

Komplexe Oberflächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit

Die Benetzung von Oberflächen spielt bei einer Reihe von unterschiedlichen Alltagsphänomenen und technologischen Prozessen eine Rolle. Beispiele sind das Beschlagen von Spiegeln und Fensterscheiben oder die Beschichtung von Oberflächen. Flächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit herzustellen, z. B. durch Aufbringen einer Struktur, ist daher ein Ziel von weit reichender Bedeutung. In diesem Artikel werden neben elementaren Grundlagen der Benetzung Produktionstechnologien zur Herstellung entsprechender Strukturen und neuartige Anwendungsperspektiven für mikrostrukturierte Oberflächen vorgestellt.

► *Complex surfaces with tailor-made wettability*

Wetting of surfaces plays a role for a number of phenomena in everyday life as well as for certain technological processes. Examples are the fogging of mirrors and window panes or the coating of surfaces. Therefore, the fabrication of surfaces with tailor-made wettability is of far-reaching importance. In this article, besides some fundamentals of wetting, production technologies for the fabrication of corresponding surfaces and novel application perspectives for microstructured surfaces are presented.

Eberhard Abele, Jakob Fischer, Steffen Hardt, Selin Manukyan, Ilia Roisman • Oft existieren für vom Menschen entwickelte Technologien Vorbilder in der Natur, so im Fall der Lotuspflanze. Die Blattoberfläche dieser Pflanze ist mit feinen Strukturen bedeckt (Abbildung 1), die dafür sorgen, dass ein Wassertropfen in der Manier eines Fakirs auf den Erhebungen sitzt. Derartige Oberflächen sind extrem schlecht benetzbar, auch kleine Wassertropfen perlen von ihnen ab. Auf diese Weise schützt sich die Lotuspflanze vor Verschmutzungen.

In den letzten Jahrzehnten hat man gelernt, diesen Effekt nachzubilden und technologische Oberflächen zu schaffen, die ähnliche Eigenschaften besitzen wie ein Lotusblatt. Aber nicht nur das: Durch eine maßgeschneiderte Strukturierung von Oberflächen gelingt es, die Natur zu übertreffen und superhydrophobe Oberflächen zu erzeugen, die Effekte zeigen, die in der Natur ohne Vorbild sind. Am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt beschäftigen wir uns unter anderem mit der Erforschung und Optimierung derartiger Oberflächen. Beispielsweise sollten es superhydrophobe Oberflächen ermöglichen, eine Flüssigkeit mit Hilfe einer Temperaturdifferenz zu pumpen. Das Pum-





Moderne Mikroskopiesysteme sind unersetzbare Hilfsmittel bei der Erforschung des Flüssigkeitstransports an Oberflächen. Wird ein Fluoreszenzfarbstoff in die Flüssigkeit eingebracht, breitet sich dieser mit der Strömung aus und kann im Mikroskop detektiert werden.

Abbildung 1
Strukturen auf der
Oberfläche eines
Lotusblatts.



Abbildung 2
Simulationsresultate
zur thermokapillaren
Strömung entlang
superhydrophober
Oberflächen. Die
Oberflächenstruktur
ist schematisch in
grau dargestellt. Die
Flüssigkeit dringt
nicht in die
Vertiefungen der
Oberfläche ein.

pen durch eine Temperaturdifferenz hätte den Vorteil, dass entsprechende Pumpen extrem einfach aufgebaut wären, was insbesondere für miniaturisierte Systeme von Vorteil sein könnte. Abbildung 2 zeigt Simulationsresultate für eine Flüssigkeit auf einer superhydrophoben Oberfläche, entlang derer sich die Temperatur ändert. Durch die Temperaturänderung beginnt die Flüssigkeit entlang der Oberfläche zu strömen. Die Abbildung zeigt die berechneten Stromlinien in der Flüssigkeit, die nicht in die Vertiefungen der

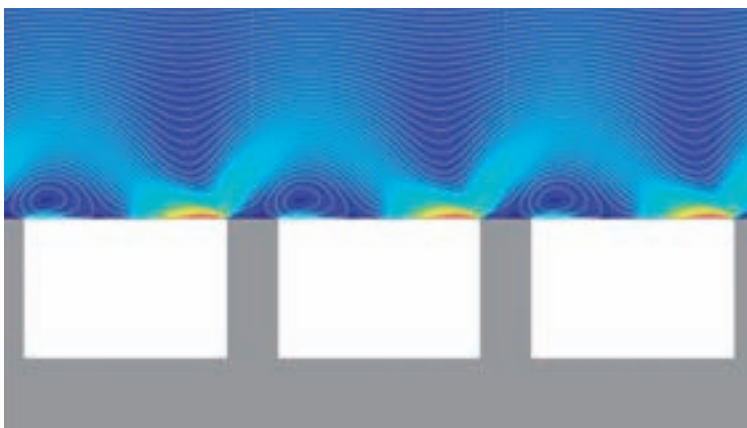


Abbildung 3
Durch Ultrapräzi-
sionszerspanung
erzeugte
superhydrophobe
Oberfläche (links)
und Seitenansicht
eines Wasser-
tropfens auf
einer derartigen
Oberfläche (rechts).



Oberfläche eindringt sowie als Farbskala den Beitrag der Flüssigkeitsgeschwindigkeit.

Forschungsthemen wie dieses erfordern es, Oberflächen mit maßgeschneiderter Benetzbarkeit herzustellen. Dies bedeutet, dass man die Größe und Geometrie der Oberflächenstrukturen möglichst frei bestimmen und im Hinblick auf bestimmte Anwendungen optimieren möchte. Entsprechende Strukturen werden am Mikro Prototyping Zentrum der TU Darmstadt mit Hilfe zweier unterschiedlicher Methoden hergestellt: dem Laser-Sinterverfahren und der Ultrapräzisionszerspanung.

Laser-Sintern und Ultrapräzisionszerspanung zur Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen

Der Prozess des Selektiven Laser-Schmelzens, auch als Laser-Sintern bezeichnet, basiert auf dem schichtweisen Aufbau von Bauteilen. Als Ausgangspunkt dient eine Schüttung kleiner Metallpartikel, d. h. ein Metallpulver. Zunächst werden aus einem Computermodell des Bauteils die zu belichtenden Bereiche in dem Pulverbett berechnet. Unter Verwendung einer Laserstrahlungsquelle werden dann diese Elemente in dem Pulver aufgeschmolzen. Nach der Erstarrung des aufgeschmolzenen Materials wird eine neue Schicht des Bauteilwerkstoffes in Pulverform durch einen Rakelmechanismus aufgebracht und die neue Materialschicht wieder aufgeschmolzen. Die Schichtstärken bewegen sich dabei im Bereich von $20\ \mu\text{m}$ oder $40\ \mu\text{m}$. Der beschriebene Vorgang wiederholt sich so lange, bis das komplette Werkstück generiert wurde. Bedingt durch den schichtweisen Aufbau können hochkomplexe Bauteilgeometrien direkt aus den CAD-Daten erstellt werden. In gewissen Prozessgrenzen sind hierdurch Strukturen realisierbar, die bislang durch keinen alternativen Prozess gefertigt werden können.

Ein etablierter Fertigungsprozess für mikrostrukturierte Bauteile ist heutzutage die Ultrapräzisionszerspanung. Die Zerspanung der Werkstoffe wird hierbei unter Verwendung von Mikrofräsern und -bohrern mit Durchmessern von z. T. nur $20\ \mu\text{m}$ erreicht. Bedingt durch den definierten Materialabtrag können komplexe Oberflächenstrukturen direkt aus einem Computermodell des Werkstücks präzise gefertigt werden. Neben Metallen können auch Kunststoffe bearbeitet werden. Gegenüber

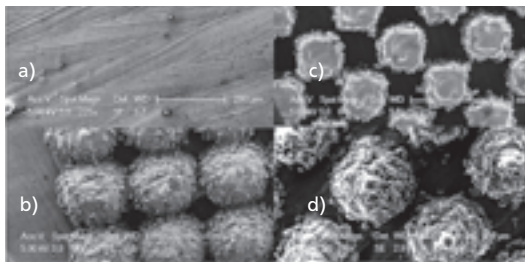


Abbildung 4
Unterschiedliche, durch Laser-Sintern erzeugte Metalloberflächen.
a) unstrukturierte Oberfläche
b) halb-kugelförmige
c) würfelförmige
d) kegelförmige Strukturen.

dem Laser-Sintern bringt die Ultrapräzisionszersetzung eine Reihe von Einschränkungen bei der Herstellung dreidimensionaler Strukturen mit sich. Ein Vorteil der spanenden Bearbeitung im Vergleich zum Lasersintern besteht jedoch in den höheren Oberflächengütern. So ist jedes der beiden Verfahren mit spezifischen Vor- und Nachteilen verbunden.

Nach der Erzeugung von Oberflächenstrukturen besteht die Möglichkeit, diese im Anschluss einer dünnen Schicht zu versehen, um eine extrem wasserabweisende Wirkung zu erzielen. Dafür eignen sich z. B. dünne Schichten aus teflonartigen Poly-

meren. Schon wenige Nanometer dicke Lagen dieser Polymere genügen in der Regel, um der Oberfläche superhydrophobe Eigenschaften zu verleihen.

Zusammenhang zwischen Oberflächenstruktur und Benetzbarkeit

Abbildung 3 zeigt eine der durch Ultrapräzisionszersetzung erzeugten Oberflächen. Die in einem regelmäßigen Raster angeordneten Strukturen haben eine quadratische Querschnittsfläche von etwa $50 \times 50 \mu\text{m}$ und sind knapp $100 \mu\text{m}$ hoch. Das Aufbringen einer dünnen wasserabweisenden

ANZEIGE

**Fachgebiet Nano- und Mikrofluidik,
Center of Smart Interfaces**
Steffen Hardt
Tel. 06151/16-2581
E-Mail: hardt@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de/institute/nmf/index.en.jsp

Center of Smart Interfaces
Selin Manukyan
Tel. 06151/16-6606
E-Mail: manukyan@csi.tu-darmstadt.de
www.csi.tu-darmstadt.de/staff/mitarbeiterdetails_19968.en.jsp

Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik
Ilia Roisman
Tel. 06151/16-3929
E-Mail: roisman@sla.tu-darmstadt.de
www.sla.tu-darmstadt.de/sla/index.de.jsp

**Institut für Produktionsmanagement,
Technologie und Werkzeugmaschinen**
Eberhard Abele
Tel. 06151/16-2156
E-Mail: abele@ptw.tu-darmstadt.de

Jakob Fischer
Tel. 06151/16-6616
E-Mail: fischer@ptw.tu-darmstadt.de
www.ptw.tu-darmstadt.de



WACHENDORFF
Elektronik GmbH & Co. KG



**Starten Sie mit uns
in eine gemeinsame
Zukunft!**

**Wir bieten Ihnen
den passenden Einstieg:**

- Werkstudententätigkeit
- Praktika
- Bachelor-/Master-Thesis
- Direkteinstieg

WACHENDORFF Elektronik GmbH & Co. KG

Personalabteilung
Industriestraße 7
65366 Geisenheim

Martina Wachendorff
Telefon 06722 9965-22
E-mail mw@wachendorff.de

wachendorff-elektronik.de

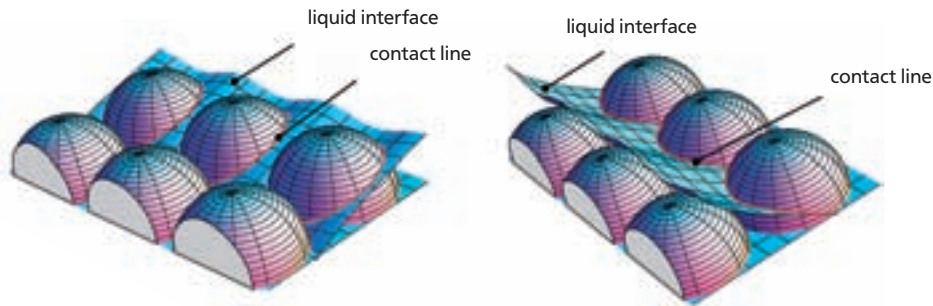


Abbildung 5
Mathematische Modellierung der Benetzbarkeit von halbkugelförmigen Strukturen. Der scheinbare Kontaktwinkel hängt von der Position der Kontaktlinien ab.

Schicht auf derartig strukturierte Aluminiumoberflächen verleiht diesen superhydrophobe Eigenschaften. Der rechte Teil der Abbildung zeigt einen etwa zwei Millimeter kleinen Wassertropfen auf einer auf diese Weise erzeugten Oberfläche. Man erkennt deutlich, dass der Wassertropfen nicht in die Vertiefungen der Oberfläche eindringt. Wenn die Fläche auch nur ein wenig gegenüber der Horizontalen geneigt wird, rollt der Tropfen sofort ab, ähnlich wie auf einem Blatt der Lotuspflanze. Um die Benetzbarkeit einer Oberfläche zu quantifizieren, führt man den sogenannten Kontaktwinkel

ein. Dies ist der Winkel, den die Grenzfläche zwischen der Flüssigkeit und der umgebenden Luft mit der Oberfläche bildet. Ist eine Oberfläche vollständig benetzbar, bildet die Flüssigkeit auf ihr einen Film und der Kontaktwinkel beträgt null. Als grobe Regel gilt, dass sich der Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf einer strukturierten Oberfläche vergrößert, wenn er auf der entsprechenden glatten Oberfläche mehr als 90° beträgt. Umgekehrt verkleinert sich der Kontaktwinkel durch Strukturierung der Oberfläche bei einem Ausgangswinkel von kleiner als 90° .

Der genaue Wert, den der Kontaktwinkel annimmt, hängt von der Form der Oberflächenstrukturen ab. In Abbildung 4 sind mit dem Laser-Sinterverfahren erzeugte unterschiedliche Oberflächenstrukturen dargestellt. Die sehr rauen Seitenwände der Strukturen sind dabei erwünscht und führen zu einer Vergrößerung des Kontaktwinkels. Es zeigt sich, dass der Kontaktwinkel von Wasser auf den kegelförmigen Strukturen größer ist als auf den halbkugel- oder würfelförmigen. Die Spitzen der kegelförmigen Erhebungen minimieren die Kontaktfläche mit der Flüssigkeit und verhindern, dass diese den Boden der strukturierten Oberfläche benetzt.

Modellierung der Benetzung von komplexen Oberflächen

Um Oberflächen mit maßgeschneiderten Benetzungseigenschaften herzustellen ist es wichtig, die Physik der Benetzung zu verstehen und aus diesem Verständnis heraus spezifische Oberflächenstrukturen mit den gewünschten Benetzungseigenschaften zu entwickeln.

Viele Jahrzehnte lang verwendete man zu diesem Zweck die relativ einfachen Modelle von Wenzel (1936) und Cassie-Baxter (1944). Neuere Forschungsergebnisse zeigen allerdings deutlich, dass diese Modelle nicht universell sind und in der Tat die meisten Situationen nicht korrekt beschreiben. Der Grund dafür ist, dass der komplexen Form der Kontaktlinie zwischen Gas, Flüssigkeit und Festkörper nicht Rechnung getragen wird.



Eberhard Abele ist Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces.



Jakob Fischer ist Leiter des Mikro Prototyping Zentrums und Doktorand am PTW.



Steffen Hardt ist Leiter des Fachgebiets Nano- und Mikrofluidik am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt.



Selin Manukyan arbeitet als Doktorandin am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt. Ihr Schwerpunkt liegt in der Erforschung der statischen und dynamischen Benetzung von komplexen Flüssigkeiten auf strukturierten Oberflächen.



Ilia Roisman ist Privatdozent am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik und Principal Investigator am Center of Smart Interfaces der TU Darmstadt.

In Abbildung 5 ist die Kontaktliniengeometrie für ein Substrat schematisch dargestellt, auf dem Halbkugeln in einem regelmäßigen Raster angeordnet sind. Der Kontaktwinkel hängt von der Position der Kontaktlinie relativ zu den Halbkugeloberflächen ab. Dieser Effekt erklärt das Phänomen der Kontaktwinkelhysterese, d. h. die Tatsache, dass der Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf einer Oberfläche oft keinen exakt definierten Wert besitzt, sondern beliebige Werte innerhalb eines relativ breiten Intervalls annehmen kann. Auf bestimmten Oberflächen beträgt die Breite dieses Intervalls 50° oder mehr. Die genaue

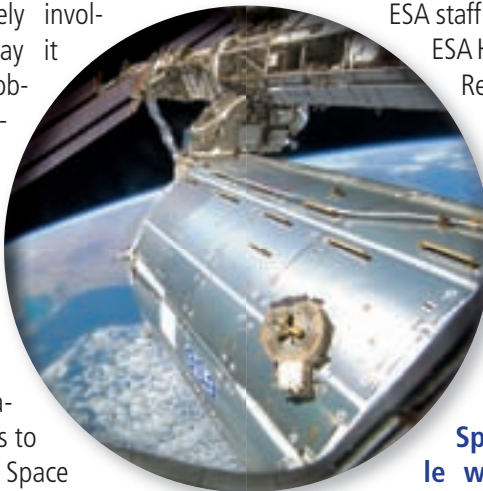
Form der Flüssigkeitsoberfläche auf einer strukturierten Oberfläche auch im Experiment zu untersuchen ist oft nicht einfach, da nur bei sehr feinen Oberflächenstrukturen vermieden werden kann, dass die Schwerkraft die Flüssigkeitsoberfläche signifikant deformiert. Solch feine Details können allerdings nicht immer leicht beobachtet werden. Abhilfe schafft hier die „Abschaltung“ der Schwerkraft, d. h. man führt Experimente im Weltraum durch. Die so gewonnenen Daten helfen den Forschern, mehr über die Benetzbarkeit von komplexen Oberflächen zu erfahren.

ANZEIGE



From the beginnings of the 'space age', Europe has been actively involved in spaceflight. Today it launches satellites for Earth observation, navigation, telecommunications and astronomy, sends probes to the far reaches of the Solar System, and cooperates in the human exploration of space.

Space is a key asset for Europe, providing essential information needed by decision-makers to respond to global challenges. Space provides indispensable technologies and services, and increases our understanding of our planet and the Universe.



Since 1975, the European Space Agency (ESA) has been shaping the development of this space capability. By pooling the resources of 19 Member States, ESA undertakes programmes and activities far beyond the scope of any single European country, developing the launchers, spacecraft and ground facilities needed to keep Europe at the forefront of global space activities.

ESA staff are based at several centres of expertise: ESA Headquarters in Paris; the European Space Research & Technology Centre (ESTEC), Netherlands; the centre for Earth observation (ESRIN), Italy; the European Space Operations Centre (ESOC), Darmstadt, Germany; the European Astronaut Centre (EAC), Cologne, Germany; and the European Space Astronomy Centre (ESAC), Spain.

Space programmes require people who like challenges. Our success depends on bright minds like yours!

Visit your career universe on www.esa.int/careers