

Helmut Satz

# Heuschrecken haben keinen König

Schwarmbildung und Selbstorganisation  
in Tierwelt, Physik und Informatik





*Helmut Satz*

**Heuschrecken haben keinen König**



*Helmut Satz*

## **Heuschrecken haben keinen König**

Schwarmbildung und Selbstorganisation in Tierwelt, Physik  
und Informatik

**WILEY-VCH**

**Autor**

**Prof. Dr. Helmut Satz**  
Universität Bielefeld  
Fakultät für Physik  
33615 Bielefeld  
Deutschland

**Titelbild**

Getty Images, Antonio Najdovski/EyeEm Image  
ID#: 611445057. Insektenschwarm gegen sonnigen  
Himmel.

Alle Bücher von WILEY-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2021 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12,  
69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**Print ISBN** 978-3-527-34749-0

**ePDF ISBN** 978-3-527-82690-2

**ePub ISBN** 978-3-527-82691-9

**Umschlaggestaltung** Adam-Design, Weinheim  
**Satz** le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Die Heuschrecken haben keinen König,  
und doch ziehen sie allesamt aus in geordneten Scharen.

*Salomo Sprüche 30:27; Elberfelder Bibel 1905*



## Inhaltsverzeichnis

	<b>Vorwort</b>	<i>IX</i>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<i>1</i>
<b>2</b>	<b>Die achte Plage</b>	<i>7</i>
<b>3</b>	<b>Das Entstehen von willkürlicher Verbindung</b>	<i>13</i>
<b>4</b>	<b>Die Stare von Rom</b>	<i>17</i>
<b>5</b>	<b>Das Entstehen von Ordnung</b>	<i>23</i>
<b>6</b>	<b>Die Gesetze des Schwarms</b>	<i>29</i>
<b>7</b>	<b>Kollektiv, kritisch, komplex</b>	<i>37</i>
<b>8</b>	<b>Wer fängt an?</b>	<i>47</i>
<b>9</b>	<b>Das Leuchten im Urwald</b>	<i>51</i>
<b>10</b>	<b>Die hörbare Stille</b>	<i>55</i>
<b>11</b>	<b>Gekoppelte Pendel</b>	<i>59</i>
<b>12</b>	<b>Laserstrahlung</b>	<i>63</i>
<b>13</b>	<b>Die Bestimmung der Wege</b>	<i>67</i>
<b>14</b>	<b>Formationsflug und Flugformationen</b>	<i>73</i>
<b>15</b>	<b>Die Aerodynamik der Vögel</b>	<i>81</i>
<b>16</b>	<b>Vogelzug und Zugvögel</b>	<i>87</i>

**VIII** | *Inhaltsverzeichnis*

**17**      **Wege unter Wasser** 97

**18**      **Der Ameisenstaat** 101

**19**      **Verwandtschaftsbestimmung** 107

**20**      **Von Blumen und Bienen** 113

**21**      **Verständigung und Sprache** 117

**22**      **Epilog** 123

**Anhang A** **Komplexität und das Entstehen von Chaos** 127

**Anhang B** **Orientierung und Navigation** 133

**Literatur** 137

**Personenverzeichnis** 139

**Sachverzeichnis** 141

## Vorwort

In den letzten 50 Jahren ist ein neues Gebiet wissenschaftlicher Forschung entstanden: die Untersuchung von Schwarmstruktur und Schwarmverhalten. Die Grundfrage, die zu diesen Untersuchungen geführt hat, ist unmittelbar verständlich: Wie ist es möglich, dass eine Menge einfacher Individuen, die jeweils nur mit ihren nächsten Nachbarn in Wechselwirkung stehen, das grandiose, kollektive Verhalten riesiger Schwärme erzeugen? Vogelschwärme führen komplexe Manöver aus über uns am Himmel, Fische vollbringen Ähnliches in den Tiefen der See. Im asiatischen Dschungel zeigen Leuchtkäfer Lichtvorführungen, in denen Tausende von Käfern in perfekter, synchroner Harmonie strahlen. Diese und ähnliche Vorgänge haben dazu geführt, dass Mathematiker und Physiker sich mit Kollegen der Biologie zusammengefunden haben, um die dem Schwarmverhalten zugrunde liegende Struktur zu erforschen. Man hat festgestellt, dass diese Struktur recht universell ist und sehr ähnlich der, die man in der Physik vieler wechselwirkender Teilchen findet. Das Entstehen und die Struktur eines Vogelschwarms entsprechen in vieler Hinsicht der Magnetisierung von Eisen, bei der ganz plötzlich die Spins der meisten Atome in die gleiche Richtung weisen. Die Synchronisierung der Leuchtkäferstrahlung wiederum beruht auf Mechanismen, die der Lichtemission eines Lasers recht ähnlich sind.

Zum anderen haben Ameisen, Bienen und weitere Staaten bildende Insekten außerordentlich effiziente Methoden zur Lösung gewisser Probleme entwickelt, wie etwa zur Bestimmung des kürzesten Weges zwischen zwei Punkten – Methoden, die seit einiger Zeit auch Eingang in die menschliche Logistik gefunden haben. Dazu kommt ferner, dass die Schwarmstruktur dem darwinschen Begriff *survival of the fittest* eine neue Bedeutung gegeben hat. Hier hat die Evolution zu einer weitgehenden Umwandlung der einzelnen Tiere geführt: Sie sind keine autonomen Wesen mehr, sondern jetzt Teile eines Superorganismus, mit speziellen Funktionen und speziellen Nutzen. Eine unabhängige Existenz mag schwierig werden für Mitglieder einer Herde von Säugetieren oder eines Vogelschwarms; für die Mitglieder eines Insektenstaates aber ist sie vollständig unmöglich. Hier sind kollektive Leistungen nicht nur für die Existenz des Staates notwendig, sondern auch für die des jeweiligen Einzelwesens.

Wie sieht es aus bei menschlichen Gemeinschaften? Obwohl das Verhalten hier sehr viel komplexer ist, gibt es doch auch Aspekte, die offensichtlich das Ergeb-

nis von Selbstorganisation sind. Insbesondere hat die Evolution zum Entstehen der menschlichen Sprache geführt als ein Werkzeug für die Beschreibung sowohl konkreter wie auch abstrakter Begriffe. Es ist wohl dieses Werkzeug, dass die Planung und Organisation möglich gemacht hat, die letztendlich zur menschlichen Herrschaft über die gesamte Erde führte.

Das Ziel dieses Buches ist es, die verschiedenen Formen des Schwarmverhaltens von Tiergemeinschaften zu beschreiben und diesen dann die entsprechenden Strukturen in Physik und Informatik gegenüberzustellen. Es richtet sich an eine allgemeine Leserschaft und wird daher nur auf wenig und recht einfache Mathematik zurückgreifen; auch die angeführte Physik und Biologie werden auf einem für Nichtspezialisten verständlichen Niveau gehalten. Für an mehr Einzelheiten interessierte Leser werden zwei Bereiche, der Übergang von komplexem Verhalten zum Chaos und die Orientierung und Navigation von Vögeln, in speziellen Anhängen etwas detaillierter behandelt und ansonsten auf eine recht umfangreiches Literaturverzeichnis verwiesen. Eine etwas komprimiertere Fassung dieses Buches ist vor Kurzem unter dem Titel *The Rules of the Flock* bei Oxford University Press erschienen.

Wir Menschen erfahren ein Gefühl tiefen Wunders, wenn wir einen wirbelnden Vogelschwarm am Himmel beobachten oder einen schimmernden Schwarm von Fischen im Meer. Wir stehen voller Staunen vor den Leistungen von Ameisenstaaten oder Bienenvölkern. Dieses Buch möchte zeigen, dass solche Gefühle noch verstärkt werden, wenn wir verstehen, wie die beeindruckenden Leistungen zustande kommen, wenn wir sehen, dass sie in der Tat auf ganz allgemeinen Grundlagen beruhen, die sowohl in der belebten wie auch in der unbelebten Welt gültig sind.

Ich danke Irene Giardina für Einzelheiten über das STARFLAG-Projekt, Johannes Fritz für die schönen Fotos vom Waldrapp-Projekt und Susette von Reder für ihre Unterstützung bei der Ausarbeitung des Manuskripts.

Bielefeld, Dezember 2019

*Helmut Satz*

# 1

## Einleitung

Moses führte das Volk Israel aus Ägypten ins gelobte Land. Caesars Legionen eroberten große Teile von Europa. Dschingis Khans Horden bedrohten das Abendland. Napoleons Truppen standen vor Moskau. Die Geschichte der Menschheit geht meist aus von vielen, die von einigen wenigen angeführt oder geleitet wurden. Das hat auch unsere Vorstellung der Vorgänge in der Natur beeinflusst. Wenn viele „unwichtige“ Einzelne etwas zusammen durchführen, etwas gemeinsam erzeugen, dann suchen wir irgendwo nach einem König, einem Anführer, einem Befehlshaber. In der Natur aber ist das oft nicht so: Heuschrecken, Ameisen, Fische, Stare, Antilopenherden und viele andere Tiere mehr, sie alle haben keinen König, keinen Herrscher, keinen Organisator und doch haben sie alle funktionierende Gemeinschaften.

Das Ganze ist von vornherein mehr als die Summe seiner Teile – das weiß man schon sehr lange, mindestens seit Aristoteles. Und dass man aus vielen Einzelteilen ein großes Ganzes bilden kann, erscheint auch natürlich. Aber dass viele gleiche Einzelteile sich von sich aus, unter eigener Kraft sozusagen, zu einem mit neuen, ganz eigenen Eigenschaften ausgestatteten Gesamtgebilde zusammenfinden können, ist eine noch recht neue Erkenntnis in der Naturwissenschaft. Man spricht dabei von *Emergenz* und *Selbstorganisation*. Bis dahin recht einzelgängerische Heuschrecken bilden plötzlich, aus heiterem Himmel, Riesenschwärme, die eben diesen Himmel verdunkeln und alles Pflanzliche auf ihrem Wege auffressen. Tausende von Leuchtkäfern, über große Gebiete verteilt, senden absolut gleichzeitig periodische Lichtsignale, ohne irgendeinen Dirigenten. Ameisen erstellen komplizierte Straßennetze, ohne jeden Bauleiter oder Bauplan. Vögel und Fische bilden umfangreiche und aus vielen Tieren bestehende dreidimensionale Gebilde, die sich ausdehnen, zusammenziehen und komplizierte Manöver im Raum vollbringen – auch wieder ohne irgendeinen Regisseur oder Choreografen. Bei all diesen Vorgängen nützt es zudem wenig, ein einzelnes Tier so genau wie möglich zu untersuchen und all seine Funktionen zu bestimmen – daraus kann man das kollektive Verhalten in keiner Weise ableiten oder vorhersagen. Erst die Verbindung der vielen erzeugt die gänzlich unerwarteten Phänomene, die Vielzahl gewinnt eine eigene Existenz, eigene Eigenschaften.

Es hat sowohl Biologen als auch Physiker einigermaßen überrascht, dass Phänomene dieser Art in beiden Bereichen auftreten und dass Selbstorganisation ein sehr

viel allgemeinerer Begriff ist. Der Nobelpreisträger *Ilya Prigogine* und sein Kollege *Gregoire Nicolis* in Brüssel schrieben 1977, dass „Komplexität nicht mehr auf die Biologie beschränkt sei, sondern auch in die physikalischen Wissenschaften eindringen würde“. Zur gleichen Zeit – und auch in Brüssel – führte ihr Kollege *Jean-Louis De-neubourg* als Erster mathematische Modelle zur Beschreibung von Ameisenstaaten ein: Die Mathematik drang damit in die Biologie ein. Die Untersuchung von Selbstorganisation als allgemeines, wissenschaftliches Forschungsthema ist noch keine 50 Jahre alt und hat eigentlich erst begonnen, als man mathematische Modelle konstruierte, in denen sich viele einfache, gleichartige „Objekte“ nach sehr simplen Regeln bewegten. Und diese Roboter zeigten dann recht genau das Verhalten, das in Ansammlungen vieler Tiere beobachtet worden war.

Noch vor 100 Jahren gab es Vorschläge, dass Vogelschwärme durch Telepathie kommunizierten oder dass das gleichzeitige Blinken von Leuchtkäferscharen auf das Blinken der Augen des Beobachters zurückzuführen sei. Heute kann man zeigen, dass bereits ganz einfache Modelle auf so etwas führen. Die Roboter, die sich in diesen Modellen bewegen, sind leblos und ohne irgendeinen Verstand, sie unterliegen nur einigen wenigen und sehr einfachen Befehlen, und schon entsteht das „unerwartete“ kollektive Verhalten. Mit Selbstorganisation haben wir eben noch nicht so viel Erfahrung.

In der Physik und der Chemie kann man die für die verschiedenen Elemente zuständigen Atome hervorragend beschreiben, als Bindungszustände von positiv geladenen Kernen und negativ geladenen Elektronen. Man kann die Bahnen der Elektronen um den Kern berechnen, die Größe der Atome beschreiben und die Struktur der Kerne spezifizieren. Das alles hilft aber wenig, wenn es um das Verhalten einer Gesamtheit vieler Atome geht. *Ein* Eisenatom ist ein Eisenatom; eine Ansammlung solcher Atome aber bildet einen Magneten (bei niedrigen Temperaturen) oder auch nicht (bei hohen Temperaturen). Helium ist das einzige Element, das zuerst auf der Sonne und erst dann auf der Erde entdeckt wurde, daher auch der Name. Helium wird nie zu einem Festkörper, es friert nie; bei sehr niedrigen Temperaturen bildet es eine fast perfekte Flüssigkeit, die ungehindert fließen kann. Weder bei Eisen noch bei Helium hat die Atomstruktur zur Erkenntnis dieser Eigenschaften beigetragen: Sie betreffen kollektives Verhalten, das als solches unabhängig entdeckt wurde. Kollektive Eigenschaften lassen sich selbst in der unbelebten Natur eben nicht aus der auch noch so perfekten Kenntnis der Einzelteile ableiten. Nicht nur ist das Ganze mehr als die Summe seiner Teile – die Teile können sich ihrerseits entschließen, zusammen ein völlig neues Gebilde zu erschaffen, mit völlig unvorhergesehenen Eigenschaften.

Ein solches unerwartete Verhalten lässt uns in der Tierwelt oft ungläubig stauen. Wie können tausende von Vögeln ihren Tanz am Himmel koordinieren? Wie erwähnt, haben selbst ernsthafte Biologen Telepathie vermutet. Und wie können tausende von Leuchtkäfern im asiatischen Urwald ihre Lichtstrahlung bis auf ein tausendstel Sekunde synchronisieren? Schwärme müssen irgendwelche geheimen Methoden haben, um diese Leistungen vollbringen zu können. Die Herausforderung an uns ist es, diese Methoden zu entziffern, festzustellen, wie sie die beobachtete Ordnung erzielen können.

Eine Weise, diese Herausforderung anzugehen, ist, wie erwähnt, das Verhalten zu untersuchen, das entsteht, wenn wir viele identische „seelenlose“ Maschinen, Roboter so programmieren, dass sie sich nach bestimmten Regeln verhalten: Folge deinem Nachbarn, bewege dich so schnell wie er, komme ihm nicht zu nahe. Und dieses Experiment muss heute nicht einmal in der Wirklichkeit durchgeführt werden: Wir können es mithilfe von Computersimulation machen, indem wir Punkte auf einem Rechner sich nach den vorgegebenen Regeln bewegen lassen. Wenn solche Regeln ausreichen, um das bei Tierschwärmen beobachtete Verhalten hervorzurufen, dann meint man wohl zu Recht, dass dieses Verhalten nicht eine Reflexion von kausalen Entscheidungen der einzelnen Schwarmmitglieder ist.

In diesem Zusammenhang taucht noch ein weiteres, wenn auch nicht a priori kollektives Problem auf. In jedem Herbst ziehen riesige Vogelschwärme in weit entfernte wärmere südliche Gefilde und im folgenden Frühjahr zurück nach Norden. Die Tiere ziehen aber nicht einfach in eine Himmelsrichtung, sondern von einem präzisen geografischen Punkt, dem Nest auf dem Baum im Ort  $x$ , zu einem anderen, den Sumpf am Fluss  $y$ , und auch die Flugroute ist Jahr um Jahr die gleiche. Und unter Wasser ziehen Lachse und Aale Tausende von Kilometern zwischen ihren Laichgebieten und Lebensbereichen – sie haben nicht einmal die Sonne zur Orientierung. Wie also können solche Tiere derartige Navigationsleistungen vollbringen? Die Erforschung dieser Problematik hat durchaus Fortschritte gebracht, aber vieles bleibt nach wie vor rätselhaft.

Neben solchen Formen von tierischer Organisation gibt es aber noch weitere. In Insektenstaaten leben Tausende, mitunter Millionen von Tieren in einer Gesellschaft, in der die verschiedensten Aufgaben ohne jede Leitung, kastenmäßig erledigt werden: Futtersucher, Nestbauer, Brutpfleger, Soldaten – alle gehen „von sich aus“ ihrer Tätigkeit nach, und selbst die „Königin“ herrscht nicht etwa, sondern legt nur Eier. Solche Strukturen müssen sich wohl im Laufe der Zeit genetisch entwickelt haben, durch Vorteile in der Evolution. Bereits Darwin hatte festgestellt, dass so etwas nicht leicht in Einklang zu bringen ist mit der üblichen Vorstellung von *survival of the fittest*. Es wird also eine Erweiterung des Evolutionsbegriffs notwendig.

Die letzten drei Jahrzehnte haben in der theoretischen Untersuchung von Selbstorganisation und Schwarmverhalten auf einen rasanten Anstieg geführt, durch die Einführung von Computersimulation wie auch ganz allgemein durch die Untersuchung mathematischer Schwarmmodelle. Jedes Jahr erscheinen Hunderte von wissenschaftlichen Arbeiten, in denen anhand mathematischer Modelle das kollektive Verhalten vieler Einzelwesen erklärt werden soll, von Mikroorganismen bis zu Antilopenherden. Gleichzeitig haben Biologen detaillierte, quantitative Studien von verschiedenen Tiergemeinschaften durchgeführt, von Vögeln, Ameisen, Heuschrecken und vielen anderen. Aus dem Zusammenspiel dieser beiden Zugangsrichtungen ist ein neues Forschungsgebiet entstanden, die Erforschung von Schwarmverhalten. Es ist von Haus aus ein interdisziplinäres Gebiet, zu dem Biologie, Physik und Mathematik wesentlich beitragen.

In diesem Buch möchte ich möglichst allgemein, für Nichtspezialisten, die Probleme und Fragen dieses neuen Forschungsgebietes darstellen und zeigen, wie man hofft Antworten zu bekommen. Wir wollen dabei von kollektiven Verhaltensweisen

bei Tieren ausgehen und dann, wo möglich, ähnliche Phänomene in der statistischen Physik und entsprechende mathematische Modelle diskutieren. Die wesentlichen Ausgangsthemen sind somit:

- Schwarmbildung: Wie entsteht ein Schwarm?
- Schwarmstruktur: Wie sind die einzelnen Teilnehmer verbunden?
- Schwarmkommunikation: Wie verständigen sich die einzelnen Teilnehmer?
- Schwarmkoordination: Wie können sich die einzelnen Teilnehmer synchronisieren?
- Schwarmorientierung: Wie legen Kollektive ihre Verbindungswege fest?
- Schwarmwege: Welchen Routen folgen Schwärme auf ihren Wanderungen?
- Schwarmstaaten: Wie entstehen Schwarmkasten?

Wir werden es bewusst offen lassen, inwieweit auch menschliche Gesellschaften entsprechenden Regeln unterliegen. Wir müssen allerdings mit Staunen feststellen, dass es zum Beispiel in Ameisenstaaten Viehzucht und Landwirtschaft gibt, Unterwerfung anderer Völker und Sklavenhaltung, Berufssoldaten und vieles mehr – alles ohne irgendeine Form von Führung.

Eine Grundfrage für das Entstehen von Schwärmen ist, wie man viele identische Komponenten zu einem zusammenhängenden Ganzen kombinieren kann. Die übliche Methode in unserer Welt geht aus von einem Konstruktionsplan, der angibt, wie man aus vielen Steinen ein Haus baut. In Lebewesen ist ein solcher Plan genetisch eingebaut: Er legt fest, wie eine Pflanze oder ein Tier aus einigen Anfangszellen entsteht. Eine ganz andere und in gewisser Weise komplementäre Methode erhält man, wenn man die Komponenten willkürlich zusammenlegt – indem man etwa ohne jeden Plan, per Zufall, Steine auf die Felder eines Schachbretts legt oder indem man beobachtet, wie aus fallenden Regentropfen eine Pfütze entsteht. Die Untersuchung des Einsetzens eines derart zufällig erzeugten Zusammenhangs, *Perkolation* ist wiederum ein Gebiet, das erst in den letzten 50 Jahren aufgeblüht ist. Für unsere Fragen ist es offensichtlich von großem Interesse: Die Heuschrecken oder die Vögel in einem Schwarm sind dort nicht nach irgendeinem Plan platziert – sie sind einfach irgendwie dorthin geraten.

Die nächste Frage ist, wie die Komponenten des Schwarms ihre Bewegung koordinieren. Wenn sich Vögel in einem Feld zur Nahrungssuche niederlassen, bewegen sie sich willkürlich umher; einige hierhin, andere dorthin. Werden sie aber erschreckt, dann fliegen sie alle auf und davon in einer gemeinsamen Richtung. Wie bestimmen sie diese Richtung? Zur Lösung dieses Rätsels haben zwei Forschergruppen wesentlich beigetragen, eine theoretisch, die andere experimentell. Im Jahre 1995 haben *Tamas Vicsek* (Budapest) und Mitarbeiter gezeigt, dass Vogelschwärme im Wesentlichen den gleichen Regeln folgen, wie sie bei der Magnetisierung von Eisen gefunden worden waren. Seitdem haben viele Biologen, Physiker und Mathematiker in fruchtbarer Zusammenarbeit diese Überlegungen bestätigt und erweitert. Insbesondere auf der experimentellen Seite hat eine Gruppe von Physikern und Biologen der Universität Rom durch intensive Untersuchungen von großen Schwärmen von Staren eine sichere empirische Basis für die Strukturforschung von Vogelschwärmen geschaffen.