Dustin Büttner

Elektronik aus dem Laserdrucker

Studie zur Nutzbarkeit der Elektrofotografie zum Druck leitfähiger Strukturen

disserta Verlag

Büttner, Dustin: Elektronik aus dem Laserdrucker: Studie zur Nutzbarkeit der Elektrofotografie zum Druck leitfähiger Strukturen, Hamburg, disserta Verlag, 2015

Buch-ISBN: 978-3-95425-196-4
PDF-eBook-ISBN: 978-3-95425-197-1
Druck/Herstellung: disserta Verlag, Hamburg, 2015
Covermotiv: © Uladzimir Bakunovich – Fotolia.com

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und die Diplomica Verlag GmbH, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Alle Rechte vorbehalten

© disserta Verlag, Imprint der Diplomica Verlag GmbH
Hermannstal 119k, 22119 Hamburg
http://www.disserta-verlag.de, Hamburg 2015
Printed in Germany

Vorwort

Betrachtet man die Forschungsarbeiten im Bereich des funktionalen Drucks während des letzten Jahrzehnts, lässt sich erkennen, dass das Bedürfnis zur Ablösung der vorherrschenden Druckverfahren durch digitale groß ist. Inkjet schreitet in vielen Bereichen voran und hat bereits eine beachtliche Leistungsfähigkeit erreicht, insbesondere beim Druck von Elektronik. Umso verwunderlicher erscheint es, dass die Elektrofotografie, besser bekannt als Laserdruck, bei der Betrachtung alternativer Druckverfahren sehr stiefmütterlich behandelt wird. Dies ist durchaus beachtenswert wenn man bedenkt, wie groß der Anteil elektrofotografischer Drucker im Office-Bereich, aber auch im Hochleistungsbereich des grafischen Drucks etwa beim Druck von Zeitungen oder auch dieses Buches ist.

Betrachtet man den dahinterstehenden Prozess, ist dies allerdings bereits etwas weniger verwunderlich. Die Elektrofotografie ist ein komplexer Vorgang, der weltweit nur von einer Handvoll Firmen auf höchstem Niveau beherrscht wird. Der Einstiegswiderstand ist somit enorm und es stehen wesentlich praktikablere Ansätze zum funktionalen Druck zu Verfügung. Hinzu kommt beim Druck von leitfähigen Strukturen, dass die Physik des Prozesses im Widerspruch zur notwendigen Leitfähigkeit der zu verdruckenden Partikeln steht (wie im Laufe dieses Buches ebenfalls erklärt wird). Allerdings denke ich persönlich, dass dies noch nicht die ganze Wahrheit ist. Im Laufe meiner Forschungen stieß ich immer wieder an Punkte, an denen sich zeigte, dass auch die Psychologie eine entscheidende Rolle spielt. Verfahren wie Inkjet sind einfach „näher“ an bereits bestehenden Verfahren und die notwendigen Forschungen betrachten ähnliche Herausforderungen. Im Gegensatz dazu ist die Elektrofotografie ein völlig neuer Prozess, bei dem andere, unbekannte Sachverhalte eine Rolle spielen.

Es ist nachvollziehbar, dass dadurch die Hemmschwelle für einen Einstieg in die Technologie recht hoch ist, vor allem da ein höheres Risiko für den Erfolg der Forschungen besteht. Nichtsdestotrotz bietet die Elektrofotografie einige erhebliche Vorteile. Es ist ein trockenes Verfahren, so dass auf den oft problematischen Einsatz von Lösungsmitteln verzichtet werden kann und die generelle Leistungsfähigkeit der Elektrofotografie zeigt sich bereits bei grafischen Anwendungen. Ich hoffe, dass dieses Buch somit einen Beitrag leisten kann, die bestehenden Hürden zu überwinden, natürlich mit Schwerpunkt auf den physikalischen. Dadurch stünde eine nützliche Alternative im funktionellen Digitaldruck zur Verfügung.

Natürlich habe ich die präsentierten Erkenntnisse nicht gänzlich allein erreicht. Mein persönlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Krüger, Herrn Beat Zobrist, der CTG PrinTEC GmbH und meinen Kollegen an der Helmut-Schmidt-Universität, ohne dieses Buch nie entstanden wäre.

Berlin, im April 2013

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **7**

Inhaltsverzeichnis **9**

Abkürzungsverzeichnis **12**

Symbolverzeichnis **13**

1 Einleitung **15**
1.1 Thematische Hinführung 15
1.2 Zielsetzung und Struktur 16

2 Elektrofotografie und funktioneller Digitaldruck **19**
2.1 Grundlagen der Elektrofotografie 19
2.1.1 Laden des Fotoleiters 20
2.1.2 Belichtung 21
2.1.3 Entwicklung 22
2.1.4 Transfer 23
2.1.5 Fixierung 23
2.2 Tonerdesign und -charakterisierung 24
2.2.1 Komponenten / Inhaltsstoffe 25
2.2.2 Tonerherstellung 25
2.2.3 Triboelektrische Aufladung 26
2.2.4 Charakterisierung des Toners 29
2.3 Anwendungsfelder des funktionalen Digitaldruckes 31

3 Herstellung und Charakterisierung von Silbertoner **39**
3.1 Grundsätzliche Herausforderung und vorbereitende Studien 39
3.1.1 Anforderungsprofil und Problemstellung 39
3.1.2 Verwendete Silberpartikel 40
3.1.3 Tonerstudien 40
3.2 Modifizierter Herstellungsprozess 43
3.2.1 Dispergierung mit dem Dreiwalzenstuhl 43
3.2.2 Vertonerung 46
3.2.3 Beschreibung der Silbertoner 46
3.3 Prozessbegleitende Charakterisierung 50
3.3.1 Rasterelektronenmikroskop 50
3.3.2 Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Silberpasten 51

3.3.3 Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Silberpillen 56
3.4 Fazit 58

4 Evaluierung von Druckergebnissen 61
4.1 Bildanalyse 61
4.1.1 Visuelle Bewertung geometrischer Eigenschaften 61
4.1.2 Digitale Bildanalyse 61
4.2 Strukturanalyse mit dem Weißlichtinterferometer 63
4.3 Gravimetrische Messung 65
4.4 Flächenwiderstand 66
4.5 Fazit 67

5 Elektrofotografisch gedruckte Silberleiterbahnen 69
5.1 Beschreibung des Versuchsdruckers 69
5.1.1 Drucker in Konfiguration A 70
5.1.2 Drucker in Konfiguration B 71
5.2 Untersuchungen des Tonertransfers 73
5.2.1 Untersuchung des Transfers in Konfiguration A 73
5.2.2 Untersuchung transferrelevanter Eigenschaften von Grüntape 75
5.2.3 Untersuchung des Transfers in Konfiguration B 78
5.2.4 Einfluss der Druckparameter 81
5.2.5 Mehrfachdruck 85
5.2.6 Transferverbesserung durch Oberflächenbehandlung des Substrats 91
5.3 Verarbeitung/Sintern der Substrate 92
5.3.1 Postfiring 93
5.3.2 Cofiring 95
5.4 Druckergebnisse der entwickelten Silbertoner 97
5.4.1 Ergebnisse Toner C01 97
5.4.2 Ergebnisse Toner C02 98
5.4.3 Ergebnisse Toner C03 100
5.4.4 Ergebnisse Toner C04 103
5.4.5 Bewerteter Vergleich 105
5.5 Anwendungsbeispiele zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit 108
5.5.1 RFID-Antennen 108
5.5.2 Leistungsfähigkeit von Silberleiterbahnen 111
5.6 Fazit 114

6 Potenzialanalyse 117
6.1 Potenziale der industriellen Entwicklung 117
6.2 Technologische Potenziale 118
6.3 Anwendungspotenziale 120

7 Zusammenfassung und Ausblick 123

8 Literaturverzeichnis 127

9 Anhang 133

9.1 Sinterprofile 133

9.2 Veröffentlichungen des Verfassers 136

Abkürzungsverzeichnis

A/D		analog/digital
CAD	*charged area development*	Hellschreiben
CCA	*charge control agents*	Ladungssteuerstoffe
D/A		digital/analog
DAD	*discharged area development*	Dunkelschreiben
DEGBE		Diethylenglykoldibutylether
dpi	*dots per inch*	Bildpunkte pro Zoll
EP	*electrophotography*	Elektrofotografie
Gew.-%		Gewichtsprozent
HSU		Helmut-Schmidt-Universität
IfA		Institut für Automatisierungstechnik
LED	*light-emitting diode*	Leuchtdiode
LTCC	*low temperature cofired ceramics*	Niedertemperatur-Einbrand-Keramiken
OPC	*organic photoconductor*	Organischer Fotoleiter
PCB	*printed circuit board*	gedruckte Schaltung
REM		Rasterelektronenmikroskop
RFID	*radio-frequency identification*	Identifizierung anhand elektromagnetischer Wellen
SD	*standard deviation*	Standardabweichung
USB	*universal serial bus*	universeller serieller Bus
ZEAC		Zobrist Engineering and Consulting

Symbolverzeichnis

Griechische Formelzeichen

γ	Rate der triboelektrischen Ladung
Δ_{90}	Spanne, in der sich 90 % der Messwerte des q-Test befinden
ε	Permittivität
ε_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
ε_r	stoffspezifische Permittivität
Φ	elektrisches Potenzial

Lateinische Formelzeichen Großbuchstaben

A	Fläche
A'	charakteristische Konstante für elektrostatischen und physischen Eigenschaften des Entwicklergemisches
C	Kapazität
C	Tonerkonzentration im Entwicklergemisch
C_0	Konstanten für physische Eigenschaften des Entwicklergemisches
D_{50}	maximaler Durchmesser von 50 % der Partikel eines Pulvers
D_{90}	maximaler Durchmesser von 90 % der Partikel eines Pulvers
E	Elektrische Feldstärke
F	Kraft
L	Induktivität
R	elektrischer Widerstand
R	Reflexionsfaktor
R^2	Bestimmtheitsmaß (Statistik)
U	Spannung / Potenzial
U_C	Koronaspannung
Q	Ladung
Q	Gütefaktor

Lateinische Formelzeichen Kleinbuchstaben

b	Breite
d	Durchmesser/Abstand
d	Optische Dichte
f	Frequenz
l	Länge
m	Masse
n	Stichprobe (Anzahl der Messungen pro Messwert)
q	Ladung
t	Zeit

Indizes

P	Messung mit dem Modell einer Parallelschaltung
max	maximal
sq	Fläche

1 Einleitung

1.1 Thematische Hinführung

"[…], Universalrechner haben jede andere Vorrichtung in unserer Welt ersetzt. Es gibt keine Flugzeuge mehr, nur noch fliegende Computer. Es gibt keine Autos mehr, nur noch Computer in denen wir sitzen. Es gibt keine Hörgeräte mehr, nur noch Computer, die wir in unsere Ohren stecken. Es gibt keine 3D-Drucker mehr, nur noch Computer, die Peripheriegeräte ansteuern. Es gibt keine Radios mehr, nur noch Computer mit schnellen A/D- und D/A-Wandlern sowie Phased-Array-Antennen." [Doctorow 11]

Dieser vielzitierte Auszug aus dem Vortrag des kanadischen Autors Cory Doctorow auf dem *28. Chaos Communication Congress* des mittlerweile weltweit renommierten Chaos Computer Clubs, das zu Herausforderungen der IT-Sicherheit überleitet, verdeutlicht sehr anschaulich, welchen Stellenwert moderne Elektronik in unserer Gesellschaft eingenommen hat. Wo früher noch analoge Steuerungen vorherrschten, steuern und regeln heute meist zentral kontrollierte, moderne elektronische Schaltungen nahezu jegliches technische Gerät. Umso verwunderlicher ist es, dass bei der Herstellung dieser Schaltungen z. T. noch auf Produktionsmethoden aus der Mitte des letzten Jahrhunderts zurückgegriffen wird.

Die von Doctorow gewählten Beispiele der „Computer, in denen wir sitzen" sowie des „fliegenden Computers" zeugen vom hohen Anteil von Elektronik im Fahrzeug- und Flugzeugbau. Bei den dort herrschenden Bedingungen, die oft hohe mechanische sowie thermische Belastungen für die Bauteile bedeuten, werden elektronische Schaltungen oftmals in Form sog. Mikrohybride realisiert. Dabei handelt es sich um gedruckte elektronische Schaltungen auf einem Keramiksubstrat, die der Dickschichttechnologie zugeordnet werden können. Deren Definition in der DIN 41848 aus dem Jahre 1984 lautet: „Integrierte Schichtschaltungen, bei denen die Schichten vorzugsweise im Siebdruckverfahren auf keramische Träger aufgebracht und anschließend eingebrannt werden" [Reichl 88]. Auch neuere Lehrbücher lassen keinen Zweifel daran, dass der Siebdruck die vorherrschenden Produktionsmethode für Dickschichtschaltungen ist [Pitt 05]. Es erscheint wie ein Anachronismus, dass im digitalen Zeitalter, während der Digitaldruck voranschreitet, ausgerechnet elektronischen Schaltungen mit einem Sieb als Schablone gedruckt werden.

Dabei wurde in den letzten Jahren durchaus mit großem Aufwand versucht, digitale Drucktechniken als Ersatz oder Ergänzung des Siebdruckes zu etablieren. Hauptsächlich wurde dabei der Inkjet-Druck untersucht. Exemplarisch seien hier die im Bereich der Dickschichttechnik veröffentlichten Arbeiten zum Inkjet-Druckprozess [Cibis 09], zur Optimierung von Partikeltinten [Currle 10] oder zum Druck passiver elektronischer Dickschichtbauelemente [Waßmer 11] genannt; allerdings wird generell im Bereich der gedruckten Elektronik Inkjet als Produktionsmethode erforscht [Li 07], auch im Vergleich zu weiteren digitalen Methoden [Hon 08].

Dabei gewinnt man den Eindruck, dass der Inkjet-Druck, aus Sicht des Siebdruckes, dessen logische Weiterentwicklung ist. Der Entwicklung von in Pasten dispergierten, funktionellen Partikeln hin zu deren Dispergierung in Tinten erscheint als folgerichtiger Schritt, der hier nicht in Frage gestellt werden soll. Wesentlich interessanter ist die Fragestellung, warum die neben dem Tintenstrahldruck ebenfalls etablierte Elektrofotografie (EP – e*lectrophotography*)

nicht als Alternative zum Druck elektronischer Schaltung zur Verfügung steht. Unter dem umgangssprachlich bekannteren Namen „Laserdruck“ ist diese digitale Drucktechnologie weit verbreitet.

Die Technologie verspricht eine Vielzahl von Vorteilen, die unter anderem aus dem Office-Bereich bekannt sind, beispielsweise die hohen möglichen Auflösungen und die hohen Druckgeschwindigkeiten. Aber auch anwendungsspezifische Vorteile sind zu erkennen. So handelt es sich bei der EP um eine komplett trockene Technologie, die ohne Lösungsmittel auskommt. Es erscheint somit folgerichtig, auch diese Druckmethode auf ihre Eignung zum Druck von elektronischen Schaltungen hin zu untersuchen.

1.2 Zielsetzung und Struktur

Damit die Elektrofotografie als Methode zum Druck von Elektronik in Frage kommt, liegt eine wesentliche Herausforderung im Druck leitfähiger Strukturen. Leitfähige Partikel wie Silber oder Kupfer in einem elektrofotografischen Prozess stehen im Widerspruch zu dessen Funktionsprinzipien; aufgrund seiner physikalischen Prinzipien ist der Prozess grundsätzlich nur mit isolierenden Stoffen durchführbar. Im Rahmen der Dickschichttechnik liegt das Hauptaugenmerk auf den Layouts aus Silberleiterbahnen; Silber wird Kupfer dabei vorgezogen, da letzteres relativ schnell oxidiert.

Diese Studie untersucht, ob und wie mittels EP leitfähige Strukturen aus Silber auf keramischen Schaltungsträgern hergestellt werden können, welche Voraussetzungen dafür notwendig sind und wie der Prozess dazu modifiziert werden muss. Ausgehend von der Überprüfung der grundsätzlichen Machbarkeit gilt es, die Möglichkeiten und Fähigkeiten des Prozesses beim Druck von Leiterbahnen aufzuzeigen. Zielsetzung ist es, mit möglichst wenigen Druckvorgängen – idealerweise nur einem – vollständig leitfähige Strukturen aus Silber zu drucken, die in Form und Zustand den Anforderungen der Dickschichttechnik gerecht werden.

Dabei wird das Augenmerk auf typische Silberleiterbahnen für Mikrohybride gelegt. Hierbei kommen zwei Verfahren zur Anwendung: Im LTCC-Verfahren (*low temperature cofired ceramics*) werden weiche Grüntapes (Glaskeramikfolien) als Substrat genutzt, die im *Cofiring* zusammen mit den Silberbahnen gesintert werden. Alternativ wird auf bereits gebrannte, harte Keramiken aus Aluminiumoxid gedruckt, auf die die Leiterbahnen im sog. *Postfiring*-Verfahren aufgebracht werden.

Da bisher auf diesem Gebiet nur vereinzelte Vorleistungen existieren, ist eine grundlegende Betrachtung des gesamten relevanten Spektrums notwendig, um somit die notwendigen Ansatzpunkte für die Entwicklung der Technologie hin zu einem Fertigungsprozess zu liefern. Dabei ist zu überprüfen, inwieweit die Ergebnisse ausschließlich innerhalb der Dickschichttechnologie anwendbar sind, oder ob diese zumindest teilweise auf andere Anwendungsgebiete gedruckter Elektronik übertragbar sind.

Dazu wird in Kapitel 0 zunächst der elektrofotografische Prozess vorgestellt. Neben dessen grundlegender Funktionsweise wird ein Augenmerk auf die Tonerherstellung und dessen Charakterisierung gelegt, bevor der Stand der Technik auf dem Forschungsgebiet des funktionellen Digitaldrucks mittels EP zusammengefasst wird.

Das nachfolgende Kapitel 0 beschäftigt sich mit der Frage, was die Besonderheiten bei der Herstellung von Silbertoner sind. Nach einer grundlegenden Diskussion wird ein modifizierter Herstellungsprozess vorgestellt und die daraus resultierenden Silbertoner beschrieben. Möglichkeiten zur prozessbegleitenden Charakterisierung werden entwickelt und untersucht. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einem Fazit, das die wesentlichen Erkenntnisse zusammenfasst und bewertet.

Anschließend werden in Kapitel 0 Besonderheiten bei der Evaluierung von elektrofotografisch gedruckten Silberleiterbahnen aufgezeigt. Verschiedene Messmethoden werden vorgestellt und auf ihre Eignung untersucht.

Es folgt die Darstellung der erzielten Ergebnisse beim Druck von Silberleiterbahnen in Kapitel 5. Nach einer Beschreibung des Versuchsdruckers werden Untersuchungen zum Transfer des Toners auf das Substrat beschrieben. Dem schließt sich eine kurze Betrachtung des Sinterprozesses von Toner und Substrat an, bevor die Ergebnisse der einzelnen, entwickelten Versuchstoner gezeigt, verglichen und bewertet werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen in einige nachfolgend beschriebene Anwendungsbeispiele ein, die zur Beurteilung der Fähigkeiten des Prozesses dienen sollen. Ein abschließendes Fazit gibt die zahlreichen Erkenntnisse kurz wieder und bewertet diese.

Die insgesamt erarbeiteten Forschungsergebnisse bilden die Grundlage für eine Potenzialanalyse der Technologie in Kapitel 6. Ziel ist die Identifizierung und Bewertung der bereits jetzt erkennbaren Potenziale der Elektrofotografie; zudem werden wesentliche Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und Etablierung der Technologie aufgezeigt.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Erkenntnisse dieser Studie. Dabei werden die erzielten Ergebnisse im Kontext der o. a. Fragestellungen bewertet und der notwendige Bedarf für weitergehende Forschungen identifiziert.