

SEBASTIAN VEHLKEN

SCHWARM-WERDEN.
EPISTEMISCHE REKURSIONEN SELBSTORGANISIERENDER
KOLLEKTIVE

Beschäftigt man sich als Medien- und Kulturwissenschaftler mit einer Mediengeschichte von Schwärmen, ergibt sich daraus wohl nur ein eher geringer Beitrag zu aktuellen Schwarmforschungen, zu einem sehr viel größeren Teil aber zur Schwarmforschungs-Forschung. Dieser Text wird sich daher weniger mit den neuesten Erkenntnissen in Bezug auf die Selbstorganisation biologischer Kollektive beschäftigen, als vielmehr drei Szenen einer Mediengeschichte *jeweils neuester* Befunde biologischer Schwarmforschungen seit 1900 versammeln. Mit anderen Worten wird es also um zumeist hoffnungslos veraltete Forschungsergebnisse gehen. Gerade diese jedoch können in medienhistorischen Perspektive von Wert sein für das zentrale Anliegen dieses Bandes – für eine Klärung des Verhältnisses von Automatismen, Technologien und der Konstitution verschiedener Register eines ‚Selbst‘-Begriffs.

Die Frage nach den Funktionsweisen von Schwärmen appelliert in ganz direkter Weise an ein Wissensfeld um Automatismen. Schwärme werden – seit sich in den 1950er Jahren im Zuge der Kybernetik ein Vokabular für derartige Prozesse herausbildet – als prototypische Phänomene kollektiver Selbst-*Organisation* beschrieben. Die Faszination für Schwärme speist sich geradewegs aus jenem scheinbaren Paradox, dass sich ungeplante und ad hoc auf lokaler Ebene ablaufende Bewegungen von Schwarmtieren zu kohärenten, funktionalen und hochflexiblen Kollektivstrukturen zusammensetzen. Und genau diese Eigenschaft – „getting a bunch of small cheap dumb things to do the same job as an expensive smart thing“¹ – machte Schwarmprinzipien schließlich auch für technische Anwendungen interessant. Schwarmforschungen versuchten mithin stets, das ominöse ‚Selbst‘ von Selbstorganisationsprozessen zu ergründen – und dies schon lange, bevor dieser Begriff überhaupt geprägt wurde. Dieser Suche nach dem ‚Selbst‘ von Schwärmen wird dieser Beitrag anhand dreier medienhistorischer Szenen nachspüren, die dazu – so könnte man formulieren – wiederum jeweils ein anderes ‚Register des Selbst‘ ziehen.

Die erste Szene spielt im Morast schottischer Moore, wo der Naturforscher Edmund Selous zu Beginn des 20. Jahrhunderts den Organisationsweisen von Vogelschwärmen nachspürt. Als Beobachter ist er konfrontiert mit den un-

¹ J. J. Corner/G. B. Lamont, „Parallel Simulation of UAV Swarm Scenarios“, in: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, S. 355-363: 335.

durchschaubaren – man könnte sagen – *Automatismen* ihrer Koordination und postuliert (im Einklang auch mit anderen Forschern) eine ‚psychologische‘ Instanz des ‚Selbst‘ von Schwärmen. Man könnte dies auf den Begriffe der *Selbst-Setzung* bringen. Die zweite Geschichte handelt von *Automatisierungen* im Bereich experimentaltechnischer Schwarmforschungen. Hier wird versucht, durch technische Beobachtungs- und Analyseverfahren dem Datengestüber von Schwärmen ein systematisierbares und mathematisierbares Wissen abzutrotzen. Diese Forschungen setzen an, jene älteren Instanzen des ‚Selbst‘ – entwickelt in halb-wissenschaftlichen Fachbereichen wie der frühen Tierpsychologie und gestützt durch wenig belastbare Theorien zu sozialen Instinkten – in formalisierbare Mikrorelationen zu zerlegen. Kurz: Sie nehmen eine *Selbst-Löschung* vor. Dabei sehen sie sich jedoch mit einem – so die Ichthyologin Julia Parrish – ‚technologischen Morast‘ konfrontiert.² Denn Schwärme stören als Objekte der Forschung durch ihre ständigen Bewegungen in Raum und Zeit stets auch die Verfahren wissenschaftlicher Objektivierungsversuche. In der dritten medienhistorischen Szene treten synthetische Simulationsverfahren neben solche Analyseversuche. Im Zuge dessen – und dies wäre die zentrale These dieses Beitrags – lässt sich eine rekursive Verschränkung von Prozessen der Selbstorganisation – die verhaltensbiologische Forschungen zu beschreiben versuchen – mit selbstorganisierenden Prozessen computertechnischer Entwicklung erkennen. Ein rudimentäres Wissen biologischer Schwarmforschungen inspiriert neuartige Computerprogrammierungs-Prinzipien und digitale Visualisierungsverfahren, deren Anwendung in der biologischen Forschung Schwärme erst hinreichend beschreibbar machte. Mit Multiagentensystemen (MAS), die sich auf ein (schwarm-)biologisches Wissens gründen, können Schwärme ab den 1990er Jahren im Rahmen einer neuen Episteme der Computersimulation erforscht werden.³ Schwärme vollziehen in den letzten circa 25 Jahren mithin ein ‚Medien-Werden‘⁴ von Objekten der Wissenschaft hin zu wissenschaftlich einsetzbaren Verfahren eigener Dignität. Im Zuge dieses Medien-Werdens können sie nur mehr als *Zootechnologien* verstanden werden – als biologisch-computertechnische Hybride, die wiederum ganz ei-

² Vgl. Julia K. Parrish/William M. Hamner/Charles T. Prewitt, „Introduction – from Individuals to Aggregations. Unifying Properties, Global Framework, and the Holy Grails of Congregation“, in: Julia K. Parrish/William H. Hamner (Hg.), *Animal Groups in Three Dimensions*, Cambridge, MA, 1997, S. 1-14.

³ Vgl. allgemein z. B. Peter Galison; „Computer simulations and the trading zone“, in: ders./D. J. Stump (Hg.), *The Disunity of Science. Boundaries, Contexts, and Power*, Stanford, CA, 1996, S. 118-157. Bezogen auf MAS vgl. z. B. Robert Axelrod, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton, NJ, 1997 und Eric Bonabeau, „Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems“, in: *PNAS* 99, Suppl. 3 (14. Mai 2002), S. 7280-7287.

⁴ Joseph Vogl, „Medien-Werden: Galileos Fernrohr“, in: Lorenz Engell/Bernhard Sieget/ Joseph Vogl (Hg.), *Mediale Historiographien*, Weimar, 2001, S. 115-123.

gene Erkenntnishorizonte und Erkenntnisbedingungen mit sich bringen.⁵ Sowohl ihre Erforschung als biologische Kollektive als auch ihre Anwendung als Multiagentensysteme in einer Vielzahl von Bereichen – von der Logistik bis zur Finanzmarktsimulation, oder von der Epidemiologie bis hin zu Robotersystemen – beruht auf einer Art rekursiven *Selbst-Findung*. Diese Prozesse der Selbstsetzungen, Selbstlösungen und Selbstfindungen sollen im Folgenden näher untersucht werden als jene drei Register, auf deren Basis die Konzeptualisierung von Schwärmen als selbstorganisierende Kollektive erst hatte entwickelt werden können.⁶

1. Selbst-Setzungen

Noch in den 1920er Jahren bilden wissenschaftliche Verhaltensstudien von Tieren in ihrem natürlichen Habitat absolute Ausnahmen. Nur sehr wenige akademisch ausgebildete und institutionell angebundene Biologen wie etwa der amerikanische Insektenforscher William M. Wheeler propagierten bereits um die Jahrhundertwende vehement den Wert von Studien am ungestört lebenden Objekt – und zwar dezidiert abseits von Laborstudien oder gar anatomischen Vivisektionen.⁷ Vor allem in Großbritannien pflegt seinerzeit jedoch ein Schlag natur- und naturwissenschaftlich interessierter Privatgelehrter, sogenannte *amateurs*, mit teils großem Engagement die Kunst der Tierbeobachtung.⁸ Ähnlich wie der Protagonist dieser ersten Schwarmgeschichte, der Naturforscher Edmund Selous, waren die *amateurs* oftmals wildniserprobte Waidmänner. Selous selbst hatte sich als konvertierter Großwildjäger um die Jahrhundertwende ganz der Ornithologie verschrieben und agitierte in seinen Texten seither vehement gegen jene „poor army of killers“.⁹ Ganz im Gegensatz dazu notierte das *Vanity Fair Album* 1894 über seinen Bruder Frederick Selous, den damals berühmtesten *Big Game Hunter* des British Empire: „[E]lephant, rhinoceros, lion, hippopotamus, giraffe, zebra, quagga, hyeana,

⁵ Vgl. hierzu Sebastian Vehlken, „Fish & Chips. Schwärme – Simulation – Selbstorganisation“, in: Eva Horn/Lucas Gisi (Hg.), *Schwärme – Kollektive ohne Zentrum. Eine Wissensgeschichte zwischen Leben und Information*, Bielefeld, 2009, S. 125-162.

⁶ Teile dieses Textes sind – unter einem anderen Fragefokus – in ähnlicher und ausführlicherer Form bereits erschienen in Sebastian Vehlken, „Schräge Vögel. Vom *Technological Morass* in der Ornithologie“, in: Stefan Rieger/Manfred Schneider (Hg.), *Selbstläufer/Leerläufer. Regelungen und ihr Imaginäres im 20. Jahrhundert*, Zürich, Berlin, 2012, S. 139-162.

⁷ Vgl. z. B. Abigail J. Lustig, „Ants and the Nature of Nature in Forel, Wasmann, and Wheeler“, in: Lorraine Daston/Fernando Vidal (Hg.), *The Moral Authority of Nature*, Chicago, IL, 2004, S. 282-307.

⁸ Vgl. Richard W. Burckhardt, *Patterns of Behavior. Konrad Lorenz, Niko Tinbergen and the Founding of Ethology*, Chicago, IL, 2005, S. 69. Neben Edmund Selous sind hier v. a. Henry E. Howard, Frederick B. Kirkman und Edward Armstrong zu nennen. Als Ausnahmen – weil im akademischen Kontext situiert – und einflussreich über die britische Ethologie hinaus sind zudem der Zoologe Julian Huxley und v. a. C. Lloyd Morgan.

⁹ Edmund Selous, *Bird Watching*, London, 1901, S. 335.

koodoo, hartebeest, duiker, oribi, klipspringer, tsessbe, and antelope of all kinds; many of which animals are now all but extinct, having been killed off by railways, by civilisation and by Selous.“¹⁰ Ironischerweise ist heute eines der größten Reservate in Tansania nach ihm benannt.

Edmund Selous hingegen versucht seinen Lesern die Faszination detaillierter Naturbeobachtungen zu vermitteln. Der Naturforscher ist – so wie Selous ihn beschreibt und selbst prototypisch verkörpert – der intelligentere Jäger: Sein Jagdtrieb hat sich transformiert in ein wissenschaftliches Interesse am Leben, bedarf aber weiterhin einer ‚abenteuerlichen‘ Herangehensweise. Und sie ist zu unterscheiden von späteren, systematischen ethologischen Feldforschungen wie bei Konrad Lorenz oder Nikolas Tinbergen und ihren diagrammatischen Techniken.¹¹ Anfang des 20. Jahrhunderts stehen hierfür weder ein fachwissenschaftliches Instrumentarium noch standardisierte Verfahren der Beobachtung und Notation bereit. Wie verhält sich also ein früher Verhaltensforscher zum Verhalten? Die Antwort: Er setzt sich hin und schreibt.

Mit einer Vorliebe für schottische Moorlandschaften verbringt Selous Stunden, Tage und Wochen mit der minutiösen Beobachtung des Verhaltens verschiedener wild lebender Vogelspezies. ‚Minutiös‘ ist dabei durchaus im Wortsinn zu verstehen, denn er notiert – kombiniert mit genauen Tageszeitangaben – alles, was er beobachtet, direkt vor Ort in ein „Observational Diary of Habits“.¹² Dies jedoch ist nicht immer ohne Weiteres möglich, wie der Historiker Richard W. Burckhardt betont:

„One has [...] often to scribble very fast to keep up with the birds, and so must leave a few things to be added.“ Back at his lodgings, he would copy out his notes and elaborate upon them. Later he might add something else if it remained fresh in his memory. He prided himself on recording *all* that he saw.“¹³

Das ornithologische Aufschreibesystem, bestehend aus Augen und Fernglas, Papier und Stift, Akribie und Geduld wird noch ergänzt durch eine ausgeprägte Ausdauer des Verharrens in seinen Verstecken. Verborgen in getarnten Unterschlüpfen, die Selous selbst ‚turf-huts‘ nennt, ist ein Blick aus der Nähe auf ein auch über längere Zeiträume ungestörtes Verhalten seiner Forschungsobjekte garantiert. Daher beobachtet der Beobachter nicht nur ein Objekt, sondern auch sich selbst: Er passt sich mimikryartig seiner Umgebung an, um sich möglichst konsequent aus der Beobachtungsrelation zu streichen, indem er für sein Untersuchungsobjekt im getarnten Unterschlupf unsichtbar wird. Diese Bewegung eines Einswerdens von Beobachtung und Selbstbeobachtung kann man mit Joseph Vogl die „Herstellung einer unabdingbaren Selbstreferenz“

¹⁰ Vgl. Anonymus, „Men of the Day: No. 585: Mr Frederic Courtney Selous“, in: *Vanity Fair Album*, 24 (1894), zit. n. Burckhardt (2005), *Patterns of Behavior*, S. 77.

¹¹ Vgl. ebd.

¹² Vgl. z. B. Edmund Selous, „An Observational Diary of the Habits – Mostly Domestic – of the great Crested Grebe (*Podiceps Cristatus*)“, in: *Zoologist*, 5 (1901), S. 161-183.

¹³ Ebd., S. 173.

nennen.¹⁴ Denn der Einsatz differierender sinnesphysiologischer und sich nach und nach technisch aufrüstender Beobachtungsanordnungen und Medien in der Schwarmforschung lokalisiert nicht nur sein Objekt (oder Nicht-Objekt), sondern zugleich auch seinen Beobachter in je spezifischer Weise. Hinzu kommt aber noch, dass sich im Zuge dieser Selbstreferenzialisierung auch ein Potenzial und eine Potenzierung von Beobachtungsanordnungen ergeben können. Damit haben sich innerhalb der Schwarmforschung bis heute ganz unterschiedliche Begriffe, Vorstellungen und Fokussierungen ergeben in Bezug auf das, was Schwärme ausmacht – abhängig von den jeweils verwendeten Medientechniken. Schwärme werden so in einer Mediengeschichte der Schwarmforschung immer wieder neu und anders konzeptualisiert und verstanden. Vogl fasst diese Bewegung unter seinen Begriff des Medien-Werdens, bei dem sich „[d]ie richtige Beobachtung [...] nur im Konditional des Beobachteten ausdrücken [lasse]“.¹⁵

In einer 1931 erschienenen Publikation fasst Selous seine Erkenntnisse über das synchrone, kollektive Flugverhalten von Vogelschwärmen zusammen. Aufgrund seiner für die Schwarmbeobachtung völlig unzureichenden technischen Ausstattung reichert er diese jedoch mit recht spekulativen Reflexionen über die zugrunde liegenden Automatismen von Kollektivmanövern an. Das Imaginäre der Regelung von Schwarmdynamiken kommt dort ins Spiel, wo Aufschreibesysteme an ihre Grenzen kommen. Denn Schwärme bewegen sich „more and faster than the eye can take it in“ – sie sind nicht zu fassen mit Selous' Art der Beobachtung.¹⁶ Was der Naturforscher erkennt ist, dass es anscheinend keine übergeordneten Führungs- und Leitindividuen gibt, die die Schwarmdynamiken steuern. Diese werden als Erklärung für die Regelung auch von Fisch- und Vogelschwärmen immer wieder diskutiert. Vielmehr greift er auf ein Strukturmodell zurück, das zugleich die Dynamik der Vogelschwärme ansatzweise visualisiert. Selous plädiert dafür, sich Schwärme als ein einziges Wesen mit netzförmiger Struktur vorzustellen:

The whole group acts thus as though it were a single bird. If a fishing-net, stretched on the ground, were to go up and float away, the one has to imagine every knot of every mesh to be a bird, and everything between the knots invisible, to have a perfect simile of what has just taken place.¹⁷

Diese Ebene, die Schwarmvögel zu einem ‚Netz-Selbst‘ zusammenführt, kann sich Selous nur mittels einer übersinnlich schnellen Instanz vorstellen. Und so fragt er schon im Titel besagter Schwarmpublikation *Thought Transference (Or What?) in Birds* keck, ob diese nicht per Gedankenübertragung vonstattengehen könne. Selous postuliert gewissermaßen eine Kommunikation auf einer noch nicht hinlänglich erforschten, aber anzunehmenden Ebene psy-

¹⁴ Vogl (2001), Medien-Werden, S. 116.

¹⁵ Ebd., S. 117.

¹⁶ Edmund Selous, *Thought Transference (Or What?) in Birds*, London, 1931, S. 94.

¹⁷ Ebd.

chisch vermittelter Automatismen. Auf Basis vorbewusster Prozesse könne hier blitzschnell kommuniziert und aufeinander reagiert werden, ungestört von einer rationalen Ebene der Strukturplanung und unbehelligt von zeitintensivem Reflektieren. Ähnlich argumentiert in den USA der Naturforscher William J. Long, der 1919 eine Textsammlung unter dem Titel *How Animals Talk* veröffentlichte, in der er sich mit den vermeintlich ‚telepathischen‘ Fähigkeiten von Tieren auseinandersetzt. Long behauptet, durch das Zusammenspiel aller biologischen Sinne ergebe sich der „Super-sense“ eines „All-Mind“. Auf dieser ‚übersinnlichen‘ Ebene sei das dynamische Globalverhalten von Vogelschwärmen somit das Resultat eines letztlich auch physiologisch herleitbaren Übertragungsphänomens. Für dieses fehlten, so Long, lediglich noch die entsprechenden Messinstrumente.¹⁸

Die Idee solcher „Gedankenwellen“ bei Vögeln – darauf weist die Wissenschaftsjournalistin Gail Vines im Jahr 2004 hin – sollte ohnehin auch im Zusammenhang gesehen werden nicht nur mit populären zeitgenössischen, pseudowissenschaftlichen Theorien der Gedankenübertragung zwischen Menschen, sondern auch mit den zu Beginn der 1920er Jahre aufkommenden neuen Medien drahtloser Signalisierung wie Radio oder Radar und verschiedenen, heiß diskutierten physikalischen Wellentheorien.¹⁹ Zudem fehlen zu dieser Zeit natürlich auch noch Begriffe wie Information und Informationsübertragung. Auch aus diesem Grund greifen die *amateurs* auf die Idee der Gedankenübertragung zurück. Im Kontext dieser frühen Beschreibungsversuche von Schwärmen kann somit lediglich eine Art von Psychologisierung eines früheren Glaubens an göttliche, wunderbare oder zumindest von außen einwirkende Regelungsinstanzen und seine Projektion in die Schwarmforschung festgestellt werden. Schwarmverhalten wird zurückgeführt auf Automatismen *innerhalb* des Schwarms und zwischen den Schwarm-Individuen, deren genauere ‚Natur‘ mangels geeigneter Medientechniken noch nicht erklärt oder quantifiziert werden könne.

2. Selbst-Löschungen

Das Problem der Datengewinnung beginnt fast zeitgleich zu Selous' Gedankenwellen-Theorien auf die Agenda im Labor arbeitender Schwarmforscher zu rücken. Da die Forschung an Vogelschwärmen kaum in experimentellen Laboranordnungen umsetzbar ist, sind es Fischschwarmforscher, die um 1930 beginnen, mittels technischer Beobachtungsverfahren die augenscheinlichen Automatismen der Schwarmorganisation in Verhältnisse von identifizierbaren Einflussvariablen und deren Parametern zu überführen. Dabei geht es ihnen

¹⁸ Vgl. William J. Long, *How Animals Talk, and Other Pleasant Studies of Birds and Beasts*, Rochester, 2005 [1919], besonders S. 102-125.

¹⁹ Vgl. Gail Vines, „Psychic Birds (Or What?)“, in: *New Scientist*, 182 (2004), S. 48-49.

gerade um die Löschung parawissenschaftlicher und diffuser tierpsychologischer Annahmen, die in früheren Schwarmforschungen noch das unifizierende ‚Selbst‘ von Schwärmen erklären sollten. Forscher wie Albert E. Parr und Charles M. Breder in den USA oder Dimitri Radakov in der UdSSR untersuchen in Forschungsaquarien etwa die interindividuellen Verhaltensweisen von Fischschwärmen. Sie ermitteln mit immer ausgefeilteren Methoden Reaktionsgeschwindigkeiten, typische Abstände und Musterbildungen, und versuchen nur Variablen zu involvieren, die auf wissenschaftlich gesicherten Annahmen beruhen. Nicht mehr hypothetische Super-Sinne werden veranschlagt, sondern z. B. die Sichtweite und der Sehwinkel von Schwarmfischen oder ihr Seitenlinienorgan experimentell erforscht, um daraus auf die mögliche Anzahl von Nachbarindividuen zu schließen, die überhaupt Einfluss auf ihr Verhalten ausüben könnten. Schon hier wird die Annahme formuliert, dass es nur ganz wenige Automatismen sein könnten, die für eine Sicherung der Kohäsion und der abgestimmten Reaktion selbst größerer Schwärme auf Umwelteinflüsse wie Angriffe, Strömungen etc. ausreichen könnten. Albert Parr nennt etwa eine sofortige Attraktion bei Sichtkontakt, eine paralleles Sich-Ausrichten der Schwarmindividuen zueinander, und die Einnahme eines artspezifischen Abstandes. Gemeinsam mit einer „automatically transmitted tendency to turn inwards“²⁰, die auf dem Bestreben der Schwarmindividuen beruhe, möglichst nicht am Rand des Schwarms – also nur mit Nachbarn auf einer Seite – zu schwimmen, ergebe sich ein kollektives, dynamisches Equilibrium: der Schwarm. Fischschwärme werden bei Parr zu quasi mechanisch gekoppelten Tiermaschinen, zu Automaten, in denen auf lokaler Basis Informationen verarbeitet und in eine Gesamtmechanik überführt werden. Charles Breder wird dann zu Beginn der 1950er Jahre an Parrs Konzepte anknüpfen und sie – unter Einfluss kybernetischer und informationstheoretischer Überlegungen – mathematisch zu formalisieren versuchen.

Zu dieser Zeit tritt die – sich nun langsam auch als Terminus etablierende – Selbstorganisation von Schwärmen auch bei Kybernetikern selbst auf die Agenda. Der Physiologe Ralph Gerard nutzt gar eine etwas unorthodoxe Methode, um den simultanen Richtungswechsel eines Vogelschwarms zu messen. Er synchronisiert sein Auto mit dessen Geschwindigkeit von etwa 35 mph und berichtet auf einer der Macy-Konferenzen: „A flight of birds was going along parallel to my car, so I could time them. [...] As I remember, I calculated there was less than five milliseconds possible time for cueing from one to another.“²¹ Ornithologen wie Frank Heppner ist diese Messmethode aber dann

²⁰ Albert E. Parr, „A Contribution to the Theoretical Analysis of the Schooling Behavior of Fishes“, in: *Occasional Papers of the Bingham Oceanographic Collection*, 1 (1929), S. 1-32: 16.

²¹ Herbert G. Birch, „Communications in Animals“, in: Claus Pias (Hg.), *Cybernetics /Kybernetik. The Macy-Conferences 1946-1953*, Band 1: *Protokolle*, Zürich, Berlin, 2003, S. 446-528: 468. Vgl. ursprünglich Ralph W. Gerard, „Synchrony in Flock Wheeling“, in: *Science*, 97 (1943), S. 160-161.

doch nicht valide genug: „It is not clear how he made such a precise determination.“²² Heppner systematisiert die Vogelschwarmforschung mit einem Text von 1974, in dem er eine Typologie verschiedener Flugformationen von den V-Formationen kleiner Gänsescharen bis hin zu den kugel-elliptischen Großkollektiven z. B. von Staren aufstellt. Er diskutiert mögliche Funktionen des Schwarmverhaltens, etwa die theoretischen Überlegungen zu und Widerlegungen von aerodynamischen Vorteilen aus Studien der 1950er und 1960er Jahre.²³ Was ihn und andere Forscher umtreibt, ist die Art der dynamischen Selbstorganisation von Schwärmen. Mittels informationstechnischer Zugänge wird nicht nur zu quantifizieren versucht, wie viele und auf welche Weise Bewegungsinformationen mithilfe welcher Sinnesdatenkanäle und aufgrund welcher Informationsquellen zwischen Schwarm-Individuen weitergegeben werden, sondern auch, wie diese Weitergabe sich in koordinierten Manövern niederschlägt. Denn Skalierungsfragen, so zeigen einige Studien, scheinen eine große Rolle zu spielen: Je dichter die Schwärme, desto präziser und schneller werden etwa die Manöver.

Doch in der Fischeschwarmforschung werden erst ab Mitte der 1960er, in der Ornithologie gar erst ab Ende der 1970er Jahre technische Verfahren eingesetzt, die eine dreidimensionale Aufzeichnung von Schwärmen mittels stereoskopischer Serienfotografie oder mittels Film- und später Videokameras angehen. Frank Heppner bezieht dazu Posten nicht im Moor wie Selous oder auf dem Highway wie Gerard, sondern am International Airport von Vancouver. Denn hier, so Heppner seien „flocks [...] a particular hazard to turbine-powered aircraft.“²⁴ Zumeist werden dabei Schwärme fotografiert, die in loser Organisation von Schlaf- zu Futterplatz unterwegs sind, doch von Zeit zu Zeit werden auch Raubvogelangriffe beobachtet, auf welche die Schwarmstruktur mit instantaner Zusammenballung, Geschwindigkeitszunahme und größerer Bewegungs- und Ausweichdynamik reagiert. Telemetrisch genau vermessen kann man jedoch nur die brav zur Futterstelle oder gen nächstes Flugzeugtriebwerk ziehenden Kollektive, deren Dichte, Abstände, relativen Richtungsänderungen, Geschwindigkeit etc. evaluiert werden. Dies gilt besonders, zumal Heppners Beobachtungsvorrichtung völlig unflexibel auf Stativen installiert ist und damit kein dynamischer, über einen großen Ausschnitt des Himmels beweglicher Schwarm avisiert oder der Bildausschnitt mit diesem mitbewegt werden kann. Es verschiebt sich mithin lediglich das Datenproblem: Statt schnell schreibend unter einem Gestöber nicht aktualisierter Vogelschwarmdaten zu sitzen, sind Schwarmforscher nun mit technischen Medien konfrontiert. Diese arbeiten einerseits extrem reduktionistisch, etwa aufgrund der erwähnten, sehr beschränkten Bildausschnitte. Andererseits aber ziehen sie selbst

²² Frank Heppner, „Avian Flight Formations“, in: *The Condor* 45, 2 (1974), S. 160-170: 164.

²³ Vgl. ebd., S. 160-170.

²⁴ Peter F. Major/Lawrence M. Dill, „The 3D Structure of Airborne Bird Flocks“, in: *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 4 (1978), S. 111-122: 112.

weitere Datengestöber nach sich, da bereits Schwärme mit wenigen Individuen über sehr kurze Zeit hinweg bereits eine schier unbeherrschbar große Menge an Bewegungsdaten produzieren.

Auch hier ergeben sich die Beobachtungs- und Aufzeichnungsverfahren erst in Auseinandersetzung mit verschiedenen Störmomenten. Der Output technisch gestützter Schwarmforschungen besteht wiederum in einem teils unüberschaubaren Wust an Daten, der schließlich erst durch eine automatisierte Auswertung diese Umschrift von Schwärmen handhabbar gemacht werden kann. Nur gilt dabei laut Heppner bis in die 1980er Jahre das Dilemma, dass es zwar Lowtech-Lösungen gebe, für die aber sehr zeitaufwendige manuelle Datenreduktionsverfahren durchgeführt werden müssten. Automatische Hightech-Systeme indes überstiegen meist den verhaltensbiologischen Kostenrahmen und seien schwer erhältlich.²⁵ Der Morast der schottischen Moore wiederholt sich im „technological morass“²⁶ optischer Beobachtungsmedien und experimenteller Forschungsanordnungen.

Erst in jüngster Zeit kommt es wieder zu interessanten Applikationen im Bereich empirischer Schwarmforschungen. So entwickelten italienische Forscher einen Bildanalysealgorithmus, der die automatische Auswertung und Vermessung von digitalen Fotografien jener berühmten Starenschwärme leistet, die seit einigen Jahren in immer größerer Zahl über Rom kreisen.²⁷ Hier werden bis zu 2700 Exemplare erfasst, und zwar erstmals in jenen dynamischen Bewegungen, die für Fragen der Selbstorganisation und Synchronisation von Bewegungen gerade interessanter sind. Mittels Stereo-Serienfotografie erzeugen die Forscher Sequenzen von acht Sekunden Länge bei zehn Bildern pro Sekunde, und rekonstruieren mit ihrer Software die individuellen Bewegungen von 80 bis 88 Prozent der beobachteten Einzelvögel. Einschränkend muss jedoch gesagt werden, dass selbst hier nur etwa 50 Prozent der aufgenommenen Sequenzen überhaupt verwertbar sind. „Optical resolution is the main bottleneck“ – sei es aufgrund von Kontrastmängeln, oder weil Schwärme aus dem Schärfebereich der Optik herausfliegen. Oder sei es, da es sich um Kollektive mit mehr Individuen handelt, als die Software identifizieren kann.²⁸ Dennoch erhärten ihre Daten z. B. die These, dass sich die Schwärme ständig völlig neu durchmischen oder dass die Orientierung von Staren auf Basis einer Nachbarschaftstopologie von maximal sieben anderen Individuen basiert, wobei entgegen lange gültigen Annahmen deren metrische

²⁵ Vgl. Frank Heppner, „The Structure and Dynamics of Bird Flocks“, in: Parrish/Hamner (1997), *Animal Groups in Three Dimensions*, S. 68-89: 85.

²⁶ Parrish/Hamner/Prewitt (1997), *Animal Groups in Three Dimensions*, „Introduction“, S. 9.

²⁷ Andrea Cavagna et al., „The STARFLAG Handbook on Collective Animal Behavior: Part I, Empirical Methods“, in: *arXiv E-print*, (2008), S. 27, online unter: <http://arxiv.org/abs/0802.1668>, zuletzt aufgerufen am 31.07.2011.

²⁸ Vgl. die eingehende Beschreibung des technischen Verfahrens ebd., S. 19-27.

Nähe zueinander keine Rolle spielt.²⁹ Damit ist eine weitere Eigenschaft des Medien-Werdens von Schwärmen angesprochen – eine *Denaturierung der Sinne*. Wenn man Schwärme erforschen will, ist die Entwicklung medien-technischer Perspektiven vonnöten, die nicht einfach Extensionen des menschlichen Blicks oder der menschlichen Sinne sind. Die Beobachtung von Schwärmen ist zuvorderst abhängig von einer Beschäftigung mit den medien-technischen Materialitäten, die sie erst zu erkennbaren, vermessbaren und regelhaft beschreibbaren Strukturen werden lassen. Erst durch eine solche Reflexion werden sie als Objekte des Wissens generiert. Diese Medientechniken, so Joseph Vogl, verlängern nicht etwa die Sinne, sondern sie

erschaff[en] vielmehr die Sinne neu, definier[en] das, was Sinneswahrnehmung und Sehen bedeutet, und mach[en] aus jedem gesehenen Datum ein konstruiertes und verrechnetes Datum, [...] [sie] produzier[en] schließlich Phänomene und ‚Nachrichten‘, die allesamt den Stempel der Theorie tragen und mit jeder sinnlichen Evidenz ein Verfahren zur Errechnung dieser Evidenz übermitteln.³⁰

Die Frage nach dem ‚Selbst‘ von Schwarm-Kollektiven findet sich im Zuge ihrer experimentellen und analytischen Durchmusterung damit aufgelöst in Mikrorelationen, die erst durch Techniken der Automatisierung überhaupt aus dem technologischen Sumpf empirischer Datengestöber extrahierbarer wurden. Schwärme werden in diesem Kontext bereits als biotechnische Hybride adressiert, etwa indem sie als *Sensory Integration Systems* beschrieben werden.³¹ Die ‚Teilchen‘ dieser Systeme nehmen Bewegungen ihrer Nachbarn wahr, richten ihre Eigenbewegung daraufhin aus und initiieren dadurch wiederum bestimmte Bewegungsweisen bei ihren Nachbarn in Raum und Zeit. Die Automatismen ihrer Regelung werden somit letztlich durch Techniken der Automatisierung auf quantifizierbare Ordnungsschemata zurückzuführen versucht – ein Prozess, der jedoch immer wieder an den Unschärfen, Intransparenzen und an den bei Schwärmen anfallenden riesigen Datenmengen scheitert, die es zu verarbeiten gilt.

3. Selbst-Findung

Vielleicht ist es aus diesem Grund wenig verwunderlich, dass – so könnte man es thesenhaft und paradoxierend zuspitzen – Schwarmforschung ihr Beobachtungs- und Datenproblem nur löst, indem sie auf ihr biologisches Forschungsobjekt verzichten lernt und Lösungen an ganz anderen Orten als auf ihren ge-

²⁹ Michele Ballerini et al., „Empirical Investigation of Starling Flocks: A Benchmark Study in Collective Animal Behavior“, in: *Animal Behavior* 76, 1 (2008), S. 201-215: 211.

³⁰ Vogl (2001), *Medien-Werden*, S. 115 f.

³¹ Vgl. Carl R. Schilt/Kenneth S. Norris, „Perspectives on Sensory Integration Systems: Problems, Opportunities, and Predictions“, in: Parrish/Hamner (1997), *Animal Groups in Three Dimensions*, S. 225-244.

nuinen Gebieten sucht. Um 1980 entwickeln japanische Fischforscher bereits agentenbasierte Schwarm-Simulationsverfahren, die anhand von ‚Verhaltenszonen‘ um jedes Individuum und mittels deren so definierten Verhaltensweisen die Entstehung von Schwarmkollektiven in digitalen Computerprogrammen modellieren. Diese Anwendungen bleiben jedoch ohne große Wirkung für die biologische Forschung – als Grund hierfür liegt nahe, dass sie noch ohne grafische Visualisierungsverfahren operieren. Doch gerade im Bereich des Grafik- und Animationsdesigns entstehen – weitgehend unabhängig vom Datenmaterial biologischer Experimentalstudien – kurz darauf Verfahren zur Visualisierung von Vielteilchensystemen, die ganz andere Ziele verfolgen, aber dabei durchaus ähnliche Simulationsmodelle entwickeln. Diese Computersimulationen und speziell ihre aufwendigen Visualisierungen werden bald darauf von Schwarmforschern adaptiert, und so eröffnen sich einige Jahre später völlig neue Zweige der Schwarmforschung. Computerprogrammierer wie Frederick Brooks oder Grafikdesigner wie Craig Reynolds machen sich jedoch zunächst einmal lediglich Gedanken über effiziente, mit wenig Aufwand zu programmierende, flexible und distribuierte Modelle der Softwareentwicklung und der Visualisierung.³² Objektorientierte Programmiersprachen spielen in diesem Dispositiv genau wie agentenbasierte Computersimulationen³³ eine entscheidende Rolle, und für beide Entwickler sind es ‚natürliche, biologische Vorbilder‘, die ihnen als Anleitung, Inspiration und Grundlage dienen.

So entwickelt Reynolds 1987 jenes berühmte *Boids-Modell* künstlicher Schwärme, das mit nur wenigen Basisregeln, einem Richtungsvektor und vor allem mit einem sehr beschränkten Wissen der einzelnen Boids über die Dynamiken des Gesamtschwarms ausgestattet, nach einer Weile des Modulierens bereits sehr realistische kollektive Flugmanöver zeigt.³⁴ Reynolds entwirft seine grafischen „Bird-oid Objects“ – daher die Abkürzung „Boids“ – ursprünglich für die Animation von Fledermausschwärmen im Film *Batman Returns*. Und sein Konzept ist, so gesteht er selbst ein, aus Bequemlichkeit geboren – indem der Animator damit mühsame Programmierarbeit einsparen kann. Anstatt alle Bewegungspfade aller Boids einzeln zu kontrollieren (und dabei Kollisionen und ‚unnatürliche‘ Pfade in jedem Frame auszuschließen), werden derartige Regelungsprozesse nun bewusst ins Systemverhalten – also in den

³² Vgl. William T. Reeves, „Particle Systems – A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects“, in: *ACM Transactions on Graphics* 2, 2 (1983), S. 91-108. Vgl. Craig W. Reynolds, „Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model“, in: *Computer Graphics* 21, 4 (1987), S. 25-34: 27.

³³ Agentenbasierte Computersimulationen (ABM) folgen einem Programmierprinzip, das einzelnen Agenten bestimmte Bewegungs- und Interaktionsfähigkeiten und Verhaltensziele zuschreibt und diese dann innerhalb einer Simulationsumwelt mit bestimmten Umweltregeln oder simulierten physikalischen Begebenheiten ‚aufeinander los lässt‘. So können potenzielle (kritische) kollektive Entwicklungsdynamiken getestet werden. Ein verbreitetes Anwendungsbeispiel wäre etwa die Verkehrsforschung, die mittels ABM-Phänomenen wie etwa dem ‚Stau aus dem Nichts‘ nachgeht.

³⁴ Ebd., S. 25-34.

Bereich der Automatismen – verschoben. Der Designer werde, so Reynolds, im Zuge dessen zu einer Art ‚Meta-Animator‘. Dieser lege nicht mehr direkt die Bewegungen seiner Animation fest, sondern nur noch Verhaltensparameter, die dann in der *runtime* des Programms zu Bewegungen führen – seien es die gewünschten oder auch ganz unerwartete. Methodologisch wird hier also nicht mehr versucht, die Selbstorganisation von Schwärmen analytisch zu zerlegen. Vielmehr wird versucht, ähnliche Selbstläufereffekte in Computersimulationen zu erzeugen, indem man haufenweise Szenarien mit (bestenfalls) systematisch variierten Parametereinstellungen produziert, diese miteinander vergleicht und nach und nach die Durchläufe mit den gewünschten Systemverhaltensweisen identifiziert. Dies funktioniert bei Kollektivprozessen, die so aussehen wie bei biologischen Schwärmen, erstaunlich gut – und so spricht Reynolds am Ende seines Boid-Textes selbst den Nutzen seines Modells für wissenschaftliche Studien an:

One serious application would be to aid in the scientific investigation of flocks, herds, and schools. These scientists must work almost exclusively in the observational mode; experiments with natural flocks and schools are difficult to perform and are likely to disturb the behaviors under study. [...] A theory of flock organization can be unambiguously tested by implementing a distributed behavioral model and simply comparing the aggregate motion of the simulated flock with the natural one.³⁵

Und tatsächlich: Wenn man den Ausführungen Steven Levys Glauben schenkt, klingelte schon bald darauf das Telefon, da interessierte Biologen sich nach Reynolds’ Steuerungsalgorithmus erkundigen wollten.

Demgemäß setzen Biologen bald genau nach diesem Prinzip aufgebaute Simulationsmodelle ein, um das Verhalten künstlicher Schwärme ohne die Restriktionen und Störungen des matschigen, von Störungen durchsetzten *real life* in verschiedenen Szenarien zu studieren.³⁶ Und hier wäre auch ein drittes Element des Medien-Werdens von Schwärmen genannt, das laut Vogl in der *Erzeugung eines anästhetischen Feldes* besteht und damit verbunden ist mit einer produktiven Störfunktion:

Der kritische Punkt einer historischen Medienanalyse liegt nicht in dem, was Medien sichtbar, spürbar, hörbar, lesbar, wahrnehmbar machen, er liegt weniger in einer Ästhetik der Daten und Nachrichten, sondern in der anästhetischen Seite dieses Prozesses.³⁷

Der technische Blick auf Schwärme dokumentiert immer auch schon das Verhältnis beziehungsweise die Differenz von Sichtbarem und Unsichtbarem. Und dies ist der Einsatzpunkt, an dem ab den 1990er Jahren mit agentenba-

³⁵ Ebd., S. 32.

³⁶ Vgl. überblickshaft Julia K.Parrish/Steven V. Viscido, „Traffic Rules of Fish Schools: A Review of Agent-Based Approaches“, in: Charlotte Hemelrijk (Hg.), *Self-Organisation and Evolution of Social Systems*, Cambridge, 2005, S. 50-80.

³⁷ Vogl (2001), *Medien-Werden*, S. 118 f.

sierten Computersimulationsverfahren und ihrer ganz eigenen epistemischen Gangart ein nochmals grundlegend anderer ‚Blick‘ auf Schwärme geworfen werden kann.

Wenn Schwarmforschungen unter der Möglichkeitsbedingung von Multiagentensystemen nach einem Prinzip verfahren, dass Bernd Mahr „Verhaltenswissenschaft von Systemen“³⁸ genannt hat, können sie ‚Computorexperimente‘ durchführen, die im *real life* mit biologischen Schwärmen, zumal mit Vögeln, nicht denkbar waren. Sie reinstallieren damit auch gar nicht jenes alte Gespenst der Mimesis, den Versuch einer positivistischen Nachahmung ‚natürlicher‘ Vorbilder. Gerade dadurch, dass sie längst das medientechnische Register gewechselt haben und nach eigenen (z. B. durch die Programmierungs- und Visualisierungskonventionen, Datenfilterverfahren und Komprimierungen definierten) Regeln verfahren, muss man im Fall agentenbasierter Simulationsverfahren mit Hans Blumenberg eher von ‚Vorahmungen‘ sprechen³⁹, von *Präsentationen*, die einen Möglichkeitshorizont von Prozessen beschreiben. MAS helfen, Forschungsfragen zu entwickeln, Forschungsrichtungen zu justieren und Ideen zu generieren – gerade dadurch, dass sie in gewisser Weise zugleich mehr und weniger zeigen, als in ‚natürlichen Schwärmen‘ je zu sehen wäre. Sie ermöglichen eine Erkenntnisebene mit fiktionalen Elementen, die durch den interaktiven Umgang mit visualisierten Simulationsdurchläufen von Schwärmen in ihren drei Raumdimensionen und ihrer zeitlichen Entwicklung und mittels der Evaluierung verschiedener Simulationsverfahren und -verläufe untereinander erreicht wird, und die zu klassischen Verfahren der Theoriebildung, des Experimentierens und der Modellbildung hinzutritt.

Diese Verfahren ermöglichen auch jene dritte, rekursiv funktionierende Annäherung an die Selbsttechnologien der Schwarmforschung. Eine Rekursion ist informatisch definiert als die Wiederanwendung einer Verarbeitungsvorschrift auf eine Variable, die selbst bereits der Output dieser Vorschrift ist:

Der Variablenwert ändert sich mit jedem Durchlauf der Schleife, und Effekt der Wiederholung ist gerade nicht die Herstellung von Identität, sondern eine vordefinierte Variation. [...] Rekursion verschränkt Wiederholung und Variation mit dem Ziel, ein Neues hervorzubringen,⁴⁰

schreibt Wolfgang Ernst im Rückgriff auf Hartmut Winkler. Sie beschreibt die Eigenschaft eines Programms oder einer Programmroutine, sich selbst aufzurufen zu können – und nicht viel Anderes geschieht in der genannten Ver-

³⁸ Vgl. Bernd Mahr, „Das Mögliche im Modell und die Vermeidung der Fiktion“, in: Thomas Macho/Annette Wunschel, *Science & Fiction*, Frankfurt/M., 2004, S. 161-182.

³⁹ Hans Blumenberg, „Nachahmung der Natur“. Zur Vorgeschichte der Idee des schöpferischen Menschen“, in: ders., *Wirklichkeiten in denen wir leben. Aufsätze und eine Rede*, Stuttgart, 1986, S. 55-103.

⁴⁰ Wolfgang Ernst, „Der Appell der Medien: Wissensgeschichte und ihr Anderes“, in: Ana Ofak/Philipp von Hilgers (Hg.), *Rekursionen*, München, 2010, S. 177-197: 185, mit Verweis auf Hartmut Winkler, „Rekursion. Über Programmierbarkeit, Wiederholung, Verdichtung und Schema“, in: *c't*, 9 (1999), S. 234-240: 235.

schränkung von Biologie und Computertechnik. Schwärme werden hier sozusagen in sich selbst eingesetzt: Von biologischen Schwarmforschungen inspirierte Software-, Simulations- und Visualisierungsmodelle werden reimportiert in die biologische Schwarmforschung, um dort anhand von Computerexperimenten und Simulationen das Verhalten vierdimensionaler, dynamischer Kollektive *in silico* zu studieren und neue Erkenntnisse hervorzubringen. Erst wenn die intransparenten Steuerungs- und Ordnungsstrukturen von Schwärmen nicht mehr nur beschrieben werden (wie in Teil 1) oder aufgeschrieben werden sollen (wie in Teil 2), sondern selbst als Schreibverfahren eingesetzt werden, lässt sich auch das Datenproblem noch einmal neu adressieren: Über die Codierung, über das Schreiben ‚digitaler Schwärme‘ und agentenbasierter Programm- und Simulationsumwelten, die auch die zeitliche Ebene von Schwarmdynamiken mitschreiben können, geschieht eine szenarische Annäherung auch an die Beschreibung biologischer Schwärme. Schwärme als Medien stellen die Mittel bereit, derer es zu ihrer eigenen Beschreibung bedarf. Erst wenn sie zu Schreibverfahren geworden sind, sind sie beschreibbar geworden. Der ‚Kern ihres Selbst‘ ergibt sich dabei aus der in Multiagentensysteme verkleideten Anwendung vordefinierter Variationen, aus denen sich synthetisch jene Automatismen ergeben, welche die Selbstorganisationsfähigkeit von Schwärmen ausmachen – sei es *in vitro* oder *in silico*.

Wenn MAS an die Stelle einer unbeobachtbaren und einer empirischen Datengewinnung gegenüber äußerst widerspenstigen Natur treten, heißt dies für die Schwarmforschung, stets im Möglichkeitsmodus zu operieren – die Annahmen eines Modells können mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit *richtig* sein oder nicht; ein *wahres* Selbst des Schwarms sind sie nie. Doch dafür wird eine Sichtweise auf die Prozesse des Kollektivs gewonnen, die dem ‚Kern ihres Selbst‘ dennoch am nächsten kommt: MAS formalisieren in ihren Programmierungen einerseits die Regeln, Fähigkeiten und Eigenschaften von Agenten und koppeln sie zugleich an operative Bilder: an dynamische Datenbilder, die wiederum intuitive Justierungen der formal-mathematisch beschriebenen Modelle in der Laufzeit des MAS erlauben. Verschiedenste Bewegungsdynamiken in Bezug auf Umweltfaktoren wie Strömungen oder Predatoren, die Zahl auf ein Individuum Einfluss ausübender Nachbarn, die Art der möglichen involvierten Sinne – all diese Konstituenden von Schwärmen können, in die Programmlogik eines MAS übertragen, in ‚virtuellen Laboren‘ das Datengestöber der biologischen Realität umgehen. Der Nachweis ihrer Richtigkeit läuft dabei über ‚interne‘ Vergleiche mit anderen Simulationen, in der Evaluation einer großen Zahl von ‚Runs‘ der einzelnen MAS, und im Einspeisen jener fragmentarischen Daten, die durch technische Beobachtungsmedien und klassische Experimente erzeugt werden. Oder er wird belastbar über erneute Rückkopplungen von Simulation und Experiment – etwa indem sie Roboterfische, die mit in Simulationen gewonnenen Verhaltensparametern programmiert sind, im Forschungsaquarium in echte Schwärme eingesetzt werden

(und die dabei durch Tracking gewonnenen Daten wiederum in ein – somit verbessertes – MAS eingespielt werden).⁴¹

Unter diesen Bedingungen sind Schwärme nur mehr als *Zootechnologien* zu verstehen. Diese denken sich – im Gegensatz etwa zu Biotechnologien oder Biomedien – nicht vom *bios*, also vom Begriff eines ‚beseelten‘ Lebens her, sondern vom *zoé*, vom unbeseelten Leben im Schwarm. Sie beziehen sich damit auf eine Form von Belebtheit, die sich computertechnisch implementieren lässt, da sie in erster Linie auf Bewegungsdynamiken und Bewegungsrelationen beruht. Umgesetzt in digitale, dynamische Bewegungsbilder visualisieren sie ein Steuerungsmodell und Problemlösungsverfahren, das von seiner substanziellen biologischen Abkunft abstrahiert wurde: Schwarmtiere haben sich zu technisch informierten Systemtieren⁴² gewandelt, deren ‚intelligente‘ Organisationspotenziale nun in verschiedensten Gegenstandsbereichen applizierbar sind. Das ‚Selbst‘ der Selbstorganisation ergibt sich in einer rekursiven Verschachtelung, in einer Annäherung von wissenschaftlicher Herangehensweise und ihrem Erkenntnisobjekt oder Erkenntnisproblem. Der unauflöslche, paradoxe Zug an diesem ‚Selbst-Findungsprozess‘ ist somit, dass niemals ein ‚Selbst‘ gefunden wird, wenn Schwärme schließlich mittels Schwarm-Medien erforscht werden – sondern immer nur Prozesse.

Literatur

- Anonymus, „Men of the Day: No. 585: Mr Frederic Courtney Selous“, in: *Vanity Fair Album*, 24 (1894).
- Axelrod, Robert, *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton, NJ, 1997.
- Ballerini, Michele et al., „Empirical Investigation of Starling Flocks: A Benchmark Study in Collective Animal Behavior“, in: *Animal Behavior* 76, 1 (2008), S. 201-215.
- Birch, Herbert G., „Communications in Animals“, in: Claus Pias (Hg.), *Cybernetics/Kybernetik. The Macy-Conferences 1946-1953*, Band 1: *Protokolle*, Zürich, Berlin, 2003, S. 446-528.
- Blumenberg, Hans, „„Nachahmung der Natur“. Zur Vorgeschichte der Idee des schöpferischen Menschen“, in: ders., *Wirklichkeiten in denen wir leben. Aufsätze und eine Rede*, Stuttgart, 1986, S. 55-103.

⁴¹ So z. B. im Robofish-Projekt des Verhaltensbiologen Jens Krause am IGB Berlin, vgl. Jakob Kneser, „Rückschau: Der Robofisch und die Schwarmintelligenz“, in: *W wie Wissen*, Beitrag in der ARD vom 14.03.2010.

⁴² Vgl. Anne von der Heiden/Joseph Vogl, „Vorwort“, in: dies. (Hg.), *Politische Zoologie*, Zürich, Berlin, 2007, S. 7-14.

- Bonabeau, Eric, „Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems“, in: *PNAS* 99, Suppl. 3 (14. Mai 2002), S. 7280-7287.
- Burckhardt, Richard W., *Patterns of Behavior. Konrad Lorenz, Niko Tinbergen and the Founding of Ethology*, Chicago, IL, 2005.
- Cavagna, Andrea et al., „The STARFLAG Handbook on Collective Animal Behavior: Part I, Empirical Methods“, in: *arXiv E-print*, (2008), S. 27, online unter: <http://arxiv.org/abs/0802.1668>, zuletzt aufgerufen am 31.07.2011.
- Corner, J. J./Lamont, G. B., „Parallel Simulation of UAV Swarm Scenarios“, in: *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, S. 355-363.
- Ernst, Wolfgang, „Der Appell der Medien: Wissensgeschichte und ihr Anderes“ in: Ana Ofak/Philipp von Hilgers (Hg.), *Rekursionen*, München, 2010, S. 177-197.
- Galison, Peter, „Computer Simulations and the Trading Zone“, in: Peter Galison/D. J. Stump (Hg.), *The Disunity of Science. Boundaries, Contexts, and Power*, Stanford, CA, 1996, S. 118-157.
- Gerard, Ralph W., „Synchrony in Flock Wheeling“, in: *Science*, 97 (1943), S. 160-161.
- Heiden, Anne von der/Vogl, Joseph, „Vorwort“, in: dies. (Hg.), *Politische Zoologie*, Zürich, Berlin, 2007, S. 7-14.
- Heppner, Frank, „Avian Flight Formations“, in: *The Condor* 45, 2 (1974), S. 160-170.
- Ders., „The Structure and Dynamics of Bird Flocks“, in: Julia K. Parrish/William H. Hamner (Hg.), *Animal Groups in Three Dimensions*, Cambridge, MA, 1997, S. 68-89.
- Kneser, Jakob, „Rückschau: Der Robofisch und die Schwarmintelligenz“, in: *W wie Wissen*, Beitrag in der ARD vom 14.03.2010.
- Long, William J., *How Animals Talk, and Other Pleasant Studies of Birds and Beasts*, Rochester, 2005. [1919]
- Lustig, Abigail J., „Ants and the Nature of Nature in Forel, Wasmann, and Wheeler“, in: Lorraine Daston/Fernando Vidal (Hg.), *The Moral Authority of Nature*, Chicago, IL, 2004, S. 282-307.
- Mahr, Bernd, „Das Mögliche im Modell und die Vermeidung der Fiktion“, in: Thomas Macho/Annette Wunschel, *Science & Fiction*, Frankfurt/M., 2004, S. 161-182.
- Major, Peter F./Dill, Lawrence M., „The 3D Structure of Airborne Bird Flocks“, in: *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 4 (1978), S. 111-122.
- Parr, Albert E., „A Contribution to the Theoretical Analysis of the Schooling Behavior of Fishes“, in: *Occasional Papers of the Bingham Oceanographic Collection*, 1 (1929), S. 1-32.
- Parrish, Julia K./Hamner, William M./Prewitt, Charles T., „Introduction – from Individuals to Aggregations. Unifying Properties, Global Framework, and the Holy Grails of Congregation“, in: Julia K. Parrish/William H. Hamner (Hg.), *Animal Groups in Three Dimensions*, Cambridge, MA, 1997, S. 1-14.
- Parrish, Julia K./Viscido, Steven V., „Traffic Rules of Fish Schools: A Review of Agent-Based Approaches“, in: Charlotte Hemelrijk (Hg.), *Self-Organisation and Evolution of Social Systems*, Cambridge, 2005, S. 50-80.
- Reeves, William T., „Particle Systems – A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects“, in: *ACM Transactions on Graphics* 2, 2 (1983), S. 91-108.
- Reynolds, Craig W., „Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model“, in: *Computer Graphics* 21, 4 (1987), S. 25-34.
- Schilt, Carl R./Norris, Kenneth S., „Perspectives on Sensory Integration Systems: Problems, Opportunities, and Predictions“, in: Julia K. Parrish/William H. Hamner (Hg.), *Animal Groups in Three Dimensions*, Cambridge, MA, 1997, S. 225-244.

- Selous, Edmund, „An Observational Diary of the Habits – Mostly Domestic – of the Great Crested Grebe (*Podiceps Cristatus*)“, in: *Zoologist*, 5 (1901), S. 161-183.
- Ders., *Bird Watching*, London, 1901.
- Ders., *Thought Transference (Or What?) in Birds*, London, 1931.
- Vehlken, Sebastian, *Zootechnologien. Eine Mediengeschichte der Schwarmforschung*, Zürich, Berlin, 2012.
- Ders., „Fish & Chips. Schwärme – Simulation – Selbstorganisation“, in: Eva Horn/Lucas Gisi (Hg.), *Schwärme – Kollektive ohne Zentrum. Eine Wissensgeschichte zwischen Leben und Information*, Bielefeld, 2009, S. 125-162.
- Ders., „Schräge Vögel. Vom *Technological Morass* in der Ornithologie“, in: Stefan Rieger/Manfred Schneider (Hg.), *Selbstläufer/Leerläufer. Regelungen und ihr Imaginäres im 20. Jahrhundert*, Zürich, Berlin, 2012, S. 139-162.
- Vines, Gail, „Psychic Birds (Or What?)“, in: *New Scientist*, 182 (2004), S. 48-49.
- Vogl, Joseph, „Medien-Werden: Galileos Fernrohr“, in: Lorenz Engell/Bernhard Siegert/Joseph Vogl (Hg.), *Mediale Historiographien*, Weimar, 2001, S. 115-123.
- Winkler, Hartmut, „Rekursion. Über Programmierbarkeit, Wiederholung, Verdichtung und Schema“, in: *c't*, 9 (1999), S. 234-240.