

reproduziert aus [4]

FLUIDDYNAMIK

Immer schneller, immer präziser

Die Physik des Tintenstrahldrucks ist sehr komplex und bietet großes Potenzial – weit über den Gebrauch in handelsüblichen Druckern hinaus.

Detlef Lohse

Mit einem Tintenstrahldrucker haben wohl alle schon einmal ein digitales Dokument in Papierform gebracht. Die Geräte für den Hausgebrauch sind zu einem günstigen Preis verfügbar und die Druckergebnisse selbst bei Fotografien ansprechend. Die Grundlage moderner Tintenstrahldrucktechnologie bildet ein komplexes Zusammenspiel verschiedener fluiddynamischer Prozesse.

Der Tintenstrahldruck [1] ist die technologische Anwendung der Mikrofluidik, die sich am weitesten verbreitet hat. Der Druckvorgang zeichnet sich durch eine hohe Tropfenfrequenz, kleine Tropfenvolumina und die extreme Reproduzierbarkeit des Druckergebnisses aus. Bekannt ist die Technik vor allem aus der grafischen Druckindustrie; es gibt aber auch zahlreiche andere Anwendungen, zum Beispiel beim Druck von Solarzellen, Mikrolinsen, Brennstoffzellen, Batterien, Leuchtanzeigen, Flachbildschirmen, Flüssigkristallanzeigen und Halbleitern, in der additiven Fertigung – speziell beim Rapid Prototyping – sowie beim Druck von Polymeren, DNA, Proteinen und lebendem Gewebe.

Einige dieser Anwendungen erlauben keine Fehler und müssen absolut zuverlässig funktionieren. Werden beispielsweise elektronische Bauteile per Tintenstrahldruck hergestellt, kann das Fehlen eines einzigen Tropfens bereits zum Ausfall des gesamten Schaltkreises führen. Auch die

medizinische Diagnostik und die präzise Dosierung von Medikamenten erfordern eine ähnlich hohe Präzision.

Die Zusammensetzung und Beschaffenheit der Tinte hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Entsprechend stellen Pigmente in einer wässrigen Lösung nur die gängigste Form dar. Um die Eigenschaften der Tinte gezielt zu steuern, kommen andere kolloidale Teilchen, Vernetzungsmittel, Tenside, Polymere und weitere Zusatzstoffe in Frage. Solchen Tinten verfestigen sich in der Regel, wenn das Lösungsmittel verdampft. Bei moderneren Varianten gilt es, das Verfestigen aktiv herbeizuführen: Geschmolzenes Wachs oder flüssiges Metall werden unter ihre Schmelztemperatur abgekühlt, gelöste Kunststoffe vernetzen sich durch ultraviolette Strahlung und organisches Material härtet in chemischen Reaktionen aus.

Beim Tintenstrahldruck gibt es zwei Prinzipien, um die benötigten Tröpfchen zu erzeugen: der kontinuierliche Tintenstrahldruck und die Drop-on-Demand-Technik. Beim kontinuierlichen Tintenstrahldruck entstehen die Tropfen aufgrund der Plateau-Rayleigh-Instabilität des Strahls [2]. Dabei treibt die Kapillarkraft im zylinderförmigen Strahl eine Instabilität so lange an, bis dieser in eine Kette von Tröpfchen zerfällt: Das Flüssigkeitssystem möchte hierbei seine Oberflächenenergie minimieren. Der belgische Physiker und Fotopionier Joseph A. F. Plateau hat dieses vom tropfenden Wasserhahn bekannte Phänomen erstmals in

◀ Stroboskopische Aufnahme gejetzter Tröpfchen beim piezoakustischen Tintenstrahldruck im zeitlichem Abstand von 3 μ s: Der Öffnungsradius der Düse beträgt 15 μ m und der Tropfen-Durchmesser 23 μ m, sodass sich ein Tropenvolumen von 11 pL ergibt. Die Endgeschwindigkeit des Tropfens liegt in diesem Fall bei 4 m/s.

den 1870er-Jahren beschrieben; der Physik-Nobelpreisträger Lord Rayleigh veröffentlichte dazu als Erster eine umfassende mathematische Ableitung. Für den Druck ist es erforderlich, die kontinuierlich entstehenden Tröpfchen durch Ablenkung zu sortieren, sodass sie nur auf den gewünschten Teil des Substrats treffen. Die ungenutzte Tinte wird recycelt.

Im Gegensatz dazu erzeugt die Drop-on-Demand-Technologie die Tropfen – wie der Name schon sagt – bei Bedarf und schießt sie gezielt auf das Substrat; man sagt auch: „Die Tropfen werden gejetzt“. Damit dies gelingt, muss im Tintenkanal ein gewisser Druck vorliegen. Dafür wandeln piezoakustische Aktuatoren [3] mithilfe des piezoelektrischen Effekts elektrische Signale in mechanische Druckimpulse um (**Abb. 1**). Diese Form des Drop-on-Demand-Printing eignet sich für höchste Qualitätsansprüche, weil sich Tropenvolumen und -geschwindigkeit leicht mittels der piezoakustischen Impulsbreite und -stärke modulieren lassen. Darüber hinaus sind hohe Jetting-Raten möglich, und dank mikro-elektromechanischer Systeme (MEMS-Technologie) ist die Herstellung der benötigten Druckköpfe heute recht kostengünstig.

Reproduzierbarkeit trifft Ästhetik

Stroboskopische Zeitreihen ermöglichen eine visuelle Vorstellung der hohen Reproduzierbarkeit, die das Drop-on-Demand-Verfahren erreichen kann und muss (**Abb.** auf S. 30). Die Beleuchtung durch laserinduzierte Fluoreszenz sorgt für eine hohe Bildqualität und vermeidet Bewegungsunschärfe, sodass sich die Ästhetik des Jettens zeigt. Obwohl der Druckprozess schnell und auf kleiner Längenskala abläuft, sind die Tropfen erstaunlich stabil. Der Tintenstrahldruck mittels piezoakustischem Drop-on-Demand findet normalerweise mit Frequenzen zwischen 10 und 100 kHz statt bei einem Tröpfchenvolumen von 0,5 bis 100 Piko-Litern. Der typische Durchmesser eines Tröpfchens beträgt etwa 20 μ m, seine Geschwindigkeit liegt meist bei 10 m/s.

Für die Flüssigkeitsdynamik bietet der Tintenstrahldruck zahlreiche Herausforderungen. Auf der Seite des Druckkopfs gilt es, den piezoakustischen Antrieb zu realisieren und die Strömung innerhalb des Druckkopfs im Detail zu verstehen. Am Ende des Tintenkanals spielt die Meniskusdynamik eine wichtige Rolle beim Austritt der Tinte. An der Düsenplatte und bei der Strahlbildung treten ebenso Benetzungssphänomene auf, wie in dem Moment, wenn die Tröpfchen auf das aufnehmende Substrat prallen – bei der geläufigen Realisierung die Oberfläche des Papiers. Dabei können sie miteinander verschmelzen (Koaleszenz), bevor das Lösungsmittel verdampft und die Tinte trocknet. Die einzelnen Aspekte lassen sich nicht getrennt voneinander betrachten und optimieren, da zum Beispiel die Eigen-

schaften der Tinte die Vorgänge im Druckkopf sowie auf dem und im aufnehmenden Substrat beeinflussen. Ein Beispiel stellt die Flüchtigkeit der Tinte dar. An der Düse des Druckkopfs sollte möglichst keine Tinte verdampfen, damit die Düse nicht verstopt. Auf dem Papier angekommen ist dagegen ein schnelles Verdampfen wünschenswert: Dann ist es möglich, das bedruckte Papier schnell weiterzutransportieren, und das Papier verformt sich nicht durch die Feuchtigkeit. Auch die Eigenschaften der Tröpfchen, wie Frequenz, Geschwindigkeit und Größe, gilt es zu beachten: Prozesse im Druckkopf legen diese fest; sie selbst beeinflussen die Abläufe auf dem und im aufnehmenden Substrat.

Synopse des Jetting-Prozesses

Beim Tintenstrahldruck lassen sich sieben grundlegende flüssigkeitsdynamische Prozesse identifizieren. In der Tintenkammer im Druckkopf baut ein piezoakustischer Aktuator periodisch Druck auf, sodass die Tinte aus der Düse gedrückt wird (**Abb. 2a**). Dabei können durch eine Instabilität Blasen in der Tintenkammer entstehen (**Abb. 2b**). Gelangen die-

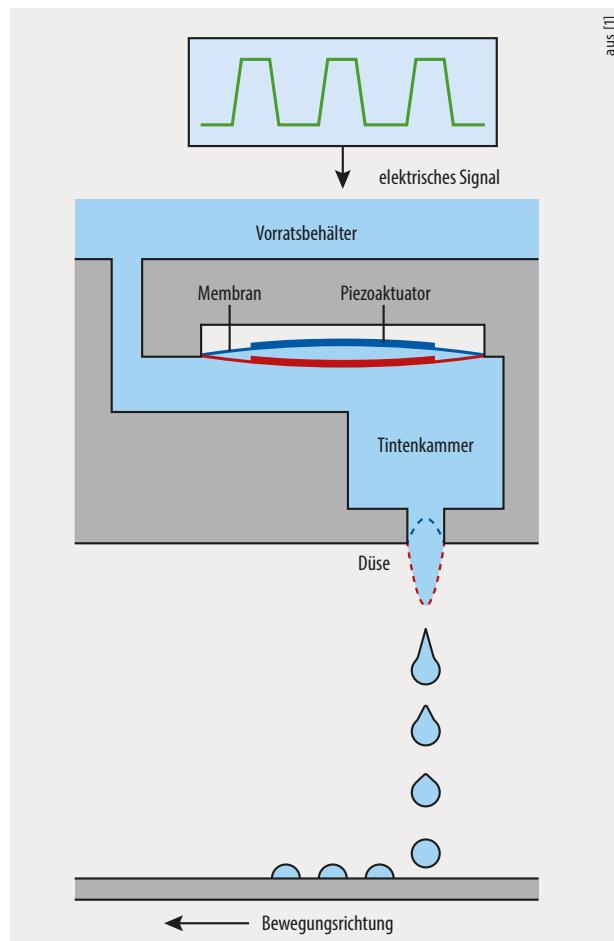


Abb. 1 Bei einem piezoakustischen MEMS-Tintenstrahlkanal setzt der Piezoaktuator ein elektrisches Signal in eine mechanische Verformung um: Die verbundene Membran steuert den Druck in der Tintenkammer zwischen einem minimalen (dunkelblau) und maximalen (rot) Wert. Entsprechend verändert sich der Meniskus an der Düse, deren Durchmesser 20 bis 30 μ m beträgt. Löst sich ein Tropfen ab, landet er auf dem Substrat, das sich unter der Düse fortbewegt. Der Vorratsbehälter für die Tinte ist durch einen Kanal mit der Tintenkammer verbunden.

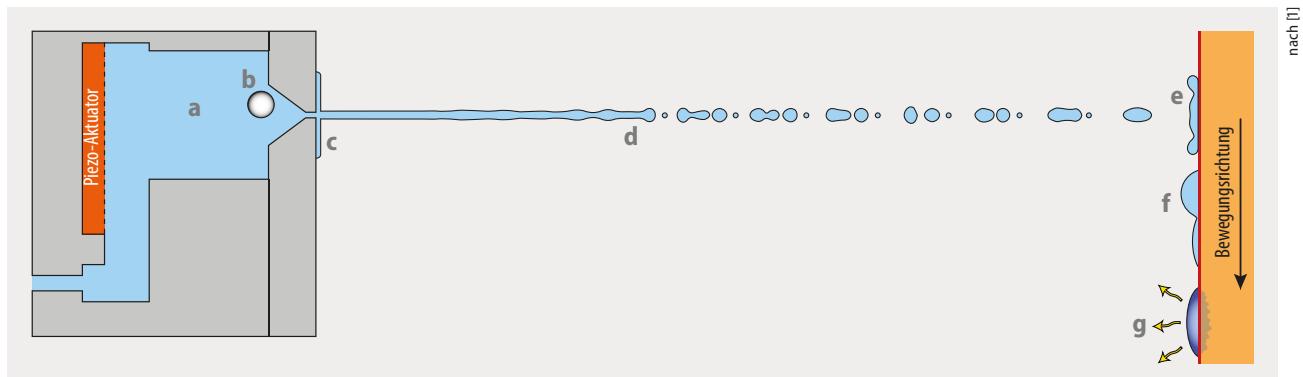


Abb. 2 Der Tintenstrahldruck besteht aus einer Abfolge mehrerer Schritte: Von der Interaktion zwischen Tinte und Piezo-Aktuator über den Tintenstrahl bis hin zur Wechselwirkung von Tinte und aufnehmendem Substrat beeinflussen verschiedene flüssigkeitsdynamische Prozesse das Druckergebnis: Strömung und Akustik im Druckkopf (a), Blasenbildung (b), Benetzungsdynamik (c), der Jetting-Prozess (d), Aufprall und Ausbreitung der Tropfen auf dem Substrat (e), Koaleszenz (f) und das Verdampfen bzw. Verfestigen der Tinte (g).

se zum Meniskus, stören sie den Ablauf empfindlich [6]: Die Blase absorbiert den aufgebauten Druck und beeinträchtigt oder verhindert sogar das Jetten (Abb. 3). Um die Tropfenfrequenz zu maximieren, gilt es daher, solche fluidodynamischen Instabilitäten zu vermeiden: Die Geometrie der Düse und die Benetzungseigenschaften der Düsenplatte entscheiden über die maximal erreichbare Stabilität (Abb. 2c). Sobald der Druck ausreicht, bildet sich an der Strahlspitze ein Tröpfchen, das sich ablöst und in Richtung des Substrats fliegt (Abb. 2d). Wann genau es sich ablöst und mit welcher Größe, hängt von Antriebsdruck und -frequenz sowie der Geometrie des Druckkopfs ab, ebenso wie von den Materialeigenschaften der Tinte.

Wenn der Tropfen auf dem Substrat aufschlägt, breitet er sich seitlich aus (Abb. 2e). Dabei ist das Substrat häufig bereits benetzt, sodass der Tropfen auf einen dünnen Flüssigkeitsfilm oder eine zuvor aufgebrachte Beschichtung trifft, oder er fällt auf bzw. neben Tropfen, die zuvor auf dem Substrat gelandet sind. Hier finden Wechselwirkungen zwischen Tropfen und Flüssigkeitsfilm bzw. zwischen den Tropfen statt (Abb. 2f), die häufig über die Qualität des Drucks entscheiden. Dafür kann aber auch die Wechselwirkung des Tropfens mit dem Substrat selbst wichtig sein, zum Beispiel wenn die Tinte in das Papier eindringt. Bei

wässrigen Tinten muss der Tropfen zumindest teilweise verdampfen und die mitgeführten Pigmente zurücklassen, damit ein Druckbild entsteht (Abb. 2g). Bei Tinten aus geschmolzenem Wachs entspricht diesem letzten Schritt das Verfestigen beim Abkühlen; bei Polymeren führen chemische Reaktionen zur Vernetzung. Das optische Erscheinungsbild des getrockneten Materials stellt das Endergebnis des Druckvorgangs dar und spiegelt dessen Qualität im Ganzen wider. Dabei kann der Trocknungsprozess auch sehr lange dauern – bis zu Stunden oder sogar Tagen.

Komplexe Kontrolle

Verschiedene Parameter kontrollieren das Ergebnis eines Tintenstrahldrucks. Aus der Geometrie des Druckkopfs folgen das Tintenkammervolumen, der Düsendurchmesser und die Düsenform. Darüber hinaus bestimmt der Druckkopf die Druckamplitude und -frequenz und ganz allgemein die Form des piezoelektrisch erzeugten Druckpulses. Zu den wichtigen Materialeigenschaften der Tinte gehören ihre Oberflächenspannung, Viskosität, Temperaturleitfähigkeit, Dichte und Flüchtigkeit; außerdem sind die geometrischen und materiellen Eigenschaften des Substrats zu beachten.

Je komplexer sich die Tinte zusammensetzt, desto mehr Kontrollparameter kommen ins Spiel. Dazu gehören die relativen Massen- oder Volumenanteile der verschiedenen Bestandteile und im Fall kolloidalen Teilchen deren Größe, Form und chemische Beschaffenheit. Die zusätzlichen Parameter machen die Beschreibung des Druckprozesses komplizierter, weil sie zu weiteren physikochemisch-hydrodynamischen Phänomenen in und zwischen den Tröpfchen führen. Ein Beispiel sind Tenside, die sich während der Ausbreitung der Tröpfchen auf dem Substrat an der Grenzfläche sammeln, was zu einer zeit- und positions-abhängigen Oberflächenspannung führt. Dagegen können sich Pigmente zusammenballen und die Düse verstopfen.

Bei Tröpfchen, die aus mehreren flüssigen Komponenten bestehen, verdampfen die Bestandteile in der Regel unterschiedlich schnell. Dadurch entstehen Konzentrationsunterschiede Δc in der Zusammensetzung der Flüssigkeit, wobei $c(x, t)$ das Konzentrationsfeld ist. Das führt zu einem

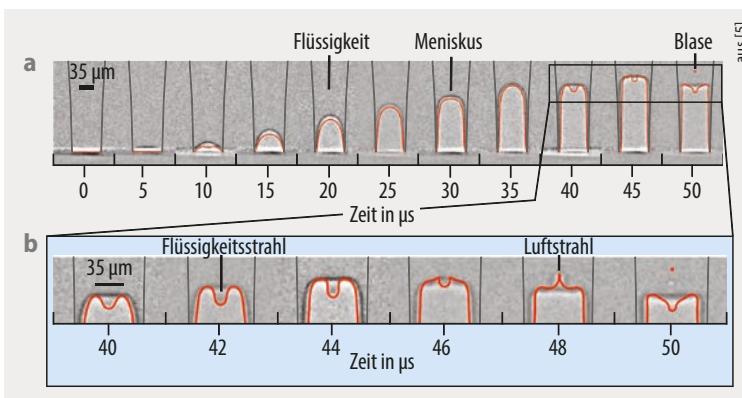


Abb. 3 Aufgrund einer Meniskusinstabilität kann in der Düse des Druckkopfs eine Blase entstehen. Der Vorgang lässt sich mit Röntgen-Synchrotronstrahlung beobachten (a, grau) und numerisch simulieren (rot). Der detaillierte Vergleich zeigt, dass sich diese „Blaseneinschleppung“ gut beschreiben lässt (b).

Gradienten in der Oberflächenspannung $\Delta\sigma$, der sich grob gemäß $\Delta\sigma \approx \partial_c\sigma\Delta c$ verhält, wobei $\sigma(c)$ im Allgemeinen keine lineare Funktion der Konzentration ist. Zusätzlich kann eine lokale Abkühlung oder Erwärmung der Tropfen einen Temperaturunterschied ΔT in der Flüssigkeit etablieren, der ebenfalls die Oberflächenspannung beeinflusst: $\sigma(T, c)$. Dann gilt allgemein:

$$\Delta\sigma \approx \partial_T\sigma(T, c)|_c \Delta T + \partial_c\sigma(T, c)|_T \Delta c.$$

Große Gradienten $\Delta\sigma$ führen dazu, dass sich das System weit weg vom Gleichgewichtszustand befindet. Dann gleicht eine sogenannte Marangoni-Strömung den Gradienten aus [7, 8]. Diesen Effekt quantifiziert die dimensionslose Marangoni-Zahl

$$Ma = \frac{R \Delta\sigma}{\rho v D}.$$

Dabei stehen ρ , v und D für die Dichte, die kinematische Viskosität und die Diffusivität der Tinte und R entspricht dem Tröpfchenradius. Marangoni-Strömungen können auch zwischen Tröpfchen zweier unterschiedlicher Flüssigkeiten oder für ein Tröpfchen auf dem Film einer anderen Flüssigkeit auftreten.

Eingeschränkter Bereich

Für den Tintenstrahldruck ist es wie in allen Bereichen der Strömungsdynamik zweckmäßig und daher üblich, die Kontrollparameter in Form dimensionsloser Kennzahlen auszudrücken. Diese beschreiben die Verhältnisse von verschiedenen Kräften oder von Zeit- bzw. Längenskalen. Vier dimensionslose Kennzahlen, von denen nur zwei unabhängig voneinander sind, beschreiben den Tintenstrahldruck im Wesentlichen:

- Die Reynolds-Zahl Re drückt das Verhältnis der Trägheits- und viskosen Kräfte aus: $Re = UR/v$. Dabei beschreiben R und U Tröpfchenradius und -geschwindigkeit. Letztere ergibt sich aus dem Druckaufbau im Tintenkanal.
- Die Weber-Zahl $We = \rho U^2 R / \sigma$ gibt das Verhältnis von Trägheits- zu Kapillarkräften an mit der Oberflächenspannung σ und der Dichte der Flüssigkeit ρ .
- Für die Kapillar-Zahl Ca gilt: $Ca = \eta U / \sigma = We/Re$. Sie gibt das Verhältnis von viskosen zu kapillaren Kräften an; $\eta = v \rho$ ist die dynamische Viskosität der Tinte.
- Das Verhältnis der viskosen zur kapillaren Zeitskala beschreibt die Ohnesorge-Zahl $Oh = \eta / (\rho \sigma R)^{1/2} = We^{1/2} / Re$.

Der Bereich, in dem ein Tintenstrahldrucker mit dem Drop-on-Demand-Verfahren stabil arbeitet, lässt sich gut in dem Parameterraum eingrenzen, den die Reynolds- und Ohnesorge-Zahl aufspannen (Abb. 4). Hier zeigt sich, dass viele Effekte ein kontrolliertes Drucken erschweren und gleichzeitig zu beachten sind. Damit ein Tropfen ausreichend kinetische Energie besitzt, um sich vom oszillierenden Meniskus abzulösen und aus der Düse gejetzt zu werden, muss zum Beispiel gelten: $Re \leq 2/Oh$ („end pinching“). Wird die kinetische Energie bei hohen Reynolds-Zahlen jedoch zu groß, fragmentiert der Tropfen nach dem Aufprall auf das Substrat („splashing“). Das verhindert ei-

nen präzisen Druck. Für diesen Bereich gilt: $Oh \cdot Re^{5/4} \geq 50$. Die Ohnesorge-Zahl muss also dazwischen liegen, damit das Drop-on-Demand-Verfahren stabil funktioniert: $2/Re \geq Oh \geq 50/Re^{5/4}$.

Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass sich genau ein Tropfen vom Meniskus ablöst, also dass dabei keine Satellitentröpfchen durch eine Plateau-Rayleigh-Instabilität entstehen. Dazu muss die Oberflächenspannung ausreichend groß sein: $Oh > 0,1$. Nach oben beschränkt die Viskosität die Kennzahl zu $Oh \leq 1$: Für größere Werte ist die Tinte zu zähflüssig, sodass der aufgebaute Druck in der Tintenkammer nicht mehr zum Jetten führt.

Kommt eine Tinte mit nichtnewtonschen Eigenschaften zum Einsatz, beeinflussen weitere Parameter den Druckvorgang. Ein Beispiel für viskoelastische Flüssigkeiten wie polymere Schmelzen ist die Deborah-Zahl De . Sie gibt das Verhältnis der Relaxationszeitskala τ_r der nichtnewtonschen Flüssigkeit und der Kapillarzeitskala $\tau_c = (\rho R^3 / \sigma)^{1/2}$ an: $De = \tau_r / \tau_c$.

Bis an die Grenze gehen

Um immer schneller und immer präziser zu drucken, ist es notwendig, noch kleinere Tropfen zuverlässig zu erzeugen, die Tinte mit immer höheren Frequenzen zu jetten oder mit zähflüssigeren Materialien zu arbeiten. Lässt sich dies technisch erreichen, eröffnen sich weitere vielfältige Anwendungen des Tintenstrahldrucks in Biologie, Medizin, Mikrofabrikation und Chemie. Bei mittleren Reynolds- und Ohnesorge-Zahlen ist das Drucken wie bereits erläu-

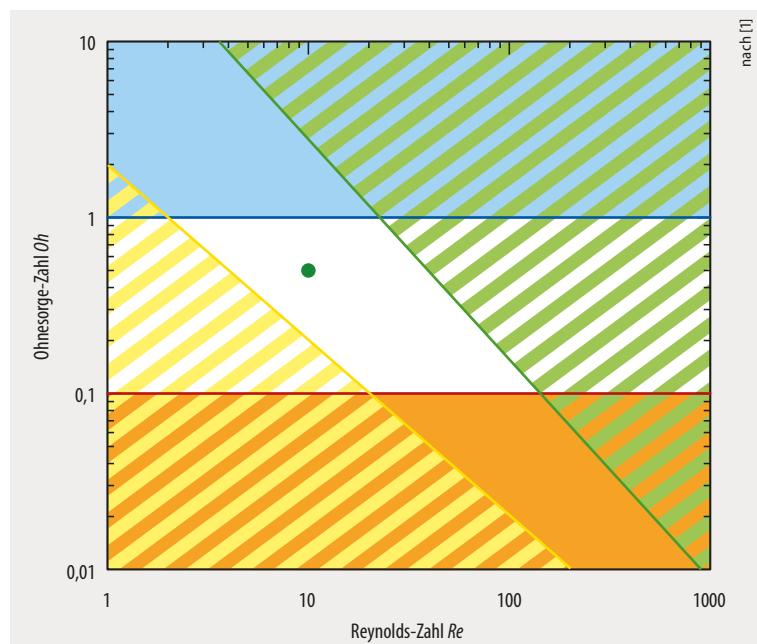


Abb. 4 Das Drop-on-Demand-Verfahren funktioniert nur in einem eingeschränkten Teil des Parameterraums (weiß), den die Ohnesorge-Zahl Oh und die Reynolds-Zahl Re aufspannen. Ist die kinetische Energie zu klein (gelb), wird kein Tropfen aus der Düse gejetzt; ist sie zu groß (grün), fragmentiert der Tropfen nach dem Aufprall auf das Substrat. Satellitentröpfchen entstehen bei einer zu geringen Oberflächenspannung (orange); die Tinte darf aber nicht zu zähflüssig sein (blau). Die Materialeigenschaften der Tinte in der Abb. auf S. 30 lassen sich mit dem Wertepaar $(Re; Oh) = (10; 0,5)$ beschreiben (grüner Punkt).

tert gut möglich. Die Übergänge zwischen den verschiedenen Regimen folgen Skalierungsgesetzen. Diese sind heute theoretisch gut verstanden und lassen sich aus den zugrundeliegenden hydrodynamischen Gleichungen ableiten. Auch die ausgeklügelteste Technik kann diese Grenzen nicht umgehen.

Eine weitere Schwierigkeit beim Tintenstrahldruck hängt mit der Flüchtigkeit der Tinte zusammen beziehungsweise mit der Zeit, welche die Tinte zum Trocknen benötigt. Einerseits sollte die Tinte schnellstmöglich trocknen, sobald sie auf dem Substrat gelandet ist. Das setzt eine hohe Flüchtigkeit der flüssigen Bestandteile voraus oder ein schnelles Verfestigen bei Materialien wie Wachs oder Metallen. Andererseits führt diese hohe Flüchtigkeit auf der Düsenplatte des Druckkopfs und am Meniskus dazu, dass die Düse verstopft. Im Fall einer selektiven Verdampfung einzelner Komponenten der Tinte kommt es – wie bereits erwähnt – zu Konzentrationsgefällen an und um die Düse, sodass Marangoni-Strömungen einsetzen. Darüber hinaus verändert die selektive Verdampfung auch die Viskosität der Tinte, was sich wiederum stark auf die Reproduzierbarkeit des Jettens auswirkt.

Kompromiss gesucht

Aus Sicht der Fluidodynamik gilt es nun, einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Anforderungen zu finden, der sich durch eine Feinabstimmung der unterschiedlichen Kontrollparameter realisieren lässt. Eventuell ist es dazu nötig, neue Freiheitsgrade einzuführen. Damit es zum Beispiel die Viskosität der Tinte erlaubt, die Kapillarkräfte am Meniskus zu überwinden und gleichzeitig die Bildung von Satellitentröpfchen zu vermeiden, könnte man der Tinte Polymere hinzufügen. Diese erlauben es, als neuen Freiheitsgrad die Elastizität der Tinte zu beeinflussen – und damit zu steuern, wann sich Satellitentröpfchen bilden. Wenn sich die Tröpfchen auf dem Substrat möglichst schnell, aber an der Düse möglichst gar nicht verfestigen sollen, stellen Tinten aus geschmolzenem Wachs einen Ausweg dar: Solange der Druckkopf bei einer Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des Wachses betrieben wird, passiert an der Düse nichts. Das kältere Substrat führt jedoch direkt zum Verfestigen, sobald die Tinte darauf auftrifft.

Die beiden Beispiele belegen, dass häufig Änderungen an der Tinte selbst dazu führen, den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden. Daher sind moderne, kommerziell erhältliche Tinten äußerst komplex aus mehreren Komponenten zusammengesetzt. Die verschiedenen Komponenten der Tinte sollten keine weiteren Herausforderungen und unerwünschten Effekte mit sich bringen. Insbesondere ein selektives Verdampfen einzelner Komponenten und die daraus resultierenden Marangoni-Strömungen innerhalb der Tröpfchen gilt es zu vermeiden. Um den Tintenstrahldruck zu optimieren, braucht es daher ein gutes Verständnis der physikalisch-chemischen Hydrodynamik der Tröpfchen.

Darüber hinaus stellt der Tintenstrahldruck ein Multiskalenproblem dar und ist als solches notorisch schwierig zu modellieren. Auf der Zeitskala sind viele Größenord-

nungen zu berücksichtigen: Innerhalb von Nanosekunden lösen sich die Tropfen vom Meniskus ab. Das Trocknen oder Aushärten der Tinte kann dagegen Wochen überstreichen; bei der Haltbarkeit der gedruckten Fläche geht es bei vielen Anwendungen sogar um Jahre. Ganz ähnlich gilt es auch auf der Längenskala, alle Größenordnungen von den Nanometern beim Ablösen der Tröpfchen bis zu den Dutzenden von Metern für die gesamte Druckvorrichtung oder die bedruckten Flächen zu beachten.

Weiter nach dem Mooreschen Gesetz?

Die Erfahrung der letzten 40 Jahre hat gezeigt, dass ähnlich der Entwicklung bei Prozessoren und Speicherkapazitäten auch für die Technik des Tintenstrahldrucks das Mooresche Gesetz gilt. Die Frequenz, mit der die Düsen eines Druckkopfs Tröpfchen ausstoßen können, wächst exponentiell und verdoppelt sich etwa alle zwei Jahre. Sie lag 1984 bei 10^7 Tröpfchen pro Sekunde aus allen Düsen eines Druckkopfs; 2020 waren es bereits 10^{11} Tröpfchen pro Sekunde. Bei diesem Zusammenhang handelt es sich wie auch in der Halbleiterindustrie nicht um ein Naturgesetz. Vielmehr stecken dahinter enorme Anstrengungen in Forschung und Entwicklung – auch bezüglich des Verständnisses der fluidodynamischen Grundlagen der Technik. Damit das Mooresche Gesetz auch in Zukunft gilt, ist es nötig, gerade diese Untersuchungen voranzutreiben. Nur so lässt sich das volle Potenzial des Tintenstrahldrucks sowohl für klassische als auch für viele neue verschiedene Gebiete erschließen und komplett ausschöpfen.

Literatur

- [1] D. Lohse, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **54**, 349 (2022)
- [2] J. Eggers, *Rev. Mod. Phys.* **69**, 865 (1997)
- [3] H. Wijshoff, *Phys. Reports* **491**, 77 (2010)
- [4] A. van der Bos et al., *Phys. Rev. Appl.* **1**, 014004 (2014)
- [5] M. Rump et al., *Phys. Rev. Fluids* **7**, 104004 (2022)
- [6] J. de Jong et al., *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 1257 (2006)
- [7] L. Scriven und C. Sternling, *Nature* **187**, 186 (1960)
- [8] D. Lohse und X. Zhang, *Nat. Rev. Phys.* **2**, 426 (2020)

Der Autor



Detlef Lohse (FV Dynamik und Statistische Physik, FV Chemische Physik und Polymerphysik) studierte Physik in Kiel und Bonn und promovierte 1992 an der Universität Marburg, wo er sich 1997 auch habilitierte. Seit 1998 ist er Inhaber des Lehrstuhls für Physics of Fluids an der University of Twente, Enschede, Niederlande. Darüber hinaus forscht er am Max-Planck-Center Twente for Complex Fluid Dynamics und am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. Für seine Arbeiten wurde er mit zahlreichen Preisen geehrt, unter anderem 2019 mit der Max-Planck-Medaille der DPG.

Prof. Dr. Detlef Lohse, Max-Planck-Center Twente for Complex Fluid Dynamics, Faculty of Science and Technology, University of Twente, 7500 AE Enschede, Niederlande, und MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Am Fassberg 17, 37077 Göttingen