

Mit Licht Tröpfchen in Bewegung setzen

Xavier Laloyaux und Alain M. Jonas*

Azoverbindungen · Energieumwandlung ·
Photochromie · Tenside

Die Bewegung kleiner Objekte mithilfe von Licht ist nicht nur eine reizvolle Vorstellung, sondern führt auch zu praktischen Anwendungen, wenn ein lokalisierter ferngesteuerter Antrieb wie in Mikrofluiden dringend gewünscht ist. Sichtbares Licht ist ideal dafür geeignet, auf Mikrosysteme zu wirken, weil es leicht zu beugen und in Mikrostrahlen umzuformen, mithilfe von optoelektronischen Komponenten mit üblicher Elektronik zu koppeln und meistens zerstörungsfrei ist. Da Photonen sowohl Impuls als auch Energie besitzen, kann Licht durch Impuls- oder Energieaustausch in Arbeit umgewandelt werden. Der Photonenimpuls ist gewöhnlich schwach, kann aber dennoch zur Entwicklung von optischen Pinzetten oder von Sonnensegeln, die auf dem Strahlungsdruck basieren, eingesetzt werden. Sehr viel effizienter jedoch ist die Nutzung der Photonenenergie.^[1] Hierbei wird die Energie zunächst immer zur Anregung der Materie genutzt. Danach läuft eine Reaktionskaskade ab, die typischerweise zur Speicherung der Energie als elektrochemisches Potential in einer Batterie oder als Enthalpie in einem chemischen Brennstoff führt. Die gespeicherte Energie ist anschließend einsetzbar, um Arbeit zu leisten und Objekte zu bewegen, was einer indirekten Umwandlung von Lichtenergie in kinetische Energie entspricht.

Doch wie Baigl et al. kürzlich zeigten,^[2] ist auch eine direkte Überführung von Licht in mechanische Arbeit möglich. Bei ihrer Untersuchung bewirkt die Lichtenergie eine lokale Veränderung des chemischen Potentials eines Tensids an der Oberfläche eines auf der Wasseroberfläche schwimmenden Öltröpfchens, welche gemäß der Gibbs-Adsorptionsgleichung in eine lokale Veränderung der Oberflächenspannung übertragen wird (Abbildung 1).^[3] Der resultierende Gradient der Oberflächenspannung ist das Oberflächen-Äquivalent des osmotischen Drucks; er führt zu Konvektionsströmen an der Oberfläche des Tröpfchens, die die Flüssigkeit von Bereichen mit geringerer Oberflächenspannung zu solchen mit höherer Oberflächenspannung bewegen. Ein Teil der Tröpfchenoberfläche zieht daher, ähnlich einer elastischen Membran, an der im Tröpfchen enthaltenen Flüssigkeit, was insgesamt zu einer Verschiebung des Tröpfchens führt.

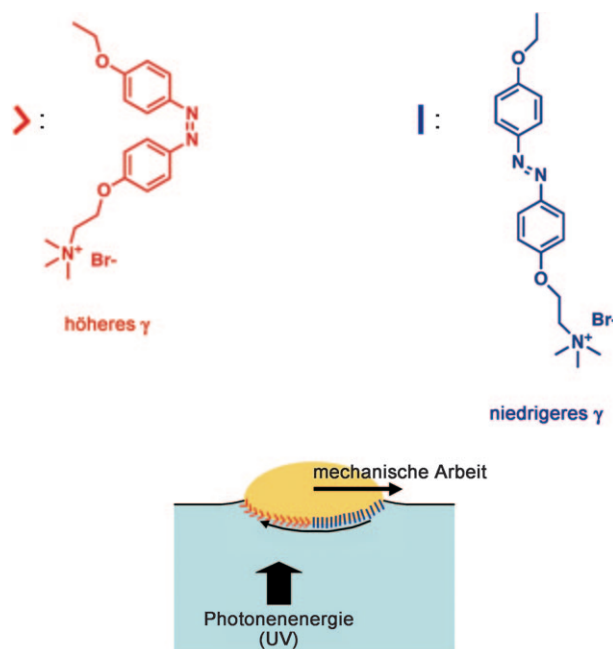


Abbildung 1. Die von Baigl et al. beschriebene photoaktivierte Tröpfchenbewegung.^[2] Die Modulation der Oberflächenspannung γ durch die photoinduzierte Konfigurationsänderung eines Azobenzol-basierten Tensids führt zu Konvektionsströmen und insgesamt zu einer Verschiebung des Tröpfchens.

Das von Baigl et al. eingesetzte Tensid ist ein auf Azobenzol basierendes, photochromes amphiphiles Molekül (siehe Abbildung 1), das seine Konfiguration bei Bestrahlung reversibel ändert und dadurch die cyclische Ausführung des Verfahrens ermöglicht. Eine Hintergrundbeleuchtung im sichtbaren Bereich dient dazu, die Moleküle in ihre *trans*-Konfiguration zu überführen, während ein lokaler UV-Strahl sie in ihre *cis*-Konfiguration anregt. Da die resultierende Kraft die Tröpfchen vom UV-Strahl fort bewegt und die Konvektionsströme bestrebt sind, den Gradienten der Oberflächenspannung aufzuheben, setzt eine kontinuierliche Tröpfchenbewegung die Verschiebung des UV-Strahls passend zur Bewegung des Tröpfchens voraus. Diese Vorgehensweise regeneriert effektiv den UV-beleuchteten Bereich an angeregten Molekülen und hält dadurch die Antriebskraft für die Verschiebung aufrecht. Verschiebungsgeschwindigkeiten von etwa einem Drittel Millimeter pro Sekunde können typischerweise auf diese Art erzielt werden.

[*] X. Laloyaux, Prof. A. M. Jonas
Institute of Condensed Matter and Nanosciences (Bio & Soft Matter)
Université catholique de Louvain
Boltzmann +2, Place Croix du Sud 1
1348 Louvain-la-Neuve (Belgien)
Fax: (+32) 10-451-593
E-Mail: alain.jonas@uclouvain.be

In einem weiteren Versuchsaufbau wird die Probe mit einer zylindrischen Hülle aus UV-Licht bestrahlt, während der Zentralbereich mit sichtbarem Licht beleuchtet wird. Auf diese Weise werden im Zentralbereich befindliche Tröpfchen von der UV-Hülle abgestoßen und bleiben eingeschlossen. Die Tröpfchen können daher je nach Beleuchtungsanordnung bewegt oder an bestimmten Orten festgehalten werden. Andere Arten der Verschiebung wären für praktische Anwendungen interessant; ein solcher Fall ist die ständige Rotation eines Tröpfchens, die noch nicht beschrieben wurde. Diese Rotation sollte durch Bestrahlung der Tröpfchen mit einer passenden Sequenz von räumlich lokalisierten Pulsen möglich sein. In diesem Fall würde ausschließlich Lichtenergie für die Bewegung des Tröpfchens eingesetzt, während bei der linearen Bewegung zusätzliche Energie zur Verschiebung des Leitstrahls aufzuwenden ist.

Oberflächenspannungsgradienten wurden bereits genutzt, um eine Tropfenbewegung auf festen Oberflächen hervorzurufen. Diese Gradienten wurden meist mithilfe von chemischen^[4,5] oder Temperaturgradienten^[4] erzeugt; derartige räumlich fixierte Gradienten ermöglichen allerdings keine kontinuierliche Tröpfchenbewegung. Eine solche Bewegung wurde mithilfe von lichtinduzierten Gradienten auf festen Oberflächen erzielt, auf die photoresponsive Moleküle aufgepfropft waren;^[6] in diesem Fall ermöglichte die Bewegung des Lichtstrahls, wie auch in der Arbeit von Baigl et al., eine kontinuierliche Bewegung. Es besteht jedoch ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen Arbeiten und der neuen Untersuchung, in der sich ein Tröpfchen zusammen mit seinem „Oberflächenspannungs-Transmissionsriemen“ bewegt. So ist der Gradient in der Arbeit von Baigl und seiner Gruppe Teil des Tröpfchens und steht unter dauernder dynamischer Kontrolle; damit eine Bewegung stattfindet, braucht es (außer der asymmetrischen Beleuchtung) nur eine Grenzfläche des Tröpfchens zu einer nichtmischbaren Flüssigkeit – eine sehr häufige Situation, die das System sehr viel anpassungsfähiger für reale Anwendungen macht als frühere Systeme, in denen sich das Tröpfchen nur über eine passend dazu konzipierte feste Oberfläche bewegen kann. In dieser Beziehung ähnelt das System von Baigl et al. den neuesten Beispielen sich selbst antreibender Mikrosysteme, wie Seifenboote,^[7] Wasserstoffperoxid-betriebene unsymmetrische katalytische Stäbe^[8] und lichtangetriebene Quader, bei denen der Grenzflächenspannungsgradient sich aufgrund der abgeführten Wärme bildet, sobald Licht an einer bestimmten Stelle des Quaders absorbiert wird.^[9]

Ein wesentliches Merkmal des Systems ist seine relativ schnelle Reaktion, die Verschiebungsgeschwindigkeiten in der Größe von Hunderten von Mikrometern pro Sekunde gestattet. Diese Geschwindigkeiten resultieren teilweise aus der niedrigen Barriere für die segmentweise Bewegung der photochromen Einheiten, die in eine monoschichtdicke fluide Grenzfläche eingebunden sind. Es gibt jedoch noch zahlreiche Aspekte der Dynamik des Systems, die eine genauere

Untersuchung verlangen, wie die Geschwindigkeit der Diffusion der Tensidmoleküle von der Grenzfläche in die flüssigen Volumenphasen und umgekehrt, die Geschwindigkeit ihrer lateralen Diffusion in der Grenzfläche oder ihre Lebensdauer in einer gegebenen Konfiguration. Derartige Faktoren sind weiter zu untersuchen, um die maximale Größe der Tröpfchengeschwindigkeit vollständig zu verstehen.

Die Ergebnisse ermöglichen uns die Vorstellung von Systemen, in denen viele Mikroreaktortröpfchen über die Oberfläche einer Flüssigkeit wandern, sich drehen, verschieben und sich in einer spezifischen zeitlichen Abfolge miteinander verbinden, wobei jedes Tröpfchen von außen durch einen Lichtstrahl gelenkt wird. Die vielen Strahlen zu steuern, die erforderlich sind, um Tausende von Tröpfchen zu verfolgen und zu beeinflussen, wird sicherlich eine hochentwickelte Tracking- und Optiktechnik erfordern; bedenkt man dabei jedoch, dass möglicherweise auch Lichtpulse statt einer kontinuierlichen Belichtung zur Bewegung der Tröpfchen eingesetzt werden können, ist die Situation weniger schwierig. Eine solche Technik würde den Weg für völlig neue Synthesemethoden bereiten, in denen kleine Volumina, an eine präzise Folge von Ereignissen gekoppelt, zu bedeutenden Fortschritten in der analytischen und der Syntheschemie führen, wie sie auf dem Gebiet der Mikrofluidik angestrebt werden. Die Allgemeingültigkeit der Methode bei anderen Solventien und unter normalen Umgebungsbedingungen ist noch nachzuweisen. Ist diese allgemeine Anwendbarkeit aber bewiesen, hat die Beeinflussung von Tröpfchen mithilfe von Licht eine leuchtende Zukunft.

Eingegangen am 25. Januar 2010

Online veröffentlicht am 25. März 2010

- [1] H. Koerner, T. J. White, N. V. Tabiryan, T. J. Bunning, R. A. Vaia, *Mater. Today* **2008**, *11*, 34–42.
- [2] A. Diguët, R.-M. Guillermic, N. Magome, A. Saint-Jalmes, Y. Chen, K. Yoshikawa, D. Baigl, *Angew. Chem.* **2009**, *121*, 9445–9448; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 9281–9284.
- [3] J. S. Rowlinson, B. Widom, *Molecular theory of capillarity*, Clarendon, Oxford, **1982**.
- [4] F. Brochard, *Langmuir* **1989**, *5*, 432–438.
- [5] M. K. Chaudhury, G. M. Whitesides, *Science* **1992**, *256*, 1539–1541.
- [6] a) K. Ichimura, S.-K. Oh, M. Nakagawa, *Science* **2000**, *288*, 1624–1626; b) J. Berna, D. A. Leigh, M. Lubomska, S. M. Mendoza, E. M. Perez, P. Rudolf, G. Teobaldi, F. Zerbetto, *Nat. Mater.* **2005**, *4*, 704–710; c) D. Yang, M. Piech, N. S. Bell, D. Gust, S. Vail, A. A. Garcia, J. Schneider, C.-D. Park, M. A. Hayes, S. T. Picraux, *Langmuir* **2007**, *23*, 10864–10872.
- [7] J. W. M. Bush, D. L. Hu, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **2006**, *38*, 339–369.
- [8] T. R. Kline, W. F. Paxton, T. E. Mallouk, A. Sen, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 754–756; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 744–746.
- [9] D. Okawa, S. J. Pastine, A. Zettl, J. M. Fréchet, *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, *131*, 5396–5398.