

Mustergültige Lichtsucher

Algen richten sich nach dem Licht aus und zeigen dabei komplexe kollektive Muster.

Holger Stark

Die Natur kennt viele Mechanismen, mit denen Mikroorganismen ihre Umgebung gezielt erkunden können. Eine zelluläre Maschinerie ermöglicht es ihnen, den Gradienten eines äußeren Feldes zu detektieren und sich im Mittel entlang dieses Gradienten zu bewegen. Dafür hat sich der Begriff „Taxis“ eingebürgert, nach dem griechischen Wort für „Ausrichtung“. Am bekanntesten ist die Chemotaxis, d. h. die Fähigkeit von Bakterien, entlang chemischer Gradienten zu einem größeren Nahrungsangebot zu schwimmen. Dafür entwickelten Evelyn F. Keller und Lee A. Segel 1971 ein mittlerweile klassisches Modell [1], das die diffusive Ausbreitung von Bakterien mit der erwähnten gerichteten Bewegung kombiniert.

Drei Forscher von der Université de Paris haben nun die Phototaxis der Alge *Chlamydomonas reinhardtii* untersucht. Dieser Mikroschwimmer bewegt sich mithilfe zweier Flagellen vorwärts (Abb. 1, Inset oben) [2]. Die Phototaxis hat ökologische Relevanz in der tagtäglichen vertikalen Migration von Plankton im Meer oder der Ausbildung von schädlichen Algenblüten. Die Autoren zeigen, dass das Keller-Segel-Modell auch die Phototaxis beschreibt, und schlagen eine Modifikation vor, um die beobachtete komplexe Musterbildung bei hohen Algendichten zu erfassen.

Das Keller-Segel-Modell startet mit der Annahme einer konstanten Ge-

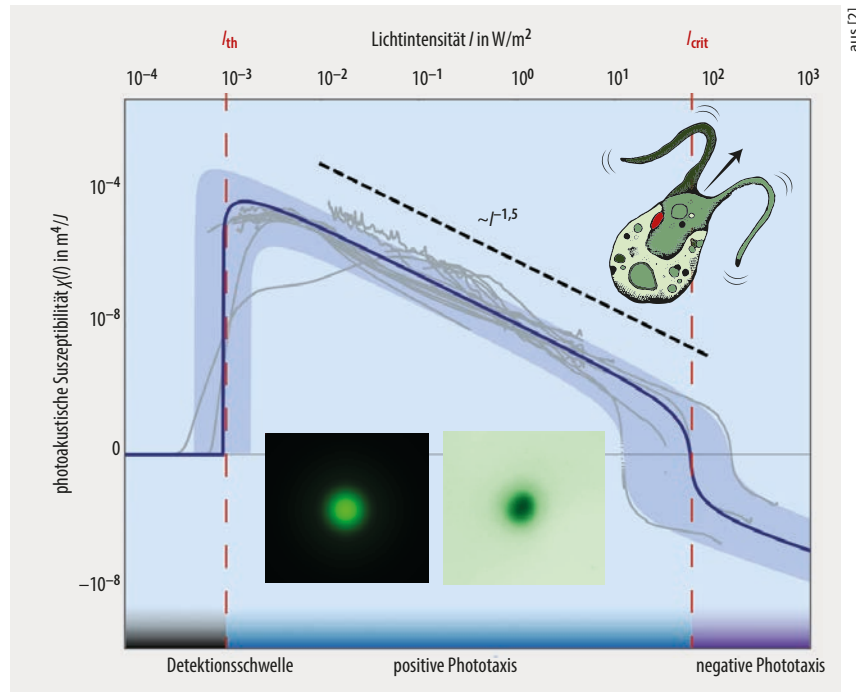


Abb. 1 Als Funktion der Lichtintensität zeigt die phototaktische Suszeptibilität der Algen *C. reinhardtii* (oben) eine Detektionsschwelle sowie positive und negative Phototaxis. Die Insets zeigen die axialsymmetrischen Profile der Lichtintensität und der Algendichte.

samtzahl der Mikroorganismen. Daraus folgt eine Kontinuitätsgleichung für die Dichte $c(\mathbf{r}, t)$ der Mikroorganismen: $\partial c / \partial t + \text{div } \mathbf{j} = 0$. Das Absterben der Mikroorganismen oder Zellteilung lässt sich durch Senken- bzw. Quellterme berücksichtigen. Zu den zwei Beiträgen der Stromdichte $\mathbf{j}$ gehört zunächst der diffusive Strom: $-D \nabla c$ (1. Ficksches Gesetz). Der Anteil der gewöhnlichen Brownschen

Bewegung an der Diffusionskonstante D ist dabei vernachlässigbar. Bei der Alge kommen die beiden synchron schlagenden Flagellen im Mittel nach einer Zeit τ aus dem Tritt, wobei die zugrundeliegenden biochemischen Prozesse für diesen Vorgang noch unklar sind. Das bewirkt, dass die Alge eine zufällige Richtungsänderung durchläuft [4] und sich daher auf Zeiten größer als τ eine diffusive Bewegung einstellt (mit $D \propto v_0^2 \tau$) [5]. Sie überwiegt die Brownsche Diffusion, wenn die Geschwindigkeit v_0 , mit der sich die Algen durch gerichtetes Schwimmen fortbewegen, groß genug ist.

Zusätzlich kommt unter dem Einfluss des Gradienten eines Feldes, bei der Alge der Lichtintensität I , auch ein Driftstrom $c \mathbf{v}_t$ vor, ähnlich der elektrischen Stromdichte. Nur ist im vorliegenden Falle die taktische Geschwindigkeit $\mathbf{v}_t$ in führender Ordnung proportional zum Gradienten

Kurzgefasst

Mit kaltem Plasma gegen Viren

Ein Greifswalder Forschungsteam hat erstmals nachgewiesen, dass ein kaltes Plasma Corona-Viren inaktiviert. Solche Plasmen befinden sich nicht im thermischen Gleichgewicht: Ionen und Elektronen haben verschiedene Temperaturen. Bisher dienten kalte Plasmen vor allem bei chronischen Wunden dazu, die Erreger der Wundinfektion abzutöten. Nun hat sich gezeigt, dass die freien Radikale im Plasma die Corona-

Viren daran hindern, in Zellen einzudringen. Das Greifswalder Team arbeitete nicht mit SARS-CoV-2, sondern nutzte Hepatitis-Viren von Mäusen, die zur gleichen Virenfamilie gehören. Nun möchten sie ein Gerät entwickeln, das direkt auf der Mundschleimhaut ein Plasma erzeugt, um die Virenlast bei einer Covid-Erkrankung zu reduzieren.

D. M. Mrochen et al., Free Radic. Biol. Med. **191**, 105 (2022)

der Lichtintensität I : $\mathbf{v}_t = \chi \nabla I$. Für eine phototaktische Suszeptibilität $\chi > 0$ driftet die Alge also mithilfe ihrer Schwimmbewegung entlang des Lichtgradienten. Mit ihrem lichtsensitiven Augenfleck richtet sie sich im Mittel nach einem Taumelereignis stärker entlang als entgegen ∇I aus (positive Phototaxis). Insgesamt erhält man so die typische Stromdichte des Keller-Segel-Modells [1,3]:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t) = -D \nabla c + c \chi \nabla I. \quad (1)$$

Im Experiment verwenden die Autoren eine Lösung von Algen auf einer Petri-Schale. Die weniger als einen Millimeter dicke Schicht erscheinen sie mit grünem Licht einer definierten Strahlbreite. In diesem Frequenzbereich reagiert der Augenfleck der Alge am empfindlichsten auf die Lichtintensität und richtet sich danach aus. Die Algen driften in Richtung maximaler Lichtintensität auf der zentralen Lichtstrahlachse.

Im stationären Gleichgewicht ($\mathbf{j} = 0$) ist die phototaktische Suszeptibilität χ als Funktion der Lichtintensität nicht konstant, wie man erwarten würde, sondern zeigt ein hochgradig nichtlineares Verhalten (Abb. 1). Eine Schwellintensität I_{th} markiert die Detektionsschwelle der involvierten Ionenkanäle von einem Photon pro Sekunde und Zelle. Die Suszeptibilität ist zunächst Null, steigt dann stark an, fällt über fünf Dekaden wie $I^{-1.5}$ ab und wird jenseits der kritischen Intensität I_{crit} negativ. Die Algen meiden somit hohe Lichtintensitäten (negative Phototaxis). Bei I_{crit} sind dann rund 2/3 aller Photorezeptoren angeregt.

In dichten Algen-Lösungen gibt es statische und dynamische Muster (Abb. 2). Ihr Ursprung liegt im Dichteunterschied zwischen Algen und Flüssigkeit, der konvektive Ströme in der vertikalen Ebene antreibt – ähnlich wie bei der Rayleigh-Benard-Instabilität, wo ein Temperaturgradient den Dichteunterschied erzeugt. Eine Pseudo-Rayleigh-Zahl¹⁾ quantifiziert die Stärke dieser Ströme, indem sie die Transportzeit der Algen aufgrund der Diffusion (D) mit der durch den

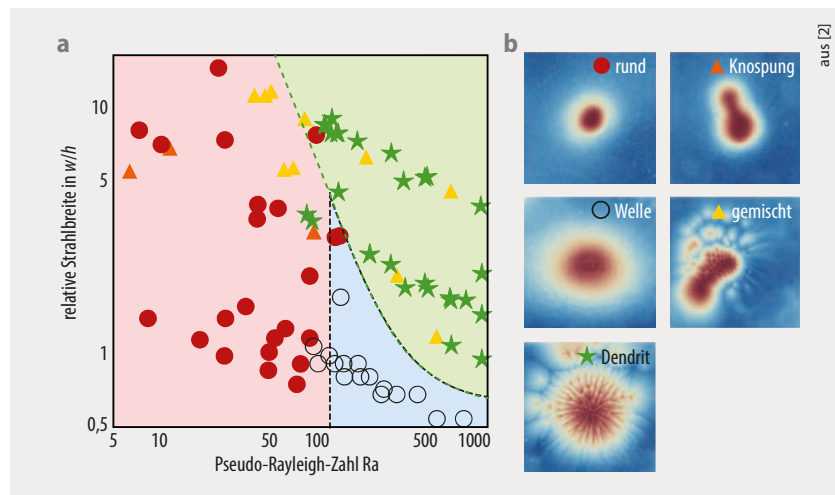


Abb. 2 Im Zustandsdiagramm zeigt sich die phototaktische Musterbildung im Parameterraum von relativer Lichtstrahlbreite w/h über Pseudo-Rayleigh-Zahl Ra .

Dichteunterschied $\Delta\rho$ angetriebenen Konvektion vergleicht:

$$Ra = \frac{h^3 \Delta\rho g c_0}{D \eta}. \quad (2)$$

Hierbei ist h die Filmdicke der Lösung, g die Schwerebeschleunigung, c_0 die mittlere Algendichte und η die dynamische Viskosität. Somit ist bei großen Werten von Ra die Diffusion vernachlässigbar. Bei kleineren Rayleigh-Zahlen, also geringer Algendichte, treten die schon beobachteten statischen runden Dichteprofile auf (Abb. 2), aber auch Knospenbildung („budding“). Für große Rayleigh-Zahlen erscheinen komplexere dynamische Muster (abhängig von der relativen Lichtstrahlbreite w/h): zirkuläre Dichtewellen im Algenagglomerat bei kleinen Breiten und dendritische Muster bei größeren Breiten, auch in Kombination mit Knospung. In einer Dünnfilmnäherung können die Autoren den Dichtegradienten der Algen in der Ebene mit einem Druckgradienten in Verbindung bringen, der entsprechende horizontale Konvektionsströme antreibt.

Ein weiterer Mechanismus ergibt sich durch die Ausrichtung der Algen entlang des Lichtgradienten, dem die Reorientierung der Schwimmrichtung durch Wirbelströme entgegenwirkt. Dieser gyrotaktische Mechanismus treibt die Instabilität des runden Agglomerats an, die schließlich die axiale Symmetrie bricht hin zum dendritischen Muster. Die Autoren können beide Mechanismen in das

Keller-Segel-Modell integrieren, indem sie die Diffusionskonstante D in Gleichung (1) durch einen Tensor Λ ersetzen, der neben der isotropen Diffusion noch anisotrope Beiträge proportional zur Algendichte c enthält. Dieses erweiterte Keller-Segel-Modell beschreibt die Größe der Muster und deren maximale Algendichte als Funktion von Ra sowie die symmetriebrechende Instabilität hin zum dendritischen Muster.

Damit zeigen die Autoren, dass das paradigmatische Keller-Segel-Modell der Chemotaxis auch auf Phototaxis anwendbar ist, wenn sie es um die Biokonvektion erweitern. Die Phototaxis erlaubt es ihnen, die räumliche Organisation mikrobischer Algenpopulationen gezielt zu kontrollieren. Das könnte für Anwendungen in Bioreaktoren interessant sein, wo Mikroorganismen, insbesondere Algen, unter optimalen Bedingungen gedeihen, etwa um biologische Wirkstoffe für die Pharmazie zu produzieren.

- [1] E. F. Keller und L. A. Segel, *J. Theor. Biol.* **30**, 225 (1971)
- [2] A. Ramamonjy, J. Dervaux und P. Brunet, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 258101 (2022)
- [3] H. Stark, *Acc. Chem. Res.* **51**, 2681 (2018)
- [4] M. Polin et al., *Science* **325**, 487 (2009)
- [5] A. Zöttl und H. Stark, *J. Phys.: Condens. Matter* **28**, 253001 (2016)

Der Autor

Prof. Dr. Holger Stark, Technische Universität Berlin, Institut für Theoretische Physik, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin

1) Der Dichteunterschied beruht hier nicht auf einem Temperaturgradienten.