

TROPFEN MIT TASTSINN

TEXT: CHRISTIAN SCHNEIDER

54

Die Beobachtung ist so alltäglich, dass sie geradezu banal wirkt. Viele Menschen dürften schon einmal zugeschaut haben, wie Regentropfen über eine Fensterscheibe rinnen. Da überrascht es vielleicht, dass sich noch grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse darüber gewinnen lassen, wie Tropfen über Oberflächen laufen. Doch genau das ist einem Team des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung gelungen – und die Forschenden haben damit überraschende Anwendungsperspektiven eröffnet.

Eine Zugfahrt im Regen: Wer sich nach der Bahnhofshektik gerade mühsam auf seinen Platz im Zug sortiert hat, kann endlich verschnaufen und das Spiel der Tropfen auf der Fensterscheibe verfolgen. Viele der Wasserlinsen bleiben dort erst einmal hängen und fangen irgendwann doch zu rinnen an. Wenn der Zug dann Fahrt aufnimmt, kommt Bewegung in die Sache. Wann wird ein Tropfen zu laufen beginnen? Wohin wird seine Bahn führen? Wird er sich zu einem feinen Rinnsal in die Länge ziehen, durch das dann mehr Regenwasser abfließt?

Die Faszination für die Bewegung von Tropfen teilen Hans-Jürgen Butt, Doris Vollmer und Rüdiger Berger vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz – sie hat ihre Arbeit bereits vor mehr als zehn Jahren inspiriert. „Die Reibung von zwei Festkörpern kannte ich schon aus der Schule“, sagt Rüdiger Berger, der am Mainzer Max-Planck-Institut eine Forschungsgruppe leitet. „Aber die Reibung zwischen einem Tropfen und einer Oberfläche zu verstehen, das fand ich spannend.“ Dabei ging es den Forschenden etwa um die Frage, ob Tropfen rollen oder rutschen. Und darum, wie genau die Eigenschaften von Oberflächen die Bewegung von Tropfen beeinflussen, aber auch darum, welche Spuren Tropfen auf Oberflächen hinterlassen.

Hans-Jürgen Butt, Direktor an dem Mainzer Institut, erklärt, was der Schlüssel zu Antworten auf viele dieser Fragen ist: „Von besonderem Interesse sind für uns die mikroskopischen Prozesse an der Dreiphasenkontaktlinie.“ Mit der Dreiphasenkontaktlinie ist die Linie gemeint, an welcher die Flüssigkeit eines Tropfens, also etwa Wasser,

eine feste Oberfläche, zum Beispiel aus Glas, und die gasförmige Luft aufeinandertreffen – im Fachjargon wird jede dieser drei Komponenten als Phase bezeichnet.

Der Winkel, den der Tropfen mit der festen Oberfläche bildet, hängt dabei stark von deren Beschaffenheit ab: Während sich ein Wassertropfen auf eine stark hydrophile, also wasserliebende Oberfläche flach wie eine Flunder legt, kugelt er sich auf einer wasserabweisenden Oberfläche zur Perle zusammen. Welche dieser Benetzungseigenschaften jeweils gefragt ist, hängt von der Anwendung ab: „Beim Bedrucken oder Beschichten von Oberflächen und auch beim 3D-Druck soll der Tropfen so lange am gleichen Ort bleiben, bis er getrocknet ist“, erläutert Doris Vollmer, die in Butts Abteilung eine Forschungsgruppe leitet. „Bei Brillen, Kameras oder auch Scheiben am Auto möchte man dagegen möglichst schnell wieder freie Sicht haben – hier ist eine wasserabweisende Oberfläche also besser.“ Auch bei Solarzellen ist es wichtig, dass Tropfen schnell von deren Oberfläche abperlen und möglichst viel Schmutz mit sich reißen. Gerade in Wüstenregionen



WISSEN AUS

PHYSIK & ASTRONOMIE

55

In Szene gesetzt: Forschende des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung untersuchen das Verhalten von Tropfen auf Oberflächen. Unter anderem lassen sie Wasser über Schrägen perlen. Damit die Tropfen auf dem Foto besser sichtbar werden, wurde das Wasser gefärbt.

nen mit viel Sand und wenig Regen ist das ein Muss, damit der Stromertrag hoch bleibt.

Das Lotusblatt treibt solche wasserabweisenden Eigenschaften buchstäblich auf die Spitze: Es besteht aus mikroskopisch kleinen Säulen und reduziert mit diesem Trick die Kontaktfläche zum Tropfen stark. Dieser bildet hierdurch eine fast perfekte Kugel, die nur mit viel Geschick auf dem Blatt gehalten werden kann: Schon wenn das Blatt ein wenig kippt, perlt der Tropfen ab. „Hier sieht man auch gut, dass Kontaktwinkel und Tropfenreibung direkt zusammenhängen“, erklärt Vollmer. „Je wasserabweisender eine Oberfläche ist, desto kugelförmiger wird der Tropfen – und desto weniger Reibung mit der Oberfläche gibt es.“

Die Oberfläche macht den Unterschied

56

Um mehr über das Zusammenspiel zwischen Tropfen und Oberflächen herauszufinden, nutzt das Team ein umgerüstetes Instrument, mit dem sich Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeiten und Oberflächen messen lassen. Das etwa einen halben Meter hohe Gerät besteht aus einem portalartigen Metallrahmen, in dem ein handtellergrößer, verschiebbarer Tisch steht. Darauf wird eine Platte mit der zu untersuchenden Oberfläche befestigt. Auf dieser platzieren die Forschenden einen Tropfen, den sie mit einem Kniff fixieren: „Wir haben zuerst versucht, den Tropfen mit einem spitzen Drahtende festzuhalten, wenn sich der Tisch darunter bewegt“, erzählt Berger. „Diese Art Nadel wird aber oft einfach durch den Tropfen gezogen. Daher haben wir sie an ihrem Ende mit einem kleinen Ring versehen, der wie eine Krone auf dem Tropfen liegt und diesen an Ort und Stelle hält.“

Wenn die Forschenden nun den Tisch unter dem fixierten Tropfen verschieben, verbiegt sich der Draht elastisch – was ein Maß für die Reibungskraft zwischen Tropfen und Oberfläche ist.

Wie stark der Draht sich biegt, misst das Team mit einer Kamera. So erhalten die Forschenden eine Landkarte der Oberfläche, die zeigt, wie groß die Reibung an welcher Stelle ist. Das demonstriert Rüdiger Berger an einer Oberfläche, auf die das Team mit einer besonders wasserabweisenden Substanz ein M geschrieben hat. In der Reibungskarte wird das M deutlich sichtbar, weil der Tropfen dort mit

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Je stärker wasserliebend eine Oberfläche ist, desto größer ist die Reibung von Wassertropfen auf ihr. Die Tropfenreibung steigt auch an feinen Rissen und anderen Defekten, sodass sich darüber die Güte etwa von Beschichtungen analysieren lässt.

Wassertropfen verändern viele Oberflächen. So quillt etwa die äußere Schicht von Glas-scheiben auf, und manche ihrer chemischen Bestandteile lösen sich in einem Tropfen.

Tropfen können auf Oberflächen Ladungen erzeugen. Dies lässt sich für den Tropfentransport in Mikrochiplaboratorien nutzen.

weniger Kraft an dem Draht zieht. So direkt und schnell lassen sich die Benetzungseigenschaften beliebiger Oberflächen und Flüssigkeiten mit keiner anderen Methode abbilden. Das ist auch für technische Anwendungen interessant, erklärt Berger: „Mit diesem Mikroskop können wir beispielsweise auch kleinste Defekte auf Oberflächen sehen – Defekte, die man von Hand nicht spüren kann und deren Größe ungefähr einem Haardurchmesser entspricht, also etwa einem zehntel Millimeter.“ Relevant ist dies zum Beispiel, wenn man Lack-schichten auf ihre Homogenität überprüfen will. Der Tropfen wird hier zur Sonde etwa für Risse, weil daran die Reibung zwischen Tropfen und

Oberfläche steigt. „Wir spüren damit Defekte auf, die viel kleiner sind als der Tropfen, da nur die Kontaktlinie daran hängen bleibt“, erklärt Berger.

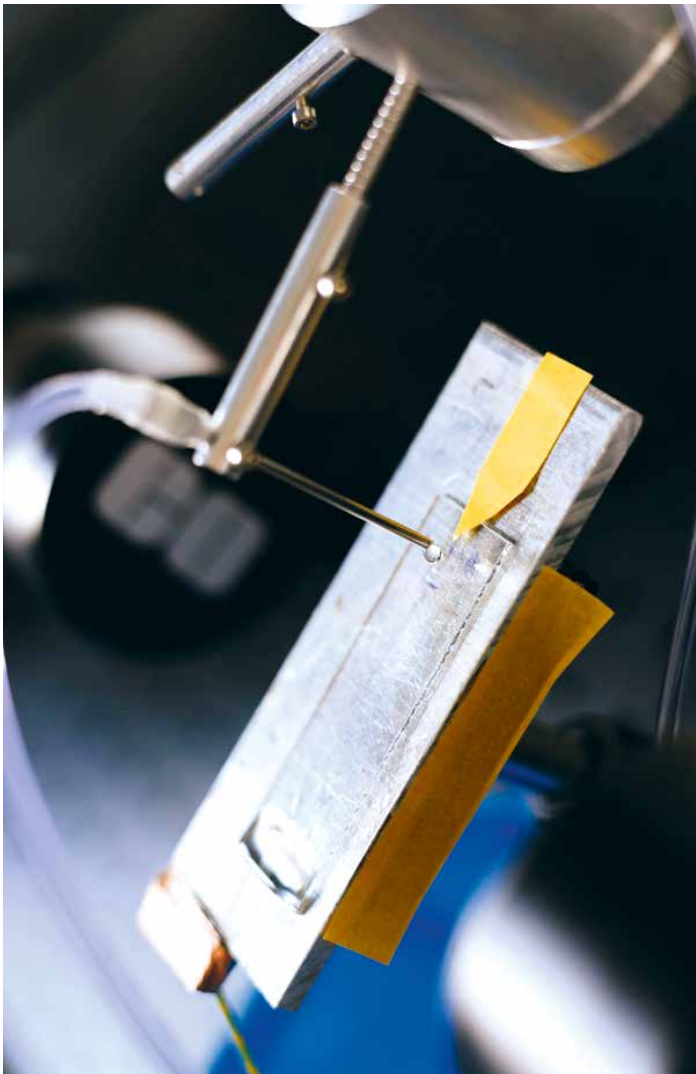
Die Vorteile der Methode hat auch die Hamburger Firma Krüss erkannt, die auf die Entwicklung wissenschaftlicher Messinstrumente, unter anderem zur Oberflächenanalyse, spezialisiert ist. Krüss möchte nun ein Gerät, das auf der Forschung von Bergers Team basiert, kommerziell verfügbar machen. Für Krüss sei die Forschung aus Mainz spannend, da sie es ermögliche, Oberflächeneigenschaften zu scannen, die sich mit anderen Geräten des Unternehmens nicht messen lassen, sagt Thomas Willers, Leiter für Anwendungstechnik und Wissenschaft bei Krüss. Dadurch ergäben sich neue Anwendungen in der Oberflächenanalyse.

Während einige Oberflächen, etwa Lack-schichten, bei Kontakt mit Wasser stabil bleiben, kommt es auf anderen Oberflächen zu Prozessen, die diese verändern. Und das ist häufiger der Fall, als man vielleicht denkt. Bei Regen an einer Fensterscheibe lässt sich der Effekt beobachten: Fließen zwei Tropfen die Scheibe hinab, nehmen sie oft die gleiche Bahn. „Das liegt daran, dass sich die Glasoberfläche verändert, wenn ein Tropfen darüberläuft“, sagt Hans-Jürgen Butt. „Man kann sich das in etwa so vorstellen, dass die Siliziumdioxidoberfläche etwas aufquillt. So wird sie wasserliebender.“ Die Folge: Der zweite Tropfen nimmt den durch den ersten vorgegebenen, wasserliebenden Weg.

Diese Prozesse zu beschreiben ist physikalisch alles andere als trivial: Wie reagiert die Oberfläche auf einen Tropfen? Und wie schnell tut sie das? Um diesen Fragen nachzugehen, haben die Forschenden ein allgemeingültiges Modell entwickelt, das die Wechselwirkung von Tropfen mit verschiedenen Oberflächen beschreiben kann. Mithilfe dieses Modells können sie Effekte von über Oberflächen rinnen den Tropfen besser erklären – und vielleicht zugleich neue Anwendungsfelder erschließen.



Eine Rutschbahn für Tropfen: Yuwen Ji misst die Reibung von Tropfen auf einer Oberfläche, die sie mit dem Lager einer ausrangierten Drehmaschine gekippt hat. So bestimmt das Mainzer Team etwa, wie schnell Oberfläche und Flüssigkeit miteinander wechselwirken.



Für die Untersuchung hat Bergers Team ein weiteres Instrument entwickelt: Die Forschenden haben Komponenten aus einer alten Drehmaschine ausgebaut und wiederverwertet. Direkt ins Auge fällt an dem Gerät eine große, schwarze Platte, die sich mithilfe des Lagers der Drehmaschine kippen lässt. In ihrer Mitte befindet sich das Kernstück des Aufbaus: ein kleines, auf einem Halter befestigtes Plättchen, über das in gleichmäßigen Abständen Wassertropfen gleiten. Dank des variablen Kippwinkels können die Forschenden einstellen, wie schnell die Tropfen auf der Schräge werden. Auf ihrem Weg nach unten fängt eine Kamera sie mit 2000 Bildern pro Sekunde und hoher Auflösung ein. Anhand der Bilder messen die Forschenden unter anderem den Kontaktwinkel, und zwar sowohl an der vorderen als auch an der hinteren Seite des Tropfens – denn die beiden Winkel unterscheiden sich aufgrund der Fließbewegung. Während der Tropfen sich vorn, also an seiner nach unten gewandten Seite, bauchig wölbt, zieht er an seinem Ende eine Art Schleppe hinter sich her – sofern die Oberfläche nicht gerade ausgesprochen stark wasserabweisend ist.

57

Rutschen um die Wette

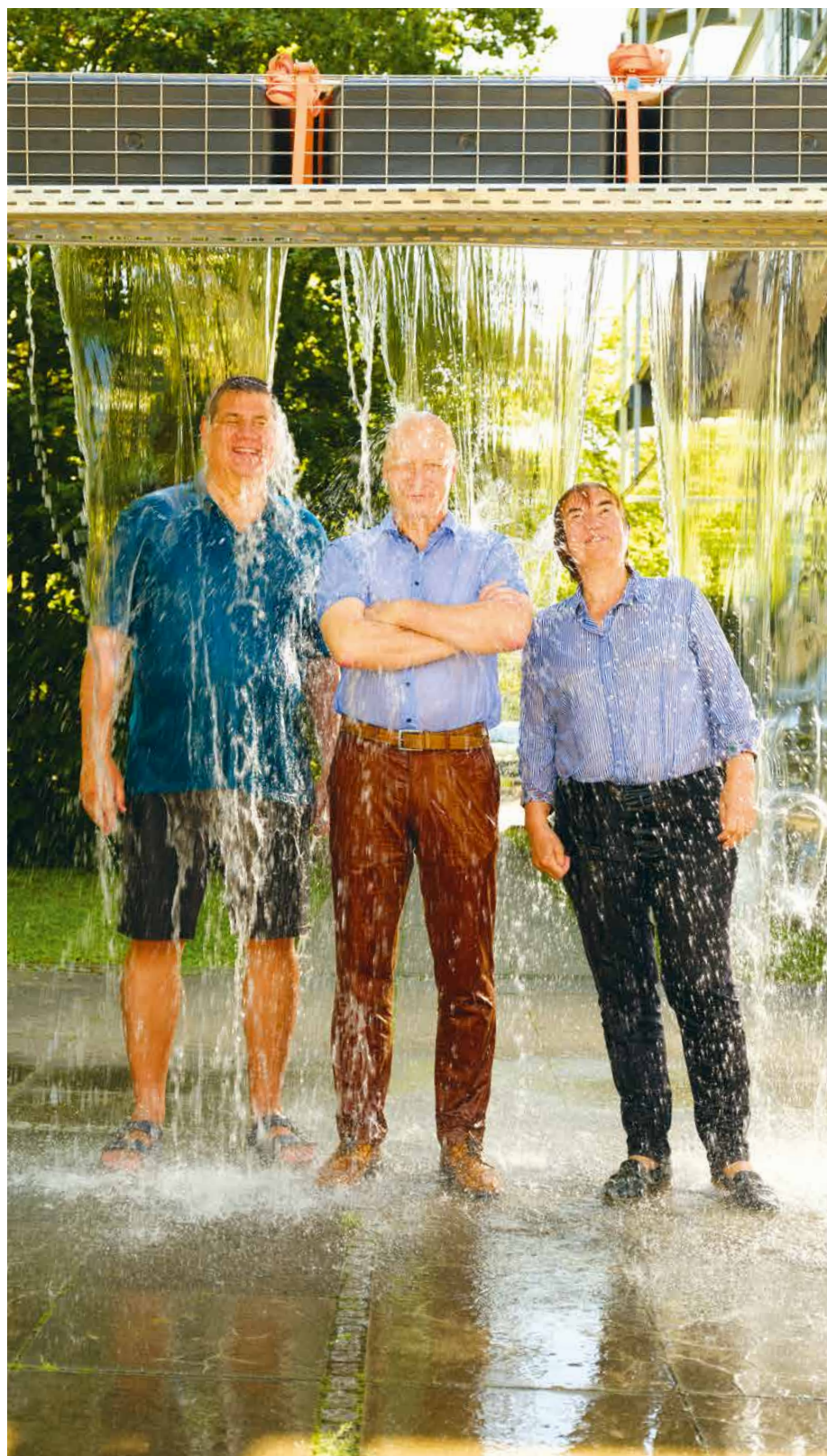
Mit der selbst gebauten Tropfenbahn sind die Forschenden unter anderem der Frage nachgegangen, ob Tropfen rollen oder rutschen. Ob sich die Wassermoleküle im Tropfen also wie in einem Rad im Kreis drehen oder ob der Tropfen in sich unbewegt über die Oberfläche gleitet. Die Frage lässt sich allerdings nicht allgemein beantworten, wie die Experimente zeigen. Denn wie sich die Moleküle verhalten, das hängt unter anderem von ihrer Position im Tropfen und von der Oberfläche ab. Die äußeren Moleküle des Tropfens drehen sich auf eher wasserliebenden Oberflächen wie in einem Rad. Je weiter im Inneren die Teilchen liegen, desto mehr fließen sie jedoch parallel zur Tropfenbahn. Wie die verschiedenen Effekte zusam-

Am Ende einer feinen Kanüle tritt langsam Wasser aus und formt einen Tropfen. Wenn dieser schwer genug ist, löst er sich ab und perlt auf einem geneigten Glasplättchen nach unten.



menspielen, das beeinflusst auch die Reibung und damit die Form des Tropfens. Dabei spielt zudem eine Rolle, wie schnell die Oberfläche durch den Tropfen verändert wird. Das brachte das Team gemeinsam mit einer Gruppe des Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology in Thailand um Daniel Crespy, einen ehemaligen Gruppenleiter des Mainzer Max-Planck-Instituts, auf eine Idee: Könnte sich nicht über das Tempo der Tropfen und deren Wechselwirkung mit der Oberfläche bestimmen lassen, wie schnell sich medizinische Wirkstoffe im Körper, zum Beispiel im Blut, von einem Trägerpolymer lösen? „Aus solchen speziellen Polymeren könnten in Zukunft beispielsweise Nanopartikel für medizinische Therapien hergestellt werden“, erklärt Rüdiger Berger. Wie schnell das Polymer den Wirkstoff abgibt, ist für die Entwicklung dieser Partikel höchst relevant; doch die Frage kann mit gängigen Analysegeräten wie etwa Kernspinresonanzspektrometern nicht beantwortet werden. Diese Geräte sind zu langsam, um die teils sehr schnellen Prozesse zu erfassen.

Mit der Tropfenrutschbahn hingegen kann das Team um Rüdiger Berger und Daniel Crespy die Abgabe des Wirkstoffs genau verfolgen, und zwar über einen ausgeklügelten, indirekten Zugang. Die Forschenden schicken immer wieder Tropfen über die Oberfläche, die sie zuvor mit dem wirkstoffbeladenen Polymer beschichtet haben. Dabei beginnen sie mit einer relativ steilen Bahn und verringern deren Kippwinkel *peu à peu* – die Tropfen werden auf diese Weise immer langsamer. Irgendwann ist ein Tropfen dann so lange mit der Oberfläche in Kontakt, dass sich der Wirkstoff lösen kann. Dadurch ändert sich der Kontaktwinkel, was die Forschenden mit ihrer Hochgeschwindigkeitskamera ablichten. „Wir haben damit eine Methode, mit der wir schnelle Prozesse an Oberflächen, wie beispielsweise eine solche Reaktionsgeschwindigkeit, untersuchen können, indem wir die Tropfengeschwindigkeit variieren.“



In ihrem Element: Rüdiger Berger, Hans-Jürgen Butt und Doris Vollmer (von links) testen im Selbstversuch die Benetzungseigenschaften unter einem künstlichen Wasserfall.

FOTO: KATRIN BINNER FÜR MPG

Tropfen interagieren mit Oberflächen aber nicht nur chemisch, sondern auch elektrisch: Abhängig vom Material, über das sie kullern, hinterlassen sie eine mehr oder weniger starke Ladungsspur auf der Oberfläche. „Der Effekt dahinter ist nicht neu, die Grundlagen wurden bisher aber noch nicht quantitativ untersucht“, erklärt Hans-Jürgen Butt. „Bereits vor 1900 hatte man an Wasserfällen festgestellt, dass Wassertropfen eine Elektrisierung bewirken können.“ Diesen Effekt habe man dann erst Mitte der 1990er-Jahre wieder untersucht, damals im Bereich der Halbleiterindustrie. Dort wurde die Aufladung durch Flüssigkeiten, die bei der Herstellung verwendet wurden, zum Problem, da sie die Chips beschädigte. Hans-Jürgen Butt und sein Team wollen nun besser verstehen, was beim elektrischen Austausch zwischen Tropfen und Oberfläche genau passiert – dies seit 2021 sogar in einem von der Europäischen Union geförderten Projekt. Daraus könnten sich auch bislang noch nicht absehbare Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

Elektrisierende Tropfen

Die erste Erkenntnis ihrer Untersuchungen hielten die Forschenden anfangs für einen Fehler. „Zuerst dachten wir, wir bekommen die Messung nicht richtig hin“, erinnert sich Butt. Jeder Tropfen zeigte eine andere La-

dung – teilweise unterschieden sich die Ladungen um das Drei- bis Vierfache. Doch inzwischen hat das Team herausgefunden: Die Ladung und das Verhalten von Tropfen hängen stark davon ab, was vorher auf der Oberfläche passiert ist. Wie viele Tropfen sind in welchem zeitlichen Abstand bereits die Fläche hinuntergelaufen? Wie hoch ist etwa die Luftfeuchtigkeit, welche die Ladungsspur langsam wieder abbaut?

Auf Basis experimenteller Untersuchungen hat das Team um Hans-Jürgen Butt ein theoretisches Modell entwickelt, das gut beschreibt, wie stark welche Flüssigkeiten welche Oberflächen aufladen und wie das wiederum deren Benetzungseigenschaften beeinflusst. „Die Aufladung einer Oberfläche spielt für die Benetzung eine viel größere Rolle als gedacht“, sagt Butt. Darüber hinaus demonstrierte das Team, dass Tropfen, die auf ein wasserabweisendes Material prallen, dort Ladungen hinterlassen. Die erzeugten Ladungen hängen von der Fallhöhe ab. Das brachte die Mainzer Forschenden und ein Team um Xu Deng – ehemals Doktorand des Instituts und heute Professor an der chinesischen Universität Chengdu – auf die Idee, viele Tropfen nebeneinander aus unterschiedlichen Höhen fallen zu lassen und so eine Spur zu- beziehungsweise abnehmender Ladungen zu erzeugen. Diese bleibt auch bestehen, wenn die Oberfläche trocknet. So entsteht eine Art Förderband, das weitere Tropfen in hohem Tempo

DREIPHASENKONTAKTLINIE heißt die Linie, an der beispielsweise das Wasser eines Tropfens, eine feste Oberfläche und Luft aufeinandertreffen. Je stärker wasserliebend eine Oberfläche ist, desto kleiner ist der Winkel zwischen dem Tropfen und der Oberfläche.

GLEITELEKTRISIERUNG wird die Aufladung einer Oberfläche durch Reibung etwa eines Wassertropfens genannt.

zwischen zwei Punkten transportiert, und dies sogar über kurvige Bahnen oder eine Steigung hinauf. Dabei geht von der Flüssigkeit auf der superwasserabweisenden Oberfläche so gut wie nichts verloren, der elektrische Tropfentransport könnte daher Proben durch ein winziges Labor auf einem Mikrochip manövrieren. An solchen Chiplaboren arbeiten weltweit viele Forschungseinrichtungen, da sie das Herzstück kleiner mobiler Geräte für Wissenschaft oder Medizin bilden könnten. Gerade in der medizinischen Diagnostik könnten die miniaturisierten Labore viele Untersuchungen vereinfachen.

Ob sich durch die Gleitelektrisierung auch einmal Strom erzeugen lässt, bleibt dagegen fraglich. Selbst wenn sich auf diese Weise ausreichend große Ladungsunterschiede erzeugen ließen, dürfte es nicht ganz einfach sein, diese als Spannungsquelle anzuzapfen. Immerhin könnte es sich lohnen, an einer entsprechenden Technik für die mobile Stromversorgung, etwa in Zelten, zu tüfteln. Und vielleicht läuft es mit den elektrischen Spuren der Tropfen ähnlich wie mit anderen Erkenntnissen, die das Team des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung gewonnen hat, geleitet von der Faszination für Tropfen: Möglicherweise führen sie zu Anwendungen, die sich auf den ersten Blick nicht aufdrängen, bei denen die Tropfenlösung aber den Zweck besser erfüllt als andere Ansätze.

Elektrische Fährte: Wenn ein Tropfen über eine Oberfläche gleitet, lagern sich negativ geladene Hydroxidionen auf der Oberfläche ab, während die positiv geladenen Protonen im Inneren bleiben. Am Ende des Tropfens löst sich nur ein Teil der Hydroxidionen wieder ab, so dass auf der Tropfenbahn eine Spur negativer Ladungen zurückbleibt.

