

Anmerkungen zum Beitrag über Zilien

JARO RIČKA

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Zilien: Mannschaftsspiel mit Molekularmotoren“ in **Physik in unserer Zeit**, 41. Jahrgang 2010, Nr. 2, S. 74.

Nodale Zilien

Eine besondere Funktion haben die sogenannten nodalen Zilien in einem Embryo [1]. Mit ihrer bevorzugten Rotationsrichtung verursachen sie die Symmetriebrechung bei der Entwicklung des Organismus. Dass wir fast alle das Herz auf der gleichen Seite haben, verdanken wir den nodalen Zilien.

Das „Schlagen“ von Zilien in der Welt kleiner Reynoldszahlen

Beobachtet man die Bewegung der Zilien genauer, so sieht man, dass der Begriff des „Schlagens“ (Kraftschlag und Erholungsschlag) sie nicht zutreffend beschreibt. Obwohl die Bewegung für den menschlichen Beobachter schnell abläuft, handelt es sich eigentlich um „Kriechen“. Massgebend ist die Reynoldssche Zahl [2]. Die Zilie bewegt sich bei einer Reynoldszahl von etwa 0,001, also auf die gleiche Art, wie sich ein Mensch in einem Schwimmbecken voll Honig bewegen würde. Bei dieser Reynoldszahl spielt das „Schlagen“, also die Impulsübertragung durch Trägheitskräfte, kaum eine Rolle. Die Bewegung (sprich Impuls) wird durch die Reibung übertragen, genauer gesagt durch viskose Scherspannungen. Die Flüssigkeit haftet an den Zilien und dadurch wird ihre Bewegung in die Flüssigkeit abgeleitet.

Die Unterscheidung zwischen „Kraftschlag“ und „Erholungsschlag“ wird in der Welt der kleinen Reynoldszahlen hinfällig. Es kann vorkommen, dass bei der langsamen Bewegung einer Zilie in der Nähe der Zelloberfläche – also mit kleiner Relativgeschwindigkeit Δv in kleinem Abstand Δx – gleich viel Energie verbraucht wird, wie bei der schnellen aufrechten Bewegung. Dies gilt, weil die Scherspannung zum Geschwindigkeitsgradienten $\Delta v / \Delta x$ proportional ist.

Auch eine solche energiesymmetrische Bewegung kann durchaus zu einem Nettoimpulsübertrag führen. Was aber zählt ist nicht das Schlagen, sondern nur die Geometrie, das heißt eine kluge Abfolge von geometrischen Phasen [2, 3]. Unter diesem Gesichtspunkt lässt sich der Bewegungsablauf in Abbildung 2 im Heft (siehe auch Video 2) diametral anders interpretieren: Während des schnellen „Kraftschlags“ wird die Zilie von der Scherströmung mitgetragen (so wie die gelegentlich vorbeiziehenden Schmutzpartikel), wobei sie diese unter minimalem Energieaufwand auch leicht antreibt. Während des langsamen „Erholungsschlags“, hingegen, wird Energie verbraucht um sich gegen den viskosen Widerstand durchzukrümmen.

Beobachtungsmethode

Bei Mikroskoppräparaten, wie wir sie untersuchen, kommt nur die Auflichtbeleuchtung in Frage. Wir können nicht direkt die Oberfläche des Epithels mit den darauf wachsenden Zilien beobachten, da sich der Brechungsindex dieser Strukturen zu wenig von umliegendem Wasser oder Mukus unterscheidet. Was wir sehen ist im Wesentlichen die Lichtreflexion an der durch die Zilienbewegung leicht modulierten Mukus-Luft-Grenzfläche.

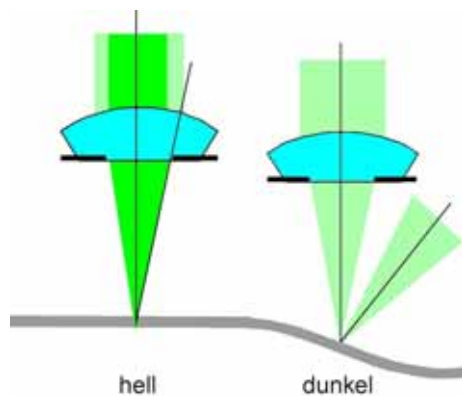


Abb. 2 Prinzip der Mikroskopie mittels Reflexionskontrast.

Für schwach modulierte Oberflächen verwendet man normalerweise den Interferenzkontrast nach Georges Nomarski. Diese Technik verursacht jedoch ein Orientierungsartefakt, welches die Analyse des Wellenfeldes unmöglich macht. Deshalb ziehen wir die einfachste Art der Reflexionsmikroskopie vor (Abbildung 1). Flache Stellen erscheinen weiß und Neigungen mehr oder weniger dunkel. Der so erreichte Kontrast ist durchaus mit der Nomarski-Methode vergleichbar und kann nach Bedarf durch eine Einengung der Apertur gesteigert werden. Dies geht natürlich auf Kosten der Auflösung, aber diese ist ohnehin durch die relative kleine Anzahl Pixel der schnellen CCD-Kamera eingeschränkt.

Wir verwenden meist eine Kamera mit einer Wiederholrate von 500 Bilder pro Sekunde und 256×256 Pixeln. Mit einem Objektiv mit 10-facher Vergrößerung beobachten wir so eine Fläche von $500 \times 500 \mu\text{m}^2$. Eine Flimmerzelle von circa $5 \mu\text{m}$ Durchmesser könnte also noch knapp aufgelöst werden, aber wir interessieren uns nun für weiträumige, viele Zellen umfassende Vorgänge.

Literatur

- [1] J. J. Essner et al., Nature **2002**, 418, 37.
- [2] E. M. Purcell, Am. J. Phys. **1977**, 45, 3.
- [3] A. Shapere, F. Wilczek, J. Fluid Mech. **1989**, 198, 557.