

MANFRED FÜLLSACK

DIE ARBITRARITÄT DER ZEICHEN. ODER: WAS WIDERSPIEGELT EIN GLIDER? SIMULATIONEN UND DIE UNTERSCHIEDUNG VON BEOBACHTETEM UND EIGEN-VERHALTEN KOMPLEXER SYSTEME

EINLEITUNG

Neben vielen anderen Einsichten verdanken wir Heinz von Foerster die Aufmerksamkeit für zwei zentrale Aspekte in der Theorie komplexer Systeme: zum einen für das Eigenverhalten („Eigenbehavior“ oder auch „Eigenlogik“) von Systemen (u.a. 1993a), und zum anderen für die Beobachterabhängigkeit von Ordnung (u.a. 1993b). Während die Eigenlogik auf ein Verhalten aggregierter Dynamiken hinweist, das gleichsam *per se*, selbst-organisiert und damit nicht „von außen“ oder „von oben“ gesteuert, eine bestimmte Regelmäßigkeit, einen „*steady state*“ entwickelt, der schließlich als (zumindest temporär) stabil betrachtet werden kann und damit gegenüber weniger stabilen Gegebenheiten zu einem „Gegenstand“, einem „*object*“ wird, betont von Foersters Beobachterabhängigkeit die prinzipielle Konstruiertheit jeglicher Ordnung, also den Umstand, dass was immer als „*steady state*“ und damit als „Gegenstand“ erscheint, erst für einen Beobachter anhand seiner je eigenen (und unter Umständen auch hoch-spezifischen) Beobachtungsmöglichkeiten zu einem solchen wird.

Wenn wir Zweiteres ernst nehmen, so ließe sich ersteres, also das Eigenverhalten von Systemen gar nicht beobachterunabhängig feststellen. Es wäre genaugenommen gar nicht „eigen“, und damit also nicht wirklich selbst-organisiert.

Was wie ein Widerspruch in der von-Foersterschen Konzeption wirkt, markiert eine erkenntnistheoretische Grundproblematik. Zum einen macht es Sinn, insbesondere komplexe Phänomene, die interessantes (und das heißt nicht-triviales, also nicht ohnehin erwartetes) Verhalten zeigen, analytisch „vor sich“ zu bringen, sie also positivistisch zu einem Untersuchungsgegenstand zu machen, dessen Verhalten „an sich“ untersucht wird, um eben seine Eigenlogik zu erschließen. Zum anderen können wir heute aber auch wissen, dass dieser Positivismus insbesondere in komplexeren Zusammenhängen (Quantenphysik, soziale Systeme etc.) Grenzen hat, die dort beginnen, wo der Beobachter das Beobachtete durch seine Beobachtung beeinflusst. Das Beobachtete zu beeinflussen impliziert, es mit den Erwartungen, Werten, Interessen, kurz den Wahrnehmungsbedingungen des Beobachters aufzuladen, es also eben nicht mehr objektiv zu betrachten. Und dies verursacht, wie wir wissen, nicht selten höchst diskutabile wissenschaftliche Einschätzungen.

Eine Möglichkeit, dieser Problematik zumindest bewusst zu begegnen, wenn nicht sie zu lösen, könnte in bestimmten Zusammenhängen die Computer-basierte Simulation bieten. Insbesondere Phänomenbereiche, aus denen es naturgemäß kaum gelingt, uns auszunehmen, ihr Eigenverhalten also von unseren Interpretationen zu trennen, weil

wir in sie - wie im Fall der im folgenden näher betrachteten Kommunikation – unvermeidbar involviert sind, könnte der Versuch, sie zu simulieren und damit gleichsam objektiv, weil eben „nur“ in Form eines Computermodells zu betrachten, Einsichten ermöglichen, die sich in herkömmlicher Weise nicht ergeben. Die Reduktion auf die Aktivitäten eines Rechners, dem – bisher zumindest - keinerlei Intentionen, geschweige denn subjektive Interessen unterstellt werden, entbindet gleichsam vom Involvement und den damit verbundenen Interpretationen. Das Eigenverhalten der Rechneraktivitäten, des Modells also, ließe dann bis zu einem gewissen Grad¹ auf jene „*In-form*-ationen“ (siehe dazu unten) rückschließen, die der Beobachter dem Beobachteten hinzufügt.

Die folgenden Ausführungen werden, nach einer kurzen einleitenden Verdeutlichung der Unterscheidung von beobachtetem und Eigen-Verhalten, versuchen, dies anhand eines Multi-Agenten-Modells zu zeigen, das den Prozess der „Konvention“, das heißt des interaktiven Übereinkommensprozesses simuliert, in dem sich Akteure „einigen“, bestimmte Zeichen in der Kommunikation zu verwenden. Gleichzeitig soll dabei die Annahme problematisiert werden, dass Kommunikation wahrscheinlicher wird, wenn in ihr Zeichen Verwendung finden, die das von ihnen Bezeichnete „widerspiegeln“ (Vgl. dazu den Beitrag von Peter Fleissner in diesem Band).

EIGENVERHALTEN UND BEOBACHTER

Um zunächst die potentielle Bedeutung der Unterscheidung von beobachtetem und Eigen-Verhalten zu verdeutlichen, sei hier kurz ein einfacher Genetischer Algorithmus betrachtet, der (am Computer generierte) Ressourcen vorsieht, anhand deren sich eine Population von (ebenfalls am Computer simulierten) Organismen (Agenten) reproduziert. Die Ressourcen treten dabei nicht gleichverteilt auf, sondern mit einer gewissen Periodizität. Ihr Vorkommen schwankt saisonal. Die Organismen, die zum „Überleben“ auf diese Ressourcen angewiesen sind, verfügen über – per Zufallsgenerator gleichmäßig gestreute – Metabolismen, die ihrerseits saisonal unterschiedlich intensiv arbeiten. Kurz: manche der Organismen benötigen viele Ressourcen im „Sommer“, dafür wenig im „Winter“. Andere benötigen mehr im „Winter“ und wenig im „Herbst“ und wieder andere brauchen im „Frühling“ viel, dafür im „Sommer“ wenig, und so weiter. Für alle gilt, dass hohe Stoffwechselintensität gerade in jenen Jahreszeiten, die wenig Ressourcen bieten, die Fitness verringert und damit auch die Überlebens- und Fortpflanzungschancen schmälert.

Beim Lauf dieses Modells passt sich, wie zu erwarten, die Population über einige Generationen hinweg evolutiv an

das jahreszeitliche Ressourcenangebot an. Auf längere Sicht „überleben“ nur solche Agenten, deren Stoffwechsel ideal angepasst ist, deren Stoffwechsel also zum Beispiel dann hoch ist, wenn auch das Nahrungsangebot hoch ist, also etwa im „Herbst“, und dann niedrig, wenn es nichts gibt, im „Winter“.

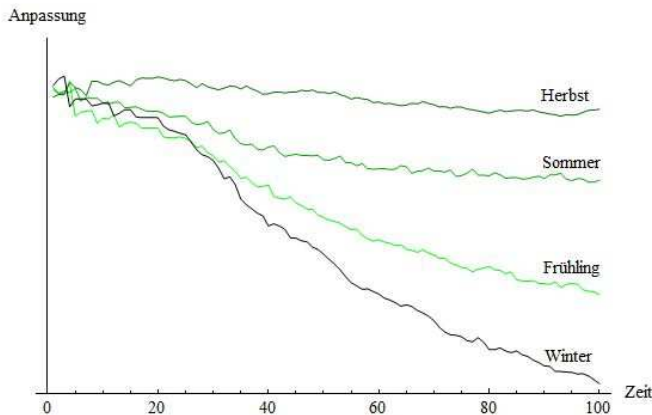


Abbildung 1: Simulierter Anpassungsprozess von Stoffwechselprozessen an saisonales Ressourcenangebot.

Eine „blinde Teleologie“ (Depew, Dawkins) ist hier am Werk. In Analogie zu natürlichen Evolutionsprozessen scheint tatsächlich ein zielgerichteter Prozess abzulaufen, der die Organismen in der gemeinsamen Absicht vorantreibt, sich anzupassen. Erst auf den zweiten Blick wird deutlich, dass es sich hier um nichts anderes als eine Computerberechnung handelt, in der, was als „Anpassung“ erscheint, das Ergebnis des Zusammenwirkens einiger Parameter ist, die aggregiert einem (als solchen wahrgenommenen) Attraktor zustreben - einem Attraktor allerdings, der mit „Anpassung“ selbst nichts zu tun hat. Erst nachträglich wird das Eigenverhalten² des Systems, also der in Form des Programmier-Codes vorgegebenen Regeln, von einem Beobachter als „ideal angepasst“ wahrgenommen. Eigenverhalten und Interpretationsleistung des Beobachters lassen sich also unterscheiden.

Auch die Deutung solcher Prozesse als „Abbildungs-“ oder „Widerspiegelungsprozesse“ sitzt meines Erachtens einer ähnlichen Vermischung auf. Zwar scheint es grundsätzlich nicht völlig missverständlich, auf einer Alltagsebene davon zu sprechen, dass die Metabolismen-Intensität der Agenten die Variabilität der Ressourcenverfügbarkeit in gewisser Weise abbildet, sie gleichsam widerspiegelt. Vielleicht ließe sich diesbezüglich im Verweis auf Conant und Ashby's „Good regulator“ (1970) sogar von einer „kontrollierenden Modellierung“ der variablen Ressourcenverfügbarkeit sprechen. Im Hinblick auf die Simuliertheit des Prozesses scheint es mir allerdings stimmiger von einem Eigenverhalten eines komplexen Systems auszugehen und die Selektion von angepassten Metabolismen als Emergenz von Ordnung zu betrachten, die erst durch den Beobachter retrospektiv in das Systemverhalten hineininterpretiert wird. Die Agenten selbst oder ihre Metabolismen haben keinerlei Konzept und keinen Plan für diese Ordnung. Sie tun nur,

was sie in Anbetracht ihrer Möglichkeiten tun. „Abbildung“ oder „Widerspiegelung“, ebenso wie Modell-basierte Kontrolle sind in diesem Sinn nur nachträglich vom Beobachter in das System projizierte Interpretationen.

GLIDER UND ANT SEARCH

Vielleicht wird diese Unterscheidung am Beispiel eines im strengen Sinn deterministischen Systems noch deutlicher. Die Regeln des von John H. Conway konzeptionierten *Game of Life* (GOL) generieren bekanntlich aus bestimmten Ausgangskonstellationen - dem berühmten f-Pentomino etwa - in Zeit und Raum stabil bleibende Zellmuster, unter ihnen unter anderem den so genannten *Glider*. Dieser Glider (ebenso wie die anderen Figuren der GOL-Dramaturgie) lässt sich im Sinn des obigen Beispiels (wenn auch ohne den evolutionären Aspekt) als Konstellation von GOL-Zellen betrachten, die ihre Form auf der Basis von spezifischen, durch die GOL-Regeln erzeugten Periodizitäten oder Regelmäßigkeiten gewinnen und behalten. In diesem Sinn ließe sich vielleicht noch davon sprechen, dass der Glider diese spezifischen Regelmäßigkeiten modelliert, sie abbildet oder widerspiegelt (und damit übrigens seinerseits Regelmäßigkeiten generiert, die dann auf nächster Ebene neuerlich genutzt werden können, um zum Beispiel Turing-Maschinen damit zu emulieren, vgl. Rendell 2002).

Die Komplexitätstheorie betrachtet Formen wie den Glider allerdings eher als emergente Ordnungen, die gegenüber den Mikro-Spezifikationen auf einer n -Ordnungsebene - hier die der GOL-Regeln - eine Makrostruktur auf einer $n+1$ -Ordnungsebene darstellen. Nach einer berühmten Äußerung von Aristoteles³ werden solche emergenten Ordnungen oftmals als „mehr als die Summe ihrer Teile“ gepriesen. Anders gesagt, zwischen Ebene n und Ebene $n+1$ klafft eine Differenz, ein *gap*, der mitunter auch als „mystery gap“ gesehen wird (vgl. u.a. Epstein 2006, S. 37). Wie ich andernorts (u.a. Füllsack 2010 und 2011, S.272f) vorgeschlagen habe, verschwindet das „mystery“, wenn man die von Mikro- (= Ebene n) zu Makrostruktur (= Ebene $n+1$) hinzukommende Information, also das „Mehr“ im „Mehr als die Summe der Teile“, einem Beobachter anlastet, der den Glider erst zum Glider macht, indem er ihn als solchen wahrnimmt, der also die Zellkonstellation, die der Glider auf Ebene n darstellt, anhand seiner eigenen Möglichkeiten und Kapazitäten erst in Form bringt, sie *in-form*-iert. Wenn dieser Beobachter in Rechnung gestellt wird, so erscheint der Glider nicht als „Abbild“ oder „Widerspiegelung“ irgendeiner verborgenen GOL-Regelmäßigkeit, sondern als Aspekt des Eigenverhaltens des Systems, das von den GOL-Regeln aufgespannt wird, dann aber nachträglich vom Beobachter in seine spezifische Form gebracht wird.

Dem vorliegenden Paper liegt nun die Vermutung zugrunde, dass analog zu dieser Ebenen-Unterscheidung auch am Kommunikationsprozess zwei Ebenen analytisch auseinandergehalten werden können⁴: eine gleichsam systemische, in der einfach passiert, was passiert, in der also multiple Dynamiken zusammenwirken und, wenn der Pro-

zess von Dauer ist, ein Eigenverhalten ausbilden, das schließlich spezifische Strukturen hervorbringt - unter anderem die Zeichen, die in der Kommunikation Verwendung finden; und zum anderen eine beobachtete Ebene, auf der diese Strukturen sodann teleologisch interpretiert werden, sprich an Erwartungen und Werten gemessen werden, die allerdings eben erst vom Beobachter an diese Strukturen herangebracht werden. In Bezug auf die Kommunikation lässt sich diese Unterscheidung noch einmal anhand des so genannten *Ant search*-Algorithmus veranschaulichen.

Bekanntlich verwenden Ameisen zur Koordination ihrer Aktivitäten, zum Beispiel ihrer Futtersuche, volatile Kohlenwasserstoffe, so genannte Pheromone, mit denen sie unter anderem Pfade markieren, auf denen sie Nahrung vom Fundort zum Nest transportieren. Die Attraktivität dieser Duftspuren erhöht die Wahrscheinlichkeit, auch andere, zunächst zufällig streunende Ameisen die Nahrungsquellen finden zu lassen. Indem diese Ameisen nach dem Nahrungsfund ebenfalls Pheromone aussondern, verstärken sie die Duftspur der ersten Ameise und orientieren so, per Zufallsauswahl, mit der Zeit immer größere Teile der Population auf die Nahrungsquelle. Sie „kommunizieren“ gleichsam den Erfolg ihrer Suche. Das Prinzip lässt sich relativ einfach programmieren und zum Beispiel zur Koordination von Roboter-Schwärmen heranziehen, die gemeinsam - nach dem Pheromon-Prinzip - zum Beispiel den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten finden sollen (vgl. Russell 2000). Zumindest in Bezug auf diese Rechner-gesteuerte Interaktion (wenn nicht schon in Bezug auf die Ameisen) wird deutlich, dass zu dieser Koordination keinerlei intrinsische Intention, kein Ziel notwendig ist. Die Roboter tun nur, was sie tun. Keiner von ihnen hat ein Konzept von Kommunikation oder Zusammenarbeit. Erst für den Beobachter erscheint das Tun koordiniert und die künstlich simulierten Pheromone ein Mittel zur Kommunikation.

ZEICHEN

Diese beiden Ebenen einer einerseits systemischen, an sich ablaufenden Eigenlogik und einer andererseits beobachteten und damit bereits gedeuteten, sprich mit Erwartungen und Werten belegten Entwicklung, lassen sich - so die hier beleuchtete These -, unterstützt durch entsprechende Simulationen, analytisch (wenn auch nicht lupenrein) auch am Prozess der menschlichen Kommunikation auseinanderhalten.

Um vorerst die beobachtete Ebene zu betrachten, sei Kommunikation, wie sie mit der Interaktion von Menschen assoziiert wird, zunächst als höchst unwahrscheinliches Phänomen markiert (vgl. dazu u.a. Luhmann 1981), das als solches die Frage, was dann Kommunikation so hinreichend wahrscheinlich werden lässt, dass sie doch statthat, in den Raum stellt. Aus Beobachterperspektive (die hier freilich eher einer Teilnehmerperspektive gleicht) könnte sich die Annahme nahelegen, dass Zeichen, die dem Bezeichneten ähneln, die es abbilden oder widerspiegeln, der Intention⁵ zu kommunizieren und damit der Wahrscheinlichkeit von Kommunikation entgegenkommen. So wie die Karte einer Landschaft, die diese Landschaft abbildet, oder das

Modell eines Hauses, das dieses Haus widerspiegelt, ihre Effizienz steigern, wenn sie möglichst detailgenau ihrem Vorbild gleichen, so würden Zeichen, die dem von ihnen Bezeichneten ähneln, den Verständigungsprozess befördern, indem sie das Verständnis assoziativ oder per Analogie erleichtern. Kommunikation würde somit wahrscheinlicher.

In der Tat stellen eine Reihe älterer Semiologien auf diese Annahme ab und verweisen zur Unterstützung der These insbesondere auf so genannte onomatopoetische Zeichen. Solche onomatopoetischen Zeichen, wie sie auf verbaler Ebene etwa die Worte „zischen“, „krächzen“ oder auch „zirpen“, „zwitchern“ etc. darstellen, scheinen das, was sie bezeichnen, in gewisser Hinsicht nach zu machen. Sie ahmen Laute, die sie bezeichnen, in ihrer eigenen Lautstruktur nach. Sie bilden sie ab (dazu u.a. Calvin / Bickerton 2000). Der Schluss legt sich nahe, dass unsere Vorfahren mithilfe solcher Ähnlichkeiten zum Beispiel jagdbare oder gefährliche Tiere „bezeichneten“. Der Umstand, dass unsere Sprache heute nur sehr wenige solcher onomatopoetischen Zeichen aufweist, würde sich gemäß dieser Annahme auf unzählige Variationen und Wiederabbildungen zurückführen, im Zuge deren nicht zuletzt auch die Verschriftlichung dafür sorgte, dass sich Zeichen heute eher durch ihre Arbitrarität, sprich ihre Willkürlichkeit gegenüber dem Bezeichneten, auszeichnen, denn durch ihre Ähnlichkeit. Bis hin zu Ferdinand de Saussure (u.a. 2001), der diese „Arbitrarität der Zeichen“ schließlich als ihr zentrales Charakteristikum markierte, fassten Linguisten die sprachliche Kommunikation gegenüber der Schrift immer wieder als die „natürlichere“ Kommunikationsform auf, in der die Ähnlichkeit von Zeichen und Bezeichnetem zwar überformt und vergessen, aber doch grundlegend sei.

Eine zumindest assoziative Anleihe bei dieser „naturalistischen“ Ähnlichkeitstheorie⁶ nahm auch die marxistisch-leninistische „Abbild-“ oder „Widerspiegelungslehre“, die der russische Revolutionär Vladimir Uljanov, genannt Lenin, inspiriert durch eine Äußerung von Karl Marx⁷, zur Basis einer weitreichenden ästhetischen und schließlich sogar staatstragenden sowjetischen Doktrin machte. Was bei Marx eine (nicht notwendig unidirektionale) Beziehung zwischen ökonomischen und ideellen Strukturen, zwischen „Basis“ und „Überbau“ meinte, und bei Engels propagandistisch verflacht zum „Abbild“ wurde, machte Lenin als „*otrashenie*“ - gelegentlich mit leicht anderer Bedeutung auch „*otobraschenie*“ - zur Grundlage einer Doktrin, die ikonografische Kunstwerke hochschätzte und alles Abstrakte und Formalistische verbannte. Das Zeichen - im speziellen das Kunstwerk - hatte das Bezeichnete - im speziellen das Dasein der Menschen und noch spezieller das Dasein des Proletariats - widerzuspiegeln, sprich es abzubilden, ihm also so „realistisch“ wie möglich zu ähneln.

In reflektierteren Marx-Interpretationen wurde die simple Abbild- oder Widerspiegelungstheorie des sozialistischen Realismus später zugunsten eines komplexeren dialektischen Abbildungsprozesses aufgegeben, der zwar nun eine Vielzahl widersprüchlicher, am Prozess der Abbildung beteiligter Aspekte zu berücksichtigen sucht, der aber, soviel ich sehe, nach wie vor an einer eindeutigen Beziehung zwi-

schen Abbild und Abgebildetem, an einer Isomorphie festhält, auch wenn diese in den verschiedenen Abbildformen unterschiedliche Gestalt annehmen kann. Mitunter werden die Marxschen Vorgaben mittlerweile auch mit Aspekten aus Informationstheorie und Kybernetik vermischt und Abbilder als eine Art Codierung der Signale der Umwelt betrachtet, die dann allerdings weiterhin an einer eindeutigen Beziehung und damit an einer Isomorphie von Abbild und Abgebildetem festzuhalten scheint (vgl. u.a. Holz 2003, 2005).

Aus Sicht eines Beobachters, (der sich in diesem Fall allerdings ausklammert, sich also unsichtbar macht), mag es Gründe geben, dies so zu sehen. Im Hinblick auf die angesprochene systemische Ebene wird allerdings einerseits deutlich, dass diese Widerspiegelung oder Isomorphie eine retrospektive Projektion des Beobachters sein könnte. Zum anderen scheinen sich auch Gründe dafür anführen zu lassen, dass die Wahrscheinlichkeit von Kommunikation weniger durch Ähnlichkeit, Widerspiegelung oder Isomorphie, sondern im Gegenteil durch Differenz, oder genauer sogar durch „*saliency*“ („Sich-Abheben“) erhöht wird.

Ich werde im Folgenden versuchen, dies mithilfe einer einfachen Simulation eines Kommunikationsprozesses zu verdeutlichen.

DAS MODELL

Die Simulation sieht eine Population von p computer-generierten Agenten vor, die mit n „Dingen“ – dem „Zu-bezeichnenden“ (*signifié* bei Saussure) – konfrontiert werden. Die Agenten fassen diese „Dinge“ als Elemente ihrer „Welt“ auf, über die sie kommunizieren. Die „Dinge“ werden durch zufällig erzeugte binäre Zahlencodes der Länge l repräsentiert. Auch die „Zeichen“, die die Agenten für diese Dinge festlegen, bestehen aus binären Zahlencodes der Länge l . Die Agenten wählen diese Zeichen aus einer Möglichkeitsliste, die die 2^l Permutationen der Binärcodes enthält. Sie bezeichnen also die Dinge ihrer Welt mit binär codierten Worten.

Als grundsätzliche Bedingung müssen diese Worte von den Dingen unterscheidbar sein. Das heißt, die Worte benötigen eine minimale informatische Differenz zu den Dingen, die sie bezeichnen. Aus diesem Grund gelten nur Worte, die zu den Dingen eine Hamming-Distanz⁸ (hd im Weiteren)

von mindestens 1 aufweisen, als reguläre Worte.

Mit diesen Worten versuchen die Agenten zu kommunizieren. Nacheinander wählt jeder Agent dazu zufällig einen Kommunikationspartner und bezeichnet ein Ding mit einem ihm adäquat scheinenden Wort. Da alle Agenten in der selben Welt leben, sind die Dinge und ihre Anzahl, vorerst nicht aber die zu ihrer Bezeichnung verwendeten Worte, für alle gleich. Um Worte zu wählen, rekurrieren die Agenten auf eine individuelle Wahrscheinlichkeitsmatrix, die aus n Reihen und 2^l Kolumnen besteht. Die Positionen in den Reihen dieser Matrix repräsentieren die in der Welt vorhandenen Dinge, und die in den Kolumnen die zu ihrer Bezeichnung möglichen Worte, beide streng in der Reihenfolge ihrer Positionen in der Liste der Welt-Dinge und in der Liste der Permutationen.

Zu Beginn stehen alle Positionen auf Null. Die anfänglichen Entscheidungen der Agenten für die zur Bezeichnung der Dinge gewählten Worte beruhen damit auf Zufall. Wenn freilich in dieser Zufallswahl ein gewähltes Wort vom Rezipienten des Kommunikationsversuchs ebenso zufällig „richtig“ gedeutet wird, das heißt der Agent das vom Sprecher gemeinte Ding mit dem von ihm gesendeten Wort assoziiert, so nehmen beide Agenten an der diesem Ding und diesem Wort entsprechenden Stelle ihrer Wahrscheinlichkeitsmatrix einen Eintrag vor. Die entsprechende Stelle wird um 1 hinaufgesetzt.

Die weiteren Wortwahlen orientieren sich nun an diesen veränderten Einträgen. Die Agenten wählen zufällig einen Gesprächspartner und ein zu bezeichnendes Ding, sodann betrachten sie die diesem Ding entsprechende Reihe ihrer Wahrscheinlichkeitsmatrix, erzeugen eine Zufallszahl zwischen 0 und 100 und vergleichen diese Zahl mit dem jeweils höchsten Eintrag in dieser Reihe. Ist die Zufallszahl kleiner oder gleich dem Eintrag so wird das entsprechende Wort zur Bezeichnung des Dings an den Rezipienten gesendet. Dieser stellt sodann die Position des Wortes in der Möglichkeitsliste fest, vergleicht diese Position mit den verschiedenen Einträgen in den Reihen seiner Wahrscheinlichkeitsmatrix und entscheidet sich für den höchsten Eintrag. Sodann erzeugt er ebenfalls eine Zufallszahl zwischen 0 und 100, vergleicht diese mit dem höchsten Eintrag und schließt, wenn der Zufallswert kleiner oder gleich dem Eintrag ist, daraus, dass das gesendete Wort das Ding bezeichnet, das der indizierten Reihe entspricht.

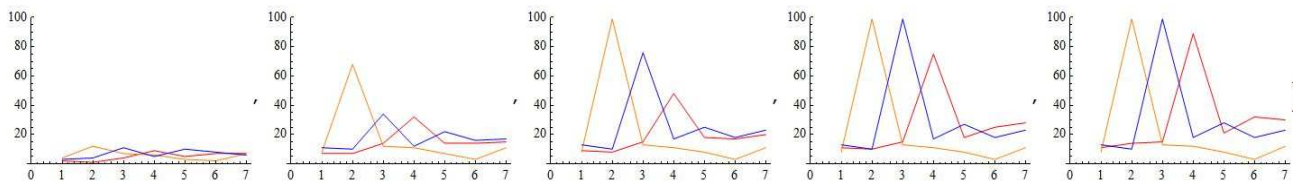


Abbildung 2: Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsmatrix eines Agenten mit $n = 3$ und $l = 3$ über (von links nach rechts) 200, 500, 700, 1000 und 2000 Spielzüge. Die drei Farben indizieren unterschiedliche „Dinge“, bzw. die entsprechende Reihe in der Wahrscheinlichkeitsmatrix. Aufgrund der notwendigen informativen Differenz von $hd = 1$ beträgt die Länge der Kolumnen $2^l - 1 = 7$ (und nicht $2^l = 8$)

Wenn dies korrekt ist, wird dies als kommunikativer Erfolg interpretiert und die entsprechende Stelle in den Wahrscheinlichkeitsmatrizen der beiden Agenten erneut um eins hinaufgesetzt - bis zu einem Maximalwert von 100. Ist dieser erreicht, so gilt die Entscheidung der Agenten für die entsprechenden Worte als determiniert. Wenn alle Agenten 100%-Einträge für alle Worte besitzen, so gilt der Verständigungsprozess als abgeschlossen.

Um Unterscheidbarkeit zu gewährleisten, ist es den Agenten verboten, Worte homonym zu verwenden, also das selbe Wort zur Bezeichnung unterschiedlicher Dinge zu wählen. Damit die Wortwahl allerdings nicht in einer Sackgasse endet, wenn ein und das selbe Wort in zwei Reihen der Wahrscheinlichkeitsmatrix (also zur Bezeichnung zweier Dinge) bereits hohe Einträge erreicht hat und einer davon schließlich auf 100 springt, ist es notwendig, die noch nicht 100-prozentigen Wahrscheinlichkeiten auch wieder sinken zu lassen. Sobald also ein Wort als festgelegt gilt und gleichzeitig auch in einer anderen Matrix-Reihe hohe Wahrscheinlichkeit hat, sinkt diese Wahrscheinlichkeit wieder zugunsten einer anderen Wahl. Worte hingegen, die einmal festgelegt sind (deren Wahrscheinlichkeit also bereits 100% erreicht hat) gelten, da es im vorliegenden Experiment nicht um die Emergenz einheitlicher Sprachen geht, als unveränderbar. Die Simulation endet, wenn alle Agenten Worte für alle Dinge gefunden haben.

5. Einige Ergebnisse

In einem ersten Setting wurden die Agenten in einem zirkulären Netzwerk so angeordnet, dass sie mit allen anderen Agenten mit gleicher Wahrscheinlichkeit kommunizierten.

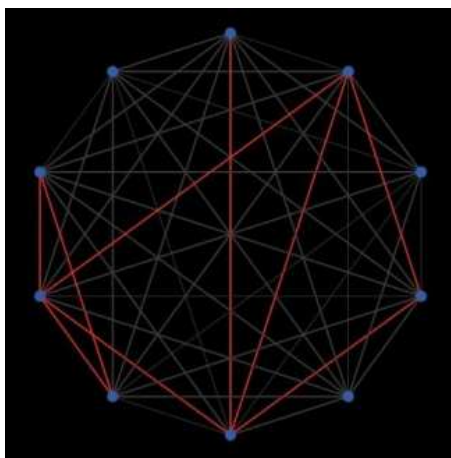


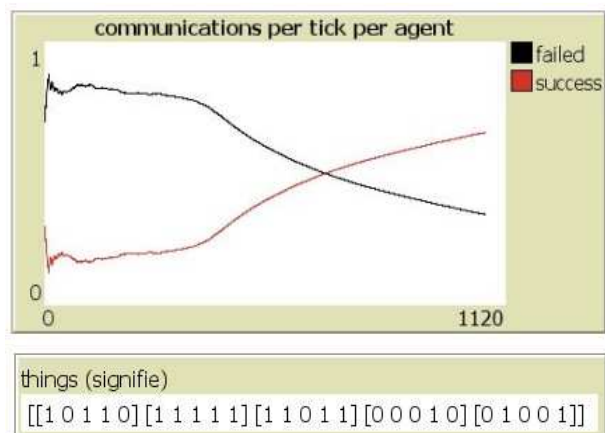
Abbildung 3: Ansichten des Modells. links: ein stilisierter Kommunikationsprozess, Agenten als blaue Punkte, erfolgreiche Kommunikationen als rote, nicht erfolgreiche als graue Verbindungen. Rechts oben: Kommunikationserfolg in der Zeit. Rechts unten: exemplarische Liste von „Dingen“ ($n = 5, l = 5$). Modelliert mit Netlogo.

Mit den Parametern $p = 10, n = 5$ und $l = 5$ etablieren alle Agenten in diesem Setting nach ungefähr 10000 Spielzügen Worte für die von ihnen zu bezeichnenden Dinge. Allerdings einigen sich nicht immer alle Agenten auf die Verwendung der selben Worte für die selben Dinge. Ihre sprachlichen Übereinkünfte gleichen eher dem, was David Lewis (1969) ein „*babbling equilibrium*“ nannte. Die Agenten sprechen „Dialekte“, wobei sie in der Regel ein oder zwei Dinge mit dem selben Wort bezeichnen, für die restlichen Dinge dagegen unterschiedliche Worte verwenden. Dies ergibt auch noch am Ende des Verständigungsprozesses eine recht hohe Missverstehensrate.

```
(agent 9): [[1 1 1 1 0] [1 1 1 0 1] [0 0 0 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 2): [[1 1 0 0 1] [1 1 1 0 1] [1 0 0 0 0] [1 0 0 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 3): [[0 0 1 0 0] [1 1 1 0 1] [1 0 0 0 1] [1 0 0 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 0): [[1 1 1 1 0] [1 1 1 0 1] [0 0 0 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 5): [[1 1 1 1 0] [0 1 1 0 1] [0 0 1 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 4): [[0 0 0 0 0] [1 1 1 0 1] [0 1 0 0 1] [1 0 0 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 1): [[0 1 1 1 1] [0 1 1 0 1] [1 1 0 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 7): [[0 0 1 0 0] [0 1 1 0 1] [1 0 1 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 6): [[0 0 1 0 0] [0 1 1 0 1] [0 0 0 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
(agent 8): [[1 1 1 1 0] [1 1 1 0 1] [1 0 1 0 1] [1 1 1 1 1] [0 0 1 1 0]]
```

Abbildung 4. Beispiel für von den Agenten zur Bezeichnung der „Dinge“ ihrer Welt „gewählte“ Worte. Im abgebildeten Fall konnten sich nur auf das letzte Wort alle Agenten „einigen“. Über den gesamten Durchlauf von 34792 Spielzügen betrug die Ratio von erfolgreichen zu nicht erfolgreichen Kommunikationen 1.6, oder absolut: 170273 erfolgreiche zu 105757 missglückten kommunikativen Akten.

Die vergleichsweise hohe Binärcode-Länge bei relativ geringer Ding-Anzahl ergibt einen relativ großen Möglichkeitsraum, der dem Zufall, beziehungsweise dem „Nicht-Entscheiden-Können“ der Agenten einiges an Platz lässt. Da es verboten ist, ein Wort mehrmals zur Bezeichnung unterschiedlicher Dinge zu wählen, schränkt sich dieser Möglichkeitsraum erst mit dem Festlegen der ersten Worte sukzessive ein.



In dem in Abbildung 3 gezeigten Beispiel wird er erst bei der „Wahl“ des letzten Wortes offensichtlich klein genug, um alle das gleiche Wort wählen zu lassen. Eine Reduktion der Wortlänge erbringt dementsprechend auch größere Übereinstimmung. Da in diesem Fall allerdings einige der bereits erreichten Wahrscheinlichkeitsniveaus auch wieder aufgegeben werden müssen, wenn die entsprechenden Worte zur Bezeichnung anderer Dinge festgelegt werden, benötigte der Wortwahlprozess in der Regel mehr Zeit. Abbildung 4 zeigt das Resultat eines Durchlaufs mit $p = 10$, $n = 5$, $l = 4$.

(agent 1):	[[0 0 0 1]]	[0 1 0 1]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 7):	[[0 0 0 1]]	[0 1 0 1]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 4):	[[0 0 0 1]]	[0 0 1 1]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 3):	[[0 0 0 1]]	[0 1 1 0]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 0):	[[0 0 0 1]]	[1 1 0 0]	[1 1 0 1]	[0 0 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 9):	[[0 0 0 1]]	[0 1 1 0]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 5):	[[0 0 0 1]]	[1 0 1 1]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 6):	[[0 0 0 1]]	[0 1 1 0]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 8):	[[0 0 0 1]]	[0 0 0 0]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]
(agent 2):	[[0 0 0 1]]	[0 0 1 1]	[1 1 0 1]	[1 1 1 0]	[1 1 1 1]

Abbildung 4. Variation des in Abbildung 3 gezeigten Runs, mit $p = 10$, $n = 5$, $l = 4$. Die Worte 1, 3 und 5 wurden von allen Agenten gleich gewählt. Über den gesamten Durchlauf von 39833 Spielzügen betrug die Ratio von erfolgreichen zu nicht erfolgreichen Kommunikationen in diesem Fall 1.28, oder absolut: 412504 zu 322986.

In einer Variation dieses Settings wurden die Agenten nicht ringförmig, sondern in einem zufallsgenerierten Netzwerk positioniert und konnten ihre Gesprächspartner nur unter den Agenten wählen, zu denen sie über direkte Links verfügten (siehe Abbildung 5).

In einer weiteren Variation wurden die Agenten nicht stationär in Netzwerken angeordnet, sondern zufällig positioniert, mit der Möglichkeit, sich zu bewegen. Als jeweiliger Gesprächspartner wurde zufällig ein Agent aus jener Gruppe von Agenten gewählt, die sich in einem Umkreis mit Radius r vom jeweiligen Akteur aufhielten. Mit $r = 5$ erzielte diese Variante die höchste Übereinstimmung an gleich gewählten Worten. Auch Populationsgrößen von 100 und mehr fanden in diesem Setting eine einheitliche Sprache. Die genauere Beschreibung der nicht-zirkulären und bewegten Variante des Modells und seiner Ergebnisse wird andernorts vorgenommen.

Im Sinne der oben angestellten Überlegungen ist freilich zu betonen, dass es sich bei den beschriebenen Entwicklungen natürlich nicht um Kommunikationsprozesse handelt, wie sie Menschen zugeschrieben werden könnten, sondern um das Verhalten eines komplexen Systems, das ein Eigenverhalten ausbildet, welches retrospektiv als Einigungsprozess gedeutet wird. Oder genauer, um ein System, das sich, determiniert durch anfängliche Zufallsselektionen, über zahlreiche Iterationen einem bestimmten Zustand nähert, der sich sodann als spezifische Ordnung Zeichen-verwendender Akteure betrachten lässt, der sich im Prinzip aber durch nichts - außer durch ein differierendes Regelset und seine Interpretation - von der Entwicklung eines GOL-Runs und den daraus emergierenden Makrostrukturen unterscheiden lässt. Das System zeigt ein Eigenverhalten, das retrospektiv als Ordnung gedeutet wird. Unter Umständen vermitteln die strukturierten Wahrscheinlichkeitsmatrizen zweier interagierender Agenten in Abbildung 6 eine Ahnung dieses systemischen Eigenverhaltens.

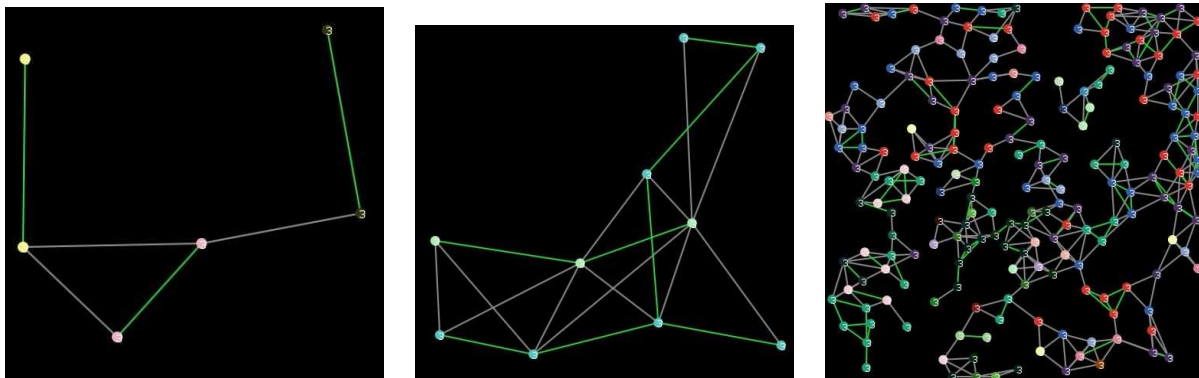


Abbildung 5: Anordnungen in Zufalls-Netzwerken. Agenten kommunizieren nur mit über direkte Links verbundenen Agenten. Links mit $p = 6$, $n = 3$, $l = 3$, Mitte mit $p = 10$, $n = 3$, $l = 3$, und Rechts mit $p = 200$, $n = 3$, $l = 3$. Grüne Links und gleiche Farben indizieren Agenten mit vollständig identer Wortwahl, also Agenten die die gleiche Sprache sprechen.

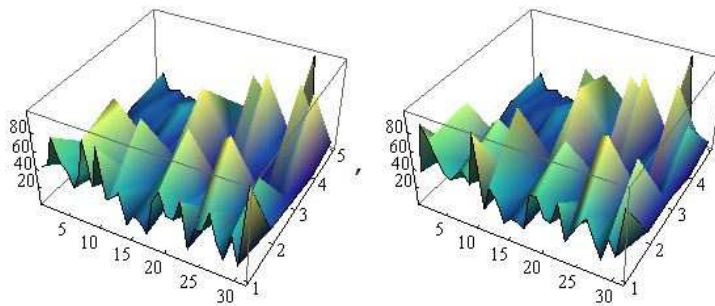


Abbildung 6. Dreidimensionale Darstellung der Wahrscheinlichkeitsmatrizen zweier interagierender Agenten (mit leichten Unterschieden in der Entwicklung), hier als Illustration des Eigenverhaltens eines komplexen Systems.

ARBITRARITÄT ODER WIDERSPIEGELUNG?

Den eigentlichen Anlass für das hier beschriebene Modell gab die mit dem Widerspiegelungstheorem assoziierte Frage, ob Zeichen, die dem von ihnen Bezeichneten ähneln, die Wahrscheinlichkeit für Kommunikation steigern. Im vorliegenden Modell würde eine solche Ähnlichkeit durch Worte zum Ausdruck kommen, die zu den Dingen, die sie bezeichnen, eine niedrige Hamming-Distanz aufweisen. Gleich vorweg, mit dem Modell in der oben beschriebenen Variante konnte keine wie auch immer geartete Tendenz zu niedrigen *hd*-Werten festgestellt werden. Die *hd*-Werte der gewählten Worte beliefen sich in allen Settings im Durchschnitt auf etwas über den Mittelwert zwischen erlaubtem Minimalwert (*hd* = 1) und maximaler Wortlänge.

Nun verfügen die Agenten dieses Modells natürlich auch über keinerlei Konzept für Ähnlichkeit. Niedrige *hd*-Werte haben keinen Wert an sich für sie. Es verwundert damit nicht, dass sich die *hd*-Werte ihrer Wortwahlen normalverteilen und im Schnitt damit genau in der Hälfte der erlaubten Minimal- und Maximal-Werte liegen. In Bezug auf die angesprochene systemische Ebene wäre es aber vorstellbar, dass sich der Phasenraum des Modells, der Möglichkeitsraum also, aus dem die Zeichen gewählt werden, einschränkt, wenn den Agenten eine „Vorliebe“ für niedrige *hd*-Werte verordnet wird. Würde sich die Dauer des Auswahlprozesses von Worten und die Zahl der unterschiedlichen Dialekte dadurch verringern? Würde die Kommunikation also damit an Wahrscheinlichkeit gewinnen?

Um dies festzustellen habe ich in einer Variation des Modells die Auswahl der Zeichen mit einem *bias* belegt. Die Agenten bevorzugen, beginnend mit 85 Prozent für *hd* = 1 jeden folgenden *hd*-Wert mit um 15 Prozent niedrigerer Wahrscheinlichkeit. Das heißt, sie überprüfen nach jeder Wortwahl die Hamming-Distanz zum zu bezeichnenden Ding und behalten das Wort mit 85-prozentiger Wahrscheinlichkeit bei, wenn sein *hd* = 1, mit 70-prozentiger Wahr-

scheinlichkeit wenn sein *hd* = 2, mit 55-prozentiger Wahrscheinlichkeit wenn sein *hd* = 3, mit 40-prozentiger Wahrscheinlichkeit wenn sein *hd* = 4 und mit 25-prozentiger Wahrscheinlichkeit wenn sein *hd* = 5 (größere Wortlängen wurden (einstweilen) nicht untersucht).

Dieses Setting wurde jeweils zehnmal mit den Werten $p = 5$, $n = 2$ und $l = 3$ bis 6, sowie $p = 10$, $n = 2$ bis 3 und $l = 3$ bis 6, und $p = 5$, $n = 5$ und $l = 5$ getestet. Von den einzelnen *hd*-Werten der gewählten Worte wurden zum einen Mittelwert (*mean* in der Tabelle) und Standardabweichung (*sd*) aller Worte eines Agenten und sodann daraus Mittelwert und Standardabweichung der gesamten Population berechnet. Diese Werte wurden in Beziehung zur Dauer des Auswahlprozesses (in Anzahl der *ticks*) und zur Zahl der von den Agenten gewählten Dialekte, ebenfalls im Schnitt der 10 Durchgänge, gestellt. Die Ergebnisse zeigen zwar (wenig verwunderlich, denn darauf waren die Agenten ja programmiert) deutlich geringere durchschnittliche *hd*-Werte, aber in allen geprüften Varianten keinerlei Tendenz zu kürzeren Auswahlprozessen oder zu größerer Übereinstimmung bei der Wahl der verwendeten Worte. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis für $p = 5$, $n = 5$ und $l = 5$. (In der Dauer des Auswahlprozesses ergaben sich aufgrund der gelegentlichen Notwendigkeit, bereits weit fortgeschrittene Wahrscheinlichkeiten auch wieder rückgängig zu machen, wenn das entsprechende Wort zur Bezeichnung eines anderen Dings gewählt wurde, sehr große Unterschiede, daher die extrem hohen Werte bei *sd ticks*)

RAUSCHEN

Zwar verringern sich die durchschnittlichen *hd*-Werte in dieser Variante des Modells. Trotzdem wahren sie aber nach wie vor auch einen Abstand, eine Distanz (hier eben Hamming-Distanz) zu den zu bezeichnenden Dingen, der größer ist als die verordnete Mindestdistanz von *hd* = 1.

$p = 5, n = 5, l = 5$	<i>mean hd</i>	<i>sd hd</i>	<i>mean ticks</i>	<i>sd ticks</i>	<i>mean Dialekte</i>	<i>sd Dialekte</i>
ohne <i>bias</i>	2.796	0.2729	48231.8	43828.0	4.8	0.4216
mit <i>bias</i>	2.144	0.4058	49952.7	83926.0	4.8	0.4153

Dies lässt auf einen Umstand schließen, den unter anderem Niklas Luhmann (u.a. 1984, S. 198) in seiner Konzeption von Kommunikation betont, den Umstand, dass um die Wahrscheinlichkeit von Kommunikation zu heben, Differenz, wenn nicht gar ein „Sich-Abheben“ („saliency“) vorteilhafter sein kann als Ähnlichkeit.

Um dies im Rahmen des beschriebenen Modells zu testen, habe ich in einer weiteren Variante angenommen, dass die Kommunikationen der Agenten mit zunehmendem „Erfolg“ ein Rauschen verursachen, vor dessen Hintergrund, wenn Kommunikation weiterhin statthaben soll, die Wahrnehmbarkeit der gewählten Worte gewährleistet sein muss. Die Wahrscheinlichkeit, die Worte „richtig“ zu verstehen, hängt also von der Unterscheidbarkeit dieser Worte vom Hintergrundrauschen ab, von ihrer „saliency“ also. Das Modell erzeugt zu diesem Zweck einen „Lärmpegel“, der aus Zufallsworten besteht, deren Hamming-Distanz die „Lautstärke“ des Rauschens angibt. Die Empfänger eines Kommunikationsversuchs müssen die an sie gerichteten Worte vor dem Hintergrund dieses Rauschens zuordnen, was die Wahrscheinlichkeit „richtigen“ Zuordnens natürlich zugunsten von Worten steigert, deren *hd*-Werte über der Lautstärke liegt. Die folgende Tabelle gibt die entsprechenden Ergebnisse wieder, diesmal mit den Parametern $p = 10$, $n = 5$ und $l = 7$, abermals gemittelt über jeweils 10 Durchläufe.

Lautstärke	mean <i>hd</i>
0	3.12667
1	3.73
2	3.75667
3	4.23667
4	5.01667
5	5.6

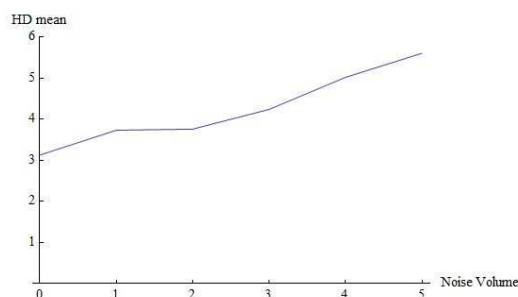


Abbildung 7: Durchschnittliche *hd*-Werte in Relation zu sechs unterschiedlichen Lautstärke-Niveaus, mit $p = 10$, $n = 5$ und $l = 7$. „mean *hd*“ bezeichnet den durchschnittlichen *hd*-Wert aller *hd*-Werte aller Worte der Agenten gemittelt über jeweils 10 Durchläufe.

Die Bandbreite für die *hd*-Werte, also für die ikonografische Distanz der Worte zu den Dingen, die sie bezeichnen, blieb in diesem Fall zwischen Lautstärke und der Wortlänge von $l = 7$. Zwar stiegen, wie die Tabelle zeigt,

die durchschnittlichen *hd*-Werte weniger schnell als der Lautstärke-Pegel. Im Vergleich zu den Dingen (mit $hd = 0$) zeigt sich aber doch eine deutliche Tendenz zur „Unähnlichkeit“, also zur „Arbitrarität der Zeichen“.

Die Simulation scheint damit die Vermutung zu bestätigen, dass die Ähnlichkeit von Zeichen und Bezeichnetem, ebenso wie Abbildung, Widerspiegelung, Isomorphie etc. Interpretationen eines Beobachters sind, der seine spezifischen Interessen in die von ihm beobachteten Zusammenhänge projiziert.

ANMERKUNGEN

- 1 Selbstverständlich ist, streng genommen, natürlich auch die Interpretation des Modells vom Involvement des Beobachters betroffen und entkommt damit der epistemologischen Grundproblematik nicht. Die Einschränkung ist also notwendig, wengleich trotzdem unter Umständen gegenüber Modellen *graduell* mehr „Objektivität“ erwartet werden darf als gegenüber den modellierten Prozessen.
- 2 Welches freilich, auf etwas abstrakterer Ebene, ebenfalls erst von einem Beobachter zu einem "Eigenverhalten" gemacht wird. Der epistemologischen Grundproblematik ist, wie schon gesagt, nicht zu entkommen. Es geht hier aber auch nicht darum, sondern um die Aufmerksamkeit für den unvermeidbaren Einfluss des Beobachters, sprich für die Konstruiertheit jeglicher Struktur.
- 3 In Metaphysik 1041b 10 (VII. Buch (Z)) heißt es (in der Übersetzung von Franz F. Schwarz Stuttgart 1970: Reclam) „Das, was in der Weise zusammengesetzt ist, daß das Ganze Eines ist, ist nicht wie ein Haufen, sondern wie eine Silbe. Die Silbe aber ist nicht dasselbe wie ihre Buchstaben, BA ist nicht dasselbe wie B und A [...]“. Es geht Aristoteles an dieser Stelle um das Wesen der Dinge und im Speziellen um das Wesen des Menschen.
- 4 Wobei auch hier die erkenntnistheoretische Problematik dieser Unterscheidung nicht übersehen sei. Was ich im folgenden tentativ als systemische Ebene von der Beobachtungsebene unterscheidet, ist selbst nicht unbeobachtet zugänglich. Auch die scheinbar wertfreien Termini "Dynamiken", "Zusammenwirken", "Eigenverhalten" etc. sind damit natürlich Interpretationen eines Beobachters, wenn auch in dem Fall die eines *second order observers*, der sehen kann, dass er stets nur unter bestimmten Bedingungen sieht
- 5 Die freilich - worauf unter anderem auch Derrida (1988) in seiner berühmten Auseinandersetzung mit Searle hinweist - ihrerseits retrospektiv in den Kommunikationsprozess projiziert wird. Soziale Insekten, oder - um hier sicher zu gehen - Roboter, die sich mit Hilfe von so genannten *Ant search*-Algorithmen koordinieren (Russell 2000), haben keine wie auch immer geartete „Intention zu kommunizieren“.
- 6 Die stark an die Position des Cratylus in Platons gleichnamigem Dialog erinnert.
- 7 „Das Bewusstsein kann nie etwas anderes sein als das bewusste Sein, und das Sein der Menschen ist ihr wirklicher Lebensprozess.“ MEW 3: 26.
- 8 Die Hamming-Distanz gibt die Zahl der Stellen an, in denen sich zwei Binärcodes derselben Länge unterscheiden.

LITERATUR:

- Calvin, William H. / Bickerton, Derek (2000): *Lingua ex Machina: Reconciling Darwin and Chomsky with the Human Brain*. MIT Press.
- Conant, Roger C. / Ashby, Ross, W. (1970): Every Good Regulator of a System must be a Model of that System. In: *International Journal of Systems Sciences*, vol. 1, No. 2, S. 89-97.
- Derrida, Jacques (1988): *Limited Inc*. Evanston: Northwestern University Press.
- Epstein, Joshua M. (2006): *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton.
- Foerster, Heinz v. (1993a): Gegenstände: greifbare Symbole für (Eigen-)Verhalten. In: ders.: *Wissen und Gewissen. Versuch einer Brücke*. (Hrsg. v. Siegfried J. Schmidt), Frankfurt am Main, S. 103-115.
- Foerster, Heinz v. (1993b): Unordnung/Ordnung. Entdeckung oder Erfindung? In: ders.: *Wissen und Gewissen. Versuch einer Brücke*. (Hrsg. v. Siegfried J. Schmidt), Frankfurt am Main, S. 134-148.
- Füllsack, Manfred (2010): Mapping and it's observer; in: Trapp, Robert (ed.): *Cybernetics and Systems 2010*. Vienna: Austrian Society for Cybernetic Studies, p.243-148.
- Füllsack, Manfred (2011): *Gleichzeitige Ungleichzeitigkeiten. Eine Einführung in die Komplexitätsforschung*. VS-Verlag. Wiesbaden.
- Holz, Hans Heinz (2003): *Widerspiegelung*. Bielefeld: transcript-Verlag.
- Holz, Hans Heinz (2005): *Weltentwurf und Reflexion. Versuch einer Grundlegung der Dialektik*. Stuttgart/Weimar: J. B. Metzler.
- Lewis, David (1969): *Convention: A Philosophical Study*. Cambridge. Harvard UP.
- Luhmann, Niklas (1981): Die Unwahrscheinlichkeit der Kommunikation. In: ders. *Soziologische Aufklärung 3. Soziales System, Gesellschaft, Organisation*. Opladen, Westdeutscher Verlag, S. 25-34.
- Rendell, Paul (2002): Turing Universality in the Game of Life; in: Adamatzky, Andrew (ed.): *Collision-Based Computing*. New York Springer.
- Rocha, Luis (1996): Eigenbehavior and Symbols. In: *Systems Research Vol. 13, No 3*, S. 371-384.
- Rocha, Luis (1998): Selected Self-Organization. And the Semiotics of Evolutionary Systems. In: Salthe, S. / Van de Vijver, G. / Delpos, M. (Eds.). *Evolutionary Systems: Biological and Epistemological Perspectives on Selection and Self-Organization*. Kluwer Academic Publishers, S. 341-358.
- Russell, Andrew R. (2000): *Odour Detection by Mobile Robots*. River Edge, NJ. World Scientific Publishing Co.
- Saussure, Ferdinand de (2001): Cours. In: Ryan, Michael / Rivkin, Julie (Eds): *Literary Theory: An Anthology*. Blackwell Publishers.