

Juliane Simmchen

Energiekrise auf der Mikroskala? Wie effizient sind Mikromotoren?

Optimistisch betrachtet hat die Coronakrise dazu geführt, dass heute nahezu jedes Kind weiß, was ein exponentielles Wachstum charakterisiert.

Ganz analog kann man argumentieren, die gegenwärtige Energiekrise bedingt nicht nur bewussteren Umgang mit Ressourcen, sondern hat auch den Begriff der Effizienz stärker in den Fokus rückt. Ganz allgemein gesagt, beschreibt Effizienz das Verhältnis zwischen aufgewandten Mitteln und erreichtem Erfolg. Abwandlungen sind in der Finanzwelt zu finden, im Ingenieurwesen und in vielen weiteren Bereichen unseres Lebens...

Auf der Makroskala sind diese Überlegungen relativ gut dokumentiert und die Informationen zugänglich, sodass wir diese Entscheidungen nach sorgfältiger Abwägung treffen, und den aktuellen Umständen anpassen können. So wissen wir etwa, dass die Wirkungsgrade in der Autoindustrie sich stark unterscheiden: Der TÜV gibt für Elektromotoren einen Wirkungsgrad von etwa 64% an, während Dieselaautos auf 45% und Benziner nur auf ca. 20% kommen. [1] Aber wie verhält sich das auf mikroskopischer Ebene? Mein Team und ich stellen künstliche Kolloidpartikel her, die in der Lage sind, sich selbst fortzubewegen wenn sie unter den richtigen Bedingungen in eine Treibstofflösung getan werden. Wie effizient nutzen diese Mikromotoren den chemischen Treibstoff? Können wir daraus vielleicht noch etwas für die Makroskala lernen und vielleicht sogar unsere Autos verbessern?

Auch in der Natur gibt es viele Beispiele von Mikroorganismen und Zellen, oder auf noch kleinerer Ebene aktiven Einheiten, die sich fortbewegen müssen um bestimmte Funktionalitäten zu erreichen: viele Bakterien schwimmen, um ihre Chance Nahrung zu finden zu optimieren, Spermien müssen lange Wege zurücklegen um das Ei zu befruchten, und in Zellen gibt

es unzählige Proteinmotoren, deren Bewegung unentbehrlich für Zellfunktionen und Transport innerhalb der Zelle ist. Die dafür benötigte Energie stammt im Allgemeinen aus dem Stoffwechsel, d. h. aus der Gesamtheit der chemischen Reaktionen, die zur Aufrechterhaltung aller Funktionen eines Organismus erforderlich sind. Darunter fallen Bereitstellung von Energie, von Bausteinen für den Körper oder zur Beseitigung von Abfallprodukten. Die chemischen Reaktionen, die dazu nötig sind, unterscheiden sich stark zwischen den einzelnen Arten. [2, 3]

Alle Lebewesen nutzen die aus dem Stoffwechsel gewonnene Energie für verschiedene Prozesse, darunter auch die Fortbewegung, und es gibt nur wenige Lebewesen, die sich in verschiedenen Stadien ihres Lebenszyklus nicht irgendwann bewegen. Wenn wir uns biologische mikroskopisch kleine Lebewesen wie Algen, Bakterien oder Spermien ansehen, dann fällt auf, dass sich diese hauptsächlich durch Körperverformungen bewegen: Die Natur hat verschiedene Muster entwickelt, die zu hohen Schwimgeschwindigkeiten und sehr effizienter Fortbewegung führen.

Der Nobelpreisträger Peter Mitchell, der den Nobelpreis für die Theorie zur Chemiosmose und den Energietransfer erhalten hat, war überzeugt, dass sich dieses Prinzip nicht auf eine Zellwand beschränken muss. Er postulierte, dass auch über den gesamten Körper eines Bakteriums ein Konzentrationsgradient aufgebaut werden sollte, der dann zur phoretischen Fortbewegung führt, oder anders bezeichnet: ein ionengetriebener Schwimmmechanismus für Bakterien. [4] Seit 1972 wurde dieser von vielen Wissenschaftlern gesucht, ist aber bis heute nicht gefunden worden. Jedoch hat Ramin Golestanian 2005 diese Idee aufgegriffen, und einen Mechanismus für Partikel postuliert, die an einer Stelle ihrer Oberfläche katalytische Reaktionen katalysieren können. [5] Kurz darauf stellte eine

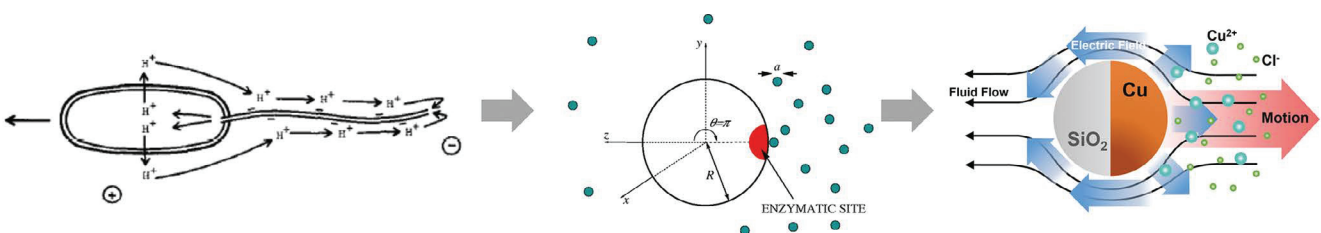


Fig. 1: Postulierter Mechanismus für Ionophorese [4], phoretischer Antrieb für synthetische Kolloide [5] und galvanophoretischer Mikromotor.

Dr. Juliane Simmchen
Technische Universität Dresden
Physikalische Chemie
01062 Dresden
juliane.simmchen@tu-dresden.de

Gruppe um Golestanian eine erste Realisierung von so einem kolloidalen Mikromotor vor: ein inertes Partikel, zur Hälfte mit Platin als sehr gutem Katalysator bedeckt, wird in eine ver-

dünnte Wasserstoffperoxidlösung eingetaucht und setzt sich durch die anisotrope Katalyse auf der Metallseite in Bewegung, eine sogenannte Selbst-Diffusiophorese. [6]

Seit dieser frühen Arbeit wurden viele weitere Details in das Konzept eingearbeitet, etwa wurde die inerte Hälfte durch einen Goldteil ersetzt, was eine Aufspaltung in Oxidation und Reduktion ermöglicht und eine selbst-elektrophoretische Bewegung hervorruft. D.h. das Teilchen wirkt wie eine kurzgeschlossene galvanische Zelle mit innerem Elektronenstrom und wird schließlich durch den entsprechenden Ionenstrom angetrieben. [7]

Auch die Verwendung halbleitender Grundmaterialien hat mittlerweile Einzug in die Fabrikation von Mikromotoren gehalten: damit ist nicht nur die An- bzw. Abwesenheit von Treibstoff ein Kontrollfaktor, sondern auch die katalytische Aktivität selbst lässt sich ausschalten und damit die Bewegung kontrollieren. [8, 9]

Häufig ausgeklammert werden auf dieser kleinen Skala die Betrachtungen zur Effizienz. Gründe dafür sind, dass die Bestimmung, wieviel Treibstoff aufgewendet wurde, nicht trivial ist, aber auch, weil diese Experimente noch ganz auf dem Gebiet der Grundlagenforschung liegen und die Kosten noch nicht hochskaliert werden müssen, wird einfach eher selten betrachtet, wie das Verhältnis der erhaltenen Leistung zur eingesetzten Leistung ist. Das Team von Tom Mallouk etablierte bereits 2013 eine stark an Verbrennermotoren orientierte Berechnungsweise für die Effizienz der Mikromotoren: es wurde angenommen, dass die vom Mikromotor abgebrachte mechanische Leistung das Produkt aus Geschwindigkeit und Widerstandskraft ist. Dieses verglichen mit der Energieleistung, die aus der Sauerstofferzeugungsrate multipliziert wird und der freien Energieänderung der Reaktion. [10] Dieses Prinzip wurde auf verschiedene Antriebsmechanismen angewandt: Sie untersuchten Selbst-Elektrophorese, Blasenantrieb und magnetisch betriebene Mikromotoren eingehend und konnten feststellen, dass aufgrund der Kopplung von chemischem Gradienten und Strömungen die Wirkungsgrade eher gering sind. Gründe dafür sind meist auf den Mechanismus zurückzuführen mit dem chemische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird. Darüber hinaus können verschiedene physikalische Effekte vorhanden sein, die Kräfte erzeugen, die nicht immer in dieselbe Richtung weisen.

Als wir letztes Jahr eine Art von Mikromotor entwickelten, deren typische Treibstoffkonzentration 100-10000 mal geringer ist als in normalen H_2O_2 Experimenten, dachten wir eine hoch-effiziente Bewegungsmöglichkeit gefunden zu haben: die "Galvanophorese". Die Motilität der Partikel wird durch die Strömungen ausgelöst, die an den Metallkappen der Janus-Teilchen durch einen galvanischen Austausch entstehen, d. h. ein elektrochemischer Redoxprozess, bei dem ein unedles Metall in seiner elementaren Form mit einer Edelmetallionen enthaltenden Lösung in Berührung kommt. Den Prozess an sich kennt man etwa von Opferanoden an Schiffen. Die Standard-Reduktionspotentiale der beiden Metalle bewirken eine Reduktion und Abscheidung des Edelmetalls, während das unedlere Metall oxidiert wird und in seine gelöste Form übergeht.

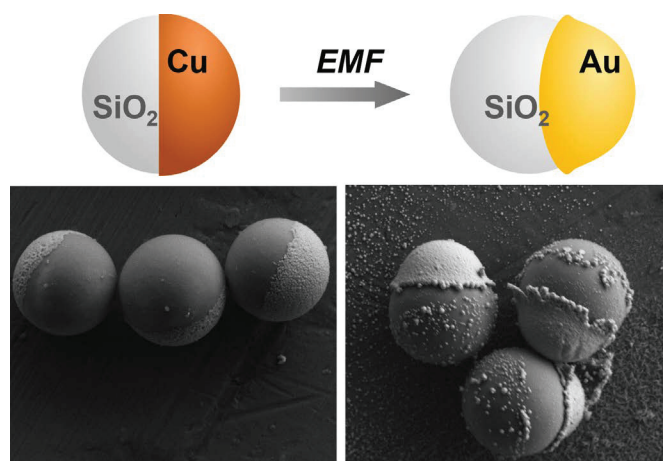


Fig. 2: Während der Galvanophorese wird die Kupferkappe der Januspartikel aufgelöst und Gold scheidet sich ab, Schema und Elektronenmikroskopie.

Diese galvanische Austauschreaktion erzeugt sehr lokalisiert Ionengradienten an der Partikeloberfläche, ohne Nebenreaktionen und Zersetzung an unerwünschten Stellen in der Lösung, da die Reaktion ausschließlich an der Opfermetallkappe stattfinden kann. Nachdem wir den Wirkungsgrad berechnet hatten und dieser lediglich 10^{-7} betrug, begaben wir uns auf Ursachensuche: der Energiegehalt der Reaktion (ΔG) ist sehr hoch, und da dieser als Faktor in die eingesetzte Leistung eingeht, erhalten wir trotz extrem geringer Konzentration eine relativ geringe Effizienz. Nun wenden wir uns der Definition zu, vermutlich brauchen diese Prozesse einfach einen anderen Parameter, um zu charakterisieren, wie effizient sie sich fortbewegen.

References

- [1] TÜV Nord, Wirkungsgrad - Die Nutzbarkeit der Energie.
- [2] D. Voet, J. G. Voet, *Biochemistry* 2011.
- [3] J. M. Berg, J. L. Tymoczko, L. Stryer et al., *Biochemistry*, 2002.
- [4] P. Mitchell, *FEBS letters* 1972, **28**, 1-4.
- [5] R. Golestanian, T. B. Liverpool, A. Ajdari, *Phys. Rev. Lett.* 2005, **94**, 220801.
- [6] J. R. Howse, R. A. Jones, A. J. Ryan, T. Gough, R. Vafabakhsh, R. Golestanian, *Physical review letters* 2007, **99**, 048102.
- [7] W. F. Paxton, A. Sen, T. E. Mallouk, *Chemistry-A European Journal* 2005, **11**, 6462-6470.
- [8] L. Wang, A. Kaeppler, D. Fischer, J. Simmchen, *ACS applied materials & interfaces* 2019, **11**, 32937-32944.
- [9] S. Heckel, J. Simmchen, *Advanced Intelligent Systems* 2019, **0**, 1900093.
- [10] W. Wang, T.-Y. Chiang, D. Velegol, T. E. Mallouk, *Journal of the American Chemical Society* 2013, **135**, 10557-10565.

Dr. Juliane Simmchen

Aufgewachsen in einem kleinen Dorf in Ostsachsen, studierte Juliane Chemie an den Universitäten Dresden und Neapel. Nach dem Diplom in analytischer Chemie zog sie nach Barcelona. Während ihrer Promotion am Institut für Nanowissenschaften und Nanotechnologie (ICN2) verliebte sie sich in Kolloide und entdeckte die Herausforderungen, die sich ergeben, wenn man den Kolloiden eine gewisse Autonomie bei der Fortbewegung einräumen will. Um ein tieferes Verständnis der zugrundeliegenden Physik zu erlangen, wechselte sie an das MPI für Intelligente Systeme in Stuttgart, wo ihre Forschungsideen mit einem Freigeiststipendium ausgezeichnet wurden. Nachdem sie sechs Jahre lang eine Gruppe an der Universität Dresden geleitet hat, ist Juliane seit kurzem Reader an der University of Strathclyde im schönen Schottland.

ZITATBOX**Albert Einstein (1879 - 1955)**

„Wenn die Biene einmal von der Erde verschwindet, hat der Mensch nur noch vier Jahre zu leben. Keine Bienen mehr, keine Bestäubung mehr, keine Pflanzen mehr, keine Tiere mehr, kein Mensch mehr.“

„Die Welt wird nicht bedroht von den Menschen, die böse sind, sondern von denen, die das Böse zulassen.“

„Solange mir die Möglichkeit offen steht, werde ich mich nur in einem Lande aufhalten, in dem politische Freiheit, Toleranz und Gleichheit aller Bürger vor dem Gesetz herrschen. Zur politischen Freiheit gehört die Freiheit der mündlichen und schriftlichen Äußerung politischer Überzeugung, zur Toleranz die Achtung vor jeglicher Überzeugung des Individuums.“

„Das Wertvollste im Leben ist die Entfaltung der Persönlichkeit und ihrer schöpferischen Kräfte.“

Quelle: <https://gutezitate.com/autor/albert-einstein>

Publish in PCCP and thus strengthen your DBG!

Physical Chemistry Chemical Physics (PCCP) is an international journal for the publication of cutting-edge original work in physical chemistry, chemical physics and biophysical chemistry. The paper appears in 48 issues per year. In 2020 PCCP had the second largest market share of international journals for physical chemistry.

PCCP was founded in 1999 by the Bunsen Society together with 18 other European specialist societies and is published by the Royal Society of Chemistry (RSC). As a co-owner, the DBG benefits from the publications by German authors in the magazine.

Current articles and information on submission can be found at
www.rsc.li/pccp



Deutsche Bunsen-Gesellschaft
für physikalische Chemie

