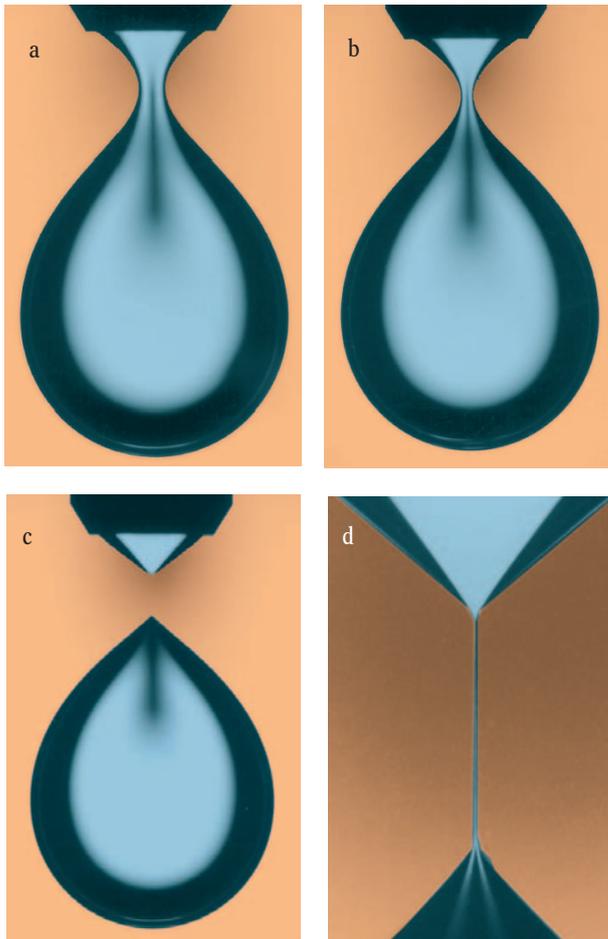


(Un)vergesslicher Tropfenabriss

Die Entstehung von Tropfen folgt in der Regel einem universellen Verhalten, bei dem die Anfangsbedingungen „vergessen“ werden. Nun wurde erstmals eine Ausnahme gefunden, bei der das Tropfenprofil eine „Erinnerung“ an die Anfangsbedingungen behält.

Tropft Honig vom Löffel auf das Frühstücksbrot, ist gut zu verfolgen, wie sich zwischen Löffel und Tropfen ein Hals ausbildet und fortschreitend verengt. Der Antrieb für diese Verengung ist die Oberflächenspannung. Sie erzeugt einen Druck auf den Hals, der umso größer wird, je kleiner der Halsradius wird. Der Druck divergiert umgekehrt proportional zum Halsradius. Ähnliche Singularitäten finden sich auch in anderen



Dünnflüssiges Wasser tropft aus einer Düse (Innendurchmesser 4,7 mm) in hochviskoses Silikonöl. Im neuen, erinnerungsbehafteten Regime schrumpft das parabelförmige Halsprofil radial, der axiale Maßstab bleibt dabei erhalten (a, b). Beim Übergang zum bekannten, universellen Regime macht sich die Viskosität des Tropfens bemerkbar. Das parabelförmige Halsprofil weicht einem langen dünnen Faden (c). Teilabbildung d zeigt die Vergrößerung des 2 mm langen und 8 μm breiten Fadens. (Quelle: I. Cohen, S. R. Nagel)

Bereichen der Physik, z. B. bei der Entstehung Schwarzer Löcher [1]. Was den Tropfenabriss so faszinierend macht, ist das Alltägliche und Zugängliche dieser Singularität. Er eignet sich aber nicht nur als Modellexperiment für Singularitäten, sondern bestimmt wichtige technische Prozesse wie Sprühverfahren oder Tintenstrahldruck.

Aus diesen Gründen steht der Tropfenabriss in den letzten Jahren im Fokus von Theorie und Experiment [2]. Aufbauend auf eine eindimensionale Beschreibung [3] fand Eggers eine selbstähnliche Lösung für das Profil des Tropfenhalses vor dem Abriss. Dies bedeutet, dass Halsprofile unterschiedlicher Zeiten durch eine bekannte Transformation ihres radialen und axialen Maßstabs zur Deckung gebracht werden können. Es gibt somit ein universelles Halsprofil. In die Transformationsgleichungen gehen nur die Stoffparameter Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung ein. Zahlreiche Experimente haben dies bestätigt [4, 2].

Auch die Dynamik folgt universellen Gesetzen. Sie wird dadurch bestimmt, wie schnell die Oberflächenspannung das Volumen aus dem sich verschlankenden Hals pressen kann. Da das Volumen erhalten bleibt, muss mit abnehmendem Halsradius die Strömungsgeschwindigkeit ansteigen. Der bremsende Einfluss der Viskosität wird daher immer wichtiger. Im Ergebnis nimmt trotz des divergierenden Drucks der minimale Halsradius mit einer konstanten Schrumpfgeschwindigkeit ab. Sie wird allein durch eine universelle Konstante (0,0304...) und die Stoffparameter bestimmt. So schrumpft der minimale Halsradius für Wasser mit 7200 cm/s, für den ungleich viskoser Honig mit nur etwa 0,5 cm/s. Daher kann man letzteren mit bloßem Auge abtropfen sehen, während der Abriss sonst nur im Hochgeschwindigkeitsfilm erkennbar wird [5].

Selbstähnlichkeit und Universalität sind aufs innigste verknüpft. Der Bereich, in dem das Halsprofil invariant bleibt, zieht sich aufgrund der abnehmenden radialen und axialen Maßstäbe immer mehr um den Abrissort zusammen. Damit „vergisst“ der Abrissprozess die Anfangs- und Randbedingungen und ist universell.

Eine amerikanisch-britische Forschergruppe um Pankaj Doshi an

der Purdue University hat nun eine wichtige Ausnahme vom universellen Verhalten aufgespürt [6]. Die Autoren lassen eine Flüssigkeit mit sehr geringer Viskosität (Wasser mit $\mu_{\text{int}} = 0,001 \text{ kg/ms}$) innerhalb einer stark viskosen Flüssigkeit (Silikonöl mit $\mu_{\text{ext}} = 12 \text{ kg/ms}$) abtropfen. Damit invertieren sie die übliche Anordnung, die eine viskose Flüssigkeit in einer nichtviskosen (meist Luft) untersucht. Sie beobachten eine unerwartete Entwicklung des Tropfenprofils: Es behält über einen weiten Bereich eine Art Erinnerung an die Anfangsbedingungen.

Die Abbildung zeigt das Tropfenprofil in verschiedenen Stadien. Zunächst messen die Autoren, dass sich das Halsprofil weder streckt noch staucht, sondern einheitlich radial nach innen wandert (a, b). Unterschiedliche Anfangsprofile bleiben daher über die Zeit erhalten; es bildet sich kein universelles Profil aus. Eine Simulation der Navier-Stokes-Gleichungen für die Strömungen in der äußeren und inneren Flüssigkeit offenbart die Ursache für dieses unerwartete Verhalten. Das Druckprofil im Inneren des Tropfens ist nach den Simulationsrechnungen homogen. Dies heißt, das Tropfeninnere verhält sich quasi-statisch. Damit entfällt der dominierende Einfluss der viskosen Reibung im Halsinneren, welcher gewöhnlich den Tropfenabriss mitbestimmt. Es entfällt auch die axiale Dynamik und so bleibt der axiale Maßstab erhalten.

Die Viskosität der inneren Flüssigkeit ist zwar sehr klein, doch von null verschieden. Verengt sich der Hals immer weiter, so wird die viskose Reibung im Inneren letztlich doch wichtig, und das übliche universelle Regime [2, 7] manifestiert sich (Abb. c, d)

Die Autoren zeigen, dass der minimale Halsradius des Übergangs zum universellen Regime linear vom Verhältnis der inneren und äußeren Viskositäten abhängt. Für einen anfänglichen Halsradius von 1 cm und ein Viskositätsverhältnis von 10^{-8} , das für Luftblasen in Sirup gilt, tritt der Übergang zum universellen Regime erst bei einem minimalen Halsradius von wenigen Ångström auf, also jenseits der Kontinuumsnäherung. Damit liegt hier sogar der ganze Abrissprozess außerhalb des universellen Regimes.

Das Team schlägt vor, das Erinnerungsvermögen an das Startprofil zur Herstellung mikroskopischer

Strukturen einzusetzen. Dazu soll ein Prepolymer der inneren Flüssigkeit beigefügt und durch Photopolymerisation vernetzt werden, sodass das nach einer gewissen Zeit radial verkleinerte Startprofil fixiert wird. Andererseits ist es möglich, einen langen dünnen Faden herzustellen, wenn die Fixierung erst im universellen Regime erfolgt.

Eine weitere Anwendung wäre die Unterdrückung von Satellitentropfen. Diese bilden sich in der letzten Phase des universellen Regimes aus dem dünnen Tropfenhals (Abb. d). Wird dieses Regime durch die extremen Viskositätsverhältnisse unterdrückt, entfallen auch die Satellitentropfen. Damit lassen sich Gasblasen einheitlicher Größe in viskosen Medien erzeugen. Das ist hilfreich, wenn beispielsweise Dämmstoffe mit wohl definierten Eigenschaften hergestellt werden sollen.

REINHARD RICHTER

- [1] M. Choptuik, Phys. Rev. Lett. **70**, 9 (1993).
- [2] J. Eggers, Rev. Mod. Phys. **69**, 865 (1997).
- [3] H. C. Lee, IBM J. Res. Dev. **18**, 364 (1974).
- [4] T. A. Kowalewski, Fluid Dyn. Res. **17**, 121 (1996).
- [5] A. Rothert, R. Richter und I. Rehberg, New J. Phys. **5**, 59 (2003).
- [6] P. Doshi, I. Cohen, W. W. Zhang, M. Siegel, P. Howell, O. Basaran und S. R. Nagel, Science **302**, 1185 (2003).
- [7] I. Cohen, M. P. Brenner, J. Eggers und S. R. Nagel, Phys. Rev. Lett. **83**, 1147 (1999).

Leuchtende Wellenfunktion

Nahfeldspektroskopie löst einzelne Exzitonen in Quantenfilmen auf

Quantenmechanische Wellenfunktionen abzubilden ist ein lang gehegtes Ziel vieler Physiker. In den letzten Jahren gelang es z. B., Quantenwirbel in Bose-Einstein-Kondensaten sichtbar zu machen oder stehende Elektronenwellen auf Metalloberflächen, etwa Quantenperle (*quantum corrals*), mit Raster-Tunnel-Mikroskopen darzustellen.

Exzitonen sind optische Elementaranregungen von Halbleiter-Nanostrukturen. Sie sind an der Lichterzeugung in Leucht- und Laserdioden beteiligt und mögliche Bausteine für zukünftige Quantencomputer. Als sog. Quasiteilchen

bestehen Exzitonen aus einem durch die Coulomb-Wechselwirkung zusammengehaltenen Elektron-Loch-Paar. Ihre Schwerpunktswellenfunktionen lassen sich durch die Schrödinger-Gleichung beschreiben und geben direkt das lokale Dipolmoment und die Wahrscheinlichkeitsamplitude der Photonenemission an. Als „selbstleuchtende Wellenfunktionen“ sollten sie also besonders leicht abzubilden sein. Dennoch haben Exzitonen sich bis jetzt standhaft jedem Versuch widersetzt, ihre Wellenfunktion mit modernen nano-optischen Methoden direkt zu visualisieren. Dies liegt daran, dass alle Halbleiter-Nanostrukturen, auch die besten mittels Molekularstrahl-Epitaxie hergestellten Quantenfilme, einen gewissen Grad an Unordnung aufweisen. Deshalb beträgt die Ausdehnung der Wellenfunktion einzelner Exzitonen zumeist nur einige 10 nm.

Die Arbeitsgruppe um K. Matsuda und T. Saiki berichtet nun, dass es ihr gelungen ist, die Wahrscheinlichkeitsdichte der Schwerpunktswellenfunktion einzelner Exzitonen in einem dünnen Gallium-Arsenid-Quantenfilm sichtbar zu machen [1]. Aufgrund der räumlichen Schwankungen der Dicke des Quantenfilms um wenige Atomlagen sind dabei die Exzitonen lokalisiert und ihre Wellenfunktionen haben eine endliche Ausdehnung (Anderson-Lokalisierung durch Unordnung). Die Forscher beleuchteten die Probe durch eine spezielle von ihnen entwickelte Nahfeldsonde, die einen sehr kleinen Aperturdurchmesser von nur etwa 20 nm (1/40 der Lichtwellenlänge) besitzt. Dennoch weist sie aufgrund ihrer speziellen Geometrie eine hohe Transmissionseffizienz auf. Während diese Spitze über die Probe bewegt wird, wird das von einzelnen Exzitonen emittierte Lumineszenzlicht detektiert (Abb. 1). Dabei wird Lumineszenz immer dann nachgewiesen, wenn sich der nur etwa 30 nm große Lichtfleck unter der Sonde und die lokalisierte Exziton-Wellenfunktion überlappen. Da sich die Emissionswellenlängen verschiedener Eigenzustände aufgrund der Unordnung geringfügig unterscheiden, lässt sich ein Bild der einzelnen Exzitonzustände innerhalb der Quantenfilmebene Pixel für Pixel aus der lokalen, wellenlängenaufgelösten Emissionsstärke aufbauen.

In ihren Quantenfilmen beob-

achten die japanischen Forscher leicht elliptische Formen mit einer mittleren Größe von etwa 100 nm, deutlich oberhalb der räumlichen Auflösung des Experiments. Bei hohen Anregungsleistungen tritt zusätzlich zur exzitonischen Emission auch noch die Emission des biexzitonischen Zustands auf, eines gebundenen „Moleküls“ aus zwei Exzitonen. Interessanterweise ist die Biexziton-Lumineszenz räumlich deutlich weniger ausgedehnt als die des Exzitons. Dies kann der gegenüber dem Exziton reduzierten Ausdehnung der Biexziton-Schwerpunktswellenfunktion zugeschrie-

Dr. Reinhard Richter, Physikalisches Institut, Experimentalphysik V, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

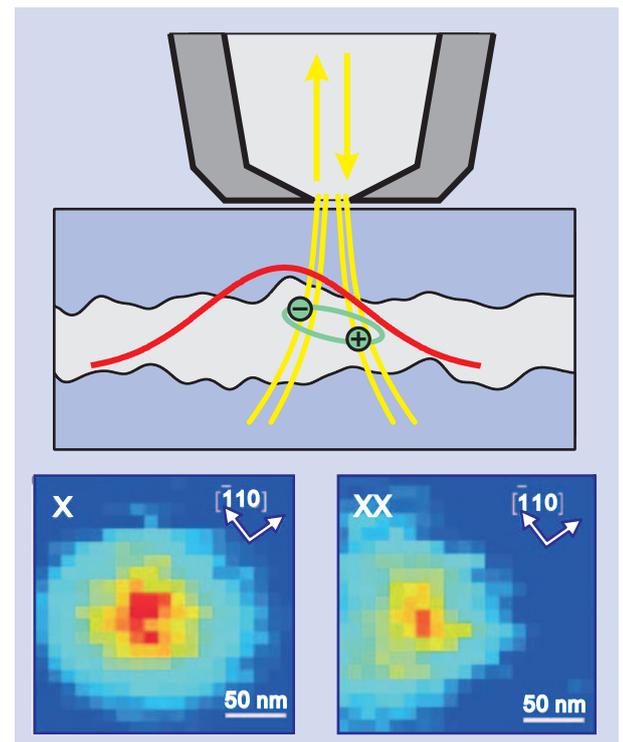


Abb. 1:

► oben: Die gleichmäßig über die Probe bewegte Glasfaser Spitze regt die lokalisierten Exziton-Zustände (rot: Wellenfunktion) an und detektiert die beim Exzitonzerfall entstehende Lumineszenz.
 ► unten: Ist die Lichtaustrittsöffnung klein gegenüber der Wellenfunktion, lässt sich die Wellenfunktion eines einzelnen Exziton- (links) bzw. Biexziton-Zustandes anhand der Intensitätsverteilung der Photolumineszenz räumlich auflösen. (aus [1])

ben werden [1]. Sicher trägt auch bei, dass es sich bei dem Nachweis um ein nichtlineares Experiment handelt – Biexziton-Lumineszenz kann nur an Orten beobachtet werden, an denen sich vorher bereits ein Exziton befand.

Das Experiment von Matsuda et al. ist ein wichtiger weiterer Schritt zum mikroskopischen Verständnis der optischen Eigenschaften von Halbleiter-Nanostrukturen. Es legt eine ganze Reihe weiterführender Experimente nahe. Gerade die exzitonischen Wellenfunktionen von dünnen, ungeordneten Quantenfil-