

DIN EN 62904

ICS 31.180

Einsprüche bis 2015-06-10

Entwurf**Gedruckte Elektronik - Ausrüstung –
Tintenstrahldruck –
Messverfahren für die Spritzgeschwindigkeit
(IEC 119/64/CD:2014)**

Printed electronics - Equipment –
Inkjet –
Measurement method of jetting speed
(IEC 119/64/CD:2014)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2015-04-10 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 32 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Messung der Tintenspritzgeschwindigkeit (technisches Verfahren)	6
4.1 Verfahren für die Messung der Tropfenbeförderungsgeschwindigkeit (technisches Verfahren 1)	6
4.2 Verfahren für die Messung der momentanen Spritzgeschwindigkeit (technisches Verfahren 2)	6
5 Verfahren für die Ermittlung der Kurve der momentanen Spritzgeschwindigkeit (Präzisionsverfahren)	7
Anhang A (informativ)	8
A.1 Bildanzeigende Messtechnik	8
A.2 Tropfenvolumen	8
A.3 Messung der Spritzgeschwindigkeit anhand festgesetzter Zeitpunkte	10
A.4 Hindernisse bei der Messung der Spritzgeschwindigkeit anhand festgesetzter Zeitpunkte	12
A.5 Messung der Spritzgeschwindigkeit am Zielort	13
A.6 Analysemethode für die Präzisionsmessung	14
A.7 Aufgezeichnete Betriebsparameter für Messungen der Tropfengeschwindigkeit	16
Bilder	
Bild A.1 – Bildgebendes Messverfahren	8
Bild A.2 – Graubild eines vergrößerten Tropfens	9
Bild A.3 – Auswirkungen des Schwellenwerts auf die Tropfengröße	10
Bild A.4 – Messungen der Spritzgeschwindigkeit anhand von zwei Bildern: (a) zum Zeitpunkt t_1 und b) zu Zeitpunkt t_2	11
Bild A.5 – Messung der Spritzgeschwindigkeit für einen hochfrequenten Strahl	12
Bild A.6 – Bilder des Tintenstrahls zu verschiedenen Zeitpunkten	13
Bild A.7 – Zielort für die Messung der Spritzgeschwindigkeit auf dem Substrat	13
Bild A.8 – Tropfenpositionen in einem Tropfenbild	14
Bild A.9 – Messung der Tropfenbildung: (a) Bewegungsbahn des Tropfens; (b) Kurve der momentanen Spritzgeschwindigkeit	15
Tabellen	
Tabelle A.1 – Mit gebräuchlichen Verfahren ermittelte Spritzgeschwindigkeiten	13

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 119/64/CD:2014 „Printed electronics – Equipment – Inkjet – Measurement method of jetting speed“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 119 „Printed Electronics“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium GUK 682.1 „Gedruckte Elektronik“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Gedruckte Elektronik – Ausrüstung – Tintenstrahldruck – Messverfahren für die Spritzgeschwindigkeit

Einleitung

Beim Tintenstrahldruck werden die auf einem Substrat benötigten Strukturen mit Hilfe von Tintentropfen gebildet. Als ein technologisch ausgereiftes Verfahren ist es für das Drucken am Arbeitsplatz und im Heimbereich weit verbreitet. Das Volumen eines aus Tintenstrahldüsen abgegebenen Tropfens kann durch Anwendung von Tintenstrahldruckverfahren mit einer Genauigkeit von Zehnteln von Pikolitern (pL) geregelt werden. Darüber hinaus können diese Tropfen mit einer Genauigkeit im Bereich von Mikrometern (μm) auf das Substrat aufgebracht werden. Infolge dieser Besonderheiten hat sich die Tintenstrahltechnologie schließlich zu einem der leistungsstärksten Werkzeuge für die Strukturierung elektronischer Bauelemente herausgebildet. Anders als beim herkömmlichen Fotolithografieverfahren ist die Strukturierung mittels eines Tintenstrahls ein additiver Prozess, bei dem das Auftragen mehrerer Schichtstrukturen nicht die Entfernung von vorher aufgebrachtem Material erfordert. Infolgedessen ermöglicht diese Technologie eine erhebliche Verringerung des Verbrauchs teurer Materialien. Da die Freisetzung von Materialien infolge des additiven Charakters des Prozesses sehr gering gehalten wird, ist der Prozess außerdem umweltfreundlicher als andere Verfahren. Die Nachfrage nach dem Auftragen elektronischer Materialien mit Hilfe der Tintenstrahltechnologie ist deshalb in den letzten Jahren stark angestiegen.

Mit der verstärkten Anwendung der Tintenstrahltechnologie müssen von den Tintenstrahlköpfen verschiedene Arten von Spritzmaterialien präzise aufgetragen werden. Für die Bewertung und Lenkung des Spritzverhaltens muss das Verhalten der Tropfen aus dem Tintenstrahlkopf exakt gemessen werden. In Herstellungssystemen mit Tintenstrahltechnologie werden häufig bildgebende Messverfahren angewendet, da aus den Erscheinungsbildern physikalische Erkenntnisse über das Spritzverhalten erlangt werden können. Die am häufigsten gemessenen Parameter der Spritzleistung, die aus den Tropfenbildern ermittelt werden können, sind die Spritzgeschwindigkeit und das Volumen der Tropfen. Dabei werden zur Messung des Spritzverhaltens meistens CCD-Kameras mit einer Stroboskoplichtquelle wie einer LED, einem Puls laser usw. eingesetzt.

Anhand des gemessenen Spritzverhaltens der Tintenstrahlköpfe kann durch Modifikation entweder der Funktionseigenschaften der Tinte oder der Leistungsfähigkeit der Tintenstrahlköpfe die Spritzleistung verbessert werden.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die gemessene Spritzleistung und deren Bewertung wesentlich vom Messverfahren abhängen können, da kein genormtes Messverfahren zur Verfügung steht. Deshalb waren die Messergebnisse für die Spritzleistung bisher mitunter irreführend und sind für Entwickler von Tinte und Spritzköpfen wahrscheinlich nicht geeignet, um die Qualität ihrer Produkte zu verbessern. Darüber hinaus ist es für Verfahrenstechniker schwierig, die von den Tintenherstellern und Tintenstrahlkopferherstellern vorgelegten Datenblätter für die Spritzleistung zu beurteilen, weil keine vergleichbaren Prüfverfahren zur Verfügung stehen, was zu möglicherweise unzuverlässigen Ergebnissen führt. Der Zweck der vorliegenden Norm ist somit die Bereitstellung eines genormten Messverfahrens für den Tintenstrahldruck.

1 Anwendungsbereich

Das vorliegende Dokument legt ein Verfahren für die Bestimmung der Tintenspritzgeschwindigkeit fest, das auf von einem Tropfenvisualisierungssystem sichtbar gemachten Tropfenbildern basiert. Die Anwendbarkeit dieser Messnorm ist auf Drop-on-Demand-Tintendruck beschränkt, sie darf nicht für Continuous-Inkjet-Drucker angewendet werden. Diese Norm enthält Prüfverfahren, Softwarealgorithmen für die Bildverarbeitung und die Analyse des Spritzverhaltens.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO/IEC 24711, *Standards for colour inkjet printers*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Tintenstrahldruck

Computerdruck, der ein digitales Bild erzeugt, indem Tintentropfen auf Papier, Kunststoff oder andere Substrate aufgebracht werden

3.2

Tropfenvisualisierungssystem

Einrichtung zur Messung der Spritzleistung bei einer festgelegten Spritzfrequenz mit Hilfe von Stroboskoplicht, das mit der Spritzfrequenz synchronisiert ist¹

3.3

Tropfenbeförderungsgeschwindigkeit

Beförderungsgeschwindigkeit der Tropfen aus dem Tintenstrahlkopf, definiert als der Quotient aus der zurückgelegten Wegstrecke des Tropfens und der Zeit zwischen dem Abdrücken und dem Auftreffen des Tropfens

3.4

Tropfenvolumen

Umfang eines aus einer Düse je Abdruckimpuls ausgestoßenen Tropfens

3.5

Bewegungsbahn eines Tropfens

Kurvendarstellung der Tropfenpositionen aus Folgebildern zur Unterstützung des Verständnisses des Spritzverhaltens einschließlich von Ausläufern und Satellitentropfen

3.6

Folgebild

Serie von Tintenstrahlbildern beginnend beim Zeitpunkt des Auslösens des Abdrucksignals des Strahls bis zu einem vorgegebenen Zeitpunkt; Folgebilder können mit dem Tropfenvisualisierungssystem durch ansteigende Auslöseverzögerung des Stroboskopblitzes gegenüber dem Spritzsignal ermittelt werden

¹ Von ImageXpert (USA), PMT Co. (Japan), TRITEK Co. Ltd. (Japan), Unijet (Korea) und PS Co. Ltd. (Korea) stehen handelsübliche Produkte für Tropfenvisualisierungssysteme zur Verfügung. Diese Information dient nur der Information der Leser des vorliegenden Dokuments und stellt keine Anerkennung dieser Produkte durch ISO oder IEC dar.

3.7

Kurve der momentanen Spritzgeschwindigkeit

Kurvendarstellung der Spritzgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit, die aus der Bewegungsbahn eines Tropfens berechnet wird; diese Angabe umfasst die relative Spritzgeschwindigkeit des Haupttropfens gegenüber Satellitentropfen und dient dem umfassenden Verständnis des Spritzverhaltens

4 Messung der Tintenspritzgeschwindigkeit (technisches Verfahren)**4.1 Verfahren für die Messung der Tropfenbeförderungsgeschwindigkeit (technisches Verfahren 1)**

Dieser Abschnitt beschreibt ein technisches Verfahren für die Messung der Tropfenbeförderungsgeschwindigkeit vom Zeitpunkt des Abdrückens des Strahls bis zu dem Zeitpunkt, an dem er den Zielort erreicht. Die Tropfenbeförderungsgeschwindigkeit, die am Zielort gemessen wird (Abstand von der Düse) kann zweckdienlich für die Bewertung der Druckqualität sein. Mit dem Verfahren ergibt sich nicht genau die mittlere Spritzgeschwindigkeit, weil die Tinte eine gewisse Zeit benötigt, um nach dem Abdrückimpuls des Strahls aus der Düse gepresst zu werden.

- 1) Festlegen der betreffenden Spritzfrequenz: Wenn es nicht anders angegeben ist, kann eine Spritzfrequenz von 1 kHz verwendet werden. Außerdem ist es empfehlenswert, für die Messung der Spritzgeschwindigkeit soweit möglich weitere Spritzbedingungen nach den Angaben in Anhang 7 festzulegen.
- 2) Festlegen des Zielorts: Der Zielort (Abstand) entspricht dem Punkt S , an dem das Medium auf das Substrat aufgebracht wird. Als Zielort wird ein Wert von $S = 0,3$ mm bis 2,5 mm von der Düsenfläche empfohlen.
- 3) Bestimmen des Zeitpunkts T_a , zu dem der Tropfen den Zielort erreicht, durch eine ansteigende Auslöseverzögerung des Stroboskopblitzes: Dieser Vorgang kann automatisch durch Bildanalyse wie einem Tracking-Algorithmus erfolgen. Ansonsten sollte T_a von Hand ermittelt werden. Die Lichtstärke der Stroboskop-LED sollte so hoch sein, dass eine Einschaltzeit des Lichts von weniger als einigen hundert Nanosekunden ausreicht, um ein unscharfes Bild des Tropfens zu verhindern.
- 4) Die Tropfenbeförderungsgeschwindigkeit kann wie folgt berechnet werden:

$$V_a = \frac{S}{T_a} \quad (1)$$

4.2 Verfahren für die Messung der momentanen Spritzgeschwindigkeit (technisches Verfahren 2)

Dieses Verfahren beschreibt ein technisches Verfahren für die Messung der momentanen Spritzgeschwindigkeit, wenn der Tropfen den Zielort erreicht. Die momentane Spritzgeschwindigkeit V_i am Zielort auf dem Substrat bezieht sich auf das Auftreffen eines Tintens tropfens auf dem Substrat und die erste Benetzung.

- 1) Festlegen der betreffenden Spritzfrequenz: Wenn es nicht anders angegeben ist, kann eine Spritzfrequenz von 1 kHz verwendet werden. Außerdem ist es empfehlenswert, soweit möglich weitere Spritzbedingungen nach den Angaben in Anhang 7 festzulegen, damit nachvollzogen werden kann, welche Bedingungen für die Messung der Spritzgeschwindigkeit zutreffen.
- 2) Festlegen des Zielorts: Der Zielort (Abstand) entspricht dem Punkt S , an dem das Medium auf das Substrat aufgebracht wird. Als Zielort wird ein Wert von $S = 0,3$ mm bis 2,5 mm von der Düsenfläche empfohlen.
- 3) Bestimmen des Zeitpunkts T_a , zu dem der Tropfen den Zielort erreicht, durch eine ansteigende Auslöseverzögerung des Stroboskopblitzes.
- 4) Die momentane Spritzgeschwindigkeit V_i am Zielort kann anhand einer kurzen Zeitdifferenz $t_2 - t_1$ mit Gleichung (2) berechnet werden. Mit Hilfe von T_a sollten zwei Zeitpunkt t_2 und t_1 bestimmt werden.

$$V_i = \frac{Py_2 - Py_1}{t_2 - t_1} \times F \quad (2)$$

- 5) Dabei sind P_{y_1} und P_{y_2} die Tropfenpositionen (Pixel) zu den Zeitpunkten $t_1 = T_a - \Delta t$ bzw. $t_2 = T_a$ (μs). Zur Ermittlung der momentanen Spritzgeschwindigkeit (m/s) aus Gleichung (2) sollte der Kalibrierfaktor F ($\mu\text{m}/\text{Pixel}$) bei der vom Tropfenvisualisierungssystem benutzten optischen Vergrößerung bestimmt werden. Wenn der Tropfen einen langen Ausläufer aufweist, werden die unteren Positionen des Tropfens als Tropfenposition angesehen. Für die Ermittlung der momentanen Spritzgeschwindigkeit wird ein Wert von $\Delta t = 20 \mu\text{s}$ empfohlen. Wenn sich Δt als zu kurz erweist, verstärkt sich der Fehler der Spritzgeschwindigkeit, was sich in der Bildqualität niederschlägt. Wenn Δt groß wird, wird anstelle der momentanen Spritzgeschwindigkeit am Zielort eine mittlere Langzeit-Spritzgeschwindigkeit ermittelt.

5 Verfahren für die Ermittlung der Kurve der momentanen Spritzgeschwindigkeit (Präzisionsverfahren)

Dieses Verfahren beschreibt ein Präzisionsverfahren für die Messung der Spritzgeschwindigkeitskurve.

- 1) Festlegen der betreffenden Spritzfrequenz: Wenn es nicht anders angegeben ist, kann eine Spritzfrequenz von 1 kHz verwendet werden. Außerdem ist es empfehlenswert, soweit möglich weitere Spritzbedingungen nach den Angaben in Anhang 7 festzulegen, damit nachvollzogen werden kann, welche Bedingungen für die Messung der Spritzgeschwindigkeit zutreffen. Eine Spritzgeschwindigkeit über 5 kHz ist nicht empfehlenswert, weil auf dem Bild dann aufeinander folgende Tropfen erscheinen.
- 2) Festlegen der endgültigen Auslöseverzögerungszeit T_f des Stroboskopblitzes zur Ermittlung des Zeitpunkts, zu dem der Tropfen am Zielort auftritt: Falls ein Ausläufer und Satellitentropfen vorhanden sind, sollte die endgültige Auslösezeit so lang sein, dass der Ausläufer und die Satellitentropfen den Zielort erreichen können. Wurde nichts festgelegt, liegt der Zielort bei 1 mm.
- 3) Erhöhen der Auslöseverzögerung des Stroboskopblitzes von Null auf die vorher festgelegte Zeit T_f , um das Folgebild aufzunehmen. Es wird eine Erhöhung der Auslöseverzögerung von 20 μs empfohlen.
- 4) Zur Messung der Bewegungsbahn des Tropfens und der momentanen Spritzgeschwindigkeit wird jedes Folgebild verarbeitet. Dafür ist eine automatische Bildverarbeitung mit Binärbildern empfehlenswert. Aus einem Binärbild, das aus einem Graubild umgewandelt wurde, können die Position des größten Abstands und die Position des kleinsten Abstands des k -ten Tropfens in y -Richtung mit der Bezeichnung $P_k^{\max}(t_d)$ und $P_k^{\min}(t_d)$ ermittelt werden (Bild A.8, siehe A.6). Die Indizes max und min bezeichnen die Position des größten Abstands bzw. die Position des kleinsten Abstands in Spritzrichtung. Vor der Aufnahme des nächsten Folgebilds wird die Bewegungsbahn des Tropfens durch Addition der berechneten Positionen des größten und des kleinsten Abstands jedes Tropfens $P_k^{\max}(t_d)$ und $P_k^{\min}(t_d)$ zu jeder Kurve aktualisiert.
- 5) Die momentanen Spritzgeschwindigkeiten $V_k^{\max}(t_d)$ des k -ten Tropfens können nach folgender Beziehung berechnet werden:

$$V_k^{\max}(t_d) = \frac{P_k^{\max}(t_d) - P_k^{\max}(t_d - \Delta t_d)}{\Delta t_d} \quad (3)$$

Dabei ist Δt_d die Zeitstufe für die Auslöseverzögerung zwischen den beiden aufeinander folgenden Bildern und $P_k^{\max}(t_d) - P_k^{\max}(t_d - \Delta t_d)$ ist die zurückgelegte Wegstrecke des k -ten Tropfens von der Düse bis zur Position des größten Abstands während der Dauer Δt_d .

Anhang A (informativ)

A.1 Bildanzeigende Messtechnik

Bild A.1 zeigt ein typisches Tropfenvisualisierungssystem, welches in Fertigungssystemen mit Tintenstrahl-druck häufig eingesetzt wird. Mit Hilfe einer Stroboskoplichtquelle wie z. B. einer Leuchtdiode (LED), die mit dem Zündsignal synchronisiert ist, erscheinen die erstarrten Tropfenbilder auf dem von der CCD-Kamera aufgenommenen Bild. Damit ist die Bildverarbeitung zum Zweck der Messung des Orts und der Größe des Tintentropfens unkompliziert.

Bisher sind zur Bewertung der Spritzleistung mit bildgebenden Messungen meistens die Tropfenspritzgeschwindigkeit und das Tropfenvolumen gemessen worden. Selbst wenn in den meisten Tintenstrahlgeräten gleichwertige Hardware implementiert und nach einem ähnlichen Messkonzept vorgegangen worden ist, weichen die Messergebnisse trotzdem erheblich voneinander ab, wenn die Messung nicht nach einem genormten Verfahren erfolgt. Um ein besseres Verständnis für die Notwendigkeit einer Normung zu vermitteln, werden hier die Probleme der Messung genau erläutert.

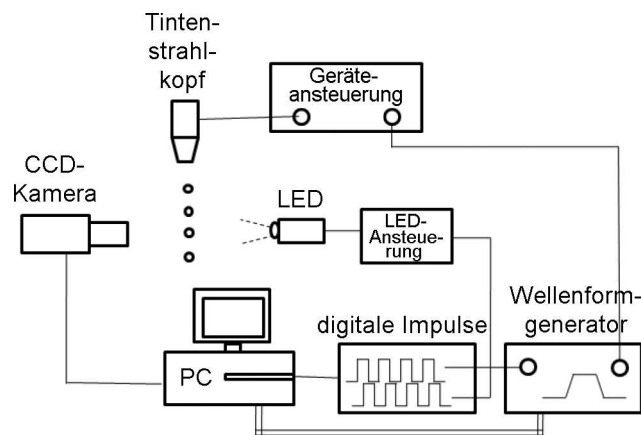


Bild A.1 – Bildgebendes Messverfahren

A.2 Tropfenvolumen

Die Volumenmessung des verspritzten Tropfens ist ein Kernproblem bei Anwendungen der gedruckten Elektronik. Die Menge der auf dem Substrat abgelagerten Materialien ist unmittelbar mit der Leistung des Bauelements verbunden. Um die Einheitlichkeit der Bauelemente sicherzustellen, sollte bei einem Druckkopf mit mehreren Düsen das Volumen der von den einzelnen Düsen verspritzten Tropfen gleich sein. Es ist jedoch zu beachten, dass das gemessene Tropfenvolumen oft unzuverlässig und für Anwendungen gedruckter Elektronik ungenau ist. Nachfolgend werden die Probleme der Messung des Tropfenvolumens erläutert.

1) Bildauflösung

Es besteht die dringende Forderung nach der Erzeugung kleinerer Tropfen mit höheren Spritzfrequenzen, folglich wachsen die Schwierigkeiten bei der genauen Messung des Tropfenvolumens wegen der begrenzten Pixelauflösung der CCD-Kamera. Bild A.2 zeigt beispielsweise die Unsicherheit bei der Bestimmung der Tropfengröße in Abhängigkeit von der optischen Auflösung.

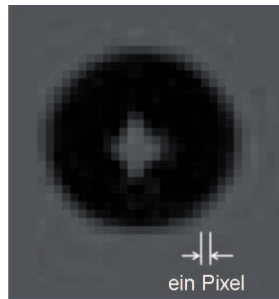


Bild A.2 – Graubild eines vergrößerten Tropfens

Zur Verringerung von Messfehlern darf eine Vergrößerung durch Zoomen mit dem Objektiv erfolgen. Wenn die Größe eines Pixels im Vergleich zum Tropfen ausreichend klein ist, kann der pixelbezogene Fehler so gering wie möglich gehalten werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die starke Vergrößerung für Messungen der Tropfenbildung möglicherweise nicht günstig ist, weil die Bildansicht durch Fokussierung auf einen sehr engen Bereich begrenzt werden kann. Zur Verringerung von Pixelfehlern kann eine hochauflösende Kamera benutzt werden. Andererseits ist die Nutzung einer hochauflösenden Kamera eine Kostenfrage und die Aufnahmegeschwindigkeit (Bilder je Sekunde) kann sinken.

Jedes Bildpixel eines 8-Bit-Graubilds besitzt je nach der Bildhelligkeit einen Wertebereich von 0 bis 255. Das Graubild kann in ein Binärbild mit Pixelwerten von 0 oder 1 umgewandelt werden. Das Binärbild kann ermittelt werden, indem ein entsprechender Schwellenwert festgesetzt wird, so dass Werte oberhalb des Schwellenwerts auf eine 1 (oder eine 0) und Werte unterhalb des Schwellenwerts auf eine 0 (oder eine 1) abgebildet werden. Mit dem Binärbild kann der Tintentropfen herausgelöst und mit Partikelanalysemethoden analysiert werden. Dabei nehmen die Pixel des Tintentropfens durch das entsprechende Festsetzen eines Schwellenwerts für die Diskretisierung einen Wert von 0 (oder 1) an und der Hintergrund wird 1 (oder 0). Bei der Nutzung eines Binärbilds zur Messung des Tropfenvolumens kann die gemessene Tropfengröße durch den Umwandlungsprozess vom Graubild in das Binärbild maßgeblich beeinflusst werden. Wie in Bild A.2 gezeigt, ist der Übergang des Bildwerts an der Grenze zwischen dem Tropfenbild und dem Hintergrund gleitend. Der gleitende Übergang des Bildwerts hängt von verschiedenen Bedingungen wie der Helligkeit der Beleuchtung und dem Fokus des Objektivs ab. Infolgedessen ändert sich die ermittelte Tropfengröße in Abhängigkeit vom Schwellenwert für die Binärumwandlung. Bild A.3 zeigt die aus einem Graubild umgewandelten Binärbilder, wobei für Vergleichszwecke zwei verschiedene Schwellenwerte verwendet wurden.

Wird ein Schwellenwert von 25 für die Binärumwandlung benutzt, kann der Tropfendurchmesser mit 20 Pixeln festgestellt werden. Ein Schwellenwert von 75 kann wiederum einen Durchmesser von 24 Pixel ergeben, folglich besteht die Schwierigkeit in der Messung eines genauen Volumens des Tintentropfens (oder einer genauen Größe) aus den Bildern. Wie in Bild A.3 angegeben, sind die Fehler bei der Binärumwandlung viel größer als die Pixelauflösung der CCD-Kamera.

Das gemessene Tropfenvolumen kann fehlerhaft sein, weil sich die Messergebnisse in Abhängigkeit vom für die Umwandlung des Binärbilds erforderlichen Schwellenwert, von der Stärke des Stroboskoplichts und vom Fokus des Objektivs unterscheiden. Damit sind die Messergebnisse für das Tropfenvolumen von der Messeinrichtung abhängig. Die Normung für die Messung des Tropfenvolumens kann sehr komplex sein. Da ein Messfehler unvermeidlich ist, muss die Fehlerschranke der Messung zum gemessenen Tropfenvolumen addiert werden, damit ein zuverlässiger Vergleich möglich ist. Die gegenwärtig erreichte Genauigkeit des Tropfenvolumens wird mit Zehnteln von Pikolitern angegeben.²

2 M. Verkouteren, J. Verkouteren und C. Zeissler, „Gravimetric Traceability for Optical Measurements of Droplets-in-Flight“, Technical Proceedings of the 2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo (2013); siehe auch „Inkjet Metrology: High-Accuracy Mass Measurements of Microdroplets Produced by a Drop-on-Demand Dispenser“, M.J. Verkouteren und J. Verkouteren, Anal. Chem. (2009), 81 (20), S. 8577–8584 DOI: 10.1021/ac901563j

Das Tropfenvolumen wird anhand der Tropfenform bestimmt, indem sie als achsensymmetrisch um die Spritzachse angenommen wird.³ Für hochgenaue Größenmessungen sind jedoch kugelförmige Tropfen erforderlich.

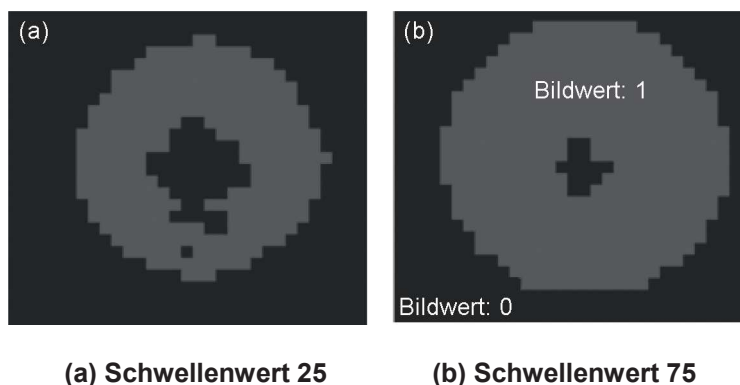


Bild A.3 – Auswirkungen des Schwellenwerts auf die Tropfengröße

A.3 Messung der Spritzgeschwindigkeit anhand festgesetzter Zeitpunkte

A.3.1 Messung der Spritzgeschwindigkeit für einen Strahl mit geringer Frequenz

In der Praxis wird die gemessene Spritzgeschwindigkeit als zuverlässiger angesehen und die Bewertung der Spritzleistung erfolgt meistens anhand der Spritzgeschwindigkeit.

Wie bereits erwähnt, kann sich die gemessene Tropfengröße während der Umwandlung in ein Binärbild verändern. Diese Fehler bei der Binärumwandlung sind während der gesamten Tropfenbildung wahrscheinlich gleich, sofern von der Annahme ausgegangen wird, dass die Messbedingungen wie die Beleuchtung, der Fokus des Objektivs und der Schwellenwert unverändert bleiben. Damit können sich die Fehler bei der Berechnung der Spritzgeschwindigkeit infolge der Subtraktion von zwei Tropfenpositionen bei der Berechnung der zurückgelegten Wegstrecke zwischen den beiden Zeitpunkten aufheben. Als Ergebnis wird die gemessene Spritzgeschwindigkeit des Tropfens als zuverlässiger angesehen als das gemessene Tropfenvolumen.

Mit der Spritzgeschwindigkeit ist die genaue Wellenform ermittelt worden. Aus der Sicht des Drucks ist die Spritzgeschwindigkeit auch für die Spritzleistung maßgeblich. Bei einer geringen Spritzgeschwindigkeit wird die Geradheit des Strahls beim Drucken wahrscheinlich mangelhaft, was zu einem Fehler bei der Anordnung des Tropfens führen kann. Ist die Spritzgeschwindigkeit jedoch zu hoch, gibt es lange Ausläufer oder Satellitentropfen, die die Druckqualität beeinträchtigen können.

Anhand einer Analyse der Binärbilder kann die Anzahl der Tropfen einschließlich der Haupttropfen und der Satellitentropfen ermittelt werden. Die Position eines Tintentropfens wird in Form von Pixelpositionen auf dem Bild der CCD-Kamera angegeben. Unter der Annahme, dass die Spritzrichtung nach unten weist, kann die Position des Tropfens mit der Pixelposition in y -Richtung P_y angegeben werden. Dabei ist zu beachten, dass die Pixelposition nicht den tatsächlichen Abstand wiedergibt. Zur Ermittlung des tatsächlichen Abstands (in μm) muss der ermittelte Pixelabstand der Tropfenposition mit einem Umrechnungsfaktor F (mit der Einheit $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) multipliziert werden.

Für die Messung der Tropfenspritzgeschwindigkeit müssen die Positionen der Tropfenbilder aus zwei aufgenommenen Tropfenbildern bei den Auslöseverzögerungszeiten t_1 und t_2 (in μs) der LED bezogen auf das

³ I.M. Hutchings, G.D. Martin und S.D. Hoath, „High speed imaging and analysis of jet and drop formation“, Journal of Imaging Science and Technology, 51 (2007), S. 438–444, ISSN 1062-3701; H. Dong, W.W. Carr und J.F. Morris, „An experimental study of drop-on-demand drop formation“, Review of Scientific Instruments 77, 085101 (2006); doi: 10.1063/1.2234853; A. van der Bos, M.-J. van der Meulen, T. Driessen, M. van den Berg, H. Reinten, H. Wijshoff, M. Versluis und D. Lohse, „Velocity Profile inside Piezoacoustic Inkjet Droplets in Flight: Comparison between Experiment and Numerical Simulation“, Physical Review Applied 1, 014004 (2014)