommunikation seiner Interaktionspartner und in Abhängigkeit davon der Selektion eigenen adäquaten Verhaltens besteht. Die selektierbaren Reaktionen sind dabei in den getrennten Verhaltensklassen „Kommunikation“ und „umweltmanipulatives Verhalten“ modelliert: Zur Klasse des „umweltmanipulativen Verhaltens“ gehören die bereits dargestellten Verhaltensweisen „Pflanzen“ und „Ernten“, zusätzlich stehen die Verhaltensoptionen „Null-Aktion“ (der Agent verhält sich passiv), „Exit“ (der Agent beendet die Interaktion) und „Sanktion“ (*Bite*) (s.u.) zur Verfügung.

Außer dem Sanktionsverhalten kann von den Agenten ausschließlich „kommunikatives Verhalten“ anderer Agenten unmittelbar beobachtet werden: Kommunikatives Verhalten ist hier lediglich durch den Austausch von Zeichen definiert, die zunächst keine definierte „Bedeutung“ für die Agenten besitzen. Diese Form des Kommunikations-Input bildet die Grundlage zur Selektion des eigenen kommunikativen und umweltmanipulativen Verhaltens des betreffenden Agenten. Die Lernaufgabe des Agenten besteht darin, als Reaktion auf den Kommunikationsreiz eines anderen Agenten das eigene kommunikative und umweltmanipulative Verhalten so zu wählen, dass der andere Agent wiederum daran anschließen kann und es über Verhaltenskoordination zur Lösung der gemeinsamen Kooperationsaufgabe kommt.

Die genannten Anforderungen setzen die Modellierung kognitiver Fähigkeiten voraus, die es den Agenten ermöglichen, „erfolgreiches“ von weniger

erfolgreichem Verhalten zu unterscheiden, dieses in einen Kontext zur jeweiligen Situation zu setzen und bei vergleichbaren Situationen in der Zukunft zu wiederholen.

In unserer ersten Modellierungsphase haben wir in den Agenten die Grundlegenden Fähigkeiten zur Verhaltensakquisition in operanten Konditionierungsprozessen durch die Implementierung eines einfachen Q-Learning-Verfahrens (Sutton/Barto 1998) angelegt: Jeder Agent verfügt über zwei *Q*-Tabellen: Die erste dient der Selektion von Aktionen (bzw. umweltmanipulierendem Verhalten), die zweite der Selektion von kommunikativem Verhalten. Auf einen gegebenen Kommunikationsreiz hin können kommunikative und aktionsbezogene Reaktionen voneinander unabhängig angepasst werden. Die *Q*-Tabellen erfüllen damit die Funktion eines Gedächtnisses, in dem der Erfolg von unterschiedlichen Aktions- und Reaktionssequenzen festgehalten und so dem eigenen Verhalten verfügbar gemacht wird: Während die einzelnen Zeilen der Tabelle die beobachteten Kommunikationsreize repräsentieren, bezeichnen die Spalten die selektierbaren Reaktionen, also das eigene kommunikative oder umweltmanipulative Verhalten (je eine Tabelle für Aktionen und Kommunikationen). Die *Q*-Werte bilden die eigentlichen Tabellenelemente und bestimmen die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Reaktion gewählt wird: Es ist die Reaktion am wahrscheinlichsten, die innerhalb der Zeile eines gegebenen Kommunikationsreizes den höchsten *Q*-Wert aufweist.

Der innere Zustand eines Agenten ist der *Q*-Zustand, basierend auf den letzten drei Nachrichten: Der letzten empfangenen Nachricht M_{t-1} , der zuvor empfangenen Nachricht M_{t-2} und der letzten (eigenen) Antwort M_{t-2} . Der Agent ist somit in der Lage, allein durch die Unterscheidung von $S_{max} + 1$ möglichen Symbolen $(S_{max} + 1)^3$ innere Zustände einzunehmen bzw. ebenso viele „Situationen“ zu unterscheiden. Hinzu kommen unterschiedliche Startzustände für den Fall dass $M_i = nil, i \in 0, 1, 2$. Gibt man dem Agenten zusätzlich die Möglichkeit, Umweltmerkmale direkt wahrzunehmen, ergibt sich ein maximales Unterscheidungsvermögen (Zustandsraum) von $\lfloor (S_{max} + 1)^3 + (S_{max} + 1)^2 + (S_{max} + 1) \rfloor \times U_e$ möglichen Situationen. Wie bereits angesprochen, ist es den Agenten nicht möglich, Umweltmerkmale wahrzunehmen und so zur Situationsdefinition zu nutzen. Diese kann *ausschließlich* indirekt, d.h. durch die Beobachtung der Kommunikation anderer Agenten, ermittelt werden. (Eine echte „Situations-Repräsentation“ liegt auch unter diesen Bedingungen beim Agenten nicht vor, er reagiert lediglich auf Kommunikationsreize mit eigenem Kommunikations- und ggf. umweltmanipulativem Verhalten. Ebenso wenig existiert in diesem Modell ein Äquivalent zu „Sinn“- oder „Erwartungs“-Repräsentationen. Es existiert überhaupt nichts, was in irgend einer Weise auch nur annähernd einer subjektiven Repräsentation entspräche.)

Die Anpassung eines *Q*-Wertes $Q(a,s)$, der die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion *a* in einer gegebenen Situation *s* bestimmt, erfolgt durch die *Q*-Learning-Vorschrift

$$Q(a, s_t) := Q(a, s_t) + \alpha [r_{t+1} + \gamma \max_{a'} Q(a', s_{t+1}) - Q(a, s_t)]$$

wobei als Parameter α und γ die bei diesem Verfahren üblichen Lernparameter, r_{t+1} das Reward-Signal und $\max_{a'} Q(a', s_{t+1})$ den höchsten Q -Wert des Nachfolge-Zustands s_{t+1} , in die Gleichung eingehen. Im Verlauf der Populationsentwicklung erfolgt keine Evolution, d.h. die Q -Tabelle wird mit Zufallswerten initialisiert und die Parameter α , γ , ϵ^3 , a und b konstant gehalten⁴. Somit verfügt zu Beginn der Simulation kein Agent über eine a-priori Verhaltensanpassung an seine (soziale) Umwelt.

Der Interaktionsprozess zweier Agenten ist wie folgt modelliert:

- Initialisierung der Startpopulation P_s
- Wiederholung des folgenden Prozesses bis Erreichen der maximalen Spielanzahl:
 - Zufallsauswahl zweier Agenten $Agent_1$ und $Agent_2$; Initialisierung der Spielrunde $t:=0$ und des Umweltzustandes $U_0:=0$.
 - $Agent_1$ selektiert (und sendet) eine Startnachricht M_0
 - wiederhole
 - $t:=t+1$
 - $Agent_2$ empfängt vorangegangene Nachricht M_{t-1} , selektiert die Aktion a_t und antwortet mit der Nachricht M_t .
 - $t:=t+1$
 - $Agent_1$ empfängt die Nachricht M_{t-1} , selektiert die Aktion a_t und antwortet mit der Nachricht M_t
 - bis $U_t = U_s$ oder $a_t = Exit$ oder $t = 2 + rounds$
- Hinzufügung oder Entfernung von Agenten aus der Population

Wenn die Anzahl der Agenten in der Population P_t soweit abfällt, dass die Größe der Startpopulation P_s unterschritten wird (z.B. bei einem Populationsweiten Kooperationszusammenbruch), werden solange neu initialisierte Agenten hinzugefügt, bis $P_t = P_s$.

Dadurch, dass zu Beginn der Simulation alle Agenten *zufallsinitialisiert* sind – sie reagieren individuell unterschiedlich auf Kommunikationsreize – besteht keine Grundlage regelhaften Verhaltens, an das die Agenten sich anpassen können. Sie verfügen jedoch über die kognitiven Fähigkeiten, sich in operanten Konditionierungsprozessen durch „experimentelle“ Verhaltensmodifikation wechselseitig aneinander anzupassen und ihr Verhalten bei Erfolg beizubehalten: Aneinander anschließbare Reiz-Reaktions-Kopplungen, die

3 Die Aktions-Selektion des Q -learning-Algorithmus erfolgt durch das $\mathcal{E}$ -greedy Selektionsverfahren.

4 Unsere Experimente haben gezeigt, dass eine Evolution auf Basis dieser Parameter keinen Einfluss auf das Kooperationsverhalten der Agenten hat.

zum Kooperationserfolg führen – dies ist zu Beginn höchst unwahrscheinlich, kommt aber gelegentlich vor – haben bei den beteiligten Agenten einen Anstieg ihres Energievorrates zur Folge, der wahrgenommen und als Verstärkungsreiz zur Festigung der zuletzt ausgeführten Reiz-Reaktions-Kopplung genutzt wird: Die Agenten generieren individuell aus der *Beobachtung ihrer Energiedifferenzen* – und nicht etwa durch die Beobachtung von Umweltmerkmalen – e_d durch die sigmoide Funktion ein Reward-Signal r , das verstärkend oder abschwächend auf die Reiz-Reaktions-Kopplung einwirkt:

Abbildung 1

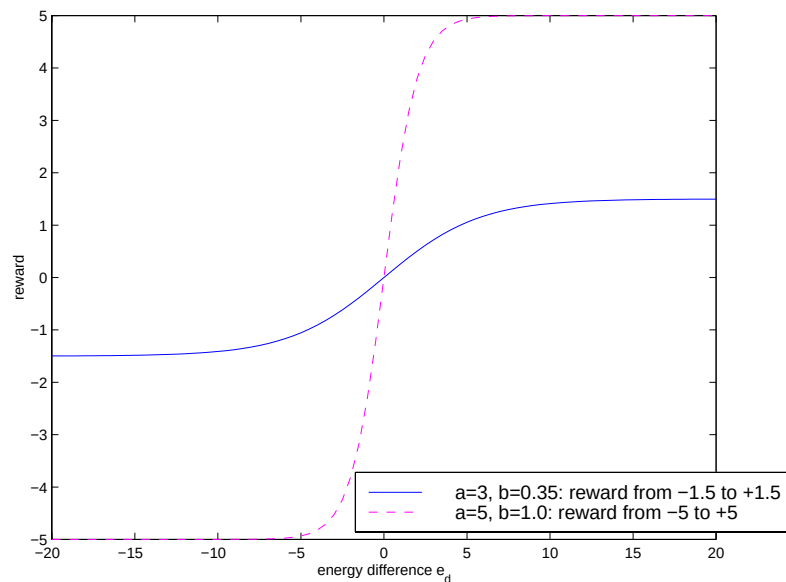


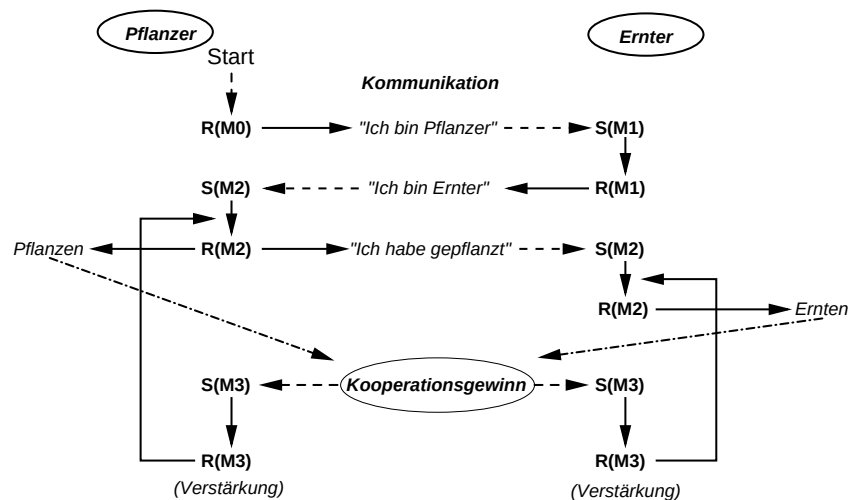
Abbildung 2

$$J_r = 2 * a * \frac{1}{1 + \exp(-b * e_d)} - a$$

Dadurch, dass diese Agenten als zunächst einzelnes „erfolgreiches“ Paar koordiniert aufeinander reagieren, besitzen sie gegenüber anderen Agenten eine höhere Chance, in der Population zu verbleiben und reagieren – anders als diese – veränderungsresistenter auf nicht erfolgreiches Anschlussverhalten anderer Agenten. Somit bilden sie eine Ausgangsgrundlage regelhaften Verhaltens, an das sich neue Agenten anpassen und dieses so in einem selbstverstärkenden Prozess ausbauen können.

Ein externer (menschlicher) Beobachter kann, sofern Kooperation funktioniert, die Agentenkommunikation *semantisch* als koordinierte Abfolge von Identifikation und Verhaltenskoordinierender Kommunikation beschreiben.

Abbildung 3



Die Fähigkeit der Agenten zur wechselseitigen Anwendung von Sanktionsverhalten bildet in Verbindung mit den genannten Lernmechanismen die Modellierungsgrundlage zur Entstehung von regelhafter Kommunikation mit der Funktionalität generalisierter Medien. Diese beruht, wie zuvor dargestellt, auf Symbolisierungsverfahren, die über motivationsbeeinflussende Mechanismen die Erwartbarkeit von Verhalten unter der Bedingung der doppelten Kontingenz steigert und damit Verhaltenskoordination wahrscheinlicher macht. Wir haben die Möglichkeit der Motivationsbeeinflussung über die Symbolisierung von Sanktionskompetenz auf individuell-kognitiver Ebene dadurch modelliert, dass Sanktionsanwendung durch andere Agenten (als eine Form umweltmanipulativen Verhaltens, s.o.) in Verbindung mit regelhafter Kommunikation auftreten *kann*. Ebenso, wie Agenten lernen können, auf Kommunikationsreize hin kooperatives Verhalten zu selektieren, haben sie auch die Möglichkeit, eine Zeichenverwendung zu etablieren, die regelhaft Sanktionsverhalten vorausgeht und damit die Bedeutung einer „Androhung“ von Sanktionen gewinnen kann. Sollte es (beim „Nichtverstehen“ dieser „Semantik“) tatsächlich zu einer Anwendung von Sanktionsverhalten kommen, so hat dies beim „betroffenen“ Agenten über die Reduktion seines Energieniveaus die Wirkung, dass sein zuvor gezeigtes dysfunktionales Reaktionsverhalten auf Kommunikationsreize in Zukunft mit verminderter Wahrscheinlichkeit auftritt.

Das Ziel besteht somit darin, bei „deviantem“ bzw. nicht-effizientem Agentenverhalten eine Zeichenverwendung (im Sinne einer „Drohung“) zu beobachten, die eine konditionierende Wirkung mit Folge einer Steigerung der Ausführungswahrscheinlichkeit künftiger funktionaler Reaktionen besitzt. Dies entspräche dem gemäß der Medientheorie zu erwartenden Effekt, dass die tatsächliche Anwendung von Sanktionen – verglichen mit der Häufigkeit der Anwendung des Mediums selbst – eine Ausnahme darstellt. Entsprechend der Theorie generalisierter Medien würden Sanktionen dann nur noch eingesetzt, um die Akzeptanz der Symbolisierungsform des Sanktionspotenzials durchzusetzen und so mehr (symbolisiertes) Sanktionspotenzial zur motivationsgesteuerten Verhaltenskoordination nutzbar zu machen, als faktisch verfügbar ist.

Empirische Ergebnisse

Die bisherigen Simulationsergebnisse legen nahe, dass mit den gewählten Verfahren zur Modellierung doppelter Kontingenz sich einerseits die Emergenz von regelhaftem Zeichengebrauch zur Verhaltenskoordination in kleinen Populationen herbeiführen lässt, andererseits die Entstehung generalisierter Medien eine erweiterte Modellierung kognitiver Fähigkeiten voraussetzt.

Emergenz Kooperations-kordinierender Kommunikation

Durch die Auswertung der vom Simulationsprogramm mitprotokollierten (sehr umfangreichen) Agentenkommunikationen mittels hierzu erstellter Analyseprogramme konnte gezeigt werden, dass unter den modellierten Bedingungen doppelter Kontingenz Agentenpopulationen tatsächlich ein Symbolisierungsverfahren entwickeln können, das zur kooperativen Verhaltenskoordination verwendbar ist.

Unsere bisherige Modellierung ermöglichte Simulationsläufe, mit denen sich zeigen ließ, dass – solange die Agentenanzahl klein gehalten wurde (im hier dargestellten Beispiel bei einer extern gesetzten Obergrenze von neun Agenten) – die Emergenz eines effizienten Symbolgebrauchs nach wenigen tausend Spielen auftritt. In Abhängigkeit von dem jeweiligen Typ des Agenten und dem Vorliegen bereits geleisteter Kooperationsteilbeiträge erfolgt situationsspezifisch ein konsistenter Gebrauch von Symbolen, der koordiniertes Anschlussverhalten von Kooperationspartnern zulässt:

Abbildung 4 und 5 zeigen zunächst die Ausbreitung und den zeitweiligen Zusammenbruch von Kooperation in einer Agentenpopulation mit variierender Agentenanzahl.

Abbildung 4

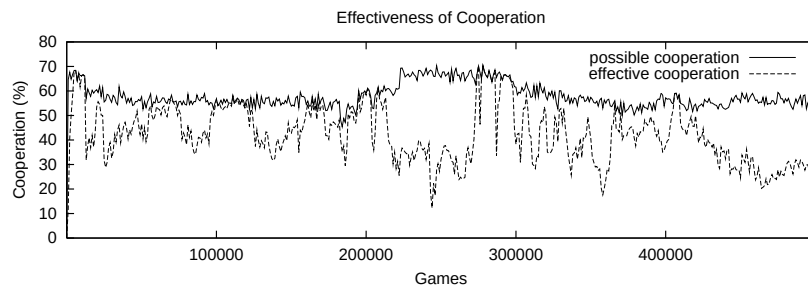
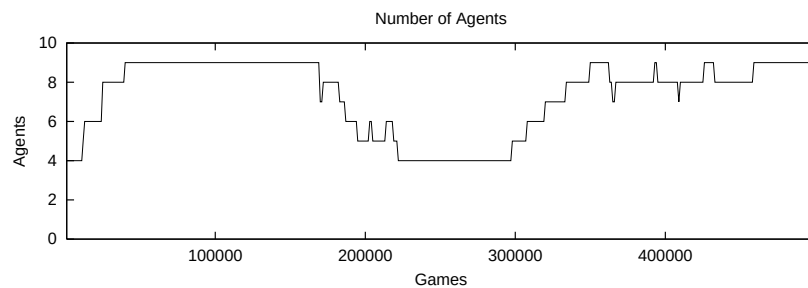


Abbildung 5



Eine Startpopulation von zunächst nur vier Agenten lernt zu kooperieren und nutzt die möglichen Kooperationschancen zunächst (im Verlauf der ersten 20.000 Spiele) sehr effektiv aus. Der Kooperationserfolg ermöglicht die Reproduktion, die zu einem Anwachsen der Population bis auf neun Agenten führt. Dabei bricht die Kooperation immer wieder zusammen, da die neu hinzugekommenen Agenten zunächst den Symbolgebrauch der ursprünglich effektiv kooperierenden Startpopulation erlernen müssen. Insgesamt reagiert die Agentenpopulation sehr empfindlich auf neue Agenten: Da immer wieder Agenten aus „Altersgründen“ ausscheiden und durch neue Agenten ersetzt werden, werden während der sich so ergebenden Lernphasen nicht alle Kooperationschancen genutzt.

Zur Koordination ihres Verhaltens verwenden die Agenten Symbole, die – bei funktionierender Kooperation – in typischen Sequenzen auftreten. In unserem Beispiel wurde nach 140.000 Spielen eine Stichprobe aus 2000 Spielen analysiert, das Ergebnis zeigt Abbildung 6:

Abbildung 6

Pos.	Freq.	(%)	Sequence:
1	302	29.6	Pi001o111x000 Hi111o001x000 Pi001o110x011 Hi110x100
2	287	28.1	Pi001o100x000 Hi100o100x000 Pi100o010x011 Hi010x100
3	161	15.7	Hi111o001x000 Pi001o010x011 Hi010x100
4	153	15.0	Hi111o001x000 Pi001o110x011 Hi110x100
5	35	3.4	Hi011o001x000 Pi001o111x000 Hi111o001x000 Pi001o110x011 Hi110x100
6	16	1.5	Hi000o100x000 Pi100o001x000 Hi001o010x100 Pi010o010x011 Hi010x111
7	15	1.4	Hi100o001x000 Pi001o001x000 Hi001x100
8	6	0.6	Hi000o001x000 Pi001o101x011 Hi101x100
9	5	0.5	Hi101o101x000 Pi101o101x011 Hi101x100
10	2	0.2	Hi100a001x000 Pi001o101x011 Hi101x100

Gezeigt werden relative Häufigkeiten von Kommunikationssequenzen (in einer Stichprobe von 2000 Spielen) die zur Kooperation führen. *P* und *H* bezeichnen den Typ des Agenten (*Planter*, *Harvester*). Der vom Agenten wahrgenommenen Kommunikation ist ein *i* vorangestellt, der von ihm ausgesandten Kommunikation ein *o*. Die vom Agenten selektierte Aktion ist mit einem *x* codiert: *Pflanzen* = *x011*, *Ernten* = *x100*, *Passiv* = *x000*.

Wie man sieht, werden über 88% der funktionierenden Kooperationen über vier typische Sequenzen koordiniert, wobei – in Abhängigkeit vom Typ des beginnenden Agenten – jeweils zwei funktionierende Sequenzen koexistieren. Wie man bei den ersten beiden Sequenzen sieht, wird stets zuerst kommuniziert ohne (teures) umweltmanipulatives Verhalten zu zeigen (codiert durch die Null-Aktion *x000*). Erst wenn der Interaktionspartner sich durch ein „bekanntes“ Symbol als potentieller Kooperationskandidat identifiziert hat, wird von dem ersten Agenten dessen Kooperationsbeitrag erbracht und diese Aktion von einem spezifischen Symbol begleitet. Dieses wiederum signalisiert dem zweiten Agenten, dass der erste Kommunikationsbeitrag erbracht wurde und hat zur Folge, dass erst jetzt der zweite Agent seinen Kooperationsbeitrag leistet.

Die Zusammensetzung der zur Verhaltenskoordination verwendeten Sequenzen unterliegt teilweise sehr starken Schwankungen: Insbesondere bei einer hohen Fluktuation von Agenten in kleinen Populationen werden zuvor funktionierende Sequenzen nach nur wenigen tausend Spielen durch ebenso funktionale, jedoch anders zusammengesetzte Sequenzen ersetzt.

Bei unseren bisherigen Versuchen mit einfachen Q-Learning Modellen ließ sich ein Trend zur Abnahme der Diversität von funktionierenden Kooperationssequenzen bei Erreichen der Populations-Obergrenze feststellen: Wie die Abbildungen oben zeigen, reduziert sich in unserem Simulationsbeispiel mit fortschreitender Simulation die Anzahl erfolgreicher Sequenzen auf einige wenige dominante Sequenzen. Dabei müssen nicht notwendigerweise Sequenzen, die zu Beginn der Simulation eine dominante Häufigkeit aufwiesen, zu späteren Zeitpunkten noch im „Repertoire“ der Agenten vertreten sein.

Als ausschlaggebend für das Zustandekommen effizienter und stabiler prä-kooperativer Kommunikation haben sich die folgenden Parameter erwiesen:

- (1) *Agentenanzahl*: Bei sehr kleinen Populationen (2-4 Agenten) ist unter den gegebenen kognitiven Randbedingungen die Emergenz von stabilem, invarianten Symbolgebrauch bei maximaler Ausnutzung von Kooperationschancen die Regel. Beginnt jedoch die Population auf Grund des Erfolges einer kleinen, gut kooperierenden Agentengruppe zu wachsen, so nimmt die Konsistenz des Zeichengebrauchs rapide ab, es wird zunehmend weniger effizient kooperiert und die Populationsgröße beginnt stark zu schwanken. Hohe Reproduktionsraten der Agenten führen in diesem Fall zu stark oszillierenden Agentenpopulationen. Auch konnte beobachtet werden, dass mit zunehmender Größe der Startpopulation der Zeitbedarf bis zur Durchsetzung von Kooperation stark zunimmt. Unsere bisherigen Forschungsergebnisse werden auch durch Forschungen im sog. „Talking Head Project“ (Steels 1999) insofern bestätigt, als die Selbstorganisation eines gemeinsamen Symbolsystems in einer Population von künstlichen Agenten nur dann gelingen kann, wenn die Fluktuation von Agenten gering ist und die Populationsgröße nicht beliebig ansteigt.
- (2) *Relative Aktionskosten*: Die relativen Kosten von umweltmanipulativem Verhalten (als „risikoreicher Kooperationsbeitrag“) und Kommunikationskosten (die meist um den Faktor 2-4 geringer angesetzt wurden) in Bezug auf den Kooperations-Payoff haben entscheidenden Einfluss auf die Entstehungsmöglichkeit präkooperativer Kommunikation: Nur bei relativ hohen Aktionskosten konnten wir beobachten, dass die Kommunikation zunächst der Typidentifizierung des Kooperationspartners diene, ohne dass dabei bereits eine (risikoreiche) Kooperationsvorleistung erbracht wurde. Sind hingegen die Aktionskosten – verglichen mit dem Kooperations-Payoff – relativ gering oder gleichwertig, erfolgt keine regelhafte Kommunikation. In diesem Fall zeigen die Agenten wahllos typspezifisches umweltmanipulatives Verhalten, das – auf Grund des nahezu gleichen Anteils beider Agententypen – bei fortgesetzter Interaktion mit nahezu 50% Wahrscheinlichkeit zum Erfolg führt.
- (3) *Notwendigkeit von Informationsdefizit*: Regelmäßiger Zeichengebrauch konnte nur dann beobachtet werden, wenn die Agenten auf die „Interpretation“ von Kommunikation zur Selektion eigenen Verhaltens angewiesen waren. Sobald es ihnen möglich war, ohne Interaktion mit anderen Agenten den jeweiligen Umweltzustand (das Vorliegen von Pflanzverhalten durch andere Agenten) festzustellen, trat verhaltenskoordinierende Kommunikation nicht mehr auf. Somit kann als Emergenzbedingung klar die Notwendigkeit eines „Informationsdefizits“ identifiziert werden, das sich ausschließlich durch die Orientierung an regelhaftem Verhalten anderer Interaktionspartner ausgleichen lässt.

Unter dem systemtheoretischen Bezug der Asymmetrisierungsnotwendigkeit von selbstreferentieller Kommunikation ist dieses Ergebnis interessant:

Während Asymmetrisierung in der systemtheoretischen Literatur bislang fast nur als Mittel zur Verhinderung tautologischer Selbstreferenz in Kommunikationsprozessen beschrieben wurde, wird hier deutlich erkennbar, dass bereits die Selbstorganisation von verhaltenskoordinierendem Zeichengebrauch (als Vorstufe von Systememergenz) die Asymmetrisierungsnotwendigkeit von Kommunikation voraussetzt. Asymmetrisierung als kommunikative Informationsgenerierung ist insofern nicht nur eine Folge des Operierens von Systemen, sondern bereits als informationsgenerierende Operation eine Bedingung der Systememergenz.

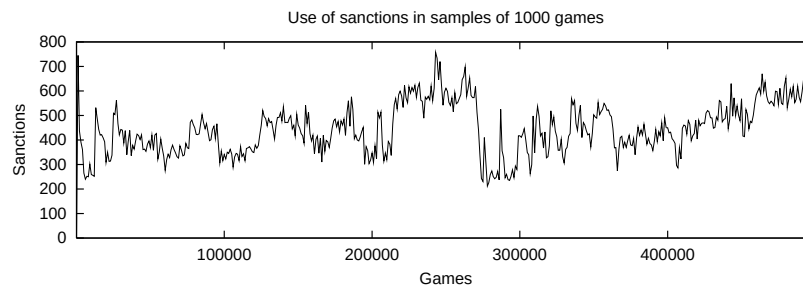
Noch keine Medienevolution

Obwohl die Emergenz von Zeichengebrauch mit Koordinationsfunktion nachweisbar ist, ist ein Symbolgebrauch mit der Funktion generalisierter Medien im bisherigen Modell nicht feststellbar. Zwar ließ sich der zu erwartende Effekt beobachten, dass mit dem Hinzukommen neuer Agenten die Sanktionshäufigkeit ansteigt und nach deren „Sozialisation“ wieder abnimmt. Es war dabei jedoch nicht erkennbar, dass ältere, bereits „sozialisierte“ Agenten Sanktionsverhalten zeigen, um in der Interaktion mit neuen Agenten Kooperation herbeizuführen. Statt dessen brachen ältere Agenten regelmäßig die Interaktion ab (oder suchten sich einen neuen Interaktionspartner) sobald sie mit Symbolen konfrontiert wurden, die im Kontext der „etablierten“ Kommunikationssequenzen nicht anschlussfähig waren. Sanktionsverhalten zeigten überwiegend neue Agenten, die dessen „teure Nutzlosigkeit“ noch nicht erlernt hatten.

Eine gehäufte Ausübung von Sanktionsverhalten von „alten“ Agenten trat vor allem dann auf, wenn etablierte Symbolsequenzen von anderen abgelöst werden. In diesen Situationen aktualisieren auch alte Agenten Zustände, deren Q -Werte noch die anfängliche Zufallsinitialisierung aufweisen. Die Agenten identifizieren dabei „neue“ Situationen, für die noch keine bewährten – Kosten vermeidenden – Verhaltensselektionen existieren. Auch wenn angepasste Agenten erfolgreiche Kommunikationssequenzen beherrschen, selektieren sie gelegentlich (auf Grund des ϵ -Greedy Selektionsverfahrens) Verhaltensweisen, die auf Grund ihrer Q -Werte nicht die maximale Wahrscheinlichkeit besitzen.

Aus den genannten Gründen blieb in allen unseren Experimenten stets ein relativ hoher Anteil von Sanktionsverhalten erhalten, der sich nur durch überproportional hohe Kosten (für den ausführenden Agenten) reduzieren ließ:

Abbildung 7



Auf Grund der Simulationsergebnisse vermuten wir, dass die Ursache für das bisherige Ausbleiben von Medienfunktionalität zum Einen in der Modellierung der Kooperationserfordernis, zum Anderen in den noch ungenügenden kognitiven Fähigkeiten der Agenten zu suchen ist:

- (1) In der bisherigen Modellierung des Kooperationserfordernisses verfügen die Agenten über zu wenig „Anreize“, um Kooperation beim Vorhandensein komplementärer Partner zu erzwingen. Beim Auftreten von Kommunikationen, die nicht Bestandteil der etablierten und erfolgreichen Kooperationssequenzen waren, selektierten die Agenten in aller Regel die Verhaltensoption „Exit“ und beendeten damit die Interaktion. Dieses Verhalten ist tatsächlich risikoärmer als der Versuch, den anderen Agenten durch Kommunikation oder Sanktion zur Änderung seines Verhaltens zu bewegen und bestätigt damit die risikovermindernde Funktion von Kommunikation. Die „Exit“-Option kann jedoch nicht aus der Modellierung entfernt werden, da diese im Falle einer Paarung nicht komplementärer Agenten (die aus Sicht eines Agenten immerhin mit einer Wahrscheinlichkeit von rund 50% auftritt) eine sinnvolle und unverzichtbare Verhaltensoption darstellt.
- (2) Die modellierten Lernfähigkeiten der Agenten erlauben zwar die Anwendung von Sanktionsverhalten zur Verminderung nicht anschließbaren Verhaltens; die Verknüpfung von Zeichen und Sanktionen zu situationsinvariant anwendbaren Symbolen mit der Funktionalität generalisierter Medien ist in der bisher verwendeten Konfiguration jedoch nicht möglich. Diese Fähigkeit war in der bisherigen Modellierung nicht angelegt, da hier primär die Fähigkeit zur Selbstorganisation von Kommunikation unter Bedingungen doppelter Kontingenz getestet werden sollte. Die Etablierung von Symbolen mit Medienfunktionalität setzt hingegen anspruchsvollere kognitive Fähigkeiten voraus, die als solche bisher nicht explizit Gegenstand soziologischer Fragestellungen waren bzw. als Grundlage menschlichen Sozialverhaltens als gegeben vorausgesetzt wurden.

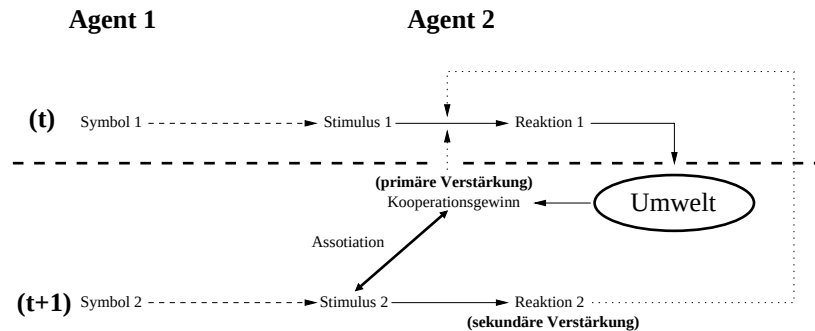
Neben der Beschleunigung von Kooperation durch die Modellierung der Symbolisierbarkeit von Sanktionspotenzial sollte mit den bisherigen Simulationsstudien auch untersucht werden, inwieweit sich mit emergierten Symbolisierungsverfahren anspruchsvollere sequenzielle Kooperation erreichen lässt. Die bisherigen Versuche haben gezeigt, dass mit den von uns modellierten Bedingungen doppelter Kontingenz die Selbstorganisation eines solchen Zeichengebrauchs mit verhaltenskoordinierender Wirkung grundsätzlich möglich ist. Jedoch ist es uns bisher noch nicht gelungen, unter diesen Prämissen die Lösung von Kooperationsaufgaben herbeizuführen, die mehr als drei koordiniert erbrachte Einzelleistungen erforderten. Da die Lösung realer Anwendungsprobleme jedoch deutlich komplexere sequenzielle Kooperationschritte voraussetzt, ist eine entsprechende Anpassung der kognitiven Agentenfähigkeiten erforderlich.

Wir haben als Ursache der bisherigen Schwierigkeit zwei Teilprobleme (Komplexitäts- und Sequenzierungsproblem) unterschieden, die durch die Modellierung zweier Konzepte aus der Kognitions- und Lerntheorie behoben werden sollen.

Erforderliche Erweiterungen des bisherigen Kognitionsmodells

Als Hauptursache der Schwierigkeiten mit längeren Kooperationssequenzen wurde von uns die einmalige, sehr spät erfolgende „Belohnung“ durch den Kooperationserfolg identifiziert. Das Problem kann jedoch dadurch gelöst werden, dass die Verstärkung von Lernleistungen nicht erst am Ende einer Sequenz, sondern mehrfach nach der Erbringung von Kooperationsteilleistungen erfolgt. Würde man die Verstärkungsbedingungen solcher koordiniert erbrachten Teilleistungen jedoch a priori bei der Modellierung festlegen, müsste eine mögliche – möglichst effiziente – Gliederung des Problemlösungsverfahrens bereits bekannt sein. Da jedoch das Problem durch die selbständige Strukturdifferenzierung der Agentenkooperation (durch generalisierten Medien) gelöst werden soll, scheidet diese Option aus. Sinnvoller hingegen ist es, den Agenten die Möglichkeit zu geben, sich selbst auf *kommunikativem* Wege für anschlussfähiges Verhalten zu „belohnen“. Ein solches Verfahren entspräche dem Grundansatz des Projektes, wonach die Problemlösungskompetenz der Agentenpopulation primär durch die Emergenz eines verhaltenskoordinierenden Kommunikationssystems definiert wird.

Abbildung 8



Sekundäre Verstärker

Eine Beschreibung der kognitiven Voraussetzungen für derart einfach wirkende Selbststabilisierungsmechanismen finden sich in der psychologischen Lerntheorie in Form von „operanter Konditionierbarkeit“ in Verbindung mit „sekundären Verstärkern“.⁵ „Operante Konditionierbarkeit“ bezeichnet dabei die Lernfähigkeit von *Ego*, auf von *Alter* selektiv präsentierte Reize selektiv zu reagieren, wobei *Alter* diesen Lernprozess mit *unmittelbar* wirksamen Verstärkungen steuert (z.B. bei Pawlows Hundeexperiment). Handelt es sich bei den Verstärkungsreizen um Reize, deren Verstärkungswert erst gelernt werden muss (z.B. Kommunikation), so spricht man hier von „sekundären Verstärkern“.

In Form von häufig nur unbewusst wahrgenommenen Signalen (der Gestik, Mimik, Intonation bis hin zu expliziter Kommunikation) begleiten sie Kommunikation – wobei es prinzipiell gleichgültig ist, in welchem Kontext und zu welchem Zweck kommuniziert wird. Wichtig ist, dass sie von thematisch gebundener Kommunikation unterschieden werden können und auf diese bezogen ausgewertet werden. Für sprachliche sekundäre Verstärker gilt, dass sie selbst und ihre Anwendung individuell erlernt werden müssen und (als Symbol) kulturspezifisch sind – obwohl ihre Funktion (der Selektionsverstärkung) kulturinvariant erforderlich ist. Typische Beispiele sind Lob, Akzeptanz und Tadel, die Kommunikation begleiten und den Interaktionspartnern Hinweise auf die Akzeptanz ihres (Kommunikations-) Verhaltens geben.

5 Das Konzept des operanten Konditionierens hat seine Wurzeln in der behavioristischen Lerntheorie (Skinner 1938) und findet in der funktional-strukturellen Systemtheorie keine explizite Anwendung. Obwohl es mittlerweile – weil zu unterkomplex – für die Erklärung von menschlichem Sozialverhalten und Sozialisationsprozessen nicht mehr herangezogen wird, eignet es sich jedoch auf Grund seiner Vereinbarkeit mit konstruktivistischen Kognitionsprämissen zur Modellierung von Lernprozessen in Agentenpopulationen.

Modellierung sekundärer Verstärker

Die bisherigen Versuche der Modellierung sekundärer Verstärker sind Erfolg versprechend: Anders als bei den einfachen Reiz-Reaktionsmechanismen der ersten Modellierungsphase können die Agenten nun Erwartungen bilden und an diesen ihr Kommunikationsverhalten ausrichten: Wie im ersten Modell lernen die Agenten zunächst durch Versuch und Irrtum, anhand ihres zunächst zufällig gewählten Kommunikationsverhaltens ihr Kooperationsverhalten zu koordinieren. Zufällig gefundene, aber bewährte Reiz-Reaktions-Folgen werden durch den Kooperationserfolg verstärkt und steigern so die Verbreitung einer „Semantik“ in der Gesamtpopulation. Zusätzlich werden nun nach einem Kommunikationssignal nicht nur Anschlusskommunikation und Kooperationsverhalten ausgewählt, sondern gleichzeitig *Erwartungen* an das Kommunikationsverhalten des jeweils Anderen selektiert, die durch „Erinnerung“ an zuvor erfolgreich verlaufene Kooperation mit anderen Agenten entstanden sind: Immer wenn ein „Spiel“ erfolgreich endet, „merken“ sich die Agenten die „Antworten“ des jeweils Anderen auf die eigene Kommunikation und wählen diese um so wahrscheinlicher als „Erwartungen“ in späteren – gleichartigen – Situationen aus, je häufiger eine bestimmte „Antwort“ auf einen selbst gegebenen Kommunikationsreiz erfolgte.

Diese Erwartungen bilden die Grundlage für die Selektion von Kommunikationsverhalten, das auf einem gesonderten „Kanal“ die Funktion sekundärer Verstärker übernimmt: Immer wenn eine Erwartung nicht eintrifft, sendet der „enttäuschte“ Agent (*Ego*) ein bestimmtes Zeichen (einen negativen sekundären Verstärker) auf diesem „SV-Kanal“ und symbolisiert so die Nichtakzeptanz einer Kommunikationsselektion. *Alter* kann nun mit eigenen Verhaltensmodifikationen auf das SV-Signal reagieren oder dieses zurückweisen, indem er selbst ein negatives SV-Signal sendet.

An dieser Stelle beginnt nun ein Regelungsmechanismus zu greifen, den wir ad hoc und ohne „theoretische Rückendeckung“ entwickelt haben, der aber vor dem Hintergrund von Alltagserfahrung zumindest teilweise plausibel erscheint: Die Agenten können *ungeduldig* werden! Ungeduld bedeutet in diesem Zusammenhang, dass nach einer bestimmten Anzahl von zurückgewiesenen SV's die Agenten zusätzlich Sanktionsverhalten selektieren. Dieses ist relativ „energieaufwändig“, verursacht aber beim „betroffenen“ Agenten einen noch höheren „Energieschwund“. Mit sich verringerndem Energieniveau steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Agent (*Alter*) „nachgibt“ und den negativen SV akzeptiert, er begibt sich dann in den von uns so genannten „Schülermodus“: Dies bedeutet, dass er dem anderen Agenten (*Ego*) ein positiven SV sendet, woraufhin dieser zunächst sein Sanktionsverhalten einstellt. Gleichzeitig modifiziert *Alter* sein Kommunikationsverhalten so lange, bis dieses den Erwartungen von *Ego* entspricht. Ist dies der Fall, sendet *Ego* einen positiven SV und verstärkt so bei *Alter* eine bestimmte (von *Ego* erwartete) Reaktion auf einen von *Ego* gegebenen Reiz.

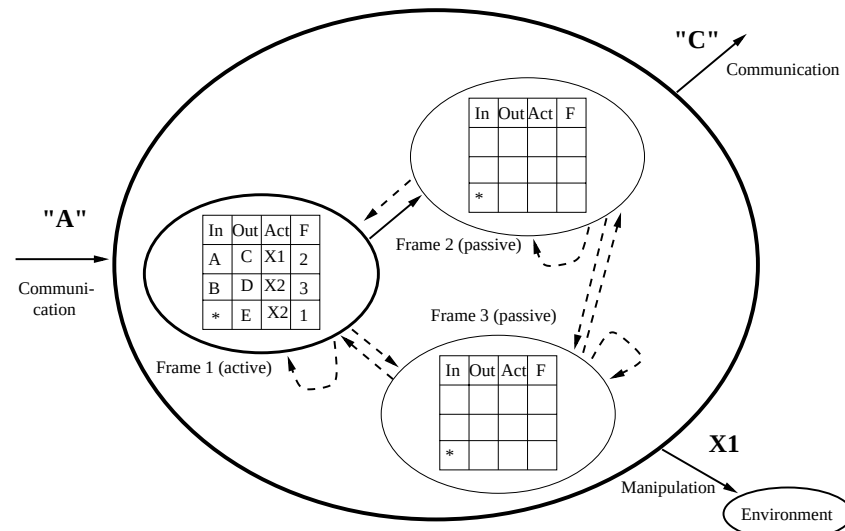
Besonders wichtig bei diesem Modellierungsansatz sekundärer Verstärker ist der *Asymmetrisierungsaspekt*, d.h. die Rückbindung an funktionierende Kooperation: Nur solche Agenten können wiederholt negative SV's ignorieren und sich auf Sanktionen einlassen, die in zuvor erfolgreicher Kommunikation mit anderen Agenten von ihrer Kooperations-Kompetenz profitiert haben und infolge dessen über relativ hohe Energiereserven verfügen.

Die Organisation von Anschlussselektionen durch Situations-Rahmungen

Die bisherigen Lernmöglichkeiten der Agenten wurden u.a. dadurch behindert, dass mit der Erweiterung von kommunikativen Kodierungsmöglichkeiten und der Erhöhung der Komplexität der Kooperationsaufgabe die Kombinationsmöglichkeiten von Kommunikation und umweltmanipulativem Verhalten exponentiell anstiegen – entsprechend verringerten sich die Chancen, dass koordiniertes Verhalten erlernt werden konnte.

Erste Versuche, Verhaltens- und Kommunikationsschemata situationsangepasst in sogenannten „Rahmen“ zu organisieren, stellen eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit dieses Problems in Aussicht. Das Grundprinzip dieses Ansatzes besteht darin, die Fülle der ursprünglichen Kombinationsmöglichkeiten zwischen Kommunikation und Verhalten durch ihre Aufteilung in situationsspezifisch angepasste Teilmengen („Rahmen“) zu verringern (Abbildung 9). In Abhängigkeit von einem durch die jeweilige Kooperationssituation definierten „Kontext“ selektieren die Agenten einen solchen „Rahmen“, innerhalb dessen nur noch eine stark verkleinerte Anzahl von Reaktionsmöglichkeiten auf unterschiedliche Kommunikationen zur Verfügung steht. Wird innerhalb eines solchen Rahmens eine Reaktion selektiert, so besteht diese – wie bisher – aus kommunikativem und umweltmanipulierendem Anschlussverhalten, aber zusätzlich auch aus der Selektion des im folgenden Interaktionsschritt zu verwendenden Rahmens, innerhalb dessen das Anschlussverhalten der nächstfolgenden Interaktion selektiert werden kann. Sollte ein Agent Kommunikation wahrnehmen, an die er innerhalb des von ihm aktuell verwendeten Rahmens nicht anschließen kann, können auch Rahmen selektiert werden, die eine Lösung des Kommunikationsproblems – dann evtl. durch den gezielten Einsatz generalisierter Medien oder entsprechenden Sanktionsverhaltens – ermöglichen.

Abbildung 9



Das Rahmungskonzept (Minsky 1975), das in unterschiedlichen Varianten in der Kognitionswissenschaft, der Computerlinguistik aber auch der Soziologie (Goffman 1974) entwickelt wurde, wird für unser Projekt auch deshalb interessant, da sich ihm möglicherweise Hinweise für eine Operationalisierung des im systemtheoretischen Kontext zentralen Sinnbegriffs entnehmen lassen: Dort wird in phänomenologischen Definitionen „Sinn“ als Verweishorizont von Bedeutungen und kommunikativen Anschlussmöglichkeiten beschrieben, die in Abhängigkeit vom wahrgenommenen Situationskontext selektiv realisiert werden (Baraldi et al. 1998). Aus subjektiver Perspektive wird Sinn als „Überschuss von Verweisungen auf weitere Möglichkeiten des Erlebens und Handelns“ (Luhmann 1984) wahrgenommen. Das bei uns in stark vereinfachter Form modellierte Rahmungskonzept kommt dieser Definition in funktionaler (nicht phänomenologischer) Hinsicht nahe. Vergleichbares trifft auf den Erwartungsbegriff zu, der hier in Hinblick auf die Anschließbarkeit von Kommunikation und situationspezifisch funktionalem Verhalten operationalisiert ist.

Die bisherigen Ergebnisse unserer Versuchsimplementationen des Rahmungskonzeptes sind vielversprechend: Wurde der Inhalt solcher Rahmen beim Populationswachstum an die „Nachkommen“ übertragen (ganz im Sinne genetischer Algorithmen), so dass deren individuelle Lernleistung nur noch in der situationsangepassten Selektion funktionaler Rahmen bestand, ergaben sich konstant hohe Kooperationsraten auch in sehr großen Populationen (mit bis zu 10.000 Agenten). Dadurch, dass in diesen Versuchen die

Agenten ihre Umwelt (den „Pflanzzustand“) direkt wahrnehmen konnten, entstand im Einklang mit den bereits zuvor gewonnenen Erkenntnissen (siehe oben) jedoch keine präkooperative Kommunikation.

Generalisierte Medien = SV + Mobilisierung Dritter?

Das genannte Modellierungsbeispiel selbstreferentieller Kommunikation über sekundäre Verstärker ist zwar illustrativ, hat aber noch erhebliche Mängel in Hinblick auf die Modellierung generalisierter Medien:

- (1) *Einbeziehbarkeit von Kooperationsnetzwerken*: Bisher können die Agenten nur in Dyaden kooperieren, d.h. eine Einbeziehung Dritter – z.B. zur gemeinsamen Anwendung von Sanktionen oder der Verteilung von Teilaufgaben – ist noch nicht möglich. Eine tatsächliche Modellierung der Funktion generalisierter Medien setzt dies aber voraus, da hier die Durchsetzung von Symbolvalidität von der bei Bedarf möglichen Kooperation Dritter abhängt.
- (2) *Emergente Semantik bei SV's*: Während sich (in unseren bisherigen Versuchen) die Emergenz von Semantik im Bereich der *koordinativen* Kommunikation gut demonstrieren lässt, ist bei der SV-Modellierung die Semantik der sekundären Verstärker bisher vorgegeben und invariant. Ob mit den bisher modellierten einfachen Lernverfahren hier ebenfalls eine Symbolemergenz – parallel zur Koordinationskommunikation – möglich ist, bleibt abzuwarten.

Letztlich wird von einer erfolgreichen Modellierung generalisierter Medien erst dann die Rede sein können, wenn die beiden genannten Punkte in einem Modell umgesetzt werden können. Erst wenn sich beobachten lässt, dass Agenten

- mit einem populationsweit gemeinsam verwendeten, emergenten SV-Symbol Kooperation motivieren und, wenn dies erfolglos bleibt
- gezielt das Sanktionsverhalten Dritter mobilisieren, um sowohl Kooperation als auch die Symbolvalidität sicherzustellen,

kann u.U. von einer gelungenen Medien-Modellierung gesprochen werden. Möglicherweise kann von einem emergenten autopoietischen Kommunikationssystem dann gesprochen werden, wenn es den Agenten gelingt, mit Hilfe sekundärer Verstärker nicht nur Verhaltenskoordination durchzusetzen, sondern gleichzeitig mit Hilfe sekundärer Verstärker die gezielte Anwendung sekundärer Verstärker zu konditionieren.

Literatur

- Axelrod, R. (1995): *Die Evolution der Kooperation*, München: Oldenbourg.
 Axelrod, R. (1997): *The Complexity of Cooperation: Agent-based Models of Competition and Collaboration*, Princeton, NJ. Princeton Univ. Press.

- Bachmann, R. (1998): Kooperation, Vertrauen und Macht in Systemen verteilter künstlicher Intelligenz. In: Malsch, T. (Hrsg.), *Sozionik. Soziologische Ansichten ueber künstliche Sozialität*. Berlin. Edition Sigma, S. 197-234.
- Baraldi, C. et al. (1998): *GLU. Glossar zu Niklas Luhmanns Theorie sozialer Systeme*. Frankfurt/Main. Suhrkamp.
- Barash, D. P. (1977): *Sociobiology and Behavior*. London. Hodder & Stoughton.
- Bartlett, F. C. (1932): *Remembering*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Boyd, R./P. J. Richerson (1985): *Culture and the Evolutionary Process*. Chicago. University of Chicago Press.
- Brodocz, A. (1998): Mächtige Kommunikation in Niklas Luhmanns Theorie sozialer Systeme. In: Imbusch, P. (Hrsg.): *Macht und Herrschaft: Sozialwissenschaftliche Konzeptionen und Theorien*. Opladen. Leske und Budrich, S. 183-197.
- Cavalli-Sforza, L. L./M. W. Feldman (1981): *Cultural Transmission and Evolution: A Quantitative Approach*. Princeton, N.J. Princeton Univ. Pr.
- Dawkins, R. (1978): *Das egoistische Gen*. Berlin. Spektrum.
- Dennett, D. C. (1991): *Consciousness Explained*. Boston. Penguin Pr.
- Durham, W. H. (1991): *Coevolution: Genes, Culture and Human Diversity*. Stanford. Stanford Univ. Press.
- Florian, M. (1998): Die Agentengesellschaft als sozialer Raum. Vorschläge zur Modellierung von Gesellschaft in VKI und Soziologie aus der Sicht des Habitus-Feld-Konzepts von Pierre Bourdieu. In: Malsch, T. (Hrsg.): *Sozionik. Soziologische Ansichten über künstliche Sozialität*. Berlin. Edition Sigma, S. 297-344.
- Giesen, B. (1980): *Makrosoziologie*, Hamburg. Hoffmann und Campe.
- Giesen, B. (1987): Media and Markets. In: Schmid, M./M. Wuketits (Hrsg.): *Evolutionary Theory in Social Science*. Dordrecht, Boston: Reidel Publishing Company, S. 171-194.
- Giesen, B. (1991): "Code, Process and Situation in Cultural Selection." *Cultural Dynamics* 4(2): S. 172-185.
- Giesen, B./K. Junge (1995): Strukturelle Evolution. In: *Protozoziologie* 7: S. 116-125.
- Giesen, B./K. Junge (1998): Strukturelle Evolution. In: Preyer, G. (Hrsg.): *Strukturelle Evolution und das Weltsystem. Theorien, Sozialstruktur und evolutionäre Entwicklungen*. Frankfurt/Main: Suhrkamp, S. 47-70.
- Glaserfeld, E. v. (1997): *Radikaler Konstruktivismus: Ideen, Ergebnisse, Probleme*, Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Goffman, E. (1974): *Frame Analysis. An Essay on the Organization of Experience*. Cambridge (Mass.): Harvard Univ. Pr.
- Gould, M. (1976): System Analysis, Macrosociology and the Generalized Media of Social Action. In: Loubser, J. J. et. al. (Hrsg.): *Explorations in General Theory in Social Science. Essays in Honour of Talcott Parsons*, New York. Free Press. S. 470-506.
- Hallpike, C. R. (1986): *The Principles of Social Evolution*, Oxford. Clarendon.
- Harris, M. (1987): *Cultural Anthropology*, New York.
- Hegselmann, R. (1996): Cellular automata in the social sciences: Perspectives, restrictions and artefacts. In: Hegselmann, R./U. Mueller/K. G. Troitzsch (Hrsg.): *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, S. 209-234.
- Hegselmann, R. (1996): Understanding Social Dynamics: The Cellular Automata Approach. In: Troitzsch, K. G./U. Mueller/N. Gilbert/J. E. Doran (Hrsg.): *Social Science Microsimulation*. Berlin: Springer, S. 283-306.

- Hejl, P. M. (1991): Soziale Systeme: Körper ohne Gehirne oder Gehirne ohne Körper? Rezeptionsprobleme der Theorie autopoietischer Systeme in den Sozialwissenschaften. In: Maturana, H./V. Riegas (Hrsg.): *Zur Biologie der Kognition. Ein Gespräch mit Humberto R. Maturana und Beiträge zur Diskussion seines Werkes*. Frankfurt/Main: Suhrkamp, S. 205-236.
- Johnson, H. (1973): Generalized Symbolic Media in Parsons Theory. In: *Sociology and social Research* 57: S. 208-221.
- Junge, K. (1993): Evolutionary Process in the Economy. In: Outhwaite, W./T. Bottomore (Hrsg.): *Social Thought. The Blackwell Dictionary of twentieth-Century*. Oxford: Blackwell Reference, S. 215-216.
- Künzler, J. (1989): *Medien und Gesellschaft. Die Medienkonzepte von Talcott Parsons, Jürgen Habermas und Niklas Luhmann*. Stuttgart: Enke.
- Luhmann, N. (1975): Einführende Bemerkungen zu einer Theorie symbolisch generalisierter Kommunikationsmedien. In: Luhmann, N.: *Soziologische Aufklärung 2*. Opladen: Westdeutscher, S. 170-192.
- Luhmann, N. (1975): *Macht*. Stuttgart: Enke.
- Luhmann, N. (1984): *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*, Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Luhmann, N. (1988): *Die Wirtschaft der Gesellschaft*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Luhmann, N. (1997): *Die Gesellschaft der Gesellschaft*, Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Maturana, H./F. G. Varela (1975): *Autopoietic Systems. A Characterization of the Living Organization*, Urbana.
- Maturana, H./F. G. Varela (1980): *Autopoiesis and Cognition*, Dordrecht/Boston: Reidel.
- Maturana, H. R. (1985): *Erkennen: Die Organisation und Verkörperung von Wirklichkeit*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- Maturana, H. R./F. J. Varela (1987): *Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln des menschlichen Erkennens*. Bern, München: Goldmann.
- Minsky, M. (1975): A Framework for Representing Knowledge. In: P. H. Winston (Hrsg.): *The Psychology of Computer Vision*. New York: McGraw-Hill, S. 211-279.
- Moritz, E. (1995): Metasystems, Memes and Cybernetic Immortality. In: Heylighen, F./C. Joslyn/V. Turchin (Hrsg.): *The Quantum of Evolution: Toward a Theory of Metasystem Transitions*. Gordon and Breach Science Publishers. S. 155-171.
- Münch, R. (1980): Über Parsons zu Weber: Von der Theorie der Rationalisierung zur Theorie der Interpenetration. In: *Zeitschrift für Soziologie*: S. 18-53.
- Münch, R. (1985): Die sprachlose Systemtheorie: Systemdifferenzierung, reflexives Recht, reflexive Selbststeuerung und Integration durch Indifferenz. Kommentar zu Gunther Teubner und Helmut Wollke. In: *Zeitschrift für Rechtssoziologie* 6(1): S. 19-28.
- Münch, R./N. J. Smelser (1987): Relating the Micro and Macro. In: Alexander, J./B. Giesen/R. Münch/N. J. Smelser (Hrsg.): *The Micro-Macro Link*, Berkeley: University of California Press, S. 356-387.
- Parsons, T. (1969): *Politics and Social Structure*. New York: Free Press.
- Piaget, J. (1974): *Biologie und Erkenntnis*, Frankfurt/Main: Fischer.
- Rammert, W. (1998): Giddens und die Gesellschaft der Einzelmännchen. Zur Soziologie technischer Agenten und Systeme Verteilter Künstlicher Intelligenz. In: Malsch, T. (Hrsg.): *Sozionik. Soziologische Ansichten über künstliche Sozialität*, Berlin: Sigma, S. 91-128.

- Schmid, M. (1982): *Theorie sozialen Wandels*. Opladen. Westdeutscher.
- Schmid, M. (1994): Zur Evolution von Regeln. Einige modelltheoretische Überlegungen. In: Reimann, H./H.-P. Müller (Hrsg.): *Probleme moderner Gesellschaften: Peter Atteslander zum 65. Geburtstag*. Opladen. Westdeutscher, S. 224-250.
- Schmid, M. (1995): Soziologische Evolutionstheorie. In: *Protosozilogie*: S. 200-210.
- Schmid, M. (1996): Das Problem der Normenentstehung. In: Gadenne, H. J. (Hrsg.): *Rationalität und Kritik*. Tübingen. Mohr, S. 151-182.
- Schmid, M. (1998): *Soziales Handeln und strukturelle Selektion. Beiträge zur Theorie sozialer Systeme*. Opladen. Westdeutscher.
- Schmid, M. (1998): Soziologische Evolutionstheorien. In: Preyer, G. (Hrsg.): *Strukturelle Evolution und das Weltsystem: Theorien, Sozialstruktur und evolutionäre Entwicklungen*. Frankfurt/Main. Suhrkamp, S. 387-426.
- Schnell, R. (1991): Computersimulation und Theoriebildung in den Sozialwissenschaften (1): In: Troitzsch, K. G./H. Esser (Hrsg.): *Modellierung sozialer Prozesse*. Bonn: Informationszentrum Sozialwissenschaften, S. 139-175.
- Schulz-Schaeffer, I./T. Malsch (1998): Das Koordinationsproblem künstlicher Agenten aus der Perspektive der Theorie symbolisch generalisierter Interaktionsmedien. In: Malsch, T. (Hrsg.): *Sozionik. Soziologische Ansichten ueber künstliche Sozialität*. Berlin. Sigma. S. 235-254.
- Skinner, B. F. (1938): *The behavior of organisms*. New York: Appleton.
- Skinner, B. F. (1953): *Science and human behavior*. New York: Macmillan.
- Steels, L. (1999): The Puzzle of Evolution. In: Kognitionswissenschaft, Vol. 8, No. 4.
- Sutton, R. S./A. G. Barto (1998): *Reinforcement Learning. An Introduction*. Cambridge MASS: MIT Press.
- Troitzsch, K. G. (1997): Social Science Simulation - Origins, Prospects, Purposes. In: Conte, R./R. Hegselmann/P. Terna (Hrsg.): *Simulating Social Phenomena*. Berlin. Springer. S. 41-54.
- Wilson, E. O. (1975): *Sociobiology. The New Synthesis*. Cambridge, Mass. Belknap Press.
- Young, H. P. (1998): *Individual Strategy and social Structure. An evolutionary Theory of Institutions*. Princeton. Princeton Univ. Press.
- Ziegler, R. (1997): The normative Structure of Solidarity and Inequality. In: *Rationality and Society* 9(4): S. 449-468.