

# Die Unvorhersehbarkeit der elektrostatischen Aufladung\*\*

Daniel J. Lacks\*

Kontaktaufladung · Elektrostatik ·  
Triboelektrische Reihe

Platons *Timaeus*,<sup>[1]</sup> geschrieben etwa 360 v. Chr., ist im Wesentlichen ein wissenschaftlicher Übersichtsartikel, der sich unter anderem mit Astronomie, der Zusammensetzung von Stoffen, Magnetismus und der elektrostatischen Aufladung beschäftigt. Das Verständnis dieser Themen war zu Platons Zeiten nur rudimentär, und die seitdem erzielten wissenschaftlichen Fortschritte sind gewaltig. Heute sind unsere Kenntnisse der Astronomie so gut, dass wir Menschen zum Mond und Raumschiffe zu anderen Planeten schicken können. Unsere umfassenden materialwissenschaftlichen Kenntnisse versetzen uns in die Lage, neuartige Materialien zu schaffen, die in der Natur nicht vorkommen und deren Eigenschaften auf unsere Bedürfnisse zugeschnitten sind. Daneben können wir unser Wissen über den Magnetismus in außergewöhnlicher Weise nutzen, z. B. um mithilfe von dreidimensionalen Bildern Krankheiten zu diagnostizieren, die im Inneren des menschlichen Körpers verborgen sind. Platon wäre von diesen Fortschritten beeindruckt!

Anders sieht es mit dem Phänomen der elektrostatischen Aufladung aus – tatsächlich lässt sich behaupten, dass es auf diesem Gebiet seit Platons Zeiten keine merklichen Fortschritte gegeben hat. Eine Kontaktaufladung tritt auf, wenn zwei Materialien in Kontakt gebracht und anschließend getrennt werden; als Folge des Kontakts wird Ladung übertragen, sodass das eine Material positiv und das andere negativ geladen ist. Jedem ist dieser Effekt geläufig – sogar Kindern, die damit experimentiert haben, einen Ballon an ihren Haaren zu reiben, und erleben, dass Ballon und Haare stark aufgeladen werden. Aber welches Material lädt sich positiv und welches negativ auf? Trotz aller Fortschritte, die die Wissenschaft über die Jahrtausende seit Platons Zeit gemacht hat, gibt es noch keine wirkliche Antwort auf diese einfache Frage.<sup>[2]</sup>

Wissenschaftler haben jahrhundertelang an der Frage gearbeitet, wie vorhergesagt werden könnte, welche Oberfläche sich bei Berührung zweier Oberflächen positiv und

welche sich negativ auflädt: Das Beste, was ihnen hierzu einfiel, ist eine empirische „triboelektrische Reihe“. Diese Reihe ordnet Materialien in der Weise an, dass die jeweilige Position zweier beliebiger Materialien die Richtung der Ladungsübertragung bestimmt, wenn diese Materialien in Kontakt kommen. Betrachten wir z. B. einen Ausschnitt der triboelektrischen Reihe:

(–) Teflon Polystyrol Wolle Nylon (+)

Nach dieser Abfolge ist zu erwarten, dass sich Polystyrol nach Kontakt mit Teflon positiv auflädt, aber negativ, wenn es mit Wolle oder Nylon in Berührung kommt. Entsprechend lädt sich Wolle erwartungsgemäß positiv auf, wenn sie mit Polystyrol oder Teflon in Kontakt kommt, jedoch negativ nach Kontakt mit Nylon. Die triboelektrische Reihe beruht auf experimentellen Beobachtungen – Versuche, sie mit irgendwelchen Materialeigenschaften in Bezug zu bringen, waren nur begrenzt erfolgreich.

Es ist lange bekannt, dass die triboelektrische Reihe Schwachstellen aufweist.<sup>[3]</sup> Die Reihenfolge ist nicht immer reproduzierbar, sodass in verschiedenen Untersuchungen verschiedene Reihenfolgen beobachtet werden. Einige Befunde sind mit dem Konzept einer triboelektrischen Reihe eindeutig unvereinbar: Zum Beispiel ergaben Experimente mit Seide, Glas und Zink, dass Glas negativ aufgeladen wird, wenn sich Seide und Glas berühren, Zink negativ aufgeladen wird, wenn sich Glas und Zink berühren und Seide negativ aufgeladen wird, wenn Zink und Seide in Kontakt treten; diese Befunde lassen eher auf einen „triboelektrischen Ring“ statt auf eine lineare triboelektrische Reihe schließen. Weitere Experimente zeigten, dass rauе und glatte Proben des gleichen Materials in der triboelektrischen Reihe an unterschiedlichen Positionen erscheinen.

In diesem Zusammenhang berichten jetzt Baytekin et al. über eine Reihe einfacher Experimente.<sup>[4]</sup> Zuerst wurden Teflonkügelchen etwa eine Minute lang in einer Polystyrolschale gerollt. Gemäß der triboelektrischen Reihe sollten sich die Teflonkügelchen negativ und die Polystyrolschale positiv aufladen. Dies wird tatsächlich festgestellt. Rollen die Teflonkügelchen jedoch mehr als einige Minuten in der Schale weiter, wird das entgegengesetzte Ergebnis erhalten: Die Teflonkügelchen laden sich positiv, die Polystyrolschale lädt sich negativ auf!

[\*] Prof. D. J. Lacks  
Department of Chemical Engineering,  
Case Western Reserve University  
Cleveland, OH 44106 (USA)  
E-Mail: daniel.lacks@case.edu

[\*\*] Dieser Artikel basiert auf Arbeiten, die von der National Science Foundation, Fördernummer CBET-0852773 und DMR-0705191, unterstützt wurden.

Warum kehrt das Rollen der Kugelchen über eine längere Zeit die Richtung der Ladungsübertragung um? Während das Kugel-Roll-Experiment simpel ist, beantworten Baytekin et al. diese Frage mit modernsten analytischen Methoden. Die Autoren zeigen, dass, während die Kugelchen auf der Schale rollen, nanogroße Stücke des Materials abgerissen und auf die andere Oberfläche übertragen werden. Während das Rollen weitergeht, werden die Teflonkugelchen teilweise mit Schichten aus Polystyrol umhüllt, und die Polystyrolschale wird teilweise mit einer Oberfläche aus Teflon belegt. Nach einiger Zeit werden die Kugeloberflächen „polystyrolartig“, während die Schalenoberfläche „teflonartig“ wird. Da die Kontaktaufladung ein Oberflächenphänomen ist, lädt sich jetzt die „teflonartige“ Schale der triboelektrischen Reihe zufolge negativ auf, während die „polystyrolartigen“ Kugelchen positiv geladen werden.

Baytekin et al. weisen darauf hin, dass dieser Materialtransferprozess von den mechanischen Eigenschaften des Materials wie der Materialhärte und der Kohäsionsenergie abhängt. So werden härtere Materialien effektiver die Stücke einer weicheren Oberfläche abreißen können, und Materialien mit höherer Kohäsionsenergie neigen weniger dazu, sich Teile abreißen zu lassen.

Diese Betrachtungen geben Aufschluss über bislang unerklärte Beobachtungen. Wie schon erwähnt, können raua und glatte Proben des gleichen Materials an verschiedenen Positionen der triboelektrischen Reihe erscheinen – insbesondere wurde dies für Glas festgestellt.<sup>[3]</sup> Gestützt auf die Schlussfolgerungen von Baytekin et al. könnte die raua Oberfläche eines harten Materials sehr effektiv Teile einer anderen Oberfläche abreißen, während eine glatte Oberfläche des gleichen Materials weniger wirksam wäre. Weil Glas ein hartes Material ist, könnten raua und glatte Proben eine Materialübertragung in unterschiedlichem Umfang verursachen und somit zu einem unterschiedlichen Aufladungsverhalten führen.

Leider führen die Befunde von Baytekin et al. auch zu einer etwas ernüchternden Schlussfolgerung: Vielleicht wird die Kontaktaufladung niemals vorhersagbar sein. Zwar ist gut bekannt, dass Oberflächenverunreinigungen die Kontaktaufladung wesentlich bestimmen können, allerdings sollten Probleme durch Verunreinigungen im Prinzip bei sorgfältigen Experimenten auszuschließen sein, indem die Proben vor jedem Versuch gründlich gereinigt werden. Die Befunde der genannten Untersuchung lassen aber darauf schließen, dass der bloße Vorgang der Berührung, der für den Kontaktaufladungsvorgang notwendig ist, zur Materialübertragung führt; diese Materialübertragung verursacht wiederum eine Oberflächenverunreinigung, die bei Kontaktaufladungsexperimenten niemals zu vermeiden ist.

Es ist fraglich, ob das Ausmaß und die Folgen der Materialübertragung jemals berechenbar sein werden. Die Materialübertragung ist erstens stark von der Art des Kontakts abhängig: Hierzu gehören die Kraft, mit der sich die Oberflächen berühren, ob Scherkräfte (z.B. durch Reiben) beteiligt sind und wie schnell die Kraft angewendet wird. Zweitens

hängt die Materialübertragung von der Nanotextur (beispielsweise Rauheit) der Oberfläche ab, da diese Textur Kräfte zwischen Oberflächen im Nanomaßstab erzeugt, die sich von der Kraft im Makromamaßstab unterscheiden. Die Oberflächentextur beruht in starkem Maß auf der Wärme- und Verarbeitungsgeschichte des Materials und ist im Allgemeinen nicht gut charakterisiert – und auch wenn sie charakterisiert wäre, wäre es schwierig vorherzusagen, wie sie die Nanokräfte und die Materialübertragung verändert. Es gibt drittens keinen einfachen Weg um herauszufinden, wie viel Materialübertragung erforderlich ist, um das Aufladungsverhalten zu beeinflussen. Weil die Materialübertragung niemals vorherzusagen sein könnte, lässt ihre Verknüpfung mit der Kontaktaufladung darauf schließen, dass diese ebenso wenig vorhersagbar sein mag.

Wie jüngste Arbeiten gezeigt haben, gibt es weitere Faktoren, die die Vorhersagbarkeit der Kontaktaufladung ebenfalls verhindern könnten. Baytekin et al. wiesen 2011 nach, dass die Ladung auf einer triboelektrisch geladenen Oberfläche nicht von einheitlicher Polarität ist; vielmehr haben die einander berührenden Flächen nanoskalige Bereiche mit positiver und negativer Polarität, sodass die Nettoladung auf einer Oberfläche ein empfindliches Gleichgewicht aus den Beiträgen dieser Bereiche darstellt.<sup>[5]</sup> Ein Wechsel der Polarität kann daher aus einer feinen Verschiebung der relativen Beiträge der positiven und negativen Bereiche herrühren, ein Effekt, der sehr viel schwieriger zu erfassen ist als der Wechsel einer ganzen, gleichförmig geladenen Oberfläche von der einen zur anderen Polarität. In unseren eigenen Untersuchungen zeigten wir vor Kurzem, dass mechanische Spannung eines Materials die Richtung der Ladungsübertragung umkehren kann.<sup>[6]</sup> Im Allgemeinen weisen Materialien uncharakterisierte nanoskalige mechanische Spannungen auf, die von ihrer Wärme- und Verarbeitungsgeschichte abhängen und die die Kontaktbeladung in unbekannter Weise beeinflussen können.

Vielleicht sind wir im Begriff zu lernen, warum der Bereich der elektrostatischen Aufladung nicht dem Verlauf ähnlicher wissenschaftlicher Bereiche gefolgt ist, die in Platos *Timaeus* behandelt werden.

Eingegangen am 16. April 2012  
Online veröffentlicht am 31. Mai 2012

- 
- [1] Platon, *Timaeus*, <http://www.gutenberg.org/ebooks/1572>.
  - [2] D. J. Lacks, R. M. Sankaran, *J. Phys. D* **2011**, *44*, 453001.
  - [3] J. Lowell, A. Rose-Innes, *Adv. Phys.* **1980**, *29*, 947–1023.
  - [4] H. T. Baytekin, B. Baytekin, J. T. Incorvati, B. A. Grzybowski, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 4927–4931; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 4843–4847.
  - [5] H. T. Baytekin, A. Z. Patashinski, M. Branicki, B. Baytekin, S. Soh, B. A. Grzybowski, *Science* **2011**, *333*, 308–312.
  - [6] M. Sow, R. Widenor, A. Kumar, S. W. Lee, D. J. Lacks, R. M. Sankaran, *Angew. Chem.* **2012**, *124*, 2749–2751; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 2695–2697.