

Irány a kolloid motor¹

A kolloidika tudományának egy lehetséges mérnöki alkalmazása

ZRÍNYI Miklós^{1,2+}, Masami NAKANO³

¹Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet, Nanokémiai Kutatócsoport, Általános Orvostudományi Kar, Semmelweis Egyetem, Nagyváradi tér 4, 1089 Budapest, Magyarország

²MTA-SE Molekuláris Biofizikai Kutatócsoport, Semmelweis Egyetem, Nagyváradi tér 4, 1089 Budapest, Magyarország

³Intelligent Fluid Control Systems Laboratory, Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577, Japán

Absztrakt

Dolgozatunkban egy példán keresztül megmutatjuk, hogy a kolloidika több mint 120 éve felfedezett, és teljességében mind a mai napig meg nem ismert jelensége, hogyan járulhat hozzá mikro-elektromotorok fejlesztéséhez. A miniatürizált elektromotor rotorjának forgómozgását a kolloidika egy régi felismerése a Quincke rotáció szolgáltatja. Sztatikus elektromos tér hatására forgó mozgást végző epoxi alapú polimer korongok, mint rotorok forgási intenzitását vizsgáltuk az elektromos térerősség függvényében. A kísérletekhez néhány száz mikrométer átmérőjű polimer korongokat és belőlük készített fogaskerekeket készítettünk forgórész gyanánt. A 100 – 500 mikron nagyságú polimer rotorok olajban történő forgását változtatott egyenáramú DC elektromos tér hatására vizsgáltuk. A sztatikus homogén tér hatására a mikrométerű polimer forgórészek forgási sebessége széles határok között (300-3000 rpm) változott. Ezzel új távlatokat nyitottunk e rendszerek mikro-elektromotorként való felhasználásában.

1. Bevezetés

Molekuláris motorok megalkotása mind biofizikai, mind technikai szempontból alapvető jelentőségű. A biofizikai kutatás főként a lineáris mozgást végző motorfehérjék, és a forgómozgást végző bakteriális flagellák vizsgálatára irányul.¹ Parányi motorok technikai alkalmazását, mikro- és nano-motorok megépítésének ötletét és lehetőségét elsőként R. P. Feynman vetette fel 1959-ben.² Azóta a mikro-elektromechanika (MEMS) területén jelentős fejlődés következett be. A gyors fejlődés ellenére igen kevés előrelépés történt a tíz mikrométer alatti mérettartományban. A szerkezetek megépítése és a forgó mozgás tanulmányozása nagy kihívást jelent. Az elektromotor miniatürizálása, a már létező motor alkatrészek méreteinek csökkentése során érhető el. E technika alapján az első mikro-motort L. S. Fan és Y.C. Tang fejlesztette ki 1988-ban.³ Az elektrosztatikusan hajtott motor mindössze 120 m átmérővel rendelkezett, és néhány pNm forgatónyomaték hatására 500 rpm forgási sebességet ért el. A hagyományos elektromágneses motor orsóit – bonyolult felépítésük következtében – még nehezebb lekicsinyíteni. Annak ellenére, hogy számos kutatás foglalkozik a mikro-motorok gyártásával és fejlesztésével, a tervezésükkel

és kivitelezésükkel kapcsolatban csak igen kevés tanulmány található az irodalomban.³⁻⁷ Áttörést jelenthet Jean-Pierre Sauvagen, J. Fraser Stoddart és Bernard L. Feringan által catenan és rotaxan típusú molekulák tengely körüli szabályozott forgómozgásával megalkotott molekuláris motorja.⁸ A jövőbeli nanotechnológiai alkalmazásokat megalapozó áttörő kutatási eredményt a 2016-ban átadott kémiai Nobel díjjal ismerték el. A közeljövőben várható a molekuláris motorok egyre szélesebb körű technikai alkalmazása. Ehhez azonban meg kell oldani néhány technikai problémát. Egy jól működő molekuláris motornak rendelkeznie kell néhány alapvető szabályozhatósági kritériummal:

- a forgó mozgást be- és ki lehessen kapcsolni,
- a forgási sebességet szabályozni lehessen, valamint
- a forgás irányát meg lehessen változtatni.

Ezek után jön annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy a molekuláris motorral milyen forgatónyomaték érhető el, és hogyan lehet a nyomatékat más nano-, illetve mikrométerű szerkezetekhez eljuttatni. A molekuláris motor energetikai jellemzőinek, hatásfokának megismerése is intenzív kutatómunkát igényel.

A Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézetének Nanokémiai Kutatócsoportjában, együttműködve Japán kutatókkal több éve foglalkozunk forgó mikro- és nano-motorok kifejlesztésével. Célunk a technikában is használható olyan miniatürizált mikro-motorok kifejlesztése, amelyek eleget tesznek az említett szabályozhatósági kritériumoknak. A hagyományos elektromotorok miniatürizálása a szerkezet bonyolultsága miatt reménytelen feladatnak látszik, ha az elektromotor méretével legalább a mikron tartományig akarunk eljutni. Hol van még a molekuláris skála! Ennek a megcélzott mérettartománynak, a kolloid méret tartománynak, további előnye, hogy fénymikroszkóppal megfigyelhetjük a forgó mozgást, és így szisztematikus kísérleteket végezhetünk. Az általunk elsőként kifejlesztett, szabályozható forgó mozgást mutató mikro-elektromotor működésének elvi alapjait a kolloidika tudománya adta meg.

1892-en G.H. Quincke mikroszkópon megfigyelte, hogy néhány szervesetlen anyag (üveg, kén, topáz, turmain aragonit...) mikroszkopikus szemcséi homogén DC elektromos tér hatására intenzív forgó mozgást végeznek.⁹

⁺ e-mail: mikloszrinyi@gmail.com

Zrínyi Miklós: Kolloidok a nanotechnológia és a modern orvostudomány szolgálatában. Akadémiai székfoglaló előadás (Budapest, MTA székház, 2013. december 10.) egyik témája.

Ezt a „misztikus” jelenséget Quincke rotációnak nevezi a szakirodalom. Azért írjuk a misztikus jelzőt, mert mind a mai napig nincs elfogadott értelmezése ennek a jelenségnek, amely sztatikus körülmények között, homogén DC elektromos térben intenzív forgó mozgást indukál.

Korábbi publikációnkban először elektrorotácót mutató, kolloidméretű szerves anyagot kerestünk.¹⁰⁻¹³ Megállapítottuk, hogy az ortorombos FeO(OH) hematit részecskék lenmagolajban intenzív, a térerősséggel jól szabályozható forgó mozgást végeznek. A szerves részecskék, bár jól mutatják az elektrorotáció jelenségét, törékenyséjük és nehéz geometriai formálhatóságuk mégsem teszik alkalmassá mikromotor rotorjának kifejlesztésére. Polimereket sokkal könnyebb formázni, ezért a következő lépést az jelentette, hogy az elektrorotácót mutató kolloid részecskéket polimerbe ágyaztuk. Térhálósított PVA és zselatin kompozitokból szabályos mikroméretű korongokat állítottunk elő, majd ezek forgó mozgását tanulmányoztuk DC elektromos térben.¹¹ Várakozásunknak megfelelően a részecskékre ható forgatónyomaték a polimer korongokat is mozgásba tudta hozni. A polimer kompozitok mikroméretű formázását gyakran nehezítette meg a részecskék jelenléte miatt fellépő strukturális inhomogenitás, ami a finom rajzolatok létrehozását megnehezítette. Megismervén a elektrorotáció törvényszerűségeit, célul tűztük ki egy tisztán polimerből álló rotor kifejlesztését.¹⁴ Jelen dolgozatban beszámolunk a kolloid motor kifejlesztésével kapcsolatos ezen eredményeinkről.

2. Elméleti háttér, kolloid részecskék kölcsönhatása külső elektromos térrel

Az elektrorotáció, avagy Quincke rotáció, dielektromos folyadékban lévő elektromosan polarizált mikroméretű részecske forgó mozgása. Az igen kisszámú kísérleti munka mellett számos szerző adott már közelítést a merev gömbölyű részecskékre érvényes forgás mozgás elméleti leírására.¹⁵⁻¹⁸ Ezek a közelítések azon a feltételezésen alapulnak, hogy a folyadékból és a részecskéből jövő szabad töltések a részecske felületén gyűlnek össze, ezáltal hozva létre \mathbf{P} dipólus momentumot. Az indukált dipólus momentum nagysága és iránya az \mathbf{E} elektromos térerősségtől és anyagi állandóktól függ,

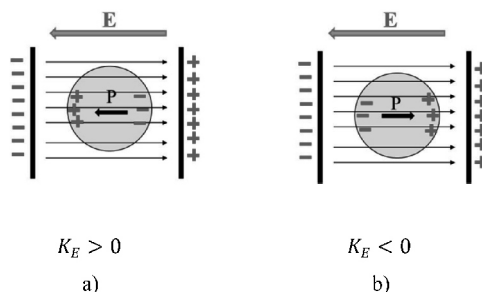
$$\mathbf{P} = 4\pi\epsilon_1 K_E R^3 \mathbf{E} \quad (1)$$

ahol \mathbf{R} a kolloid méretű részecske sugarát, \mathbf{K}_E pedig az permittivitásoktól függő Clausius-Mosotti függvényt jelenti,

$$K_E(\epsilon_1, \epsilon_2) = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \quad (2)$$

ahol az 1 és 2 indexek a folyadék, illetve a diszperz részecske permittivitását jelöli. Az esetek nagy többségében $K_E < 0$, ami azt jelenti, hogy az indukált dipólus vektor és a térerősség vektor azonos irányú. Ez a helyzet stabil mechanikai egyensúlyt jelent, ahogy azt az egyensúly 1.a ábra mutatja. A folyadék és a szilárd részecske minőségének megfelelő megválasztásával (a permittivitások megválasztásával) megvalósítható a Clausius-Mosotti függvény negatív értéke.

(1.b Ábra). Ez olyan instabil helyzetet jelent, amely a részecske elfordulását eredményezi. Amennyiben az indukált töltések kialakulása változik a részecske felületén, az instabilitás fennmarad, és az elektrosztatikusan indukált forgatónyomaték a részecske folyamatos forgó mozgását eredményezi. A spontán forgás feltételeit a permittivitás (ϵ) és a konduktivitás (σ) meghatározott értéke adja meg.



1. Ábra: Indukált dipólusok kialakulása homogén elektromos tér hatására.

a) stabil állapot,

b) instabil állapot,
ami forgással stabilizálódik

Ha a töltés relaxációs ideje rövidebb a folyadékban, mint a szilárd anyagban, akkor az indukált dipólus iránya ellentétes irányú az elektromos tér irányával. A forgatónyomaték elindítja a részecske elektromos térre merőleges irányú forgástengely körüli forgását. Ha a viszkozus ellenőrző kiegyensúlyozza az elektromos forgatónyomatékot, beáll a stacionárius állapot. Ilyenkor az alkalmazott elektromos térerősség (E) függvényében a forgást jellemző szögsebesség (N) a következőképpen adható meg:¹⁶⁻¹⁹

$$N(E) = \pm \frac{1}{\tau_{MW}} \sqrt{\frac{E^2}{E_{cr}^2} - 1} \quad E > E_{cr} \quad (3)$$

Ahol E_{cr} elektromos térerősség küszöbértéke, ahol a szilárd részecskék forgása beindul, és τ_{MW} a Maxwell-Wagner-féle határfelületi polarizáció relaxációs ideje, amely gömb alakú részecskék esetén:

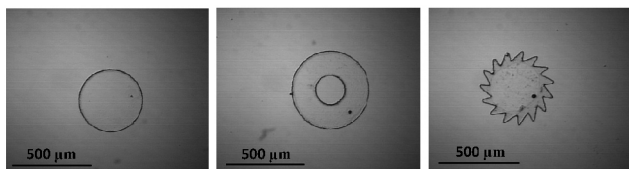
$$\tau_{MW} = (2\epsilon_1 + \epsilon_2) / (2\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4)$$

Az 3-as egyenlet az 1-500 nm mérettartományba eső szilárd részecskékre érvényes. A \pm jel a tengely körüli forgás két lehetséges irányára utal. Meg kell említenünk, hogy F. Peters, L. Lobry, A. Khayari, és E. Lemaire kidolgoztak egy elméletet a gömbtől eltérő geometriájú rendszerek elektromos forgásának leírására.¹⁹ Legjobb tudomásunk szerint korong alakú polimer elektrorotációjára sem elmélet, sem pedig saját munkánkon kívüli kísérleti vizsgálat nem található a szakirodalomban.

3. Kísérleti anyagok

Vizsgálatainkat a Micro Resist Technology cégtől (Németország) vásárolt SU8 2075 fényérzékeny anyaggal végeztük. Kétféle vastagságú és négy különböző átmérőjű SU8 korongot és aszimmetrikus fogakkal rendelkező fogaskereket készítettünk litográfiai technikával.¹⁰ Ezek

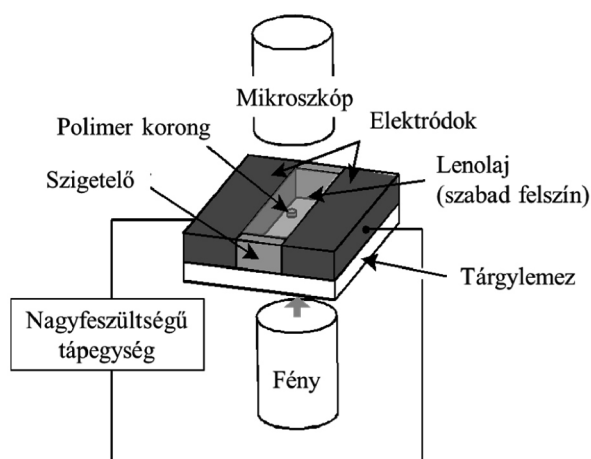
átmérője 100-500 mikron, vastagsága pedig 20-40 mikron között változott. A kísérleti eljárás részletes leírása megtalálható az előző publikációkban.^{14,15} Az elektromos forgás jelenségét olyan folyadékban tanulmányoztuk, amely nagy mennyiségű olajsav-, palmitinsav- és linolsav trigliceridjeit tartalmazza.



2. **Ábra:** Epoxi alapú polimerből készített polimer rotorok. A rotorok szélén látható pont segítségével határoztuk meg a forgási sebességet.

4. Kísérleti módszerek

Vizsgáltuk a DC elektromos tér intenzitásának hatását a forgás sebességére. Ehhez a korong tengelyére merőlegesen ható egyenáramú DC elektromos teret keltettünk. A 3. ábrán látható a kísérleti berendezés, amellyel tanulmányoztuk a homogén elektromos térbe helyezett korong alakú polimer rotorok forgási viselkedését. A két elektród közötti rés nagysága 3 mm, amelyet az előzőekben említett olajjal töltöttünk ki. Az elektromos teret nagyfeszültségű DC tápegység (TREC, USA) biztosította. Az elektromos tér intenzitását lépcsőzetesen növeltük egészen 2,2 kV/mm-ig. A forgást nagysebességű kamerával (Photron, Japán) felszerelt optikai mikroszkóp (OLYMPUS, Japán) segítségével követtük. A forgás vizualizálására és a szögfrekvencia meghatározására a korong szélénél lévő jelölés szolgált. A forgás szögfrekvenciáját a korong forgó mozgásáról készült felvétel alapján határoztuk meg, minden egyes elektromos tér intenzitásnál. Kísérleteinkhez nem csak korongokat, hanem a 3. ábrán mutatott geometriájú rotorokat is használtunk.



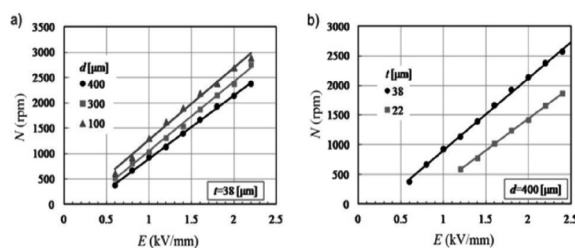
3. **Ábra:** A forgási sebesség és a DC elektromos tér intenzitás kapcsolatának meghatározásához használt kísérleti összeállítás.

5. Eredmények

Kísérleteink során megállapítottuk, hogy homogén elektromos térben a korongra mozgó erő nem, csak forgatónyomaték hat. Eredményeink szerint az elektromos tér síkjára merőleges tengely állandó helyzeténél jelentkeznek forgó mozgás. Tanulmányoztuk a forgási sebesség és a DC elektromos mező intenzitásának kapcsolatát. Megállapítottuk, hogy a polimer rotorok forgásának dinamikája igen összetett. Az elektrosztatikus tér erősségét figyelembe véve három szakaszt különíthetünk el.

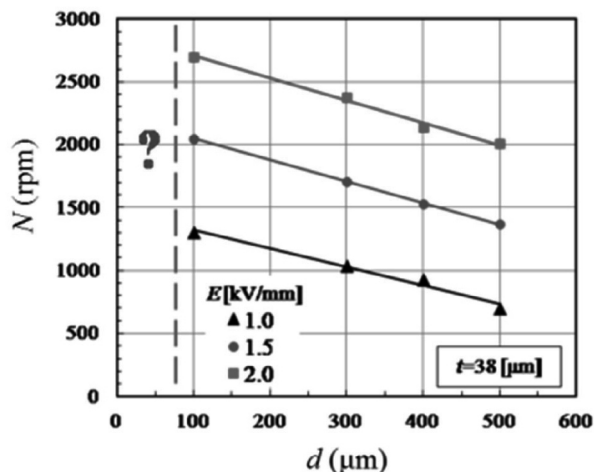
- Jóval az elektromos tér határértéke alatt (E_{cr}), a korongok nem mutatnak forgó mozgást.
- A határérték közelében és kissé felette, a korong elkezd mozogni, de a szögelfordulás kisebb, mint 2° .
- A határértéknél magasabb DC tér intenzitások esetén folyamatos a forgó mozgás.

Megjegyezzük, hogy tökéletes geometriájú polimer korongoknál a forgás ugyanolyan valószínűséggel valósul meg az óramutató járásával megegyező-, illetve azzal ellentétes irányban. A 4. (a) ábrán látható, hogy az elektromos tér intenzitásának növekedésével a forgás sebessége növekszik, és a kísérleti hibahatáron belül belül lineáris a változás. Továbbá az is megfigyelhető, hogy az elektrosztatikus tér határértéke (E_{cr}), - aminél elkezdődik a forgás - közel 0,6 kV/mm. Az ábra azt is megmutatja, hogy a forgási sebességet jelentősen befolyásolja a rotor mérete. Azonos elektromos tér intenzitás esetén a legkisebb korong (100 mikron) forgó mozgása a legintenzívebb. A korongok vastagságának vizsgálata során épp ellenkező hatást figyeltünk meg, amely a 4. (b) ábrán figyelhető meg. Azonos elektromos tér intenzitás esetén a vastagabb korong (38 mikron) forgási sebessége nagyobb volt. A legnagyobb forgási sebesség, amit még képesek voltunk megfigyelni közel 3000 rpm volt, amely jelentősen meghaladja az első elektrosztatikusan hajtott motor forgási sebességét.³



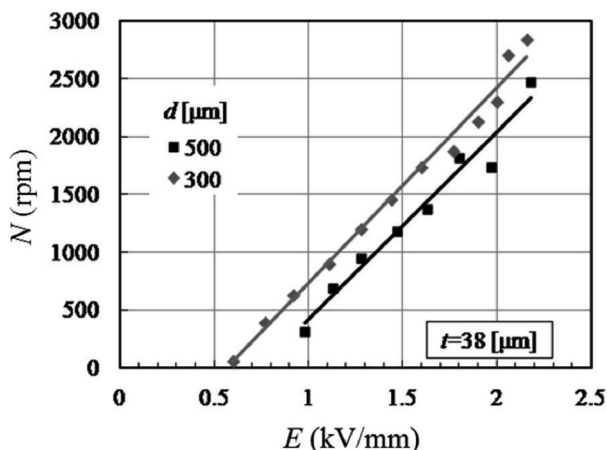
4. **Ábra:** A forgási sebesség (N) függése a térerősségtől, átmérőtől (d) és vastagságtól (t).

A mikroméretű rotorok igen intenzív forgást mutatnak homogén elektromos térben. Munkánk során a legkisebb rotor átmérője 100 μm , vastagsága 22 μm volt, amely messze a nano mérettartomány fölé esik. Ez a munka tisztán jelzi, hogy a rotor méretének csökkentésével a forgás sebessége növekszik, ahogy az 5. ábrán is látható. Nagy kihívást jelent a korong átmérőjének nanoméretre csökkentése (a kérdőjellel jelölt terület az 5. ábrán). Ebben az esetben a nano-rotorok forgását fénymikroszkóppal már nem tudnánk megfigyelni. A néhány mikrométer átmérőjű motorok építése azonban szép reményekkel kecsegtet, amelyekkel az itt bemutatottaknál sokkal gyorsabb forgás is elérhető.



5. Ábra: A forgási sebesség (N) függése a polimer korong átmérőjétől (d).

A technikai alkalmazásnál fontos, hogy szabályozni tudjuk a forgás irányát. A tökéletes korongok forgása az óramutató járásával megegyező-, és ellentétes irányban egyenlő valószínűséggel történhet. Szabályozott irányú forgás előidézése érdekében meg kellett szüntetnünk a rotor szimmetriáját, amelyet aszimmetrikus fogú fogaskerék kialakításával értünk el. A fogak vezető- és hátoldalán különböző szögben történő bevágással alakítottuk ki az aszimmetrikus fogú formáját (2. ábra). Az aszimmetrikus fogú rotoroknak köszönhetően minden esetben irányított forgás jellemezte a rendszerünket. Az 5. ábrán megfigyelhető, hogy a forgás sebességére szintén jelentős hatást gyakorol a fogaskerék mérete. Azonos elektromos térintenzitás alkalmazása esetén a kisebb fogaskerék (300 mikron) mutatott intenzívebb forgó mozgást. Emellett az is látható, hogy a forgási sebesség és az elektromos tér intenzitása között fennálló kapcsolat továbbra is lineáris.



6. Ábra: A különböző átmérőjű (d) polimer fogaskerek forgási sebességének (N) függése az alkalmazott elektromos tér intenzitásától (E). A rotorok vastagsága mindkét esetben 38 μm .

6. Az eredmények összefoglalása

A kismértékben elektromosan vezető folyadékban merített polimer korong forgását vizsgáltuk a sztatikus homogén elektromos tér intenzitásának függvényében. Megállapítottuk, hogy egy kritikus térorosság felett, a mikroméretű polimer korongok intenzív forgó mozgást végeznek. Az elektromos tér intenzitásának növelésével a forgó korong és polimer fogaskerék forgási sebessége növekszik. A rotor átmérőjének csökkentésével a forgás intenzitása szintén növekszik. Ismereteink alapján még nem tudjuk kidolgozni azt az elméleti hátteret, amellyel értelmezhetnénk az elektromos forgás jelenségének összetettségét, de az eddigi kísérleti eredmények alapvető információval szolgálnak egy új típusú mikro-motor további fejlesztéséhez.

Az elektrorotáció törvényszerűségeinek mélyebb megismerése nemcsak a mikro elektromechanika (MEMS), hanem a kolloidika további fejlődése számára is alapvető fontosságú.

Köszönetnyilvánítás

E kutatást a JSPS Grant-in-Aid for Challenging Exploratory Research (Grant No. 26630084, 2014-2015), a Collaborative Research Project of Institute of Fluid Science, Tohoku University és az OTKA (Grant No. K115259) támogatta.

Hivatkozások

1. Sauvage, J.-P. (ed.) *Molecular Machines and Motors*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg and New York, **2001**. ISBN: 978-3-540-41382-0 <https://doi.org/10.1007/3-540-44421-1>
2. Feynman, R. J. *J. Microelectromech. S.* **1993**, *2*, 4-14. <https://doi.org/10.1109/84.232589>
3. Fan, L.-S.; Tai, Y.-C.; Muller, R. S. *IC-processed electrostatic micromotors; Technical Digest*; International Electron Devices Meeting: San Francisco, **1988**, 666-669. <https://doi.org/10.1109/IEDM.1988.32901>
4. Ghalichechian, N.; Modafe, A.; Beyaz, M. L.; Ghodssi, R. J. *J. Microelectromech. S.* **2008**, *17*, 632-642. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2008.916346>
5. Vinhais, H. F.; de Godoy, P. H.; Silva, E. C. N. *Optimized Design on An Electrostatic Side-Drive Micromotor*; ABCM Symposium Series in Mechatronics **2006**, *2*, 433-450. ISBN: 978-85-85769-26-0
6. Nicolaescu, M. A.; Campeanu, A. Proceedings of 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, Chişinău, Republic of Moldova, Oct. 4-6, **2007**, 421-424.
7. Loget, G.; Kuhn, A. *Nat. Commun.* **2011**, *2*, Article number: 535. <https://doi.org/10.1038/ncomms1550>
8. The Royal Swedish Academy Of Sciences *Molecular Machines*, 5 Oct. **2016**
9. Quincke, G. *Ann. Phys. Chem.* **1896**, *59*, 417-486. <https://doi.org/10.1002/andp.18962951102>
10. Zrínyi, M. *Colloid Surface A* **2011**, *382*, 192-197. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.01.047>
11. Antal, M.; Filipcsei, G.; Zrínyi, M. *Compos. Sci. Technol.* **2007**, *67*, 2884-2885. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.03.027>

12. Zrínyi, M. *J. Electrostat.* **2013**, *71*, 357-361.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.006>
13. Zrínyi, M.; Nakano, M.; Tsujita, T. *Smart Mater. Struct.* **2012**, *21*, Paper 065022.
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/6/065022>
14. Bauer, R. A.; Kelemen, I.; Nakano, M.; Totsuka, T.; Zrínyi, M. *Smart Mater. Struct.* **2015**, *24*, Article Number: 105010.
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/10/105010>
15. Zrínyi, M.; Nakano, M. *Period. Polytech. Chem.* **2017**, *61*, 15-18. <https://doi.org/10.3311/PPch.10274>
16. Jones, T. B. *Electromechanics of Particles*; Cambridge University Press: New York, **1995**. ISBN: 0-521-01910-9
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511574498>
17. Turcu, I. *J. Phys. A Math. Gen.* **1987**, *20*, 3301-3308.
<https://doi.org/10.1088/0305-4470/20/11/033>
18. Lobry, L.; Lemaire, E. *J. Electrostat.* **1999**, *47*, 61-69.
[https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(99\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(99)00024-8)
19. Peters, F.; Lobry, L.; Khayari, A.; Lemaire, E. *J. Chem. Phys.* **2009**, *130*, Paper 194905.
<https://doi.org/10.1063/1.3134046>

Towards the colloid motor.

A possible engineering application of colloid science

The first impulse to build micro- or nano-motor was given by R.P. Feynman in 1959. The early attempts to miniaturize the electromotors were achieved by making a scale reduction of existing motor parts. Due to their complicated construction, the coils of the traditional electromagnetic motor are rather difficult to miniaturize. In order to construct a novel type of micro-motors, we have exploited an old-time known colloidal phenomenon, the electrorotation often referred as Quincke rotation. As early as in 1896 G. Quincke observed that some solid particles (glass, aragonite, sulphur, topaz, tourmaline...) can spontaneously rotate in certain media (ether, carbon disulfide, benzyl, and different oils) if a large uniform electric field is applied. The rotational axis is perpendicular to the electrostatic field. The phenomenon exhibits a threshold value of the electric field and occurs only if certain conditions concerning the conductivity and permittivity of the particles and of the liquid are satisfied. This condition for spontaneous rotation can be expressed by the permittivity, and conductivity, data: $\epsilon_2 < \epsilon_1$ where the subscripts 1 and 2 refer to the liquid and the dispersed particle, respectively. In this case, the electric field- and polarization vectors are antiparallel which means that the adjacent charges (between the particles and electrodes) are of like a sign. This repulsive electrostatic interaction results in rotational displacement. The direction of rotation depends entirely on the initial disturbance. Due to special criteria of material characteristics, it is not easy to observe the phenomenon. Only a limited number of experimental and theoretical studies are available.

In order to utilize the spontaneous rotation for micro-motor applications, several requirements have to be fulfilled. The most important are: the rotating material has to have a suitable shape (wheel, shaft...) by means of which the torque may be transmitted. Suitable control which the rotation can either starts or stops. It is also a requirement that the speed of circular motion may be controlled in a wide range. We have found several colloidal particles immersed in oil showing intensive spinning in uniform DC electric field. We were able to prepare polymer composites utilizing these particles. We have also successfully fabricated micron-sized disks, hollow cylinders and gears with asymmetric teeth from electroactive polymer without using any solid particles. SU8 photoresists disks were prepared with two different thicknesses and four different diameters. The diameter was

varied between 100 to 500 microns with heights of 20 – 40 microns. Disk, hollow cylinders and gear with asymmetric teeth of different size as prototypes were manufactured. We have studied the effect of DC electric field intensity on the speed of rotation. We have put the polymer rotors between two electrodes separated by a gap distance of 3 mm. The space between the electrodes was filled up with special oil which contains a substantial amount of triglyceride of oleic-, palmitic-, and linoleic acids, with conductivity of $9.56 \cdot 10^{-10}$ S/m and relative permittivity of 3.32. Uniform DC electric field was applied perpendicularly to the axis of the polymer rotors. The electric field was supplied by a high voltage DC power supply (TREC, USA). The intensity of the uniform DC electric field was increased step by step from 0.5 kV/mm up to 2.2 kV/mm and it was applied perpendicularly to the axis of the rotors.

The rotation of floating micro-rotors in the oil was followed by an optical microscope (OLYMPUS, Japan) equipped with a high-speed camera (4500 fps, Photron, Japan). In order to visualize the rotation and to determine the angular frequency, a visible sign close to the edge of the disk was used. The angular frequency of the rotation was determined by recording the spinning motion of the disk on the high-speed camera.

We have increased the electric field intensities step by step up to 2.2 kV/mm. The angular motion of SU8 polymer disk, immersed in slightly conducting dielectric liquid, was studied as a function of DC field intensities. We have concluded that the dynamics of electrorotation of polymer rotors is very complex. If the strength of static DC field is accounted for, three regimes have been observed.

1. Far below a threshold value E_{cr} of the electric field, the disk does not show any motion.
2. Close to the threshold value and slightly above, the disk begins to rotate, but the angular displacement is less than 2π .
3. At DC field intensities higher than the threshold value, continuous rotation is observed. The direction of rotation seems to be randomly selected occurring either in clockwise or counter-clockwise direction.

It was observed that above a critical value of electric field intensity, the rotors begin to rotate at a constant rate. This

rate is sensitive to the field intensity. With increasing field intensities the angular velocity of rotating disk increases. This increase can be approximated by linear dependence. The size and shape of the rotors, as well as the strength of electric field intensity, determines the electro-mechanical performance of the rotors. The extrapolation of the observed trends suggests that motors of several micrometers diameter could be built that could rotate with at least the rate presented here. Regarding the driving principle of the micromotors

presented here, it may open new perspectives for their use in several MEMS applications. It must be mentioned that in our work the diameter of the smallest rotor was 100 μm with a thickness of 22 μm . This is far above the nano-sized range. Despite this, this work clearly indicates that decreasing the size of the rotor increases the speed of rotation. This shows great promise to construct much smaller electric motors that can rotate with controllable speed and direction.