

Reihe 9

Elektronik/Mikro
und Nanotechnik

Nr. 393

Dipl.-Ing. Markus Albert Kagerer,
Gräfelfing

Mikrofertigung und Mikromontage zur Herstellung eines indi- viduellen piezoelek- trisch betriebenen Mikrotropfenerzeugers

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 9

Elektronik/Mikro-
und Nanotechnik

Dipl.-Ing. Markus Albert Kagerer,
Gräfelfing

Nr. 393

Mikrofertigung und
Mikromontage zur
Herstellung eines indi-
viduellen piezoelek-
trisch betriebenen
Mikrotropfenerzeugers

VDI verlag

Kagerer, Markus Albert

Mikrofertigung und Mikromontage zur Herstellung eines individuellen piezoelektrisch betriebenen Mikrotropfenerzeugers

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 9 Nr. 393. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

142 Seiten, 85 Bilder, 3 Tabellen.

ISBN 978-3-18-339309-1, ISSN 0178-9422,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Für die Dokumentation: Drop-on-Demand – Druckkopf – Funktionsmodell – Lasermikrobearbeitung – Mikrofertigung – Mikrofluidik – Mikromontage – Mikrosystemtechnik – Rapid Manufacturing – Rapid Prototyping

In vorliegender Arbeit werden Methoden für die kostengünstige und schnelle Herstellung von Funktionsmodellen für die Mikrosystemtechnik entwickelt. Für die Mikrostrukturierung von Substraten werden sowohl für die Laserbearbeitung als auch für das Trennschleifen die notwendigen Fertigungsparameter abgeleitet. Die Montage von Funktionskomponenten wird über einen neu entwickelten Mikromontageplatz mit Klebstoffauftragswerkzeug realisiert. In weniger als 10 Stunden können mit den vorgestellten Verfahren fünf Funktionsmodelle eines Mikrotropfenerzeugers hergestellt werden.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9422

ISBN 978-3-18-339309-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit aus dem Bereich der Mikrosystemtechnik entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth, Ordinarius des Lehrstuhles für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik an der Technischen Universität München, für die intensive Betreuung, die wohlwollende Förderung und das mir entgegengebrachten Vertrauen. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth für die geistigen Freiräume und die gezielten Anregungen, welche entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinem Zweitprüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Schwesinger, Leiter des Fachgebietes Mikrostrukturierte Mechatronische Systeme an der Technischen Universität München, danke ich für die Betreuung dieser Arbeit als Zweitgutachter und vor allem dafür, dass er mich mit seinen Lehrveranstaltungen schon als Student für die Mikrosystemtechnik begeisterte.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhles für Umformtechnik und Gießereiwesen an der Technischen Universität München, bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes.

Danken möchte ich zudem der Bayerischen Forschungsstiftung, deren Fördermittel die finanzielle Basis für die vorliegenden Forschungstätigkeiten geschaffen haben.

Meinen Kollegen danke ich für das sehr angenehme Arbeitsklima, für die vielen zielführenden Diskussionen und vor allem für das kollegiale Arbeitsklima am Lehrstuhl. Hierbei möchte ich mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Franz Irlinger, Herrn Dr.-Ing. Thomas Otnad und dem gesamten Werkstattteam unter der Leitung von Herrn Gerhard Ribnitzky bedanken.

Besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle auch den vielen Studenten aussprechen, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten oder auch ihrer HiWi-Tätigkeiten entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Spezielle Dankesworte richte ich hierbei an Herrn Dipl.-Ing. Dominik Rumschöttel, Herrn M. Sc. Arne Meeuw und Herrn Dipl.-Ing. Kenji Lars Eiler. Vor allem freut es mich sehr, dass Herr Ing.-Dominik Rumschöttel nach seinem Studium den Weg in die Gruppe Mikrotechnik am Lehrstuhl gefunden hat.

Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Peter Werndl, Oberlandesgerichtspräsident a. D., Herrn Dipl.-Ing. Dominik Rumschöttel, Herrn M. Sc. Markus Menacher und Frau Volljuristin Monika Werndl für die Durchsicht der Arbeit bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen engen Freunden, die mir im Laufe der Jahre den notwendigen Rückhalt gegeben haben, um vorliegende Arbeit anzufertigen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Lebensgefährtin Volljuristin Monika Werndl für ihre moralische Unterstützung und ihren liebevollen und ununterbrochenen Beistand für die Fertigstellung der Dissertation danken.

Gräfelfing, im August 2015

Markus Kagerer

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
Kurzfassung	X
1. Problemstellung	1
1.1 Einführung – Mikrosystemtechnik.....	1
1.2 Anwendungsbeispiel aus der Mikrosystemtechnik – Mikrotropfenerzeugung.....	2
1.2.1 Tropfendosierung mit Drop-on-Demand Techniken.....	2
1.2.2 Unterteilung piezoelektrisch betriebener Mikrotropfenerzeuger.....	3
1.2.3 Einsatz piezoelektrisch betriebener Mikrotropfenerzeuger.....	5
1.3 Problembeschreibung / Anwendung – Fertigung von Mikrosystemen.....	7
2. Stand der Technik	9
2.1 Mikrostrukturierung von Substraten.....	9
2.1.1 Prozessablaufplan für die Mikrostrukturierung von Substraten.....	10
2.1.2 Basisprozesse für die Mikrostrukturierung von Substraten.....	12
2.1.3 Reinheit in der Mikrostrukturierung von Substraten.....	15
2.2 Mikromontage in der Mikrosystemtechnik.....	17
2.2.1 Mikromontage im Vergleich zu standardisierten Montagetechniken.....	17
2.2.2 Prozessablauf in der Mikromontage.....	19
2.2.3 Gerätschaften für die Mikromontage.....	19
2.2.4 Klebstoffauftragsverfahren in Mikromontageanlagen.....	23
2.3 Zusammenfassende Betrachtung des Stands der Technik.....	25
3. Kritik am Stand der Technik	26
4. Aufgabenstellung	28
5. Erwartete Vorteile	29
6. Abgrenzung	30
7. Eigener Ansatz	31
7.1 Mikrostrukturierung von Substraten.....	31
7.1.1 Werkzeuge für die Strukturierung von Substraten.....	31
7.1.2 Grundlagen der Laserstrahlmaterialbearbeitung.....	33
7.1.3 Gaußsche Strahlenoptik.....	35
7.1.4 Laserstrahlquellen unabhängige Parameter für die Materialbearbeitung ..	37
7.1.5 Fertigung senkrechter Kanäle mithilfe des Trennschleifens.....	40
7.2 Mikromontage von Bauteilen.....	44
7.2.1 Aufbau des Mikromontageplatzes.....	44
7.2.2 Ausrichten und Absetzen von zwei Bauteilen.....	47
7.2.3 Definierter Klebstoffauftrag auf planare Bauteile.....	51
7.2.4 Lösungsprozess für die Fügung zweier Bauteile.....	53
7.3 Zusammenfassende Betrachtung des eigenen Ansatzes.....	55
8. Unterscheidungsmerkmale zum Stand der Technik	56

9. Realisierung.....	57
9.1 Werkzeuge für die Strukturierung von Substraten.....	57
9.1.1 Laserstrahlmaterialbearbeitung mit Nanosekunden Laserstrahlquellen	57
9.1.2 Fertigung senkrechter Kanäle mit einer Wafersäge.....	59
9.2 Mikromontageplatz zur Fügung zweier Bauteile.....	63
9.2.1 Gestell des Mikromontageplatzes.....	63
9.2.2 Montageplattform am Mikromontageplatz.....	64
9.2.3 Greif- / Absetzwerkzeug am Mikromontageplatz.....	67
9.2.4 Klebstoffauftragswerkzeug am Mikromontageplatz.....	69
9.2.5 Gesamtaufbau des Mikromontageplatzes.....	71
9.2.6 Anwendung des Mikromontageplatzes.....	72
9.3 Zusammenfassende Betrachtung der Realisierung.....	75
10. Experimente zur Mikrostrukturierung und zur Mikromontage.....	76
10.1 Experiment 1: Laserstrahlschneiden in Silizium.....	76
10.2 Experiment 2: Ebener Laserstrahlmaterialabtrag in Silizium.....	80
10.3 Experiment 3: Fertigung senkrechter Kanäle mithilfe des Trennschleifens.....	84
10.4 Experiment 4: Positionierung zweier Bauteile mit dem Mikromontageplatz.....	86
10.5 Experiment 5: Klebstoffauftrag mit dem Mikromontageplatz.....	89
11. Bedeutung der Ergebnisse.....	92
11.1 Beschreibung eines planaren piezoelektrischen Mikrotropfenerzeugers.....	92
11.1.1 Aufbau des Mikrotropfenerzeugers.....	92
11.1.2 Funktionsweise des Mikrotropfenerzeugers.....	94
11.2 Herstellung individueller Funktionsmodelle des Mikrotropfenerzeugers.....	95
11.2.1 Prozessflow zur Herstellung der Mikrotropfenerzeuger.....	95
11.2.2 Schritt 1: Mikrostrukturierung mittels Laserstrahlung.....	96
11.2.3 Schritt 2: Mikrostrukturierung mittels Trennschleifen.....	96
11.2.4 Schritt 3: Verbindung von Membran und Substrat.....	97
11.2.5 Schritt 4: Mikromontage von piezoelektrischer Keramik und Membran ..	97
11.2.6 Schritt 5: Strukturierung der Elektroden mittels Trennschleifen.....	98
11.2.7 Schritt 6: Vereinzelung mittels Trennschleifen.....	98
11.2.8 Bewertung und Gegenüberstellung des Prozesses.....	99
11.3 Inbetriebnahme der Mikrotropfenerzeuger.....	105
11.3.1 Oberflächenmodifikation der Düsenplatte.....	106
11.3.2 Montage der Druckchips auf eine Platine.....	108
11.3.3 Aufnahmevorrichtung für platinenbasierte Druckchips.....	109
11.3.4 Kontrolle von Düsenfunktionalität und Hub des bimorphen Aufbaus	111
11.4 Fluidmechanisches Dosierexperiment / -beispiel.....	114
12. Zusammenfassung und Ausblick.....	119
13. Literaturverzeichnis.....	122

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
a	Beschleunigung des Werkstückes in Bewegungsrichtung	[m/s ²]
A	Fläche des Druckunterschiedes	[m ²]
Ani	Grad der Anisotropie	[-]
a _{oben}	Abstand Positionierung obere Ecke	[m]
a _{unten}	Abstand Positionierung untere Ecke	[m]
b	Geforderte Kanalbreite	[m]
b _{Sub}	Breite des Testsubstrates	[m]
d	Sägeblattbreite	[m]
D	Durchmesser des Laserstrahles auf der Fokussieroptik	[m]
d _{Austritt}	Durchmesser an der Laserstrahlaustrittsseite	[m]
d _{Eintritt}	Durchmesser an der Laserstrahleintrittsseite	[m]
d _{Haupt}	Durchmesser des Haupttropfens	[m]
d _{Satellit}	Durchmesser des Satellitentropfens	[m]
d _{Shape}	Dimension / Durchmesser der Schneidform	[m]
d _{Soll}	Sollmaß / Durchmesser nach Laserprozess	[m]
d _w	Bearbeitungsdurchmesser	[m]
E _{Kin}	Energie für Tropfenflug	[J]
E _{Oberf}	Energie für Tropfenformung	[J]
E _{Visk}	Energie für Überwindung der Reibung im Düsenkanal	[J]
f	Brennweite der Fokussieroptik	[m]
F _{Ober}	Fläche auf der Oberseite des Ablationsgebietes	[m ²]
F _{Boden}	Fläche auf dem Boden des Ablationsgebietes	[m ²]
F _A	Abreißkraft	[N]
F _H	Haltekraft	[N]
F _S	Ansaugkraft	[N]
f _{Puls}	Pulsfrequenz	[Hz]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
I(r,z)	Örtliche Intensitätsverteilung des Laserstrahles	[W/m ²]
I ₀ (0)	Maximale Intensität (r=0; z=0)	[W/m ²]
I ₀ (z)	Maximale Intensität auf der Strahlachse (r=0)	[W/m ²]

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
l	Länge des Pleuels	[m]
$l_{\text{Düse}}$	Länge der Düse	[m]
m	Masse des Werkstückes	[kg]
M^2	Beugungsmaßzahl	[-]
n	Anzahl	[-]
P_{Mittel}	Mittlere Laserleistung im Pulsbetrieb	[W]
P_{Puls}	Laserpulsspitzenleistung	[W]
$P_{\text{Ü}}$	Pulsüberlapp	[%]
r_{Kurb}	Kurbelradius	[m]
R_a	Mittlere Rauheit	[m]
R_{Lat}	Laterale Ätzrate	[m/s]
r_{Tropf}	Radius des ausgestoßenen Tropfens	[m]
R_{Ver}	Vertikale Ätzrate	[m/s]
r_{Wobbel}	Wobbelradius	[m]
R_z	Gemittelte Rauhtiefe	[m]
S	Sicherheitsfaktor	[-]
$S_{\text{Ü}}$	Spurüberlapp	[%]
T	Waferdicke	[m]
T_{abt}	Abladierte Tiefe nach dem Laserprozess	[m]
t_{Puls}	Pulsperiodendauer	[s]
V_{abt}	Abladiertes Volumen nach dem Laserprozess	[m ³]
$v_{\text{Düse}}$	Fluidgeschwindigkeit in der Düse	[m/s]
V_{Fluid}	Ausgestoßenes Fluidvolumen	[m ³]
v_s	Vorschubgeschwindigkeit des Laserspots	[m/s]
v_{Tropf}	Tropfenfluggeschwindigkeit	[m/s]
$w(z)$	Strahlradius als Funktion der Entfernung z von Fokus	[m]
w_0	Fokusradius	[m]
x_{Kolb}	Kolbenweg	[m]
Z_R	Rayleigh Länge	[m]
α	Flankenwinkel	[°]
β	Stangenwinkel	[°]
γ	Winkelversatz	[°]
Δp	Druckdifferenz (Umgebungsdruck / Unterdruck)	[Pa]
Δv	Versatz der Sägeschnitte	[m]

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
Δy	Linienabstand	[m]
η	Viskosität der Flüssigkeit	[Pa · s]
θ_{Kont}	Kontaktwinkel	[°]
θ_{Kurb}	Kurbelwinkel	[°]
θ_{Real}	Realer Divergenzwinkel	[°]
λ	Wellenlänge	[m]
λ_{Schub}	Schubstangenverhältnis	[-]
ρ	Dichte der Flüssigkeit	[kg/m ³]
σ	Oberflächenspannung der Flüssigkeit	[N/m]
τ_{Puls}	Pulsdauer	[s]

Kurzfassung

Mikrosysteme sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie sorgen dafür, dass Ärzte während Operationen unterstützt werden, Autos sicherer und energiesparender fahren oder auch Fotos zuhause gedruckt werden können. Die Systeme besitzen kleine Massen, ermöglichen schnelle Reaktionen und erlauben den Zusammenschluss unterschiedlicher Funktionen platzsparend in einem dreidimensionalen Aufbau meist mit hybrider Architektur. Für ihre Fertigung werden Verfahren sowohl für die Mikrostrukturierung von Substraten als auch für die Mikromontage von Funktionskomponenten bzw. -werkstoffen eingesetzt, welche aus der Mikroelektronik hervorgehen. Diese zeichnen sich vor allem durch ihre kostengünstige Fertigung von hohen Stückzahlen eines identischen Produktes aus. Die konstant steigende Komplexität von Mikrosystemen erfordert jedoch bereits in frühen Phasen ihrer Entwicklung eine Funktionsprüfung an realen und individuellen Funktionsmodellen.

Die vorliegende Arbeit löst dabei die Aufgabe der kostengünstigen Herstellung von individuellen Funktionsmodellen für die Mikrosystemtechnik in geringen Stückzahlen und gleichzeitig auch in kurzer Zeit, indem an diese Randbedingungen angepasste Fertigungstechniken entwickelt, optimiert und eingesetzt werden.

Für die Mikrostrukturierung von Substraten werden vorliegend sowohl die Laserstrahlmaterialbearbeitung als auch das Trennschleifen mit einer Wafersäge eingesetzt. Die Laserstrahlmaterialbearbeitung zeichnet sich dadurch aus, dass es nahezu keine Einschränkung in der Formenvielfalt gibt und dass vor allem keine aufwendige und teure Photolithographie für die Strukturübertragung gefordert ist. Im Rahmen dieser Arbeit ist hierzu das Zusammenspiel der grundlegenden Bearbeitungsparameter Fokusposition, Vorschubgeschwindigkeit und auch Linienabstand sowohl auf das Laserstrahlschneiden als auch auf den ebenweisen Laserstrahlmaterialabtrag aufgezeigt. Diese Parameter sind nicht von der Laserstrahlquelle abhängig, so dass die aufgezeigten Zusammenhänge auf jedes Lasersystem übertragen werden können. Für die Erstellung von senkrechten Kanälen mit geringer Rauheit an den Seitenwänden für die Mikrofluidik wird vorliegend das Trennschleifen mit einer Wafersäge eingesetzt. Für die notwendige Fügung von zwei Bauteilen über eine Klebschicht ist ein Mikromontageplatz erstellt, mit dem sowohl Klebschichten auf Substraten als auch Relativpositionierungen von zwei Bauteilen durchgeführt werden können.

Die untersuchten Fertigungsverfahren werden erfolgreich bei der Herstellung von piezoelektrisch betriebenen Mikrotropfenerzeugern als Anwendungsbeispiel eingesetzt. Es werden insgesamt fünf identische Mikrotropfenerzeuger gleichzeitig in einem Batchverfahren gefertigt, so dass eine ausreichend hohe Anzahl an Funktionsmodellen in der Produktentstehung für die Eigenschaftsbewertung vorliegt. Diese werden in weniger als 10 Stunden gefertigt.

Zusammenfassend gilt, dass durch die vorliegende Arbeit individuelle Funktionsmodelle eines Mikrosystems in geringen Stückzahlen und gleichzeitig in kurzer Zeit fertigbar sind. Es steht ein kostengünstiger Fertigungsprozess mit einer angepassten Genauigkeit zur Verfügung. Es kann in frühen Phasen der Produktentstehung eines Mikrosystems auf notwendige Änderungen mit einem Redesign reagiert werden.