

Kurzzusammenfassung

Bakterien können Grenzflächen besiedeln, indem sie dichte Kolonien ausbilden. In dieser Arbeit werden einfache Modelle entwickelt und untersucht, die den Einfluss passiver physikochemischer Kräfte und Prozesse – wie Osmose, Oberflächenspannungseffekte und Benetzbarkeit – auf die Ausbreitung bakterieller Kolonien beleuchten. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf zwei Ausbreitungsmechanismen: dem osmotisch getriebenen Spreiten und dem Spreiten angetrieben durch oberflächenaktive Moleküle, sogenannte Bio-Surfactants. Diese Mechanismen werden von Bakterienkolonien an Grenzflächen zwischen feuchten Substraten und Atmosphäre ausgenutzt. Die in dieser Arbeit entwickelten Modelle basieren auf einer hydrodynamischen Beschreibung dünner, aus Mischungen und Suspensionen bestehender Flüssigkeitsfilme, die um bioaktive Terme erweitert wird. Sie berücksichtigen daher explizit Oberflächenspannungseffekte und Benetzbarkeit.

Der erste Teil der Arbeit widmet sich dem osmotisch getriebenen Spreiten von Bakterienkolonien, das auf der Erzeugung von osmotischen Druckgradienten beruht. Die Bakterien produzieren extrazelluläre polymere Substanzen, die als Osmolyte wirken und einen Fluss von nährstoffreicher Flüssigkeit aus dem feuchten Substrat in die Kolonie hervorrufen. Die Analyse der entwickelten Modelle zeigt in Übereinstimmung mit experimentellen Befunden, dass die Kolonie zunächst vorrangig vertikal anschwillt und sich anschließend mit einem annähernd konstanten Kontaktwinkel lateral über das Substrat ausbreitet. Es zeigt sich, dass Benetzbarkeit die Spreitdynamik von Biofilmen drastisch beeinflusst und entscheidend dafür ist, ob sich die Kolonie auf dem Substrat ausbreiten kann oder nicht. Bei schlechter Benetzbarkeit wird die laterale Expansion der Kolonie unterdrückt, obwohl die Bakterien biologisch aktiv sind und Wachstumsprozesse stattfinden. Eine leichte Verringerung der Oberflächenspannung und die damit verbundene Verbesserung der Benetzbarkeit kann jedoch ausreichen, um ein laterales Spreiten der Kolonie zu ermöglichen. Dies kann beispielsweise durch Bio-Surfactants geschehen, welche die Eigenschaften der Oberfläche modifizieren. Im Allgemeinen ist die Produktion von Bio-Surfactants eine weitverbreitete Strategie, die Bakterienkolonien eine effektive Ausbreitung ermöglicht. Zusätzlich zur Verbesserung der Benetzbarkeit können Gradienten in der Surfactant-Konzentration am Rand der Kolonie Marangoni-Flüsse hervorrufen, die das Spreiten unterstützen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden passive, von unlöslichem Surfactant bedeckte Tropfen untersucht, um die Basis für die Berücksichtigung inhomogener Surfactant-Konzentrationen in der Modellierung zu schaffen. Zunächst werden statische passive Tropfen betrachtet und die in dieser Arbeit verwendete mesoskopische Beschreibungsebene des Systems wird mit einer makroskopischen Beschreibung verknüpft. Aus der Tatsache, dass beide Bilder zu konsistenten Resultaten führen müssen, können Beziehungen zwischen den jeweiligen Größen der beiden Beschreibungsebenen abgeleitet werden. Im Speziellen wird gezeigt, dass die Eigenschaften der mesoskopischen Benetzungsenergie mit der makroskopischen Oberflächenspannung der Grenzfläche zwischen Substrat und Atmosphäre verknüpft sind. Aus energetischen Überlegungen zu statischen Tropfen kann abgeleitet werden, dass die Struktur des Youngschen Gesetzes im Vergleich zum Surfactant-freien Fall unverändert bleibt. Die Surfactant-Konzentrationen auf dem Tropfen sowie auf der umliegenden Absorptionsschicht passen sich jedoch selbstkonsistent mit den daraus resultierenden Grenzflächenspannungen an.

Im nächsten Schritt wird ein Modell für das Surfactant-getriebene Spreiten bakterieller Kolonien entwickelt und analysiert. Dieses berücksichtigt die Produktion von Bio-Surfactants durch die Bakterien und die aus einer nicht-homogenen Surfactant-Verteilung resultierenden Marangoni-Flüsse. Es zeigt sich, dass das Zusammenspiel zwischen Benetzbarkeit und Marangoni-Flüssen die Ausbreitungsdynamik und Morphologie bakterieller Kolonien stark beeinflusst. Die Produktion von Bio-Surfactants kann die laterale Expansion unter für die Bakterien ansonsten ungünstigen Bedingungen ermöglichen. Zusätzlich bewirkt sie eine Instabilität der kreisrunden Form der Kolonie. Die Analyse des Modells zeigt, dass Variationen von Benetzbarkeit und Surfactant-Produktion ausreichen, um vier verschiedene Arten von Wachstum zu reproduzieren: Kolonien, deren laterales Spreiten verhindert wird, spreitende Kolonien mit kreisrunder oder leicht modulierter Form sowie die Ausbildung ausgeprägter Finger im Höhenprofil.

Im letzten Teil der Arbeit wird ein phänomenologisches Modell für aktive polare Flüssigkeiten hergeleitet, das einen ersten Schritt hin zur Einbeziehung der aktiven kollektiven Bewegung der Bakterien in die entwickelte Dünnschicht-Beschreibung der Kolonien darstellt. Das Modell verknüpft die Dynamik der freien Grenzfläche mit der eines Polarisationsfeldes, das den Eigenantrieb der Bakterien und aktive Spannungen beschreibt. In einer ersten Analyse des Modells werden ruhende und bewegte aktive Flüssigkeitstropfen untersucht.