

# Active-Inference-basierte Multi-System-Simulationen als theoretische Werkzeuge

Kolja J. Kurzer

*Beitrag zur Veranstaltung »Aktuelle Entwicklungen in Modellbildung und Simulation« der Sektion Modellbildung und Simulation*

## Einleitung

Simulationen nehmen als Werkzeug der Erklärung in der Soziologie bislang keine prominente Rolle ein. Während der Corona-Pandemie erlebten Simulationen, auch Multi-Agenten-Simulationen (Multi Agent Based Simulation – MABS) eine erhöhte mediale und öffentliche Aufmerksamkeit; u.a. da sie zur vorausschauenden Bewertung von Schutzmaßnahmen genutzt werden konnten (Waldherr et al. 2021, S. 243). Auch aktuelle Klimamodelle stehen in zentralen Knoten in modernen Handlungsgeflechten, wenn diese das kollektive Handeln von Staaten, Staatengemeinschaften, kollektiven Akteur:innen aller Art und Privatpersonen beeinflussen. Aber auch Finanzmodelle versuchen Marktentwicklungen vorherzusagen und wirken zusammen mit den Emotionen und Erwartungen der Anleger:innen auf Bewertungen ein, teils bevor diese eintreffen, und teils gar in Prozessen – in mertonischer Manier als selbst-erfüllende Prophezeiung –, die diese erst hervorbringen.

Für Sozialwissenschaften und die Soziologie sind MABS von besonderem Interesse, denn hier lässt sich über die Modellierung von einzelnen Agenten, die dynamisch interagieren, eine Strukturbildung höherer Ordnung beobachten. Durch Simulationen wird eine andere Art der Wissensgewinnung möglich. Joshua M. Epstein und Robert L. Axtell prägten dafür den Begriff des „generativen Paradigmas“ (Epstein und Axtell 1996, S. 177f.; Epstein 2006). Während bei der Induktion durch Beobachtungen empirischer Sachverhalte Wissen gewonnen wird, wird bei der Deduktion durch logisches Schlussfolgern aus Apriori oder axiomatisch geltendem Wissen Aposteriori bzw. abgeleitetes Wissen geschlussfolgert. Generatives Wissen nutzt theoretische Vorannahmen zur Herleitung von Simulationsbedingungen: das heißt hier Agenten, gefasst durch ihre möglichen Wahrnehmungen und Aktionen, sowie deren Umwelt, welche anschließend genutzt werden, um durch eine große Anzahl künstlicher Beobachtungen – der Simulationsdurchläufe – theoretische Wissensgewinne zu erhalten. Klassisches Beispiel wäre Schellings Segregationsmodell: Ein Feld aus angrenzenden Quadraten wird bewohnt von Agenten in zwei „Farben“. Wobei jedes „Haus“ vier direkte Nachbarn, an den jeweiligen Seitenlinien, hat. Zu jedem Zeitwechsel haben die Agenten die Möglichkeit, in ein freies Feld umzuziehen oder zu bleiben, wo sie sind. Ein veränderbarer und der für das Ergebnis zentrale Wert ist die präferierte Anzahl an gleichfarbigen Nachbarn. Das kontraintuitive Ergebnis ist dabei, dass bei einer Präferenz zwischen 26 % und 49 % gleicher Nachbarn, also einer sehr hohen Heterophilie, sehr homogene Nachbarschaften als stabile Ordnungen entstehen, wohingegen bei einer starken Homophilie von über 75 % diverse Nachbarschaften ent-

stehen.<sup>1</sup> Ziel dieser Simulationen ist es zu erzeugen und nicht zu erklären! Es soll nicht ein Phänomen auf ein Phänomen höherer oder tieferer, fundamentalerer Ordnung zurückgeführt werden. Es soll ein minimaler Satz an Rahmenbedingungen und operativen Regelmäßigkeiten gefunden werden, um ein Phänomen hervorzubringen. Ein zentrales Merkmal dieses Vorgehens ist dabei aber auch, dass das simulierte Erzeugenkönnen nicht heißt, dass vorhergesagt werden kann, was passiert. In den meisten Fällen können nur Vorhersagen über aggregierte Zustände gemacht werden. Im Fall der Segregation kann vorhergesagt werden, in welcher Größenordnung die Mischung der Farben sein wird. Das genaue Muster, und noch weniger die endläufige Position eines Agenten, kann dagegen nicht vorhergesagt werden. Sie muss erst durch das Ablaufen der Simulation berechnet werden.

Der Artikel leistet zweierlei: Zum einen macht er sich für die Nutzung von Simulationen als theoretische Werkzeuge stark, zum anderen zeigt er, dass die in den Neurowissenschaften paradigmatische Theorie der Active Inference dafür besonders geeignet ist. Dies geschieht über das Vorstellen einiger Simulationen, welche den Formalismus der Active Inference nutzen, um relevante Phänomene der Sozialwissenschaften zu generieren: *Erstens* wird das Entstehen von Synchronizität in Dyaden generiert. *Zweitens* wird eine Simulation, die das Problem der doppelten Kontingenz aufnimmt, vorgestellt. *Drittens* wird die Entstehung von geteilten Erwartungen, bzw. deren Entwicklung durch jeweils recht simple zugrundeliegende Modelle generiert. Abschließend wird eine Skizze für eine noch zu erstellende, komplexere Reihe von Simulationen präsentiert, die genutzt werden soll, um verschiedene Paradigmen des klassischen Problems der Verbindung von Mikro- und Makroebene zu untersuchen.

Theorien können als Netzwerk an Begriffen bzw. Konzepten (z.B. Fuhse 2022) oder Sätzen bzw. Prädikationen (u.a. Zermelo 2010, S. 210; Luhmann 2018, S. 406) verstanden werden.<sup>2</sup> Als Netzwerk betrachtet können die Prädikationen bzw. die Konzepte als Knoten verstanden werden, die mit anderen sie beeinflussenden Knoten verbunden sind. Analog können Simulationen als Netzwerk verstanden werden: Knoten bilden die Akteur:innen<sup>3</sup> und ihre möglichen Perzeptionen über die Umwelt ab. Relationen sind die möglichen Aktionen gegenüber anderen Akteur:innen sowie der Umwelt. Ein anderer Weg wäre die Analogie über Modelle: Sowohl Theorien als auch Simulationen lassen sich als Modelle eines abzubildenden Phänomenbereiches verstehen. Wir können über diese Analogien Simulationen als dynamisierte Theorien fassen. Sowohl bei der Präsentation von Theorien als lineare Symbolfolge, wie in der Fassung in Texten oder Vorträgen als auch über zweidimensionale Entfaltung in Schaubildern, Karten und Diagrammen, aber auch in dreidimensionalen Darstellungen, wie beispielsweise digitalen Körperatlanten, wird die Zeitdimension meist stillgestellt. Teils werden Darstellungen um eine Zeitachse erweitert, diese wird dann aber meist ohne Variabilität nach voreingestellter Abfolge präsentiert. Simulationen erlauben dagegen, den Möglichkeitsraum, die Potenzialität der durch die Reihe der theoretischen Vorannahmen eröffneten Konfiguration aus Kanten und Knoten, zu durchlaufen. Sie erlauben es, statische Theorien in beobachtbare Prozesse zu überführen, die ihrerseits zur Verbesserung der Theorie herangezogen werden können. Die Analogie entfaltend können wir die Theorie als eine die Simulation beschreibende Hintergrundebene fassen, welche ihre Kernmomente kondensierend nutzt, um Teile ihrer Kernthesen auf ihre Geltung in einer dynamischen Umgebung zu testen. Ein Paradigma, das eine Theorie bereitstellt, die leistungsfähig und zugleich schlank genug ist, um berechenbare Simulationen zu erstellen, ist das der Active Inference.

---

<sup>1</sup> Die Punkte der Phasenübergänge, die durch den Grad der Homo-, bzw. Heterophilie entstehen, sind durch die Anzahl der Nachbarfelder bedingt. Würde eine Anordnung mit Sechsecken gewählt, wären diese jeweils bei verschiedenen  $\frac{1}{6}$ .

<sup>2</sup> Ein Kernanliegen meiner Masterarbeit „Wiedereintritt des Systems. Theorie als Netzwerk“ (unveröffentlicht) ist die Argumentation für das zweite Verständnis von Theorie und die epistemologische Reflexion dieser Arten von Theorieverständnis unter modernen kybernetischen, d.h. nicht linearen, Kausalitätsvorstellungen.

<sup>3</sup> In anderen Fällen bildet nur die Umwelt die Knoten und Akteure befinden sich immer auf einem Knoten, oder die Netzwerke bestehen aus Knoten für sowohl mögliche Felder als auch für Akteure.

## Active Inference – Eine kurze Einführung

Active Inference ist eine Theorie der Kognitionswissenschaften, welche die Dynamiken von selbstorganisierenden, autopoietischen Systemen beschreibt. Sie findet weitverbreitete Anwendung in der theoretischen Beschreibung sowie empirischen Überprüfung und kann als fortgeschritten auf dem Weg zum Paradigma (im Kuhnschen Sinne) gesehen werden. Sie findet auch Anwendung in den angewandten Wissenschaften der Artificial Intelligence sowie Robotik. Die Anfänge des Feldes unter dem Namen Active Inference wurden von Karl Friston gemacht (2006; 2010). Stark expandiert ist das Paradigma in den Jahren ab 2019: Stark steigende Zitationszahlen sowie Institutionalisierung durch die Gründung von Journals, Instituten, Arbeitsgruppen und Firmen, welche proprietäre Umsetzungen der Theorie suchen, lassen die theoretische Findungsphase in eine aktive Phase des „learning-by-doing“ übergehen.

Zentrales Theoriestück ist das „Free Energy Principle“, das die Energiedynamiken von selbstorganisierenden Systemen vorhersagt (Friston 2006; 2010). Dynamische Systeme werden als Theoretiker bayesianischer Art gefasst: Sie bilden Theorien über die Welt draußen, über Perzeption und die Welt im Innern, über Interozeption, und versuchen durch geschicktes Sammeln von Informationen die Diskrepanz über Umweltereignisse und Abweichungen mit den eigenen Erwartungen möglichst klein zu halten. Sie minimieren dabei eine spezifische Art von Überraschung (surprisal), die analog zur (Shannon) Entropie formalisiert wird. Diese Dynamik des Minimierens ist das Free Energy Principle. Das bayesianische Schema der Inferenz wird dabei auch in der Kognition genutzt: Die Welt wird laufend konstruierend vorhergesagt (predictive brain hypothesis). Auffallend große Abweichungen von den Vorhersagen werden als „error“ salient und führen zu Wahrnehmungen bzw. Observationen, oder zum Lernen, also zur Änderung der unterliegenden Modelle des Vorhersagens (belief update).<sup>4</sup>

Aktiv wird die Inferenz dadurch, dass der gleiche Formalismus sowohl zur Vorhersage von Observationen als auch von Handlungen genutzt wird: Die Differenz bzw. der Error zwischen einer kontrollierten Hand und einem Gegenstand, den man zu greifen wünscht, kann sowohl über ein Update des Modells, also z.B. eine Änderung der Präferenzen, überwunden werden – wenn also der Gegenstand nicht mehr als attraktiv gesehen wird – oder indem die Position der Hand in der Nähe zum Gegenstand vorhergesagt wird. Nun kann die Differenz durch Veränderung der Position der Hand überwunden werden und die überzeitlich aggregierte Menge der freien Energie wird reduziert.<sup>5</sup>

Ein weiteres zentrales Theoriestück ist die Beschreibung der dynamischen Systeme durch ihre Einbettung in eine selbsteinschließende Grenze. Das System kann Wahrnehmungen und Aktionen nur an der Grenze vollziehen. Es tut dies durch die Nutzung des internen Modells, ohne auf dieses direkt zugreifen zu können. Durch sukzessive Verbesserung des Modells durch Inferenz und Aktion wird das interne Modell mit dem immer versteckten „generativen Prozess“ der Umwelt immer übereinstimmender. Friston taufte diese Grenze die Markov-Decke in Anlehnung an die Formalisierungen von Judea Pearl (1988) zur Beschreibung von Markov-Netzwerken. Pearl zeigt, dass in einem kausalen Netzwerk von einem gegebenen Knoten aus nur die einkommenden und ausgehenden Knoten einen Mehrwert an Information bieten. Alle darüber hinaus existierenden Knoten können nur mediiert über die benachbarten Knoten in Interaktion treten, so dass nur die mediiierenden Knoten alle relevanten Informationen beinhalten. Analog bieten Markov-Decken über die internen und externen Zustände das Maximum an erreichbarer Welt des Systems.<sup>6</sup> In anderen Worten: Die Markov-Decke ist die Grenze der möglichen

---

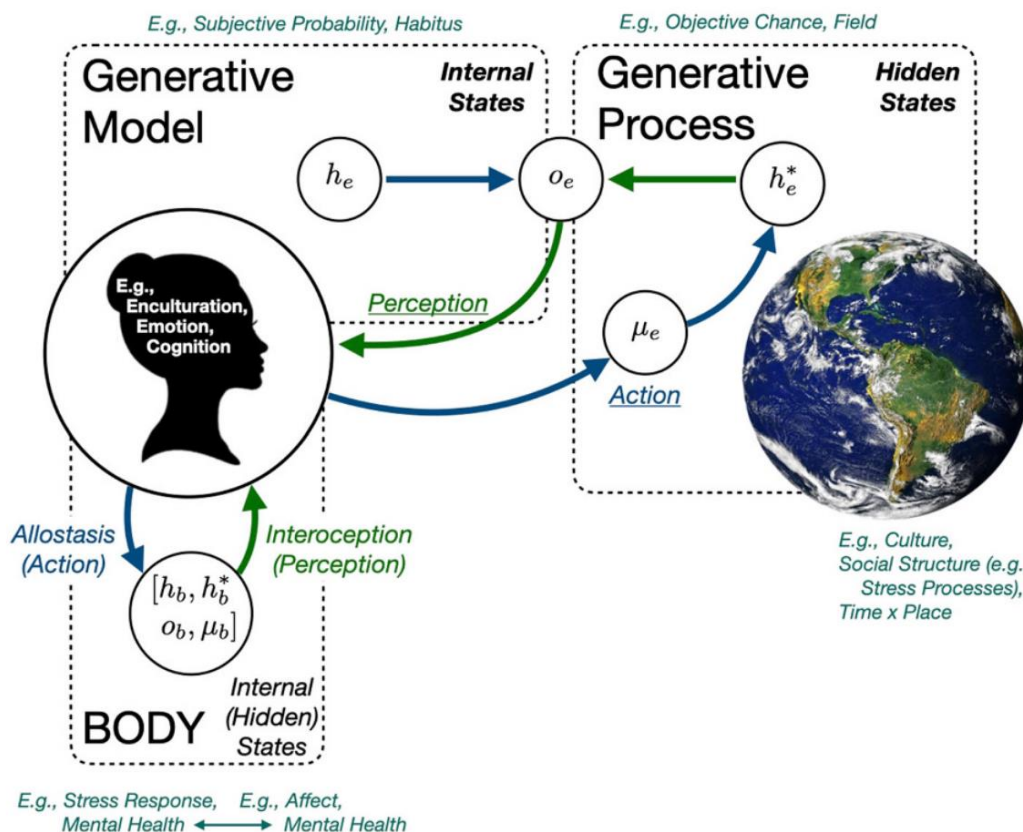
<sup>4</sup> Das „klassische“ Textbook zur Einführung in die Theorie der Active Inference ist Parr et al. (2022). Eine kürzere Einführung in den Formalismus bieten Friston et al. (2023). Eine gute Einführung in den Formalismus und die Umsetzung von POMDPs bieten Smith et al. (2022).

<sup>5</sup> Priorelli et al. diskutieren dies und eine erläuternde Darstellung ist auf S. 11 zu finden (Priorelli et al. 2024).

<sup>6</sup> Was nicht ausschließt, dass die Grenze durch Veränderungen des Systems um neue Knoten erweitert werden kann bzw. die Nische des Organismus durch das Erlernen neuer Wahrnehmungen und Aktionen erweitert werden kann.

Observationen und Aktionen der Akteur:innen, es ist der Horizont der Welt. Die Dynamik eines Systems besteht folglich im fortlaufenden Evidenzen sammeln durch Vorhersagen über die Dynamik auf der Markov-Decke sowie deren Anpassung durch Abweichungen und Aktionen. Diese Ansammlung an Anpassungen der Modelle, also der internen und externen Variablen, verfeinert dieses und führt zu so einer immer genauer passenden Modellierung der internen und externen generativen Prozesse. Dadurch wird die Überraschung, die Abweichung generativer Prozesse von ihrer Modellierung, schrittweise und auch bei dynamischer Veränderung weiterhin minimiert und dies vermag auch die besonders sprunghafte Überraschung – z.B. Destruktion – zu vermeiden.

Jacob E. Cheadle et al. (2024) leisten Vorarbeit für eine Synthese der Theorie der Active Inference mit den Theorien der Soziologie. Für diese Diskussion ist die Formalisierung einer situierten Akteur:in relevant, über die wir uns der Formalisierung von Agenten in MABS nähern können und zugleich an soziologisches Denken anschließen können. In Abbildung 1 sehen wir eine mögliche Aufteilung von dynamischen Systemen in ihre jeweiligen Markov-Decken, die ein Minimalprogramm für die Formalisierung von Akteur:innen beinhaltet. Zentral links steht die Akteurin, die über zwei Grenzen mit jeweils den Kanälen Perzeption und Aktion, zum einen mit den versteckten Zuständen der externen Umwelt und zum anderen mit den internen versteckten Zuständen verbunden ist. Der relevanteste Teil der externen Umwelt wird in der Soziologie meist als Kultur oder soziale Struktur gefasst; es ist hier aber auch auf die soziale Vorstrukturierung der Kategorien, welche Agenten aufnehmen, um Ereignisse zu beobachten, angezeigt, die über Enkulturation bzw. Sozialisation aufgenommen werden. Der Körper ist als zweite Oberfläche zur Selbstbeobachtung (Interozeption) und zur Regulation von Körperzuständen (Allostasis) mit eigenen versteckten Zuständen, wenngleich kleiner, ähnlich undurchsichtig wie die externen versteckten Zustände.



**Abbildung 1: Das Bio-Neuro-Soziale Modell** (Abbildung aus Cheadle et al. 2024, S. 335, adaptiert aus Parr et al. 2022, CC BY 4.0)

Zur Umsetzung des Formalismus der Active Inference haben sich eine ganze Reihe von Formalisierungsarten entwickelt, die sich in zwei Klassen einteilen lassen: in Formalismen, die in diskreten Zeitschritten arbeiten und jenen, die in kontinuierlicher Zeit arbeiten. In der Simulation von sozialen Interaktionen kann über Elemente wie sozialen Handlungen oder Kommunikationen usw. eine sinnvolle diskrete Strukturierung der Zeit gewählt werden, sodass hier die einfacheren, und daher auch weniger rechenintensiven, diskreten Modelle genutzt werden können. Gängig ist das Aufteilen der einzelnen Schritte der Inferenz der Akteur:innen auf verschiedene Berechnungsschritte eines Bewertungsprozesses. Der teilweise beobachtete Markov-Entscheidungs-Prozess (**P**artially **O**bserved **M**arkov **D**ecision **P**rocess), gängig POMDP genannt, kann genutzt werden, um verschiedene Tensoren und ihre Verrechnung zu nutzen, um die Dynamik der Inferenz auf die besten Erklärungen zur Reduzierung der freien Energie zu simulieren. Tensoren für Präferenzen, mögliche Handlungen und Wahrnehmungen, Zustände der Welt und dem generativen Modell sowie deren Verrechnung über mehrere simulierte Handlungsverläufe erlauben den Akteur:innen vorausschauend eine Handlung zu wählen, ohne dabei auf perfekte Information angewiesen zu sein, sondern durch Verbesserung der eigenen Wissensbestände über die Welt durch sukzessives Wechseln zwischen Exploration und Exploitation.

## Simulationen mit Active Inference – Eine kleine Tour durch den Bestand

Karl Friston und Christopher Frith (2015) simulieren in ihrem Artikel mit dem klangvollen Namen „A Duet for One“ die Synchronisierung von „Gesang“ unter Vögeln. Zwei Vögel werden über POMDP-Modelle simuliert, welche jeweils sowohl die eigenen Erwartungen über das Lied als auch die erwarteten Erwartungen des anderen Vogels (second-level expectations) umfassen. Sind die Vögel außerhalb der Hörreichweite, stellt sich keine Synchronizität ein. Sind sie dagegen in ausreichender Nähe, wird durch Feedback eine Synchronizität erreicht. Dabei zeigen sich zwei überraschende Ergebnisse: Erstens vollzieht sich die Synchronizität über die generativen Modelle; sie agieren nicht nur synchron, sondern „denken“ synchron. Zweitens wird nach Erreichen hoher Grade der Synchronizität das Hören und aktive Singen stetig abgewechselt, so dass die beiden Vögel auch als aggregiert betrachtetes System weniger Energie verbrauchen.

Einen Schritt in die Simulation von doppelter Kontingenz geht der Artikel von Riddhi J. Pitliya et al. (2025): Über den Einbau einer simulierten „Theory of Mind“ werden Blockaden, die daraus resultieren, dass die kürzesten Pfade der Agenten sich überschneiden, gelöst. Allerdings werden hier lediglich die Erwartungs-Erwartungen eines Agenten an den anderen simuliert. Diese Simulation ähnelt daher sozialen Situationen, in denen ein Agent die Situation für die anderen Agenten mitstrukturiert (scaffolding), um ein erfolgreiches Handeln herzustellen, wie dies beispielsweise in Situationen zwischen Erwachsenen bzw. älteren Kindern und Kleinkindern zu beobachten ist (vgl. Tomasello 2021, S. 112).

Das wohl komplizierteste der betrachteten Modelle stellt die Simulation der Verbreitung von Ansichten in Natalie Kastel et al. (2022) dar. Den Agenten wird hier durch die Wahl eines Gesprächspartners sowie durch ein zeitlich begrenztes Gedächtnis ein hohes Maß an Kompetenz zuteil, welches eine hohe Ähnlichkeit zu realen Akteur:innen aufweist. Durch die Umsetzung der Simulation mit nur zwei „Ideen“-Arten (rot und blau) und dichotom verfassten Präferenzen wird diese berechenbar gehalten. Spielfeld ist ein Marktplatz oder Forum, bzw. eine Anzahl an potenziellen Gesprächspartnern. Die Simulation verläuft über zwei wiederholend ablaufende Phasen: Die Suche bzw. Wahl eines Gesprächspartners sowie die Konversation mit Partnern, wenn diese dem Gespräch zustimmen. Über Gespräche hinweg wird sowohl die Präferenz für eine Idee ggf. angepasst als auch ein Gedächtnis angelegt, welche Personen welche Ideen präferieren. Die Agenten verfügen über Neigungswerte zur Konfirmation gehaltener Werte (confirmation bias), welcher vor der Simulation in seiner Streuungsvarianz und Höhe eingestellt wurde. Fällt dieser niedrig aus, neigen Agenten häufiger dazu, abweichende Informationen

zu suchen (novelty seeking). In ausgeglichener Verteilung neigen Kulturen dazu, neu eingeführte Ideen zu verteilen und sich dann in zwei abgeteilte Bereiche jeweils kongruenter Meinung zu teilen. In hochgradig neugierigen Populationen wird ein neu eingeführter Wert schnell übernommen und zur neuen Mehrheitsmeinung.<sup>7</sup> In stark konfirmationsfreudigen Populationen wird die neue Idee nur durch wenige Agenten übernommen und kann sich nur in kleinen Subgruppen halten.

#### *Vorteile der Nutzung der Active Inference für MABS*

Als Zwischenfazit soll festgehalten werden, dass die Theorie der Active Inference eine Simulation rationaler Agenten erlaubt, die ohne die Annahme der perfekten Information auskommen. Mehr noch, die Agenten können verschiedene Perspektiven einnehmen und die Perspektiven anderer in ihre Kalkulation einbeziehen. Aktiv inferierende Agenten sind mit einer „Bounded Rationality“ ausgestattet und damit deutlich näher an der sozialen Realität als Rational-Choice-Ansätze.

In der ersten Simulation, der der Dyaden, haben wir gesehen, dass auch eine Optimierung über mehrere Agenten erreicht werden kann und gleichzeitig die Agenten jeweils für sich nahezu optimal handeln. Lukas Beckenbauer et al. (2025) zeigen, dass diese Optimierung auch für Aufgaben mit einem sehr langen Zeithorizont über mehrere jeweils begrenzt rationale Agenten erreicht wird.

Ein bisher nicht diskutierter Vorteil ist für den Rest dieses Artikels zentral: Der Formalismus der Aktiven Inferenz erlaubt es bzw. sieht es sogar vor, dass hierarchisch verschachtelte dynamische Systeme durch Interaktion an ihren Grenzen einen gemeinsamen Organismus bilden. Dies erlaubt es, Simulationen von sozialen Aktionen nicht mehr „nur“ über Agenten auf der individuellen Ebene einzelner Körper zu simulieren, sondern auch kleinere oder größere Elemente in die Simulation aufzunehmen. Der Formalismus der Active Inference erlaubt es, MABS sozialer Systeme als Ordnung eigener Art mit eigener Dynamik aufzunehmen.<sup>8</sup>

### MABS – Simulation nur im mikrosoziologischen Paradigma?

MABS zeichnen sich durch den Erklärungsgewinn der Emergenz aus: Makroeffekte können durch das Verhalten einzelner Agenten, die das größere Muster weder kennen noch beabsichtigen, erklärt werden. Sie sind damit grundlegend mikrosoziologisch: Soziale Muster lassen sich aus den aggregierten Handlungen je nach lokaler Logik getroffener Handlungen von Agenten erklären bzw. hier generieren (vgl. Schellings Segregations-Modell in der Einleitung). Aber: In der Wahl der möglichen Aktionen sowie der räumlichen und zeitlichen Anordnung der Handlungen (Karte, Netzwerk, Vektorenraum) werden starke Vorannahmen getroffen, die der Vorstrukturierung des Raumes von Akteur:innen in makrosoziologischen oder Strukturierungstheorien (z.B. Giddens und Bourdieu) ähneln. Stärker noch: Diese Strukturen können in den meisten MABS nicht durch die Agenten geändert werden! Diese Makrostrukturen sind damit in den Simulationen zeitlos und unveränderlich.<sup>9</sup> Je nach Simulation kann dies kein größeres Problem darstellen: Wenn die Zeitskalen der Änderung auf den Ebenen so weit auseinanderfallen, dass es aus der Logik der Agenten so aussieht, dass sich die Rahmenbedingungen nicht ändern – wie beispielsweise bei der Erosion von Bergen oder der Verschiebung von tektonischen Platten – stellt dies

---

<sup>7</sup> Mir scheint es logisch und die Abbildung auf Seite 14 in Kastel et al. (2022) legt nahe, dass die ehemalige Mehrheitsidee nach gegebener Zeit nun als neue Minderheitsidee wieder interessant und damit für die neugierigen Agenten attraktiver wird, sodass ein periodisches Oszillieren zwischen den beiden Meinungen auftreten sollte. Im Artikel finden sich dazu keine Angaben.

<sup>8</sup> Ich werde später argumentieren, dass die Vorstrukturierung, die in der Soziologie den Makroparametern zufällt, in den MABS als Simulation des Spielfeldes und der erlaubten Handlungen vorgenommen wird; und damit als unveränderlicher Hintergrund verdeckt wird.

<sup>9</sup> So betrachtet folgen viele MABS damit nicht mikrosoziologischen Annahmen, sondern man könnte sie dagegen als makrosoziologisch ansehen, denn sie beobachten wie weitgehend durch die Regeln und Rahmenbedingungen determinierte Agenten die Logik der Struktur ausführen.

kein Problem dar. Aber die meisten Rahmenbedingungen sozialer Interaktionen sind durch soziale Interaktionen gebildet und veränderbar.

Hier kommt der angekündigte Vorteil der Simulation von MABS über Active Inference ins Spiel: Agenten, Systeme lokaler Ordnung (Interaktionssysteme) und globaler Ordnung (Funktionssysteme, Kultur, Gesellschaft) können hierarchisch verschachtelt und jeweils auf anderen Zeitskalen und an den Grenzen durch Wahrnehmungen beobachtbar und veränderbar simuliert werden.

## Vergleich verschiedener Paradigmen durch Simulation

Skizziert wird im Folgenden eine Reihe von Simulationen, die die gleichen Rahmenbedingungen aufweisen, aber die Verrechnung der Handlungsabläufe (policies) und der Aktiven Inferenz bzw. der Minimierung von freier Energie über vier verschiedene Anordnungen vollziehen, die Lösungen des Mikro-Makro-Problems in der Soziologie entsprechen. Der *Mikro*-Ansatz folgt dabei der gängigen Logik von MABS. Die Inferenz vollzieht sich über einzelne Agenten, welche alle auf gleicher Ebene und Zeitskala agieren. Die sozialen Dynamiken sind dabei Folge und unbeabsichtigte Nebenfolge der Handlungen Einzelner. Aber auch *Makro*-Ansätze lassen sich simulieren, indem die Agenten als Submodule eines großen dynamischen Systems gefasst werden. Die freien Energien und Handlungsabläufe werden über ein aggregiertes System berechnet. Neuere Theorien setzen häufig eine Zwischenebene zwischen die großen Strukturen und die Handlungsentscheidungen der einzelnen Akteur:innen. Eine dieser dreigeschichteten Theorien ist im *Situationslogik*-Ansatz von Hartmut Esser (2002, 2019) ausformuliert. Makrostrukturen stellen dabei aggregierte Handlungsoptionen bereit, die in jeweiligen Situationen nach der jeweiligen lokalen Situationslogik auf kontextuell verfügbare Handlungen begrenzt und angepasst werden. Agenten wählen dann aus diesem vorgegebenen Horizont und verändern damit ggf. Makrostrukturen. Diesem strikten Dreischritt folgend ließe sich die Inferenz auf drei Ebenen aufteilen, die jeweils zeitlich nacheinander geordnet ihre Berechnung durchführen. *Systemtheoretische* Ansätze, insbesondere die durch Luhmann (1994, 1991) ausgearbeiteten, sprechen den verschiedenen Systemebenen ein Konstellieren nach eigener Logik zu.<sup>10</sup> Knapp gesagt: Neben psychischen Systemen (Agenten), inferieren hier Situationen (Interaktionssysteme ggf. auch Organisationssysteme) als auch aggregierte Systeme (Funktionssysteme, Gesellschaftssysteme) in heterarchischer Ordnung.

Formal lassen sich die Unterschiede in einer gängigen Notation der Active Inference skizzieren:

### Mikro:

$$A_n = (\mu, s, \pi[\alpha], c[s_o, c_o])$$

### Situationslogik:

$$\begin{aligned} A_n &= (s, c) \\ Si_n &= (\mu, \pi, \pi_o) \\ S_n &= (\mu, c) \end{aligned}$$

### Makro:

$$S_n = (\mu, s, \alpha, c)$$

### Systemtheorie:

$$\begin{aligned} A_n &= (\mu, s, c, \pi) \\ Si_n &= (\mu, s, c, \pi) \\ S_n &= (\mu, s, c, \pi) \end{aligned}$$

Wobei das  $\mu$  für interne Zustände, das  $\alpha$  für einzelne Handlungen,  $\pi$  für Handlungsketten,  $s$  für Observationen bzw. sensory states und  $c$  für Präferenzen steht. Ein tiefgestelltes  $o$  bezeichnet hier die

<sup>10</sup> Diese eigene Handlungslogik der Systeme sollte dabei nicht zu sehr im „intentional stance“ (Dennett 1996) verstanden werden, sondern eher als ein bewusstloses Konstellieren bzw. eine „Autilität“ (Fuchs 2015).

Zurechnung auf einen anderen Agenten, also die Erwartung der Handlungsketten oder Beobachtungen anderer.

Für die Wahl des simulierten Szenarios ist es für einen fairen Vergleich wichtig, dass durch diese Wahl nicht vorab ein Paradigma bevorzugt wird. Es müssen sowohl Präferenzen und Entscheidungen der einzelnen Agenten eine Rolle spielen und diese müssen auch – in den dreigliedrigen Fällen umgesetzt – auf die Strukturen einwirken. Es ist zu erwarten, dass der makrosoziologische Ansatz die geringste Rechenleistung benötigt. Beim systemtheoretischen Ansatz stellt sich ggf. das zu lösende Problem, wie mit Abweichungen zwischen den Berechnungen der Systeme umgegangen wird. Hier wird der psychisch häufig erlebte Konflikt zwischen „Exzessiver Subjektivität“ (Finkelde 2015) und Konformität salient. Die Systemtheorie hat hierfür eine eigene Klasse von Subsystemen des Gesellschafts-systems vorgeschlagen: Konfliktsysteme. Es ließe sich eine eigene Klasse von Systemen simulieren, die in diesen Fällen eine Berechnung durchführen und über die folgenden Handlungen bzw. Observationen der konfligierenden Systeme entscheidet und dann direkt wieder verschwindet. Alternativ ließe sich über die Regel „Subjekt schlägt Interaktion schlägt Gesellschaft“ deutlich weniger aufwändig verfahren.

Zur Umsetzung der Simulation bieten sich zwei Programmiersprachen-Bibliotheken an: Für Python steht mit `pymdp` (Heins et al. 2022) eine Umgebung zur Erstellung von Active Inference Agenten in Markov Entscheidungsumgebungen bereit. Für Julia steht `ActiveInference` (Nehrer et al. 2025) zur Verfügung, das auch POMDP modellieren kann.

## Ausblick

Der Formalismus der Active Inference und die Modellierung über POMDP sowie deren Simulationen können ein hilfreiches Werkzeug sein, um soziologische Theoriebildung und Erklärung zu erweitern. Die Aufnahme des Paradigmas rund um die Berechnung der freien Energie erlaubt es zum einen bestehende Simulationsparadigmen durch komplexere Anordnungen zu erweitern und zum anderen auch neuartige Simulationen zu erstellen. Hier ist insbesondere durch die Verschachtelungen von Systemen auf verschiedenen Ebenen ein Gewinn zu erwarten.

Ein weitreichender Nutzungsfall von Simulation als theoretisches Werkzeug – bzw. als manifestiertem Gedankenexperiment – ist die Implementierung verschiedener Anordnungen der Speicherung von Erwartungen (Observationen und Präferenzen) und Erwartungs-Erwartungen. Hier könnte in Anlehnung an Tomasello (2021, 2024) die Speicherung von Erwartungen auf drei Ebenen aufgeteilt vorgenommen werden: Jeder Agent speichert eigene *subjektive* Erwartungen und Vorlieben. Er speichert weiterhin alle mit einer spezifischen anderen Person *dyadisch* gemachten Erfahrungen über mit dieser geteilten Erwartungen und Vorlieben (dialogisch bzw. 2P). Weiterhin werden die von allen geteilten Erwartungen und Vorlieben gespeichert („*objektiv*“). Hier könnten je nach Simulation die Gruppen der „objektiv“ geteilten Erwartungen in kulturelle Kreise unterteilt werden.

Erweitert werden sollten Simulationen auch sicherlich hinsichtlich der Simulation der Körper der Agenten. Allostasis von internen Ressourcen könnte in Anlehnung an die unter Sugarscape bekannten MABS gestaltet werden (Epstein und Axtell 1996, S. 21ff.). Agenten müssen, um zu überleben, ihren Zuckerwert über dem tödlichen Wert 0 halten und sind folglich mit dem Management von Exploration und Exploitation bei Beibehaltung eines möglichst hohen Zuckerwertes beschäftigt. Erweitert wurde dieses Simulations-Paradigma u.a. auf mehrere Ressourcen sowie auf den Tausch zwischen Agenten. In Kombination mit der Verbesserung von Fähigkeiten bzw. Ressourcen-Extraktion oder deren Umwandlung könnten komplexe Abbildungen von körperlichen Prozessen erfolgen.

Eine Verbindung dieser beiden Erweiterungen könnte eine Simulation von emotionalen Dynamiken sein. Werden Emotionen als Aggregationen bzw. Symbolisierungen von Körperzuständen gefasst – wie z.B. bei Lisa Feldman Barrett (2023) – und nehmen wir weiter an, dass die gleichen Systeme und Konzepte zur Beobachtung der eigenen internen Zustände sowie daraus folgenden Rückschlüsse auf aktuelle Präferenzen und niedrige Ressourcen auch für die Beobachtung anderer Agenten genutzt werden (Fields et al. 2025; Ramstead et al. 2024), so kann eine komplexe soziale Dynamik simuliert werden, die nicht nur „bounded rational“ Agenten aufweist, sondern auch empathisch rationale Agenten, womit ein entscheidender Schritt hin zur Simulation von „kooperativ rationalem Handeln“ (Tomasello 2024) gemacht wäre. Hingegen nutzen aktuelle Simulationen mit Agenten auf der Ebene von Feedbacksteuerungssystemen bei zielgerichteten Akteur:innen einen sehr niedrigen Komplexitätsgrad des Handelns. Dies ist aber nur ein Baustein der Simulation von kooperativ rationalen Agenten.

## Literatur

- Barrett, Lisa Feldman. 2023. *Wie Gefühle entstehen: eine neue Sicht auf unsere Emotionen*. Hamburg: Rowohlt Polaris.
- Beckenbauer, Lukas, Johannes-Lucas Loewe, Ge Zheng und Alexandra Brintrup. 2025. Orchestrator: Active Inference for Multi-Agent Systems in Long-Horizon Tasks. <http://arxiv.org/abs/2509.05651> (Zugegriffen: 17. Sep. 2025).
- Cheadle, Jacob E., K. J. Davidson-Turner und Bridget J. Goosby. 2024. Active Inference and Social Actors: Towards a Neuro-Bio-Social Theory of Brains and Bodies in Their Worlds. *KZfSS Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 76:317–350.
- Dennett, D. C., 1996. *Kinds of minds: toward an understanding of consciousness*. New York: Basic Books.
- Epstein, Joshua M. 2006. *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton: Princeton University Press.
- Epstein, Joshua M., und Robert L. Axtell. 1996. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Esser, Hartmut. 2002. *Soziologie. 1: Situationslogik und Handeln*. Frankfurt am Main, New York: Campus.
- Esser, Hartmut. 2019. Situationslogik. In *Große Transformation? Zur Zukunft moderner Gesellschaften: Sonderband des Berliner Journals für Soziologie*, Hrsg. Klaus Dörre, Hartmut Rosa, Karina Becker, Sophie Bose und Benjamin Seyd, 567–585. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Fields, Chris, Mahault Albarracin, Karl Friston, Alex Kiefer, Maxwell J.D Ramstead und Adam Safron. 2025. How do inner screens enable imaginative experience? Applying the free-energy principle directly to the study of conscious experience. *Neuroscience of Consciousness* 2025(1):2057–2107. 10.1093/nc/niaf009
- Finkelde, Dominik. 2015. *Exzessive Subjektivität: eine Theorie tathafter Neubegründung des Ethischen nach Kant, Hegel und Lacan*. Freiburg: Verlag Karl Alber.
- Friston, Karl. 2010. The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience* 11:127–138.
- Friston, Karl, Lancelot Da Costa, Noor Sajid, Conor Heins, Kai Ueltzhöffer, Grigorios A. Pavliotis und Thomas Parr. 2023. The free energy principle made simpler but not too simple. *Physics Reports* 1024:1–29. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2023.07.001>
- Friston, Karl, und Christopher Frith. 2015. A Duet for One. *Consciousness and Cognition* 36:390–405.
- Friston, Karl, James Kilner und Lee Harrison. 2006. A free energy principle for the brain. *Journal of Physiology-Paris* 100:70–87.
- Fuchs, Peter. 2015. *DAS Sinnsystem: Prospekt einer sehr allgemeinen Theorie*. Weilerswist: Velbrück Wissenschaft.
- Fuhse, Jan A. 2022. How Can Theories Represent Social Phenomena? *Sociological Theory* 40:99–123.
- Heins, Conor et al. 2022. pymdp: A Python library for active inference in discrete state spaces. *Journal of Open Source Software* 7:4098.

- Kastel, Natalie, Casper Hesp, K. Richard Ridderinkhof und Karl J. Friston. 2022. Small steps for mankind: Modeling the emergence of cumulative culture from joint active inference communication. *Frontiers in Neurorobotics* 16:944986.
- Luhmann, Niklas. 1991. *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie*. 4. Auflage. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Luhmann, Niklas. 1994. *Die Gesellschaft der Gesellschaft*. 1. Band. 11. Auflage. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Luhmann, Niklas. 2018. *Die Wissenschaft der Gesellschaft*. 8. Auflage. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Nehrer, Samuel William, Jonathan Ehrenreich Laursen, Conor Heins, Karl Friston, Christoph Mathys und Peter Thestrup Waade. 2025. Introducing ActiveInference.jl: A Julia Library for Simulation and Parameter Estimation with Active Inference Models. *Entropy* 27(1):62. <https://doi.org/10.3390/e27010062>
- Parr, Thomas, Giovanni Pezzulo und Karl J. Friston. 2022. *Active Inference: The Free Energy Principle in Mind, Brain, and Behavior*. Cambridge, Massachusetts; London: The MIT Press.
- Pearl, Judea. 1988. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*. Burlington, MA: Morgan Kaufmann.
- Pitliya, Riddhi J., Ozan Catal, Toon Van de Maele, Corrado Pezzato und Tim Verbelen. 2025. Theory of Mind Using Active Inference: A Framework for Multi-Agent Cooperation. <http://arxiv.org/abs/2508.00401>
- Priorelli, Matteo, Federico Maggiore, Antonella Maselli, Francesco Donnarumma, Domenico Maisto, Francesco Mannella, Ivilin Peev Stoianov und Giovanni Pezzulo. 2024. Modeling motor control in continuous-time Active Inference: a survey. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 16(2):485–500. <https://doi.org/10.1109/TCDS.2023.3338491>
- Ramstead, M.J.D., Albarracin, M., Kiefer, A., Klein, B., Fields, C., Friston, K., Safron, A., 2024. The inner screen model of consciousness: applying the free energy principle directly to the study of conscious experience. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.02205>
- Smith, Ryan, Karl J. Friston und Christopher J. Whyte. 2022. A step-by-step tutorial on active inference and its application to empirical data. *Journal of Mathematical Psychology* 107:102632.
- Tomasello, Michael. 2021. *Becoming Human: A Theory of Ontogeny*. Cambridge, Massachusetts; London: The Belknap Press of Harvard University Press.
- Tomasello, Michael. 2024. *Die Evolution des Handelns: von den Eidechsen zum Menschen*. Berlin: Suhrkamp Verlag.
- Waldherr, Annie, Martin Hilbert und Sandra González-Bailón. 2021. Worlds of Agents: Prospects of Agent-Based Modeling for Communication Research. *Communication Methods and Measures* 15:243–254.
- Zermelo, Ernst. 2010. *Collected Works: Gesammelte Werke*. Hrsg. Heinz-Dieter Ebbinghaus, Craig G. Fraser und Akihiro Kanamori. Heidelberg: Springer.